

На правах рукописи

ВЕРЖБИЦКИЙ Кирилл Дмитриевич



**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСА ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО
РЕЗЕРВУАРА ПУТЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЖНЕГО ПОЯСА**

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург–2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор

Щипачев Андрей Михайлович

Официальные оппоненты:

Лукьянова Ирина Эдуардовна

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ», профессор

Чепур Петр Владимирович

кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», кафедра «Прикладная механика», доцент

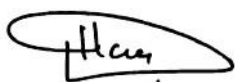
Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет»

Защита состоится 6 июня 2019 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.13 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 5 апреля 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ТАНАНЫХИН
Дмитрий Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Со времен начала добычи нефти на территории России и по сегодняшний день был основан один из крупнейших топливно-энергетических комплексов в мире, включая систему трубопроводного транспорта и хранения нефти и продуктов ее переработки. С начала 70-х годов прошлого столетия в СССР были разработаны типовые проекты резервуаров различного объема и типа, среди которых одним из самых распространенных является вертикальный стальной резервуар (РВС). По различным оценкам, на сегодняшний день в России насчитывается более 50 тысяч резервуаров объемом от 3 до 50 тысяч кубических метров.

Работоспособность резервуаров зависит от герметичности всех его узлов и соединений, качество которых формируется на этапе сооружения. Анализ результатов экспертизы технического состояния РВС, указывает, что значительное количество дефектов сконцентрировано в уторном узле резервуара – место стыковки стенки и днища, который является одним из самых нагруженных участков всего сооружения.

Снижение ресурса резервуара в зоне уторного узла может быть спровоцировано технологическим непроваром в уторном узле; дефектами сборки таврового соединения уторного узла (завышенный зазор, местные деформации элементов узла); формированием высокого уровня остаточных напряжений в уторном шве после сварки; дефектами сварного шва и коррозионными процессами от действия среды.

Особенностью конструкции узла является наличие конструктивного зазора между стенкой и окраечным листом, который, согласно нормативно-технической документации, должен находиться в пределах 0...2 мм. Наличие регламентированного зазора между стенкой и окрайкой приводит к осложнению процесса монтажа стенки вследствие необходимости соблюдения нормативно допустимых пределов величин зазора. Опыт монтажа резервуаров показывает, что не всегда удается выдержать необходимый зазор. Проведенные замеры на реальных объектах позволили установить, что длина таких участков достигает до 7% от общей площади

соприкосновения стенки и окрайки, а увеличение зазора в соединении уторного узла значительно снижает ресурс резервуара, поэтому обеспечение ресурса работы резервуара с наличием вышеуказанных участков является актуальной задачей.

Цель работы

Обеспечение ресурса вертикального стального резервуара путем применения дополнительной обработки уторного узла для снижения уровня остаточных напряжений.

Задачи исследования

1. Проанализировать состояние проблемы обеспечения долговечности сварного соединения уторного узла резервуара.

2. Рассчитать внутренние напряжения конструкции при отклонении от технологии изготовления в математической модели уторного узла.

3. Экспериментально исследовать влияние дополнительной обработки уторного узла с дефектами сборки на его циклическую долговечность.

4. Разработать методику определения потенциально опасных зон в уторном узле резервуара и рекомендации по увеличению его ресурса.

Идея работы

В результате операций по устранению ненормативного зазора путем упругой деформации окрайки днища возникают остаточные растягивающие напряжения в уторном узле, что снижает долговечность конструкции. Для уменьшения уровня остаточных технологических напряжений, предлагается применять обработку нижнего пояса резервуара.

Научная новизна работы

1. Получена зависимость циклической долговечности зоны уторного узла резервуара от величины первоначального зазора в стыке сварного шва.

2. Исследовано влияние ультразвуковой ударной, термической, вибрационной обработок сварного шва на циклическую долговечность.

Защищаемые научные положения

1. Влияние упругих напряжений, возникающих в связи с необходимостью уменьшения зазора перед сваркой, на циклическую долговечность уторного узла;

2. Обоснование метода обработки уторного узла резервуара на участках с увеличенным зазором с целью повышения циклической долговечности.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовался комплексный способ исследований, включающий экспериментальные и теоретические методы исследований: анализ современного состояния теории, практики и патентных материалов; расчет внутренних напряжений в математической модели уторного узла с применением программного комплекса ANSYS; проведение экспериментов на образцах уторного узла, изготовленных с применением ультразвуковой ударной, вибрационной и термической обработками.

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных положений подтверждается сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований с доверительной вероятностью не менее 0,95.

Практическая значимость работы

1. Разработаны рекомендации по внедрению ультразвуковой ударной и вибрационной обработки в технологию сварки уторного узла резервуара.

2. Разработана методика определения величины зазора в уторном узле резервуара, находящегося в процессе эксплуатации.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на Научно-практической конференции, проводимой в рамках Уральского промышленного форума «Сварка и контроль – 2014» (г. Уфа, 2014 г.); VII - VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 2015 г.); X Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2015» (г. Уфа, 2015 г.); 66-ой научно-техническая

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2015 г.); XI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2016 г.); Юбилейной 70-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ 2016» (г. Москва, 2016 г.); XII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2017» (г. Уфа, 2017 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, 2 из которых в изданиях, включенных в перечень научных изданий ВАК.

Личный вклад соискателя

Обосновано влияние величины зазора на долговечность уторного узла резервуара; разработаны математические модели полей напряжения в уторном узле резервуара в условиях увеличенного зазора; обоснован выбор формы и размеры экспериментальных образцов; проведены экспериментальные исследования; разработаны рекомендации по выбору метода обработки уторного узла резервуара.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 103 страницах текста, состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 130 источников, содержит 51 иллюстрацию и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и научные положения.

В первой главе проведен анализ технологий сборки и сварки резервуара, в частности, уторного узла, методов снижения уровня остаточных напряжений, методов проведения диагностики, типов дефектов, встречающихся в данном узле, статистики отказов и норм оценки технического состояния резервуара.

Из источников известно, что в России первый металлический резервуар для нефти из клепанных металлических листов был изготовлен по проекту инженера В.Г. Шухова в 1878 году. Первый резервуар в США построили еще в 1864-ом, однако его конструкция

была прямоугольной, а русский инженер придал своей емкости цилиндрическую форму, что по расчетам значительно сэкономило металл при изготовлении. С этого времени резервуарное нефтяное оборудование широко распространено практически на всех этапах от добычи до переработки углеводородного сырья.

Опыт строительства, эксплуатации и ремонта резервуаров выявил достаточно большое количество вопросов, которые на протяжении десятилетий успешно решались отечественными и зарубежными специалистами.

Исследованием формирования напряженно-деформированного состояния уторного узла и обеспечением ресурса резервуара в процессе его изготовления и эксплуатации занимались отечественные и зарубежные специалисты и ученые Тарасенко А.А., Каравайченко М.Г., Дорошенко Ф.Е., Чепур П.В., Лежнев М.А., Любушкин В.В., Востров В.К., Сильницкий П.Ф., Землянский А.А., Семин Е.Е., Катанов А.А., Нехаев Г.А., Соболев Ю.В., Сафарян М.К., Еленицкий Э.Я., Ковальчук О.А., Еленицкий С.Э., Розенштерн И.М., Васильев Г.Г., Щипачев А.М., Гумеров А.К., Бэлл Р., Гринвуд Д., Де Бир Е. и другие.

По результатам технического диагностирования резервуаров и имеющихся в открытой печати материалов, в которых рассмотрены проблемы прочности резервуаров, свидетельствуют о том, что наиболее часто дефекты возникают в самом опасном и нагруженном участке - уторном соединении стенки с днищем. Это обусловлено тем, что в зоне уторного шва имеет место сложно - напряженное состояние, характеризующееся наличием, как кольцевых растягивающих усилий, так и меридиональных напряжений изгиба от краевых моментов. Анализ результатов технического диагностирования РВС и материалов представлены на рисунке 1.

Согласно ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные стальные цилиндрические для нефти и нефтепродуктов», в процессе сооружения резервуара, при толщине первого пояса менее 12 мм, допускается не проводить скос кромок стенки при сварке уторного узла. Данный узел сваривают дуговой сваркой по различным технологиям. Как правило, при этом применяют обратную полярность, когда отрицательный полюс подключают к изделию, а

положительный к стрелке электрода или сварочной проволоки. В данном случае большему нагреву подвергается присадочный материал (электрод, проволока), следовательно, глубина проплавления основного металла небольшая. В связи с этим неизбежно возникновение непровара в уторном узле резервуара.

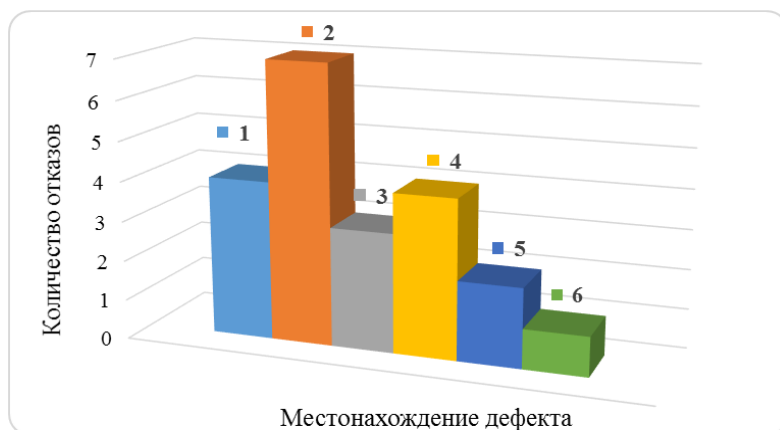


Рисунок 1 - Зависимость отказов резервуаров от местонахождения дефектов

1 – дефекты, расположенные в стенке; 2 – дефекты, расположенные в уторных соединениях; 3 – дефекты, расположенные в монтажных швах; 4 – дефекты, расположенные в патрубке; 5 – дефекты, расположенные в днище; 6 – дефекты, расположенные в трубопроводе

В местах приварки люка-лаза или приемо-раздаточных патрубков к первому поясу, а также в вертикальных швах сварки листов стенки конструкций возникают местные деформации, которые в дальнейшем приводят к возникновению увеличенного зазора в тавровом соединении уторного узла. Устранение увеличенного зазора путем подтягивания окрайки приводит к возникновению дополнительных нежелательных напряжений в уторном узле и отклонению от вертикальности образующей резервуара.

На сегодняшний день известно достаточно большое количество способов и приемов снижения уровня сварочных напряжений и деформаций, многие из которых имеют ограничения по применению из-за конструктивных особенностей свариваемых конструкций либо применяемых технологий сварки. Одним из наиболее распространенных и универсальных способов является термическая обработка. С целью снижения трудоемкости работ по снижению уровня сварочных напряжений и деформаций в последние годы активно исследуются альтернативные способы, такие как сопутствующая вибрационная и ультразвуковая ударная обработки. Таким образом, целесообразно использовать один из способов обработки потенциально опасных участков уторного узла, в которых систематически, независимо от квалификации сварщика создаются дефекты сборки.

Во второй главе проведен анализ напряженно-деформированного состояния уторного узла резервуара, путем создания математических моделей в программном комплексе ANSYS.

Для этого были построены модели уторного узла резервуара без дефекта (рисунок 2а), с локальным увеличением зазора в стыке (смоделировано подтягивание в пределах одного окраечного листа) (рисунок 2б), с протяженным увеличенным зазором в стыке (непрерывное подтягивание на длине до трех окраечных листов) (рисунок 2 в,г). На резервуар были приложены следующие нагрузки: давление веса крыши, приложенное по нормали к верхней грани стенки; гидростатическое давление на стенку и днище. Жесткое закрепление резервуара осуществлялось по внешней нижней поверхности днища и окрасок.

Результаты выполненных расчетов показывают, что максимальные эквивалентные напряжения расположены в зоне уторного узла. Установлено, что в уторном узле, изготовленном с поднятием окрайки, в процессе нагружения резервуара на окрайке возникают дополнительные напряжения на приподнятом участке.

С целью оценки уровня напряжений в месте сопряжения стенки и днища при различных углах загиба окрайки при помощи метода конечных элементов был построен узел, состоящий из

стенки первого пояса и окрайки, зазор между которыми составляет 4 мм, двустороннего углового сварного шва с катетом 10 мм (рисунок 3а). В первоначальном положении окрайка была изогнута до касания ею внешней кромки стенки - на 5° от горизонтали (рисунок 3б).

В дальнейшем проведены расчеты для величины угла загиба окрайки с уменьшением от 4° и до 1° , также рассмотрена модель без загиба.

В результате проведенных расчетов установлено, что при нагружении резервуара уровень напряжений в зоне термического влияния стенки при монтаже с использованием приема подтяжки окрайки выше, чем при выполнении сварного соединения с завышенным зазором. Так, при увеличении угла подъема окраечного листа с 1 до 5 градусов, эквивалентные напряжение в зоне термического влияния увеличиваются с 19,7 до 38,3%

Расчет внутренних напряжений модели уторного узла, с дополнительной деформацией окрайки днища с учетом сварочных напряжений и приближенной к реальным размерам представлен на рисунке 4. Максимальные внутренние напряжения, равные 296 МПа, находятся непосредственно в зоне технологического непровара, которые близки к пределу текучести материала (сталь 09Г2С).

Выбор формы образцов проводился по результатам математического моделирования. Закрепление модели перед нагрузкой производилось по всем осям, с торцов и посередине «окрайки днища». Нагрузка на образец разложена на две составляющие и приложена к верхнему торцу «стенки» в связи с тем, что на испытательной машине она направлена под углом в 55° (рисунок 5). Эквивалентная нагрузка составляет 10 кН.

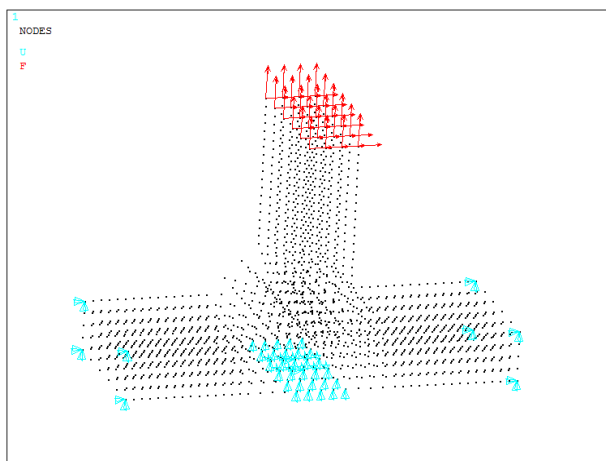


Рисунок 5 – Расположение закреплённых элементов и приложенных нагрузок в математической модели образца

Проанализировав результаты математического моделирования образцов (рисунок 6) следует отметить, что максимальные внутренние напряжения находятся в зоне термического влияния и равны 270 Мпа, что подтверждает нахождение модели образца в упругой зоне. Разница показаний внутренних напряжений в моделях образцов приведенных на рисунках 4 и 6 составляет 8,8%, что подтверждает адекватность выполненных экспериментов.

В третьей главе описана методика проведения экспериментов.

С целью определения степени влияния величины зазора между стенкой и окрайкой на ресурс работы уторного узла были проведены экспериментальные исследования. Для этого были изготовлены образцы из листов толщиной 10 мм из стали 09Г2С (рисунок 7).

Экспериментальные образцы прошли следующие виды обработки:

- с применением после сварки термообработки (отпуск);
- с применением ультразвуковой ударной обработки после сварки (технологический комплекс Шмель);

– с применением виброобработки в процессе сварки.

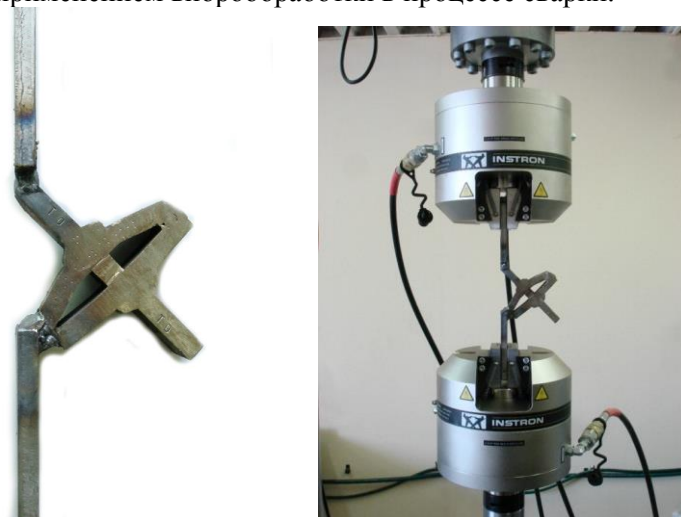


Рисунок 7 – Опытный образец уторного узла

Для снижения уровня остаточных напряжений с 24 образцами была проведена термообработка в режиме высокого отпуска, в муфельной печи при температуре 550 °С, время выдержки 3,5 часа с последующим охлаждением на воздухе.

На следующих 24 образцах проводилась ультразвуковая ударная обработка с использованием «Технологического комплекса «Шмель» ИЛ100-16 при частоте 25-27 кГц и амплитудой 35 мкм, в 2 прохода по поверхности сварного шва и основного металла в зоне термического влияния.

Изготовление образцов еще 24 образцов проводилось на специальном вибрационном стенде с амплитудой колебаний 1 мм и частотой 50 Гц в процессе их сварки.

Также было изготовлено 24 образца без обработки.

Испытания на разрывной машине INSTRON, проходили при следующих условиях: температура – 20 °С, нагрузка – 10 кН, частота – 0,3 Гц. Исследования выполнялись при мягком осесимметричном нагружении, когда амплитуда напряжений является постоянной, а амплитуда деформаций изменяется с количеством циклов. В процессе экспериментов было установлено,

что трещины в сварном соединении образовывались в зоне термического влияния. Всего было изготовлено и испытано 96 образцов.

На рисунке 8 приведены результаты экспериментов на циклическую долговечность образцов.

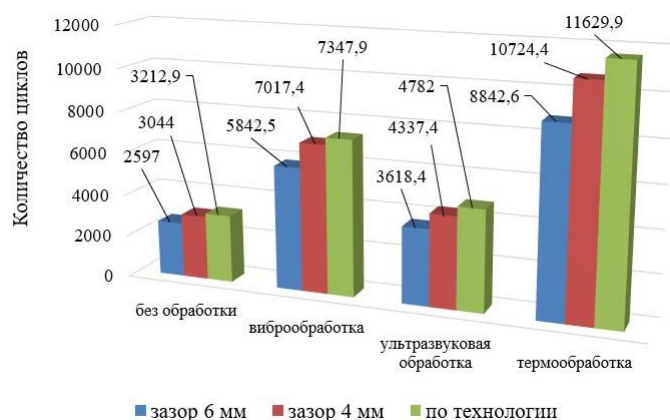


Рисунок 8 – Результаты экспериментов по определению циклической долговечности образцов

Таким образом, установлено, что применение ультразвуковой ударной обработки позволяет обеспечить необходимый ресурс уторного узла при величине зазора в стыке 6 мм, а в случае использования вибрационной и термической на 82% и 175% соответственно.

Экспериментальные данные обрабатывались с помощью регрессионного анализа по системе нормальных уравнений. Уравнения регрессии зависимости числа циклов от величины зазора при различных видах обработки приведены на рисунках 9-13.

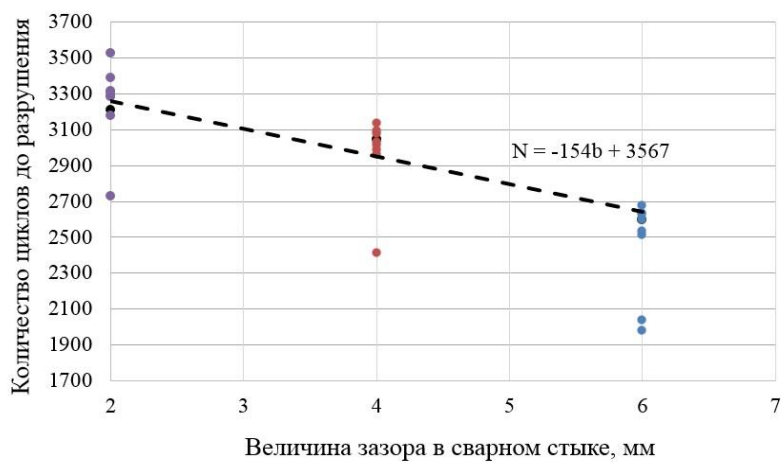


Рисунок 9 – Зависимость количества циклов от величины зазора на образцах, изготовленных без дополнительной обработки после сварки

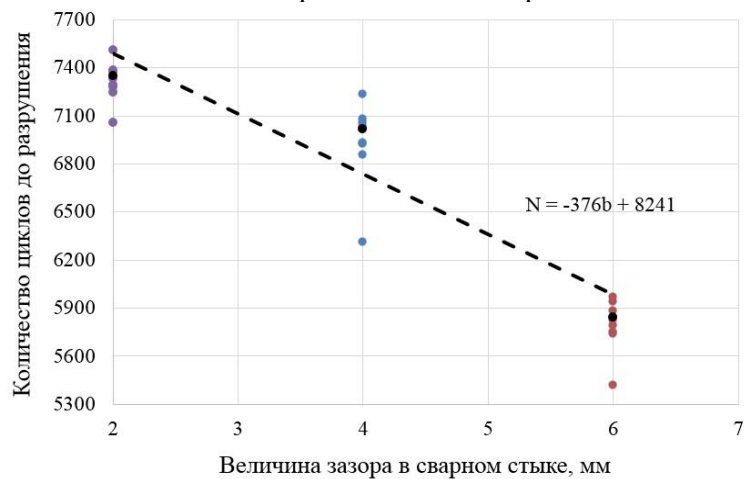


Рисунок 10 – Зависимость количества циклов от величины зазора на образцах, изготовленных с вибрационной обработкой в процессе сварки

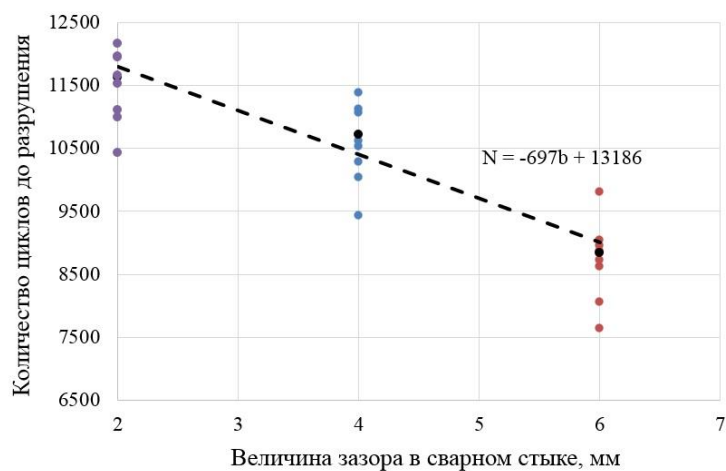


Рисунок 11 – Зависимость количества циклов от величины зазора на образцах, изготовленных с последующей термообработкой

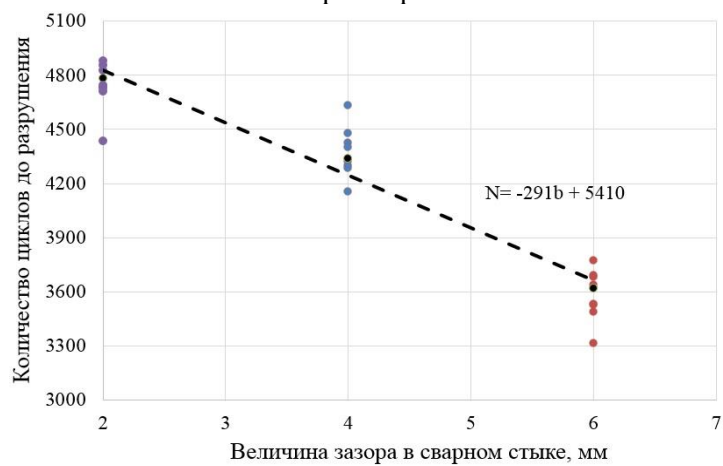


Рисунок 12 – Зависимость количества циклов от величины зазора на образцах, изготовленных с последующей ультразвуковой ударной обработкой

Согласно полученным уравнениям регрессии при увеличении зазора на 1 мм циклическая долговечность уторного узла снижается на 4,4-5,6%. Дополнительная обработка уторного узла позволяет существенно увеличить ресурс резервуара.

В четвертой главе разработаны технологии определение величины зазора в уторном узле с применением ультразвуковой дефектоскопии на резервуарах, находящихся в эксплуатации.

Технологический непровар в корне шва имеет характер плоскостного дефекта, следовательно, сигнал от него на экране дефектоскопа будет иметь явно выраженный характер. Поиск сигнала от непровара необходимо проводить по основному металлу первого пояса. После нахождения максимума сигнала, необходимо сделать метку на основном металле, в точке выхода луча ультразвуковой волны из пьезоэлектрического преобразователя (рисунок 13) и записать показания расстояния X до дефекта с экрана дефектоскопа (рисунок 14).

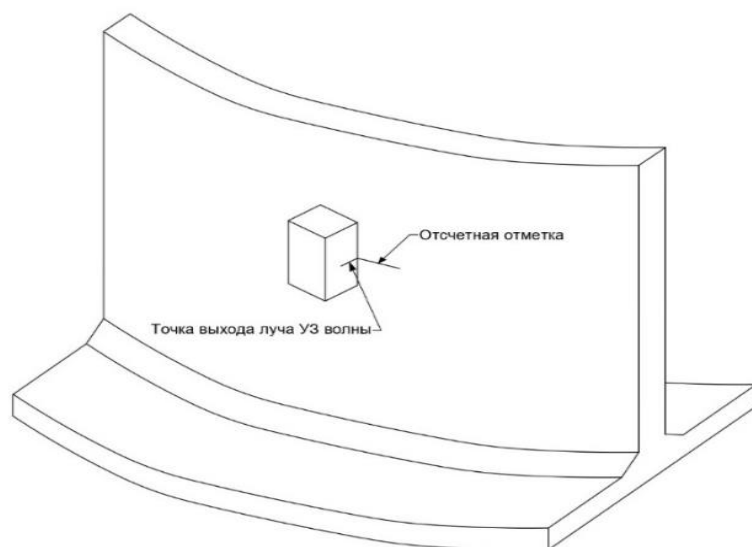


Рисунок 13 – Нанесение отсчетной отметки

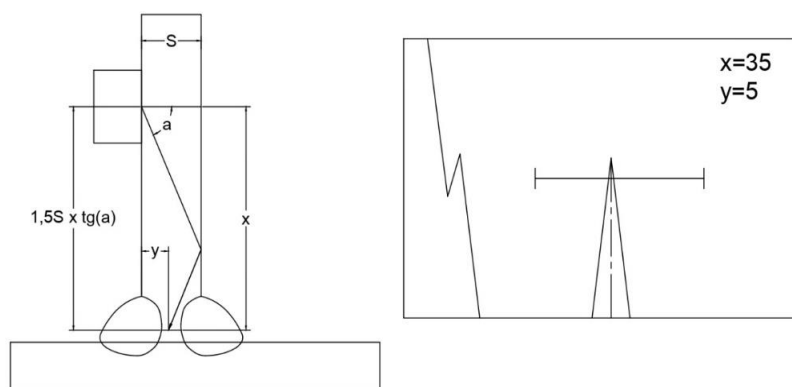
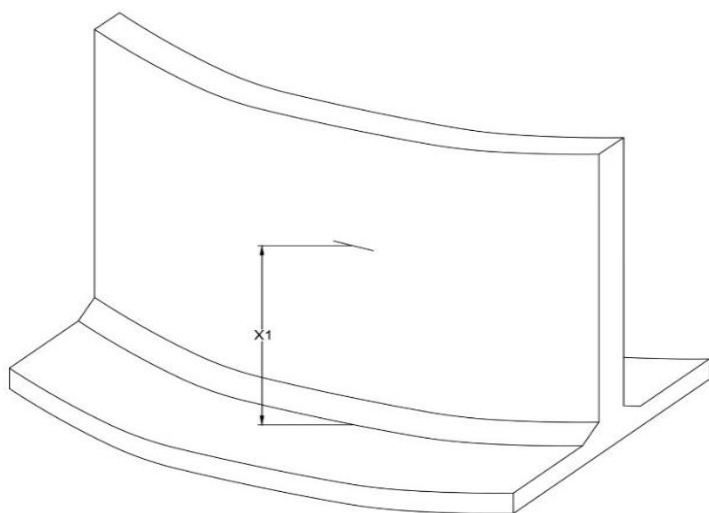


Рисунок 14 - Определение расстояния X

Далее необходимо провести замер расстояния X_1 от насечки до основного металла окрайки (рисунок 15).



б)

Рисунок 15 - Определение расстояния X_1

Разность величин X и X_1 и будет являться величиной зазора в данном узле. Результаты данных исследований показали, что максимальная относительная погрешность составляет 10,3%.

Разработаны технологии обработки уторного узла вертикального стального резервуара.

Термообработка в данной работе представлена для сравнения с другими способами, так как ее проведение непосредственно на объекте, является очень дорогостоящим.

Рекомендуется применять ультразвуковую ударную обработку с применением технологического комплекса ИЛ100-16 «Шмель», инструментом №1 на участках с увеличенным зазором до 4 мм, так как данный метод является менее трудозатратным, чем вибрационная обработка, а также обеспечивает коррозионную стойкость.

При зазорах в сварном стыке более 4 мм рекомендуется проводить вибрационную обработку шва в процессе сварки с применением технологического комплекса НВО "Резонанс" И100-17-1.0 (либо аналогов) для обеспечения долговечности узла в целом.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Научные выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Проанализировав результаты технического диагностирования РВС, выявлено что наиболее часто выходящим из строя узлом является уторный узел, место сопряжения стенки с днищем. Наличие технологического непровара, а также в местах образования местных деформаций листов первого пояса, в связи с припаркой люков-лазов, приемо-раздаточных патрубков, наблюдается увеличение зазора в стыке между стенкой и днищем перед сваркой. Устранение увеличенного зазора путем упругой деформации окрайки днища, создает дополнительные растягивающие напряжения в шве, в совокупности с наличием непровара на данном участке формируется сложное напряженно-деформированное состояние, что негативно влияет на долговечность конструкции.

2. Расчет по математической модели полей напряжений в уторном узле резервуара показывает, что после сварки узел находится в сложном напряженно-деформированном состоянии, а при моделировании увеличенного зазора в стыке, наблюдается локальное

увеличение остаточных напряжений до величин близких к пределу текучести.

3. На основе проведенных экспериментальных исследований было установлено, что увеличение зазора в стыке снижает циклическую долговечность уторного узла резервуара. Применение ультразвуковой ударной, термической или вибрационной обработок сварного соединения положительно сказывается на его циклическую долговечность.

4. Разработаны рекомендации к технологическому процессу сварки уторного узла резервуара, а именно применение определенного метода обработки в зависимости от величины зазора в стыке, для обеспечения долговечности всего узла в целом. Разработана методика измерения зазора в уторном узле резервуара, находящегося в эксплуатации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В изданиях из перечня, рекомендованных ВАК
Минобрнауки России:**

1. Вержбицкий К.Д. Исследование конструктивных элементов уторного шва резервуаров / К.Д. Вержбицкий, А.А. Скорняков, М.З. Зарипов, И.Г. Ибрагимов, А.Л. Карпов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2014 – Т.12, №4 – С.157-161.

Режим доступа: http://ngdelo.ru/files/old_ngdelo/2014/4/ngdelo-4-2014-p157-161.pdf

2. Вержбицкий К.Д. Влияние сопутствующей вибрационной обработки на качество сварных соединений вертикальных стальных резервуаров / К.Д. Вержбицкий, А.М. Файрушин, А.Р. Ямилова, И.Р. Сагадеев, Р.Г. Шарафиев // Научно-технический и производственный журнал «Монтажные и специальные работы в строительстве». – 2015 – №4 – С.19-22.

Публикации в других отечественных изданиях:

1. Вержбицкий К.Д. Повышение срока службы уторного узла вертикального стального резервуара / К.Д. Вержбицкий, А.С. Романчук // VII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2014» –

Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2014. – С.48.

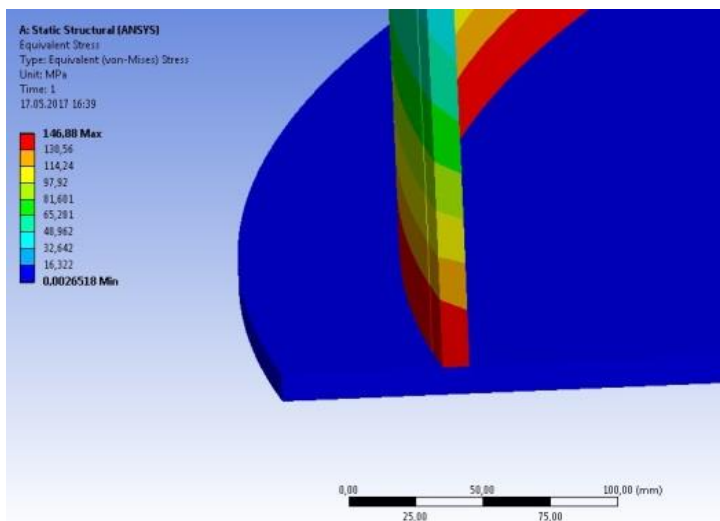
2. Verzhbickiy K.D. Influence of vibrational treatment on quality of welding joints of vertical steel tanks / K.D. Verzhbickiy, A.M. Fairushin, O.F. Khafizova, A.R. Yamilova // International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies – 2015 – №2 – С. 68-72.

3. Вержбицкий К.Д. Повышение срока службы уторного узла вертикального стального резервуара / К.Д. Вержбицкий, Н.Н. Валеев, А.С. Романчук // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» – Москва: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. – С.295.

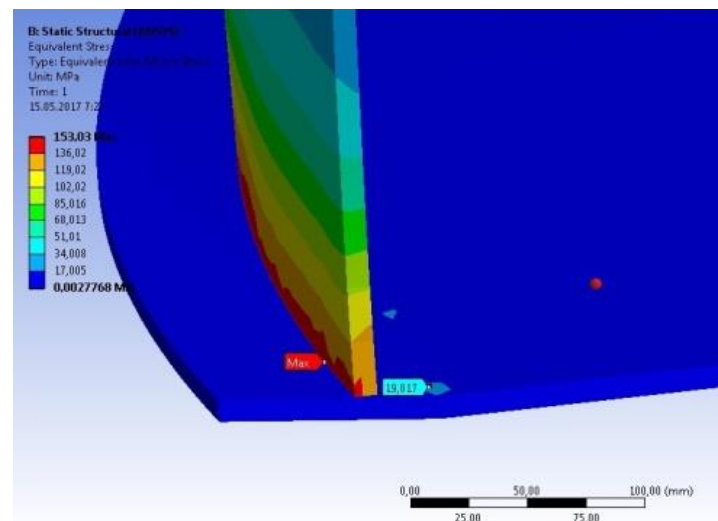
4. Вержбицкий К.Д. Совершенствование технологии изготовления уторного узла вертикального стального резервуара / К.Д. Вержбицкий, Н.Н. Валеев, А.С. Романчук, Р.Р. Чернятьева, В.А. Князев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» – 2017 – №6 – С.57-75.

Режим доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2017/ogbus_6_2017_p57-75_ValeevNN_ru.pdf

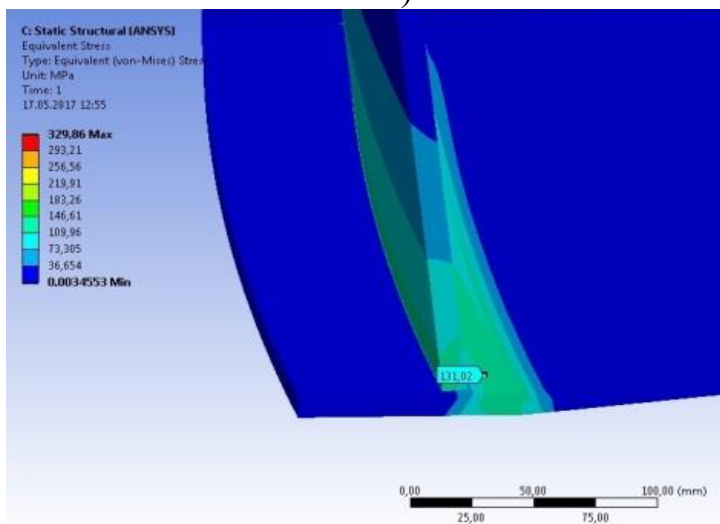
5. Вержбицкий К.Д. Обеспечение ресурса уторного узла вертикального стального резервуара на стадии сооружения / К.Д. Вержбицкий, Г.Х. Самигуллин // XII Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2017» – 2017 – Т.1, С. 308.



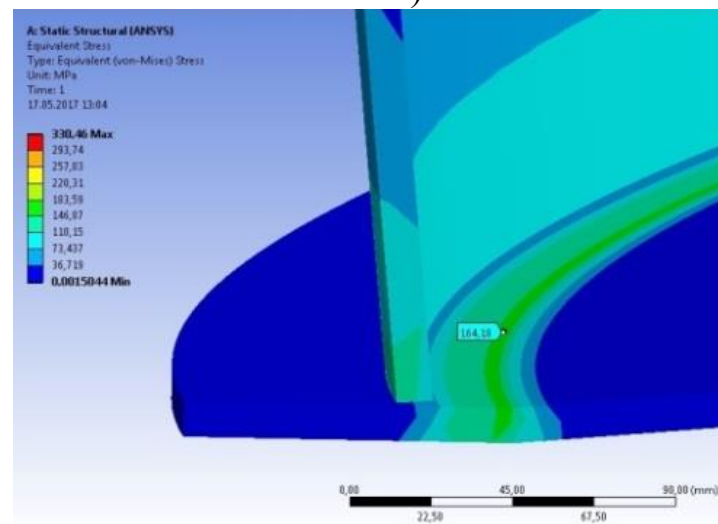
а)



б)



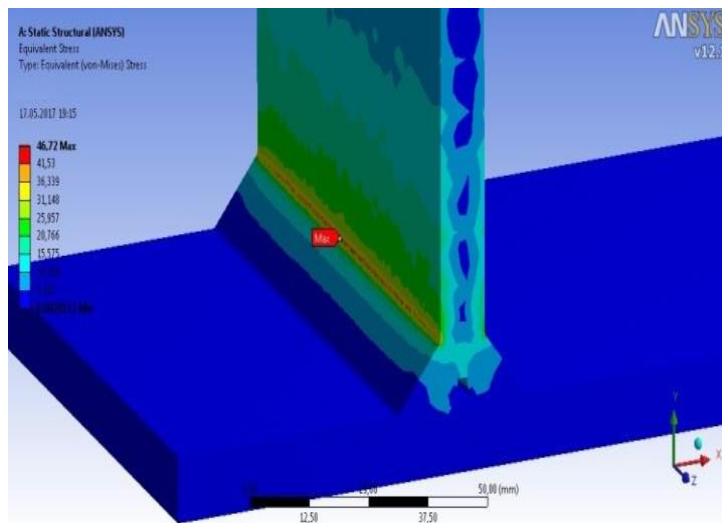
в)



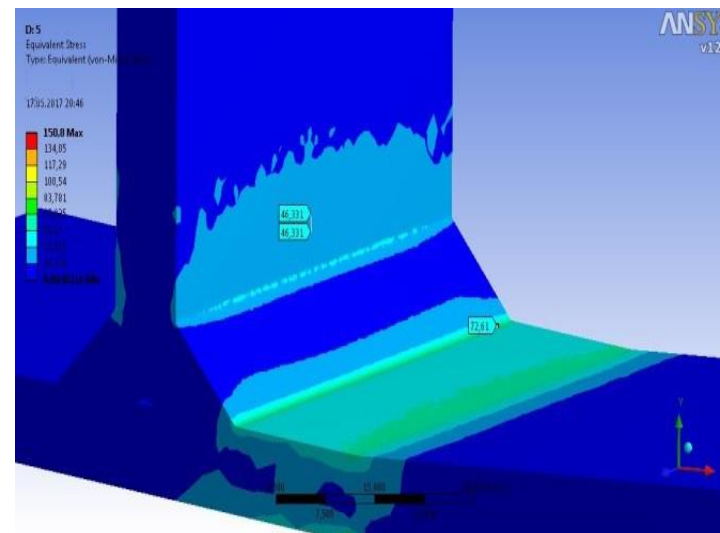
г)

Рисунок 2 – Распределение эквивалентных напряжений в уторном узле

а – в резервуаре без дефекта окрайки; б – в резервуаре с локальным дефектом окрайки; в – в резервуаре с дефектом на 1 окрайке; г – в резервуаре с дефектом на двух окрайках



а)



б)

Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений
а – в образце без деформации; б – в образце с поднятой на 5° крайкой

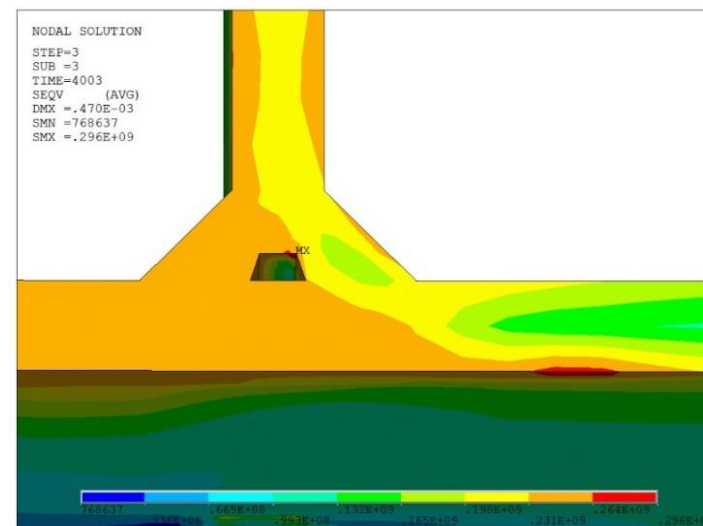
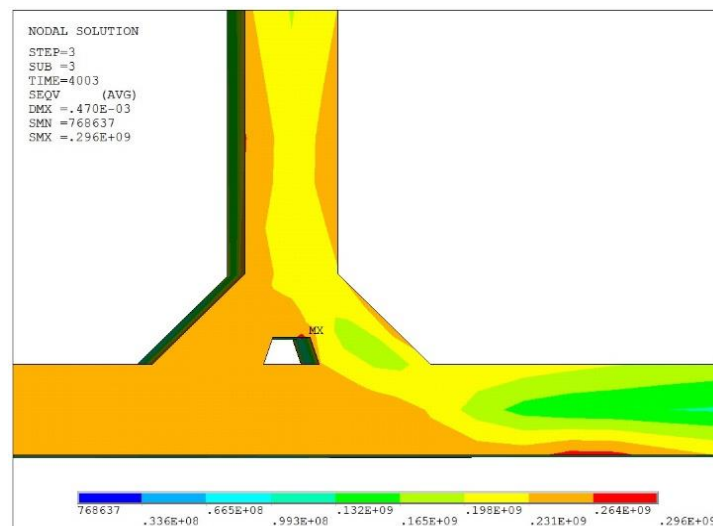


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных внутренних
напряжений в модели приближенной к реальным размерам

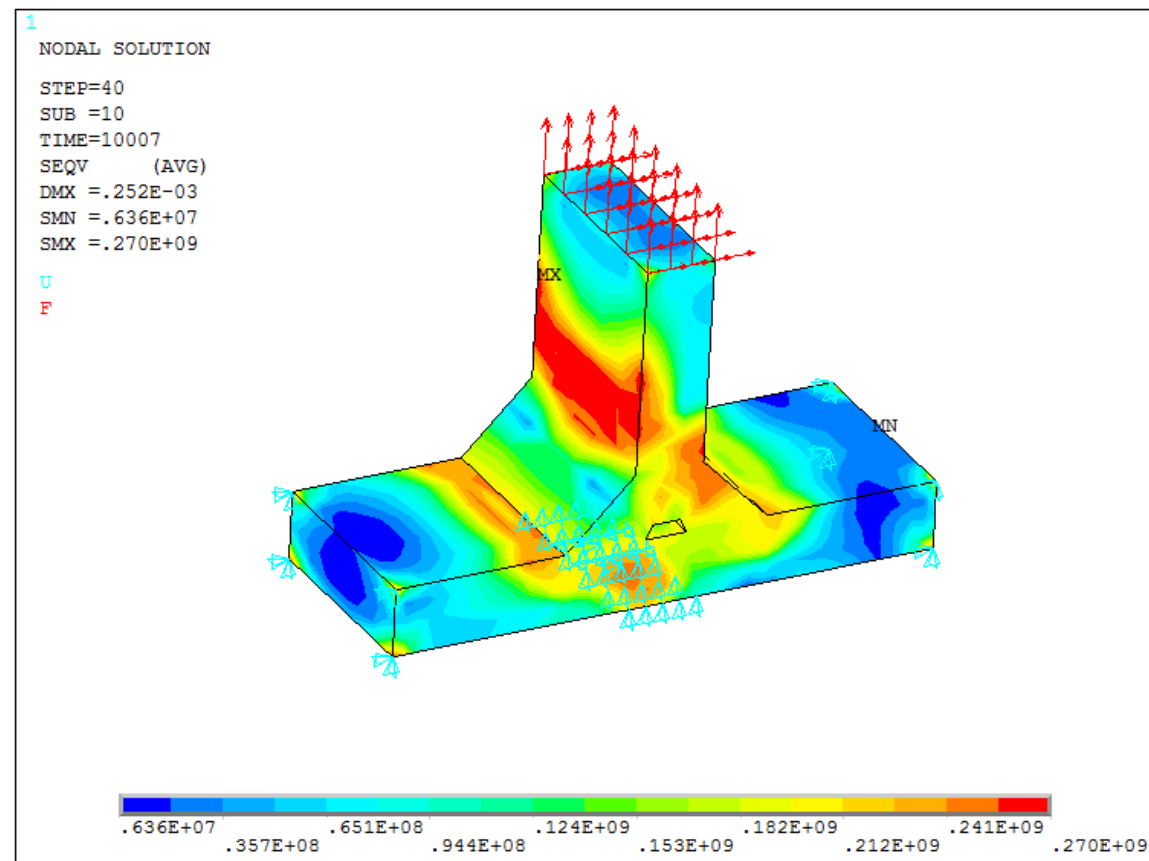


Рисунок 6 – Распределение полей напряжения в математической модели образца с указанием направления нагрузки и мест закрепления