

На правах рукописи

**ШАРНИНА ГУЛЬНАРА САЛАВАТОВНА**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ  
НЕФТЕ- И НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДОВ**

Специальность 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность  
(нефтегазовая отрасль)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа - 2003

Работа выполнена на кафедре «Машины и аппараты химических производств»  
Уфимского государственного нефтяного технического университета

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Кузеев Искандер Рустемович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Халимов Андалис Гарифович

кандидат технических наук  
Журавлев Герман Валентинович

Ведущее предприятие: Открытое акционерное общество  
«Уралтранснефтепродукт»

Защита состоится « 2 » июля 2003 г. в 10<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан « 2 » июня 2003 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Ибрагимов И.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г. № 116-ФЗ нефтепроводы и нефтепродуктопроводы относятся к категории опасных производственных объектов. Госгортехнадзор России приводит данные о том, что в Российской Федерации эксплуатируются 49,8 тыс. км нефтепроводов и 19,5 тыс. км нефтепродуктопроводов, из которых соответственно 66 и 65 % эксплуатируются свыше 20 лет.

Анализ аварийности, выполненный Госгортехнадзором России, показывает, что основными причинами аварий, случившихся в 1992 – 2000 гг., являются внешние физические воздействия на трубопроводы (34,7 %), нарушения норм и правил производства работ при строительстве и ремонте, отступления от проектных решений (24,7 %), коррозионные повреждения (23,5 %), нарушения технических условий при изготовлении труб, деталей и оборудования (12,4 %), ошибочные действия эксплуатационного и ремонтного персонала (4,7 %). Применительно к длительно эксплуатируемым нефтепроводам на эти причины накладываются особенности, определяемые уровнем техники и технологии строительства тех лет.

В эксплуатации находятся тысячи километров нефтепроводов и нефтепродуктопроводов, построенных в 50 – 80 – е годы с применением газопрессовой и электроконтактной сварки. Необходимость быстрого сооружения нефтепроводов и нефтепродуктопроводов в сочетании с несовершенством технологии сварочных работ приводила к снижению качества строительно-монтажных работ, что явилось причиной возникновения различных дефектов в сварных соединениях и околошовных зонах. Длительность срока эксплуатации трубопроводов, непрерывно изменяющиеся параметры перекачки и окружающей среды способствовали увеличению количества коррозионных и усталостных повреждений в сварных соединениях и металле труб.

Например, на нефтепроводе Туймазы-Уфа-II ( $\varnothing$  377 мм), построенном в 1950 году, внутритрубная диагностика на участке протяженностью 52 км выявила в сварных соединениях и стенках труб более 5000 дефектов различного характера (потери металла, вмятины, гофры, расслоения, коррозионные повреждения стенки трубы, дефекты сварных соединений и т.п.). Эти повреждения снижают несущую способность линейной части магистрального нефтепровода по сравнению с проектной, что приводит к увеличению вероятности отказов и уменьшению срока безопасной эксплуатации нефтепровода.

В настоящее время в процессе диагностирования длительно эксплуатируемых нефтепроводов и нефтепродуктопроводов выяснилось, что прочность металла сварных соединений снизилась, в том числе и из-за наличия в них различных дефектов, но в то же время степень коррозионного износа и деформационного старения металла стенок труб позволяют дальнейшую эксплуатацию трубопроводов при условии, что будет обоснованно рассчитан ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и стенок труб с дефектами.

Поэтому весьма актуальной становится задача определения ресурса безопасной эксплуатации длительно эксплуатируемых нефтепроводов и нефтепродуктопроводов с дефектами сварных соединений и стенок труб, в том числе и трубопроводов со сварными соединениями, выполненными газопрессовой и электроконтактной сваркой. Хотя газопрессовая сварка при сооружении трубопроводов в настоящее время не применяется, но трубопроводы с газопрессовыми сварными соединениями продолжают эксплуатироваться, и их количество достаточно велико, чтобы оценка срока их безопасной эксплуатации являлась достаточно актуальной в настоящее время, а электроконтактная сварка продолжает применяться при строительстве трубопроводов.

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Определение ресурса безопасной эксплуатации длительно эксплуатируемых нефтепроводов и нефтепродуктопроводов на основе анализа режима нагружения и концентрации напряжений в сварных соединениях и дефектах труб.

## **ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

1. Исследовать механические характеристики основного металла, металла швов и околошовных зон электродуговых сварных соединений и металла зоны сварки газопрессовых сварных соединений длительно эксплуатируемого нефтепровода.

2. Выполнить экспериментальные исследования малоциклового долговечности металла сварных соединений и основного металла длительно эксплуатируемого нефтепровода.

3. Исследовать влияние отклонений формы сварных стыков и неравномерности распределения механических характеристик по зонам сварных соединений, выполненных газопрессовой сваркой, на их напряженно-деформированное состояние с использованием метода конечных элементов.

4. Разработать методику определения ресурса безопасной эксплуатации длительно эксплуатируемых нефтепроводов и нефтепродуктопроводов на основе анализа режима нагружения и концентрации напряжений в сварных соединениях и дефектах труб.

## **НАУЧНАЯ НОВИЗНА**

1. Механические характеристики металла сварных соединений, выполненных газопрессовой сваркой, на участках зоны сварки значительно ниже, чем характеристики металла электродуговых швов и основного металла; малоцикловая долговечность при циклических испытаниях на осевое растяжение металла сварных стыков, выполненных газопрессовой сваркой, меньше долговечности основного металла в 1,5 – 2 раза, а при изгибных циклических деформациях – в 1,6 раз, что необходимо учитывать при определении разрешенного давления и ресурса безопасной эксплуатации нефте- и нефтепродуктопроводов.

2. С использованием метода конечных элементов определены коэффициенты концентрации напряжений для типичных форм сварных соединений, выполненных газопрессовой сваркой. Значения коэффициентов концентрации сварных соединений, выполненных газопрессовой сваркой, определенные методом конечных элементов, на 4,8 – 50,2 % выше значений теоретических ко-

коэффициентов концентрации этих соединений в зависимости от формы сварного стыка.

### **ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ**

Результаты исследований, проведенных в данной работе, использованы УГНТУ для расчета остаточного ресурса участка нефтепровода Туймазы – Уфа – II при выполнении заключения экспертизы промышленной безопасности «Экспертная оценка соответствия нефтепровода Туймазы – Уфа – 2 очереди требованиям промышленной безопасности Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

**На защиту выносятся** следующие основные положения:

1. Результаты сравнительного анализа механических характеристик металла сварных соединений, выполненных газопрессовой и электродуговой сваркой, и основного металла длительно эксплуатируемого нефтепровода, распределения микротвердости по зонам сварных соединений и сравнительного анализа малоцикловой долговечности основного металла и металла сварных соединений, выполненных газопрессовой сваркой.

2. Предложенный в работе экспериментально-расчетный подход к оценке коэффициентов концентрации напряжений сварных соединений, выполненных газопрессовой сваркой, заключающийся в исследовании неравномерности распределения механических характеристик по зонам сварных соединений, построении на этой основе расчетных моделей сварных стыков и расчете методом конечных элементов напряжений и деформаций в сварных стыках.

3. Методика определения ресурса безопасной эксплуатации нефтепроводов и нефтепродуктопроводов на основе анализа режима нагружения и концентрации напряжений в сварных соединениях и дефектах труб.

### **АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 1999); Втором научно-техническом семинаре «Обеспечение промышленной безопасности производственных объектов топливно-

энергетического комплекса Республики Башкортостан» (Уфа, 1999); 51-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2000); межрегиональной научно-методической конференции «Проблемы нефтегазовой отрасли» (Уфа, 2000); III-м Конгрессе нефтегазопромышленников России (секция Н «Проблемы нефти и газа», Уфа, 2001).

### **ПУБЛИКАЦИИ**

По материалам диссертации опубликовано десять работ.

### **ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка использованных источников из 126 наименований, содержит 158 с. машинописного текста, 48 рисунков, 22 таблицы и 1 приложение.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении раскрывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, цель работы, основные положения, выносимые на защиту, а также отражена научная новизна выполненных исследований и их практическая ценность.

**В первой главе** «Анализ аварийности, причин отказов нефте- и нефтепродуктопроводов, методов оценки их долговечности и концентрации напряжений в сварных соединениях и дефектах труб» выполнен анализ работ, посвященных исследованию и обоснованию сроков безопасной эксплуатации нефтепроводов и нефтепродуктопроводов.

Проведен анализ аварийности и причин отказов сварных соединений и основного металла труб нефте- и нефтепродуктопроводов. Установлено, что основными причинами отказов являются несовершенства проектных решений, заводской брак труб, брак строительно-монтажных работ, общая и язвенная коррозия, коррозионное растрескивание и коррозионная усталость металла нефтепроводов, нарушения правил эксплуатации, включающие ошибки обслу-

живающего персонала, механические повреждения трубопроводов сторонними организациями и ремонтной техникой в процессе эксплуатации.

Из анализа разрушений линейной части нефте- и нефтепродуктопроводов последних лет видно, что из всех случаев разрушений часто встречающимися являются разрушения по основному металлу труб, в зоне заводского (продольного) сварного шва, а также по монтажным (кольцевым) стыкам на трубопроводах, построенных в 1940 – 1950 годах, когда основными способами сварки труб были ручная электродуговая и газопрессовая сварка, а контроль сварных стыков не был налажен в достаточной степени. На трубопроводах, построенных в течение последних 20-25 лет, число разрушений по монтажным кольцевым стыкам практически незначительно.

Проведена оценка характеристик концентрации напряжений в сварных соединениях и дефектах труб нефте- и нефтепродуктопроводов.

Выполнен анализ методов оценки долговечности при циклическом нагружении нефтепроводов, расчета опасности дефектов, оценки работоспособности труб нефтепроводов, позволяющих оценить вероятность разрушения труб с дефектами, степень опасности и допустимости дефектов и прогнозировать ресурс труб с дефектами в условиях малоциклового усталости. Сделан вывод о том, что разработанные методики оценки долговечности имеют ряд недостатков. В нормативных документах и опубликованных работах не даются конкретные рекомендации по анализу режима нагружения нефтепроводов для использования в расчетах ресурса. В литературе практически не рассмотрены вопросы влияния формы, размеров и неравномерности распределения механических характеристик по зонам сварных соединений, выполненных газопрессовой и электроконтактной сваркой, на концентрацию напряжений. Неравномерность распределения механических характеристик металла по зонам газопрессовых сварных соединений, а также их влияние на концентрацию напряжений не изучены, тогда как около 40 % аварий и разрушений приходится на сварные соединения.

В заключение первой главы на основе анализа литературных данных

сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** «Исследование металла сварных соединений и основного металла труб длительно эксплуатируемого нефтепровода» исследованы изменения механических характеристик металла сварных соединений, выполненных газопрессовой (ГПС) и электродуговой (ЭДС) сваркой, и основного металла нефтепровода после длительного срока эксплуатации (50 лет). Проведены испытания образцов из основного металла, металла швов и зон термического влияния (ЗТВ) сварных соединений, выполненных ЭДС, и металла зоны сварки, включающей зону сплавления и зону влияния, сварных соединений, выполненных ГПС (сталь Ст4сп), на растяжение и ударный изгиб. Испытания на растяжение проводились на универсальной разрывной машине фирмы «MST» со скоростью деформации, равной  $8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , при комнатной температуре. Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре МК-30 с энергией удара, равной 150 Дж. В результате испытаний определены механические характеристики (предел прочности, предел текучести, относительное равномерное сужение, относительное сужение при разрыве) и значения ударной вязкости для основного металла, металла швов и металла ЗТВ сварных соединений, выполненных ЭДС, и металла зоны сварки стыков, выполненных ГПС (табл. 1). Установлено, что механические характеристики металла зоны сварки стыков, выполненных ГПС, значительно ниже, чем характеристики металла электродуговых швов и основного металла. Значение предела прочности основного металла после 50 лет эксплуатации находится в пределах, указанных в ГОСТ и сертификате на трубы. При испытаниях на ударную вязкость установлено, что в сварных швах и зонах термического влияния значения ударной вязкости более низкие по сравнению с основным металлом, что указывает на высокую вероятность хрупкого разрушения швов. Такие низкие значения могут быть обусловлены влиянием микроструктуры, а также наличием непроваров и пор, обнаруженных в швах. При этом для металла зоны сварки газопрессовых сварных стыков значения ударной вязкости ниже, чем для металла электродуговых швов и основного металла, что, по-видимому, обуслов-

лено сильным наклепом ферритных зерен.

Таблица 1

Механические характеристики основного металла и металла сварных соединений (сталь Ст4сп)

Наименование металла	Средние значения механических характеристик*				
	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относит. удлинение $\delta$ , %	Относит. сужение при разрыве $\psi_k$ , %	Ударная вязкость КСV, Дж/см <sup>2</sup>
Основной металл (кольцевое направление)	270	494	31	47	82
Основной металл (осевое направление)	284	505	28	43	101
Сварной шов (электродуговая сварка)	299	515	22	39	52
ЗТВ (электродуговая сварка)	286	487	25	47	60
Металл зоны сварки (газопрессовая сварка)	227	397	20	35	45
Ст4сп по ГОСТ 14637-89 (поперечное напр-е)	265	410-530	23-26	-	> 80
Ст4сп по ГОСТ 19282-73 (продольное напр-е)	265	410-530	23-26	-	> 100
Сертификат на трубы	-	455-565	21-30	-	-

\* - Средние значения механических характеристик устанавливались по испытаниям 5 образцов для каждой группы образцов - основного металла и металла сварных соединений

Для определения реальной прочности металла сварных соединений проводились испытания на растяжение образцов с уже имеющимися дефектами в корне швов, выполненных электродуговой сваркой (непровары и подрезы), и в зоне сварки стыков, выполненных газопрессовой сваркой (несплавления в стыках), причем наружная и внутренняя поверхности образцов механически не обрабатывались. Для образцов сварных соединений, выполненных ЭДС, разрушение прошло по швам; для образцов сварных соединений, выполненных

ГПС, - по металлу зоны сплавления или в непосредственной близости от зоны сплавления. Установлено, что реальная прочность на растяжение металла сварных швов, выполненных ЭДС, ниже значений предела прочности металла этих швов, установленного на стандартных образцах, в 2 раза, а реальная прочность металла зоны сварки стыков, выполненных ГПС, ниже значений предела прочности металла зоны сварки этих стыков в 1,5 раза.

С целью определения предельного числа циклов до разрушения и зависимости длины усталостной трещины от числа циклов нагружения были проведены испытания на малоцикловую усталость натуральных образцов основного металла и сварных соединений труб. Испытания проводились по схеме чистого изгиба по симметричному циклу. Наружная и внутренняя поверхности образцов не обрабатывались, их толщина соответствовала толщине металла труб. Контроль над моментом образования и роста усталостных трещин проводился с помощью бинокулярного микроскопа МБС-10. Установлены средние значения долговечности для образцов из основного металла и сварных соединений, выполненных газопрессовой и электродуговой сваркой, построены графики зависимости длин усталостных трещин на образцах сварных соединений, выполненных ЭДС и ГПС, от числа циклов нагружения. Разрушение образцов сварных соединений проходило, как правило, по основному металлу (для ГПС) или в зоне перехода от шва к основному металлу (для ЭДС). Определены значения остаточной долговечности в условиях циклически изменяющихся нагрузок с использованием графиков зависимости длины усталостной трещины от числа циклов нагружения.

Проведено исследование малоцикловой долговечности металла сварных соединений, выполненных газопрессовой сваркой, и основного металла длительно эксплуатируемого нефтепровода при циклических испытаниях на осевое растяжение и изгиб.

Циклические испытания на осевое растяжение образцов из металла сварных стыков, выполненных газопрессовой сваркой, и основного металла (сталь Ст4сп) проведены по ГОСТ 25.502-79. Испытания проводились при асиммет-

ричном мягком нагружении с частотой нагружения 5 Гц при максимальном напряжении, равном пределу прочности, определенному именно для этой стали предварительными испытаниями на однократное растяжение для основного металла и металла газопрессового стыка. Образцы испытывались на 4-х уровнях напряжений ( $0,25, 0,5, 0,75, 0,9\sigma_B$ ), на каждом уровне по 5 образцов из основного металла и по 3 образца из металла газопрессовых сварных стыков. В результате испытаний определено предельное число циклов до разрушения на каждом уровне нагружения для основного металла и металла сварных стыков, выполненных газопрессовой сваркой, и построены кривые усталости, кривые распределения долговечности по уровням напряжений и кривые усталости для различных вероятностей разрушения ( $P = 10, 30, 50, 70, 90 \%$ ) (рис. 1, 2) для образцов из основного металла и металла газопрессовых сварных стыков.

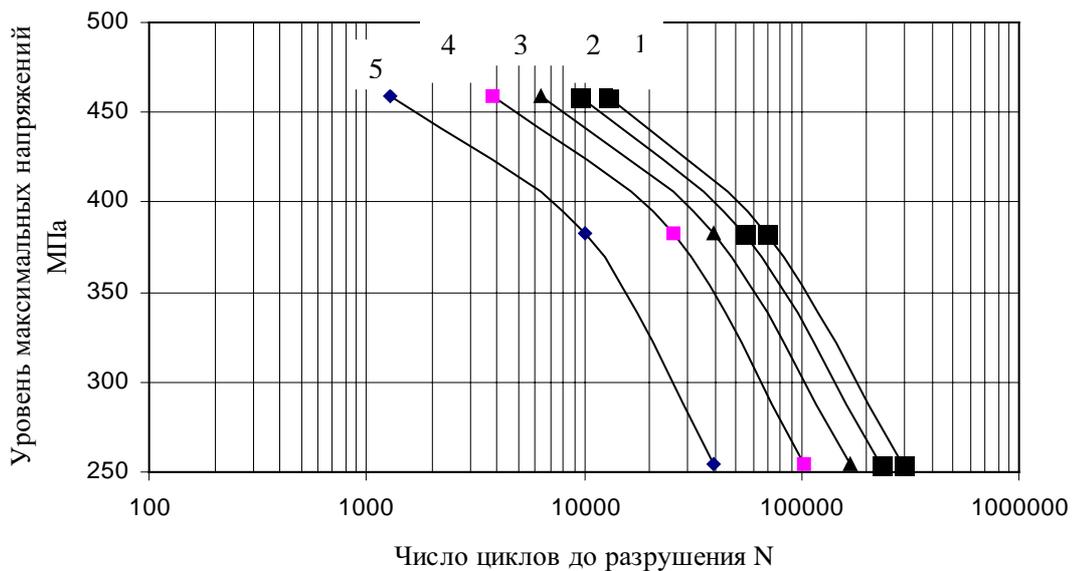


Рис. 1. Кривые усталости для различных вероятностей разрушения при циклических испытаниях на осевое растяжение для основного металла:

1 –  $P = 90 \%$ ; 2 –  $P = 70 \%$ ; 3 –  $P = 50 \%$ ; 4 –  $P = 30 \%$ ; 5 –  $P = 10 \%$

Циклическими испытаниями на осевое растяжение образцов из металла сварных стыков, выполненных газопрессовой сваркой, и основного металла длительно эксплуатируемого нефтепровода установлено, что долговечность металла газопрессовых сварных стыков в среднем в 1,5 – 2 раза меньше долговечности основного металла.

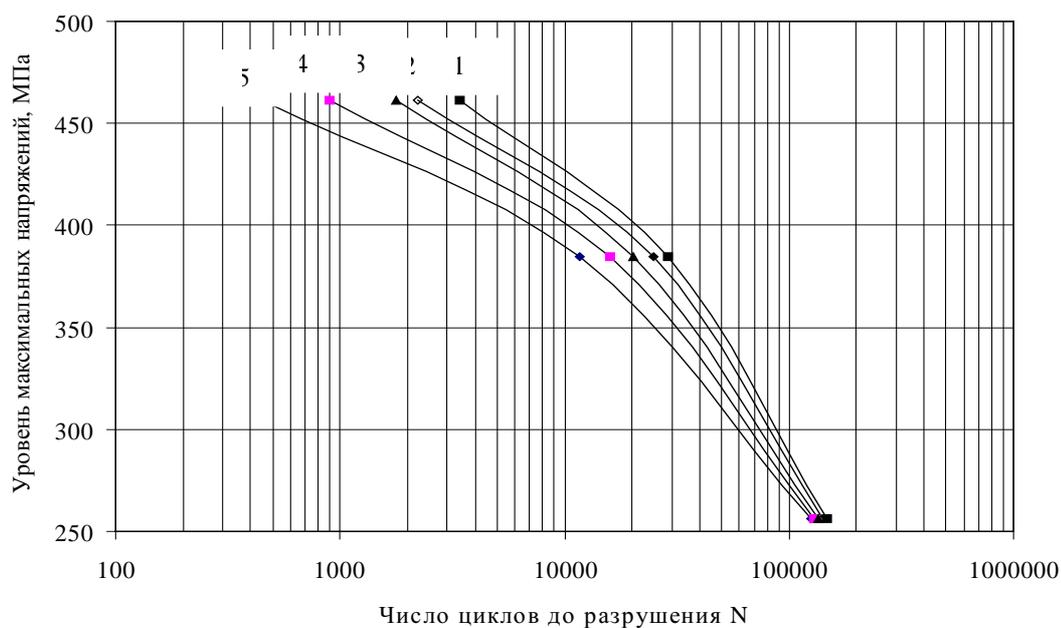


Рис. 2. Кривые усталости для различных вероятностей разрушения при циклических испытаниях на осевое растяжение для металла газопрессовых стыков:

1 –  $P = 90\%$ ; 2 –  $P = 70\%$ ; 3 –  $P = 50\%$ ; 4 –  $P = 30\%$ ; 5 –  $P = 10\%$

Проведены циклические испытания на изгиб образцов из основного металла длительно эксплуатируемого нефтепровода (сталь Ст4сп). Образцы испытывались на установке для испытаний на малоцикловую усталость при симметричном мягком нагружении по схеме поперечного изгиба с частотой нагружения 10 циклов в минуту, при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ . Построены усталостные кривые, кривые распределения долговечности по уровням напряжений и кривые усталости для различных вероятностей разрушения ( $P = 10, 30, 50, 70, 90\%$ ) для образцов из основного металла.

**В третьей главе** «Анализ напряженно-деформированного состояния сварных соединений длительно эксплуатируемых нефтепроводов» проведена оценка концентрации напряжений в сварных соединениях, выполненных газопрессовой сваркой, длительно действующего нефтепровода методом конечных элементов (МКЭ). В работе использован вычислительный комплекс программ МКЭ ANSYS 5.5.3. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) в газопрессовых сварных стыках нефтепровода проведено двумя методами: по упругой модели и по упругопластической модели.

По упругой модели расчеты напряженно-деформированного состояния вы-

полнены отдельно на действие внутреннего давления и на действие суммарных продольных напряжений от совместного действия внутреннего давления и положительного перепада температур. Расчет осуществлялся для четырех типов геометрических форм газопрессовых сварных стыков (рис. 3).

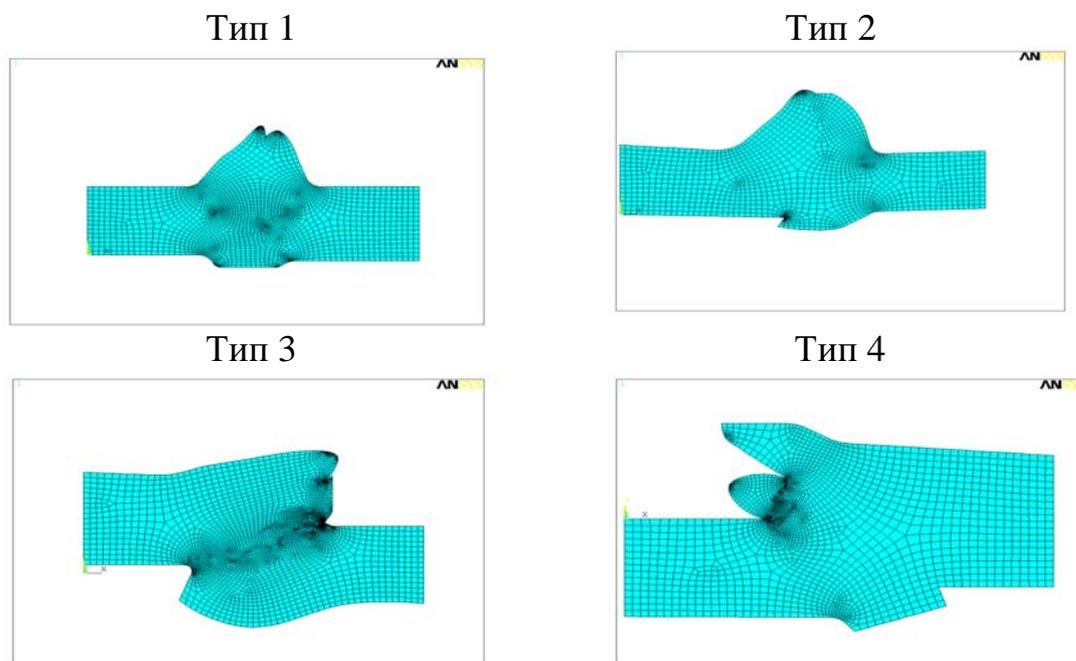


Рис. 3. Конечно-элементные модели основных типов геометрических форм газопрессовых сварных стыков: тип 1 и тип 2 – формы стыков, встречающиеся в 75 – 80 % случаев; тип 3 – в 15 – 20 % случаев; тип 4 – до 5 % случаев

Напряженно-деформированное состояние при действии внутреннего давления имеет две отличительные особенности: появление касательных напряжений разного знака в зонах, примыкающих к основанию усиления шва (рис. 4, а); деформация удлинения кольцевого сечения от действия внутреннего давления значительно больше удлинения зоны стыка, что приводит к появлению изгибных деформаций и напряжений по границам сварного стыка (рис. 4, б).

От действия внутреннего давления по упругой модели рассчитаны максимальные значения главных  $\sigma_1$ , изгибных  $\sigma_x$ , касательных напряжений  $\tau_{xy}$  и интенсивностей напряжений  $\sigma_i$  в местах наибольшей концентрации напряжений для сварного стыка типа 2; рассчитаны номинальные значения этих напряжений в гладкой части стенки трубы на достаточном удалении от концентратора и определены условные коэффициенты концентрации главных, осевых, ка-

сательных напряжений и коэффициенты концентрации интенсивности напряжений сварного стыка типа 2 (табл. 3.1).

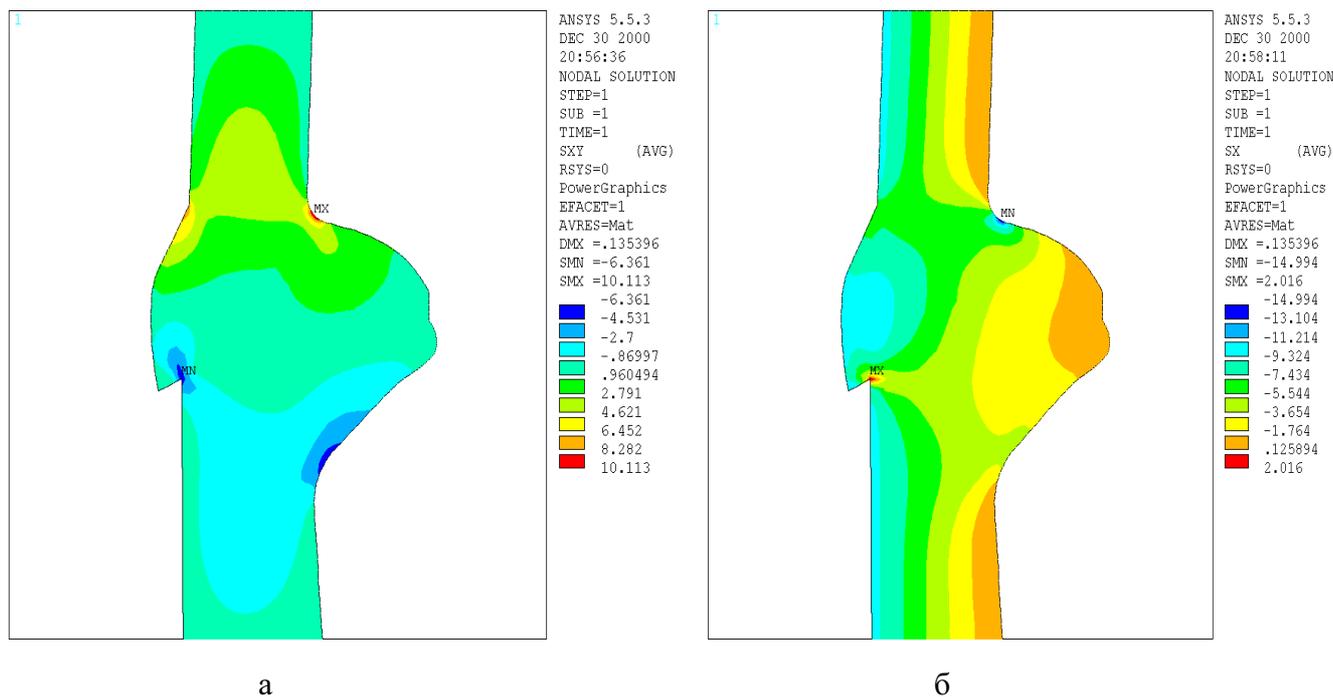


Рис. 4. Распределение изополос касательных  $\tau_{xy}$  (а) и изгибных  $\sigma_x$  (б) напряжений от действия внутреннего давления в зоне сварного стыка типа 2

Анализ результатов расчетов по упругой модели от действия внутреннего давления показывает, что в газопрессовых сварных стыках наиболее часто встречающихся типов (типа 1 и 2) концентрация главных напряжений и интенсивностей напряжений от действия внутреннего давления незначительна при достаточно большом уровне номинальных напряжений. В то же время значительные неравномерности распределения изгибных и касательных напряжений даже при общем меньшем уровне их значений могут привести к снижению надежности газопрессовых стыков, особенно на криволинейных участках и на выходе из насосных станций.

При расчете по упругой модели от действия суммарных продольных напряжений получены распределения изополос главных напряжений  $\sigma_1$  и интенсивностей напряжений  $\sigma_i$  для газопрессовых сварных стыков типов 1, 2, 3, 4. Рассчитаны максимальные значения главных напряжений и интенсивностей напряжений в местах наибольшей концентрации напряжений, значения напряжений в гладкой части стенки трубы на достаточном удалении от концентратора

ра, принимаемые за номинальные напряжения, а из их соотношения рассчитаны условный коэффициент концентрации главных напряжений и коэффициент концентрации интенсивности напряжений (см. табл. 2).

Таблица 2

Напряжения и коэффициенты концентрации напряжений, определяемые по упругой модели от действия продольных суммарных напряжений.

№	Наименование исследуемого параметра	Тип образца по геометрической форме			
		1	2	3	4
1	Главные напряжения $\sigma_1$ , МПа: - максимальные $\sigma_{1 \max}$ - номинальные $\sigma_{1 \text{н}}$	25,12	22,78	80,97	227,02
		11,183	10,1	17,79	25,31
2	Условный коэффициент концентрации главных напряжений $\alpha_{\sigma 1}$	2,25	2,26	4,55	8,97
3	Интенсивность напряжений $\sigma_i$ , МПа: - максимальные $\sigma_{i \max}$ - номинальные $\sigma_{i \text{н}}$	25,12	23,97	80,07	251,52
		8,38	8,04	17,79	27,35
4	Коэффициент концентрации интенсивности напряжений $\alpha_{\sigma i}$	2,99	2,98	4,50	9,2
5	Интенсивность упругих деформаций $\epsilon_i$	$0,16 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$

Из анализа результатов видно, что даже при отсутствии радиальных и угловых смещений свариваемых кромок труб усиление и грат, образовавшиеся при осаживании свариваемых труб (стыки типа 1 и 2), дают значения коэффициентов концентрации интенсивности напряжений, равные 2,98 – 2,99 на закругленных участках сварного стыка. Радиальные смещения кромок с поворотом плоскости сплавления (стык типа 3) даже при наличии закруглений у оснований выступов увеличивают коэффициент концентрации в 1,5 и более раз, а такие же дефекты с острыми углами, образовавшимися при выдавливании металла зоны влияния (стык типа 4), имеют коэффициент концентрации в 3 раза больший по сравнению с коэффициентами концентрации образцов типа 1 и 2.

Установлено, что значения коэффициентов концентрации напряжений газопрессовых сварных стыков типа 1, 2, 3, 4, определенные методом конечных элементов по упругой модели, на 4,8 – 50,2 % выше, чем значения теоретических коэффициентов концентрации этих стыков.

Оценка напряженно-деформированного состояния сварных стыков по не-

линейной упругопластической модели осуществлялась итерационным методом - методом касательной жесткости Ньютона – Рафсона. Для расчетов НДС сварных стыков с использованием нелинейной упругопластической модели зона сварного стыка разбивалась на участки со значениями твердости металла одного уровня. Основой для определения границ участков с различными значениями твердости и других механических характеристик являются данные измерений микротвердости основных типов сварных соединений, выполненных газопрессовой и электродуговой сваркой. Определение микротвердости проводилось на приборе ПМТ-3 алмазной пирамидой с углом при вершине  $136^\circ$  и нагрузкой 100 г. Диаграммы распределения микротвердости по зонам газопрессового сварного соединения типа 1 и электродугового сварного соединения представлены на рис. 5, 6.

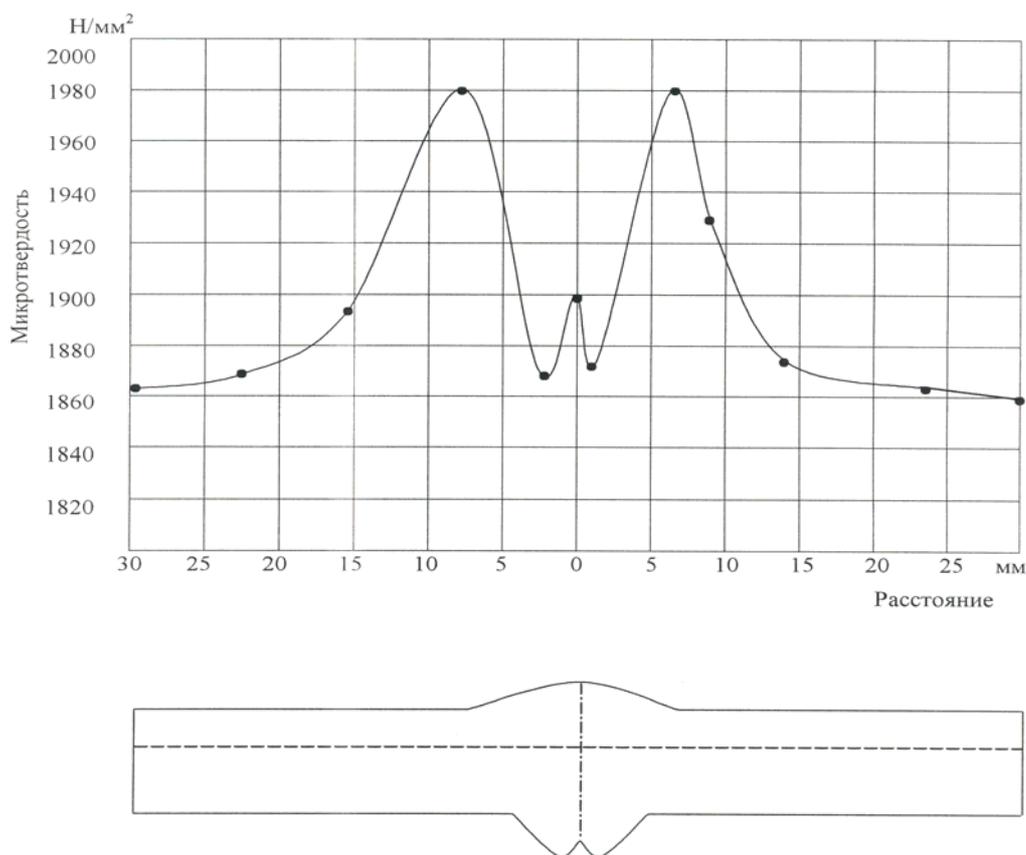


Рис. 5. Распределение микротвердости по зонам газопрессового сварного соединения типа 1

По результатам исследований микротвердости установлено:

- микротвердость металла электродугового сварного шва на 13 % выше

микротвердости зоны термического влияния и на 20 % выше микротвердости основного металла;

- микротвердость металла зоны сплавления газопрессового сварного стыка на 4 % ниже микротвердости металла зоны влияния и на 3 % выше значения микротвердости основного металла;

- распределение микротвердости по зонам газопрессового сварного соединения носит неравномерный характер. Максимальное значение микротвердости выявлено на расстоянии 6 - 7 мм от зоны сплавления и выше значения микротвердости основного металла на 7 %.

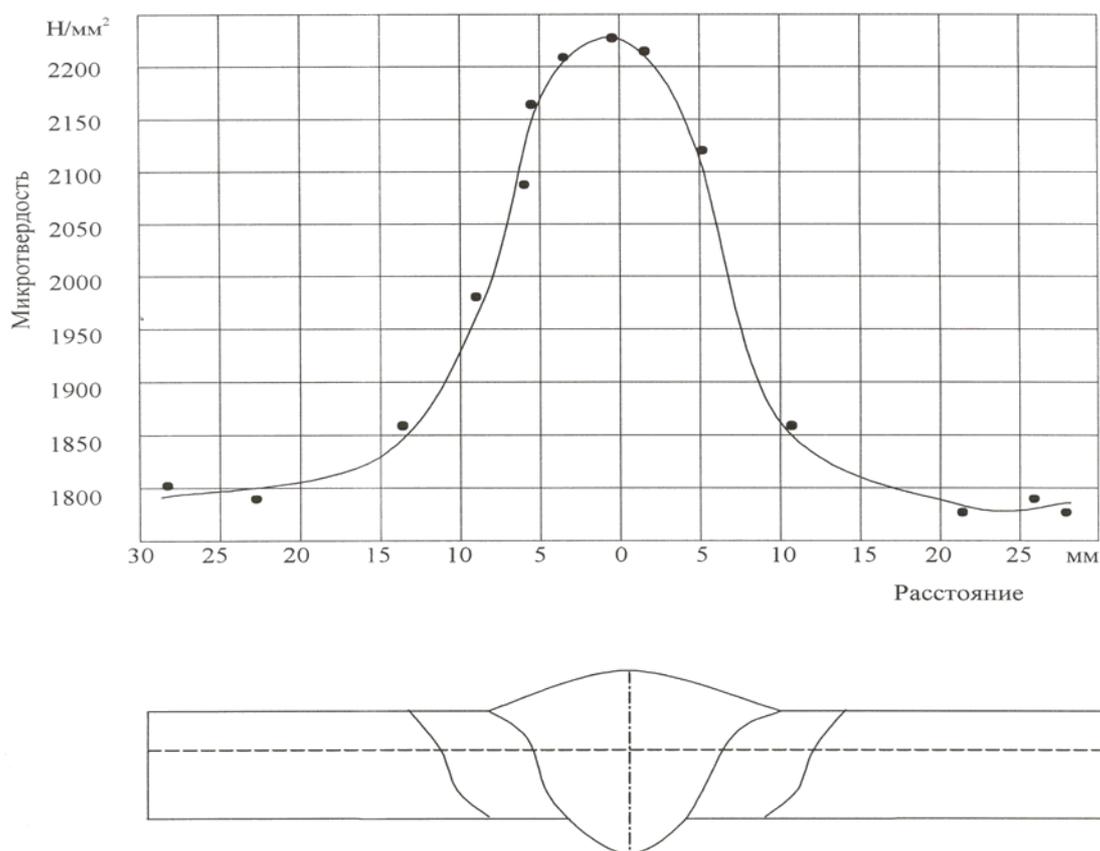


Рис. 6. Распределение микротвердости по зонам электродугового сварного соединения

Для газопрессовых сварных стыков типа 3 и 4 использовались значения микротвердости, замеренные по направлению, перпендикулярному линии сплавления стыков. Каждый участок со значениями твердости одного уровня является конечным элементом - твердым телом с характеристиками пластичности, прочности и деформируемости, характеризующими значениями твердости.

В результате расчетов получены твердотельная модель нелинейных упруго-пластичных элементов, распределения по участкам сварного стыка типа 3 изополос главных напряжений  $\sigma_1$ , изополос полных упруго-пластических деформаций растяжения  $\varepsilon_{\Sigma}^{pl}$  и осевых упруго-пластических деформаций удлинения  $\varepsilon_x^{pl}$ . Выявлено направление развития зон сдвиговых деформаций  $\gamma_{xy}^{pl}$  под действием касательных напряжений  $\tau_{xy}$  для образца типа 3.

**В четвертой главе** «Определение ресурса безопасной эксплуатации длительно эксплуатируемых нефтепроводов и нефтепродуктопроводов» разработана методика определения ресурса безопасной эксплуатации длительно эксплуатируемых нефте- и нефтепродуктопроводов на основе анализа режима нагружения, принципа линейного накопления повреждений и концентрации напряжений в сварных соединениях и дефектах труб.

По принципу линейного накопления повреждений суммарное повреждение за один год определяется по формуле

$$\Pi_{\text{год}} = \frac{N_1}{N_1^*} + \frac{N_2}{N_2^*} + \dots + \frac{N_i}{N_i^*}, \quad (1)$$

где  $N_1, N_2$  – число циклов нагружения при режимах 1 и 2 за один год;

$N_1^*, N_2^*$  - число циклов, которое может выдержать до разрушения нефтепровод с дефектом при режимах 1 и 2, включающее оба этапа усталостного разрушения – этап зарождения и этап роста трещины;

$N_i$  - число циклов нагружения при  $i$ -том режиме за один год;

$N_i^*$  - общее число циклов до разрушения, которое может выдержать нефтепровод с дефектом при  $i$ -том режиме.

Уровень накопленных повреждений  $\Pi$  за все время эксплуатации определяется как сумма ежегодных повреждений нефтепровода в течение всего срока эксплуатации по формуле

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i, \quad (2)$$

где  $n$  – количество лет, в течение которых эксплуатировался нефтепровод.

Ресурс безопасной эксплуатации определяется по формуле

$$R = 1 - П. \quad (3)$$

Проведен анализ режимов нагружения нефтепроводов с приведением несимметричного режима нагружения к эквивалентному отнулевому и разбиением диапазона изменения рабочего давления на промежутки, называемые классами. Приведение несимметричного процесса нагружения к эквивалентному отнулевому производится по соотношению

$$\Delta P = P_{\max} - k_{\text{но}} \cdot P_{\min}, \quad (4)$$

где  $k_{\text{но}}$  – уровень оптимизма.

Для различных значений уровня оптимизма ( $k_{\text{но}}$ ) получаются оценки эквивалентного процесса нагружения: от крайне пессимистической ( $k_{\text{но}} = 0$ ) до крайне оптимистической ( $k_{\text{но}} = 1$ ). Реалистической позиции соответствует промежуточное значение коэффициента приведения  $k_{\text{но}} = \{0; 1\}$ .

Подсчитывается количество размахов давлений, попадающих в каждый класс, за контрольный период (в данном случае, за год) при различных уровнях оптимизма. По количеству размахов рабочих давлений в каждом классе определяются фактические числа циклов нагружения нефтепровода  $N_1 \dots N_i$  за каждый год для каждого из  $n$  классов. Расчет для длительно эксплуатируемых нефтепроводов предпочтительно вести с позиции крайнего пессимизма, с запасом.

Общее число циклов до разрушения нефтепровода с дефектом при циклическом нагружении определяется как сумма числа циклов на этапе зарождения трещины в дефекте, рассчитываемого из уравнения Коффина – Мэнсона, и числа циклов на этапе развития трещины, определяемого по уравнению Пэриса – Махутова. При расчете числа циклов нагружения на этапе зарождения трещины в уравнение Коффина-Мэнсона подставляется амплитуда истинной деформации в вершине зарождающейся трещины в дефекте при несимметричном нагружении, приведенная к эквивалентному симметричному виду.

В данной работе в качестве примера произведена оценка ресурса безопасной эксплуатации участка длительно эксплуатируемого нефтепровода Туймазы - Уфа – II с дефектом газопрессового сварного соединения в виде отклонения формы стыка.

Выполнен анализ режимов нагружения длительно эксплуатируемого нефтепровода Туймазы – Уфа – II на участке Языково - Нурлино, введенного в эксплуатацию в 1950 году, за два интервала времени – с 1950 по 1995 год (когда предельное разрешенное рабочее давление в нефтепроводе составляло 4,0 МПа) и с 1996 года до настоящего времени (при предельном разрешенном давлении 2,5 МПа). Анализ выполнен по данным о суточных колебаниях рабочего давления за 1989 и 1998 годы, в течение которых наблюдалась наибольшая нестабильность в работе изучаемого участка нефтепровода, частые и значительные колебания давления в нефтепроводе и довольно длительные простои. Построены графики изменения рабочего давления в исследуемом нефтепроводе, проведено сопоставление характера нагружения, сделаны выводы по поводу возможности возникновения внезапных отказов.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. В длительно эксплуатируемых нефте- и нефтепродуктопроводах со сварными соединениями, выполненными газопрессовой сваркой, механические характеристики металла зоны сварки газопрессовых сварных соединений на 19 – 35 % ниже характеристик основного металла, что вынуждает ограничивать уровень напряжений и величину изгибных деформаций в трубопроводах при эксплуатации и капитальном ремонте.

2. Малоцикловая долговечность при циклических испытаниях на осевое растяжение металла зоны сварки газопрессовых сварных соединений в 1,5 – 2 раза меньше долговечности основного металла. При изгибных циклических деформациях сварных соединений разрушения происходят в зонах влияния сварных соединений, причем долговечность металла зоны сварки газопрессовых сварных стыков в 1,6 раз меньше долговечности основного металла, а долговечность металла шва, выполненного электродуговой сваркой, - в 1,75 раз.

3. Значения коэффициентов концентрации напряжений сварных соединений, выполненных газопрессовой сваркой, определенные методом конечных

элементов по упругой модели, на 4,8 – 50,2 % выше, чем значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений. Установленные коэффициенты концентрации напряжений газопрессовых стыков позволяют оценить значения напряжений для определения срока безопасной эксплуатации нефте- и нефтепродуктопроводов.

4. Разработанная методика определения ресурса безопасной эксплуатации длительно эксплуатируемых нефтепроводов и нефтепродуктопроводов на основе анализа режима нагружения и концентрации напряжений в сварных соединениях и дефектах труб использована для расчета остаточного ресурса участка нефтепровода Туймазы – Уфа – II при выполнении заключения экспертизы промышленной безопасности «Экспертная оценка соответствия нефтепровода Туймазы – Уфа – 2 очереди требованиям промышленной безопасности Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

1. Рафикова Г.С. (Шарнина Г.С.), Рафиков С.К., Кузеев И.Р. Анализ режимов загрузки магистральных нефтепроводов// Материалы 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: Сб. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. – С. 3 – 4.

2. Рафикова Г.С. (Шарнина Г.С.), Рафиков С.К. К определению малоциклового долговечности нефтепроводов в условиях сложного режима загрузки// Материалы 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: Сб. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. – С. 58 – 59.

3. Набиев Р.Р., Хаматдинов З.З., Насыров Р.З., Шаммазов А.М., Рафиков С.К., Рафикова Г.С. (Шарнина Г.С.), Наумкин Е.А. Исследование малоциклового усталости металла гладких дефектов труб нефтепроводов// Обеспечение промышленной безопасности производственных объектов топливно-

энергетического комплекса Республики Башкортостан: Материалы Второго научно-технического семинара. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. - С. 67-74.

4. Худяков М.А., Рафикова Г.С. (Шарнина Г.С.) Малоцикловая долговечность основного металла и сварных соединений труб старых нефтепроводов// Обеспечение промышленной безопасности производственных объектов топливно-энергетического комплекса Республики Башкортостан: Материалы Второго научно-технического семинара. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. – С. 143-147.

5. Рафикова Г.С. (Шарнина Г.С.), Худяков М.А. Изучение механических свойств металла сварных стыков длительно эксплуатирующихся нефтепроводов// Материалы 51-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: Сб. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С. 93 – 94.

6. Худяков М.А., Рафикова Г. С. (Шарнина Г.С.) Исследование механических свойств основного металла и сварных соединений длительно эксплуатируемых нефтепроводов. – М.: Изд-во ООО «ИРЦ Газпром»/ НТС по серии: Транспорт и подземное хранение газа. - 2000. - № 6. – С. 20 – 33.

7. Кузеев И.Р., Рафикова Г.С. (Шарнина Г.С.) Оценка остаточного ресурса нефтепроводов, работающих при несимметричном нагружении// Материалы межрегиональной научно-методической конференции «Проблемы нефтегазовой отрасли»: Сб. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. - С. 152.

8. Рафикова Г.С. (Шарнина Г.С.) Определение гармонических составляющих напряжений в нефтепроводе с помощью Фурье-анализа при несимметричном нагружении// Материалы межрегиональной научно-методической конференции «Проблемы нефтегазовой отрасли»: Сб. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С. 153 – 154.

9. Рафиков С.К., Шарнина Г.С. Исследование напряженно-деформированного состояния газопрессовых стыков магистральных нефтепроводов методом конечных элементов// III Конгресс нефтегазопромышленников России. Секция Н «Проблемы нефти и газа»: Сб. научн. тр.- Уфа: Изд-во «Реактив», 2001. – С. 270.

10. Шарнина Г.С., Буренин В.А., Рафиков С.К. Определение остаточного ресурса нефтепроводов с дефектами на основе анализа режима нагружения и принципа линейного накопления повреждений// Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ: Сб. научн. тр.- Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – С. 210 – 217.