

На правах рукописи

ПОПОДЬКО ДМИТРИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

**ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОЛОЧЕК
С "КАНАВОЧНЫМ ИЗНОСОМ"
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 05.26.03 – "Пожарная и промышленная безопасность"
(Нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа-2004

Работа выполнена на кафедре «Машины и аппараты химических производств» в Уфимском государственном нефтяном техническом университете.

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Кузеев Искандер Рустемович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Султанмагомедов Султанмагомед
Магомедтагирович;

кандидат технических наук
Сагинбаев Рустам Хабирович.

Ведущая организация ООО НГДУ "Аксаковнефть".

Защита состоится 19 ноября 2004 года в 11-30 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 19 октября 2004 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ибрагимов И.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Россия – одна из крупнейших нефтедобывающих держав, которая обладает уникальной сетью нефтепроводов различного назначения. В соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» №116-ФЗ от 21.07.1997 г. нефтепроводы относятся к категории опасных производственных объектов и, следовательно, требуют особого внимания при эксплуатации.

Существует ряд причин, по которым происходит отказ промысловых нефтепроводов. Наиболее распространенной (91%) является внутренняя коррозия, 71% из которой составляет канавочная коррозия. Местом зарождения и развития канавки является нижняя образующая трубопровода. В зависимости от продукта транспортирования, режимов перекачки и многих других факторов образуются канавки различных видов.

Скорость канавочного разрушения иногда достигает 2...3 мм/год, приводя тем самым к частым порывам трубопроводов, снижая гарантийный срок их эксплуатации. Механизм данного вида разрушения является многофакторным.

В настоящее время существует ряд способов борьбы с канавочной коррозией, такие как: технологические методы, применение ингибиторов коррозии, защита полимерными покрытиями, применение магнитных устройств, использование неметаллических, многослойных и армированных труб, являющихся недостаточно эффективными по своим свойствам.

Особое место в ряду традиционных занимает новый способ продления срока службы нефтепроводов – ремонт участка трубопровода с канавочным дефектом методом профилактического поворота трубопровода вдоль продольной оси на определенный угол для вывода дефекта из зоны коррозионного разрушения. Профилактический поворот является принципиально новым методом борьбы с "канавочным износом". Однако

данный метод не исключает появления по нижней образующей новой "канавки". В связи с чем, вызывают интерес распределение напряжений в области канавки до, и после выполнения профилактического поворота под действием внутреннего давления, влияние геометрических размеров зарождающихся дефектов и их взаимного расположения в оболочке на напряженно-деформированное состояние в области канавок различных видов под действием внутреннего давления. Решение такого комплекса вопросов аналитическими методами представляется затруднительным, как и постановка такого количества лабораторных экспериментов.

Внедрение автоматизированных расчетов на основе моделирования с использованием мощных систем автоматизированного проектирования CAD (Computer Aided Design) и инженерного анализа CAE (Computer Aided Engineering), реализующих метод конечных элементов (МКЭ), а также высокий уровень визуализации получаемых результатов позволяют решать подобные комплексные задачи без привлечения значительных затрат и большого числа металлоемких экспериментов.

Необходимость определения напряженно-деформированного состояния и безопасной эксплуатации трубопроводов, ранжирования отдельных участков по срокам их ремонта или замены требует новых подходов и комплексных решений, стимулирует совершенствование существующих методик, позволяющих оценить предельные состояния и надежность трубопроводов.

На основании вышеизложенного, исследование напряженно-деформированного состояния в оболочках с канавочными дефектами под действием внутреннего давления методом конечных элементов является актуальной задачей и требует решения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Оценка безопасной эксплуатации оболочек с "канавочным износом" на основе анализа напряженно-деформированного состояния в области канавочного дефекта под действием внутреннего давления методом конечных элементов.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Проведение вычислительного эксперимента для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки без дефекта под действием внутреннего давления методом конечных элементов (МКЭ). Сравнение полученных результатов с использованием МКЭ с аналитическим решением.

2. Расчет НДС методом КЭ для оболочек с одиночным канавочным дефектом различных видов: "овальной", "шпоночной" и "серповидной" с различными геометрическими характеристиками. Определение максимальных эквивалентных напряжений ($\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{макс}}$) в области канавочных дефектов.

3. Определение НДС в области дефектов методом КЭ для оболочек, неоднократно подверженных "канавочному износу". Исследование зависимости эквивалентных напряжений в области дефектов от их взаимного расположения в оболочке. Анализ распределения эквивалентных напряжений в оболочке с двумя дефектами – старым и постепенно развивающимся новым.

4. Проведение лабораторного эксперимента для проверки расчетов, выполненных с использованием метода конечных элементов. Оценка возможности использования предложенного подхода для определения и анализа НДС в оболочках, подверженных "канавочному износу".

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

1. Методом конечных элементов исследовано НДС цилиндрических оболочек с канавочными дефектами в процессе реального нагружения внутренним давлением.

2. Установлено, что образование второго канавочного дефекта вызывает перераспределение эквивалентных напряжений в оболочке, что приводит к снижению (до 20%) максимальных эквивалентных напряжений в области канавочных дефектов в сравнении с $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{макс}}$ для оболочек с одиночным канавочным дефектом той же геометрии в области упругих деформаций.

Выявлен, так называемый, эффект "втягивания" области канавки во внутрь оболочки, что вызывает упругое изменение её формы.

3. Определены условия безопасной эксплуатации оболочек с двумя канавочными дефектами в области упругих деформаций, в зависимости от их взаимного расположения, исключающего наложение дефектов, под действием внутреннего давления. Рекомендуемое взаимное расположение канавок в оболочке установлено в интервале углов до 100 градусов между центральными сечениями канавок.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

На основании проведенных исследований на базе ПК "ANSYS" разработаны и сформулированы «Методические рекомендации по определению предельного состояния оболочек с канавочными дефектами методом конечных элементов» для использования при определении первоочередности мероприятий по защите трубопроводов от канавочной коррозии методом профилактического поворота.

Результаты исследования и методика по оценке несущей способности цилиндрических оболочек, подверженных "канавочному износу", используются при курсовом и дипломном проектировании студентами 4 и 5 курсов (специализация 171701 – "Проектирование, монтаж, эксплуатация и ремонт оборудования").

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Результаты вычислительного эксперимента по определению допустимых геометрических характеристик одиночных канавочных дефектов трёх видов на основе анализа НДС в оболочках под действием внутреннего давления в области упругих деформаций.

2. Результаты вычислительного эксперимента по определению условий безопасной эксплуатации оболочек с двумя дефектами типа "канавочный износ" в зависимости от их взаимного расположения в оболочке под действием внутреннего давления в области упругих деформаций.

3. Результаты лабораторного эксперимента, подтверждающего достоверность проведенных вычислительных экспериментов.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены:

- на 54-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2003);
- 1-й Международной научно-технической интернет-конференции «Творчество молодых в науке и образовании» (МГУИЭ, Москва, 2003) *(Работа отмечена дипломом Национальной системы развития научной, творческой и инновационной деятельности молодежи России «Интеграция»);*
- 3-й Международной научно-технической конференции "Новые информационные технологии в науке, образовании, экономике" (НИТНОЭ-2003), Т.2., (Владикавказ, 2003);
- VIII Международной научно-технической конференции «Проблема строительного комплекса России» (Уфа, 2004);
- 2-й Международной научно-технической конференции «Новосёловские чтения» (Уфа, 2004);
- V юбилейной Международной молодежной научной конференции "Севергеоэкотех-2004" (Ухта, 2004);
- научной конференции аспирантов, молодых преподавателей и сотрудников вузов и научных организаций «Молодежная наука-нефтегазовому комплексу» (Москва, 2004);
- 55-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2004).

ПУБЛИКАЦИИ

По материалам диссертации опубликовано семь работ.

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка использованных источников из 102 наименований, содержит 120 страниц машинописного текста, 70 рисунков, 18 таблиц и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Представленная работа является поисковым исследованием, в основе которого лежит идея нового подхода с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ПК «ANSYS», для исследования напряженно-деформированного состояния оболочек, подверженных "канавочному износу".

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 освещена проблема канавочной коррозии, традиционные методы борьбы с ней и новый эффективный ресурсосберегающий метод профилактического поворота трубопровода.

Приведены основные положения и определение метода конечных элементов. Показано, что область применения метода конечных элементов, реализованного в программных комплексах, для решения задач различных областей науки и техники достаточно обширна и успешно применяется во всем мире специалистами для решения как классических, так и нестандартных задач.

В заключение первой главы на основе анализа данных литературных источников сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе при использовании метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе инженерного анализа ПК «ANSYS», совместно с системой автоматизированного проектирования "AutoCAD", рассмотрены модель бездефектной оболочки и модели с канавочными дефектами, наиболее широко встречающимися при эксплуатации трубопроводов.

Создана модель бездефектной оболочки, и выполнено её тестирование путем проведения вычислительного эксперимента для определения максимальных напряжений под действием внутреннего давления.

Приведен расчет максимальных эквивалентных напряжений для двухмерной и трехмерной задач, так как сходимость последних в расчетах методом конечных элементов, наряду с аналитическим решением, свидетельствует о правильности постановки задачи и её решения в целом.

Для расчетов использовались конечные параболические элементы – (элементы второго порядка), имеющие промежуточный узел вдоль каждой из сторон, поскольку использование многоузловых конечных элементов позволяет наиболее точно передавать криволинейные формы моделей и увеличивает точность расчетов. Для решения плоских задач принимался элемент plane 183 (8 узлов), а для решения объемных задач использовался элемент solid 186 (20 узлов). Разбивка модели на конечные элементы осуществлялась с использованием регулярной сетки или близкой к ней в случаях сложных форм.

Величина конечного элемента при построении конечно-элементной сетки определялась, исходя из зависимости максимальных эквивалентных напряжений в области "канавочного износа", вызываемых избыточным внутренним давлением, от величины (количества) конечных элементов в оболочке (рис. 1 и таб. 1).

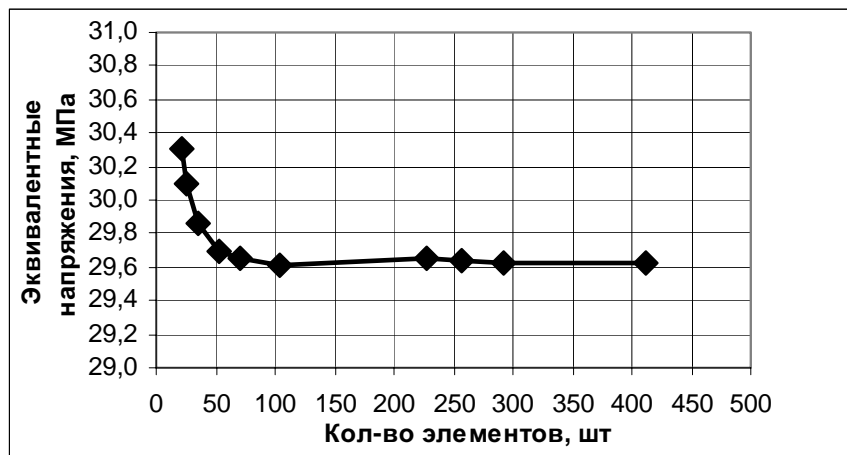


Рис. 1. Зависимость напряжений от количества заданных элементов
(для бездефектной оболочки $\varnothing 325 \times 10$ мм, $p = 2$ МПа)

Таблица 1

Данные для выбора размера конечного элемента

$\sigma_{\text{экв}}^{\text{макс}}$, МПа	29,65	29,61	29,65	29,64	29,63	29,62
Элементы, шт	70	104	228	256	292	412
Размер, м	0,0015	0,001	0,00095	0,0008	0,0007	0,0005

В области точных решений напряжения стабилизировались. Для упрощения выполнения задачи и проверки адекватности решения, проводимого МКЭ, реализованного в ПК "ANSYS", расчеты проводились для целой, 1/2 и 1/4 оболочки. Отсутствующие части модели оболочки учитывались условиями симметрии, обуславливающими граничные условия задачи. Во всех расчетах были получены одинаковые значения напряжений, что дополнительно подтвердило правильность постановки вычислительного эксперимента.

Аналитический расчет был выполнен согласно уравнению Лапласа для цилиндрических оболочек. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Проведено сравнение результатов вычислительного эксперимента и аналитического решения.

Таблица 2

Исходные данные и результаты
вычислительного эксперимента и аналитического решения

Наименование параметра	вычислительный эксперимент	аналитическое решение
$p_{\text{вн}}$ – расчетное внутреннее избыточное давление, (МПа)	2	
D_n – диаметр и t – толщина стенки оболочки, (мм)	325 x 10	
E – модуль упругости, (МПа)	2×10^5	
ν - коэффициент Пуассона	0,3	
для 2D модели $\sigma_{\text{экв}}$, (МПа)	29,6	Уравнение Лапласа $\sigma = \frac{p \cdot R}{t}$ $\sigma = 30,5$
для 3D модели $\sigma_{\text{экв}}$, (МПа)	32,6	
δ - относительная погрешность вычислительного эксперимента	2%	-

Сравнение полученных результатов показало хорошую сходимость вычислительного эксперимента и аналитического решения (таб.2). Погрешность составила 2% относительно точного решения (в технических расчетах принято 5%), что свидетельствует об определенной достоверности проведенного вычислительного эксперимента.

Проведены расчеты оболочек с одиночным канавочным дефектом различных типов канавок (таб. 3) под действием внутреннего давления для определения предельных геометрических размеров дефекта в упругой области $\sigma_{\text{экр}} = f(t_k, b_k) \leq [\sigma_T]$, где t_k и $b_k(\alpha)$ – остаточная толщина стенки в канавке и ширина канавки соответственно.

На примере трубной стали марки Ст 3 проведены исследования по изменению эквивалентных напряжений в канавке различной геометрии - "овальной", "шпоночной" и "серповидной" (таб. 3) под действием внутреннего давления. За предельное состояние был принят предел текучести материала для стали марки Ст3 $\sigma_T = 272$ МПа, определенный экспериментально. Допускаемое напряжение было определено по СНиП 2.05.06 и составило $[\sigma_T] = 183$ МПа (для Ст 3).

Получены предельные состояния оболочек с одиночным дефектом типа "канавочный износ" в зависимости от их геометрии под действием внутреннего давления и в зависимости от допускаемого напряжения (таб. 3, рис. 2). Расчеты и анализ напряженного состояния оболочек с одиночным канавочным дефектом показали (рис. 2), что с увеличением глубины канавки максимальные эквивалентные напряжения ($\sigma_{\text{экр}}^{\text{макс}}$) в оболочке в области канавок возрастают в 5 и более раз в зависимости от формы дефекта. Увеличение ширины канавки, в случае "овальной" и "серповидной", приводит к снижению эквивалентных напряжений. Для "шпоночной" канавки изменение ширины канавки практически не изменяет напряженно-деформированного состояния.

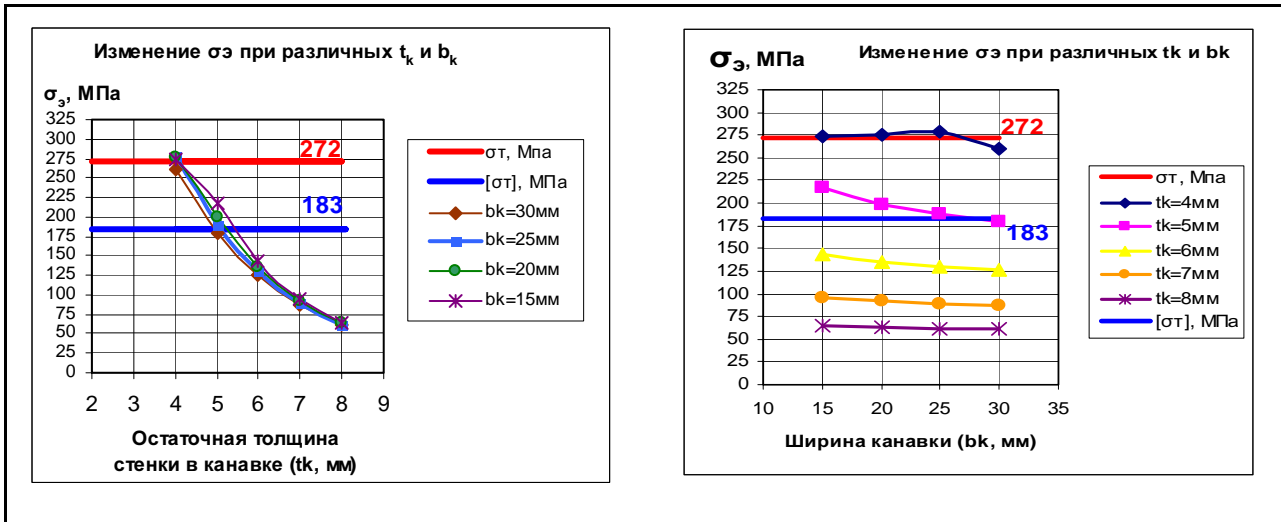
Получены распределения эквивалентных напряжений в области канавок. Показано, что "шпоночная" канавка за счет влияния концентраторов напряжений в оболочке (рис. 4, в) ослабляет несущую способность оболочки в большей степени, чем другие виды канавок. В связи с чем, данный вид дефекта является наиболее опасным.

Таблица 3

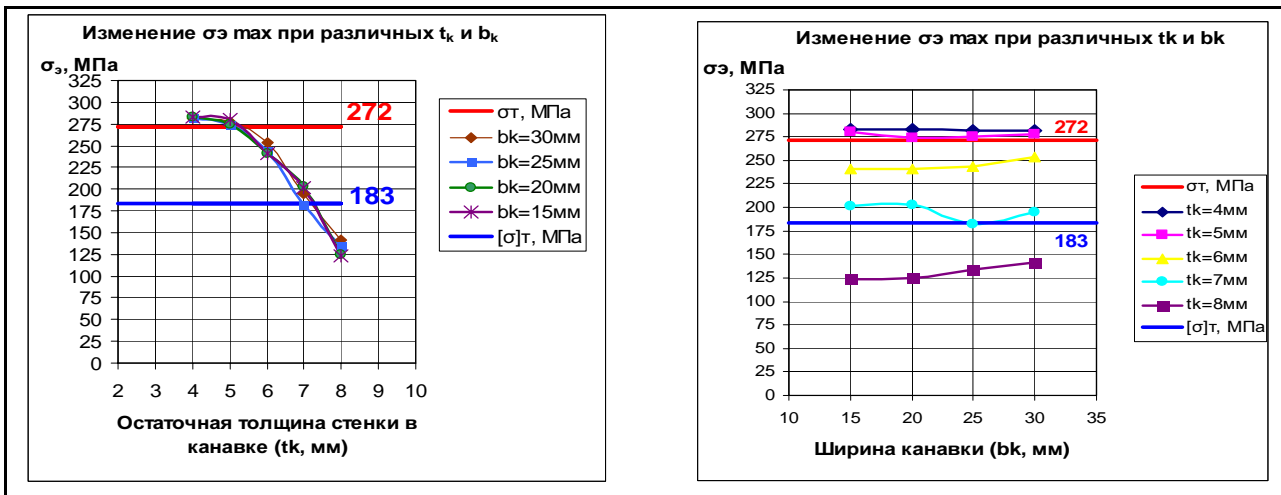
Максимальные эквивалентные напряжения (МПа) для различной геометрии исследуемых канавок под действием внутреннего давления (оболочка $\varnothing 325 \times 10$ мм, внутреннее давление $p = 2$ МПа)

Вид канавки геометрия	серповидная			овальная			шпоночная				
	α (град)	b_k (мм)	t_k (мм)	α (град)	b_k (мм)	t_k (мм)	α (град)	b_k (мм)	t_k (мм)		
t_k (мм)	30	45	60	15	20	25	30	15	20	25	30
3	270,0	233,0	203,0	-	-	-	-	-	-	-	-
4	200,0	172,0	152,0	273,0	276,0	278,0	260,0	278,0	277,0	276,0	275,0
5	148,0	131,0	116,0	218,0	199,0	189,0	180,0	279,0	302,0	294,0	314,0
6	109,0	98,5	89,3	143,0	135,0	130,0	125,9	233,0	233,0	237,0	247,0
7	-	-	-	95,5	91,7	89,6	87,6	203,0	193,0	178,0	212,0
8	-	-	-	64,6	63,2	62,1	61,3	123,0	127,0	132,0	141,0

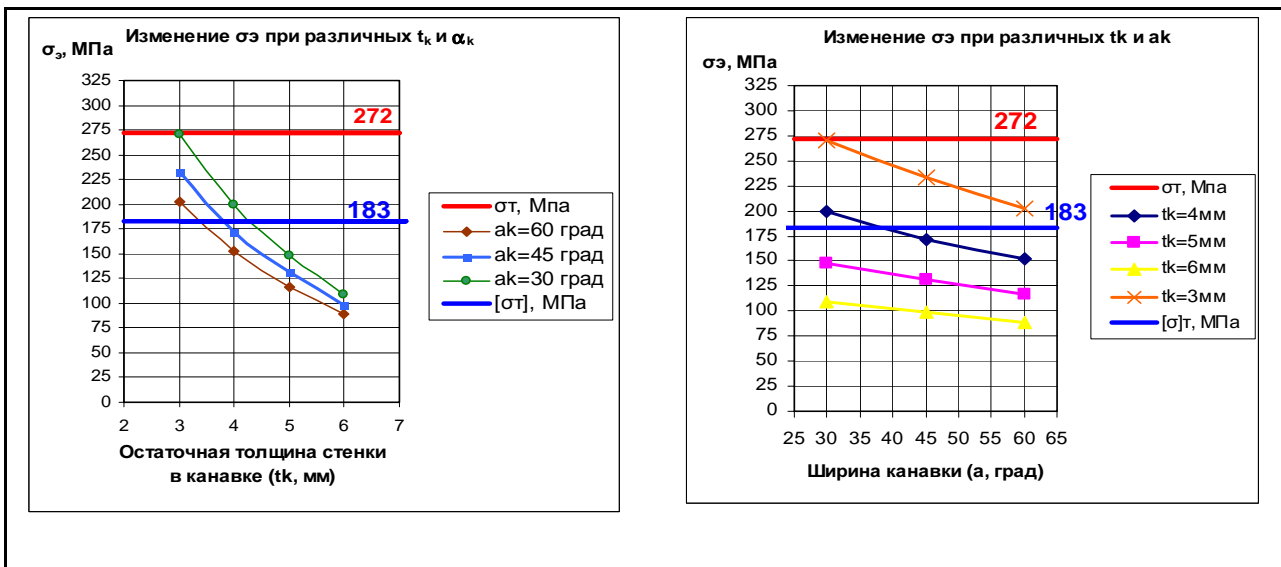
Примечание: α - центральный угол серповидной канавки, град;
 b_k - ширина канавки, мм;
 t_k - остаточная толщина стенки в области канавочного износа, мм.



а – овальная канавка

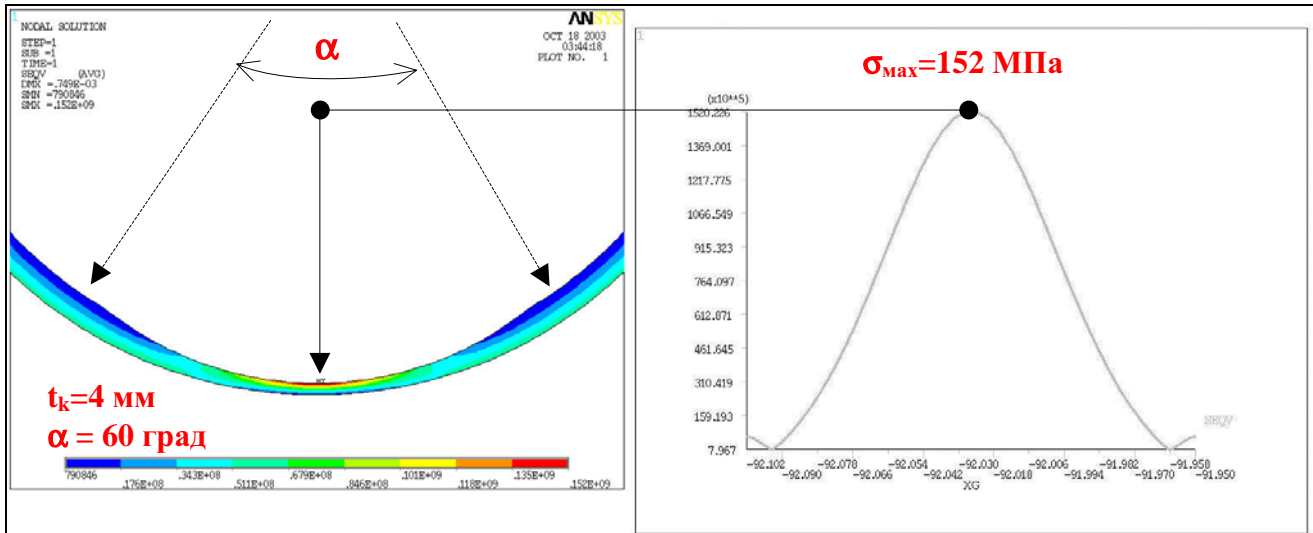


б- шпоночная канавка

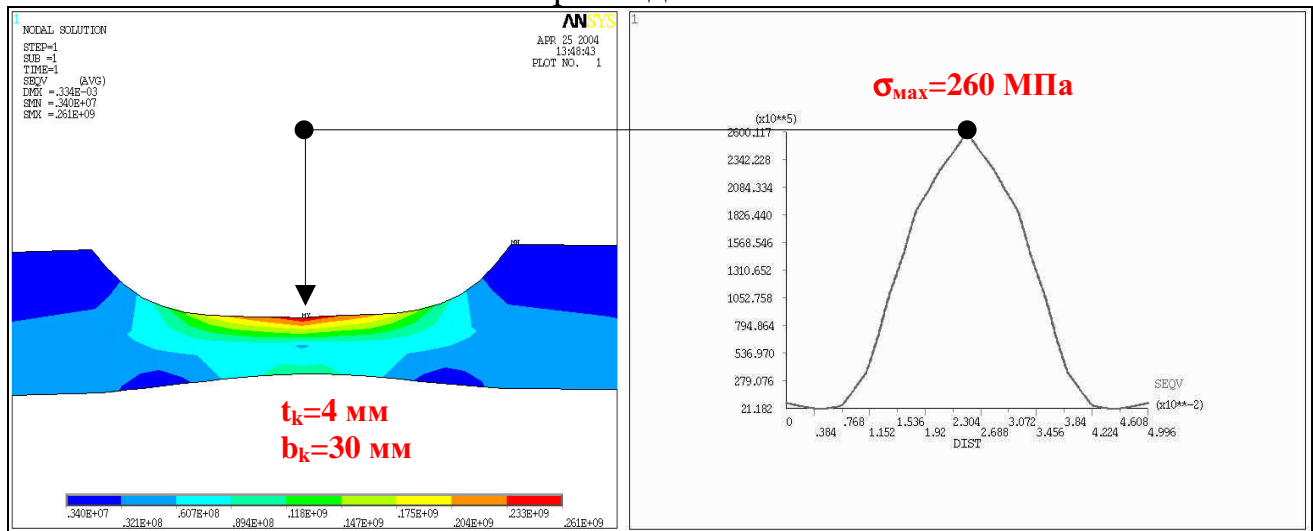


в – серповидная канавка

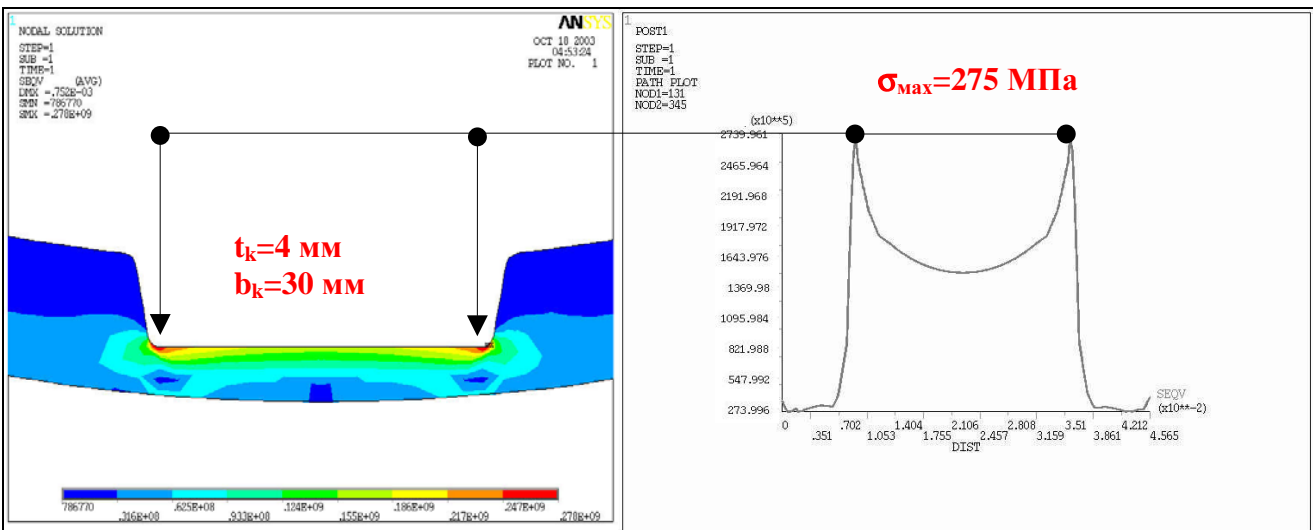
Рис. 2. Влияние геометрических размеров канавочных дефектов на максимальные эквивалентные напряжения в области канавок



а – серповидная канавка



б – овальная канавка



в – шпоночная канавка

Рис. 3. Виды распределений эквивалентных напряжений по профилю канавочного дефекта (для оболочки $\varnothing 325 \times 10 \text{ мм}$)

На основании проведенных исследований разработаны и сформулированы "Методические рекомендации по определению предельного состояния оболочек с "канавочным износом" методом конечных элементов" для использования при определении первоочередности мероприятий по защите трубопроводов от канавочной коррозии методом профилактического поворота, а также при курсовом и дипломном проектировании в учебном процессе.

В третьей главе выполнен вычислительный эксперимент и проведен анализ напряженно-деформированного состояния в оболочке с двумя дефектами с учетом предельных геометрических сочетаний в упругой области, полученных во второй главе, удовлетворяющих условию $\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma_T] = 183 \text{ МПа}$.

На примере стали марки Ст3 с предельными характеристиками $\sigma_T = 272 \text{ МПа}$, $\sigma_B = 551 \text{ МПа}$ проведены исследования по изменению эквивалентных напряжений в канавках выбранной геометрии в зависимости от угла φ между канавками в упругой области ($\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma_T]$, где t_k и b_k – остаточная толщина стенки в канавке и ширина канавки, соответственно).

Изучено влияние расстояния, равного углу φ , между старым и образовавшимся новым дефектом, на распределение максимальных эквивалентных напряжений в области канавок.

Установлено, что образование в оболочке второго канавочного дефекта той же геометрии на минимальном расстоянии, равном углу φ , от старого, способствует снижению (до 20%) максимальных эквивалентных напряжений в канавке в упругой области по абсолютной величине, по сравнению с напряженным состоянием в оболочке с одиночным дефектом аналогичной геометрии за счет перераспределения эквивалентных напряжений в оболочке.

Изучено влияние взаимного расположения двух дефектов, сформировавшегося (старого), выведенного на угол φ , и вновь зарождающегося (нового) с постепенным изменением его геометрических характеристик (t_k , b_k) (рис. 4, а) в сторону развития канавки.

Установлено, что в упругой области, в оболочке с одной канавкой при постепенном образовании второй на определенном расстоянии, равном углу φ , происходит перераспределение эквивалентных напряжений. При этом в старой

канавке эквивалентные напряжения снижаются, а в новой возрастают до определенного $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ (рис.4, б), которое соответствует максимальному эквивалентному напряжению в оболочке с двумя канавочными дефектами одинаковой геометрии.

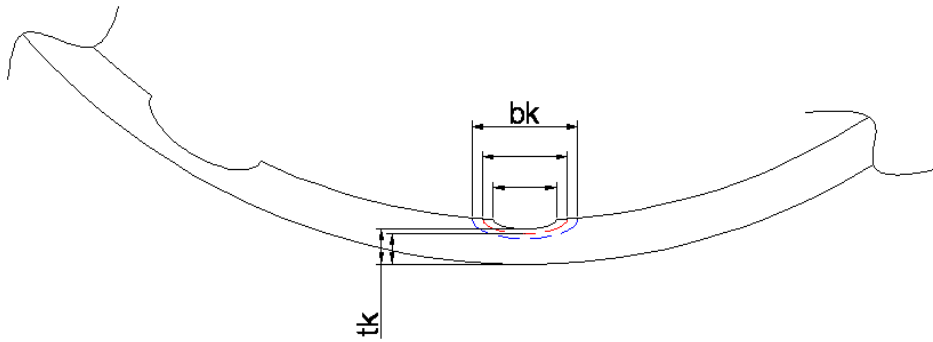
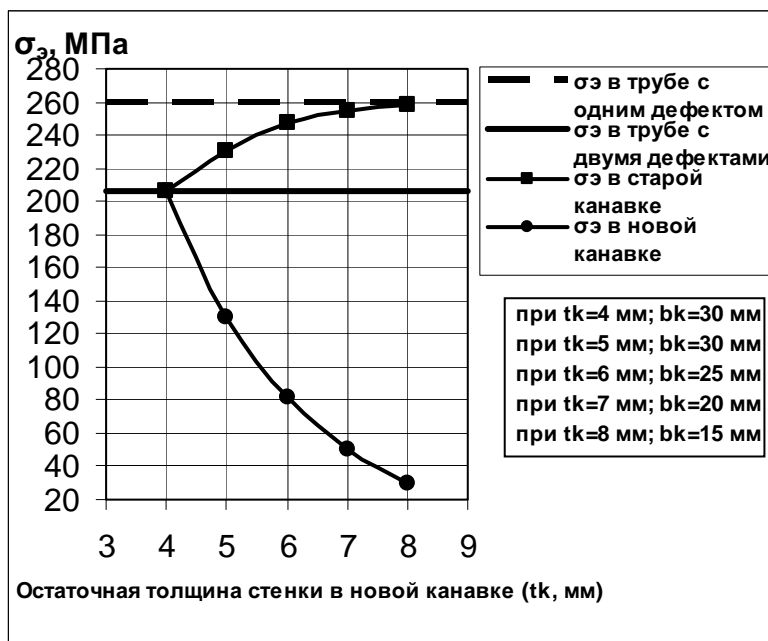


Рис.4, а



б

(а – изменение геометрических размеров канавки, б-зависимость эквивалентных напряжений в канавках от постепенного роста новой канавки)

Рис.4. Распределение $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ в зависимости от постепенного развития геометрии новой канавки ($\varnothing 325 \times 10$ мм, овальная канавка, $p_{\text{ВН}}=2$ МПа).

Перераспределение напряжений происходит с внутренней на внешнюю поверхность оболочки в канавочной области (таб. 4). Вследствие чего, наблюдается, так называемый эффект "втягивания" канавочной области во внутрь оболочки и происходит изменение её формы. В других областях оболочки напряжения практически не изменяются по сравнению с оболочкой с одиночным канавочным дефектом той же геометрии.

Известно, что в упругой области, согласно закону Гука, напряжения прямо пропорциональны деформациям. Из таблицы 4 видно, что в оболочке с одиночным дефектом большие напряжения соответствуют большим перемещениям, а для оболочки с двумя канавочными дефектами соответствующие величины меньше, что свидетельствует о правильности вычислительного эксперимента. Так, образование в оболочке с одиночным дефектом ($b_k = 30$ мм и $t_k = 5$ мм, таб. 3, "овальная" канавка) второго дефекта той же геометрии на расстояние угла $\varphi = 30$ град (рис.5, б) снижает максимальные эквивалентные напряжения со 180 МПа до 150 МПа.

Определены условия безопасной эксплуатации оболочек с двумя канавочными дефектами в упругой области, в зависимости от их взаимного расположения в оболочке, исключающее их наложение, под действием внутреннего давления. Рекомендуемое взаимное расположение центральных сечений канавок находится в области до 100 градусов.

Таблица 4

Сравнительные параметры оболочек с канавочными дефектами ("серповидная" канавка, $t_k = 4$ мм, $b_k(\alpha) = 45$ град, $p_{вн} = 2$ МПа)

Вид оболочки	Макс. суммарные перемещения в оболочке, м	$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{макс}}$ изнутри "канавки", МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ снаружи "канавки", МПа
Оболочка с одиночным дефектом	$0,487 \cdot 10^{-3}$	173,0	60,5
Оболочка с двумя дефектами на расстоянии $\varphi = 50$ град	$0,462 \cdot 10^{-3}$	140,0	74,4

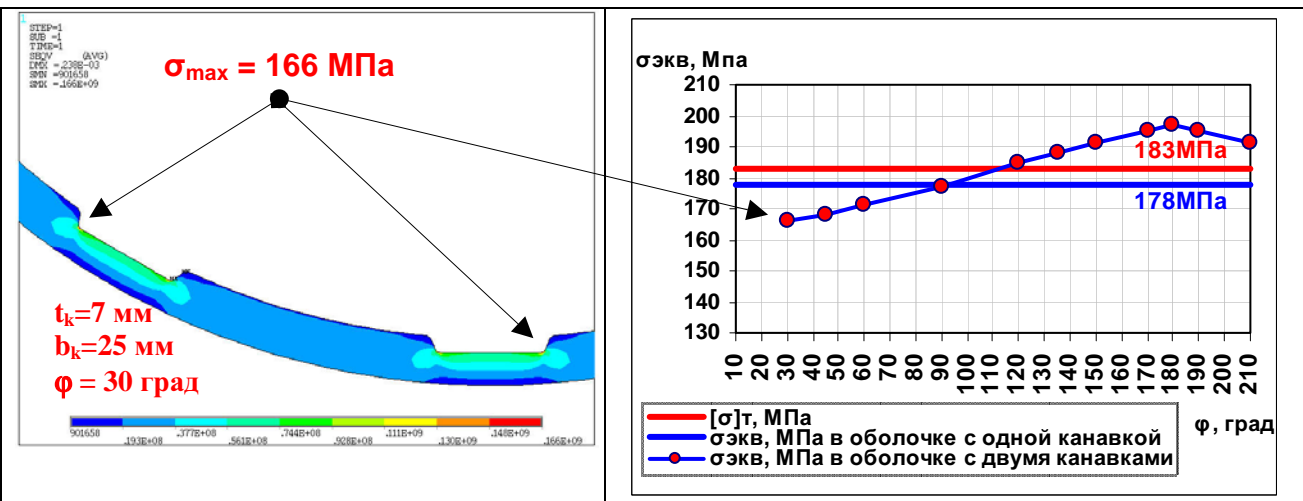
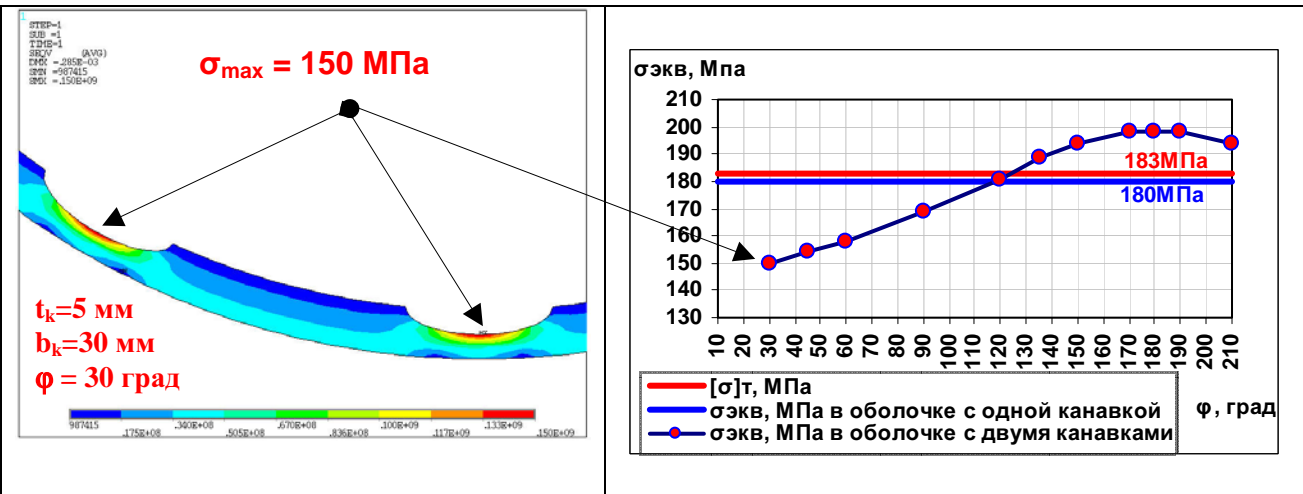
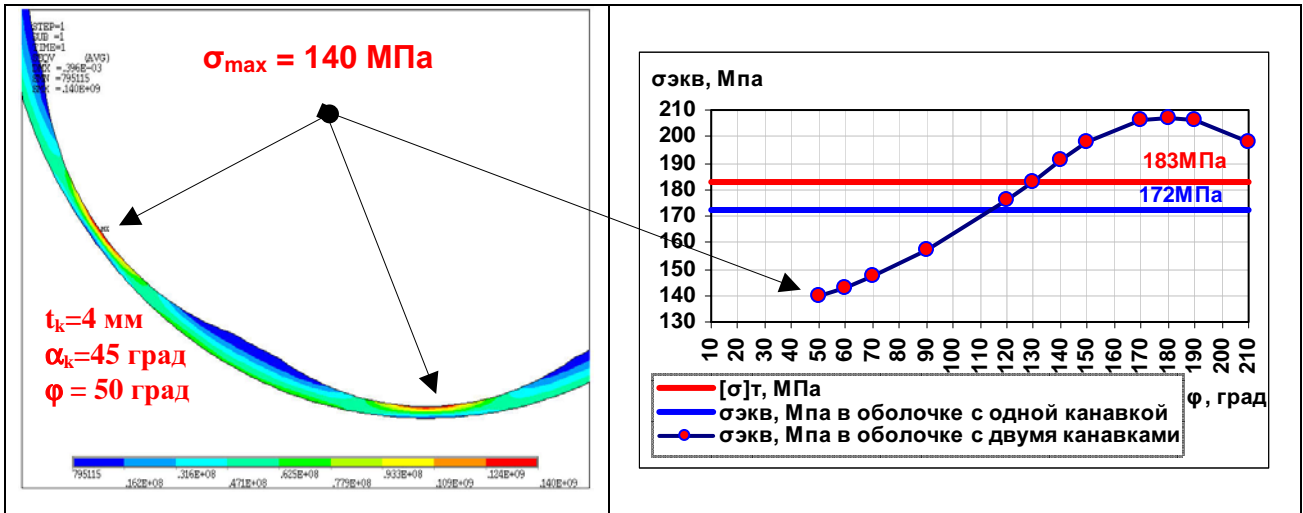


Рис. 5. Зависимость эквивалентных напряжений от угла между канавками под действием внутреннего давления (оболочка $\varnothing 325 \times 10 \text{ мм}$, $p_{вн} = 2 \text{ МПа}$)

В четвертой главе выполнен ряд лабораторных экспериментов, целью которых являлось сравнение полученных результатов вычислительного и лабораторного экспериментов. Суть лабораторного эксперимента заключалась в разрыве металлической оболочки с канавочным дефектом под действием внутреннего давления с помощью гидравлической установки.

Для выполнения вычислительного эксперимента была построена 3D-модель оболочки протяженностью $L = 220$ мм с внешним диаметром $\varnothing 108$ мм, толщиной стенки $t = 4$ мм и "шпоночной канавкой" (таб. 3) с остаточной толщиной стенки в области канавки $t_k = 1$ мм и шириной канавки $b_k = 15$ мм. После построения необходимой геометрии модель была экспортирована в ядро инженерного анализа ПК "ANSYS", разбита на конечные элементы, установлены граничные условия и заданы фактические физические свойства материала (σ_b , σ_T). Последние определялись по диаграмме растяжения плоского образца из стали марки Ст20 (рис. 6).

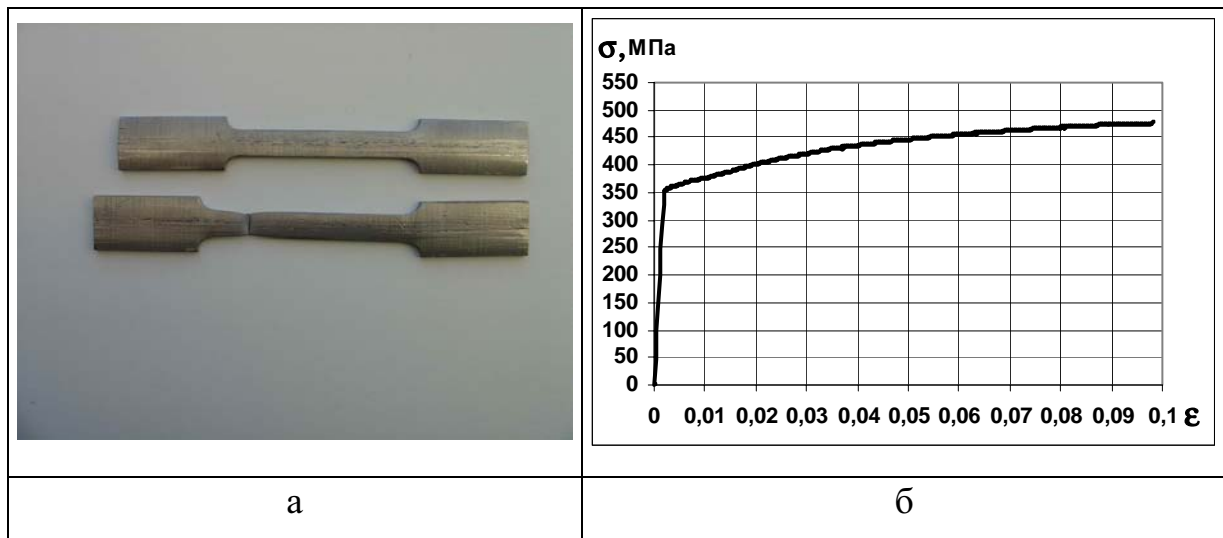
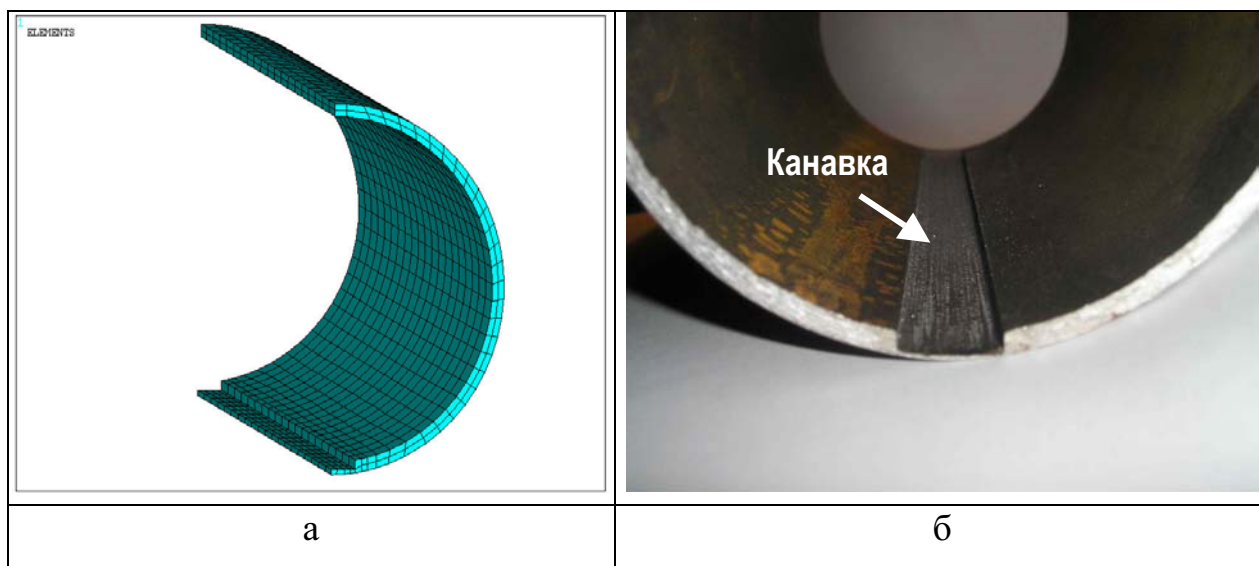


Рис.6. Диаграмма растяжения плоского образца (Ст20)

Результаты вычислительного эксперимента показали, что области максимальных эквивалентных напряжений располагаются, как и предполагалось, в местах их концентраторов (рис.8, а). Заключение о

достижении конструкцией разрушения делали по значениям максимальных эквивалентных напряжений, соответствующим пределу прочности материала $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{макс}} = \sigma_{\text{В}} = 469 \text{ МПа}$ (рис.6, б). По результатам вычислительного эксперимента, разрушающее давление $p_{\text{р}}$ составило 9,3 МПа (таб. 3).



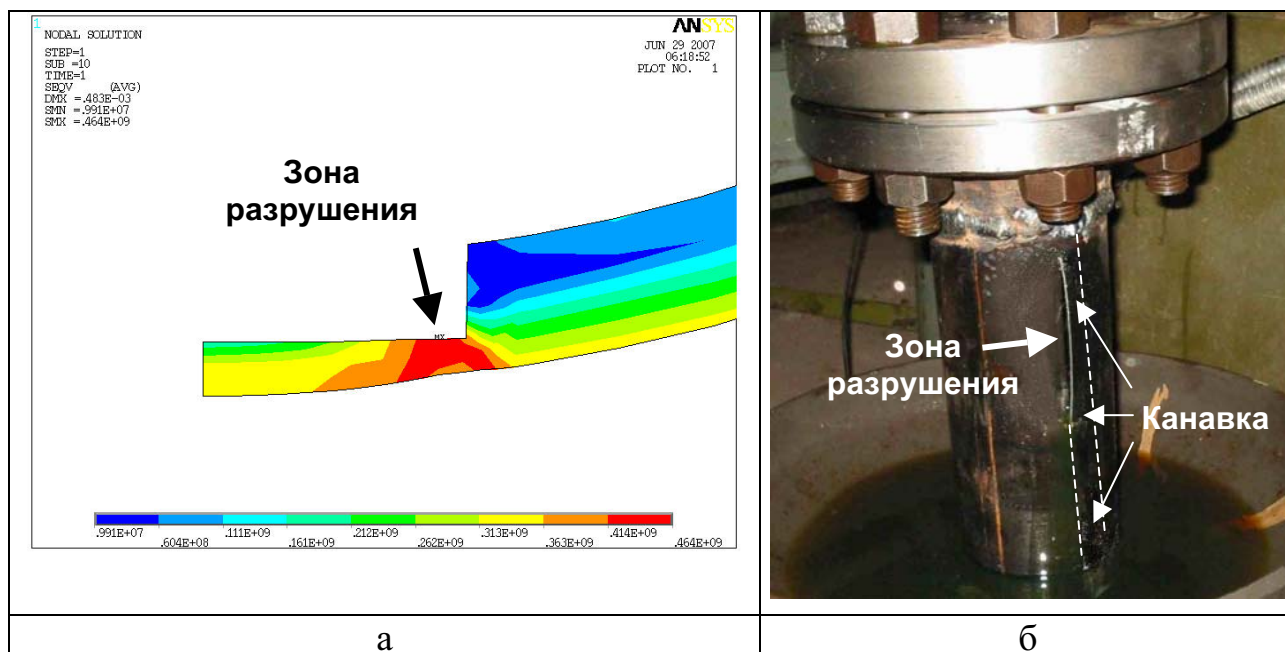
а) – вычислительный эксперимент; б) – лабораторный эксперимент

Рис. 7. Оболочка для испытаний со "шпоночным" дефектом

Для проведения лабораторного эксперимента была создана герметичная конструкция, основу которой составляла труба со "шпоночной" канавкой (рис.7, б), которая постепенно нагружалась внутренним давлением.

Инструментом разрушения служил приспособленный для гидравлических испытаний гидравлический грузопоршневой манометр МП-600, позволяющий плавно нагнетать необходимое давление. При внутреннем давлении, равном $p = 9 \text{ МПа}$, и фиксацией нагнетания около 5 минут имело место разрушение образца по краю канавки с протяженностью ее раскрытия около $2/3$ длины (рис. 8).

В ходе лабораторного эксперимента, одновременно с изменением внутреннего давления в оболочке, проводилось измерение коэрцитивной силы. Исследование проводилось с помощью магнитного структуроскопа КРМ-Ц. Полученные результаты свидетельствовали о росте коэрцитивной силы в области канавки при повышении внутреннего давления в оболочке.



а) – вычислительный эксперимент; б) – лабораторный эксперимент
 Рис. 8. Зона разрушения участка оболочки со "шпоночным" дефектом

Таблица 5

Параметры проведенных экспериментов

Наименование параметра	Вычислительный Эксперимент	Лабораторный эксперимент
$p_{вн}$ - внутреннее избыточное давление, (МПа)	9,3	9
D_n - диаметр и t – толщина стенки оболочки, (мм)	108 x 4	
Предел прочности	469	
Предел текучести	350	
Для 2D модели $\sigma_{ЭКВ}$, (МПа)	469	-
Для 3D модели $\sigma_{ЭКВ}$, (МПа)	464	
δ - относительная погрешность экспериментов	в пределах 1 %	$\delta=0,2/9*100=2,2\%$

Сравнительный анализ показал хорошую сходимость вычислительного и лабораторного экспериментов (в пределах 5%) (таб. 5), что свидетельствует об определенной достоверности результатов, представленных в предыдущих главах. Проведен анализ режимов нагружения образца, построены графики распределения максимальных эквивалентных напряжений и коэрцитивной силы, проведено сопоставление характера нагружения. Сделаны выводы о возможности и целесообразности применения ПК "ANSYS" для решения задач,

связанных с оценкой и анализом напряженно-деформированного состояния оболочек, подверженных "канавочному износу".

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнены целенаправленные исследования по оценке безопасной эксплуатации цилиндрических оболочек с канавочными дефектами.

2. Определены области максимальных эквивалентных напряжений в канавках: для овальной и серповидной – в центре, а для шпоночной - в зоне перехода к бездефектной части оболочки. Установлено, что с увеличением глубины канавочного дефекта в оболочках до половины толщины стенки, максимальные эквивалентные напряжения ($\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{макс}}$) в области "канавок" возрастают в 5 и более раз по сравнению с бездефектной оболочкой в зависимости от формы канавки и внутреннего давления.

3. Определены допустимые геометрические характеристики одиночного канавочного дефекта трёх видов под действием внутреннего давления в области упругих деформаций.

4. Установлено, что образование в оболочке второго канавочного дефекта на определенном расстоянии перераспределяет эквивалентные напряжения, и приводит к снижению (до 20%) максимальных эквивалентных напряжений, в области канавки в сравнении с $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{макс}}$ в оболочках с одиночным канавочным дефектом той же геометрии в области упругой деформации.

5. Определены условия безопасной эксплуатации оболочек с двумя канавочными дефектами в упругой области, в зависимости от их взаимного расположения в оболочке, исключающее их наложение, под действием внутреннего давления. Рекомендуемое взаимное расположение центральных сечений канавок находится в интервале углов до 100 градусов.

6. Показана принципиальная возможность применения нового подхода к анализу напряженно-деформированного состояния оболочек с одним и более канавочным дефектом с использованием метода конечных элементов,

реализованного в программном комплексе "ANSYS" совместно с системой автоматизированного проектирования "AutoCAD".

7. На основании проведенных исследований разработаны и сформулированы «Методические рекомендации по определению предельного состояния оболочек с канавочными дефектами методом конечных элементов» для использования при определении первоочередности мероприятий по защите трубопроводов от канавочной коррозии методом профилактического поворота.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Поподько Д.В., Кузеев И.Р. Метод конечных элементов для анализа НДС трубопровода с дефектом типа "канавочный износ" // Материалы 54-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – Ч.1. –С. 260.

2. Поподько Д.В., Кузеев И.Р. К вопросу об оценке напряженного деформированного состояния в трубопроводе с дефектом типа "канавочный износ" // Творчество молодых в науке и образовании: Тезисы докладов интернет-конференции МГУИЭ. –М: Изд-во МГУИЭ, 2003. –Ч.1. –С. 103–109.

3. Кузеев И.Р., Поподько Д.В. Анализ распределения напряжений в области канавочного дефекта в зависимости от его геометрии методом конечных элементов // Информационные технологии и системы: Новые информационные технологии в науке, образовании, экономике: Сборник трудов 3-й Международной научно-технической конференции (НИТНОЭ-2003) – Владикавказ: Изд-во СКГТУ, 2003. – С. 342–344.

4. Поподько Д.В. Некоторые результаты исследований в области моделирования оболочек с дефектами типа "канавочный износ" методом конечных элементов // Мировое сообщество: проблемы и пути решения: Сб. науч. ст. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – № 14. – С. 167–170.

5. Кузеев И.Р., Поподько Д.В. Изменение геометрии дефекта типа "канавочный износ" // Проблема строительного комплекса России: Материалы VIII Международной научно-технической конференции – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. –Т.2.– С. 37.

6. Кузеев И.Р., Поподько Д.В. Изменение $\sigma_{\text{экв}}$ в оболочке, неоднократно подверженной канавочному износу // Новосёловские чтения: Материалы 2-й Международной научно-технической конференции – Уфа: УГНТУ, 2004. – С. 76.

7. Поподько Д.В., Кузеев И.Р. Анализ сходимости вычислительного и физического экспериментов на модели оболочки с канавочным дефектом под действием внутреннего давления // Молодежная наука нефтегазовому комплексу: Тезисы докладов научной конференции аспирантов, молодых преподавателей и сотрудников вузов и научных организаций – М.: РГУ, 2004. – Т.3.– С. 20.

Автор выражает глубокую благодарность кандидату технических наук Бердину В.К., за помощь и консультации при подготовке диссертационной работы.