

**На правах рукописи**

**ЕРЕХИНСКИЙ БОРИС АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ФОНТАННЫХ АРМАТУР ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ  
СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА**

**Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы  
в нефтяной и газовой промышленности**

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

**Москва – 2014**

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Системы и технологии обеспечения безопасности. Техдиагностика» (ОАО «Техдиагностика, г. Оренбург) и Обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва)

Научный руководитель -

доктор технических наук  
**Барышов Сергей Николаевич.**

Официальные оппоненты:

**Ивановский Владимир Николаевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Машины и оборудование  
нефтяной и газовой промышленности» РГУ нефти  
и газа имени И.М. Губкина;

**Салюков Вячеслав Васильевич**  
доктор технических наук, Председатель  
Правления НП «СоюзПрогрессГаз».

Ведущая организация -

**Открытое акционерное общество  
«ВНИИНЕФТЕМАШ».**

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2014 г. в 13 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 511.001.02, созданного на базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ» по адресу: 147717, Московская обл., пос. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2 этаж, конференц-зал ОНТЦ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и на сайте: <http://www.vniigaz.ru>.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

**Курганова Ирина Николаевна**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Северные нефтегазоконденсатные месторождения Сибири имеют стратегическое промышленное значение для России на долгосрочную перспективу. В настоящее время на их долю приходится до 70% разведанных запасов газа, газового конденсата (нефти) месторождений Группы Газпром. Количество газодобывающих скважин этих месторождений составляет более 6 тыс. Для герметизации, контроля и управления работой скважин в их конструкции применяются фонтанные арматуры (далее – ФА), состоящие из элементов различных производителей и типов-размеров. Среднее количество элементов ФА на скважинах достигает порядка 130 тыс. Элементы ФА являются одними из самых сложных и потенциально опасных технических устройств. Надежность ФА определяет надежность и эффективность эксплуатации скважин и газодобывающих предприятий в целом.

К настоящему времени наработка большей части ФА (около 80%) превосходит проектный срок эксплуатации. С целью продления срока их дальнейшей эксплуатации по фактическому техническому состоянию они прошли неоднократное диагностирование. По мере увеличения наработки количество таких ФА увеличивается. Анализ статистики и причин отказов ФА показывает, что при длительной эксплуатации в низкотемпературных климатических условиях Севера происходит нарушение их работоспособности за счет снижения пластичности и растрескивания металла. При этом создается высокий риск хрупких разрушений ФА с причинением тяжкого вреда для жизни и здоровья людей, объектов и окружающей среды. Существующие методы диагностирования ФА не позволяют прогнозировать работоспособность ФА по механизмам снижения пластичности и растрескивания металла.

Разработка новых методов прогнозирования работоспособности ФА газодобывающих скважин в условиях Севера является актуальной научно-практической задачей. Ее решение позволит обосновывать сроки продолжения дальнейшей эксплуатации ФА, предупреждать их хрупкие разрушения, и, тем самым, повысить безопасность и эффективность эксплуатации объектов газодобывающих предприятий.

**Цель работы:** Разработка методов прогнозирования работоспособности ФА газодобывающих скважин, длительно эксплуатируемых в низкотемпературных климатических условиях Севера, для обоснования сроков продолжения их эксплуатации и предупреждения хрупких разрушений основываясь на результатах диагностирования.

### **Задачи работы:**

1. Анализ статистики диагностирований и отказов ФА газодобывающих скважин северных месторождений Западной Сибири.
2. Обоснование методов прогнозирования работоспособности ФА по механизмам снижения пластичности и растрескивания металла.
3. Расчетно-экспериментальное определение диагностических параметров, критериев предельного состояния ФА по механизмам снижения пластичности и растрескивания металла и закономерностей их изменения.
4. Разработка программно-методического обеспечения и апробация методов прогнозирования работоспособности ФА при их диагностировании.

**Научная новизна.** Установлено, что одной из причин нарушения работоспособности ФА, длительно эксплуатируемых в низкотемпературных климатических условиях Севера, является растрескивание металла из-за снижения его пластичности (от 10 до 60% за 20 лет эксплуатации) в зонах конструктивных концентраторов

напряжений и дефектов изготовления при деформировании от воздействия рабочих нагрузок.

Впервые разработаны методы прогнозирования работоспособности ФА с применением выборочного лабораторного неразрушающего и разрушающего контроля их типовых элементов, критерия разрушающей пластической деформации поверхностного слоя металла с исходным концентратором, анализа закономерностей снижения пластичности и растрескивания металла.

Обоснованы расчетно-экспериментальные методы анализа закономерностей снижения пластичности металла элементов ФА, определения величины разрушающей пластической деформации и ресурса до начала растрескивания и технология неразрушающего контроля ФА в условиях эксплуатации для определения параметров растрескивания металла.

#### **Защищаемые положения:**

- обоснование причин нарушения работоспособности ФА при их длительной эксплуатации в низкотемпературных климатических условиях Севера;

- теоретическое обоснование методов прогнозирования работоспособности ФА с применением выборочного лабораторного неразрушающего и разрушающего контроля их типовых элементов, критерия разрушающей пластической деформации, анализа закономерностей снижения пластичности и растрескивания металла;

- расчетно-экспериментальное обоснование методов анализа закономерностей снижения пластичности металла элементов ФА, определение величины разрушающей пластической деформации и ресурса до начала растрескивания, технологии неразрушающего контроля ФА в условиях эксплуатации.

**Практическая значимость и реализация результатов работы.** Практическую значимость представляют научно обоснованные методы прогнозирования работоспособности ФА при их диагностировании по механизмам охрупчивания и растрескивания металла и программно-методическое обеспечение для практического применения этих методов. Внедрение разработок позволяет определять срок и условия продолжения эксплуатации элементов ФА, сохранивших работоспособность и имеющих запас надежности, предупредить внезапные высокорисковые хрупкие разрушения ФА и, тем самым, повысить безопасность и эффективность продолжения их эксплуатации, учитывая фактическое техническое состояние.

Разработанные и апробированные технические решения реализованы в положениях стандартов организации ОАО «Техдиагностика» и ОАО «Газпром». Разработки применяются в газодобывающих предприятиях ОАО «Газпром» при диагностировании ФА скважин северных месторождений Западной Сибири для определения сроков, условий продления их эксплуатации, планирования ремонтов и замен. В результате их применения проконтролированы ФА 94-х скважин Комсомольского, Уренгойского и Ен-Яхинского газовых месторождений, выявлено 65 трещин в корпусах 28-ми элементов ФА, которые были оперативно выведены из эксплуатации и предупреждены их возможные хрупкие разрушения. Для остальных элементов ФА определены сроки продления их эксплуатации, проведения диагностирований, ремонтов и замены.

Годовой экономический эффект от внедрения разработок в ООО «Газпром добыча Уренгой» составил 34,2 млн. руб., что подтверждено актом внедрения.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на: Международных деловых встречах Диагностика-2009, Диагностика - 2011 и Диагностика-2013;

Межрегиональной научно-технической конференции «Подготовка кадров и современные технологии для ТЭК Западной Сибири» (г. Тюмень, 2010 г.); VIII и IX Международных научно-технических конференциях «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред» (г. Оренбург, 2010, 2012 г.г.).

**Публикации по теме.** По теме диссертации опубликованы 24 научные работы, из них 15 в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в «Перечень ...» ВАК Минобрнауки РФ, одна монография.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 162 страницах; содержит 79 рисунков, 26 таблиц и список использованных источников из 175 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследования, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость результатов исследования.

**В первой главе** изложены результаты анализа конструкций, сроков и условий эксплуатации ФА газодобывающих скважин северных месторождений Западной Сибири, научно-методических основ организации эксплуатации ФА, основываясь на данных об их фактическом техническом состоянии, статистике диагностированных и отказов.

Обзор существующих научно-технических решений по обеспечению безопасной и эффективной эксплуатации нефтегазового оборудования, исходя из его фактического технического состояния, в т.ч. ФА газодобывающих скважин, выполнен на основе анализа работ известных ученых и специалистов в областях неразрушающего контроля и диагностирования, оценки прочности, надежности и ресурса нефтегазового оборудования с учетом повреждений технологического и эксплуатационного происхождения, в их числе Л.Р. Ботвиной, С.Н. Барышова, А.Н. Бочарова, Б.С. Вольфсона, М.М. Гаденина, В.М. Горицкого, В.А. Емелькиной, Е.Е. Зорина, В.Н. Ивановского, И. Каримова, В.В. Ключева, И.Н. Кургановой, В.М. Кушнарченко, И.Р. Кузеева, Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, В.В. Москвичева, А.В. Митрофанова, А.М. Лепихина, П.А. Овчинникова, Б.Р. Павловского, В.Н. Пермякова, В.В. Салюкова, В.Н. Сызранцева, Г.М. Хажинского, В.В. Харионовского, О.Ф. Чернявского, А.О. Чернявского и др.

В составе газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных северных месторождений Западной Сибири - Надым-Пур-Тазовского региона и полуострова Ямал - находятся более 6 тыс. скважин - табл. 1, где: НГК, Г, ГК – нефтегазоконденсатное, газовое, газоконденсатное;  $T_{нд}$  – год начала добычи;  $T_{э}$  – срок эксплуатации, лет;  $N_{скв}$  – количество скважин. Сроки эксплуатации > 60% скважин составляют > 20 лет.

В конструкции скважин применяется ФА, состоящая из комплекта последовательно соединенных элементов различных типов – колонных и трубных головок, спецфланцев (адаптеров), задвижек, крестовин, переводников (буферов), промежуточных и глухих фланцев, с условными размерами проходного сечения от 2 до 13 дюймов (50 – 350 мм), на давления 14, 21, 35 МПа, отечественных и зарубежных производителей: Нефтегаздеталь и Воронежский механический завод (г. Воронеж), Breda Fusine (Италия), Hubner-Vamag (Австрия), заводы им. Лейтенанта Шмидта и им. П. Монтина (Азербайджан, г. Баку), UPETROM (Румыния), DKG-EAST (Вен-

грия), ФМС (США) и др. Поскольку в составе комплекта ФА применяется до 20 элементов, среднее их количество на скважинах месторождений Западной Сибири достигает порядка 130 тыс. ед.

Таблица 1 – Сведения о количестве и сроках эксплуатации скважин северных месторождений Западной Сибири.

Наименование месторождения	Тип	Г <sub>нд</sub> / ТЭ	N <sub>скв</sub>	Распределение N <sub>скв</sub> по срокам эксплуатации				
				< 10 лет	10 – 20 лет	20 – 30 лет	30 – 40 лет	>40 лет
Уренгойское	НГК	1978/35	1910	—	—	—	1910	—
Ен-Яхинское	НГК	1985/28	461	—	—	461	—	—
Песцовое	НГК	2004/9	192	192	—	—	—	—
Северо-Уренгойское	Г	1987/26	159	—	—	159	—	—
Ямбургское	НГК	1986/28	1506	364	551	591	—	—
Заполярье	НГК	2001/12	629	313	316	—	—	—
Медвежье	НГК	1972/41	356	—	—	—	—	356
Юбилейное	НГК	1992/21	122	—	—	122	—	—
Бованенковское	НГК	2012/1	219	219	—	—	—	—
Ямсовейское	ГК	1997/16	140	—	140	—	—	—
Вынгапуровское	Г	1978/35	82	—	—	—	82	—
Комсомольское	Г	1993/20	195	—	—	195	—	—
Западн.-Таркосалин.	НГК	1996/17	115	—	115	—	—	—
Губкинское	Г	1999/14	111	—	111	—	—	—
Вынгайхинское	Г	2003/10	41	—	41	—	—	—
Еты-Пуровское	Г	2004/9	115	115	—	—	—	—
Всего:			6353	1203 (19%)	1274 (20%)	1528 (24%)	1992 (31%)	356 (6%)

Элементы ФА изготовлены из литых и кованных заготовок, из углеродистых, низколегированных, нержавеющей сталей, коррозионностойких сплавов. В процессе эксплуатации они испытывают коррозионное и эрозийное воздействие потоков рабочих сред, деформирование металла от воздействия внутреннего давления, нагрузок от затяжки крепежных элементов фланцев и присоединенных трубопроводов в диапазоне климатической температуры окружающей среды от +40 до -60°С.

Для ФА скважин северных месторождений был определен исходный (проектный) срок их эксплуатации 10 - 15 лет. С учетом срока эксплуатации скважин (табл. 1), около 65 % единиц общего числа ФА прошли процедуру диагностирования с целью продления сроков их дальнейшей эксплуатации, при этом на почти 50% единиц ФА процедура диагностирования выполнена от 2 до 4 раз. Поэтому в перспективе, по мере увеличения наработки прогнозируется как увеличение количества ФА, подлежащих диагностированию, до 1 тыс. единиц (до 20 тыс. элементов) ФА в год, так и увеличение количества их диагностирований – до 5 и более раз.

Замена такого количества ФА, выработавших проектный срок эксплуатации, проблематична по причине потребности весьма высоких инвестиций и неэкономична, поскольку в подавляющем большинстве эти ФА даже после длительной эксплуатации продолжают обладать работоспособностью и запасом ресурса, позволяющими продолжать их дальнейшее надежное и эффективное использование. Как показывает анализ, замена элементов ФА при достижении ими проектного срока службы носит исключительный характер (менее 1 %).

В ОАО «Газпром» более 20 лет реализуется подход по поэтапному продлению сроков эксплуатации ФА исходя из анализа их фактического технического состояния. При таком подходе в соответствии с законодательными и нормативными тре-

бованиями при достижении наработки ФА проектного или назначенного срока эксплуатации проводится их диагностирование – контроль, оценка технического состояния и прочности, прогнозирование ресурса. Элементы ФА с выявленными недопустимыми дефектами и достигшими предельного состояния (ресурсного отказа) ремонтируются или заменяются на работоспособные. Для элементов без дефектов или имеющих допустимые дефекты определяются возможность, срок и условия продолжения их дальнейшей эксплуатации до очередного диагностирования в пределах прогнозируемого остаточного ресурса, т.е. наработки до прогнозируемого ресурсного отказа.

Анализ статистических данных о 850 случаях отказов элементов ФА за 10-ти летний период эксплуатации (рис. 1 а) показывает, что помимо ресурсных отказов (РО) элементов ФА, выявляемых и прогнозируемых при их диагностировании, внезапные (непрогнозируемые) отказы (ВНО) их элементов также происходят. Количество таких отказов увеличивается по мере увеличения наработки ФА. Причинами этих отказов (рис. 1 б) являются потеря герметичности затворов запорных элементов (задвижек) – 93%, а также растрескивание металла корпусов – 7%.

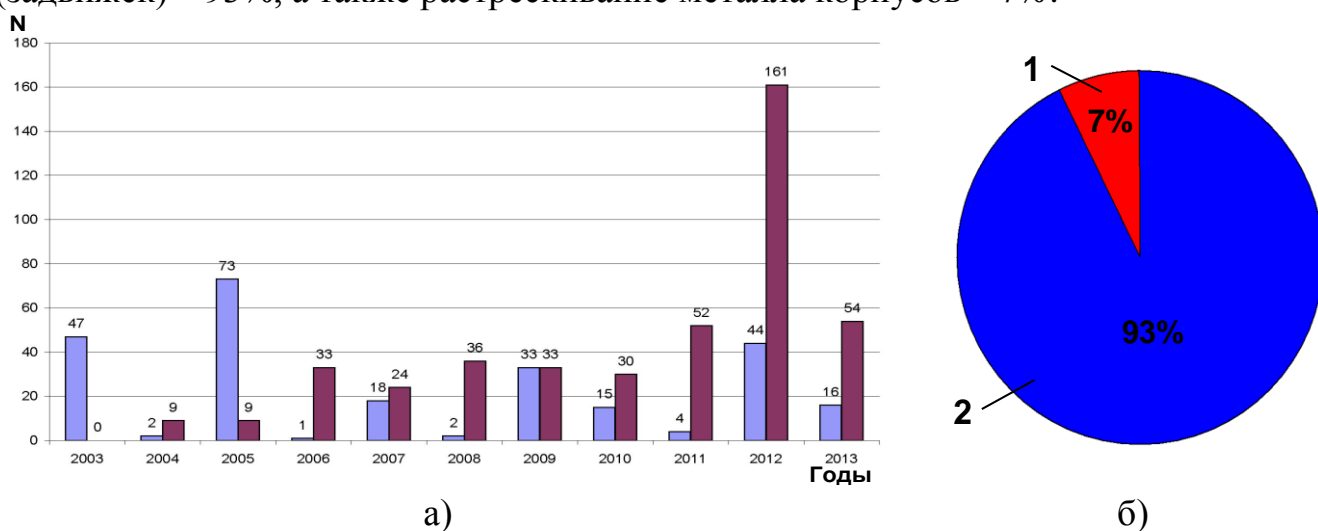


Рисунок 1 – Временное распределение количества (N) видов отказов ФА (а), распределение причин внезапных (непрогнозируемых) отказов (б): ■ - РО; ■ - ВНО; 1 – растрескивание металла; 2 – потеря герметичности затворов

Негерметичность затворов запорных элементов успешно выявляется службами газодобывающих предприятий в процессе эксплуатации ФА при проведении функциональной диагностики и при плановых профилактических проверках работоспособности. Такие элементы выводятся из эксплуатации и заменяются на резервные, которые комплектуются из отремонтированных после замены или из новых.

Исследования показывают, что причиной растрескивания металла элементов ФА является снижение и истощение его пластичности при длительной эксплуатации в низкотемпературных климатических условиях Севера. Применяемый при диагностировании неразрушающий контроль ФА, выполняемый с наружной поверхности, и косвенная оценка механических свойств металла по измерениям твердости в условиях эксплуатации не позволяют выявлять и прогнозировать отказы ФА, произошедшие по причине снижения пластичности и растрескивания металла.

Возникновение внезапных (непрогнозируемых) отказов ФА из-за снижения пластичности и растрескивания металла увеличивает вероятность и риск их хрупких разрушений. Такие отказы и разрушения наиболее опасны. Они могут повлечь внезапную разгерметизацию скважины с выбросом углеводородного сырья, взрывами и

пожарами, тяжкий вред для жизни и здоровья людей, производства и окружающей среды, большие затраты на ликвидацию их последствий. Непланные затраты и простои скважин на устранение непрогнозируемых отказов существенно превышают затраты и простои на плановые ремонты и замены элементов ФА при устранении ресурсных отказов, выявляемых при их диагностировании.

Анализ распределения причин отказов (рис. 1) показывает, что в учтенные случаи растрескивания металла вошли случаи выявления на корпусах ФА магистральных трещин на стадиях, практически предшествующих их разрушению.

Поэтому без разработки новых методов прогнозирования работоспособности ФА газодобывающих скважин в условиях Севера, учитывающих снижение пластичности и растрескивание металла, по мере увеличения сроков эксплуатации ФА количество их внезапных (непрогнозируемых) отказов, вероятность и риск хрупких разрушений также будут возрастать.

**Во второй главе** изложено теоретическое обоснование диагностических моделей, параметров, критериев, алгоритмов и методов прогнозирования работоспособности ФА с применением выборочного лабораторного неразрушающего и разрушающего контроля их типовых элементов, критерия разрушающей пластической деформации, анализа закономерностей снижения пластичности и растрескивания металла.

На рис. 2 представлен предложенный алгоритм метода контроля технического состояния и прогнозирования работоспособности ФА.

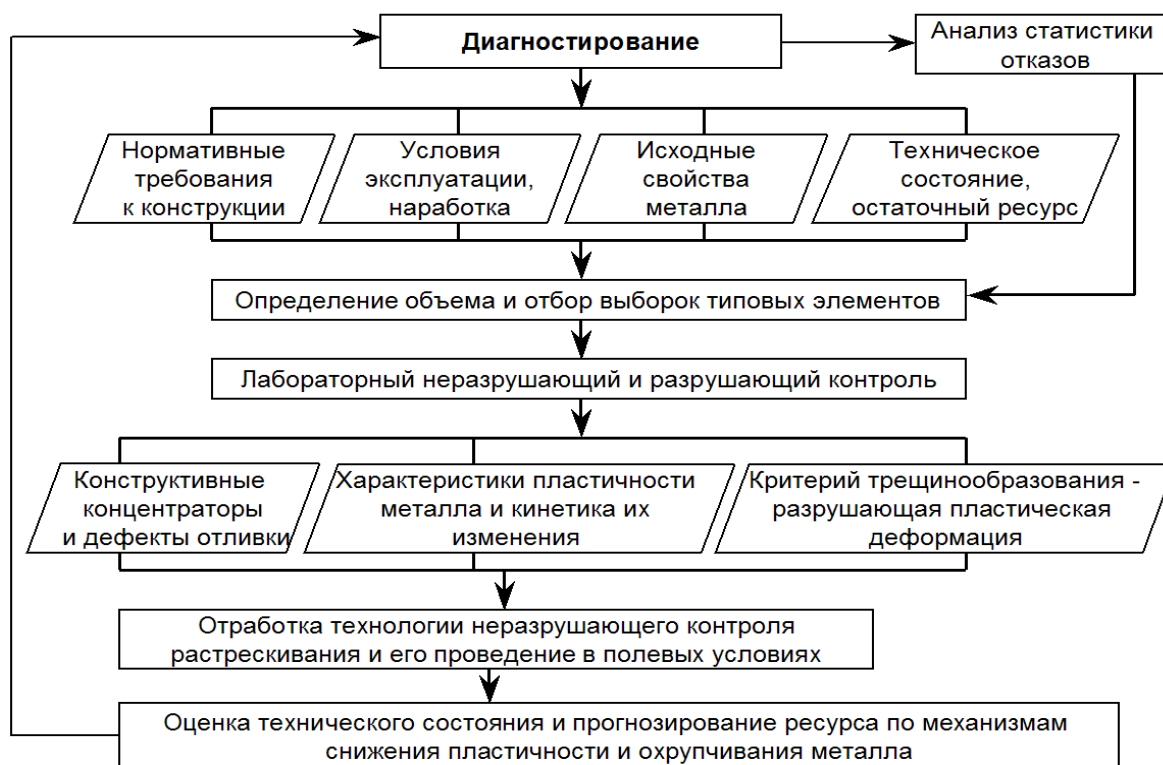


Рисунок 2 – Алгоритм метода контроля технического состояния и прогнозирования работоспособности ФА

В соответствии с алгоритмом (рис. 2) в дополнение к применяемым методам диагностирования ФА предусмотрено проведение выборочного неразрушающего и разрушающего контроля их типовых элементов. Выбор этих элементов определяется по результатам анализа статистики отказов и данных диагностирования ФА за предшествующий период их эксплуатации. Алгоритм метода выбора элементов ФА представлен на рис. 3.



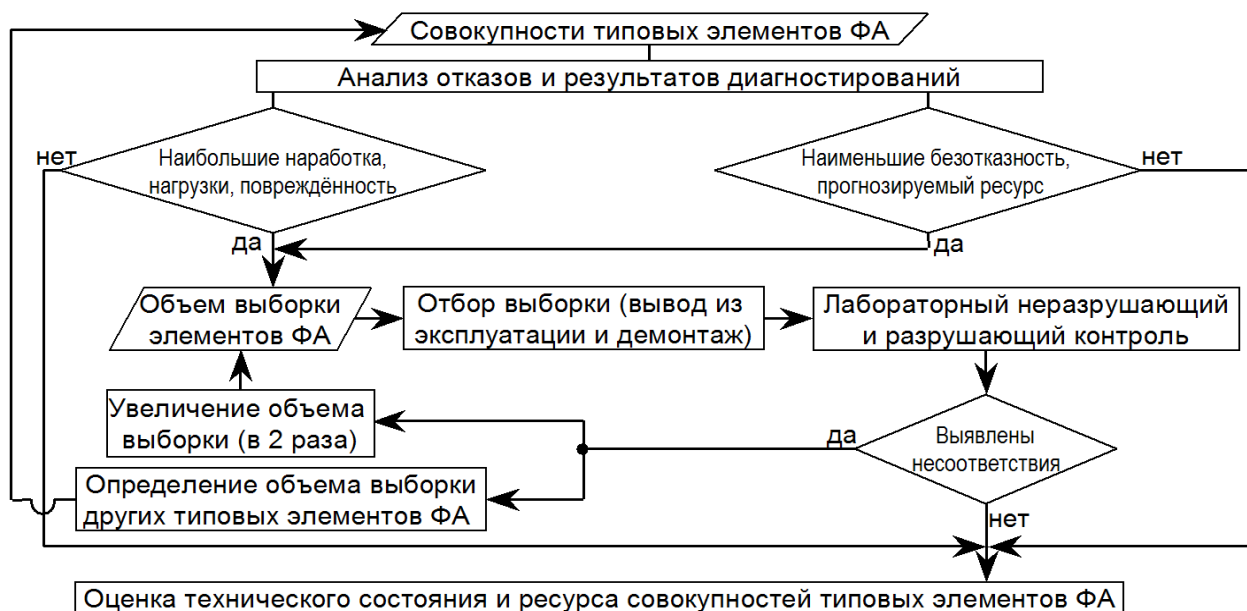


Рисунок 3 – Алгоритм метода выбора элементов ФА

В соответствии с алгоритмом (рис. 3) для каждой совокупности элементов ФА (объединенных по одинаковым изготовителям, типам-размерам и идентичным условиям эксплуатации) выполняется анализ данных об отказах и результатов предыдущих диагностирований. Выбираются элементы ФА, для которых поврежденность, частота и прогнозируемая вероятность отказов являются наибольшими. Выбранные элементы ФА демонтируются со скважины.



Рисунок 4 – Алгоритм метода лабораторного неразрушающего и разрушающего контроля выбранных элементов ФА

В соответствии с разработанным алгоритмом (рис. 4) для выбранных элементов ФА выполняются лабораторный неразрушающий и разрушающий контроль, отработка технологий неразрушающего контроля их характерных дефектов для реализации ее в условиях эксплуатации. Если при исследованиях выбранных элементов ФА выявляются недопустимые дефекты, количество таких элементов увеличивается по алгоритму (рис. 3) и выполняется выбор элементов ФА для других совокупностей.

Исследованиями установлено, что при длительной эксплуатации ФА, по мере увеличения ее наработки и с учетом минимальной температуры эксплуатации до  $-60^{\circ}\text{C}$  (для климатической зоны северных месторождений Западной Сибири) харак-

теристики пластичности металла ФА (относительное удлинение и сужение, ударная вязкость) снижаются. При этом силовые характеристики деформирования и разрушения (пределы текучести и прочности), как правило, увеличиваются. В этом случае использование применяемых подходов к оценкам прочности и ресурса по силовым критериям приводит к консервативным результатам при расчете прочности и долговечности. Об этом могут свидетельствовать фактические случаи растрескивания элементов ФА, не выявляемые и не прогнозируемые при их традиционном диагностировании. Для их выявления и прогнозирования, в отличие от применяемых диагностических моделей с использованием силовых параметров и критериев, в исследовании обоснованы новые модели растрескивания (рис. 5) и прогнозирования ресурса (рис. 6). Параметры и критерии этих моделей определяются по характеристикам пластичности металла и закономерностей их изменения. Научно-практической базой обоснования этих моделей послужили положения механики упругопластического деформирования и разрушения (Н.А. Махутов, В.Т. Алымов, М.М. Гаденин, В.В. Москвичев и др.) и выявленные при экспериментальных исследованиях (глава 3) причины растрескивания металла элементов ФА – низкие исходные значения и снижение пластических свойств, исходные концентраторы (конструктивные, дефекты отливки и структуры), деформирование при отрицательных температурах.

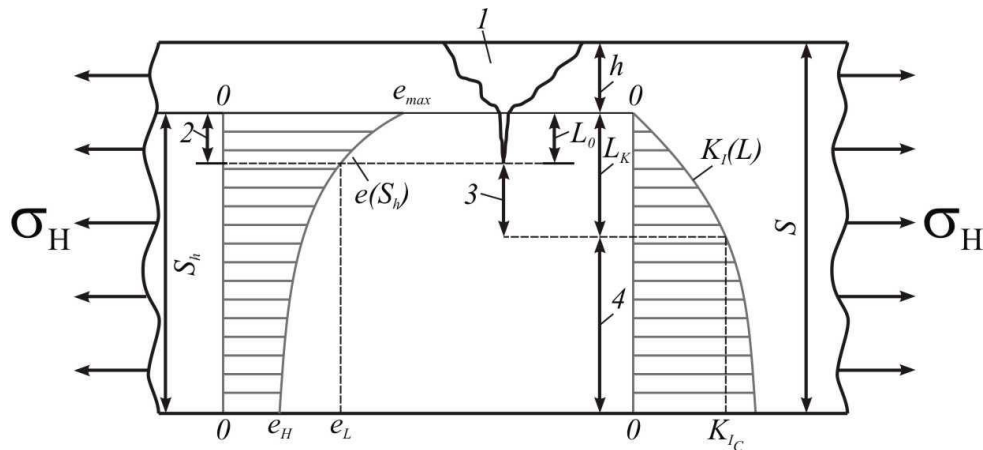


Рисунок 5 – Деформационная модель растрескивания (трещинообразования) в сечении стенки элементов ФА с исходным концентратором (дефектом)

На рис. 5 представлена деформационная модель растрескивания (трещинообразования) в сечении стенки элементов ФА с исходным концентратором (дефектом), где:  $S$  – исходная толщина стенки;  $l$  и  $h$  – исходный концентратор (дефект) и его глубина;  $S_h$  – остаточная толщина стенки -  $S_h = S - h$ ;  $e(S_h)$  – эпюра относительных деформаций (далее – деформаций) в сечении стенки, проходящем через вершину концентратора (дефекта);  $\sigma_H$  и  $e_H$  – номинальные напряжения и деформации в стенке при рабочих нагрузках;  $e_{max}$  – максимальные деформации в вершине концентратора;  $e_L$  – разрушающие деформации (деформации трещинообразования); 2 – область образования исходной трещины размером (глубиной)  $L_0$  при исчерпании пластичности в зоне  $e(S_h) \geq e_L$ ; 3 – область роста трещины;  $K_I(L)$  – эпюра коэффициентов интенсивности напряжений по пути роста трещины;  $K_{IC}$  и  $L_k$  – критические коэффициент интенсивности напряжений и глубина трещины; 4 – область разрушения (долома).

Образование исходной трещины -  $L_0$  (рис. 5) в вершине исходного концентратора -1 (галтели, технологического или эксплуатационного дефекта и т.п.) при действии напряжений -  $\sigma_H$  от внешних нагрузок происходит в области 2, где пластиче-

ская деформация –  $e(S_h)$  превышает значение деформационного критерия - разрушающей пластической деформации –  $e_L$ :

$$e_L = e_{ktmin} \cdot k_P; \quad e_{ktmin} = \ln \frac{1}{1 - \psi_{ktmin}}; \quad \psi_{ktmin} = f(\sigma_{0,2}; \sigma_B; \psi_k; \beta_T; \beta_B; t_{min}) / n_\psi, \quad (1)$$

где:  $\sigma_{0,2}$ ;  $\sigma_B$  и  $\psi_k$  – пределы текучести, прочности и относительное сужение, полученные по результатам стандартных механических испытаний по ГОСТ 1497-84 при температуре  $+20^\circ\text{C}$ ;  $\psi_{ktmin}$ ,  $e_{ktmin}$  – относительное сужение и разрушающая деформация при минимальной температуре эксплуатации ( $t_{min} = -60^\circ\text{C}$ );  $k_P$  – коэффициент снижения пластических свойств поверхностного слоя по отношению к пластическим свойствам металла гладких образцов для механических испытаний, как правило, вырезаемых из сердцевины сечения;  $\beta_T$ ,  $\beta_B$  – расчетные характеристики материала, зависящие от  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$  и определяемые либо экспериментально, либо по справочным данным;  $n_\psi$  - коэффициент запаса, учитывающий объем выборочных испытаний и статистический разброс их результатов. Значение  $\psi_{ktmin}$  может быть определено либо по эмпирической зависимости (1), либо экспериментально.

Для оценки сопротивления хрупкому разрушению размер исходной трещины –  $L_0$  (рис. 5) может быть определен как размер пластической зоны, в которой  $e(S_h) \geq e_L$  (см. область 2 на рис. 5) и уточнен из условия  $K_I(L_0) \leq K_{IC}$ . Исходная трещина -  $L_0$  в условиях эксплуатации может расти в области 3 до критического размера –  $L_K$ , соответствующего критическому значению коэффициента интенсивности напряжений –  $K_{IC}$ . После этого происходит разрушение – долом сечения (область 4). Допустимый размер трещины ( $[L]$ ), соответствующий условию сопротивления хрупкому разрушению может быть выражен из расчетной зависимости  $K_I(L)$ :

$$[L] = L([K_I]), \quad (2)$$

где:  $[K_I]$  – допустимый коэффициент интенсивности напряжений, определяемый по ПНАЭ Г – 7-002-86 с учетом фактических свойств металла, минимальной температуры эксплуатации -  $t_{min}$  и критической температуры хрупкости металла ( $t_K$ ). Значение  $t_K$  определяется по температурной зависимости ударной вязкости металла при стандартных испытаниях на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78 на образцах с V-образным надрезом в диапазоне температур от  $+20^\circ\text{C}$  до  $t_{min}$ .

Таким образом, определение характеристик пластичности, разрушающей пластической деформации и возможности растрескивания металла элементов ФА по модели (рис. 5) и зависимостям (1), (2) выполняется с использованием результатов стандартных испытаний на растяжение и ударный изгиб образцов металла элементов ФА после их длительной эксплуатации. Вырезка таких образцов из корпусов выборки бывших в эксплуатации элементов ФА (рис. 3, 4) позволяет получить их необходимое количество, в том числе из зон исходных концентраторов.

На рис. 6 представлена модель прогнозирования ресурса ФА по механизмам снижения пластичности и растрескивания металла, где:  $P$  – обобщенный контролируемый параметр пластичности металла (относительные удлинение ( $\delta$ ), сужение -  $\psi_k$ , ударная вязкость ( $KV$ ));  $T$  – время эксплуатации;  $L$  – размер (глубина) трещины;  $P(T)$  и  $L(T)$  – временные закономерности снижения пластичности и растрескивания;  $dP/dT$  – скорость снижения пластичности;  $T_D$  - текущая наработка до диагностирования;  $P_0$  и  $P_D$  – исходные (сертификатные) и фактические параметры пластичности (определяемые при диагностировании);  $[P_{min}]$  – нормативные минимально допустимые параметры пластичности;  $P_L = e_L$  – деформационный критерий растрескивания

(трещинообразования);  $\tau_k$ ,  $\tau_P$  и  $\tau_L$  – прогнозируемый ресурс по критериям растрескивания (трещинообразования), снижения пластичности (охрупчивания) и сопротивления хрупкому разрушению;  $L_0$ ,  $[L]$  и  $L_k$  – исходный, допустимый и критические размеры трещины;  $L_{min}$  – минимальный размер трещины, выявляемой при контроле;  $R_L$  – время роста трещины от  $L_{min}$  до  $[L]$ .

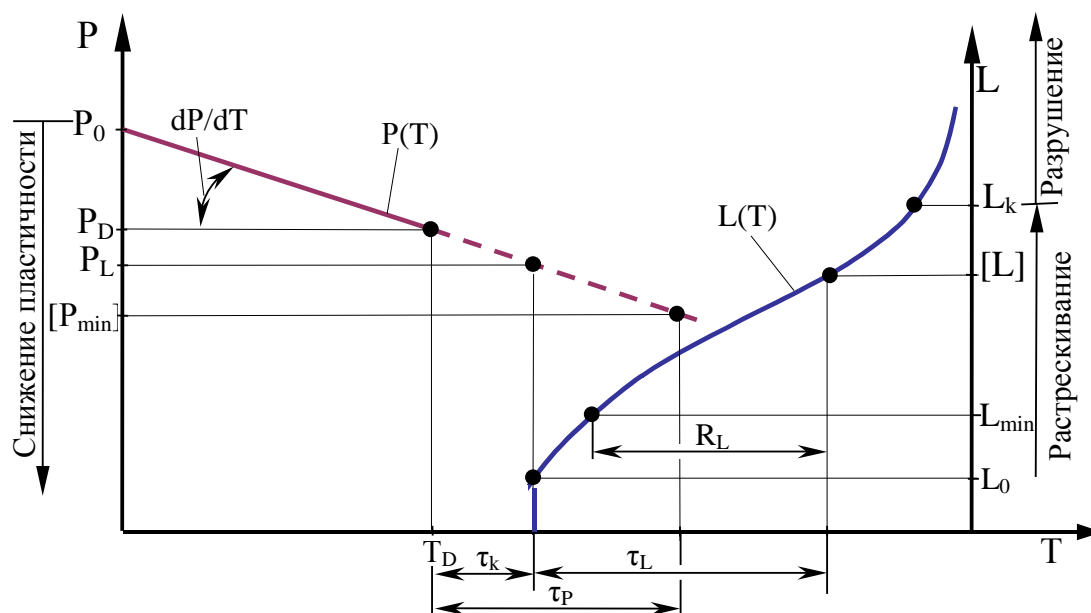


Рисунок 6 – Модель прогнозирования ресурса элементов ФА по механизмам снижения пластичности и растрескивания металла

Применяемые диагностические модели позволяют прогнозировать ресурс по критерию сопротивления хрупкому разрушению -  $\tau_L$  (рис. 6), который соответствует наработке от момента растрескивания (образования исходной трещины –  $L_0$ ) до достижения трещиной допустимого размера  $[L]$  из условия (2). В отличие от них, обоснованная в исследовании модель (рис. 6) позволяет прогнозировать ресурс до истощения пластичности металла -  $\tau_P$  и ресурс до начала растрескивания (образования исходной трещины –  $L_0$ ) -  $\tau_k$ . Это позволяет прогнозировать суммарный ресурс до истощения сопротивления хрупкому разрушению -  $\tau_k + \tau_L$  и прогнозировать ресурсные отказы по механизмам снижения пластичности и растрескивания металла.

Согласно модели (рис. 6) при диагностировании определяются исходные параметры пластичности -  $P_0$  по данным сертификатов на металл, содержащихся в исполнительной документации. Фактические параметры пластичности –  $P_D$  определяются по результатам испытаний образцов, вырезанных из корпусов выборки бывших в эксплуатации элементов ФА (рис. 3, 4). Значения  $P_0$  и  $P_D$  аппроксимируются закономерностью –  $P(T)$  и экстраполируются на последующий период эксплуатации (см. прерывистую линию). Остаточный ресурс по механизму снижения пластичности -  $\tau_P$  определяется как прогнозируемая наработка до достижения параметрами пластичности их нормативных минимально допустимых значений -  $[P_{min}]$ .

Ресурс по механизму растрескивания (трещинообразования) -  $\tau_k$  определяется как прогнозируемая наработка до достижения максимальными деформациями –  $e_{max}$  (рис. 5) в зоне исходного концентратора (конструктивного перехода, дефекта) значений критерия трещинообразования - разрушающей пластической деформации -  $P_L = e_L$ , соответствующей образованию исходной трещины –  $L_0$ .

Для отработки технологии неразрушающего контроля определяется минимальный размер трещины -  $L_{\min}$  в металле элемента ФА, которая должна быть выявлена. Значение  $L_{\min}$  определяется в промежутке  $L_0 \leq L_{\min} < [L]$  по закономерности  $L(T)$  из условия, чтобы время возможного роста трещины -  $R_L$  (рис. 6) до величины  $[L]$  не превышало назначаемый период эксплуатации до очередного диагностирования. Это позволяет оптимизировать затраты на проведение неразрушающего контроля по критериям его трудоемкости и требуемой периодичности. Закономерности роста трещины  $L(T)$  могут определяться или по результатам испытаний металла корпусов выборок элементов ФА на трещиностойкость, или по справочным данным.

Метод прогнозирования работоспособности ФА (рис. 2) с использованием моделей (рис. 5, 6) реализуется в следующей последовательности. Для выбранных по алгоритму (рис. 3) элементов ФА выполняются лабораторный неразрушающий и разрушающий контроль по алгоритму (рис. 4). Определяются параметры пластичности металла, закономерности их снижения, оценивается их соответствие нормативным требованиям. По отработанной технологии неразрушающего контроля выполняется контроль в полевых условиях остающихся в эксплуатации элементов ФА. В соответствии с деформационной моделью (рис. 5) для них выполняется расчёт критериев трещинообразования (разрушающей пластической деформации) и сопротивления хрупкому разрушению (допустимого размера трещины). С учетом этих данных по модели (рис. 6) выполняются оценка технического состояния и прогнозирование ресурса по механизмам снижения пластичности и растрескивания металла. Полученные результаты, в т.ч. закономерности возникновения отказов, используются для определения возможности, сроков и условий продолжения эксплуатации ФА до их очередного диагностирования, прогнозирования сроков их ремонтов и замен.

**В третьей главе** изложено расчетно-экспериментальное обоснование методов определения объема выборок типовых элементов ФА и проведения их неразрушающего и разрушающего контроля, анализа закономерностей снижения пластичности металла, определения его разрушающей пластической деформации и технологии неразрушающего контроля ФА в условиях эксплуатации.

В соответствии с разработанными алгоритмами контроля технического состояния, прогнозирования работоспособности (рис. 2) и определения объема выборок элементов ФА (рис. 3) проанализировано  $> 400$  случаев внезапных отказов элементов ФА за прошедший 10-ти летний период эксплуатации. Установлены доминирующие факторы отказов элементов ФА по причине растрескивания металла корпусов: отказавшие элементы относятся к ФА UPETROM Румынского производства на давление 21 МПа; 82% – задвижки  $4^{1/16}$ ", 14% – задвижки  $7^{1/16}$ ", по 1% – задвижка  $2^{1/16}$ ", колонная головка  $13^{5/8}$ ", трубная головка  $13^{5/8}$ "  $\times$  9", спец. фланец (адаптер)  $9$ "  $\times$   $7^{1/16}$ ", крестовина  $7^{1/16}$ "  $\times$   $4^{1/16}$ "; 84 % отказов произошли при наработке 10 – 20 лет, 13% - от 20 до 30 лет, 3% -  $>30$ лет.

В соответствии с алгоритмом (рис. 3) и полученными результатами анализа причин и факторов возникновения отказов из-за растрескивания металла в настоящем исследовании выбрана совокупность ФА UPETROM Румынского производства 32-х газодобывающих скважин Комсомольского месторождения. Эта ФА эксплуатируется с 1986 года, срок ее эксплуатации в ряде случаев достигает 27 лет и превышает проектный срок эксплуатации. Корпуса элементов ФА изготовлены из литой заготовки из стали T32MoCrNi08R (Румынский стандарт СТАС 699-87, по химическому составу идентична отечественной стали 35ХМЛ по ГОСТ 977-88).

Анализом сведений о количестве и наработках до отказов по ГОСТ 27.002-89 получены значения показателей надежности (безотказности) совокупностей элементов ФА UPETROM: вероятности отказа/безотказной работы  $-V_0/V_{БР}=0,17/0,83$ ; гамма-процентная наработка до отказа (при  $\gamma = 90\%$ ) - 12 лет; средняя наработка до отказа - 19,8 лет; интенсивность возникновения отказов - 0,009 отказов/год. Для каждой группы типовых элементов ФА установлено, что наименьшую  $V_{БР}$  имеют задвижки размером (условным диаметром)  $4^{1/16}$  и  $7^{1/16}$  – 0,68 и 0,71 соответственно, для других типовых элементов (колонной и трубной головок, спецфланцев (адаптеров), задвижек  $2^{1/16}$ , крестовин, переводников (буферов), промежуточных и глухих фланцев)  $V_{БР} > 0,94$ , для всей совокупности элементов ФА по всем видам отказов  $V_{БР}= 0,83$ , согласно нормативным требованиям (условно применен РД 09–102–95)  $V_{БР}$  должна обеспечиваться на уровне  $> 0,9 \div 0,95$ . В соответствии с алгоритмом (рис. 3), на основе анализа статистики отказов и результатов диагностирования, для проведения лабораторного неразрушающего и разрушающего контроля была выбрана задвижка  $4^{1/16}$  ФА UPETROM на давление 21 МПа (далее – задвижка) с наработкой 20 лет. Задвижки такого типа за предшествующий период эксплуатации имели наибольшее количество отказов и выявленных дефектов.

В соответствии с алгоритмом контроля выборки элементов ФА (рис. 4) выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния корпуса задвижки при нагружении рабочим давлением и силами от затяжки шпилек фланцевых соединений. Установлено (рис. 7 а), что на его поверхности имеются зоны концентраторов напряжений, характеризующиеся высоким значением локальных напряжений (см. зоны с уровнями напряжений  $> 70$  МПа). Эти зоны располагаются в местах конструктивных переходов (сопряжениях различных диаметров, галтелях, проточках, местах изменения формы и размеров) и в зонах поверхностных и внутренних дефектов.

После разборки задвижки поверхность ее корпуса была зачищена от лакокрасочного покрытия и подготовлена для проведения неразрушающего контроля согласно нормативным требованиям. Выполнены визуально-измерительный (ВИК) и магнитопорошковый (МГПК) контроли его наружной поверхности. По результатам ВИК были выявлены дефекты отливки – недоливы, заливы, грубая шероховатость по ГОСТ 19200-80 (рис. 7 б). По результатам МГПК в зонах концентраторов напряжений с их высокими значениями (рис. 7 в) - в зоне сопряжения тарелки фланца с патрубком (ступицей) и в зоне сопряжения стакана корпуса с патрубком (ступицей) фланца (см. поз. 5 и 6 на рис. 7 в соответственно) - были выявлены поверхностные трещины. Общая длина трещины в зоне сопряжения тарелки фланца со ступицей (патрубком) составляет 98 мм, расстояние (Н) от трещины до плоскости тарелки фланца –  $H = 20 \dots 30$  мм. Длина трещины в зоне сопряжения стакана со ступицей (патрубком) фланца – 15 мм. До зачистки металла от лакокрасочного покрытия ВИК не позволил выявить эти трещины, они были скрыты под слоями краски.

По результатам исследований для наиболее результативного выявления трещин при МГПК было экспериментально обосновано применение дефектоскопа МДПМ-1 (Россия), контрастной белой краски и черной магнитной суспензии В103 (BabbCo, Франция) с размером частиц 0,5-20 мкм, определены места установки полюсов магнитопорошкового дефектоскопа, требования к напряженности магнитного поля.

Затем в соответствии с алгоритмом (рис. 4) корпус был разрезан на две части по продольной плоскости симметрии относительно оси фланца (рис. 7 г) ленточной пилой FILL Speedliner 920 m. Для каждой части выполнен ВИК и МГПК внутренней



поверхности и поверхностей плоскостей реза. По результатам ВИК выявлены дефекты отливки (рис. 7 г).

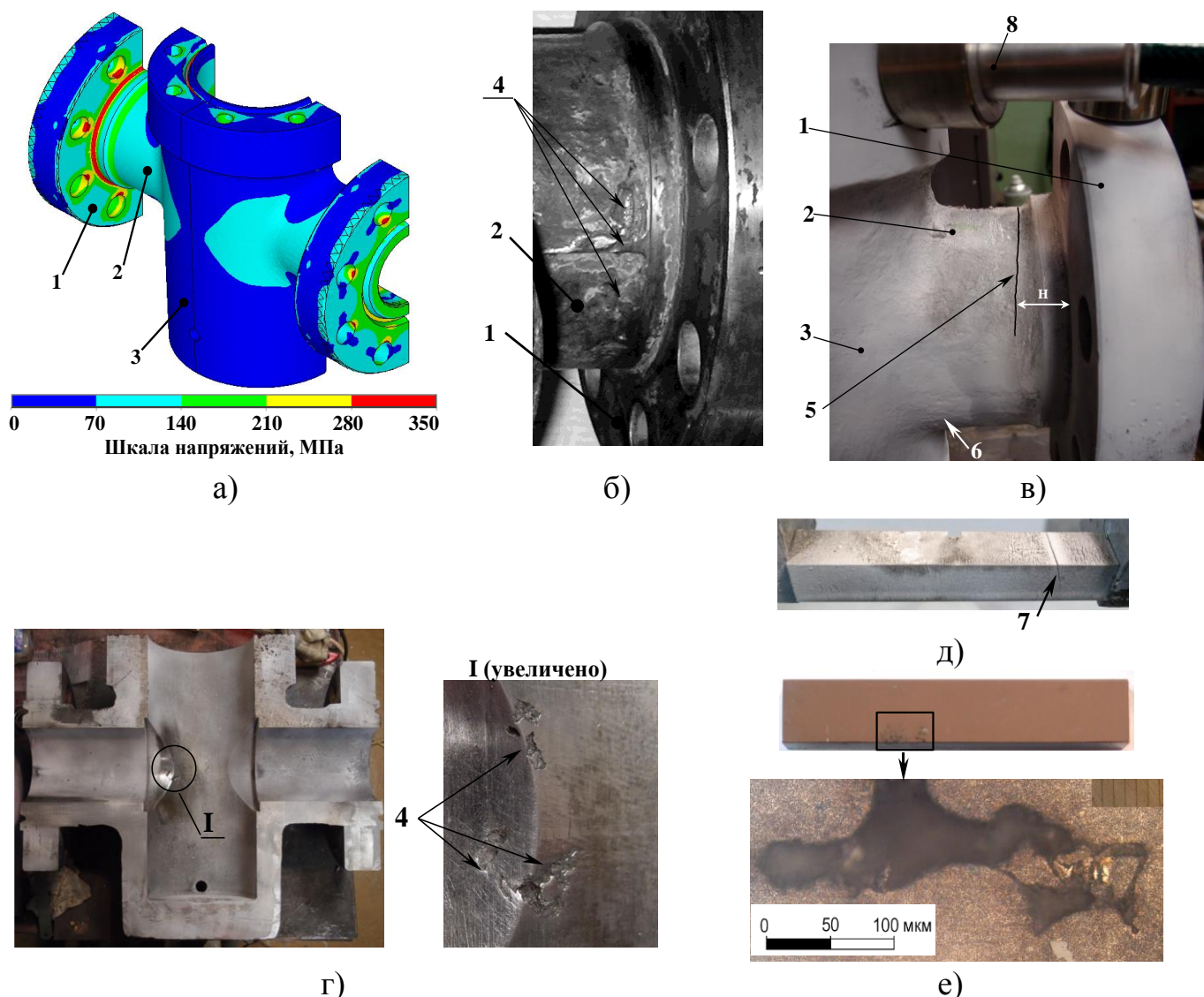


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений в корпусе задвижки (а), дефекты отливки (б) и трещины на наружной поверхности (в), дефекты отливки на внутренней поверхности (г), образцы для испытаний на ударный изгиб с трещиной (д) и рыхлотой (е): 1 – тарелка фланца; 2 – ступица (патрубок) фланца; 3 – стакан корпуса; 4 – дефекты отливки; 5, 6, 7– трещины; 8 – магнит дефектоскопа

Из металла зоны сопряжения тарелки фланца со ступицей (патрубком) корпуса, не имеющего поверхностных дефектов по результатам ВИК и МГПК, были изготовлены образцы для испытаний на растяжение и ударный изгиб, ориентированные вдоль оси патрубка (ступицы) фланца. После механической обработки при проведении ВИК и МГПК на некоторых образцах были выявлены трещины и металлургические рыхлоты (рис. 7 д, е). По результатам исследований трещин в этих образцах установлено, что в соответствии с ориентацией их вырезки, также как и в случае на рис. 7 в, трещина располагалась в зоне галтели сопряжения тарелки фланца со ступицей и являлась практически радиальной (ее поверхность имела наклон к плоскости радиального сечения ступицы фланца  $< 10^\circ$ ). Строение поверхностей трещины соответствует хрупкому излому. Наличие рыхлот в образцах (рис. 7 е) служит одной из причин образования и развития трещин.

Для исследования трещины в зоне сопряжения тарелки фланца со ступицей (патрубком) фланца (рис. 7 б) из корпуса задвижки был вырезан фрагмент металла с

трещиной. Этот фрагмент по длине трещины был разрезан на образцы (рис. 8 а). Каждый образец был надпилен и доломлен (рис. 8 б). Выполнены измерения длины трещины (по поверхности), ее глубины и реконструкция положения трещины в плоскости поперечного сечения ступицы (патрубка) фланца (рис. 8 в).

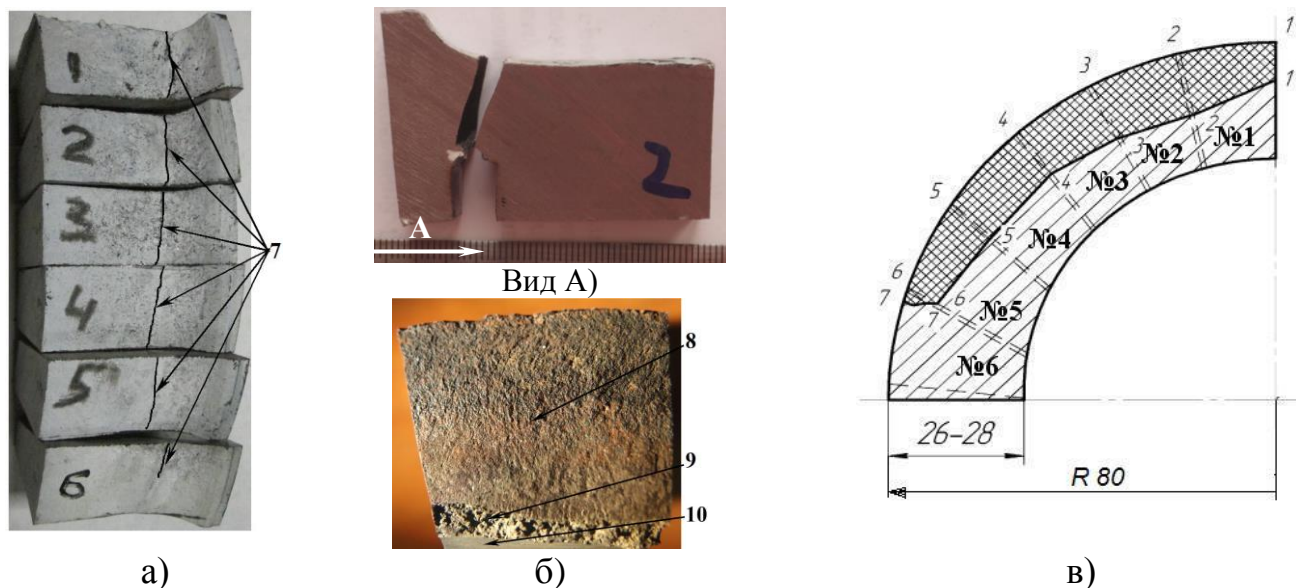



Рисунок 8 - Фрагмент металла ступицы с трещиной (а), поверхность излома образца №2 (б), положение трещины в плоскости поперечного сечения ступицы (в): 1 – 6 – нумерация образцов; 7 – трещина; 8 - поверхность трещины; 9 - область долома; 10 - место подпила; 1 – 1, ..., 7 – 7 – сечения трещины (плоскости вырезки образцов);  - поверхность трещины в сечении

Исследованиями установлено, что трещина (рис. 8 в) располагается по периферии поперечного сечения и ее глубина практически достигает середины сечения.

Результаты проведенного моделирования напряженно-деформированного состояния фланца методом конечных элементов (рис. 9) наглядно показывают, что при действии внутреннего давления, сил затяжки шпилек ( $F_{ш}$ ) и обжатия прокладки ( $F_{п}$ ) сечение ступицы фланца по периметру нагружено распределенным изгибающим моментом ( $M$ ) – рис. 9 а.

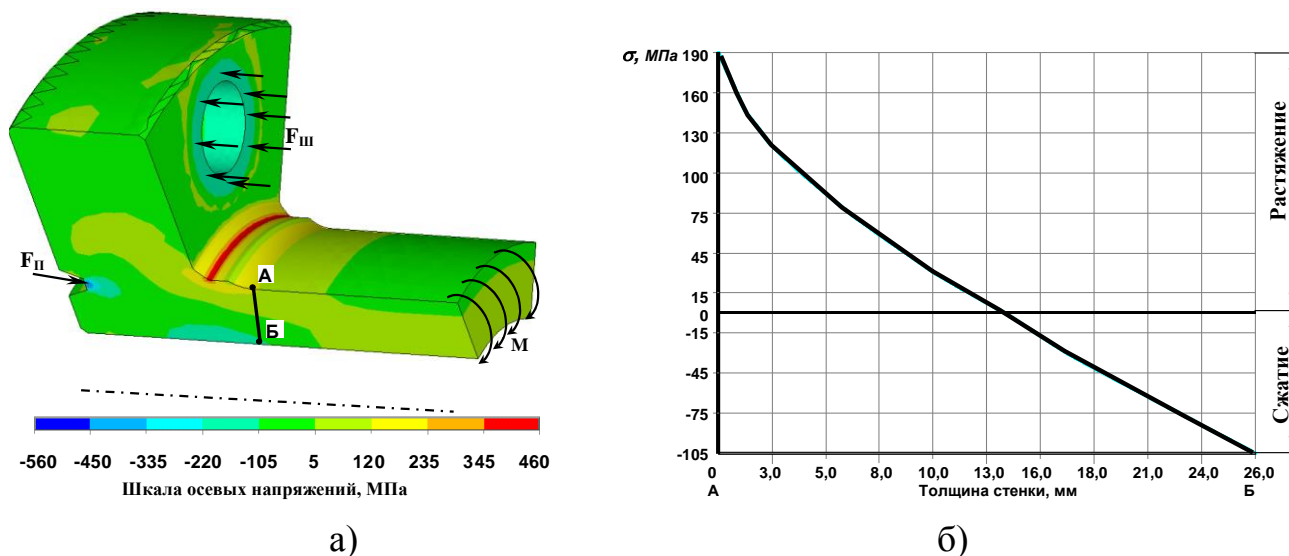


Рисунок 9 – Распределение осевых напряжений во фланцевом соединении (а), эпюра осевых нормальных напряжений по линии А-Б в области расположения выявленной трещины (б):  $\sigma$  - осевые напряжения



В этом случае в периферийной (наружной) части сечения, практически до ее середины, действуют нормальные (осевые) растягивающие напряжения (см.  $\sigma > 0$  на рис. 9 б), а от середины к внутренней части - осевые сжимающие напряжения (см.  $\sigma < 0$  на рис. 9 б). Это соответствует одному из характерных условий образования и развития выявленной трещины (рис. 8 в).

Поскольку в корпусе изначально выбранного элемента ФА - задвижки  $4^{1/16}$ " - были выявлены трещины, в соответствии с алгоритмом (рис. 3) были выбраны еще две аналогичные задвижки  $4^{1/16}$ " и по одному элементу для других типовых элементов ФА UPETROM – колонной головки  $13^{5/8}$ ", трубной головки  $13^{5/8} \times 9$ ", спец. фланца (адаптера)  $9 \times 7^{1/16}$ ", задвижек  $7^{1/16}$ " и  $2^{1/16}$ ", крестовины  $7^{1/16} \times 4^{1/16}$ ", переводника (буфера)  $7^{1/16}$ ", промежуточного фланца  $4^{1/16}$ ", глухого фланца  $4^{1/16}$ ".

Корпуса этих элементов были исследованы по аналогии с корпусом первой задвижки (рис. 7). В результате во всех корпусах были выявлены поверхностные и внутренние дефекты отливок (недоливы, заливы, грубая шероховатость, раковины, рыхлоты), в корпусах всех задвижек, колонной и трубной головок, спец. фланца (адаптера) выявлены поверхностные и внутренние трещины металла длиной до 200 мм, глубиной до 50% от толщины стенки. Большинство трещин выявлены в зонах сопряжения тарелки фланца со ступицей (патрубком). Техническое состояние исследованных элементов ФА с выявленными трещинами не соответствует нормативным требованиям, элементы выбракованы.

По результатам лабораторного спектрального анализа химического состава металла и металлографических исследований установлено, что содержание основных химических элементов металла корпусов всех выборок элементов ФА соответствует паспортным значениям и нормативным требованиям. Установлена дефектная микроструктура стали крестовины  $7^{1/16} \times 4^{1/16}$ " в виде игольчатых включений вдоль границ зерен перлита, характерных для перегрева и ускоренного охлаждения в процессе литья. Крестовина выбракована, микроструктура металла корпусов остальных элементов ФА оценена как недефектная.

Исходные механические свойства металла корпусов определены по данным сертификатов на примененный для их изготовления металл, содержащихся в паспортах ФА (см. столбцы голубого цвета в табл. 2). Фактические механические свойства (см. столбцы зеленого цвета в табл. 2) определены по результатам механических испытаний образцов, вырезанных из высоконагруженных зон (рис. 7 а), в которых не были выявлены дефекты, корпусов всех выборок элементов ФА - по три образца для испытаний на растяжение (тип III по ГОСТ 1497-84) и по 15 образцов - на ударный изгиб с V-образным надрезом (Шарпи) (тип 11 по ГОСТ 9454-78) в диапазоне температур  $-60 \div +20^\circ\text{C}$  и по результатам измерений твердости по Бринеллю на стационарном твердомере HBRV-187,5 по ГОСТ 9012-59. В результате были получены выборки значений исходных и фактических механических свойств металла корпусов для каждой выборки типовых элементов ФА и для их совокупности. Выполнена статистическая обработка этих выборок по ГОСТ Р 50779.21-2004. В табл. 2 представлены результаты для совокупности исследуемых типовых элементов ФА, где:  $\delta$  - относительное удлинение;  $KV_{-60}$  – работа удара при  $-60^\circ\text{C}$  на образцах  $10 \times 10$  мм; НВ – твердость по Бринеллю; СКО – среднее квадратическое отклонение. Согласно ГОСТ Р 51365-2009 минимальные допустимые нормативные значения механических свойств металла определены для групп прочности K248 и K310.

Анализ соотношения исходных, фактических и нормативных свойств металла (табл. 2) показывает: исследуемый металл обладал низкими исходными пластическими свойствами – минимальные исходные  $\delta$  и  $\psi_k$  (15 и 25%) менее требуемых нормативных ( $> 19$  и  $> 32\%$ ) и выборочное среднее  $\delta$  (19,1%) практически равно минимально допустимому нормативному; за прошедший 20-ти летний период эксплуатации в низкотемпературных климатических условиях Западной Сибири пластические свойства -  $\delta$ ,  $\psi_k$  снизились, рассеяние их значений увеличилось – см. соотношение соответствующих границ диапазонов, доверительных интервалов, выборочных средних, СКО в голубых и зеленых столбцах; фактические пределы текучести, прочности -  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и твердость – НВ соответствуют нормативным требованиям, фактические пластические свойства ( $\delta$ ,  $\psi_k$  KV<sub>-60</sub>) не соответствуют нормативным требованиям - см. соотношение соответствующих границ диапазонов, доверительных интервалов и выборочных средних в зеленых столбцах с требованиями ГОСТ Р 51365-2009.

Таблица 2 - Исходные, фактические и нормативные свойства металла

Статистические параметры		$\sigma_{0,2}$ , МПа		$\sigma_B$ , МПа		$\delta$ , %		$\psi_k$ , %		KV <sub>-60</sub> , Дж	НВ
Объем выборки		323	36	323	36	323	36	323	36	36	108
Диапазон значений, min-max		353-755	336-630	519-951	490-810	15-27	8,4-26,1	25-67	12,4-53	4,0-55,4	166 - 241
Выборочное среднее		<b>568</b>	<b>505</b>	<b>705</b>	<b>669</b>	<b>19,1</b>	<b>17,5</b>	<b>43,1</b>	<b>26,1</b>	<b>26,6</b>	<b>208</b>
СКО		56,7	95,4	55,5	103	1,7	4,3	7,3	9,0	9,7	17,5
Границы 90% доверительного интервала	min	474	348	613	500	16,3	10,5	31,0	11,4	10,7	179
	max	661	662	796	838	21,9	24,5	55,2	40,8	42,6	237
Требования ГОСТ Р 51365 - 2009		<b>&gt; 310</b>		<b>&gt; 483</b>		<b>&gt; 19</b>		<b>&gt; 32</b>		<b>&gt; 20</b>	<b>&gt; 140</b>

Полученные результаты исследований (табл. 2) наглядно показывают, что предусмотренный традиционными методами диагностирования контроль твердости не позволяет выявить изменение и несоответствие пластических свойств металла элементов ФА после их длительной эксплуатации.

Исследованиями установлено, что образование и развитие выявленных трещин (растрескивание) металла (рис. 7, 8) обусловлено низкими исходными пластическими свойствами и их снижением на 10 – 60% за 20 лет эксплуатации (табл. 2), а также наличием исходных дефектов отливки и структуры металла, длительной эксплуатацией и деформированием металла от действия рабочих нагрузок в диапазоне отрицательных температур в климатических условиях Западной Сибири.

С использованием полученных результатов исследований выполнены расчеты параметров и критериев теоретически обоснованной деформационной модели растрескивания (рис. 5) для исследуемых выборок типовых элементов ФА. Расчеты выполнены методом конечных элементов в осесимметричной постановке задачи при билинейной модели упруго-пластического деформирования металла с учетом его фактических свойств при минимальной климатической температуре эксплуатации - 60°C. На рис. 10 представлены результаты расчетов на примере сечения ступицы фланца исследуемого корпуса задвижки 4<sup>1/16</sup>" с исходным дефектом отливки, где: 1 и 2 – тарелка и ступица фланца; 3 и 4 – исходные дефект отливки и трещина;  $e$  и  $e_{max}$  – расчетная деформация по линии А-Б и максимальная расчетная деформация в вершине дефекта;  $K_I$  – расчетный коэффициент интенсивности напряжений при ро-

сте условной исходной трещины из вершины дефекта (точка А) по линии А-Б;  $[K_I]$  и  $[L]$  – допустимые коэффициент интенсивности напряжений и глубина трещины.

По результатам расчетов установлено, что с учетом фактических экспериментально определенных предела текучести -  $\sigma_{0,2} = 478$  МПа и относительного сужения  $\Psi_k = 25,6\%$  при  $+20^\circ\text{C}$ , и их рассчитанных значений при минимальной температуре эксплуатации -  $t_{\min} = -60^\circ\text{C}$  -  $\sigma_{0,2 t_{\min}} = 490$  МПа и  $\Psi_{k t_{\min}} = 11,8\%$  условие образования исходной трещины реализуется при максимальных расчетных деформациях в вершине дефекта –  $e_{\max} = 6\%$ . С учетом  $\Psi_{k t_{\min}} = 11,8\%$  расчетная разрушающая деформация составляет -  $e_k = 12,6\%$  (1), а значение коэффициента снижения пластических свойств поверхностного слоя отливки -  $k_p = 0,48$ . Определенная по температурной зависимости ударной вязкости критическая температура хрупкости металла –  $t_k = -35^\circ\text{C}$ . С учетом ее по ПНАЭ Г – 7-002-86 допустимый коэффициент интенсивности напряжений -  $[K_I] = 23$  МПа·м<sup>1/2</sup>, допустимая глубина трещины по (2) –  $[L]=9$  мм.

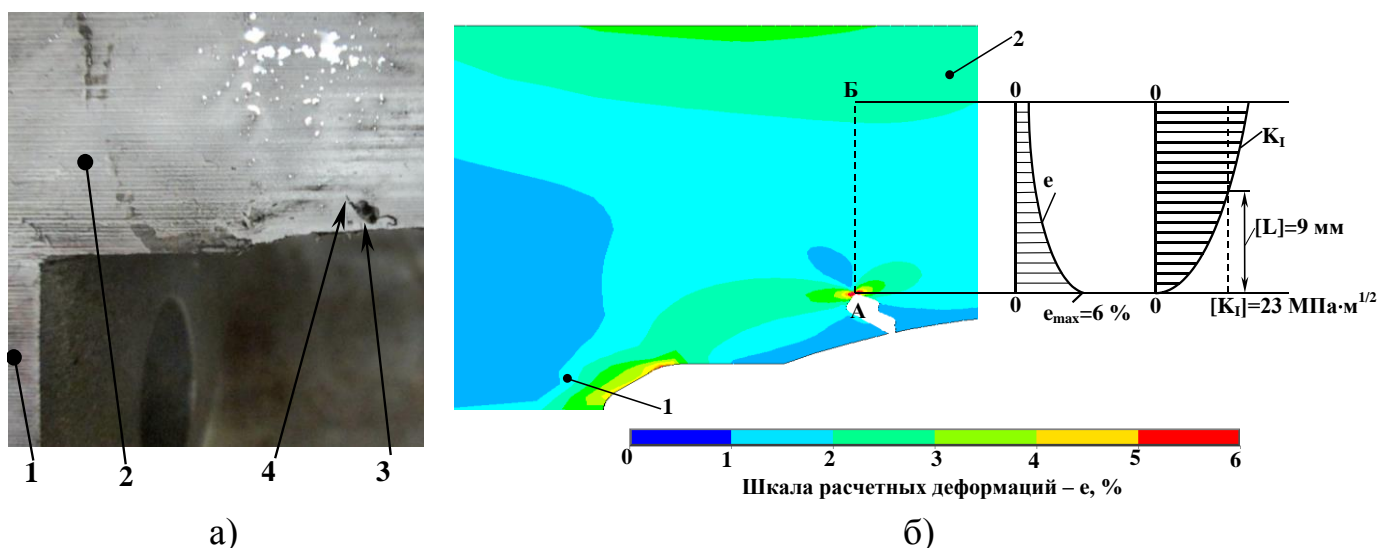


Рисунок 10 – Сечение ступицы фланца задвижки с выявленными исходным дефектом отливки и трещиной (а), распределение расчетных деформаций –  $e$  и результаты расчетов параметров и критериев деформационной модели растрескивания (б)

На основе обобщения результатов расчетов для других исследуемых выборок типовых элементов ФА с выявленными трещинами в вершинах дефектов и конструктивных концентраторов установлены диапазоны значений  $k_p$ , соответствующие условию растрескивания с учетом фактических значений  $\Psi_k$ : для исходных дефектов отливки (недоливы, заливы, грубая шероховатость)  $k_p = 0,4 \div 0,6$ ; для галтелей и конструктивных переходов без обработки точением (сопряжение ступицы и стакана) -  $k_p = 0,6 \div 0,8$ ; для галтелей и конструктивных переходов после механической обработки (сопряжение ступицы и тарелки фланца) -  $k_p = 0,8 \div 1$ .

**В четвертой главе** представлены результаты разработки программно-методического обеспечения и апробации новых методов прогнозирования работоспособности ФА северных месторождений Западной Сибири, основанных на учете механизмов снижения пластичности и растрескивания металла при их диагностировании, с целью обоснования возможности и условий продления эксплуатации и предупреждения хрупких разрушений.

На основе результатов выполненных исследований разработан стандарт организации ОАО «Техдиагностика» - СТО-НК.И-222 «Инструкция по неразрушающему контролю сплошности металла высоконагруженных конструктивных концентраторов напряжений и прогнозированию работоспособности элементов фонтанных ар-

матур газодобывающих скважин для предупреждения их хрупких разрушений». Разработанные методические принципы контроля технического состояния и прогнозирования ресурса ФА отражены в положениях Р Газпром 2-3.3-732-2013 «Техническое диагностирование фонтанных арматур и оборудования устья скважин». Разработки применяются в газодобывающих предприятиях для проведения диагностирования, определения возможности, сроков и условий продолжения эксплуатации ФА по фактическому техническому состоянию, планирования их ремонтов и замен.

Для повышения производительности обработки данных результатов выборочно-лабораторного неразрушающего и разрушающего контроля, контроля в условиях эксплуатации, расчетов остаточного ресурса ФА и снижения вероятности вычислительных ошибок разработано специализированное программное обеспечение для ЭВМ в виде вычислительных блоков (модулей). В программе Microsoft Excel – файлы ввода значений контролируемых параметров. В программе MathCad – файл «Расчет ресурса ФА.mcd», являющийся одновременно и алгоритмом программы расчета прогнозируемого ресурса и результатом ее выполнения. Командные log-файлы для расчетов пластических деформаций в стенке элементов ФА с исходными концентраторами методом конечных элементов.

В результате апробации и внедрения разработок в производство при контроле в условиях эксплуатации 422-х элементов ФА UPETROM на 31-й скважине Комсомольского месторождения из 239-ти проконтролированных задвижек на 21-й задвижке (19 ед. -  $4^{1/16}$ " и 2 ед. -  $7^{1/16}$ ", в эксплуатации с 1993 г.) 16-ти скважин было выявлено 38 трещин корпусов. Из них 35 трещин на ступице (патрубке) фланца длиной  $15 \div 502$  мм и три трещины на тарелке фланца длиной  $110 \div 178$  мм (пример результатов контроля представлен на рис. 11). На некоторых задвижках выявлено до 5, 6 трещин. На 63-х скважинах Уренгойского и Ен-Яхинского месторождений из 446-ти элементов на 7-ми задвижках UPETROM на 21 МПа (4 ед. -  $4^{1/16}$ ", в эксплуатации с 1994 г.; 2 ед. -  $4^{1/16}$ ", в эксплуатации с 1986 г. и 1 ед. -  $2^{1/16}$ ", в эксплуатации с 1993 г.) 4-х скважин выявлено 27 трещин. Из них 26 трещин на ступице (патрубке) фланца длиной  $2 \div 170$  мм и одна трещина в галтели сопряжения стакана корпуса и ступицы фланца длиной 60 мм. По результатам контроля все элементы ФА с выявленными трещинами были оперативно выведены из эксплуатации и заменены.



а)



б)

Рисунок 11 – Результаты контроля в полевых условиях: трещина ступицы (патрубка) фланца (а) и трещина тарелки фланца задвижки  $4^{1/16}$ "(б): —> - трещины

Для остальных элементов ФА (на которых трещины не были выявлены) выполнены расчеты параметров, критериев и прогнозируемого ресурса в соответствии с теоретически обоснованной деформационной моделью растрескивания (рис. 5) и моделью контроля технического состояния и прогнозирования ресурса элементов

20

ФА (рис. 6). При этом использованы результаты неразрушающего контроля элементов ФА в условиях эксплуатации, результаты выборочного лабораторного неразрушающего и разрушающего контроля, механических испытаний металла типовых элементов ФА. Результаты расчетов на примере колонной головки UPETROM 13<sup>5/8</sup>" с выявленными при контроле дефектами отливки представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов параметров, критериев и прогнозируемого ресурса колонной головки по механизмам охрупчивания и растрескивания металла

Параметры, критерии, прогнозируемый ресурс	Результаты расчетов		
Максимальная деформация в вершине дефекта, $e_{max}$ , %	8		
Коэффициент снижения пластичности, $k_p$	0,5		
Относительное сужение при $-60^\circ\text{C}$ , $\Psi_{kt min}$ , %	18,3		
Разрушающая деформация для образцов при $-60^\circ\text{C}$ , $e_k$ , %	20,2		
Разрушающая деформация (критерий трещинообразования), $e_L$ , %	10,1		
Критическая температура хрупкости, $t_k$ , $^\circ\text{C}$	-70		
Допустимый коэффициент интенсивности напряжений, $[K_I]$ , МПа · м <sup>1/2</sup>	35		
Допустимый размер условной трещины в вершине дефекта, $[L]$ , мм	14		
Деформация трещинообразования при исходных свойствах, $e_{L0}$ , %	17		
Прогнозируемый ресурс по критерию трещинообразования, $\tau_k$ , лет	<b>5,7</b>		
Нормируемые параметры пластичности, Р	$\Psi_k$ , %	$\delta$ , %	KV <sub>-60</sub> , Дж
Исходные параметры пластичности, $P_0$	62	48	53*
Фактические параметры пластичности, $P_D$	41	33	29
Минимальные допустимые, [Р] (по ГОСТ Р 51365)	32	19	20
Прогнозируемый ресурс по критерию охрупчивания, $\tau_p$ , лет	<b>8,2</b>	<b>18</b>	<b>7,5</b>
Минимальный размер трещины, выявляемой при контроле, $L_{min}$ , мм	3		

\* принято на основе экстраполяции сертификатных значений KV<sub>-45</sub>, с учетом скорости их изменения за прошедший период эксплуатации

С учетом полученных результатов расчетов (табл. 3) и минимального значения прогнозируемого ресурса до начала растрескивания – 5,7 лет срок эксплуатации рассматриваемой колонной головки до очередного диагностирования продлен на 4 года при условии ежегодного проведения ВИК и МГПК в зонах конструктивных концентраторов с высокими значениями напряжений, обеспечивающих выявление трещин в металле с минимальным размером от 3 мм.

Аналогичные расчеты были выполнены для каждого элемента ФА, на основе которых определены возможность, сроки и условия продолжения их эксплуатации. Для элементов, у которых ресурс оказался близок к исчерпанию, определены сроки их плановой замены и условия эксплуатации до плановой замены.

В соответствии с поставленной целью исследования по результатам апробации и применения разработок были выявлены и выведены из эксплуатации элементы ФА с трещинами. Тем самым, предупреждены возможности их потенциально-опасных хрупких разрушений, и следовательно, повышена их безотказность. Обоснованы сроки и условия продолжения эксплуатации элементов ФА.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Разработаны новые методы контроля технического состояния и прогнозирования работоспособности ФА газодобывающих скважин в условиях Севера с применением выборочного лабораторного неразрушающего и разрушающего контроля их типовых элементов для определения параметров и критериев исчерпания пластичности и растрескивания металла, анализа закономерностей изменения параметров пластичности металла за период эксплуатации и отработки технологии неразруша-



ющего контроля элементов ФА в условиях эксплуатации с целью предупреждения их хрупкого разрушения.

2. Причиной нарушения работоспособности ФА скважин при их длительной эксплуатации в низкотемпературных климатических условиях Севера в более чем 7% случаев является растрескивание металла, создающее высокий риск хрупких разрушений конструкций.

3. Растрескивание металла ФА происходит из-за исчерпания его пластичности в зонах конструктивных концентраторов напряжений и исходных дефектов при низкотемпературном до  $-60^{\circ}\text{C}$  деформировании при воздействии эксплуатационных нагрузок. Снижение пластичности металла может достигать величины от 10 до 60% за 20 лет эксплуатации. Применяемые ранее методы диагностирования ФА не учитывали снижение пластичности и растрескивание металла, поэтому при эксплуатации ФА возникали нарушения работоспособности.

4. Теоретически обоснованы модель растрескивания металла в сечении элементов ФА с конструктивным концентратором напряжений или дефектом изготовления по критерию разрушающей пластической деформации поверхностного слоя металла при минимальной температуре эксплуатации до  $-60^{\circ}\text{C}$ , модель прогнозирования ресурса на основе анализа закономерностей снижения пластичности и растрескивания металла.

5. Экспериментально обоснованы: методы анализа закономерностей снижения пластичности, определения величины разрушающей пластической деформации и ресурса до начала растрескивания металла элементов ФА; технология неразрушающего контроля элементов ФА в условиях эксплуатации для выявления растрескивания металла.

6. По результатам исследования разработан нормативный документ - стандарт организации ОАО «Техдиагностика», разработанные методические принципы учтены в положениях СТО Газпром. Для автоматизации процедур анализа результатов контроля, испытаний и расчетов ресурса ФА разработано программное обеспечение.

7. В результате применения разработанных методов проконтролированы ФА на 94-х скважинах северных месторождений Западной Сибири, выявлено 65 трещин в корпусах 28-ми элементов ФА, которые были выведены из эксплуатации и, тем самым, предупреждены их возможные хрупкие разрушения. Для остальных элементов ФА определены сроки проведения диагностирования, ремонтов и замены.

8. Экономический эффект от внедрения разработок составил 34,2 млн. руб. за счет предупреждения возможных хрупких разрушений ФА и продолжения эксплуатации элементов ФА, сохранивших работоспособность и имеющих запас надежности.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ.

Монография:

1. Альбом дефектов – растрескиваний металла корпусов задвижек фонтанной арматуры. Опыт диагностирования газодобывающих скважин северных месторождений ОАО «Газпром» / **Ерехинский Б.А.**, Митрофанов А.В., Барышов С.Н., Егоров С.В., Ломанцов В.А.: Научное издание. - М.: ВНИИОЭНГ, 2013. – 50 с.

Статьи в журналах, входящих в «Перечень ...» ВАК Минобрнауки РФ:

2. О результативности корректирующих и предупреждающих действий по снижению техногенного риска на опасных производственных объектах на примере

- применения международных стандартов / **Ерехинский Б.А.**, Минликаев В.З., Полозов В.А., Халиков Р.Р. // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 2. – С. 51 – 56.
3. Эффективность диагностирования и ремонта основных фондов в снижении риска аварий для газодобывающих предприятий (на примере основного технологического оборудования) / **Ерехинский Б.А.**, Филиппов А.Г., Митрофанов А.В., Барышов С.Н. // Наука и техника в газовой промышленности. – 2010. – № 3 (43). – С. 108 – 115.
4. Технические и системные аспекты управления надежностью и безопасностью производственных объектов / **Ерехинский Б.А.**, Григорьев С.Б., Калинин А.В., Полозов В.А., Филиппов А.Г. // Газовая промышленность. – 2011. – № 3. – С. 17 – 21.
5. Магнитная дефектоскопия эксплуатационных колонн скважин – высокоэффективный инструмент оценки технического состояния скважин / **Ерехинский Б.А.**, Абакумов А.А. (мл.), Абакумов А.А., Могильнер Л.Ю., Семин Е.Е., Халиков Р.Р. // Газовая промышленность. – 2011. – № 9. – С. 56 – 59.
6. Результаты испытаний НКТ с эмалированным покрытием на скважинах Комсомольского месторождения / **Ерехинский Б.А.**, Дикамов Д.В., Дубровский Н.Д., Минликаев В.З., Назаров С.И., Шулятиков И.В. // Газовая промышленность. – 2011. – № 10. – С. 72 – 74.
7. Оценка и прогнозирование ресурса и риска сверхпроектной эксплуатации основных фондов газодобывающих предприятий (на примере оборудования объектов сероводородсодержащих месторождений) / **Ерехинский Б.А.**, Филиппов А.Г., Митрофанов А.В., Барышов С.Н. // Газовая промышленность. – 2012. № 1. – С. 40 – 45.
8. Диагностирование оборудования объектов добычи газа, газового конденсата, нефти с использованием критериев безопасности дефектов конструктивных элементов (для оборудования объектов сероводородсодержащих НГКМ) / **Ерехинский Б.А.**, Мокшаев А.Н., Низамов Н.Ф., Митрофанов А.В., Барышов С.Н. // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2012. – № 2. – С. 32 – 39.
9. **Ерехинский Б.А.**, Минликаев В.З. Диагностика технического состояния и остаточного ресурса основных фондов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2012. – № 4. – С. 22 – 25.
10. Стратегия решений о продолжении эксплуатации или замене стареющего оборудования объектов газодобывающих предприятий по результатам диагностирования / **Ерехинский Б.А.**, Минликаев В.З., Мокшаев А.Н., Пономаренко Д.В., Филиппов А.Г., Митрофанов А.В., Барышов С.Н. // Нефтепромысловое дело. – 2012. – № 5. – С. 34 – 44.
11. Филиппов А.Г., **Ерехинский Б.А.** Диагностирование оборудования объектов добычи сероводородсодержащих газа, газового конденсата, нефти ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2013. – № 7. – С. 86-91.
12. Особенности формирования системы диагностического обеспечения безопасной эксплуатации скважин ОАО «Газпром» при освоении северных месторождений / **Ерехинский Б.А.**, Жариков М.Г., Халиков Р.Р. // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2013. – № 12. – С. 56 – 63.

13. Растрескивание металла корпусов задвижек фонтанной арматуры газодобывающих скважин северных месторождений / **Ерехинский Б.А.**, Маслаков С.В., Шустов Н.И., Митрофанов А.В., Барышов С.Н., Заряев М.Ю., Кравцов А.В., Егоров С.В // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2014. – № 2. – С. 31 – 36.

14. **Ерехинский Б.А.** Анализ результатов диагностирования оборудования объектов газодобывающих предприятий северных месторождений (по данным работ за 2012 – 2013 гг.) // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2014. – № 2. – С. 38 – 43.

15. **Ерехинский Б.А.** О диагностике оборудования газодобывающих предприятий северных месторождений // Газовая промышленность. – 2014. - № 3. - С. 80 – 84.

16. Методы контроля растрескивания металла фонтанных арматур скважин северных месторождений / **Ерехинский Б.А.**, Митрофанов А.В., Барышов С.Н., Заряев М.Ю. // Газовая промышленность. – 2014. – № 4. – С 55 – 58.

Статьи в сборниках докладов и материалов конференций:

17. Системный подход к управлению диагностическим обслуживанием объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» / **Ерехинский Б.А.**, Калинин А.В., Минликаев В.З., Павловский Б.Р., Филиппов А.Г. // Материалы XVIII Международной деловой встречи «Диагностика - 2009». – Том 1. – С. 20 – 31.

18. **Ерехинский Б.А.**, Халиков Р.Р. Диагностическое обслуживание технологического оборудования и трубопроводов объектов добычи газа, газового конденсата, нефти в ОАО «Газпром» // Материалы XVIII Международной деловой встречи «Диагностика - 2009». – Том 2. – С. 4 – 14.

19. Опыт проведения работ по техническому освидетельствованию и экспертизе промышленной безопасности устройств сужающих быстросменных, эксплуатируемых на объектах ОАО «Газпром» / **Ерехинский Б.А.**, Андреасян И.Г., Буликин Д.В., Рамзин А.Б., Халиков Р.Р. // Материалы Материалы XVIII Международной деловой встречи «Диагностика - 2009». – Том 2. – С. 41 – 50.

20. Оценка результативности действий по снижению техногенного риска на опасных производственных объектах / **Ерехинский Б.А.**, Полозов В.А., Сызранцев В.Н. // Материалы Межрегиональной научно-технической конференции «Подготовка кадров и современные технологии для ТЭК Западной Сибири» (11 – 12 февраля 2010 г., Тюмень). – Изд-во: ТюмГНГУ. – 2010. – В 2 ч. - Ч. 2. – С. 175 – 185.

21. База диагностических данных по фонтанной арматуре, эксплуатируемой на АГКМ / **Ерехинский Б.А.**, Коренякин А.Ф., Полозов В.А. // Материалы 8-й Международной научно-технической конференции «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородосодержащих сред». – 23-26 ноября 2010 г., (г. Оренбург, Самородово). – С. 107 – 112.

22. Анализ организации диагностирования оборудования объектов добычи сероводородосодержащих газа, газового конденсата, нефти ОАО «Газпром» / Филиппов А.Г., **Ерехинский Б.А.** // Материалы 9-й Международной научно-технической конференции «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородосодержащих сред». – 13-16 ноября 2012 г., (г. Оренбург, Самородово). – С. 6 – 15.

23. **Ерехинский Б.А.** Основные итоги диагностических работ, выполненных в 2010 году и предложения по дальнейшему совершенствованию системы диагностического обслуживания объектов добычи газа ОАО «Газпром» // Материалы Девятна-



дцатой Международной деловой встречи «Диагностика - 2011». – Москва, 2013. – Том 2. – С. 4 – 14.

24. Реализация автоматизированного рабочего места – диагностическое обследование объектов добычи газа и экспертно-аналитической системы оценки технического состояния скважин в ИСТС «Инфотех» / **Ерехинский Б.А.**, Халиков Р.Р., Русова Ю.В. // Материалы Девятнадцатой Международной деловой встречи «Диагностика - 2011». – Москва, 2013. – Том 2. – С. 136 – 141.

Подписано к печати «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Заказ № \_\_\_\_\_

Тираж 100 экз.

1 уч.-изд. л. ф-т 60×84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» по адресу:  
142717, Московская обл., Ленинский район, пос. Развилка