

*На правах рукописи*



БИККИНИН АЙДАР ИЛШАТОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО  
РЕЗЕРВУАРА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ КОНСТРУКЦИИ  
УТОРНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ**

Специальность: 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,  
баз и хранилищ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа - 2020

Работа выполнена на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель                      доктор технических наук, профессор  
**Ризванов Риф Гарифович**

Официальные оппоненты:                **Бурков Петр Владимирович,**  
доктор технических наук,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»/  
отделение нефтегазового дела, профессор

**Лежнев Михаил Александрович,**  
кандидат технических наук,  
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени  
И.М. Губкина»/ кафедры «Сооружение и ремонт  
газонефтепроводов и хранилищ», доцент

Ведущая организация                      ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный  
университет» (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 16.04.2020 г. в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 года.

Ученый секретарь



Султанов Шамиль Ханифович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

В Российской Федерации эксплуатируется значительное количество резервуаров, предназначенных для операций по сбору, хранению, а также осуществления технологических переключений и учета нефти и нефтепродуктов. Конструкция представляет собой резервуар вертикальный стальной, изготавливаемый технологией разворачивания рулона и листовой сборки. Несмотря на то, что технология изготовления таких резервуаров отработана достаточно давно, риск возникновения дефекта в сварном соединении остается достаточно высоким.

Наиболее частым является дефект сварного соединения. Высокий уровень напряжений, несоблюдение технологии и режима изготовления при строительстве значительным образом сказываются на технологических свойствах соединения.

Важнейшим направлением развития технологий изготовления нефтегазового оборудования и сооружений является создание таких технологических процессов, которые позволят в течение всего срока эксплуатации оборудования соответствовать заявленным характеристикам в вопросах обеспечения показателей безопасности, надежности и др. Существующие нормы, заложенные в технической документации, предписывают ограничения, не всегда выполнимые при монтажных операциях. Поиск соответствующих технологических решений, направленных на улучшение характеристик изготавливаемого оборудования, является актуальной задачей отечественного нефтегазового комплекса.

### **Степень разработанности темы**

Результаты исследований отечественных и зарубежных ученых В.А. Винокурова, В.Л. Березина, В.А. Буренина, А.А. Тарасенко, А.А. Землянского, М.Г. Каравайченко, Е.Е. Семина, М.К. Сафаряна, Р.К. Malhotra, D. Swenson и др. обосновывают появление значительного количества повреждений в окрайке и уторном узле стальных вертикальных резервуаров под воздействием эксплуатационных нагрузок. Однако в настоящее время несовершенство конструкции уторного сварного соединения и

отсутствие достоверной методики прогнозирования остаточного ресурса не позволяют в полной мере использовать ресурсный потенциал резервуаров вертикальных стальных.

### **Цель работы**

Разработка технических и методических подходов, применение которых на стадии проектирования и изготовления позволит повысить долговечность уторного узла вертикального стального резервуара.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи исследования:**

1 Разработка численной модели уторного сварного соединения вертикального стального резервуара, верификация разработанной модели. Оценка напряженно-деформированного состояния исследуемых типоразмеров уторного узла.

2 Исследование влияния величины технологического непровара уторного узла вертикального стального резервуара на его ресурс.

3 Разработка усовершенствованной конструкции уторного сварного соединения вертикального стального резервуара.

4 Разработка методики оценки циклической долговечности для уторных узлов усовершенствованной конструкции.

### **Научная новизна**

1 Впервые получена зависимость циклической долговечности образцов из стали 09Г2С, напряженно-деформированное состояние которых максимально приближено к условиям работы уторного узла стального вертикального резервуара, от величины технологического непровара. Показано, что изменение величины технологического непровара от 0 до 3 мм снижает долговечность уторного узла на 30 %.

2 Получена численная модель испытательного образца, моделирующего напряженно-деформированное состояние уторного узла резервуара при циклическом нагружении, которая позволяет повысить точность воспроизведения эквивалентных напряжений в испытательном образце на 18,6 % для уторных узлов с толщиной стенки близкой или равной толщине окрайки.

3 Экспериментальным путем на образцах, моделирующих предварительный выгиб в уторном узле, получены значения уточняющих коэффициентов, которые могут быть применены при проектировочных расчетах долговечности вертикальных стальных резервуаров объемом от 5000 до 50000 м<sup>3</sup>, изготовленных из стали 09Г2С.

### **Теоретическая значимость**

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании выбора оптимальных параметров нагружения испытательного образца уторного сварного соединения исходя из характера распределения напряжений по внутренней поверхности уторного узла. Приведенные данные позволяют получить оценку долговечности при определении величины допустимых дефектов уторных сварных соединений, а также повысить достоверность оценки ресурса уторных узлов.

### **Практическая значимость работы**

Разработана и внедрена конструкция уторного сварного соединения вертикального стального резервуара, позволяющая повысить ресурс работы узла. Получен патент на полезную модель резервуара РФ №164588, опубл. 30.03.2016 г. (Внедрено в ПАО АК «Востокнефтезаводмонтаж»).

### **Методология и методы исследования**

Для решения задач механики деформируемого тела применялись универсальные программные комплексы на основе метода конечных элементов. Результаты моделирования верифицировались путем проведения натурных экспериментальных исследований по определению циклической выносливости, обработка результатов проводилась с применением методов математической статистики. Для определения степени компенсации амплитуды напряжений использовались методы математического анализа.

### **Положения, выносимые на защиту**

1 Методика оценки циклической долговечности уторного узла вертикального стального резервуара, выполненного с предварительным выгибом окрайки.

2 Совокупность установленных в результате исследования закономерностей влияния параметров уторного сварного вертикального стального резервуара на его циклическую долговечность.

3 Научно обоснованные геометрические параметры образцов и схема их нагружения при проведении испытаний на циклическую выносливость уторного сварного соединения вертикального стального резервуара.

4 Усовершенствованная конструкция уторного узла, позволяющая повысить ресурс вертикальных стальных резервуаров.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов и выводов подтверждается сходимостью полученных теоретических результатов с данными лабораторных экспериментов, использованием при проведении численного моделирования сертифицированных программ (ANSYS) и поверенных универсальных испытательных машин при оценке циклической выносливости образцов.

### **Апробация результатов**

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: X-й международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт - 2015» (г. Уфа, 2015 г.); научно-практической конференции «Сварка и контроль – 2016» (г. Уфа, 2016 г.); 66-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2015 г.); XI-й международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт - 2016» (г. Уфа, 2016 г.); IX-й международной научной конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2016», (г. Уфа, 2016 г.); XII-й международной научной конференции «Трубопроводный транспорт - 2017» (г. Уфа, 2017 г.); VII-й международной научной конференции «Наукоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса в год экологии в России» (г. Уфа, 2017 г.); XII-й научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2018 г.)

### **Соответствие паспорту научной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле специальности 25.00.19: напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ (п. 1).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, получен 1 патент на полезную модель.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, содержит 121 страницу машинописного текста, в том числе 55 рисунков, 16 таблиц, список литературы, включающий 164 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнен анализ технологий сборки уторных узлов резервуаров, требований нормативных документов к техническим параметрам, приведена статистика отказов, осуществлен патентный поиск существующих решений по совершенствованию конструкции и увеличению срока безопасной эксплуатации уторного узла.

Анализ распределения дефектов по конструктивным элементам вертикальных стальных резервуаров (Рисунок 1) показал, что большая доля дефектов сконцентрирована в днище.

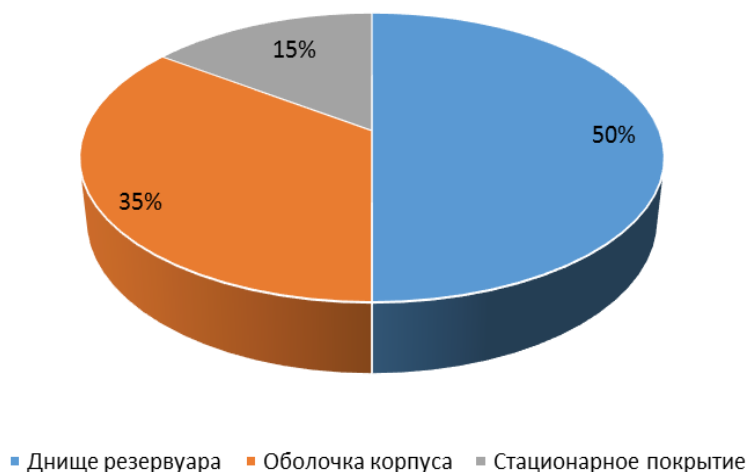


Рисунок 1 – Распределение дефектов по конструктивным элементам резервуаров

Изучение современного состояния технологий строительства резервуаров, а также существующей нормативной и технической документации показало необходимость совершенствования конструкции и увеличения срока службы уторных узлов вертикальных стальных цилиндрических резервуаров.

Существующая технология строительства методом полистовой сборки поясов предусматривает монтаж и сварку трех первых поясов и последующую приварку их к окрайке днища резервуара, при этом регламентированная величина зазора между нижним поясом и окрайкой должна находиться в допусковых пределах (до 2 мм).

В ходе анализа строительных работ выявлено отклонение от допусковых значений зазора. Длина участков, на которых указанный зазор превышает регламентные значения, достигает до 7 % от общей протяженности линии соприкосновения стенки и окрайки. Появление зазора выше допустимых норм обусловлено некачественной подготовкой поверхности бетонного основания и деформацией листов окрайки и стенки резервуара в процессе сборки.

Минимизация отклонения рассматриваемого зазора от нормативных значений возможна за счет изменения технологического процесса изготовления уторного узла.

Обзор существующей патентной базы для поиска наиболее эффективного решения по увеличению срока службы уторного соединения резервуара показал, что существующие решения подразумевают усложнение конструкции



узла и, как следствие, удорожание стоимости строительства резервуара. Таким образом, вопрос поиска недорогого и технологичного способа продления срока службы уторного сварного соединения вертикального стального резервуара является актуальной задачей для современного нефтегазового комплекса РФ.

Во **второй главе** выполнена оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) уторного сварного соединения вертикальных стальных цилиндрических резервуаров с использованием численного моделирования для приведенных в Таблице 1 параметров узла «1-й пояс стенки – окрайка днища». Геометрические параметры образцов приняты с учетом типовых проектных решений, применяемых в ПАО «Транснефть».

Таблица 1 – Параметры исследованных образцов уторного узла

Обозначение образца уторного узла	УУ-1	УУ-2	УУ-3	УУ-4	УУ-5
Номинальный объем резервуара, соответствующего типоразмеру уторного узла, м <sup>3</sup>	5000	10000	20000	30000	50000
Толщина 1-го пояса стенки, мм	9	10	13	22	28
Толщина окрайки днища, мм	9	9	9	14	16

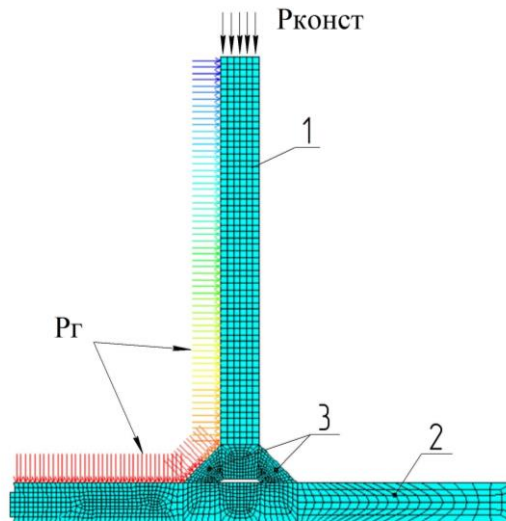
Механические свойства стали 09Г2С, использованные в расчетах, приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Механические характеристики стали 09Г2С

Характеристика	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Модуль упругости	E	МПа	$2,06 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	$\nu$	-	0,28
Плотность	$\rho_{ст}$	кг / м <sup>3</sup>	7850
Условный предел текучести	$\sigma_{0,2}$	МПа	330
Предел прочности	$\sigma_B$	МПа	500

Численное моделирование НДС производилось в программном комплексе ANSYS, реализующем метод конечных элементов. Геометрия расчетной области и схема расчетной конечно-элементной модели с приложенными нагрузками приведены на Рисунке 2. Модель представляет собой меридиональное сечение уторного узла резервуара, включающее металл стенки 1, днища 2 и уторное сварное соединение 3. Учитывая действие краевого

эффекта от совместного деформирования стенки и дна расчетную высоту стенки приняли 1,5 м. Геометрическая модель разбита на сетку конечных элементов PLANE183. Сетка конечных элементов нерегулярная со средним размером элементов 2 мм и сгущением вблизи сварного шва. Общее количество узлов в модели – 138500.



1 – стенка, 2 – окрайка дна, 3 – сварной шов  
 $P_{\text{конст}}$  – давление от веса верхней части резервуара,  $P_{\text{г}}$  – гидростатическое давление продукта

Рисунок 2 – Расчетная модель уторного узла

Взаимодействие дна резервуара с основанием задается контактом с коэффициентом трения  $\mu = 0,35$ . Гидростатическое давление продукта приложено в виде распределенной нагрузки к внутренней поверхности стенки, дна и сварному шву. К верхнему краю стенки приложена нагрузка, соответствующая весу верхних поясов, кровли и оборудования, устанавливаемого на стенку.

Для оценки адекватности произведенного численного расчета проведена проверка по аналитическим методикам определения перемещений и напряжений. Сущность метода заключается в решении канонического уравнения метода сил с целью вычисления изгибающего момента и поперечной силы, далее рассчитываются значения напряжений, возникающих от изгибающего момента в стенке и днище.

Полученные результаты решений аналитическим методом и с использованием численного моделирования показаны в Таблице 3. Значения

напряжений, полученные в результате расчета при использовании метода конечных элементов, отличаются от приближенного аналитического решения в среднем на 3,9 %.

Таблица 3 – Значения максимальных напряжений в уторном узле, МПа

Уторный узел	УУ-1	УУ-2	УУ-3	УУ-4	УУ-5
Аналитический расчет	245	262	284	186	174
Метод конечных элементов	260	270	280	188	160
$\Delta, \%$	5,7	2,9	1,4	1,0	8,8

На Рисунке 3 представлено распределение эквивалентных напряжений (по теории Мизеса) в уторном сварном соединении, полученное численным моделированием.

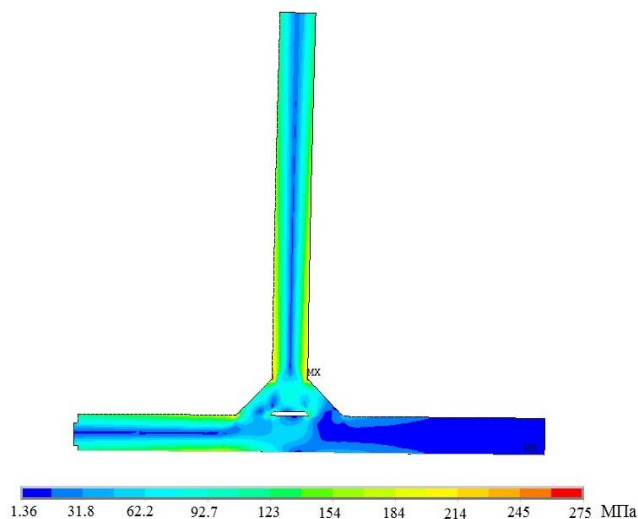


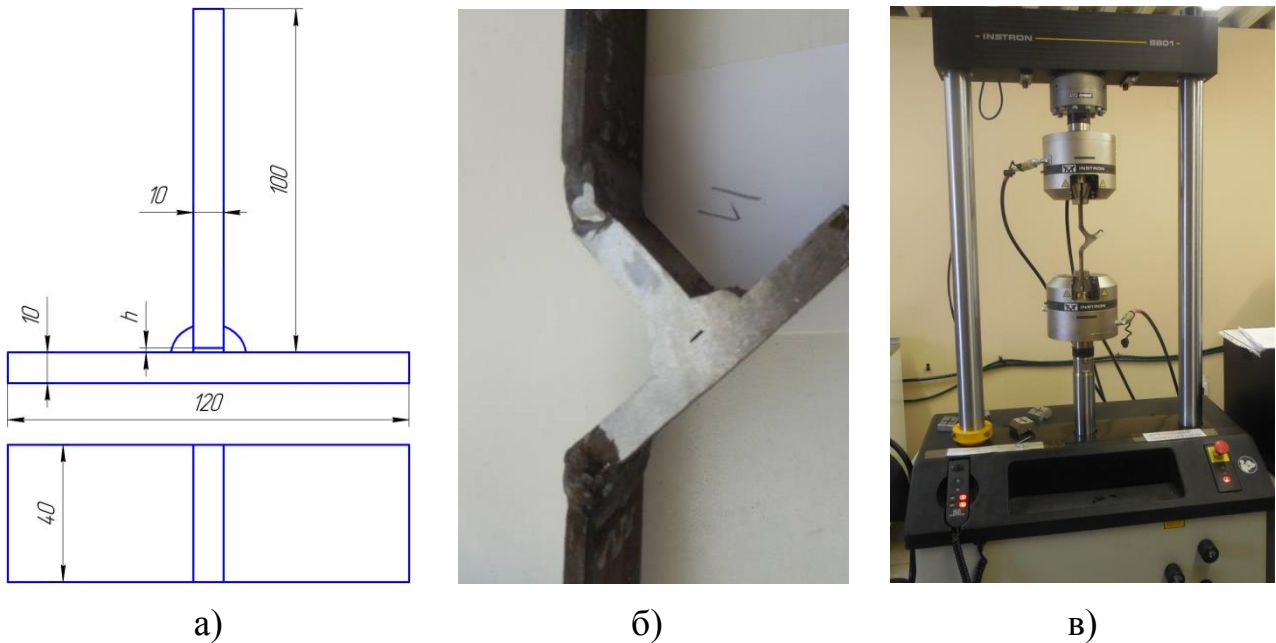
Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений в уторном узле УУ-1

Из Рисунка 3 видно, что напряжения достигают максимальной величины в точке сплавления сварного шва и металла стенки. Значения напряжений в этих точках находятся близко к пределу текучести. Следовательно, наиболее опасными с точки зрения циклической долговечности являются линии сплавления сварной шов - окрайка, сварной шов - стенка.

В третьей главе проведен анализ конструктивных особенностей уторного сварного соединения. Наличие конструктивного непровара затрудняет проведение достоверной диагностики узла неразрушающими методами контроля. С целью определения степени влияния непровара на ресурс уторного узла были проведены испытания сварных уторных узлов с различными вариантами исполнения (без зазора, с зазорами 1, 2 и 3 мм) на циклическую

долговечность (Рисунок 4).

Образцы для испытания, по 8 шт. каждого типа, сварены из стали 09Г2С, с применением механизированной сварки в среде углекислого газа проволокой диаметром 1,2 мм марки Св-08Г2С. Испытания проводились при нормальной температуре (20 °С). Максимальная нагрузка на образец составляла 10 кН, частота нагружения - 0,3 Гц. Цикл нагружения - мягкий асимметричный отнулевой.



а) схема образца; б) фото образца; в) проведение испытаний  
Рисунок 4 – Испытание образца на циклическую долговечность

Данные по циклической долговечности уторных узлов в зависимости от величины зазора между стенкой и окрайкой представлены на Рисунке 5.

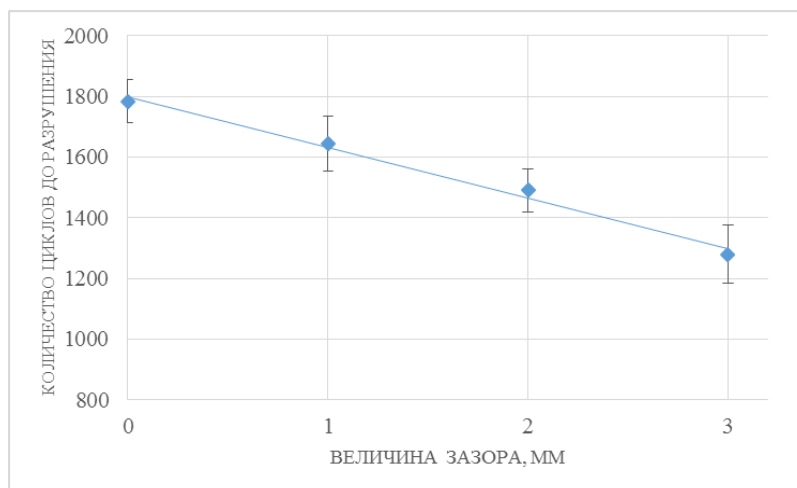


Рисунок 5 – Зависимость циклической долговечности образцов от зазора

Из Рисунка 5 видно, что при увеличении зазора от 0 до 3 мм количество циклов до появления трещины в узле снижается в среднем на 30 %, а при зазоре с максимально допустимым значением (2 мм) – на 17 %.

Для определения влияния остаточных сварочных напряжений, возникающих в уторном узле, на уровень деформаций в окрайке проведены измерения отклонения геометрии на натуральных образцах, полученных вырезкой из резервуара РВСП-20000, и образцах, изготовленных в лабораторных условиях. Угловые деформации при выполнении уторного шва в среднем составляют от 3 до 6 градусов. Результаты расчета деформаций, вызванных неравномерным нагревом металла по толщине краечного листа, проведенного по методике В.Н. Волченкова, коррелируют с экспериментальными данными.

Для уменьшения остаточных деформаций в настоящей работе применен способ обратного выгиба с пластическими деформациями, которые позволят компенсировать деформации, вызванные сварочными процессами.

Использование обратного выгиба приводит к снижению неравномерности зазора между стенкой и окрайкой вследствие деформационного воздействия от веса стенки. С целью оценки степени снижения неравномерности зазора между стенкой и окрайкой, окрайкой и фундаментным кольцом был проведен численный расчет деформаций в программном комплексе ANSYS. Расчетная модель включает окрайку с предварительным обратным выгибом, стенку резервуара, поверхность фундаментного кольца (Рисунок 6). Вес стенки резервуара задавался распределенной нагрузкой.

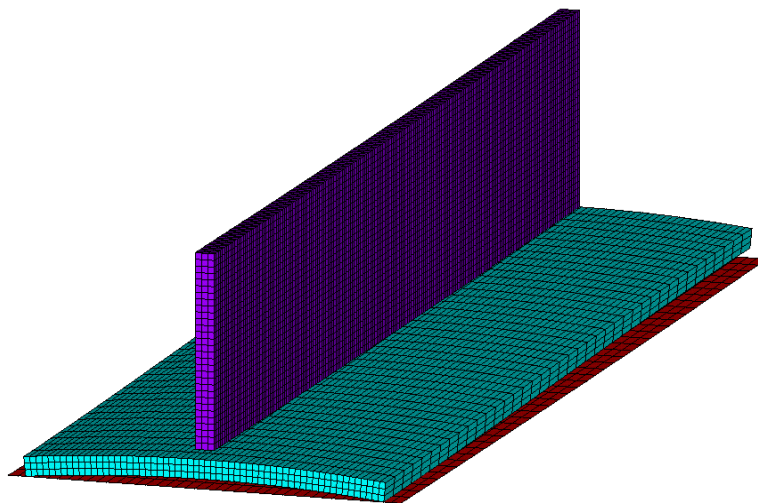


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель уторного узла с предварительным обратным выгибом окрайки

Построение модели предполагало наличие неравномерного зазора между стенкой и окрайкой для приближения условий моделирования к реальным. В результате расчета определено, что нагрузка от веса стенки резервуара позволяет устранить неравномерный зазор между стенкой и окрайкой и получить равномерный зазор между окрайкой и фундаментным кольцом. Последующая операция приварки позволяет устранить остаточный зазор окрайка – фундаментное кольцо за счет сварочных деформаций краечного листа. Графики изменения максимальной величины зазоров для уторного узла УУ-1 при увеличении нагрузки на стенку резервуара приведены на Рисунке 7.

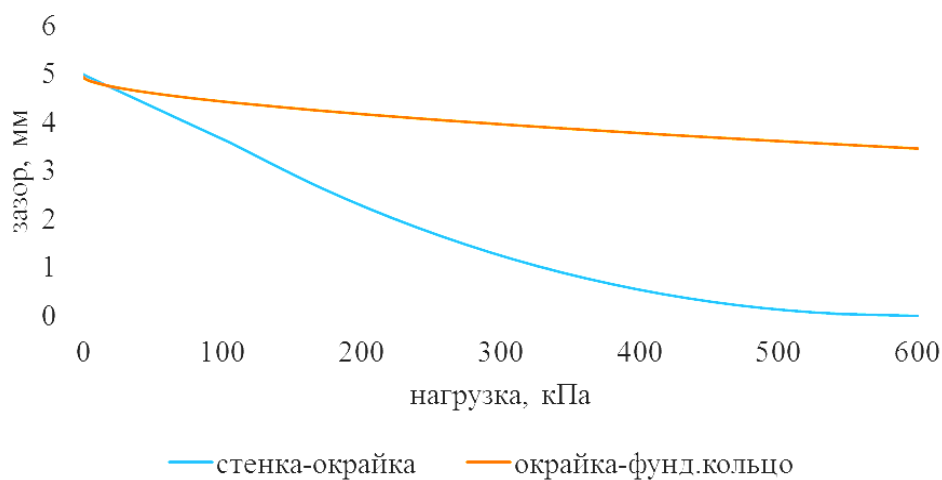
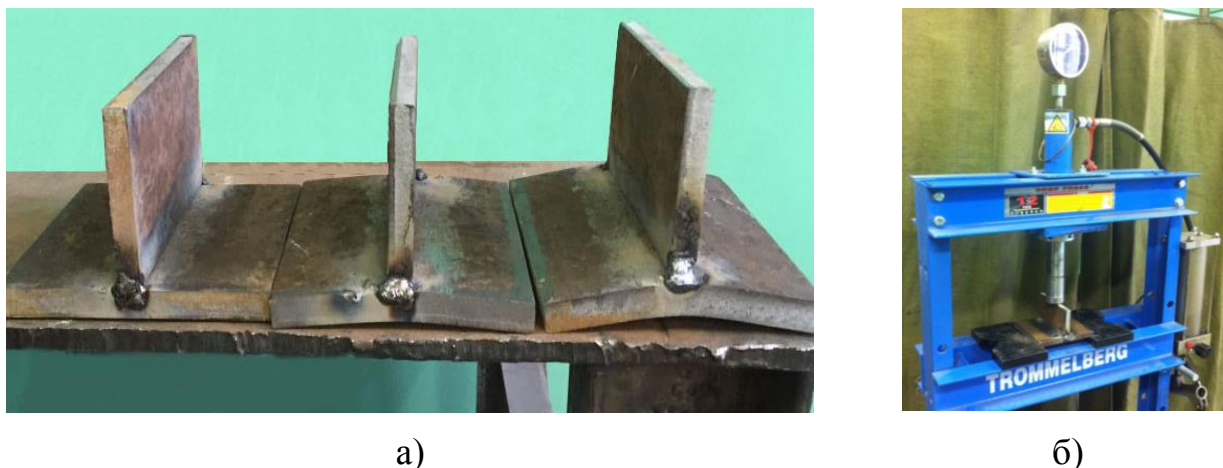


Рисунок 7 – График изменения максимальной величины зазора в контактах

Численным моделированием подтверждается эффективность предлагаемого технологического решения. Технология изготовления уторного узла резервуара с предварительным обратным выгибом краечного листа позволит устранить зазоры в соединении стенка - окрайка и тем самым повысить надежность узла.

Для определения необходимой величины выгиба были подготовлены 12 образцов из стали 09Г2С толщиной 10 мм (РВС-20000). Окрайки размером 120×130 мм выгибались на 3 и 6 мм, также были исследованы окрайки без обратного выгиба (Рисунок 8). Выступ окрайки с двух сторон принимался по 60 мм. К окрайкам приваривались стенки размером 120×60 мм механизированной сваркой в среде углекислого газа под действием усилия гидравлического пресса. Прессом создавалось усилие, соответствующее весу стенки резервуара РВС-20000.

Проведенные замеры деформации окрайки на образцах показали, что компенсационные деформации достигают 3 мм. В образцах без обратного выгиба деформация окрайки колеблется в пределах 2 - 3 мм. Полученные средние данные приведены на Рисунке 9.



а) собранные образцы с различной величиной выгиба окрайки; б) нагружение образца в процессе сварки

Рисунок 8 – Образцы с предварительным выгибом

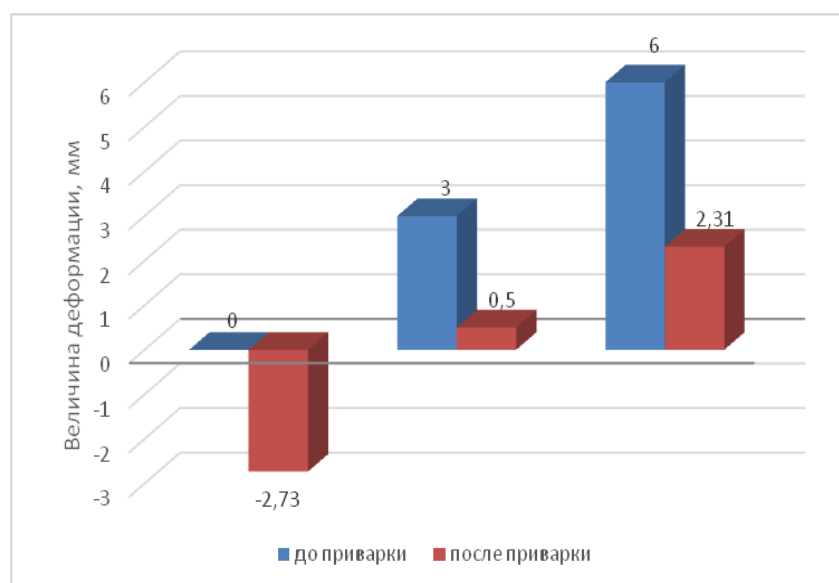
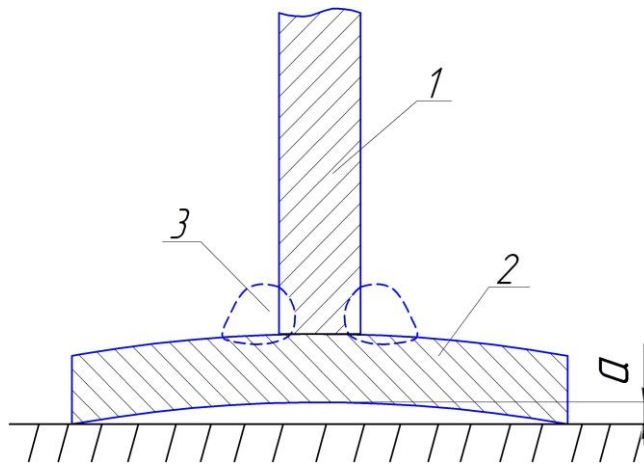


Рисунок 9 – Величина деформации образцов до и после сварки

Определена необходимая величина предварительного обратного выгиба для испытанных образцов, равная 3 мм. Основываясь на теоретических и экспериментальных данных, предложено техническое решение в виде усовершенствованной конструкции уторного сварного узла вертикального стального резервуара (Рисунок 10).



1 – стенка резервуара; 2 – крайка; 3 – сварной шов;  
а – величина предварительного выгиба крайки

Рисунок 10 – Конструкция уторного узла с предварительным выгибом до выполнения операции сварки

С учетом нормативной величины выступа крайки, согласно типовым нормам проектирования для исследуемых резервуаров, рассчитана величина предварительного выгиба с учетом деформаций от веса стенки (Таблица 4).

Таблица 4 – Величина предварительного обратного выгиба крайки

Уторный узел	УУ-1	УУ-2	УУ-3	УУ-4	УУ-5
Величина предварительного выгиба, мм	3,5	4	5,6	6,7	7,2

В **четвертой главе** проведена оценка соответствия существующей испытательной модели уторного узла (модель №1), предложенной Е.Е Семиным и применяемой в настоящее время для оценки циклической долговечности, реальному НДС уторного узла. Численным моделированием в программном комплексе ANSYS были определены значения напряжений на наиболее нагруженной внутренней поверхности уторного узла (линия ABCD на Рисунке 11), и соответствует поверхности испытательной модели №1.

Характерными точками определены линии сплавления днища и сварного шва (точка В), сварного шва и стенки (точка С). В этих точках наблюдаются локальные максимумы значений напряжений.



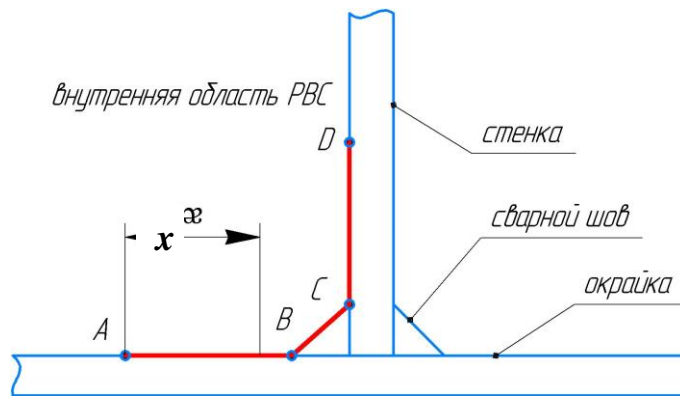


Рисунок 11 – Линия L (ABCD) определения величины напряжения в исследуемых образцах

На Рисунке 12 приведен график изменения значений напряжений вдоль линии ABCD для уторного узла УУ-1. Сравнение графиков распределения напряжений по линии L на внутренней поверхности резервуара и соответствующей поверхности испытательной модели №1 наглядно продемонстрировало отличия между гидростатической расчетной моделью и испытательной моделью №1.

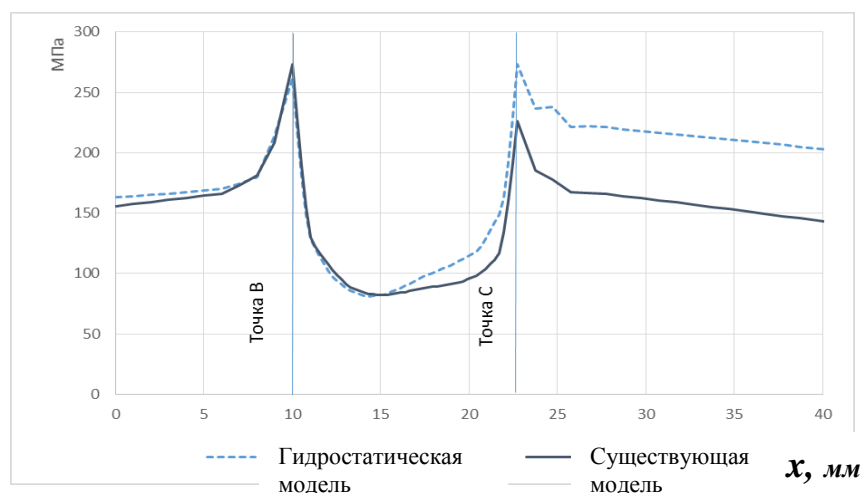


Рисунок 12 – Распределение эквивалентных напряжений по внутренней поверхности уторного узла резервуара и существующей испытательной модели

Из Рисунка 12 видно, что в испытательной модели №1, применяемой в настоящее время, напряжения в точке С занижены по сравнению с напряжениями в реальном резервуаре (гидростатическая модель).

Для получения достоверных данных при проведении испытаний на циклическую долговечность разработана усовершенствованная испытательная

модель (модель №2) с оснасткой для ее нагружения в универсальных испытательных машинах (Рисунок 13).

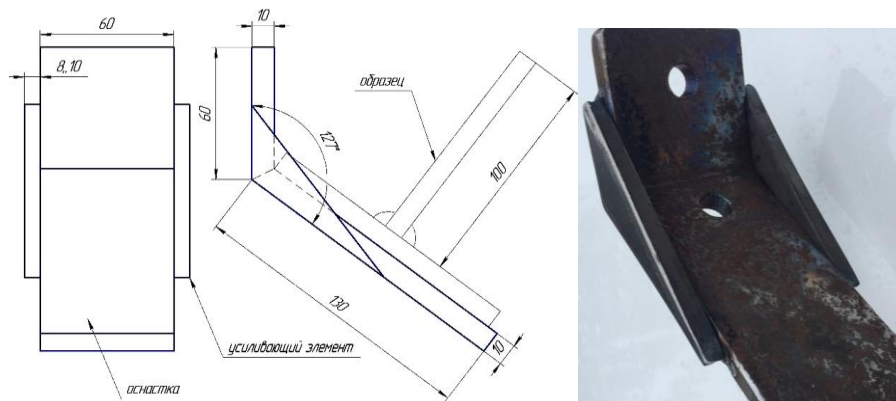


Рисунок 13 – Предлагаемая испытательная модель и оснастка для ее нагружения

Было выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния испытательной модели №2 в программном комплексе ANSYS. Результаты представлены на Рисунке 14.

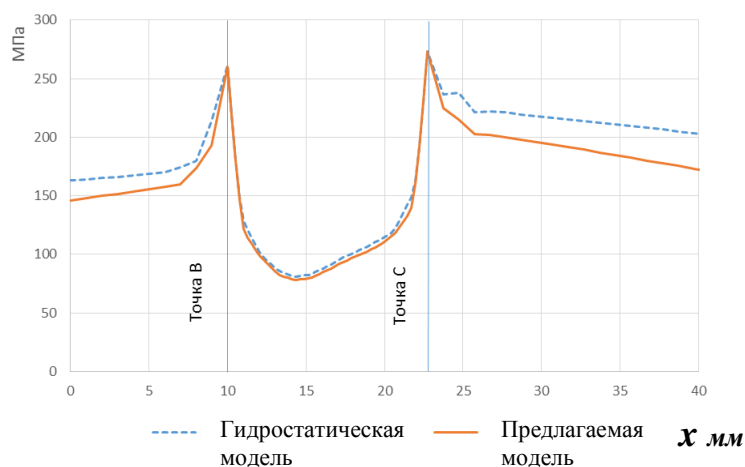


Рисунок 14 – Распределение эквивалентных напряжений по внутренней поверхности уторного узла УУ-1

Совпадение графиков в диапазоне точек ВС свидетельствует о высокой степени соответствия испытательной модели реальному нагружению уторного узла. Для оценки сходимости значений эквивалентных напряжений для гидростатической модели и испытательной модели №2 использовали среднеарифметическое относительное отклонение в диапазоне точек ВС. Показатель сходимости для модели №2 образца уторного узла УУ-1 составил

94,4 %, в отличие от значения сходимости для модели №1, составившей 73,0 %.

Было проведено численное моделирование для исследуемых типоразмеров образцов, получены значения сходимости для испытательных моделей №1 и №2. Оценка разницы между этими показателями показала, что степень соответствия полученных результатов для испытательной модели №2 на 18,6 % выше по сравнению с испытательной моделью №1 для образцов с толщиной стеки равной или близкой толщине окрайки. Характерным отличием в распределении эквивалентных напряжений для уторного узла УУ-1 двух типов испытательных моделей является достижения точек максимума в точке В для модели №1 и в точке С для модели №2. Проверка численных расчетов проведена при сравнительных испытаниях на циклическую выносливость образцов существующей и предлагаемой конструкции.

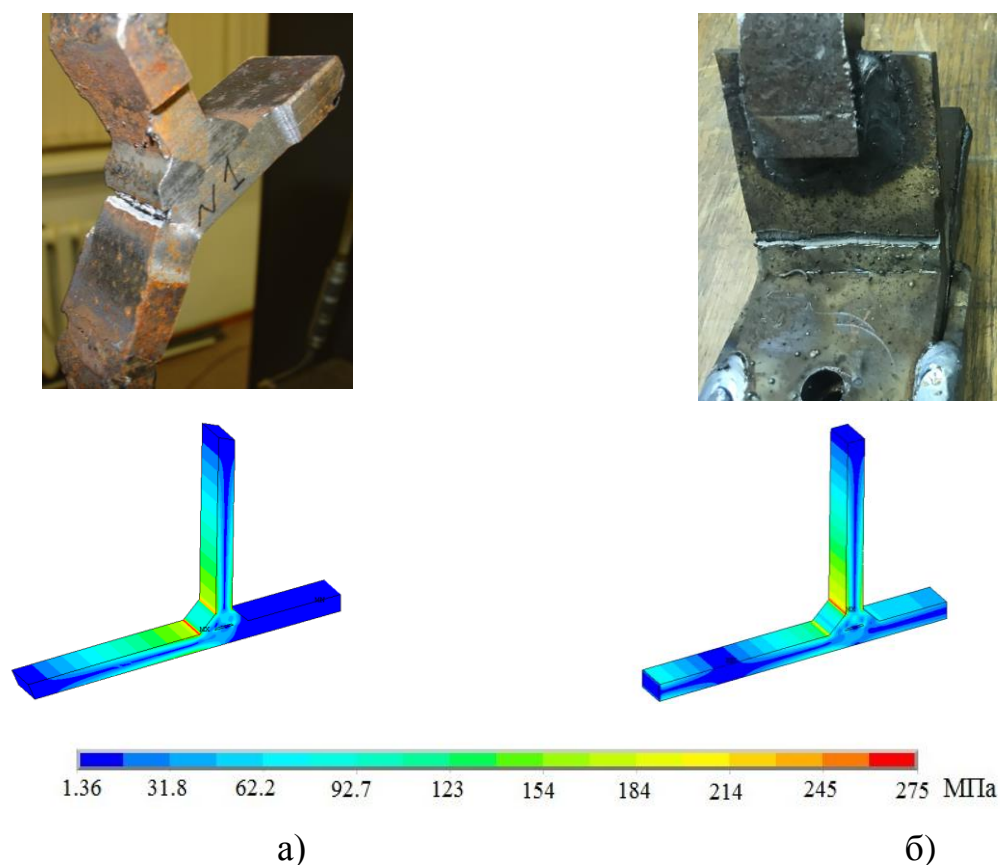


Рисунок 15 – Образцы после испытаний с результатами численного моделирования

Далее был определен ресурс уторных узлов, изготовленных по применяемой в настоящее время технологии с использованием

предварительного обратного выгиба, с целью подтверждения полученных расчетных зависимостей. Испытания проводились для определения числа циклов до разрушения образцов уторных узлов (с толщинами стенки и окрайки согласно данным Таблицы 1) с применением испытательной модели №2.

Образцы, изготовленные по существующей технологии, сравнивались с образцами, изготовленными по технологии с применением предварительного обратного выгиба. Испытания проводились при комнатной температуре (20 °С). Нагрузки при проведении эксперимента  $P_{\max} = 30$  кН,  $P_{\min} = 6$  кН, частота нагружения  $f = 7$  Гц.

Результаты испытаний образцов на циклическую долговечность – средние значения количества циклов до разрушения представлены на Рисунке 16.

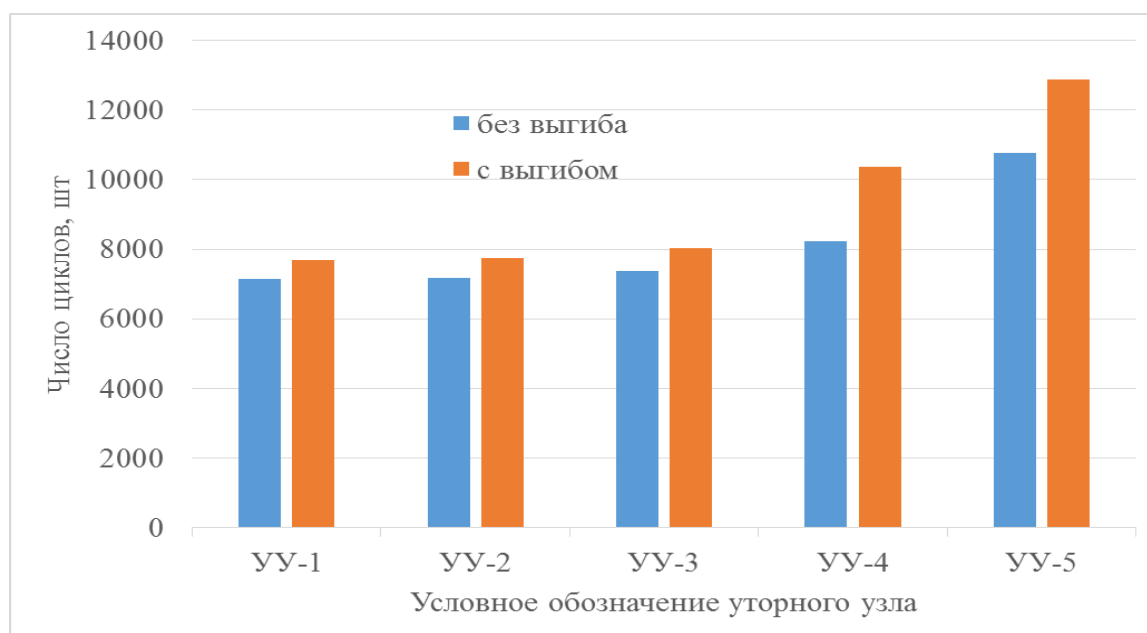


Рисунок 16 – Результаты испытаний образцов на циклическую долговечность

Анализ полученных результатов испытаний показал, что ресурс образцов, изготовленных с применением технологии предварительного обратного выгиба, в среднем на 13 % выше, чем у образцов, изготовленных по существующей технологии.

Расчет циклической долговечности уторного узла производится согласно методики, изложенной в РД 153-112-017-97. Вследствие того, что предварительный выгиб приводит к компенсации напряжений, в расчетные уравнения введен коэффициент, учитывающий степень компенсации

напряжений в узле. Таким образом, методика оценки циклической долговечности примет следующий вид (1):

$$N_0 = \min \left\{ \frac{1}{4} \left( \frac{1,28E \ln \frac{1}{1-\psi}}{1,28n_\sigma k_1 \sigma_a^* \frac{1}{\varphi_c} - \sigma_{-1}} \right)^2; \frac{1}{4n_N} \left( \frac{1,28E \ln \frac{1}{1-\psi}}{1,28k_1 \sigma_a^* \frac{1}{\varphi_c} - \sigma_{-1}} \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\psi$  – относительное сужение, %;  $n_\sigma$  – коэффициент запаса по напряжениям,  $n_\sigma = 2$ ;  $\sigma_a^*$  – амплитуда условных напряжений в расчетной точке, МПа;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости для стали, МПа;  $\varphi_c$  – коэффициент, учитывающий снижение характеристик в результате сварки: при ручной дуговой сварке  $\varphi_c = 0,8$ ; при автоматической дуговой сварке  $\varphi_c = 0,9$ ;  $n_N$  – коэффициент запаса долговечности,  $n_N = 10$ ;  $k_1$  – уточняющий коэффициент.

Получены значения коэффициента компенсации напряжений для исследуемых типоразмеров уторных узлов, определенных на основе средних значений показателей циклической долговечности, для двух конструкций уторных узлов (Таблица 5).

Таблица 5 – Значения уточняющего коэффициента  $k_1$

Уторный узел	УУ-1	УУ-2	УУ-3	УУ-4	УУ-5
Номинальный объем резервуара, м <sup>3</sup>	5000	10000	20000	30000	50000
Уточняющий коэффициент $k_1$	0,935	0,933	0,920	0,789	0,808

На основе решений численной модели определяется величина амплитуды напряжений (максимальные напряжения, возникающие на линии сплавления стенка – сварной шов, сварной шов – окрайка), и производится расчет циклической долговечности уторного сварного соединения. Методика оценки циклической долговечности позволяет прогнозировать ресурс уторного узла, изготовленного с применением обратного выгиба окрайки.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Разработаны методические подходы, заключающиеся в расчете величины амплитуды напряжений на основе численной модели уторного узла, для определения степени компенсации напряжений для узлов с предварительным обратным выгибом окрайки. Предложены технические решения, направленные на совершенствование испытательной модели, и конструктивные новшества, позволяющие повысить долговечность в среднем на 13 % для исследованных типоразмеров уторных узлов, изготовленных из стали 09Г2С.

2 Разработана численная модель уторного сварного соединения вертикального стального резервуара, позволяющая определять напряженно-деформированное состояние узла в процессе эксплуатации резервуара. Получены значения максимальных эквивалентных напряжений для исследуемых типоразмеров уторных узлов. Проведена верификация предложенной модели путем сравнения с результатами, полученными по существующим методам аналитического расчета напряженно-деформированного состояния уторного узла.

3 Экспериментально определено влияние величины технологического непровара между стенкой и окрайкой на циклическую долговечность уторного узла изготовленного из стали 09Г2С. Полученная зависимость циклической выносливости уторного узла вертикального стального резервуара имеет линейный характер в диапазоне от 0 до 3 мм. Ресурс работы уторного узла при зазоре, равном 3 мм, уменьшается на 30% по сравнению с узлом, выполненным без зазора.

4 Численными методами моделирования с использованием сертифицированных программных комплексов доказана эффективность применения операции обратного выгиба краевого листа. Разработана усовершенствованная конструкция уторного узла вертикального стального резервуара с предварительным обратным выгибом окрайки, позволяющая при сохранении существующей технологии выполнения сборочно-сварочных работ устранить зазоры в соединении «стенка-окрайка» и тем самым, повысить долговечность уторного узла, а также потенциально повысить

производительность сварочно-монтажных работ. Получен патент на конструкцию уторного узла металлического резервуара для хранения жидких продуктов, выполненного с обратным выгибом окраечного листа (пат. № 164588, опубл. 30.03.2016 г.).

5 Определен характер распределения напряжений по внутренней поверхности уторного сварного соединения. На основании полученных данных предложена модель испытательного образца для определения циклической долговечности уторного узла с толщинами стенки, близкими или равными толщине окрайки, позволяющая получить распределение напряжений в испытательном узле с достоверностью на 18,6 % выше в сравнении с существующими моделями для проведения испытаний.

6 Для исследуемых типоразмеров резервуаров экспериментальным путем получены значения уточняющего коэффициента для расчета прогнозной циклической долговечности уторного узла с предварительным обратным выгибом окрайки. На основании полученных данных разработана методика проведения испытаний уторных узлов, выполненных с предварительным обратным выгибом окрайки.

#### **Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:**

##### *ведущие рецензируемые научные издания*

1 Файрушин, А.М. Совершенствование технологии изготовления уторного узла стального вертикального резервуара / А.М. Файрушин, М.З. Ямилев, О.В. Четверткова, А.И. Биккинин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 6 (26). С. 84 - 87.

2 Биккинин, А.И. Определение оптимальных параметров формы и размеров образца уторного узла резервуара для проведения механических испытаний на долговечность / А.И. Биккинин, Р.Г. Ризванов // Нефтегазовое дело. 2017. № 4 (15). С. 137 - 142.

3 Ризванов, Р.Г. Экспериментальные исследования конструктивно-подобных образцов на циклическую выносливость / Р.Г. Ризванов, А.И. Биккинин, М.З. Ямилев // Нефтегазовое дело. 2018. № 3 (16). С. 70 - 75.

##### *публикации в других изданиях*

4 Файрушин, А.М. Совершенствование конструкции и технологии изготовления уторного узла стального вертикального резервуара / А.М. Файрушин, О.В. Четверткова, Н.Н. Валеев, А.С. Романчук, А.М. Биккинин // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2015. № 11. С. 12 – 13.

5 Файрушин, А.М. Модернизация уторного узла стального вертикального резервуара / А.М. Файрушин, Н.Н. Валеев, А.С. Романчук, А.И. Биккинин, М.З. Ямилев //

Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 2. С. 18 - 21.

6 Четверткова, О.В. Совершенствование конструкции и технологии изготовления уторного узла стального вертикального резервуара / О.В. Четверткова, Н.Н. Валеев, А.С. Романчук, А.И. Биккинин // Материалы научно-практической конференции «Сварка и контроль – 2016»: сборник тезисов докладов. Уфа: УГНТУ. 2016. С. 66 - 70.

7 Валеев, Н.Н. Совершенствование технологии изготовления уторного узла стального вертикального резервуара / Н.Н. Валеев, А.С. Романчук, А.И. Биккинин // Материалы IX Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники»: сборник тезисов докладов. Уфа: Нефтегазовое дело. 2016. Т. 1. С. 151 - 152.

8 Биккинин, А.И. Исследование влияния на остаточный ресурс напряженно-деформированного состояния сварного соединения / А.И. Биккинин // Материалы IX Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники»: сборник тезисов докладов. Уфа: Нефтегазовое дело. 2016. Т. 1. С. 157 - 158.

9 Романчук А.С., Валеев Н.Н., Биккинин А.И. Модернизация уторного узла стального вертикального резервуара // Материалы XII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2017». Уфа: Изд-во УГНТУ. 2017. С. 302 - 304.

10 Романчук, А.С. Совершенствование конструкции сварного уторного узла стального вертикального резервуара / А.С. Романчук, Н.Н. Валеев, А.И. Биккинин, Р.Р. Чернятьева // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2017. № 4. С. 42 - 54.

11 Ямилев, М.З. Применение численного моделирования для подбора параметров образца для испытаний / М.З. Ямилев, О.В. Четверткова, А.И. Биккинин // Материалы VII Международной научной конференции «Научоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса в год экологии в России»: сборник тезисов докладов. Уфа: РИЦ БашГУ. 2017. С. 80 - 83.

12 Ямилев, М.З. Совершенствование конструкции образца для проведения испытаний на малоцикловую усталость сварного соединения / М.З. Ямилев, О.В. Четверткова, А.И. Биккинин // Материалы XII научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России»: сборник тезисов докладов. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. 2018. С. 357.

#### ***патенты РФ***

13 Патент на полезную модель 164588 Российская Федерация, МПК E04H 7/06. Металлический резервуар для хранения жидких продуктов / Файрушин А.М., Каретников Д.В., Романчук А.С., Валеев Н.Н., Четверткова О.В., Ямалетдинова Л.И., Биккинин А.И. Заяв. 30.03.2016; опубл. 10.09.2016, Бюл. №25.