

На правах рукописи

Архипов Андрей Владимирович

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
КОТЛА ЦИСТЕРНЫ, ИМЕЮЩЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ
НЕСОВЕРШЕНСТВА**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС) Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Смолянинов Александр Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Емельянов Игорь Георгиевич
кандидат технических наук Горячев Сергей Александрович

Ведущее предприятие – ГОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «18» мая 2007 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66 ауд. 283, тел. 8-343-358-55-10, fax 8-343-245-01-90.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «17» апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Асадченко В.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Несмотря на постоянное совершенствование технологии изготовления котлов цистерн, существует ряд геометрических несовершенств формы, которые оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) котла. К этим несовершенствам, в частности, относятся: увод (угловатость) сварных швов, смещение кромок швов и овальность. В результате воздействия перечисленных факторов профиль обечайки котла цистерны становится некруговым, что в свою очередь, отражается на НДС конструкции. В ряде работ, выполненных ранее в МИИТе, было исследовано НДС котла цистерны при наличии регулярных несовершенств и единичного искажения формы котла. Авторы работ отмечают, что несовершенства формы котла существенно снижают его несущую способность и являются концентраторами напряжений.

Опыт проектирования котлов цистерн и аналогичных резервуаров показал, что учет начальных несовершенств поможет снизить случаи нарушения целостности конструкции и число техногенных катастроф. В связи с этим качественное и количественное исследования начальных геометрических несовершенств котлов цистерн и влияния таких несовершенств на НДС конструкции является актуальной задачей.

Разработка и внедрение в практику численных методов расчета, в частности, метода конечных элементов, позволили производить расчеты сложных конструкций и профилей. Применительно к вагонным конструкциям метод конечных элементов прочно вошел в практику численных экспериментов. Однако, как показывают исследования, при выполнении подобных «компьютерных» расчетов зачастую два инженера, решив одну и ту же задачу, не получают одинаковый ответ. Свобода в выборе расчетной схемы приводит к тому, что инженер, особенно сталкивающийся с подобной задачей впервые, может учесть какой-либо фактор и не учесть другой, посчитав его малозначимым. При этом нет гарантии, что расчетчик не совершит грубую ошибку и к эксплуатации будет допущен резервуар, имеющий опасные дефекты. Поэтому многократно проверенные численные эксперименты целесообразно обобщать в аналитических методах расчета, связывающих характеристики НДС с параметрами сосуда и дефекта. Либо, полученные на основе МКЭ результаты, верифицировать с известными решениями для аналогичных задач.

Точные аналитические решения для задач с нерегулярными несовершенствами профиля не найдены. Это связано со сложностью представления поперечного сечения профиля в замкнутом аналитическом виде. Анализ современных методик, пригодных для определения НДС резервуаров и труб, имеющих несовершенства формы поперечного сечения, позволил сделать вывод о сложности и трудоемкости многих из них. Зачастую проверочный расчет требует привлечения средств ЭВМ, написания собственных программ или наличия специализированных программных пакетов (Mathlab, Mathcad, и др.). В связи с этим, верификация результатов, полученных на конечно-элементных моделях для данного класса задач, является крайне трудоемким процессом.

Целью диссертационной работы является разработка аналитической методики оценки напряженно-деформированного состояния котлов цистерн с геометрическими несовершенствами формы, направленной на обеспечение прочности вновь проектируемых цистерн.

Для достижения поставленной цели потребовалось **решить следующие задачи:**

1. Выполнить анализ и систематизацию известных решений в области исследований НДС тонких цилиндрических оболочек с геометрическими несовершенствами формы.
2. Создать методику верификации результатов расчетов НДС котла цистерны с геометрическими несовершенствами поперечного сечения.
3. Разработать конечно-элементную модель для определения напряженно-деформированного состояния котла цистерны с уводом кромок сварных швов.
4. Разработать и верифицировать аналитическую методику оценки НДС котлов цистерн с несовершенством формы обечайки в виде увода кромок сварного шва. При этом особое внимание уделить тому, что методика не должна требовать привлечения мощных вычислительных средств.

Объектом исследования в настоящей работе являются цистерны для перевозки светлых нефтепродуктов.

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние котла цистерны с геометрическими несовершенствами формы.

Научная проблема исследований формулируется следующим образом: создание аналитической методики оценки напряженно-деформированного состояния тонких цилиндрических резервуаров и труб с геометрическими несовершенствами формы в виде увода кромок сварного шва.

Методы исследования. Методологической основой работы являются теоремы о параметрах деформирования, современные представления о механике изгиба тонких оболочек. Общая методика исследований построена на использовании численных методов анализа, компьютерного моделирования, понятия верификации задач и теорий.

В своей работе автор опирался на труды ученых Л.И. Балабуха, В.З. Власова, Б.Г. Галеркина, А.Л. Гольденвейзера, А.И. Лурье, В. В. Новожилова, С.П. Тимошенко и др., а так же иностранных ученых – всемирно известных теоретиков Л. Эйлера, Л.Г. Доннелла и др. Автор учитывал результаты исследований ученых в области железнодорожного транспорта: А.П. Азовского, С.П. Беспалько, М.М. Болотина, А.И. Быкова, В.Н. Котуранова, В.Г. Мышкова и др.

Научная новизна работы.

1. Проведен анализ и обобщение известных решений в области исследований НДС тонких цилиндрических оболочек с геометрическими несовершенствами формы.
2. Разработана методика верификации результатов расчетов НДС котла цистерны с геометрическими несовершенствами поперечного сечения, основанная на теоремах о равновесии сечений (теоремах Марбека).
3. Разработана конечно-элементная модель котла цистерны, позволяющая учитывать увод кромок замыкающего сварного шва двух типов: радиальное отклонение наружу обечайки и радиальное отклонение внутрь обечайки котла. На основе анализа результатов расчетов обоснован более предпочтительный тип увода шва.
4. Разработана аналитическая методика оценки НДС котла цистерны, имеющего геометрические несовершенства поперечного сечения обечайки, позволяющая проводить экспресс-анализ прочности котла и способная заменить трудоемкие расчеты по другим методикам.

Практическая значимость исследования. Результаты исследования направлены на практическое решение проблем обеспечения прочности подвижного состава. Разработанная аналитическая методика значительно упрощает и ускоряет процесс расчета НДС котла цистерны с несовершенствами поперечного сечения в виде увода кромок сварного шва, исключая громоздкие расчеты по МКЭ. Разработанная методика верификации позволяет проверить и оценить результаты, полученные с использованием других методик, в том числе и МКЭ.

На основании проведенных исследований даны рекомендации по учету начальных геометрических несовершенств при проектировании, изготовлении и контроле формы котлов цистерн для светлых нефтепродуктов. Обоснован более предпочтительный тип увода шва.

На защиту выносятся:

1. Результаты анализа известных решений в области исследований НДС тонких цилиндрических оболочек с геометрическими несовершенствами формы.
2. Аналитическая методика оценки НДС котла цистерны, имеющего геометрические несовершенства поперечного сечения обечайки.
3. Методика верификации результатов расчетов НДС котла цистерны с геометрическими несовершенствами поперечного сечения.
4. Результаты расчетов с использованием разработанной конечно-элементной модели котла цистерны с уводом кромок замыкающего сварного шва.

Реализация результатов работы. Методика оценки НДС котла цистерны с несовершенствами поперечного сечения профиля обечайки и методика верификации нашли применение в Уральском конструкторском бюро вагоностроения ФГУП «ПО Уралвагонзавод» при разработке перспективных цистерн. На основании результатов работы в системе менеджмента качества на ФГУП «ПО Уралвагонзавод» введены операции по контролю увода швов.

Отдельные положения и результаты работы используются в научных исследованиях кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения и в учебном процессе по дисциплине «Строительная механика вагонов».

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научно-технических конференциях УрГУПС «Молодые ученые – транспорту» (Екатеринбург, 2001, 2002, 2005 г.); всероссийской научно-технической конференции, посвященной 125-летию Свердловской железной дороги «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Екатеринбург, 2003 г.); научно-технической конференции «Магистраль» (Нижний Тагил, 2004 г.); международной научно-технической конференции «Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России» (Екатеринбург, 2006 г.); на научно-технических семинарах и заседаниях кафедры «Вагоны» УрГУПС (1999 - 2006 гг.).

Результаты диссертационных исследований были доложены на расширенном заседании кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения. Основные положения диссертации доложены на кафедре «Вагоны» Московского государственного университета путей сообщения.

Публикации. Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 10-ти печатных работах. Общий объем публикаций около 7,2 п.л., из них автору принадлежит 4,4 п.л. **Одна статья опубликована в**

издании «Транспорт Урала», входящим в Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций, остальные статьи опубликованы в журналах «Транспорт Урала», изданиях ВИНТИ, сборниках трудов УрГУПС.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Содержание изложено на 132 страницах, в том числе включает 7 таблиц и 46 рисунков. Библиографический список содержит 121 наименование.

Автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность научному руководителю профессору А. В. Смольянинову, В.А. Кузнецову, профессору В. А. Ивашову, а также сотрудникам кафедры «Вагоны» УрГУПС за содействие и внимание к работе, за консультации и обсуждение результатов исследований, представленных в диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулирование цели и задач исследований, изложение основных результатов работы.

В первой главе приведен материал по использованию цилиндрических оболочек в различных отраслях народного хозяйства. Среди таких конструкций могут быть горизонтальные и вертикальные резервуары для хранения нефтепродуктов, контейнер-цистерны для транспортировки и хранения нефтепродуктов, криогенная техника и др. При этом многие конструкции имеют схожие размеры, материал и условия эксплуатации с котлом цистерны. Анализ области применения таких оболочек показал, что котел цистерны является частным случаем среди множества конструкций, относящихся к тонким цилиндрическим оболочкам. Многие исследователи отмечают, что начальные геометрические несовершенства поперечного сечения являются причиной снижения и разброса критических распределенных нагрузок цилиндрических оболочек. Конструкции с такими несовершенствами в эксплуатации менее надежны, т.к., считаясь номинально круглыми, имеют дополнительные концентраторы напряжений. Оболочки могут иметь несовершенства формы, полученные при изготовлении, и дефекты, приобретенные в эксплуатации и ремонте. Несовершенствами в данном случае могут быть: овальность профиля, увод кромок сварных швов, локальные вмятины, вспучивание и т.д.

На цистерны и сосуды для транспортирования или хранения сжатых, сжиженных газов, жидкостей и сыпучих тел, в которых давление выше 0,07 МПа (0,7 кгс/см²) создается периодически, распространяются «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» (ПБ 03-576-03). «Правила...» регламентируют форму и допускаемые размеры отклонений поперечного сечения обечайки при изготовлении:

- относительная овальность a в любом поперечном сечении не должна превышать 1%;
- увод (угловатость) f кромок (рисунок 1, а) в сварных швах не должен превышать $f = 0,1h + 3$ мм, где h – толщина стенки обечайки;
- смещение кромок b листов (рисунок 1, б), измеряемое по срединной поверхности, в стыковых соединениях, определяющих прочность сосуда, не должно превышать $b = 0,1h$, но не более 3 мм.

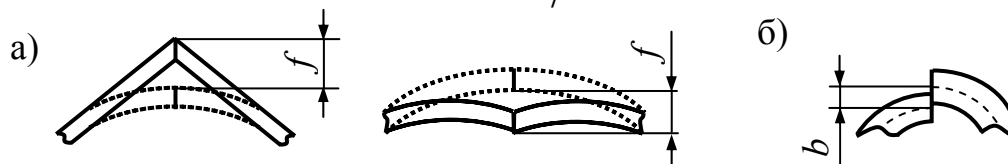


Рисунок 1 – Начальные отклонения поперечного сечения обечаек после изготовления

Следовательно, перечисленные несовершенства формы поперечного сечения в той или иной мере присутствуют на всех вновь изготовленных резервуарах и носят не случайный характер.

В зависимости от технологических возможностей изготовителя, требований заказчика, требований смещения швов относительно друг друга по нормативным документам, размещения конструктивных элементов относительно швов и требований равнопрочности, большинство цистерн по раскрою цилиндрической части котла можно разделить на три типа: состоящие из сплошных продольных листов; состоящие из трех царг; состоящие из четырех и более царг.

Для анализа схем раскроя котлов цистерн, применяемых разными заводами-изготовителями, была составлена их классификация, в которую вошли более 40 моделей цистерн для перевозки светлых нефтепродуктов. На основе проведенных исследований был сделан вывод, что наиболее часто применяемой схемой является обечайка, выполненная из сплошных продольных листов. В результате анализа классификации в качестве объекта исследования был выбран котел цистерны со схемой раскроя цилиндрической части, состоящей из сплошных продольных листов, сваренных встык, свальцованных и соединенных замыкающим сварным швом. Очевидно, что в обечайках, выполненных по такой схеме, несовершенства формы будут более ярко выражены, чем в обечайках, собранных из нескольких царг. Это объясняется их меньшей жесткостью из-за отсутствия поперечных сварных швов.

Для определения формы поперечного сечения обечайки котла цистерны после изготовления было обследовано 30 обечаек, изготовленных из сплошных продольных листов. В ходе обследования на каждой обечайке были измерены: угловатость (увод) кромок сварных швов; овальность профиля; смещение кромок листов. Измерение угловатости сварного шва и смещения кромок листов производились с помощью шаблона АДК 8385.5483 и штангенциркуля ШЦ – 1-125-0,1 ГОСТ 169-89. Длина зоны недовальцовки определялась с помощью металлической линейки ГОСТ 427-75. Замеры проводились на каждом из четырех продольных сварных швов 1, в пяти равноотстоящих друг от друга сечениях I – V вдоль образующей обечайки (рисунок 2).

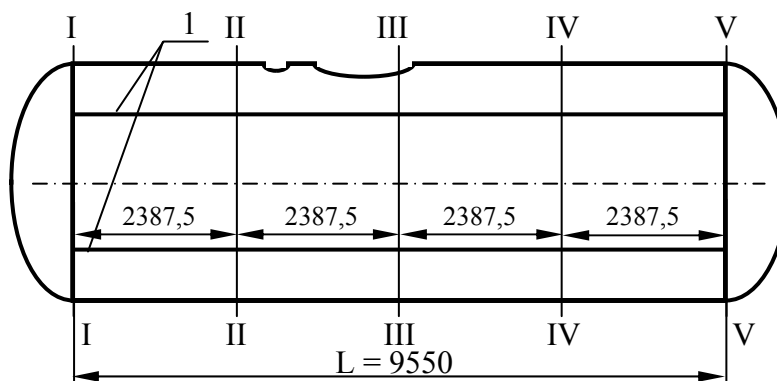


Рисунок 2 – Схема расположения сечений для замеров

В процессе измерений установлено, что в замыкающем сварном шве 10 % котлов имеет увод кромок шва 3 мм, 20 % – 2 мм, 43,33 % – 1 мм и 26,67 % не имеет увода. Остальные сварные швы на 86,67 % котлов не имеют отклонения геометрической формы в виде увода кромок и 13,33 % имеет увод менее 1 мм. В целом все измеренные котлы соответствуют допуску на увод кромок сварного шва, установленному по “Правилам...” (при $h = 12$ мм $f = 0,1h + 3$ мм ≤ 4 мм).

Вдоль образующей обечайки увод кромок шва носит, как правило, постоянный характер: 93,33 % всех измеренных котлов имеют разницу значений увода вдоль образующей менее 1 мм и 6,67 % котлов – менее 1,5 мм. Отклонение замыкающего шва внутрь (рисунок 3, а) зафиксировано у 26,6 % всех измеренных котлов, соответственно, 73,3 % котлов имеют отклонение наружу. Зона недоваляцовки сварного шва колеблется в пределах от 66 мм до 113 мм.

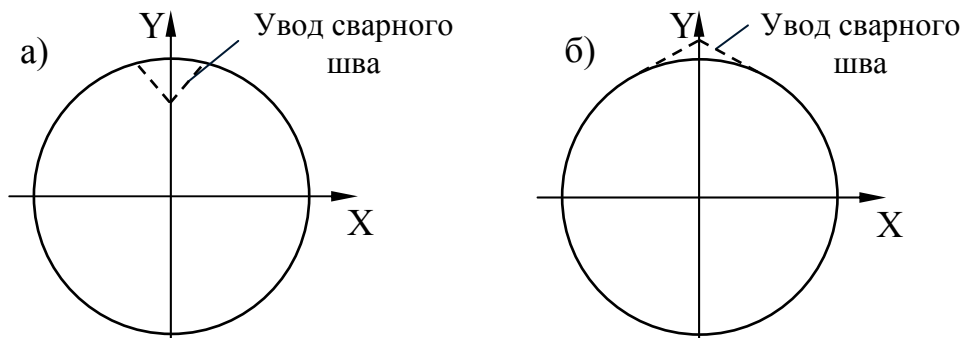


Рисунок 3 – Превалирующие формы профиля обечайки по результатам измерений (а – увод шва внутрь; б – увод шва наружу)

По смещению кромок листов и относительной овальности все измеренные котлы находятся в поле допуска согласно “Правилам...” (соответственно, увод кромок $b = 0,1h < 1$ мм и овальность $a < 1\%$).

В результате проведенных выше исследований было установлено, что котел цистерны является частным случаем среди множества конструкций, относящихся к тонким цилиндрическим оболочкам с геометрическими несовершенствами поперечного сечения обечайки. Величина отклонений и вид зависят от технологии изготовления обечайки (царговый вариант или из сплошных продольных листов). Основным несовершенством поперечного сечения обечайки котла после изготовления является увод кромок в замыкающем сварном шве. Величина радиального отклонения f находится в пределах от 0 до 3 мм, а зона недоваляцовки – от 66 мм до 113 мм.

В результате этого профиль котла становится некруговым с нерегулярной неровностью, распространенной вдоль всей образующей.

Для определения НДС котла с несовершенством формы в виде увода кромок сварного шва был произведен поиск и анализ существующих методик расчета аналогичных задач.

Во второй главе дан обзор исследований по оценке нагруженности тонких некруговых цилиндрических оболочек и сделан анализ современных методов расчета НДС резервуаров и труб с нерегулярными несовершенствами поперечного сечения.

Существенный вклад в развитие методов расчета, испытаний, проектирования и оптимизации котлов железнодорожных цистерн внесли С.В. Беспалько, А.А. Битюцкий, М.М. Болотин, Ю.П. Бороненко, В.М. Бубнов, А.А. Долматов, С.Н. Киселев, В.Н. Котуранов, А.Д. Кочнов, В.С. Лагута, В.П. Лозбинев, В.П. Мальцев, В.И. Мяченков, М.Н. Овечников, Ю.С. Ромен, А.В. Смольянинов, М.М. Соколов, В.Н. Филиппов, В.Д. Хусидов, В.Н. Цюренко, Ю.М. Черкашин, Л.А. Шадур, Н.Н. Шапошников и др.

Большой вклад в науку об оболочках внесли отечественные ученые: Л.И. Балабух, В.З. Власов, Б.Г. Галеркин, А.Л. Гольденвейзер, А.И. Лурье, В.В. Новожилов, С.П. Тимошенко и др., создавшие свои научные школы, известные в широких научных и инженерных кругах.

Совершенствование методов расчета, основанных на применении моментной и полубезмоментной теории оболочек, для котлов цистерн получено в работах А.П. Азовского, С.П. Беспалько, М.М. Болотина, А.И. Быкова, В.Н. Котуранова, В.Г. Мышкова и др.

Глубокие исследования по изучению нагруженности и прочности конструкций подвижного состава ведутся во ВНИИЖТе, в университетах путей сообщения городов Москвы, Санкт-Петербурга, Хабаровска, Омска, Днепропетровска, Екатеринбургa, ФГУП «ПО Уралвагонзавод» и в других организациях.

Отмечается, что в современных условиях большое развитие получили численные методы расчета НДС конструкций и, в частности, метод конечных элементов. Это объясняется удобством для расчетов на ЭВМ, простотой алгоритмизации, возможностью учета в одной модели многих факторов и особенностей исходной конструкции и т.д. Поэтому в качестве основного инструмента расчета в рамках данной работы был выбран МКЭ.

В связи с тем, что котел имеет особенность в виде увода кромок сварного шва, задача определения НДС такой конструкции значительно усложняется. Однако для достоверности результатов получаемое по МКЭ решение необходимо сравнивать с известными и апробированными решениями для аналогичных задач.

С целью поиска и разработки метода решения задачи НДС котла для верификации результатов, полученных по МКЭ, был проведен анализ современных методик, пригодных для определения НДС резервуаров и труб, имеющих несовершенство формы поперечного сечения. Из общего числа различных методик было выделено несколько вариантов: методика, основанная на методе сил, модифицированная автором в рамках данной работы; методики, основанные на решениях с использованием рядов Фурье, предложенные в МИИТе и в трудах П.Ф. Папковича; точечная оценка НДС котла непосредственно в вершине увода шва согласно «Справочника по судостроению» под редакцией А.А. Уманского. По расчетной схеме, приведенной на рисунке 4, были выполнены расчеты по анализу НДС котла с уводом сварного шва по перечисленным методикам.

В качестве нагрузки было принято внутреннее испытательное давление $q = 0,4$ МПа. Увод кромок шва $f = 3$ мм равномерный по длине всей образующей, что позволяет рассматривать задачу в двумерной постановке.

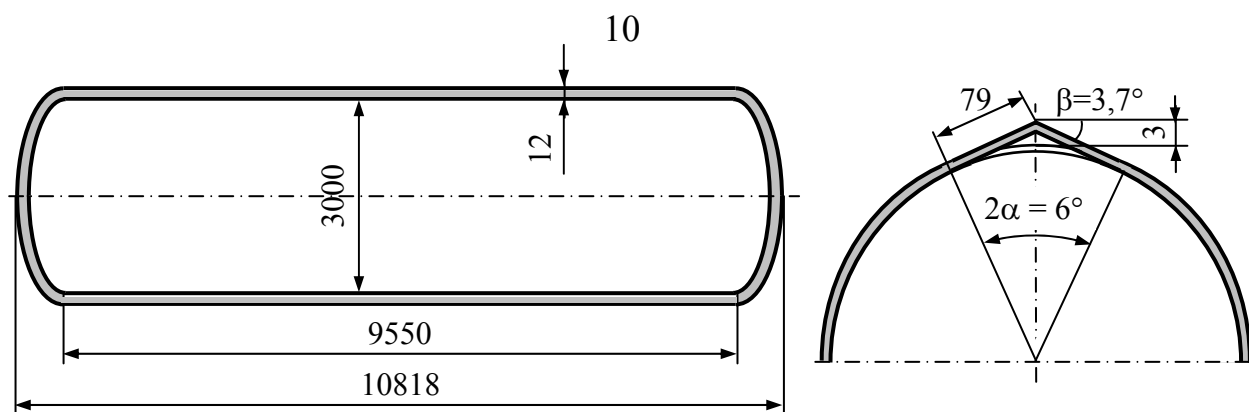


Рисунок 4 – Геометрические параметры модели

Значения напряжений в вершине участка увода шва и в точке сопряжения прямого и дугового участков приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экстремальные эквивалентные напряжения в обечайке котла

Точки определения напряжений	Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, МПа			
	Метод сил	Точечная оценка	Решения в рядах Фурье	
			МИИТ	П.Ф. Папкович
В вершине участка увода шва	107,57	110,57	104,66	95,58
В точке сопряжения прямого и дугового участков	39,79	–	39,85	41,03

Анализ полученных результатов, приведенных в таблице 1, позволяет сделать вывод, что значения, определенные по разным методикам могут отличаться на $3 \div 16\%$, что приемлемо для технических расчетов. Однако каждая из приведенных методик обладает рядом существенных недостатков. Решение, полученное по теоремам Максвелла-Мора, требует вычисления 12 дополнительных коэффициентов, входящих в уравнения тангенциальных сил Q , нормальных сил T и изгибающих моментов M на продольных площадках обечайки, что затрудняет анализ этих уравнений. Методика, предложенная в МИИТе, требует удержания до 600 членов ряда для получения достоверных результатов и требует привлечения ЭВМ. Точечные оценки не дают представления об НДС котла в поперечном сечении обечайки, кроме вершины участка увода шва.

Таким образом, анализ работ в области исследований НДС тонких цилиндрических оболочек с геометрическими несовершенствами показал, что решение задачи существующими методами связано со значительными трудностями. В ряде случаев для проверки своих результатов исследователь вынужден решать задачу с привлечением ЭВМ, программированием или использованием специализированных расчетных программ.

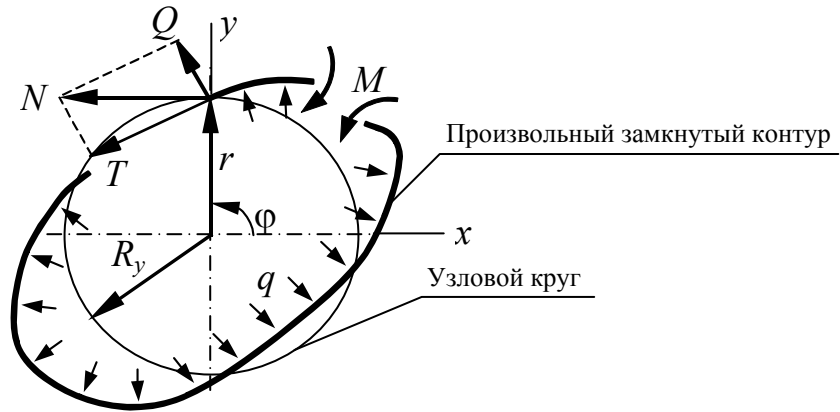
В связи с этим ни одна из рассмотренных методик не может быть выбрана в качестве верификационной для решения поставленной задачи. Поэтому автор приступает к разработке аналитической методики оценки НДС котла цистерны с учетом увода кромок сварного шва. Особое внимание уделено тому, что методика должна позволять производить быстрые вычисления без привлечения мощных вычислительных средств.

Третья глава посвящена разработке аналитической методики оценки НДС котла цистерны с учетом увода кромок сварного шва, основанной на известных зависимостях, какими в работе рассматриваются теоремы Марбека.

Из этих теорем известно, что если знать профиль поперечного сечения обечайки после деформации, например путем измерения, то можно однозначно определить кольцевые напряжения в любой точке профиля. Если априори известно, что деформации под нагрузкой малы, то достаточно знать форму начального профиля. При производстве котлов цистерн начальную форму поперечного сечения контролируют, измеряя отклонения, следовательно, она известна. На факте знания формы профиля и на теоремах о равнодействующей кольцевых сил N и кольцевом моменте M в тонких телах, нагруженных равномерно распределенными силами, построена разрабатываемая методика. Для замкнутых профилей доказательство этих теорем сформулировано французским инженером Марбеком и изложено в работе П.Ф. Папковича. Первая теорема утверждает (рисунок 5)

$$N = q \cdot r, \quad N \perp r, \quad (1)$$

где N – равнодействующая кольцевых внутренних сил T и Q ; q – равномерно распределенная нагрузка; r – радиус-вектор из центра сил.



где s – координата, отсчитываемая вдоль периметра контура от произвольно выбранной фиксированной его точки; EI – изгибная жесткость профиля, заданная как функция от s ; x , y – декартовы координаты точки контура, соответствующие рассматриваемому значению s .

Рисунок 5 – Теоремы Марбека

Вторая теорема гласит

$$M = q(r^2 - R_y^2)/2, \quad (2)$$

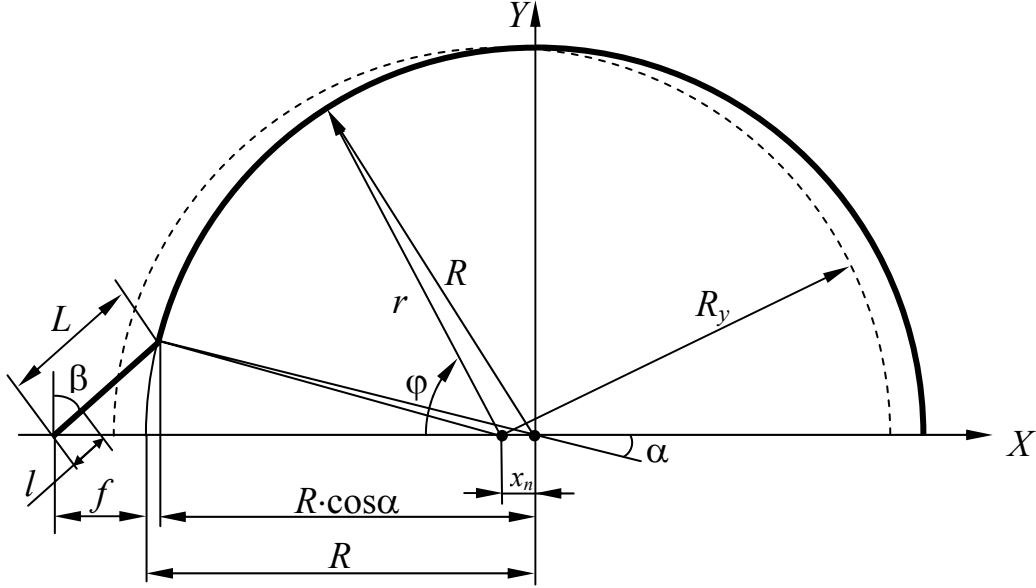
где M – изгибающий момент; R_y – радиус узлового круга.

Третья теорема определяет координаты центра сил и радиуса узлового круга

$$R_y^2 = \frac{\int \frac{r^2}{EI} ds}{\int \frac{1}{EI} ds}, \quad x_n = \frac{\int \frac{x}{EI} (x^2 + y^2) ds}{2 \int \frac{x^2}{EI} ds}; \quad y_n = \frac{\int \frac{y}{EI} (x^2 + y^2) ds}{2 \int \frac{y^2}{EI} ds}. \quad (3)$$

Интегралы в формулах (3) предполагаются взятыми по всей длине периметра рассматриваемого контура. Для симметричных профилей центр сил совпадает с центром симметрии профиля и началом полярных координат r , φ .

По формулам (3) были определены значения координат центра сил x_n и y_n с учетом горизонтальной симметрии профиля. Затем для прямолинейного и дугового участков были получены выражения для радиус-вектора из центра сил r и радиуса узлового круга R_y , выраженные через геометрические параметры профиля (рисунок 6).



R – радиус обечайки; f – амплитудное значение отклонения; 2α – угол раствора поперечного сечения уклона; β – угол между вертикальной осью и прямолинейным участком сечения; l – текущая координата прямолинейного участка сечения; L – длина прямолинейного участка; φ – текущая координата по дуге; x_n – координата центра сил по оси X

Рисунок 6 – Схема расчета обечайки с угловатостью

Подставляя эти выражения в формулы (1) и (2) и решая их, для каждого участка в замкнутой форме получены выражения внутренних кольцевых усилий N и M :

$$\left. \begin{aligned} N_l &= q \sqrt{R^2 (B-a)^2 - 2Rl(B-a) \sin \beta + l^2}; \\ N_\varphi &= q \sqrt{R^2 (1 - 2a \cos \varphi + a^2 \cos 2\varphi)}. \end{aligned} \right\} \begin{aligned} 0 < l < L; \\ \alpha < \varphi < \pi; \end{aligned} \quad (4)$$

$$M_l = \frac{q}{2} \left(R^2 (B-a)^2 - 2Rl(B-a) \sin \beta + l^2 - R^2 \times \right. \\ \left. \times \frac{\pi - \alpha + (B-a)L/R [(B-a) - \sin \alpha \tan \beta] + L^3/3R^3 + a \cdot \sin \alpha (2 - a \cdot \cos \alpha)}{L/R + \pi - \alpha} \right) \text{ при } 0 < l < L;$$

$$M_\varphi = \frac{q}{2} \left(R^2 (1 - 2a \cos \varphi + a^2 \cos 2\varphi) - R^2 \times \right. \\ \left. \times \frac{\pi - \alpha + (B-a)L/R [(B-a) - \sin \alpha \tan \beta] + L^3/3R^3 + a \sin \alpha (2 - a \cos \alpha)}{L/R + \pi - \alpha} \right) \text{ при } \alpha < \varphi < \pi, \quad (5)$$

где
$$B = \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\cos \beta}; \quad a = \frac{L}{2R} \cdot \frac{B + \cos \alpha - 2 \cos \beta}{\pi - \alpha - L/R}.$$

Для определения суммарных кольцевых и продольных напряжений в произвольном сечении профиля в работе использованы известные формулы

$$\sigma_1 = \frac{N_j}{h} \pm \frac{6M_j}{h^2}; \quad \sigma_2 = \sigma_{2M} \pm \frac{6\mu M_j}{h^2}, \quad (6)$$

где N_j и M_j – соответственно сила и изгибающий момент в данном кольцевом сечении, равные N_l и M_l для прямого участка или N_ϕ и M_ϕ для криволинейного участка обечайки; h – толщина обечайки; $\sigma_{2M} = q \cdot R / 2h$; μ – коэффициент Пуассона.

Далее производилась проверка полученных зависимостей. С этой целью была решена задача оценки НДС котла из главы 2, по схеме, приведенной на рисунке 4. Результаты решения сопоставлялись с результатами известных методик, рассмотренных в главе 2 (таблица 1). Значения эквивалентных напряжений, полученные по разработанной методике, в характерных точках профиля составили: в вершине увода шва – 108,08 МПа; в точке сопряжения прямого и дугового участков – 41,72 МПа. Максимальная относительная погрешность по сравнению с приведенными в таблице 1 значениями составила менее 5 %, что подтверждает адекватность разработанной методики.

Таким образом, разработана аналитическая методика, позволяющая с достаточной точностью определять напряжения в обечайке с уводом кромок сварного шва. Следует подчеркнуть, что если известна форма деформированного поперечного сечения, то значения напряжений, полученные по разработанной методике, будут истинными с точностью до погрешностей измерений.

Четвертая глава посвящена анализу НДС котла с уводом сварного шва по МКЭ и верификации результатов конечно-элементных расчетов с результатами, полученными с использованием разработанной методики. При оценке НДС котла рассмотрены два типа увода шва – увод наружу и внутрь котла.

В настоящей работе была реализована пластинчатая модель. Котел цистерны аппроксимирован 4-х узловыми оболочечными элементами Shell181. Этот элемент позволяет реализовать геометрию увода шва и, кроме того, получать значения трех внутренних силовых факторов T , Q и M , которые необходимы для верификации КЭ решения.

В связи с тем, что котел имеет две оси симметрии, модель представлена в виде $\frac{1}{4}$ котла с симметричным закреплением и состоит из 18358 элементов и 18712 узлов. Размер конечных элементов уменьшен непосредственно в зоне увода кромок сварного шва. Согласно поставленной задаче, в модели не учитывались такие концентраторы напряжений как опоры котла, зона люка-лаза, зона сливного прибора и др.

В связи с необходимостью оценки общего НДС котла с уводом сварного шва, была разработана базовая модель, которая позволяла изменять параметры зоны увода (f , α) и толщину стенки котла h при неизменной геометрии котла (R , L) и величине нагрузки q .

На модели были проведены многовариантные расчеты. В качестве первого варианта была выбрана модель с параметрами, приведенными на рисунке 4. Результаты КЭ расчета сопоставлялись с результатами, полученными по разработанной методике и по рассмотренным во второй главе решениям. На рисунке 7, а приведена эпюра распределения эквивалентных напряжений на внутренних волокнах обечайки котла в сечении, равноотстоящем от обоих краев обечайки. Ну-

левая отметка соответствует нижней образующей котла. На рисунке 7, б в увеличенном масштабе показаны эквивалентные напряжения непосредственно в зоне увода шва.

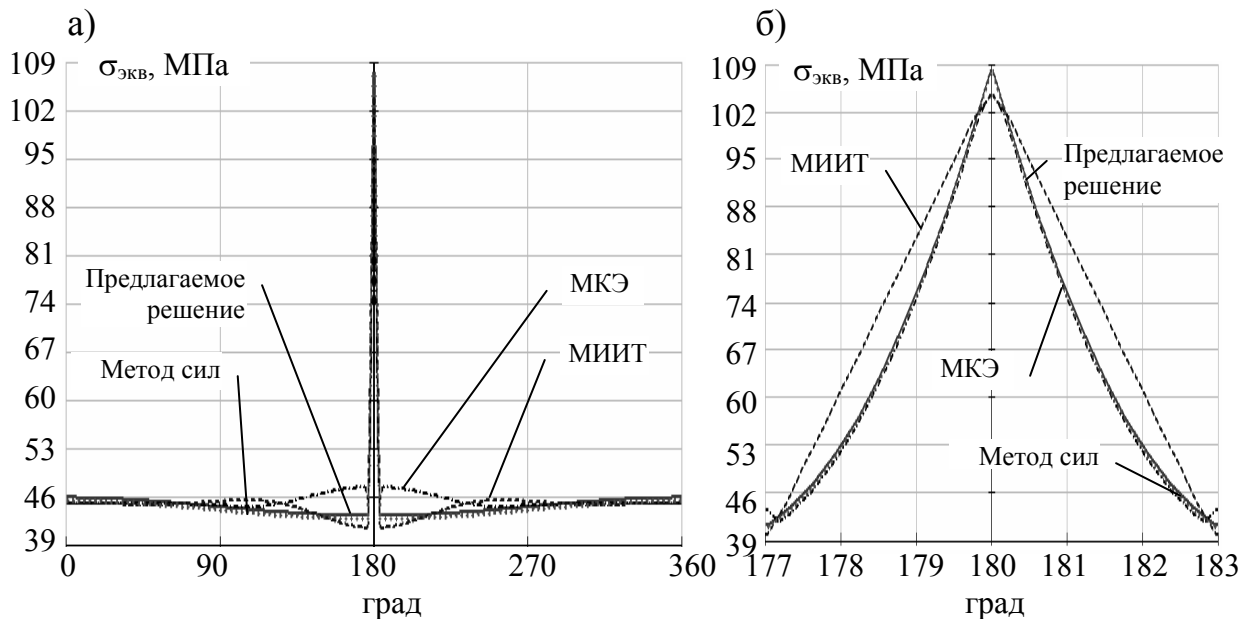


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений на внутренних волокнах обечайки при уводе шва наружу котла по периметру сечения (а), на участке увода шва (б),

На рисунке 8, а, б приведена эпюра распределения эквивалентных напряжений на внешних волокнах обечайки котла в сечении, равноотстоящем от обоих краев обечайки для случая увода шва внутрь котла.

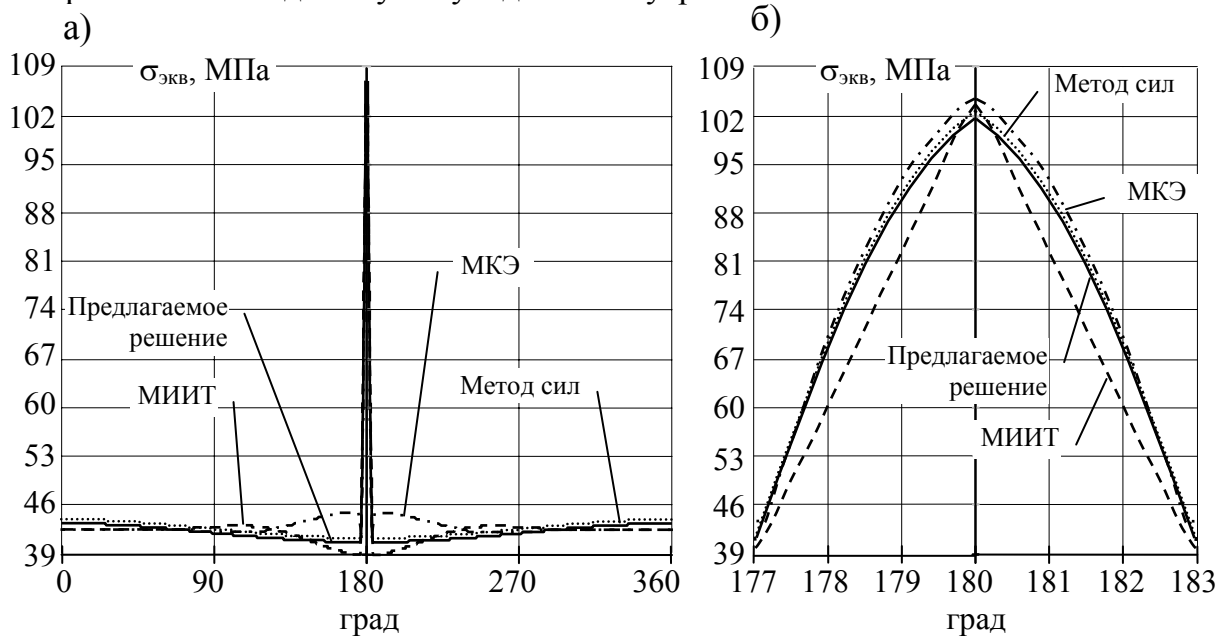


Рисунок 8– Распределение эквивалентных напряжений на внешних волокнах обечайки при уводе шва внутрь котла по периметру сечения (а), на участке увода шва (б)

На основе анализа графиков можно сделать вывод, что разработанная КЭ модель правильно отражает работу реальной конструкции, т.к. дает результаты,

которые хорошо согласуются с результатами, полученными по разработанной методике и по рассмотренным ранее решениям.

Далее, для изучения влияния параметров и типов увода шва на НДС котла, проводились расчеты со ступенчатым изменением следующих характеристик модели: угол раствора зоны угловатости $\alpha = 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$; толщина обечайки $h = 8 \text{ мм}, 10 \text{ мм}, 12 \text{ мм}$; значение радиального отклонения при наличии увода шва наружу котла $f = 1 \text{ мм}, 2 \text{ мм}, 3 \text{ мм}, 4 \text{ мм}$; значение радиального отклонения при наличии увода внутрь котла $f = -1 \text{ мм}, -2 \text{ мм}, -3 \text{ мм}, -4 \text{ мм}$. Таким образом, для каждого из двух типов увода шва был проведен расчет по 36 вариантам сочетания параметров увода шва (f, α) и толщины обечайки котла h .

В результате расчетов были установлены закономерности изменения уровня напряжений по периметру обечайки котла в зависимости от ее толщины и типов увода шва. Процесс перераспределения полей напряжений, обусловленный наличием дополнительного изгибающего момента на продольных площадках обечайки, приводит к возникновению зон локальной концентрации с увеличением уровня напряжений в 1,5-3,9 раза.

Установлены параметры, от которых зависят значения максимальных напряжений для каждого из двух типов увода шва. На основе проведенного анализа обоснован предпочтительный тип увода шва – увод наружу котла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана аналитическая методика оценки НДС котла цистерны с уводом кромок сварного шва. Нижеприведенные выводы и результаты являются составными частями решенной задачи:

1. Установлено при обследовании котлов цистерн модели 15-150, что основным геометрическим несовершенством формы профиля обечайки является увод замыкающего сварного шва. По результатам обследований выявлено, что в замыкающем сварном шве 10 % котлов имеет угловатость 3 мм, 20 % – 2 мм, 43,33 % – 1 мм и 26,67 % не имеет угловатости. Остальные сварные швы на 86,67 % котлов не имеют отклонения геометрической формы в виде угловатости, и 13,33 % имеет угловатость менее 1 мм.

2. Выполнен анализ и систематизация известных решений в области исследований НДС тонких цилиндрических оболочек с геометрическими несовершенствами. Результатом анализа явился вывод о необходимости разработки аналитической методики оценки НДС котла цистерны с учетом увода кромок сварного шва, пригодной для верификации результатов расчетов, выполненных по другим методикам.

3. Разработана и верифицирована аналитическая методика оценки НДС котлов цистерн с несовершенством формы обечайки в виде увода кромок сварного шва. Методика основана на теоремах о равновесии внутренних усилий в сечениях обечайки (теоремы Марбека) и может быть использована для расчета на прочность сосудов с уводом кромок сварного шва как наружу, так и внутрь обечайки. Верификация методики путем решения тестовых задач и сопоставления их с результатами известных решений показала, что максимальная погрешность результатов составила менее 5% для случая увода шва наружу котла и менее 4% для случая увода шва внутрь котла. Это говорит об адекватности разработанной аналитической методики.

4. Разработана параметрическая конечно-элементная модель для определения напряженно-деформированного состояния котлов цистерн на основе пластинчатых конечных элементов, учитывающая многовариантность геометрических параметров увода шва и котла.

5. Установлены закономерности изменения уровня напряжений по периметру обечайки котла в зависимости от ее толщины и типов увода шва. Процесс перераспределения полей напряжений, обусловленный наличием дополнительного изгибающего момента на продольных площадках обечайки, приводит к возникновению зон локальной концентрации с увеличением уровня напряжений в 1,5-3,9 раза.

6. Установлены параметры, от которых зависят значения максимальных напряжений для каждого из двух типов увода шва. Для случая увода шва наружу котла рост напряжений обусловлен только увеличением значения увода шва f . Сечение, в котором напряжения принимают максимальные значения расположено в вершине угловатости. Для случая увода шва внутрь котла определяющими параметрами являются величина увода шва f и угол раскрытия зоны увода α . При этом, среди исследованных вариантов с уводом шва внутрь котла, где угол раскрытия максимален $\alpha = 5^\circ$, пиковое значение напряжений приходится на сечение, расположенное на участке увода шва, но не совпадающее с вершиной угловатости.

7. Обоснован выбор предпочтительного типа увода шва с точки зрения обеспечения прочности – увод наружу котла. Для всех рассчитанных вариантов с уводом шва наружу котла уровень максимальных напряжений не выше, чем в аналогичных вариантах с уводом шва внутрь котла, а для вариантов с максимальным углом раскрытия, полученные напряжения значительно ниже (до 34,1%), чем для вариантов с уводом шва внутрь котла. Кроме этого, при уводе шва внутрь котла, уровень напряжений зависит от двух параметров: величины увода f и угла раскрытия зоны увода α , а значения максимальных напряжений не всегда находятся в вершине зоны увода.

8. Обоснованы практические рекомендации по уменьшению влияния увода замыкающего сварного шва на напряженно-деформированное состояние котла. Особенно актуальными эти рекомендации являются для вновь проектируемых котлов, и котлов, изготавливаемых из новых материалов (алюминий и др.), т.е. в случаях, где требуется проводить полный комплекс оценки НДС котла.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Архипов А.В., Смольянинов А.В. Концентрация напряжений в зоне геометрических отклонений формы котла цистерны // Транспорт Урала. 2007.- № 1. – С. 53-64. **(входит в перечень ВАК)**

2. Архипов А.В. К вопросу об отклонениях формы цилиндрической части котла цистерны. // Тр. науч.-тех. конф. Молодые ученые – транспорту. – Екатеринбург: УрГУПС, 2001. – С. 241-247.

3. Архипов А.В. Математические модели геометрических характеристик тонких цилиндрических оболочек. // Тр. науч.-тех. конф. Молодые ученые – транспорту. – Екатеринбург: УрГУПС, 2001. – С. 232-240.

4. Архипов А.В. Верификация методик расчета напряженно-деформированного состояния конструкций, имеющих сварные швы с угловатостью. // Тр. VI межвузовской науч.-тех. конф. Молодые ученые – транспорту. Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – С. 70-77.

5. Архипов А.В. Оценка напряженного состояния котла цистерны с угловатостью в продольном сварном шве. Безопасность движения, совершенствование конструкций вагонов и ресурсосберегающие технологии в вагонном хозяйстве: Сб. научн. трудов, посв. 50-летию УрГУПС и 35-летию механ. факультета // Под ред. проф. А.В. Смольянинова. – Екатеринбург: УрГУПС. № 38(121). – 2005. – С. 29-38.

6. Архипов А.В., Смольянинов А.В. Напряженно-деформированное состояние котла цистерны с учетом его геометрических несовершенств // Транспорт Урала. – 2006. – № 3. – С. 41-47.

7. Архипов А.В., Смольянинов А.В. Численные исследования влияния увода кромок сварного шва на напряженно - деформированное состояние котла цистерны // М.: 2007. – 13 с., Деп. в ВИНТИ, № 69-В2007 от 24.01.2007.

8. Архипов А.В., Кузнецов В.А., Смольянинов А.В. Сопоставление методов расчета некруговых цилиндрических оболочек // Тр. XXXI уральского семинара. Механика и процессы управления. – Екатеринбург: УрГУПС, 2001. – С. 104-114.

9. Архипов А.В., Кузнецов В.А., Смольянинов А.В. Расчет тонких некруговых цилиндрических оболочек с большим перепадом кривизны. // Сб. научных трудов. Безопасность движения, совершенствование конструкций вагонов и ресурсосберегающие технологии в вагонном хозяйстве – Екатеринбург: УрГУПС, 2003. – С. 109 – 127.

10. Архипов А.В., Кузнецов В.А., Смольянинов А.В. Анализ результатов численного и аналитического расчетов тонкой эллиптической оболочки, нагруженной внутренним давлением. // Труды Всероссийской науч.-тех. конф. Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта. – Екатеринбург: УрГУПС, 2003. – С. 127-138.

АРХИПОВ Андрей Владимирович

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
КОТЛА ЦИСТЕРНЫ, ИМЕЮЩЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ
НЕСОВЕРШЕНСТВА**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация

Подписано в печать 10.04.2007 г.

Формат бумаги 60х84 1/16. Объем 1,1 п.л. Заказ 100 Тираж 100 экз.

Типография УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, Колмогорова, 66