

На правах рукописи



Крысько Александра Анатольевна

**ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТОНКОСТЕННЫХ
ОБОЛОЧЕК ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЁТОМ
НЕСОВЕРШЕНСТВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

05.01.01 – инженерная геометрия и компьютерная графика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2016

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мущанов Владимир Филиппович,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры», проректор по
научной работе, заведующий кафедрой
теоретической и прикладной механики;

кандидат технических наук, доцент
Конопацкий Евгений Викторович,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры», доцент кафедры
специализированных информационных
технологий и систем.

Официальные оппоненты: **Зверев Виталий Валентинович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет», заведующий
кафедрой металлических конструкций;
Карабчевский Виталий Владиславович,
кандидат технических наук, доцент,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», заведующий
кафедрой компьютерного моделирования и
дизайна.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет».

Защита состоится «23» декабря 2016 г. в 10⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д01.006.02 ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры» по адресу: 86123, г. Макеевка,
ул. Державина, 2, 1-й учебный корпус, зал заседаний ученого совета.
Тел. факс: +38(0623) 22-77-19, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбас-
ская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 86123,
г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://www.donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 01.006.02


Назим Ярослав Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования, посвящённые влиянию несовершенств геометрической формы на напряженно-деформированное состояние тонкостенных оболочек инженерных сооружений, являются одной из актуальных, сложных и до конца нерешенных научных проблем.

Отдельным видом таких оболочек являются стальные тонкостенные оболочки вращения, которые нашли самое разнообразное применение в инженерной практике: газгольдеры для хранения и распределения газов; бункеры и силосы для хранения и перегрузки сыпучих материалов; трубопроводы больших диаметров; дымовые и вентиляционные трубы, водонапорные башни, градирни; специальные конструкции металлургической, химической и других отраслей промышленности; различные баки и контейнеры для транспортировки жидких и газообразных веществ, в том числе вагоны-цистерны. Также к таким сооружениям относятся стальные вертикальные цилиндрические резервуары (ВЦР) для хранения нефти и нефтепродуктов.

Имеющиеся случаи разрушения приведенных выше инженерных сооружений привели к необходимости периодического мониторинга их состояния в течение всего периода эксплуатации.

Основным конструктивным элементом вертикального цилиндрического резервуара для хранения нефти и нефтепродуктов является цилиндрическая стенка. Она представляет собой тонкостенную оболочку, на которую воздействуют объективные и субъективные факторы, изменяя её первоначальную геометрическую форму. К объективным факторам можно отнести целый комплекс нагрузок: собственный вес конструкций, гидростатическое давление жидкости в резервуаре, вакуум, ветровая и снеговая нагрузки. К субъективным факторам относятся погрешности связанные с изготовлением, транспортировкой и монтажом стенки резервуара. Также к субъективным факторам можно отнести нарушение условий эксплуатации резервуара.

Для учета несовершенств геометрической формы при расчетах на прочность и устойчивость стенки тонкостенных оболочек инженерных сооружений необходимо аналитическое описание ее действительной поверхности. Но существующие методы определения действительной геометрической формы тонкостенной оболочки не рассматривают её в целом, как единую конструкцию, а учитывают лишь определенный класс несовершенств геометрической формы. Такой подход не даёт возможности оценить влияние того или иного несовершенства на всю конструкцию в целом, а следовательно и предложения по необходимости устранения таких несовершенств не всегда являются оптимальными и экономически обоснованными.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о необходимости разработки новых эффективных геометрических моделей на основе дуг кривых 2-го и 3-го порядков, представленных в БН-исчислении (точечное исчисление Балюбы-Найдыша), а также новых способов их формализации и создания программных продуктов, которые их реализуют, что является актуальной научной задачей, которая открывает новые возможности для выполнения рас-

четов тонкостенных оболочек инженерных сооружений на прочность и устойчивость, а также для прогнозирования влияния развития несовершенств геометрической формы на прочность и устойчивость такой оболочки.

Степень разработанности темы исследования. Как показывает проведенный нами анализ литературных источников большинство научных исследований по данному вопросу можно классифицировать на два типа:

1. Исследования несовершенств геометрической формы тонкостенных оболочек, выполненные специалистами из областей науки смежных с прикладной геометрией, таких как: строительная механика (Иванов В.Н., Ризван Мухаммад, Бурлаков А.В., Вольмир А.С., Пелех Б.Л., Бен Хелал Монсеф Бен Мулди); строительные конструкции, здания и сооружения (Лессинг Е.Н., Писанко Н.М., Егоров Е.А., Перельмутер А.В., Муцанов В.Ф., Сливкер В.И., Сафарян М.К., Ращепкина С.А., Федоряка Ю.В., Феодосьев В.И., Ежи Зюлко); строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ (Тюрин Д.В.); динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (Алифанов Л.А.) и т.п.

2. Исследования ученых по прикладной геометрии в области оболочек конструкций не связанные с несовершенствами геометрической формы: Балюбы И.Г., Верещаги В.М., Михайленко В.Е., Найдыша А.В., Найдыша В.М., Обуховой В.С., Павлова А.В., Подгорного А.Л., Рыжова Н.Н., Скидана И.А. и их учеников.

Теоретической базой для создания универсальной геометрической и компьютерной модели поверхности резервуара с учётом несовершенств геометрической формы стали работы ведущих ученых Мелитопольской школы прикладной геометрии и их учеников: Балюбы И.Г., Бездитного А.А., Верещаги В.М., Горягина Б.Ф., Давыденко И.П., Конопацкого Е.В., Кучеренко В.В., Малютиной Т.П., Найдыша А.В., Найдыша В.М., Полищука В.И. и др.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Исследования по теме диссертации выполнены в рамках научно-исследовательских работ Донбасской национальной академии строительства и архитектуры К-2-07-11 «Совершенствование аналитических и численных методов расчета строительных конструкций, их элементов и соединений на действие статических и динамических нагрузок с учетом влияния срока службы и факторов эксплуатационного износа» (номер государственной регистрации 0111U008169); Д-2-02-06 «Исследование оптимальных конструктивных форм комбинированных большепролетных покрытий зданий и сооружений» (номер государственной регистрации 0106U002950); К-2-09-11 «Создание графического и вычислительного аппарата для моделирования топографических линий и поверхностей и их взаимного положения в рамках специализации «Землеустройство» (номер государственной регистрации 0111U0081760).

Целью исследования является разработка комплексного подхода к компьютерному моделированию и численному исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учётом несовершенств геометрической формы на примере

стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов.

Задачи исследования:

- усовершенствовать существующие и разработать новые способы аналитического определения дуг обвода в БН-исчислении, а также способы моделирования выпуклых обводов первого порядка гладкости;
- разработать комплексный подход по обработке геометрической информации при обследовании и оценке технического состояния ВЦР, которая является исходной для универсального компьютерного алгоритма моделирования поверхности резервуара с учётом несовершенств геометрической формы;
- разработать универсальную геометрическую и компьютерную модель незакономерной поверхности стенки резервуара с учётом характерных несовершенств геометрической формы;
- исследовать раздельное и совместное влияние общих и местных несовершенств геометрической формы на НДС резервуара для хранения нефтепродуктов в линейной и нелинейной постановках;
- внедрить результаты исследований в практику геометрического и компьютерного моделирования незакономерных поверхностей для оценки технического состояния ВЦР для хранения нефтепродуктов с учётом несовершенств геометрической формы, а также в учебный процесс Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Объект исследования – тонкостенные оболочки инженерных сооружений с несовершенствами геометрической формы.

Предмет исследования – влияние несовершенств геометрической формы на напряженно-деформированное состояние стальных тонкостенных оболочек инженерных сооружений.

Научная новизна полученных результатов:

- усовершенствованы существующие и разработаны новые способы аналитического определения дуг обвода в БН-исчислении, а также способы моделирования выпуклых обводов первого порядка гладкости;
- разработан в БН-исчислении способ конструирования геометрических объектов незакономерной формы, в основу которого положен метод подвижного симплекса;
- впервые получен универсальный геометрический и компьютерный алгоритм моделирования действительной поверхности стенки резервуара с учётом как общих, так и местных несовершенств геометрической формы;
- впервые исследовано совместное влияние общих и местных несовершенств геометрической формы на НДС резервуара для хранения нефтепродуктов в линейной и нелинейной постановках;
- впервые предложен комплексный подход к численному моделированию и анализу влияния несовершенств геометрической формы на НДС стального ВЦР, начиная с момента сбора геометрической информации с помощью традиционных и инновационных измерительных приборов и адаптации исходных данных, необходимых для построения компьютерной модели ВЦР, и заканчивая, непосредственно, численным расчётом на прочность и устойчи-

вость, а также анализом полученных результатов исследований, результатом реализации которого является инженерная методика численного исследования НДС стального ВЦР находящегося в эксплуатации.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке методики оценки технического состояния вертикального цилиндрического резервуара с геометрическими несовершенствами, которая позволяет на основании геометрических обмеров с помощью средств компьютерного моделирования оценить техническое состояние резервуара для хранения нефтепродуктов с учётом несовершенств геометрической формы, спрогнозировать поведение стенки резервуара при дальнейшем развитии несовершенств и обосновать необходимость проведения работ по ликвидации влияния данных несовершенств геометрической формы. Также предложенный способ моделирования незакономерных поверхностей с последующим численным расчётом может быть успешно использован для исследования НДС любых тонкостенных оболочек инженерных сооружений, не зависимо от сложности их формы.

Результаты исследований внедрены в практику проектирования и определения технического состояния тонкостенных оболочек инженерных сооружений на ПАО «АЗМК» и в Донецком экспертно-техническом центре Государственного Комитета Гортехнадзора ДНР, а также в учебный процесс Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Методы исследования. Поставленные в работе задачи геометрического моделирования незакономерных поверхностей решаются на основе математического аппарата моделирования геометрических объектов – БН-исчисления. Также используются методы начертательной, аналитической и аффинной геометрии; компьютерные методы расчета и изображения геометрических форм с помощью программного пакета *Maple* и системы автоматизированного проектирования *AutoCAD*. Численные исследования НДС резервуара под действием статических нагрузок были проведены в вычислительном комплексе *SCAD Office*, в основу которого положен метод конечных элементов.

На защиту выносятся:

- способ геометрического и компьютерного моделирования незакономерных поверхностей оболочек технических форм на основе выпуклых обводов первого порядка гладкости;
- универсальный геометрический и компьютерный алгоритм моделирования действительной поверхности стенки резервуара с учётом всех несовершенств геометрической формы;
- результаты исследования совместного влияния общих и местных несовершенств геометрической формы на НДС резервуара для хранения нефтепродуктов в линейной и нелинейной постановках;
- комплексный подход к численному моделированию и анализу влияния несовершенств геометрической формы на НДС стального ВЦР.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается практическим внедрением, построенными с помощью программного пакета *Maple* и

системы автоматизированного проектирования *AutoCAD* изображениями результатов исследований, а также использованием современных вычислительных комплексов численного анализа и сопоставления результатов численных исследований с экспериментальными и теоретическими данными, полученными другими исследователями.

Личный вклад соискателя заключается в реализации, поставленных руководителями, задач данного исследования; формулировке и разработке основных положений, определяющих научную новизну и практическую ценность работы; в создании расчетных моделей и анализе результатов, а также в сборе и обработке необходимой статистической информации.

В статьях, опубликованных в соавторстве, вклад соавторов ограничивался постановкой задач и контролем достоверности полученных результатов. Проведение исследований, получение аналитических и компьютерно-графических результатов осуществлено лично автором диссертации.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на XXXVIII Всеукраинской студенческой научно-технической конференции «Научно-технические достижения – строительно-архитектурной отрасли Украины» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка, 2012 г.); на XVI международной научно-практической конференции «Современные проблемы геометрического моделирования» (г. Мелитополь, 2014 гг.); на X Крымской международной научно-практической конференции «Геометрическое и компьютерное моделирование: энергоснабжение, экология, дизайн» (г. Симферополь, 2013 гг.); на I международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Прикладная геометрия, дизайн и инновационная деятельность» (г. Киев, 2012 г.); на II международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Прикладная геометрия, дизайн и объекты интеллектуальной собственности» (г. Киев, 2013 г.); на XIII-XIV международной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (г. Москва, 2013 г.); на XIII Международной конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Здания и конструкции с применением новых материалов и технологий» (г. Макеевка, 2014 г.); на III Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы механики в современном строительстве» (г. Пенза, 2014); на XV Международной конференции по математическому моделированию, посвящённая 160-летию со дня рождения Анри Пуанкаре (г. Херсон, 2014 г.); на Всеукраинской научно-методической конференции «Исследование возможностей использования инновационных технологий в научной работе по прикладной геометрии в учебном процессе кафедр вузов, которые занимаются графической подготовкой студентов» (г. Луцк, 2015 г.); на конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Научно-технические достижения студентов, аспирантов, молодых ученых строительно-архитектурной отрасли» (г. Макеевка, 2016 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 17 работ, в том числе 7 из них опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденный МОН Украины; 2 – в журналах или сборниках, включенных в международные наукометрические базы; 5 – в изданиях, выходящих по материалам научных конференций. Общий объем публикаций 7,2 п.л., из которых 4,13 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованной литературы из 153 наименований. Работа содержит 193 страницы текста, в том числе 142 страниц основного текста, 37 рисунков и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований. Показана научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В первом разделе выполнен анализ несовершенств геометрической формы резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов и причин их возникновения. Так основным конструктивным элементом вертикального цилиндрического резервуара для хранения нефти и нефтепродуктов является цилиндрическая стенка, которая представляет собой тонкостенную оболочку, подвергающуюся воздействию различных факторов, изменяющих её первоначальную геометрическую форму. К объективным факторам можно отнести целый комплекс нагрузок, к которым относятся: собственный вес конструкций, гидростатическое давление жидкости в резервуара, вакуум, ветровая и снеговая нагрузки. К субъективным факторам относятся погрешности связанные с изготовлением, транспортировкой, монтажом стенки резервуара, а также нарушение условий эксплуатации резервуара.

Характерными геометрическими несовершенствами стенки стальных резервуаров являются:

- отклонениям цилиндрической стенки резервуара от вертикальной прямолинейной образующей;
- локальные выпучины или вмятины различной формы и расположения;
- выпучивание поясов между сварными швами.

Эти же несовершенства геометрической формы характерны и для других тонкостенных оболочек инженерных конструкций. Для учета несовершенств геометрической формы при расчете на прочность и устойчивость стенки такой оболочки необходимо аналитическое описание её действительной поверхности.

Как показывает проведенный нами анализ литературных источников, вопросами несовершенств геометрической формы действительных поверхностей тонкостенных оболочек занимались не профессиональные геометры, а специалисты из тех областей науки, в которых возникали проблемы исследо-

вания несовершенств геометрической формы и их влияния на те, или иные инженерные сооружения. В связи с этим, при математическом моделировании действительной поверхности оболочки использовались не специализированные инструменты прикладной геометрии, а общеизвестные методы. Например, в работах Егорова Е.А. для описания общих и локальных несовершенств геометрической формы действительной поверхности резервуаров для хранения нефтепродуктов предлагается использование рядов Фурье. Такой подход не даёт возможности состыковать дуги кривых полученных на основе рядов Фурье, а следовательно и поверхностей построенных на их основе, по первому порядку гладкости, что может привести к появлению новых незапланированных несовершенств геометрии.

Для геометрического моделирования конструкций тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учётом несовершенств геометрической формы в данной работе используется математический аппарат БН-исчисление, который позволяет получить аналитические зависимости, описывающие действительную поверхность тонкостенных оболочек инженерных сооружений. Такой подход позволяет не только аналитически описать действительную поверхность оболочки на основе дискретного массива точек, полученного любым способом, в том числе и с помощью наземного лазерного сканера (НЛС), и исследовать её под действием различных нагрузок, но и моделировать с помощью ЭВМ изменение действительной поверхности оболочки при проведении предполагаемых мер по ликвидации несовершенств геометрической формы, что позволяет эффективно оценить и обосновать с помощью компьютерного моделирования необходимость проведения работ по ликвидации несовершенств геометрической формы.

Также в первом разделе проведен анализ допусков величин геометрических несовершенств эксплуатируемых резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Установлено, что согласно РД 08-95-95 отклонения от вертикали образующих стенки резервуаров, сданных в эксплуатацию, а также находящихся в эксплуатации не более 5 лет, не должны превышать предельных значений, приведенных данным нормативном документе.

Второй раздел посвящён разработке геометрических и компьютерных алгоритмов моделирования поверхностей тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учетом несовершенств геометрической формы и состоит, в свою очередь, из двух частей. В первой части исследованы способы определения дуг обвода кривых второго и третьего порядков в БН-исчислении.

Также во втором разделе исследованы 10 алгоритмов моделирования выпуклых обводов первого порядка гладкости через k наперед заданных точек, которые дают возможность сконструировать незакономерную поверхность любой степени сложности обводами первого порядка гладкости.

На основе полученных в работе алгоритмов конструирования обводов разработан универсальный вычислительный алгоритм моделирования действительной поверхности стального ВЦР для хранения нефтепродуктов с учётом несовершенств геометрической формы, который приводится ниже.

Для определения точек на поверхности резервуара (рис. 1) принимаем

следующие обозначения точек: $A_{i,j}$, где i – порядковый номер опорного контура, изменяющийся от 1 до m ; j – порядковый номер точки на опорном контуре, изменяющийся от 1 до n . Для упрощения расчетов принимаем количество точек в каждом поясе одинаковым, причем точки будем располагать равномерно.

Для координации точек на поверхности резервуара необходимо ввести систему координат. Идеализированной поверхностью стенки резервуара является круговой цилиндр. Примем декартовую систему координат с началом в точке O (рис. 1). Тогда оси x и y будут совпадать с осями окружности (рис. 2), а за ось z примем прямую OO_i (рис. 1).

Далее сформируем вычислительный алгоритм формирования геометрической модели стального ВЦР с учётом несовершенств геометрической формы методами БН-исчисления.

1. Для начала необходимо получить исходные данные для геометрического моделирования, которыми являются координаты точек на поверхности резервуара, с помощью данных, полученных в результате обследования резервуара (высота резервуара, его радиус и отклонения от вертикальной стенки).

1.1. Вводим: высоту резервуара h , радиус резервуара R , количество поясов k , количество точек в каждом поясе n и массив отклонений стенки от вертикальной образующей $\delta_{i,j}$.

1.2. Определяем количество опорных контуров по формуле: $m = k + 1$, где k – количество поясов.

1.3. Координаты $x_{A_{i,j}}$ и $y_{A_{i,j}}$ определим с помощью радиуса резервуара и таблицы отклонений стенки резервуара от вертикали по формулам:

$$x_{A_{i,j}} = (R + \delta_{i,j}) \sin \frac{2(j-1)\pi}{n}; \quad y_{A_{i,j}} = (R + \delta_{i,j}) \cos \frac{2(j-1)\pi}{n}. \quad (1)$$

1.4. Определяем массив координат $z_{i,j}$ по формуле: $z_{i,j} = (i-1)h/k$, из расчёта, что в каждом i -м слое координата $z_{i,j}$ является одинаковой. Т.е. $z_{i,j} = z_{i,j+1} = \dots = z_{i,n}$.

В результате получим три двумерных массива соответственно для коор-

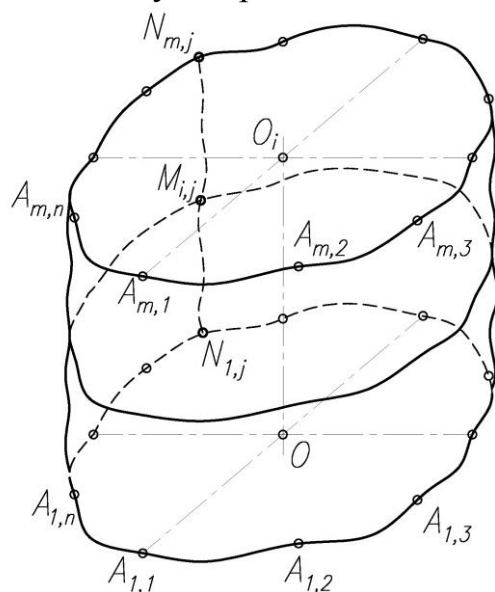


Рисунок 1. Геометрическая схема поверхности резервуара с несовершенствами.

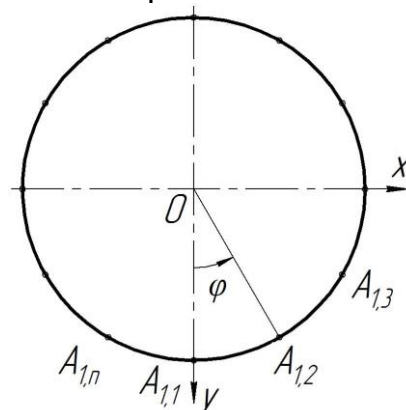


Рисунок 2. Основание цилиндрической поверхности резервуара.

динат точек $x_{A_{i,j}}$, $y_{A_{i,j}}$ и $z_{A_{i,j}}$.

При проведении измерений с помощью НЛС результатом является цифровая модель действительной поверхности тонкостенной оболочки. В этом случае первая часть алгоритма исключается за ненадобностью.

2. Алгоритм формирования линий опорного контура следующий:

2.1. Формируем цикл для i от 1 до m .

2.2. Определяем длину отрезка $A_{i,j}A_{i,j+1}$:

$$|A_{i,j}A_{i,j+1}| = \sqrt{(x_{A_{i,j+1}} - x_{A_{i,j}})^2 + (y_{A_{i,j+1}} - y_{A_{i,j}})^2 + (z_{A_{i,j+1}} - z_{A_{i,j}})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n+1. \quad (2)$$

2.3. Определяем длину отрезка $A_{i,j}A_{i,j+2}$:

$$|A_{i,j}A_{i,j+2}| = \sqrt{(x_{A_{i,j+2}} - x_{A_{i,j}})^2 + (y_{A_{i,j+2}} - y_{A_{i,j}})^2 + (z_{A_{i,j+2}} - z_{A_{i,j}})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n+1. \quad (3)$$

2.4. Определяем массив точек $B_{i,j+1}$:

$$B_{i,j+1} = (A_{i,j+2} - A_{i,j}) \frac{|A_{i,j+1}A_{i,j+2}|}{\pi |A_{i,j}A_{i,j+2}|} + A_{i,j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, n+1. \quad (4)$$

2.5. Определяем массив точек $C_{i,j+1}$:

$$C_{i,j+1} = (A_{i,j} - A_{i,j+2}) \frac{|A_{i,j}A_{i,j+1}|}{\pi |A_{i,j}A_{i,j+2}|} + A_{i,j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, n+1. \quad (5)$$

2.6. Определяем дуги линий i -го опорного контура:

$$N_{i,j} = A_{i,j}\bar{u}^3 + 3B_{i,j}\bar{u}^2u + 3C_{i,j}u^2\bar{u} + A_{i,j+1}u^3, \quad j = 2, \dots, n+1. \quad (6)$$

где $\bar{u} = 1 - u$; $0 \leq u \leq 1$.

2.7. Увеличиваем i на 1 и возвращаемся к пункту 2.1.

3. Алгоритм формирования образующих линий:

3.1. Формируем цикл для j от 2 до $n+1$.

3.2. Определяем длины отрезков:

$$\begin{aligned} |N_{i,j}N_{i+1,j}| &= \sqrt{(x_{N_{i+1,j}} - x_{N_{i,j}})^2 + (y_{N_{i+1,j}} - y_{N_{i,j}})^2 + (z_{N_{i+1,j}} - z_{N_{i,j}})^2}, \\ |N_{i-1,j}N_{i+1,j}| &= \sqrt{(x_{N_{i+1,j}} - x_{N_{i-1,j}})^2 + (y_{N_{i+1,j}} - y_{N_{i-1,j}})^2 + (z_{N_{i+1,j}} - z_{N_{i-1,j}})^2}, \\ |N_{i,j}N_{i-1,j}| &= \sqrt{(x_{N_{i-1,j}} - x_{N_{i,j}})^2 + (y_{N_{i-1,j}} - y_{N_{i,j}})^2 + (z_{N_{i-1,j}} - z_{N_{i,j}})^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

где $i = 2, 3, \dots, m-1$.

3.3. Определяем точки $P_{i,j}$ и $Q_{i,j}$:

$$\begin{aligned} P_{i,j} &= (N_{i+1,j} - N_{i-1,j}) \frac{|N_{i,j}N_{i+1,j}|}{2|N_{i-1,j}N_{i+1,j}|} + N_{i,j}, \quad i = 2, 3, \dots, m-1. \\ Q_{i,j} &= (N_{i-1,j} - N_{i+1,j}) \frac{|N_{i,j}N_{i-1,j}|}{2|N_{i-1,j}N_{i+1,j}|} + N_{i,j}, \quad i = 2, 3, \dots, m-1. \end{aligned} \quad (8)$$

3.4. Определяем дуги обвода для первого и последнего поясов:

$$M_{1,j} = N_{1,j}\bar{v}^2 + 2Q_{2,j}v\bar{v} + N_{2,j}v^2. \quad (9)$$

$$M_{m,j} = N_{m-1,j}\bar{v}^2 + 2P_{m-1,j}v\bar{v} + N_{m,j}v^2.$$

3.5. Формируем дуги образующих линий для промежуточных поясов:

$$M_{i,j} = N_{i,j}\bar{v}^3 + 3P_{i,j}\bar{v}^2v + 3Q_{i,j}v^2\bar{v} + N_{i+1,j}v^3, \quad i = 2, 3, \dots, m-2. \quad (10)$$

где $\bar{v} = 1 - v$; $0 \leq v \leq 1$.

3.6. Увеличиваем значение j на 1 и возвращаемся к пункту 3.1.

В третьем разделе исследованы способы моделирования и численного расчёта НДС стальных ВЦР с учётом общих несовершенств геометрической формы. Чтобы осуществить концепцию комплексного подхода к вопросу обследования и технической диагностики резервуаров с помощью современной вычислительной техники, в работе были исследованы методы измерения и обработки статистического материала. Установлено, что наряду с традиционными методами определения геометрической формы стенки резервуара, находящегося в эксплуатации, возможно использование инновационных технологий, к которым относится наземный лазерный сканер.

Особенностью использования наземного лазерного сканера при проведении измерительных работ является получение результатов измерения в виде облака точек, т.е. гиперколичественного дискретного конечного множества точек. При использовании НЛС существенным являются три основных этапа выполнения работ:

- 1) сбор данных;
- 2) предварительная обработка результатов съёмки;
- 3) выбор данных для построения геометрической модели ВЦР.

Для вычислительного обеспечения всех этих этапов в работе предложен расчетный алгоритм, который позволяет удалить избыточную информацию из гиперколичественного множества точек, полученного НЛС.

1. Разбиваем облако точек по вертикали на слои, количество которых зависит от объема резервуара и заданной точности расчета (рис. 3).

2. В границах слоев высота точек принимается одинаковой (x, y - разные, z - одинаковые) (рис. 4).

3. Выявим дублирующие точки, полученные во время предыдущей операции.

4. Определяем расстояние от точек поверхности до оси резервуара.

5. Формируем массивы, состоящие из точек с максимальными или мини-

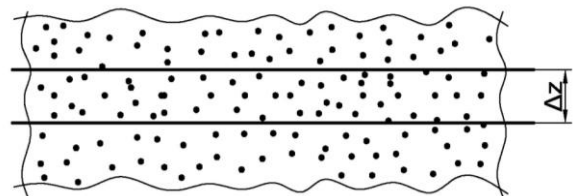


Рисунок 3. Первый этап упрощения – расслоение облака точек.

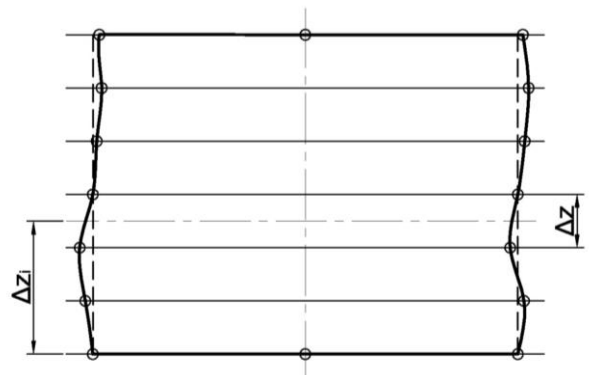


Рисунок 4. Определение высот каждого слоя облака точек.

мальными отклонениями от вертикали.

6. Далее последовательно сравниваем все точки и центральные углы между ними (рис. 5). В случае, когда максимум или минимум возрастает, в случае сравнения двух или более точек, сравнение углов продолжается до исключения всех точек, которые находятся в середине центрального угла.

Полученная цифровая модель используется для последующего создания геометрической модели ВЦР с учетом несовершенств геометрической формы с помощью универсального алгоритма разработанного во 2 разделе.

На следующем этапе был выполнен анализ влияния несовершенств геометрической формы на НДС стального ВЦР. С помощью вычислительного комплекса *SCAD Office* был произведён расчёт НДС резервуара №1 для хранения бензина объемом 1000 м^3 КСП «Бешевский», который был построен на основе типового проекта ТП 704-1-54 «Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 1000 м^3 », с учётом несовершенств геометрической формы и без учёта несовершенств геометрической формы. Для восполнения недостающей информации воспользуемся техническим заключением № 96-2 ДЦ «Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций резервуара №1 для хранения бензина объемом 1000 м^3 КСП «Бешевский», которое было проведено «Донбасским диагностическим центром строительных конструкций, зданий и сооружений» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

На основании разработанного во втором разделе вычислительного алгоритма в программном комплексе *Maple*, создана компьютерная модель поверхности вертикального цилиндрического резервуара объемом 1000 м^3 для хранения нефтепродуктов с учетом несовершенств их геометрической формы.

Полученная модель является основой для создания расчетной схемы в вычислительном комплексе *SCAD Office*, но для её использования необходи-

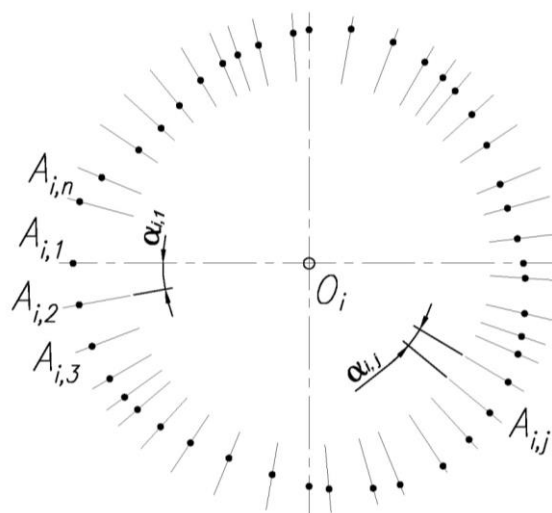


Рисунок 5. Выявления лишних точек в каждом слое облака точек.

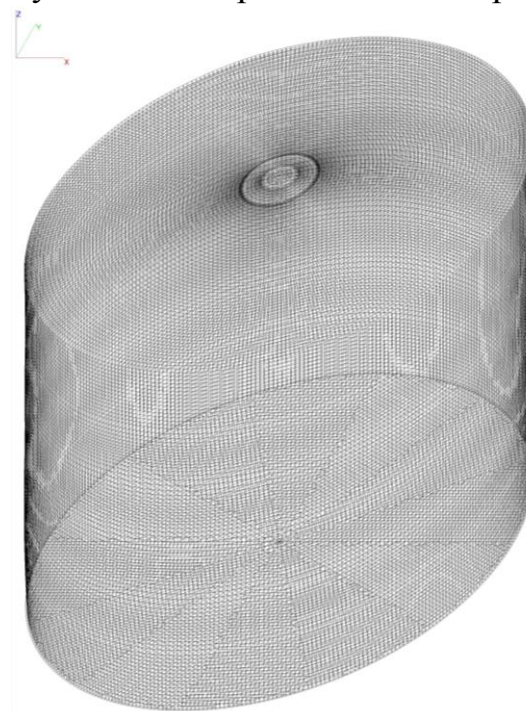


Рисунок 6. Расчетная схема резервуара объемом 1000 м^3 с геометрическими несовершенствами.

мо аппроксимировать полученную поверхность плоскими конечными элементами заданного размера. Эта задача была реализована с помощью VBA с последующим выводом информации в AutoCAD. В результате получим следующую расчётную схему (рис. 6).

Определение размера конечного элемента резервуара было выполнено на основании сопоставления результатов аналитического и численного расчёта нижнего пояса идеализированного резервуара без учёта несовершенств геометрической формы. Окончательно было принято разбиение стенки резервуара с размерами конечного элемента $0,1076 \times 0,1$ м при этом погрешность вычисленных напряжений составляет всего 1,2%. Такой же размер конечного элемента был принят и для численного исследования НДС резервуара с учётом несовершенств геометрической формы.

Для вертикальных цилиндрических резервуаров основной нагрузкой является внутреннее давление жидкости на стенки резервуара (т.н. гидростатическое давление), которое вызывает нормальные кольцевые напряжения. Для определения НДС стенки резервуара выполнен расчет по следующим схемам нагружений:

- схема нагружения 1 – собственный вес;
- схема нагружения 2 – гидростатическое давление;
- схема нагружения 3 – собственный вес + гидростатическое давление.

Для анализа влияния несовершенств геометрической формы стенки резервуара, выполнен расчет его НДС с учетом несовершенств и без них в линейной постановке.

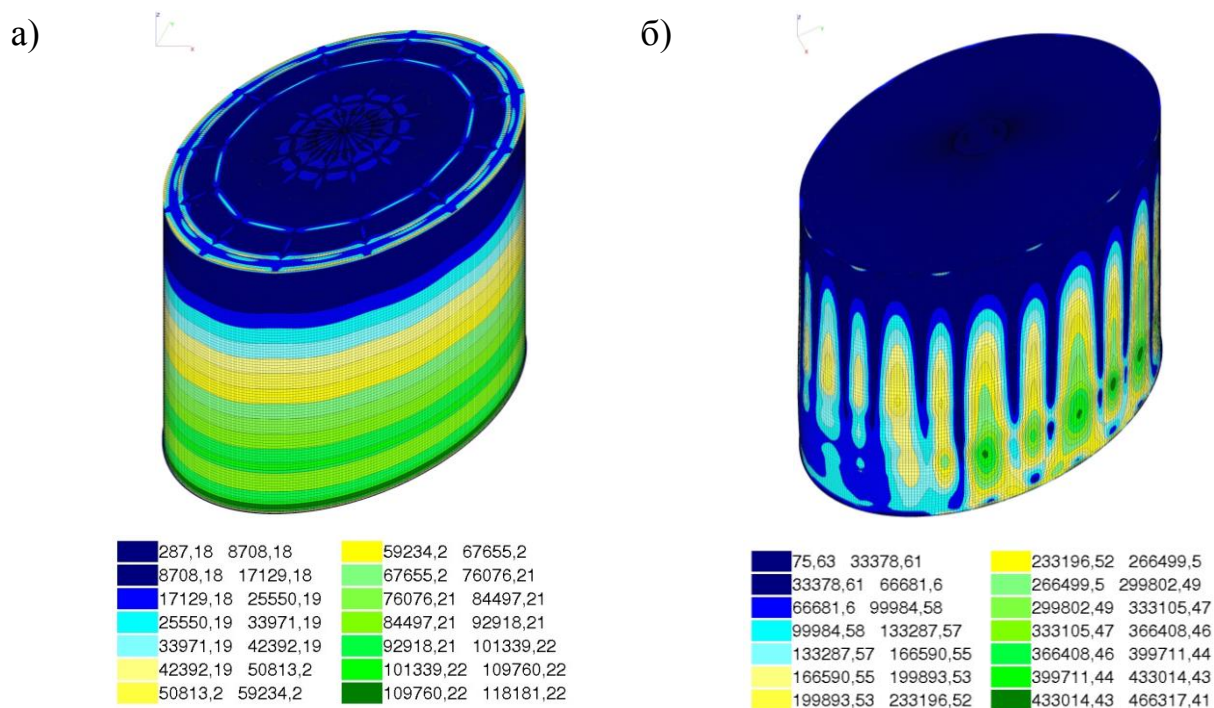


Рисунок 7. Значения приведенных напряжений от совместного действия собственного веса и гидростатической нагрузки в линейной постановке, кН/м^2 : а – идеализированная модель, б – модель с несовершенствами.

Результаты анализа влияния несовершенств геометрической формы на

НДС резервуара от совместного действия собственного веса и гидростатической нагрузки в линейной постановке приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Анализ результатов расчета НДС резервуара от совместного действия собственного веса и гидростатической нагрузки в линейной постановке

№ пояса	Напряжения в идеальной стенке, МПа				Напряжения стенке с несовершенствами, МПа				Δ^* , %
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	$\sigma_{пр}$	σ_x	σ_y	τ_{xy}	$\sigma_{пр}$	
I	105,7	-1,310	0,102	115,1	138,9	117,2	47,3	532,3	363
II	101,7	-1,454	0,029	103,4	106,1	122,2	25,1	584,9	466
III	81,8	-1,231	0,045	82,9	71,0	105,1	13,9	450,6	444
IV	59,3	-0,962	0,064	60,5	62,0	103,2	20,8	385,5	537
V	36,8	-0,720	0,099	38,0	33,4	69,5	17,3	273,0	618
VI	21,7	-0,531	1,053	41,6	38,0	41,8	17,7	225,4	442

Как видно из табл. 1, приведенные напряжения в стенке резервуара с несовершенствами в среднем в 5 раз превышает аналогичные напряжения в резервуаре с идеализированной стенкой, что говорит о значительном влиянии искажений геометрической формы на НДС стальных ВЦР и подтверждает актуальность выбранной темы и необходимость проведенных научных исследований.

Дополнительно был проведен расчет НДС ВЦР с учетом несовершенств геометрической формы стенки и без них в нелинейной постановке. При расчете на действие гидростатической нагрузки учитывалась не только геометрическая нелинейность, но и нелинейность конструктивная, как важный фактор, влияющий на изменение формы и размеров исходных геометрических несовершенств, а, следовательно, изменение первоначальной расчетной схемы при поэтапном приложении нагрузки.

Следует отметить, что исходный расчёт НДС стенки резервуара при гидростатической нагрузке в линейной постановке давал результат в пределах нормы, а в нелинейной постановке – напряжения в стенке резервуара в несколько раз

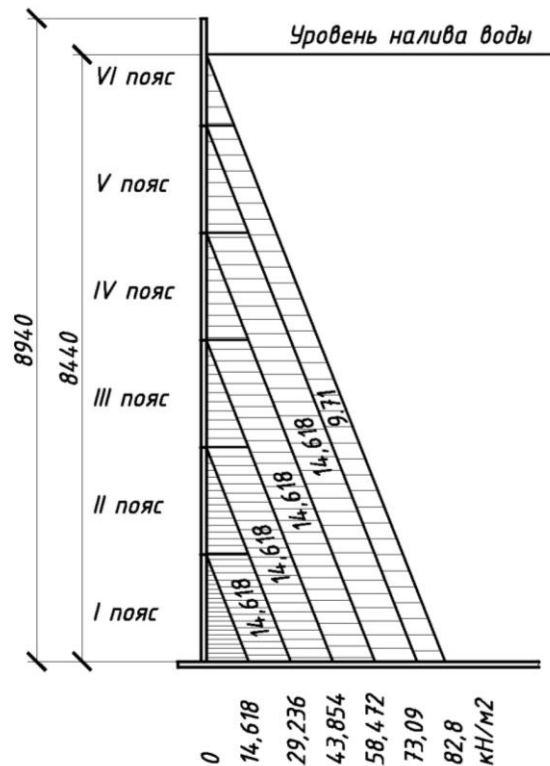


Рисунок 8. Схема поэтапного нагружения резервуара гидростатической нагрузкой в нелинейной постановке.

превышали предел текучести стали. Было установлено, что это вызвано некорректным заданием гидростатического давления при моделировании нелинейных нагрузок на стенку резервуара. Гидростатическое давление жидкости на стенку резервуара не может быть разбито на доли простым введением коэффициента загрузки и количества шагов, ввиду того, что давление увеличивается не частями на всю стенку по высоте, а снизу вверх, по мере наполнения резервуара. Поэтому для исследования НДС стенки резервуара под действием гидростатической нагрузки в нелинейной постановке была реализована поэтапная схема нагружения резервуара, как показано на рисунке 8. Таким образом, при моделировании нелинейного нагружения гидростатическим давлением, имеем 6 шагов нагружения с коэффициентом загрузки равным 1, в соответствии с количеством поясов стенки резервуара. На первом этапе нагружается первый пояс стенки резервуара, на втором – первый и второй, на третьем – первый, второй и третий и т.д. до выхода на уровень налива жидкости в резервуар.

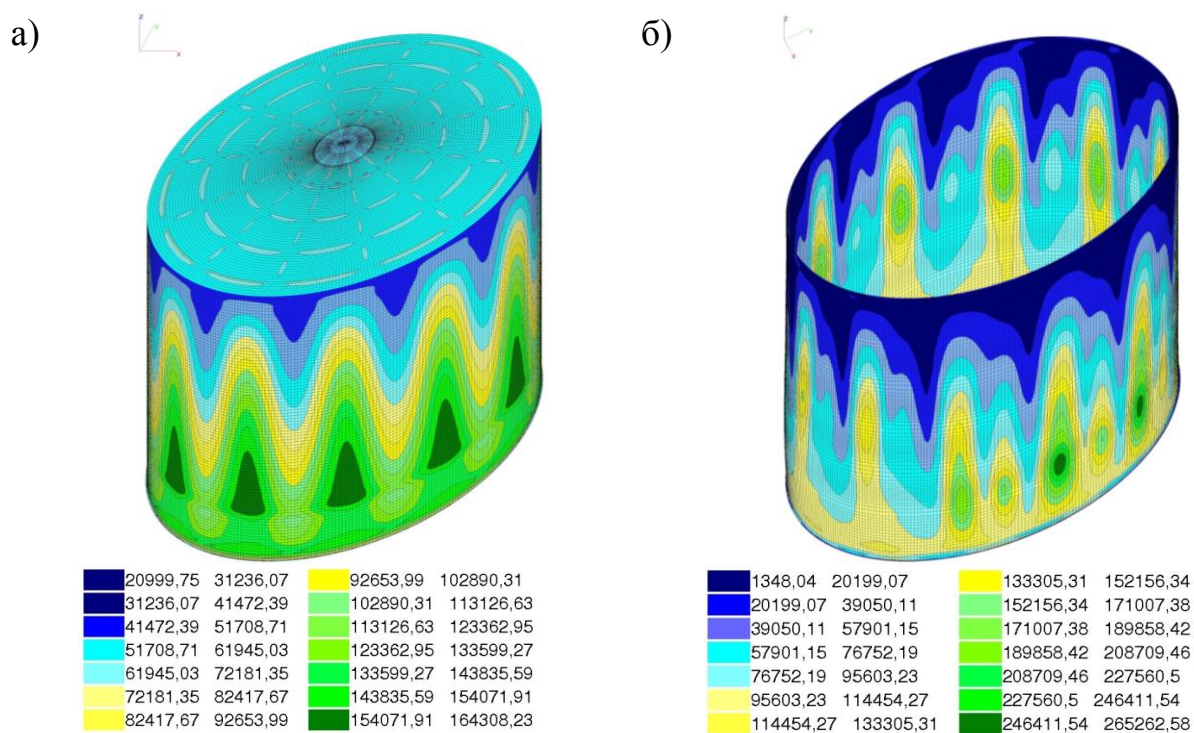


Рисунок 9. Значение приведенных напряжений от действия гидростатической нагрузки в нелинейной постановке, кН/м^2 : а – идеализированная модель, б – модель с несовершенствами.

Результаты анализа влияния несовершенств геометрической формы на НДС резервуара под действием гидростатической нагрузки в нелинейной постановке приведены в таблице 2.

Как видно из анализа, расчет кольцевых напряжений в нелинейной постановке дает корректировку результатов аналогичных линейных исследований, однако влияние искажений геометрической формы на НДС стенки резервуара остается значительным. Значение приведенных напряжений в стенке резервуара с несовершенствами в среднем в 1,5 раза превышают аналогичные

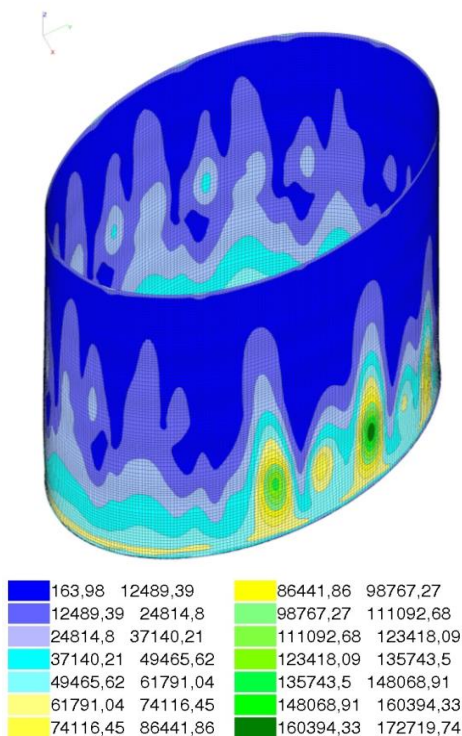
напряжения в резервуаре с идеализированной стенкой, за исключением верхних поясов резервуара, что говорит о значительном влиянии искажений геометрической формы на НДС стальных ВЦР и подтверждает актуальность выбранной темы и необходимость проведенных научных исследований.

Таблица 2 – Анализ результатов расчета НДС резервуара действия гидростатической нагрузки в нелинейной постановке

№ пояса	Напряжения в идеальной стенке, МПа				Напряжения в стенке с несовершенствами, МПа				Δ^* , %
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	$\sigma_{пр}$	σ_x	σ_y	τ_{xy}	$\sigma_{пр}$	
I	159,2	20,2	3,2	150,8	266,7	76,6	17,5	240,2	59
II	173,9	26,7	2,5	164,3	298,4	90,7	12,7	266,1	62
III	170,5	29,9	1,4	158,9	237,7	84,5	16,0	209,4	32
IV	156,1	29,9	1,6	143,6	236,1	84,4	6,8	207,7	45
V	124,1	26,8	2,5	113,2	138,3	46,9	5,9	125,0	10
VI	81,8	20,4	3,1	73,7	77,6	28,2	7,5	69,8	5

Кроме этого поэтапная схема нагружения позволяет отслеживать тенденцию изменения напряжений под действием гидростатической нагрузки.

а)



б)

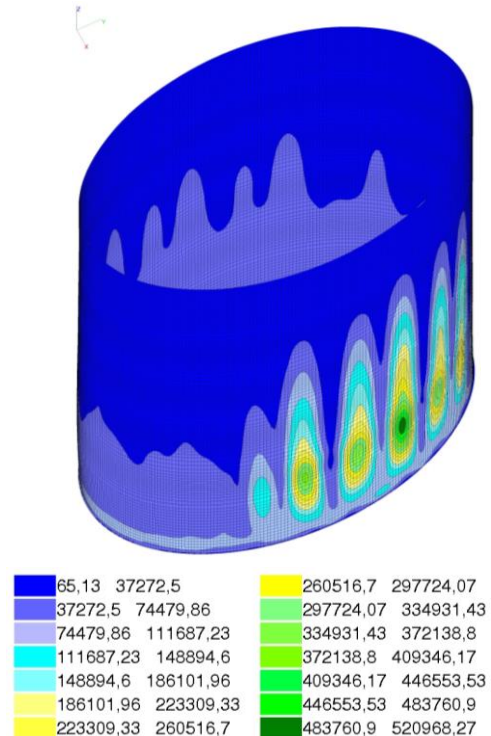


Рисунок 10. Значение приведенных напряжений в стенке резервуара с несовершенствами от совместного действия собственного веса и гидростатической нагрузки в нелинейной постановке на третьем и четвертом этапах нагружения, кН/м^2 : а – 3 этап нагружения, б – 4 этап нагружения.

Следует отметить, что принятые для анализа параметры геометрических

несовершенств в среднем на 20-40% превышают предельные величины заданные в нормативных документах. Поэтому, на приведенных выше рисунках видно, что при третьем этапе нагружения значения приведенных напряжений, не превышают значения предела текучести стали, а уже четвёртый этап даёт значительное увеличение приведенных напряжений, которые превышают предел текучести. Таким образом, при реализации поэтапной схемы нагружения появляется возможность определения максимальной высоты налива жидкости в резервуар с учётом несовершенств геометрической формы для его дальнейшей безопасной эксплуатации, которая, однако, должна быть подтверждена расчётом на устойчивость.

Четвертый раздел посвящен моделированию и численному исследованию НДС стальных ВЦР с учётом местных несовершенств геометрической формы.

Для сравнения результатов численных исследований НДС стального ВЦР, полученных на основе, предложенного в работе, универсального алгоритма моделирования действительной поверхности резервуара, с экспериментальными и теоретическими данными, полученными другими исследователями, было проанализировано НДС девяти резервуаров различного объема от 1000 до 10000 м³ для хранения нефтепродуктов с учётом местных несовершенств под действием гидростатической нагрузки в линейной постановке.

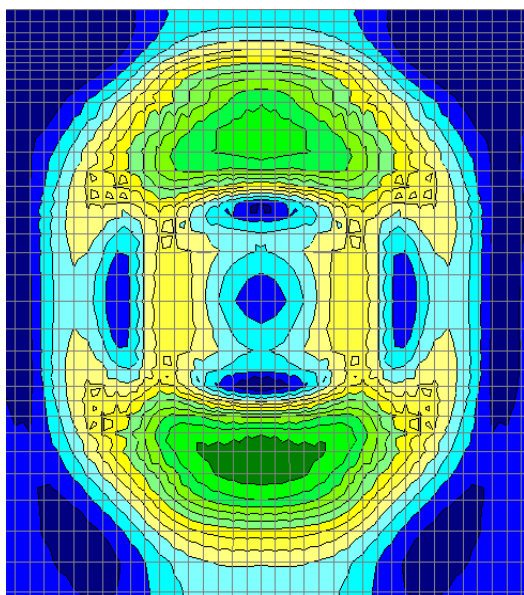
Для описания сферической формы вмятины определенного размера и расположения в универсальный алгоритм кроме отклонения от вертикали были дополнительно введены высота вмятины и коэффициент, определяющий положение центра вмятины по отношению к высоте резервуара, что позволило смоделировать вмятину нужного размера и сопоставить его НДС под действием гидростатической нагрузки, с результатами, полученными в работе Алифанова Л.А.

Сравнение результатов численного расчёта НДС резервуаров с учётом вмятины сферической формы, полученных на основе универсального алгоритма, предложенного во втором разделе, с аналогичными исследованиями, приведенными в работе Алифанова Л.А., представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение результатов численных исследований НДС резервуаров

№ в.м.	D , м	H , м	h_0	f , мм	L , м	t , мм	σ_{\max}	σ_{\max} (расч)	Δ^* , %
94	12,34	8,94	0,17	38	1,2	4	993	906,73	8,69
95	12,34	8,94	0,08	41	1,12	4	1280	1165,3	8,96
97	12,34	8,94	0,67	76	1,6	4	525	491,64	6,35
133	22,79	11,92	0,88	50	1,5	7	196	184,12	6,06
135	22,79	11,92	0,56	60	2,5	7	807	747,84	7,33
145	22,79	11,92	0,06	20	0,7	7	862	788,32	8,55
244	39,9	17,88	0,83	40	3	8	650	607,57	6,53
249	39,9	17,88	0,62	20	1	8	723	679,31	6,04
251	39,9	17,88	0,71	20	1,5	8	636	594,65	6,50

Графическая визуализация полей эквивалентных напряжений в зоне сферической вмятины резервуара №94 при воздействии гидростатической нагрузки приведена на рисунке 11.



54,53	65977,1	461512,55	527435,13
65977,1	131899,68	527435,13	593357,7
131899,68	197822,25	593357,7	659280,28
197822,25	263744,83	659280,28	725202,85
263744,83	329667,4	725202,85	791125,42
329667,4	395589,98	791125,42	857048,0
395589,98	461512,55	857048,0	922970,57

Рисунок 11. Эквивалентные напряжения в зоне сферической вмятины при действии гидростатической нагрузки, кН/м^2 .

На основании анализа значений погрешности при численном расчёте (табл. 3), которая не превышает 10 % можно сделать вывод о достоверности полученных результатов и подтверждении полной работоспособности универсального алгоритма моделирования поверхности резервуара с учётом местных несовершенств геометрической формы. При этом большая сходимость результатов наблюдается для резервуаров большего объема. Погрешность в расчётах может быть вызвана не только использованием разных вычислительных комплексов (Алифанов Л.А. использовал ANSYS), но и тем фактом, что Алифанов Л.А. в местах концентрации напряжений использовал более плотную сетку, в то время как в нашем случае сетка была более равномерной, чтобы не отходить от концепции универсальности предложенного алгоритма.

В пятом разделе разработана и внедрена в ГП «Донецкий экспертно-технический центр государственного комитета гортехнадзора ДНР» инженерная методика численного исследования НДС стального ВЦР находящегося в эксплуатации.

Полученная методика численного исследования НДС стального ВЦР находящегося в эксплуатации позволяет на основании геометрических обмеров с помощью компьютерного моделирования оценить техническое состояние резервуара для хранения нефтепродуктов с учётом несовершенств геометрической формы, а также моделировать изменения с течением времени и под воздействием различных факторов. Принципиальная блок-схема методики проведения исследований представлена на рисунке 12.

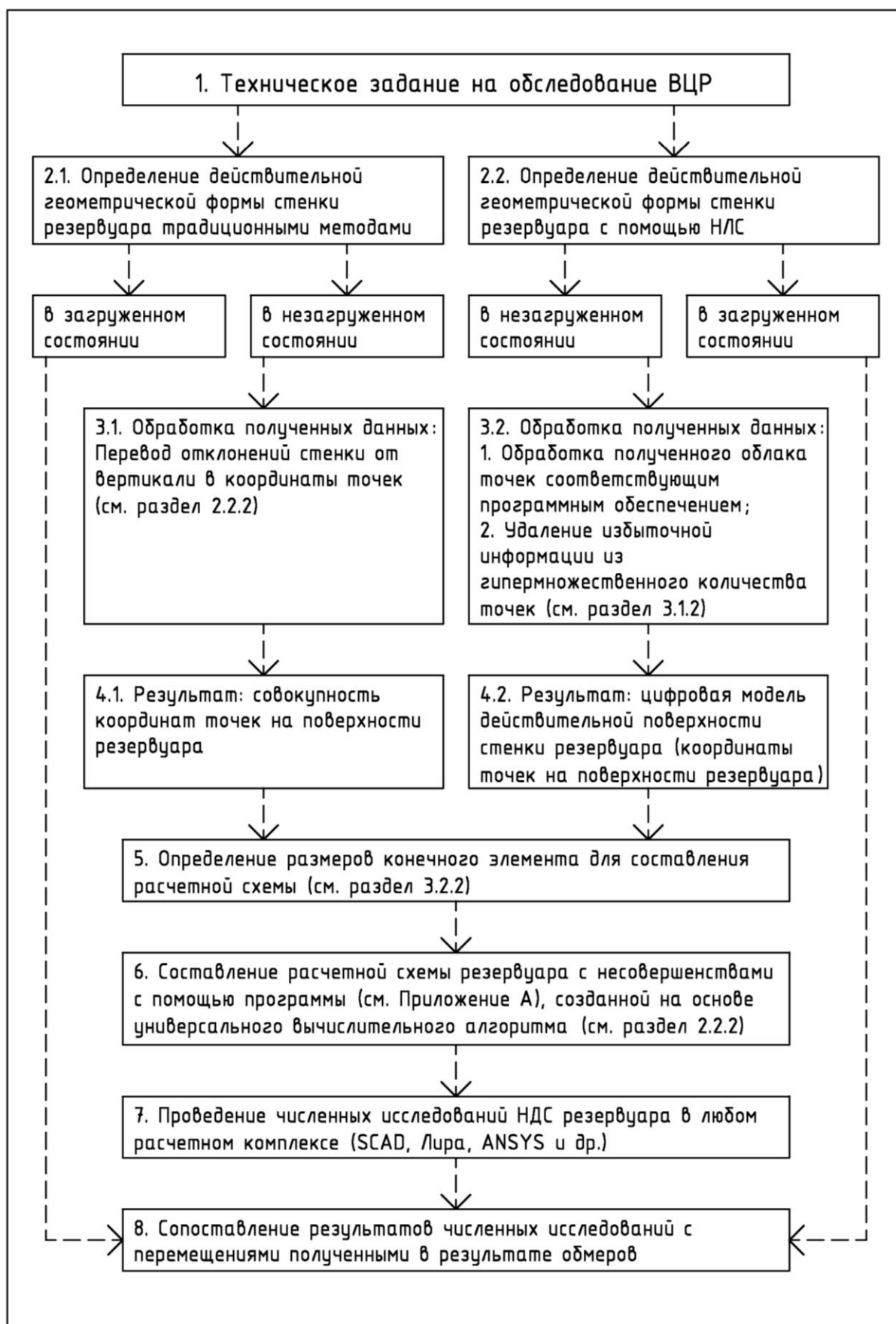


Рисунок 12. Принципиальная блок-схема инженерной методики численно-го исследования НДС стального ВЦР находящегося в эксплуатации.

ВЫВОДЫ

Диссертация посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния стальных вертикальных цилиндрических резервуаров с учётом несовершенств геометрической формы. Все полученные в работе геометрические и компьютерные модели тонкостенных оболочек инженерных сооружений получены в БН-исчислении методом подвижного симплекса.

При этом получены результаты, имеющие научную и практическую ценность:

1. Выполненный анализ литературных источников показал, что в настоящее время отсутствуют работы, посвященные численному исследованию НДС тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учётом совместных (общих и местных) несовершенств геометрической формы. Критический анализ подтвердил необходимость и целесообразность применения математического аппарата БН-исчисления, который позволяет решать задачи моделирования сложных незакономерных поверхностей технических форм, упрощает их программную реализацию и уменьшает затраты ресурсов.

2. Исследованы в БН-исчислении способы аналитического определения дуг обвода на основе геометрических схем их конструирования, а также разработаны или усовершенствованы 10 алгоритмов моделирования выпуклых обводов первого порядка гладкости, которые являются теоретической основой для конструирования сложных незакономерных поверхностей оболочек инженерных сооружений с учётом несовершенств геометрической формы методом подвижного симплекса.

3. Получен универсальный геометрический и компьютерный алгоритм моделирования действительной поверхности стенки резервуара с учётом как общих, так и местных несовершенств геометрической формы, что позволяет использовать вычислительные возможности современной компьютерной техники для численного исследования и анализа НДС стальных ВЦР с учётом несовершенств геометрической формы при совместном действии нагрузок на весь резервуар в целом.

4. Исследовано совместное влияние общих и местных несовершенств геометрической формы на НДС резервуара для хранения нефтепродуктов в линейной и нелинейной постановках с учетом конструктивной нелинейности, что позволяет объективно оценить техническое состояние стального ВЦР и обосновать с помощью компьютерного моделирования необходимость проведения работ по ликвидации несовершенств геометрической формы.

5. Исследовано НДС ряда стальных резервуаров объемом от 1000 м^3 до 10000 м^3 для хранения нефтепродуктов с учётом местных несовершенств сферической формы под действием гидростатической нагрузки в линейной постановке, что позволило сопоставить результаты численных исследований с экспериментальными и теоретическими данными, полученными другими исследователями, и подтвердило достоверность полученных результатов исследований и универсальность предложенного алгоритма.

6. Предложен и реализован комплексный подход по обработке геометрической информации при обследовании и оценке технического состояния ВЦР, численному моделированию и анализу влияния несовершенств геометрической формы на НДС эксплуатируемого стального ВЦР. Такой подход позволяет не только аналитически описать действительную поверхность оболочки на основе дискретного массива точек, полученного любым способом, в том числе и НЛС, и исследовать её под действием различных нагрузок, но и моделировать с помощью ЭВМ изменение действительной поверхности оболочки для оценки необходимости реализации мер по усилению стенки резервуара.

7. Разработана инженерная методика численно-экспериментального исследования НДС стального ВЦР находящегося в эксплуатации, которая позволяет оценить техническое состояние резервуара для хранения нефтепродуктов с учётом фактических несовершенств геометрической формы, а также спрогнозировать поведение конструкции при дальнейшей эксплуатации под воздействием различных факторов.

8. Внедрены результаты работы в практику мониторинга и обследования технического состояния стальных ВЦР, а также в учебный процесс Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, что подтверждает актуальность выбранной темы и завершенность проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. Резервуар: пат. 27947 Украина: МПК В65D 90/22 / Мущанов В.Ф., Бачурин А.Н., **Крысько А.А.** – u200705463; заявл. 18.05.2007; опубл. 26.11.2007. Бюл. №19. – 2с.
2. Мущанов, В.Ф. Новое конструктивное решение усиления резервуара [Текст] / В.Ф. Мущанов, А.Н. Бачурин, **А.А. Крысько** // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Інженерні системи та техногенна безпека.: зб. наук. пр. – Макіївка: ДонНАБА. – 2010. – Вип. 2010-6(86). – С. 145-151. (*Анализ исследований и публикаций по теме, детальное описание предложенной конструкции стального резервуара для хранения нефти и нефтепродуктов*).
3. **Крысько, О.А.** Спосіб геометричного моделювання поверхні резервуару будь-якого об'єму для зберігання нафтопродуктів з урахуванням недосконалостей [Текст] / **О.А. Крысько** // Будівництво та техногенна безпека: зб. наук. пр. – Сімферополь: НАПКС, 2013. – Вип. 48. – С. 98-102.
4. Конопацкий, Е.В. Геометрическое моделирование стенки стального вертикального цилиндрического резервуара с несовершенствами [Текст] / **А.А. Крысько, Е.В. Конопацкий** // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Будівлі та конструкції із застосуванням нових ма-

теріалів та технологій: Зб. наук. пр. – Макіївка: ДонНАБА. – 2013. – Вип. 2013-3(101). – С. 126-129. (*Разработка вычислительного алгоритма геометрической модели стенки стального вертикального цилиндрического резервуара с учетом несовершенств*).

5. **Крисько, О.А.** Геометричне моделювання дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм [Текст] / О.А. Крисько, А.В. Найдыш, Д.В. Спиринцев // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ, 2014. – Вип. 3(50). – С. 594-597. (*Вывод последовательности аналитических зависимостей, описывающих форму оболочек технических форм, с последующей программной реализацией*).

6. **Крысько, А.А.** Вычислительный алгоритм формирования геометрических моделей действительной поверхности тонкостенных оболочек технических форм методами БН-исчисления [Текст] / А.А. Крысько // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). – Луцьк: 2015. – Вип. 48. – С. 125-129.

7. Конопацький, Є.В. Особенности конструирования замкнутого обвода первого порядка гладкости в БН-исчислении [Текст] / Е.В. Конопацький, **А.А. Крысько**, Н.А. Рубцов // Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. праць. – Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2016. – Вип. 6. – С. 65-70. (*Разработка геометрического алгоритма конструирования замкнутого обвода первого порядка гладкости*).

– **публикации в журналах или сборниках, включенных в международные наукометрические базы:**

8. Методика численного исследования напряженно-деформированного состояния стальных вертикальных цилиндрических резервуаров с учётом несовершенств геометрической формы [Текст] / **А. А. Крысько**, Е. В. Конопацький, А. Н. Миронов и др. // Металлические конструкции. – 2016. – Т. 22, №1 – С. 45-57. (*Разработка универсального геометрического алгоритма моделирования действительной поверхности стенки резервуара с учётом несовершенств геометрической формы; численное исследование НДС стальных ВЦР с учётом несовершенств геометрической формы*).

9. **Крисько, О.А.** Конструювання просторових дуг обводу у БН-численні [Текст] / О.А. Крисько // Научный журнал «Сборник научных трудов SWorld». – Вип. 3, Т. 12. – Иваново: МАРКОВА АД, 2013. – С. 86-92.

– **публикации по материалам научных конференций:**

10. Конопацький, Є.В. Проективне визначення просторової кривої третього порядку [Текст] / Є.В. Конопацький, **О.А. Крисько**, В.Є. Налбат // Зб. тез доп. за матер. XXXVIII Всеукр. студ. наук.-тех. конф. «Науково-технічні досягнення студентів – будівельно-архітектурній галузі України» (Макіївка, 20 квітня 2012 р.). – Макіївка: ДонНАБА. – 2012. – С. 35. (*Получение точечного уравнения дуги кривой третьего порядка*).

11. Конопацький, Є.В. Геометричне моделювання купольної поверхні на заданих опорних контурах методом рухомого симплексу [Текст] / Є.В. Конопацький, **О.А. Крисько**, О.Ю. Розанова // Зб. тез доп. І-ї конф. студ., аспір. та

молод. вч. «Прикладна геометрія, дизайн та інноваційна діяльність». (Київ, 15-16 травня 2012р.). – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – Вип. 1. – С. 116-118. (*Разработка геометрической схемы моделирования купольной поверхности*).

12. Конопацький, Є.В. Геометричне моделювання поверхні резервуару для зберігання нафтопродуктів з урахуванням недосконалостей методами БН-числення [Текст] / Є.В. Конопацький, А.І. Бумага, **О.А. Крисько** // Матер. II Міжнар. наук.-практ. конф. студ., аспір. та молод. вч. «Прикладна геометрія, дизайн та об'єкти інтелектуальної власності». Вип. 2. (Київ, 22-23 квітня 2013р.). – К.: ДІА, 2013 р. – С. 118-122. (*Получение расчетного алгоритма геометрической модели поверхности резервуара с учетом несовершенств*)

13. **Крысько, А.А.** Теоретические основы геометрического моделирования поверхности резервуара для хранения нефтепродуктов с несовершенствами [Текст] / А.А. Крысько // Научная дискуссия: вопросы технических наук: сб. статей по матер. XIII-XIV междунар. заочн. науч.-практ. конф. – М.: Международный центр образования и науки, 2013. – № 8-9(11). – С. 17-25.

14. **Крысько, А.А.** Геометрическое моделирование действительной поверхности тонкостенных оболочек технических форм методами БН-исчисления [Текст] / А.А. Крысько // Актуальные проблемы механики в современном строительстве. Матер. III Междунар. науч.-тех. конф. (Пенза, дек. 2014р.) – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 40-47.

– **публикации в других изданиях:**

15. **Крисько, О.А.** Обробка даних отриманих НЛС для створення геометричної моделі дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм [Текст] / О.А. Крисько // Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. пр. – Мелітополь: Видавництво МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2014. – Вип. 2. – С. 51-56.

16. Найдиш, А.В. Геометричні передумови моделювання дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм методами БН-числення [Текст] / А.В. Найдиш, Є.В. Конопацький, **О.А. Крисько** // Науковий вісник Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. Серія: Математика. Геометрія. Інформатика. – Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2014. – Т. 1. – С. 118-125. (*Разработка алгоритма формирования линий опорного контура поверхности резервуара*).

17. **Крысько, А.А.** Геометрические основы конструирования одномерного обвода через k наперед заданных точек в БН-исчислении [Текст] / А.А. Крысько, Е.В. Конопацкий, А.Я. Чураков // Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. праць. – Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2015. – Вип. 4. – С. 76-81. (*Исследованы условия предъявляемые к дугам обвода, а также условия формирования касательных в точках стыковки дуг обвода*).

АННОТАЦИЯ

Крысько Александра Анатольевна. Геометрическое и компьютерное моделирование эксплуатируемых конструкций тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учётом несовершенств геометрической формы. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения и 05.01.01 – Инженерная геометрия и компьютерная графика. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Макеевка, 2016 г.

Диссертация посвящена геометрическому моделированию незакономерных поверхностей тонкостенных оболочек инженерных сооружений и исследованию, на их основе, напряженно-деформированного состояния стальных вертикальных цилиндрических резервуаров с учётом несовершенств геометрической формы.

В работе исследованы способы задания дуг обвода кривых второго и третьего порядков на основе геометрических схем их построения. Также в работе предложены новые и усовершенствованы существующие алгоритмы моделирования выпуклых обводов первого порядка гладкости, что дало возможность смоделировать незакономерные поверхности стенки резервуаров методом подвижного симплекса и создать универсальный алгоритм моделирования таких поверхностей.

Исследовано совместное влияние общих и местных несовершенств геометрической формы на НДС резервуара для хранения нефтепродуктов в линейной и нелинейной постановках, для которой реализовано поэтапное нагружение гидростатической нагрузкой, что дало возможность предложить методику определения возможности использования резервуаров с несовершенствами при ограниченной высоте налива.

Кроме того в работе разработан и реализован комплексный подход по обработке геометрической информации при обследовании и оценке технического состояния ВЦР, численному моделированию и анализу влияния несовершенств геометрической формы на НДС стального ВЦР, результатом реализации которого является инженерная методика численного исследования НДС стального ВЦР находящегося в эксплуатации. Такой подход позволяет не только аналитически описать действительную поверхность оболочки на основе дискретного массива точек, полученного любым способом, в том числе и НЛС, и исследовать её под действием различных нагрузок, но и моделировать с помощью ЭВМ изменение действительной поверхности оболочки при проведении предполагаемых мер по ликвидации несовершенств геометрической формы.

Результаты исследований внедрены в ПАО «АЗМК», а также в учебный процесс Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Ключевые слова: стальной вертикальный цилиндрический резервуар, напряжённо-деформированное состояние, несовершенства геометрической формы, численные исследования, гидростатическая нагрузка, БН-исчисление,

точечные уравнения, дуги обвода, выпуклый обвод первого порядка гладкости, метод подвижного симплекса, геометрическое и компьютерное моделирование.

ABSTRACT

Krysko Aleksandra. **Geometrical and computer modeling of thin-walled shells operated construction of engineering structures, due to the defects of geometrical form.** - Manuscript.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.23.01 – Building constructions, buildings and structures and 05.01.01 – Engineering geometry and computer graphics. – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2016.

The thesis is devoted to the geometrical modeling of irregular surfaces of thin-walled shells of engineering constructions and to the research of intense deformed condition of steel vertical cylindrical tanks due to imperfections of a geometrical form.

A combined effect of general and local defects of geometric forms on the intense deformed state of storage tanks in linear and non-linear productions for which implemented gradual loading of the hydrostatic load has been researched, making it possible to offer a method of determining the possibility of the use of tanks with defects with limited loading height.

The work presents the development and implementation of an integrated approach to processing of geometric information in condition survey and assessment of the vertical cylindrical tank, numerical modeling and analysis of the influence of defects on the geometrical shape of the intense deformed state of the steel vertical cylindrical tank, which not only describe analytically the actual surface of the shell based on a discrete pixel array obtained by different means, including land-based laser scanning and examine it under the influence of various loads, but also to model the changes of the actual surface of the shell during the estimated measures for the correction of defects of geometric forms by using a computer.

Keywords: steel vertical cylindrical tank, the intense deformed state, the defects of geometrical form, numerical analysis, hydrostatic load, BN-calculation, point equation, arc bypass, convex perimeter smoothness of the first order, rolling simplex method, geometrical and computer modeling.