

*На правах рукописи*

**КРАСНИКОВ АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ  
УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДА ПОСЛЕ РЕМОНТА**

25.00.19 – Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень, 2005г.

**Работа выполнена в Тюменском государственном нефтегазовом университете**

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки РФ  
**Иванов Вадим Андреевич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор,  
**Кретов Валерий Андреевич**

кандидат технических наук,  
**Большаков Юрий Николаевич**

**Ведущая организация:** ООО «МегаГрупп»

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2005 года в \_\_\_\_ часов.  
на заседании диссертационного совета Д 212.273.02 при Тюменском государственном нефтегазовом университете по адресу:  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Тюменского государственного нефтегазового университета

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2005г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ С. И. Челомбитко

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное старение трубопроводных систем диктует необходимость их реконструкции. Практически единственным кардинальным средством, обеспечивающим решение задачи поддержания высоконадежного и эффективного транспорта нефти и газа, становится переход на новую ресурсосберегающую систему обслуживания «по состоянию». Это обуславливает необходимость разработки теоретических методов и практических рекомендаций по оценке технического состояния длительно эксплуатируемых трубопроводов с дефектами. С учетом интенсивного развития внутритрубной диагностики корректная количественная оценка напряженно-деформированного состояния металла стенки трубы и технического состояния линейного участка в целом дает возможность реализовать адекватные программы выборочного ремонта трубопроводов, что, в свою очередь, позволит управлять ресурсом конструкции. При этом следует отметить, что по сравнению с металлом изоляция трубопроводов стареет интенсивнее. Это определяет необходимость многократного увеличения объемов выборочного ремонта.

Таким образом, для обеспечения безопасности трубопроводов требуется анализировать негативные факторы длительной эксплуатации, развивать методы оценки эксплуатационной надежности, а также совершенствовать технологии ремонта на основе современных экспериментальных исследований и математических моделей. Решение этих задач позволит: обеспечить безопасность трубопроводов в течение всего срока эксплуатации; определить наиболее эффективные пути обеспечения их эксплуатационной надежности, не требуя в тоже время излишних ремонтных работ. Учитывая значительную протяженность трубопроводных систем, исследования в данном направлении крайне актуальны.

На основании изложенного была сформулирована **цель работы** — оценка работоспособности трубопровода после выборочного ремонта локальных участков с учетом предыстории эксплуатации и ремонта в специфических условиях Западной Сибири.

Для реализации цели поставлены следующие **основные задачи**:

- формирование концепции безопасной эксплуатации трубопроводных систем после локальных ремонтов линейных участков;
- разработать методики количественной оценки ремонтных напряжений с учетом диагностической информации, наличия дефектов в стенке трубы при реализации восстановительных мероприятий и взаимодействия с грунтами различных типов;
- разработать алгоритм расчета общего уровня напряженно-деформированного состояния трубопровода после ремонта его участков с учетом сложных условий эксплуатации в мерзлых и водонасыщенных грунтах;
- построить математическую модель для определения вероятности безотказной работы (работоспособности) трубопровода после локальных ремонтов с учетом неопределенности прогнозной информации.

В процессе решения поставленных задач получены результаты, представляющие **научную новизну**:

- разработаны основы расчетной методики, позволяющей адекватно определять напряженно-деформированное состояние ремонтируемых участков трубопроводов с учетом особенностей технологий восстановительных работ и специфических региональных условий;
- созданы алгоритмы расчета общего напряженного состояния трубопровода при сложном нагружении с использованием принципа суперпозиции упругих напряжений, учитывающие начальные напряжения;
- разработана математическая модель оценки работоспособности трубопровода с локально восстановленными участками при неопределенности прогнозной информации.

**Теоретическими основами** исследования являются положения теории надежности, теории принятия решений, теории вероятности, механики разрушения, численного моделирования процессов деформирования и разрушения твердых тел, а также прикладные исследования по проектиро-

ванию, строительству, эксплуатации и ремонту систем трубопроводного транспорта.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что полученные результаты дают возможность нефтегазотранспортным предприятиям адекватно планировать мероприятия по техническому обслуживанию систем трубопроводного транспорта и позволяют разрабатывать обоснованные ремонтные программы с учетом развития современных технологий диагностики и восстановления.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты комплексного анализа основных факторов и причин снижения работоспособности трубопроводов, особенностей их нагружения в процессе ремонта и послеремонтной эксплуатации, механизмов разрушения конструкции, позволяющие сформировать концепцию безопасной эксплуатации нефтегазопроводов после выборочного ремонта.

2. Результаты исследований напряжено-деформированного состояния труб с дефектами различных типов в процессе реализации восстановительных мероприятий с учетом специфических условий Западной Сибири.

3. Расчетная методика определения работоспособности магистрального трубопровода после локального ремонта его участков с учетом прогнозных оценок послеремонтной эксплуатации.

**Апробация работы, публикации.** Основные положения диссертационной работы докладывались на научно – техническом семинаре ТюмГНГУ (Тюмень, 2003г.), на расширенном заседании кафедры «Сооружение и ремонт нефтегазовых объектов» (Тюмень, 2004 г.), на технических совещаниях в Ноябрьском управлении магистральных трубопроводов (Ноябрьск, 2002, 2003, 2004 гг). По результатам работы опубликовано 4 статьи.

**Объем работы.** Работа состоит из введения, четырех разделов, выводов, общим объемом 162 страницы машинописного текста, содержит 35 рисунков и 19 таблиц, список использованной литературы из 114 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы, отражена научная новизна, формализованы основные задачи исследований по проблеме эксплуатационной надежности длительно эксплуатируемых трубопроводных магистралей с локально отремонтированными участками.

**В первом разделе** на основе анализа возрастной структуры магистральных трубопроводов и динамики их восстановления, обзора исследований и научно-технических разработок по проблемам оценки несущей способности труб с дефектами сделан вывод о необходимости развития существующих методов оценки работоспособности конструкций, в том числе и после локального ремонта повреждений труб.

Проведенный анализ возрастной структуры и динамики восстановления нефтегазопроводов выявил необходимость реализации масштабных восстановительных мероприятий на локальных поврежденных участках.

Однако решение этой задачи в условиях ограниченности финансовых и материальных ресурсов может быть достигнуто лишь за счет перехода на выборочные методы ремонта по результатам технической диагностики. Это требует создания программ выборочного ремонта, основанных на математических моделях по расчету напряжений и деформаций в стенке трубы с дефектом, а также разработки методов оценки работоспособности трубопроводов после локальных ремонтов их отдельных участков для разработки мероприятий по текущему техническому обслуживанию магистралей.

В настоящее время согласно действующим нормативным документам работоспособность магистральных трубопроводов оценивается по предельному состоянию. В качестве основной расчетной схемы принята тонкостенная оболочка, нагруженная внутренним давлением. В нормативных документах не учитываются в явном виде дефекты и связанная с ними концентрация напряжений.

В связи с этим разработано достаточно много рекомендаций по определению работоспособности труб с различного вида повреждениями. В этих рекомендациях учтено влияние на работоспособность труб геометри-

ческих характеристик повреждений, физико-механических свойств материала, категорий участка и величины внутреннего давления. В результате сопоставления предельно допустимых размеров дефектов, определенных в соответствии с методическими рекомендациями по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами ВРД 39-1.10-004-99 («ОАО Газпром»), методикой определения опасности повреждений стенки труб магистральных нефтепроводов по данным обследования внутритрубными дефектоскопами «АК «Транснефть» и стандартом ASME B31G было определено, что оценки по B31G излишне консервативны для узких дефектов. А применительно к широким непротяженным зонам коррозионных повреждений оценки по B31G могут оказаться неоправданно оптимистичными.

В основу используемых в настоящее время методик оценки опасности локальных трещинообразных дефектов положен полуэмпирический подход, при котором некоторые параметры ( $M$ ,  $\sigma$  или  $\sigma_{cp}$ ) должны определяться косвенными методами на основе принятого механизма разрушения и результатов испытаний труб с дефектами на разрушение.

Анализ приведенных выше и других научно-технических разработок по проблеме оценки несущей способности трубопроводов с дефектами показал, что в настоящее время требуется развитие существующих методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопровода с учетом предыстории его эксплуатации, наличия повреждений различных типов. Также необходимо создание методик по оценке ремонтных и остаточных послеремонтных напряжений для определения работоспособности отремонтированной конструкции. При этом сделан вывод о том, что точное определение работоспособности участка трубопровода после выборочного ремонта является трудноразрешимой задачей, поскольку все характеристики взаимодействия с грунтом, нагрузок и ряд других исходных параметров являются случайными. В этом случае целесообразно использование вероятностных моделей при неопределенности исходной информации.

**Во втором разделе** на основе классификации дефектов с позиций ремонтпригодности, анализа современных технологий восстановитель-

ных работ и количественной оценки факторов, влияющих на уровень допустимых напряжений в металле стенки трубы при ремонте, предложена математическая модель расчета НДС трубопровода при реализации различных технологий ремонтных работ.

На основе анализа состояния магистральных трубопроводов сделан вывод о том, что техническое состояние трубопроводов различных поколений неоднозначно по различным параметрам и требует индивидуальной оценки с учетом количественной информации о дефектах трубы, которые подразделяются на дефекты геометрии, дефекты стенки, сварного шва, комбинированные дефекты, недопустимые конструктивные элементы.

Учитывая многообразие дефектов, для решения данной задачи повреждения классифицированы с позиций ремонтпригодности. При этом учтено, что не все дефекты и конструктивные концентраторы могут привести к разрушению трубы, а лишь опасные, соотношение которых к общему количеству выявленных повреждений представлено в таблице 1.

Таблица 1

Статистика опасных дефектов

Дефекты	Число опасных дефектов, %
Коррозия (потери металла)	42,8-59,2
Расслоения	24,6-47,1
Расслоения с выходом на поверхность	1,5-2,6
Расслоения в околошовной зоне	6,2-7,7
Риски	1,3-7,0

Кроме того, в зависимости от условий эксплуатации одни и те же дефекты могут быть опасными и неопасными. С этой точки зрения, существующие методики оценки дефектов являются консервативными и рекомендуют завышенные объемы ремонтных работ. Так, например, результаты гидроиспытаний показали, что расслоения и включения, не выходящие на поверхность трубы и не примыкающие к другим типам дефектов, не являются опасными. Длина таких дефектов не ограничивает прочность трубы. Концентрация напряжений на гофрах, вмятинах и рисках, даже примыкающих к сварным швам, лишь ускоряет разрушение трубы, но не является опасным. Опасными являются коррозионные дефекты, плотность которых увеличена в областях ниже горизонтального диаметра трубы из-

за сползания пленки при засыпке и уплотнении грунта, примыкающие к сварному шву, геометрическое усиление которого способствует неплотному прилеганию изоляционного покрытия. На таких дефектах от сварных соединений часто распространяются трещины. После вскрытия и обследования дефектного участка трубы с последующей его засыпкой опасным становится сочетание гофра и кольцевого сварного шва, из-за неконтролируемых дополнительных осевых напряжений при усадке.

С учетом изложенного, а также особенностей распределения напряжений в области дефектов, последние могут быть типизированы по трем грунтам: классические (гладкие), трещинообразные и V-образные концентраторы.

Для классических дефектов мерой концентрации является теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  :

$$K_e \cdot K_s = \alpha_\sigma^2 \text{ или } S_{yn} \cdot e_{yn} = \sigma_y \cdot \varepsilon_y$$

$$K_e = e_{yn} / e_{нетто} ; K_s = S_{yn} / \sigma_{нетто} ; \alpha_\sigma = \delta_{max} / \delta_{нетто}$$

где  $\alpha_\sigma$  - теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$K_e$  и  $K_s$  - упругопластические коэффициенты концентрации деформаций и напряжений;

$e_{yn}$  и  $S_{yn}$  - максимальные упругопластические деформации и напряжения в вершине дефекта (концентратора);

$\sigma_y$  и  $\varepsilon_y$  - максимальные упругие напряжения и деформации в вершине дефекта.

Для трещинообразных дефектов основными характеристиками концентрации напряжений являются:

$$K_{I\sigma} = \sigma_{брутто} \sqrt{d} \cdot Y(\eta) - \text{коэффициент интенсивности напряжений,}$$

$$\left. \begin{aligned} K_{Ie} &= (K_I / \sigma_I \cdot I)^{Pe}, \text{ при } \sigma_{нетто} \leq \sigma_T \cdot I \\ K_{Ie} &= (K_I / \sigma_I \cdot I)^{Pe} (\sigma_{нетто} / \sigma_T \cdot I), \text{ при } \sigma_{нетто} > \sigma_T \cdot I ; \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Коэффициент} \\ \text{интенсивности} \\ \text{деформаций} \end{array}$$

где  $Y(\eta)$  - функция, учитывающая геометрические параметры дефекта;

$I$  - коэффициент двухосного напряженного состояния;

$P_e$  - показатель механических характеристик металла.

Для V-образных концентраторов напряжений, имеющих двугранный угол раскрытия  $\beta$  (угловые швы ремонтных заплаток и муфт, врезки, цапапины, ответвления, геометрические усиления сварного шва) поле тензора напряжений описывается зависимостью:

$$\sigma_{ij} = \sum_n \frac{K_{n\beta}}{\tau^{\lambda_n}} \cdot \Phi_{nij}(\beta, \varphi),$$

$\tau, \varphi$  - полярные координаты (от точки 0);  $K_{n\beta}$  - коэффициенты интенсивности напряжений;  $\lambda_n$  - параметры поля напряжений;  $\Phi_{nij}(\beta, \varphi)$  - нормированные функции от полярной координаты  $\varphi$ .

Представленная типизация дает возможность классифицировать дефекты и концентраторы в соответствии с особенностями распределения напряжений в их зоне, что, в свою очередь, позволит принимать адекватные решения по консервации или ликвидации повреждений.

Показания к ликвидации (ремонту) обуславливаются двумя аспектами. С одной стороны, надзорные органы разрешают разрабатывать и применять технологии ремонта в зависимости от конкретных условий и задач эксплуатации. С другой стороны, ремонтные мероприятия обеспечиваются аналитической поддержкой в виде расчетных методик и компьютерных программ, позволяющих оценить напряжения в ослабленных сечениях трубы. Обычно применительно к ремонту допустимый уровень напряжений составляет 45% от предела текучести трубной стали. На его величину влияют следующие факторы: категоричность линейного участка (коэффициент снижения допустимого трения на категорию  $K_m$ ); старение (деградация) металла стенки трубы при длительной эксплуатации, приводящее к снижению пластичности и к повышению прочности (хрупкости) стали (коэффициент старения  $K_e$ ); концентрация кольцевых ( $\sigma_\theta$ ) и продольных ( $\sigma_z$ ) напряжений в области дефекта, определяемая с помощью конечноэлементного анализа; перегрузки (при испытаниях), обуславли-

вающие снижение допустимых напряжений при ремонте в  $K_n = 1,1 \div 1,25$  раз.

С учетом изложенного допустимые ремонтные напряжения составляют:

$$[\sigma_K^P] = \frac{K_m \cdot \alpha_\theta \cdot \delta_g}{\delta_H \cdot K_n \cdot K_e} \cdot \sigma_T - \text{для кольцевых напряжений};$$

$$[\sigma_{np}^P] = \frac{K_m \cdot \alpha_z \cdot \delta_g}{\delta_H \cdot K_n \cdot K_e} \cdot \sigma_T - \text{для продольных напряжений}.$$

Напряжения, возникающие в стенке трубопровода при ремонтно-восстановительных мероприятиях не должны превышать значения  $[\sigma_K^P]$  и  $[\sigma_{np}^P]$ . Для оценки НДС трубопровода при ремонте рассмотрены технологии с подъемом и без подъема трубы.

При анализе возможности применения традиционных методов расчета напряжений в поднятом состоянии для ремонта трубопровода был сделан вывод, что не учитываемая в рамках этих методов продольная сила от воздействия подземных участков вызывает значительные напряжения. Данное обстоятельство, а также необходимость учета остаточных напряжений и дефектов стенки трубы, определяют целесообразность применения численных методов при решении задачи. Для анализа НДС поднятого трубопровода с дефектами, концентрирующими вокруг себя напряжения, используется метод конечных элементов (МКЭ), формулируемый в форме метода перемещений. По данной методике можно учесть и остаточные напряжения в стенке трубопровода, которые возникают после каждой технологической операции и меняются при эксплуатации. После определения нагрузок и воздействий на поднятом трубопроводе (рис. 1) с помощью стандартной программы численного счета, реализующей МКЭ, были получены следующие результаты:

- с увеличением числа трубоукладчиков развиваемое усилие на крюке уменьшается, кроме того, возможно увеличение длины приподнятой части трубопровода;

- влияние продольной силы на НДС ремонтируемого трубопровода неодинаково по его длине: есть зоны, где влияние этой силы незначительно; есть зоны, где влияние продольной силы способствует некоторому снижению напряжений. С увеличением продольной силы напряжения начинают расти, значительно превышая уровень, который имел бы место при отсутствии продольной силы;
- ремонт трубопроводов с подъемом и без остановки перекачки возможен на магистральных трубопроводах всех диаметров, а не ограничивается восстановлением труб диаметром не более 720 мм (табл. 2);
- продольные перемещения подземных (прилегающих к поднятому для ремонта) участков значительно увеличиваются при подъеме трубы на высоту более 0,5 м.

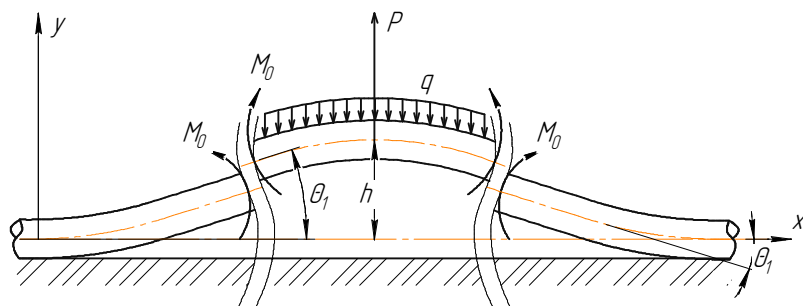


Рис. 1 Схема ремонта с подъемом трубопровода

Таблица 2

Технологические параметры ремонта трубопроводов  
больших диаметров

Трубопровод	Длина поднимаемого участка L, м	Расстояние между трубоукладчиками l, м	Усиление на крюках трубоукладчиков R, т	Высота подъема крайних трубоукладчиков, $h_1=h_4$	Высота подъема средних трубоукладчиков, $h_2=h_3$	Наибольшее ремонтное напряжение $\sigma_{max}$ МПа
1220 (г/п)	150	20	15,3	60	100	121
1020 (н/п)	150	25	35,1	60	100	143
1220 (н/п)	150	29	44,8	60	100	167

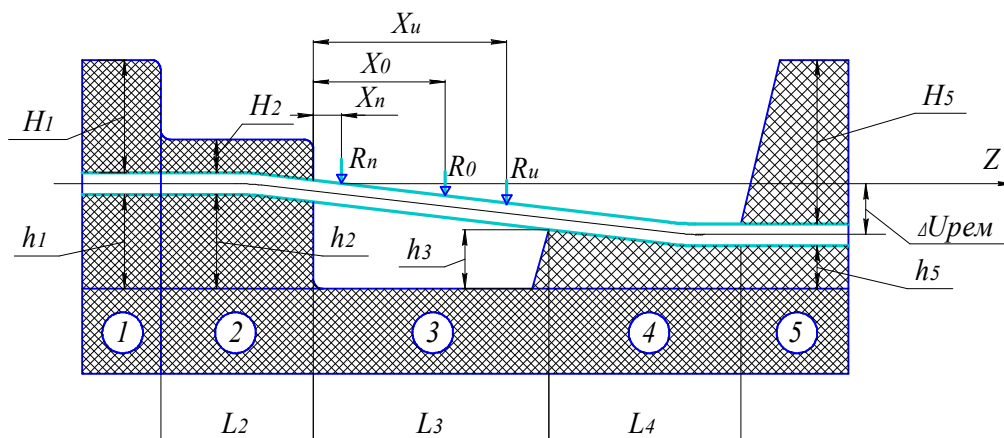


Рис.2 Схема ремонта трубопровода без подъема  
 $R$ -ремонтные машины,  $R_n$ -подкапывающая,  $R_o$ -очистная,  $R_u$ -изолирующая,  
 $\Delta U_{рем}$ -осадка трубы в результате ремонта

Для расчета НДС трубопровода, ремонтируемого без подъема (рис. 2), также был применен МКЭ, с помощью которого получено (рис. 3):

- наиболее напряженная область находится на границе перехода от подземного участка к ремонтной траншее. После завершения ремонта ремонтные напряжения исчезают вследствие перехода трубы в положение ниже исходного;

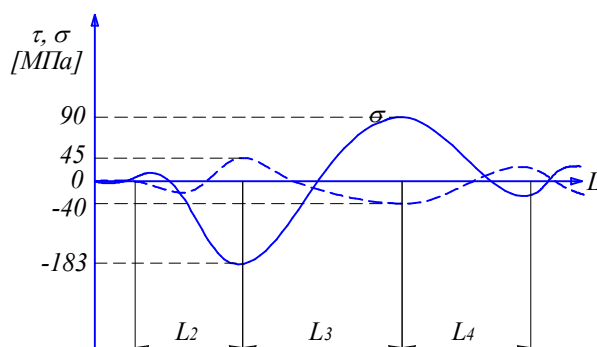


Рис.3 Напряженно – деформированное состояние трубопровода, ремонтируемого без подъема

- на верхней образующей появляется сначала максимальные растягивающие, а затем максимальные сжимающие напряжения, способствующие интенсивности дефектов сварных стыков. На нижней образующей трубы появляются примерно вдвое меньшие напряжения в обратной последовательности – сначала сжатие, а затем растяжение, способствующие гофрообразованию;

- касательные напряжения в десятки раз меньше нормальных напряжений;
- плотность грунтовой подбивки (подсыпки) способствует уменьшению просадки трубы снижая, тем самым, ремонтные напряжения.

**В третьем разделе** разработана математическая модель оценки работоспособности трубопровода после выборочного ремонта. При этом количественно проанализировано влияние на отремонтированные участки грунта обратной засыпки при эксплуатации трубопровода в условиях болот и взаимодействие отремонтированных участков с мерзлыми грунтами.

Как было отмечено выше, при выборочном ремонте магистральных трубопроводов отремонтированный участок получает вертикальное смещение по сравнению с исходным положением, что обусловлено невозможностью добиться идентичного прежнему состоянию грунта под трубой. Это смещение вызывает остаточные (осадочные), напряжения, которые, при прочих равных условиях, растут при:

- увеличении диаметра, глубины залегания, глубины подкопа;
- уменьшении толщины стенки трубы, уплотнения грунта при подсыпке, коэффициента постели грунта.

С увеличением длины ремонтируемого участка послеремонтная просадка трубопровода и остаточные напряжения имеют тенденцию к стабилизации, которая наступает при  $L = 50$  м. Это связано с тем, что с увеличением длины отремонтированного участка концентрации напряжений в краевых зонах перестают влиять друг на друга. В окрестности  $L = 20$  м остаточные напряжения имеют наибольшие значения, что объясняется взаимным влиянием и наложением концентраций напряжений в краевых зонах. При уменьшении длины  $L$  остаточные напряжения и деформации стремятся к нулю.

Несмотря на существование различных способов снижения осадочных напряжений, дополнительные напряжения, остающиеся после выполнения ремонтных работ, невозможно устранить полностью. В зонах этих напряжений интенсифицируются процессы коррозии, роста микродефектов, изменения физико-механических характеристик стали. Даже если

предположить, что неремонтируемые (не были обнаружены дефекты при диагностическом обследовании) и отремонтированные участки соответствуют проектному состоянию, то все же граничные зоны нельзя считать полностью благополучными. Это предопределяет целесообразность анализа надежностных параметров магистрального трубопровода после выборочного ремонта его отдельных участков с учетом наличия зон повышенных послеремонтных напряжений. Следует отметить, что алгоритм расчета параметров надежности, приведенный ниже, может быть использован и для случая, когда не отремонтированные участки не соответствуют проектному состоянию.

В предположении, что из  $K(0)$  линейных участков трубопровода  $K(t)$  участков соответствует предельному состоянию к моменту  $t$ , предложена зависимость для оценки вероятности безотказной работы конструкции:

$$P(T \geq t) = \frac{K(t)}{K(t) + [K(t-1) - K(t)]} \rightarrow v(t), \quad (1)$$

где  $[K(t-1) - K(t)]$  - количество отремонтированных участков.

Поскольку трубопровод средней протяженности состоит из  $10^6$ - $10^7$  секций, то в соответствии со статистическим определением относительная частота отказов будет асимптотически приближаться к значению функции живучести  $v(t)$ . При этом остаточный ресурс определяется следующим образом:

$$f(t) = 1 - v(t). \quad (2)$$

Дифференцируя  $v(t)$  по аргументу  $t$  рассчитывается плотность распределения времени безотказной работы  $\rho(t)$ :

$$\rho(t) = \frac{dv(t)}{d(t)} = \frac{d[K(t-1) - K(t)]}{K(0)dt}. \quad (3)$$

Параметр интенсивности отказов в этом случае:

$$\lambda(t) = \frac{\rho(t)}{v(t)} = \frac{1}{K(t)} \cdot \frac{d[K(t-1) - K(t)]}{dt}. \quad (4)$$

С учетом приведенных соотношений априорная вероятность отказа  $\rho$  в интервале от  $(t - 1)$  до  $t$  равна вероятности того, что за период времени от 0 до  $(t - 1)$  не произойдет отказа, умноженной на условную вероятность  $P_c(t)$  отказа в интервале от  $(t - 1)$  до  $t$ :

$$P_c(t) = \frac{P(t-1 \leq T \leq t)}{P(T \geq t-1)} = \frac{K(t-1) - K(t)}{K(t-1)}. \quad (5)$$

Если в качестве параметра технического состояния трубопровода рассматривать предельное разрушающее давление, то состояние линейных участков описывается плотностью распределения вероятности расчетного разрушающего давления с учетом остаточных (в том числе осадочных) напряжений. Используя статистические данные и приведенные выше зависимости, рассчитывается вероятность отказа трубопровода после выборочного ремонта. При этом предусмотрена возможность реализации различных стратегий выборочного ремонта, приводящих к различным уровням отказов:

- ремонт по “отказу”;
- ремонт секций с “недопустимыми” дефектами;
- ремонт секций с дефектами.

В зависимости от выбранной стратегии выборочного ремонта средняя интенсивность отказов трубопровода составляет  $0,6 \pm 0,01$  отказов / (год  $\times$  1000 км).

Для оценки работоспособности трубопровода после выборочного ремонта в условиях болот необходимо учитывать специфику взаимодействия конструкции с грунтом. Эта специфика заключается в возможности значительных осадок, перемещений в продольном направлении, а также в неопределенности взаимодействия трубопровода с основанием при неориентированном перемещении трубы. Рассмотрены три варианта перемещений забалластированного отремонтированного участка относительно проектного положения: поперечное вверх, поперечное вниз и продольное.

Поперечное перемещение отремонтированного участка вверх характеризуется разрушением засыпки при перемещении забалластированной трубы:

$$F_{np}^e = F_1^e + F_2^e + F_3^e - \text{предельное сопротивление засыпки};$$

$F_1^e$  – сила давления на трубу от массы грунта в призме выпора;  $F_2^e$  – сила сопротивления окружающей засыпки перемещению призмы выпора;  $F_3^e$  – сила трения засыпки по боковой поверхности пригрузов;

$$F_1^e = \gamma_{uh} [hDL + NL(\bar{h}_n \bar{B}_n - hD)];$$

$$F_2^e = 2[h_0L + NL(\bar{h}_n - h_0)] \cdot \tau^{-1};$$

$$F_3^e = 2K_{mp} NF_{прин} (0,5\xi\gamma_{zp} h_c \operatorname{tg}\varphi_{zp} + C_{zp}),$$

где  $h, \bar{h}_n, h_0, h_c$  - параметры заглубления трубы, диаметром  $D_l$ , и утяжелителей;  $N, \ell, B, F_{прин}$  - количество утяжелителей, их длина, ширина, площадь боковой поверхности.

Поперечное перемещение отремонтированного участка вниз происходит при достижении предельного сопротивления основания перемещения трубы:

$$P_{np}^N = 0,71ND\gamma_{zp} + N_g \gamma_{zp}' h_m + N_c C_{zp},$$

где  $\gamma_{zp}, N_g, N_c$  - коэффициенты несущей способности;  $h_m$  - параметр заглубления трубы.

Перемещение трубы при давлении на основание  $\rho^H = R$ :

$$S = S_R (P_{np}^H - R) \cdot P^H / (P_{np}^H - P^H) \cdot R,$$

$$P^H = SRP_{np}^H / [S_R (P_{np}^H - R) + SR].$$

Перемещение отремонтированного участка в продольном направлении имеет место при достижении предельного сопротивления основания и пригрузов удлинению (укорочению) трубы:

$$t_{np}^{\bar{a}al} = t_{np}^H + t_{np}^e N;$$

$$t_{np}^H = g_{mp}^{\bar{a}al} \operatorname{tg}\varphi^{u-2} / \pi R + C_0^{u-\bar{b}};$$

$$t_{np}^e = g_{ym} \operatorname{tg}\varphi^{u-\bar{b}} / \pi R \ell + C_0^{u-\bar{b}},$$

где  $g_{np}^{\bar{a}al}$  - погонный вес трубы с балластировкой в обводненной среде;  $G_{ym}$  - масса утяжелителя в обводненной среде;  $\operatorname{tg}^{u-2}, C_0^{u-\bar{b}}$  и  $\operatorname{tg}\varphi^{u-\bar{b}}, C_0^{u-\bar{b}}$  - харак-

характеристики контактного трения полимерной изоляции по торфу и по бетонной поверхности соответственно.

Приведенные выше зависимости позволяют количественно оценить перемещение участков трубопровода в условиях болот, и тем самым, адекватно оценить НДС металла стенки трубы и работоспособность конструкции.

Для оценки работоспособного выборочно восстановленного трубопровода в мерзлых грунтах рассмотрены различные случаи, характеризующие положение отремонтированного участка при изменении несущей способности грунтов (рис. 4).

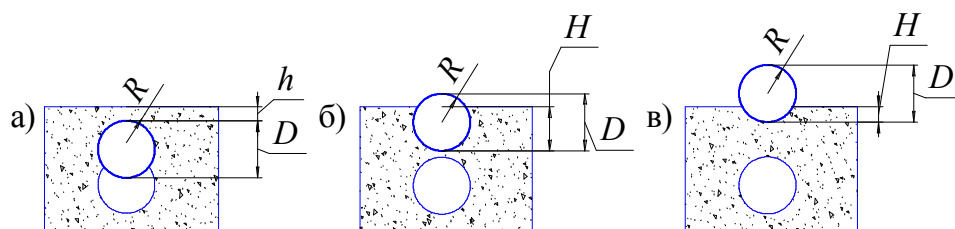


Рис. 4 Смещение трубы вверх после выборочного ремонта  
 а) Труба полностью в грунте; б) труба частично заглублена  $D > H > 0,5D$ ;  
 в) труба частично заглублена  $0,5D > H > 0$

а) Реакция грунта сверху:  $q_{zp}^+ = -(h + 0,1073D) \cdot D \cdot \gamma_{zp}$ .

Реакция грунта снизу:  $q_{zp}^- = -C(U - \Delta U) \cdot D$ ,

$$\Delta U = (q_{св} + q_{zp}^+) / CD,$$

где  $q_{св}$  - вес трубы диаметром  $D$  с изоляцией;

$\Delta U$  - параметр вертикального смещения  $U$ , при котором исчезает реакция грунта снизу.

б) При  $U \leq \Delta U$ :  $q_{zp} = q_{zp}^- + q_{zp}^+$ ,

$$q_{zp}^+ = -f_1(\eta) \cdot D_{сум}^2 \cdot \gamma_{zp},$$

$$q_{zp}^- = -C(U - \Delta U) \cdot D_{сум},$$

$$\Delta U = -(q_{св} + q_{zp}^+) / C \cdot D_{сум}.$$

При  $U > \Delta U$ :  $q_{zp} = q_{zp}^+$ ,

$$f_1(\eta) = \frac{1}{4} \left[ \eta \cdot (2 - \sqrt{1 - \eta^2}) - \arcsin \eta \right]; \quad \eta = \frac{H}{R} - 1.$$

в) При  $U \leq \Delta U$ :  $q_{cp} = q_{cp}^-$ ,

$$q_{cp}^- = -C(U - \Delta U) \cdot D \cdot \sqrt{1 - \eta^2},$$

$$\Delta U = -\frac{q_{св}}{C \cdot D \cdot \sqrt{1 - \eta^2}}.$$

При  $U > \Delta U$ :  $q_{cp} = 0$ .

Значения напряжений, определяемые по заданным смещениям  $U$  трубы в грунтах с известными физико-механическими свойствами, позволяют судить о работоспособности исследуемого участка по выбранному критерию (или по разрушающему давлению).

**В четвертом разделе** разработаны методики, позволяющие практически реализовать полученные результаты. В предположении, что влияние как случайных, так и износных факторов на длительность эксплуатации трубопровода удовлетворительно описывается распределением Пуассона, дан алгоритм определения вероятности безотказной работы выборочно восстановленного трубопровода. Поскольку данная вероятность зависит от выбранной стратегии ремонтных мероприятий, то ее количественная оценка позволила провести технико-экономический анализ различных стратегий выборочного ремонта для выбора наиболее рационального по надежности-стоимости варианта. В работе использована модель оценки работоспособности трубопровода после выборочного ремонта, остаточный ресурс магистралей на момент времени  $t$  составляет:

$$f_T(t) = K(0) \cdot v_T(t) + \int_0^t Z'(u) \cdot v_T(t-u) du. \quad (6)$$

Первое слагаемое в зависимости (6) описывает состояние конструкции до проведения выборочного ремонта. Второе слагаемое – число участков, не достигших предельного состояния ко времени  $t$  из отремонтированных на момент времени  $U$ .

Выражение (6) является типовым интегральным уравнением, решаемым с помощью преобразований Лапласа следующим образом:

$$F(S) = \alpha f_T(t) = K(0) \cdot P(S) + \frac{R'(S) \cdot P(S)}{s}; \quad (7)$$

$$P(S) = \alpha v_T(t); \quad R(S) = \alpha z(t); \quad R'(S) = \alpha z'(t).$$

Показано, что если известно количество отремонтированных участков магистрального трубопровода и задана величина остаточного ресурса  $f_T(t)$ , то с помощью (7) вероятность безотказной работы конструкции имеет вид:

$$P_{\text{без}} = \frac{F(S)}{K(0) + R(S)}. \quad (8)$$

Исходя из (8):

$$v_T(t) = \alpha^{-1} \cdot F(S) / [K(0) + R(S)]. \quad (9)$$

Зависимость (9) означает, что, задаваясь графиком работы при выборочном ремонте, можно варьировать работоспособность всего трубопровода. График выборочного ремонта базируется на понятиях “безопасных” и “недопустимых” дефектов. Дефекты, для которых коэффициент запаса по расчетному разрушающему давлению относительно нормативного рабочего давления не ниже проектной величины, считаются безопасными (для газопроводов с  $P_{\text{раб}} = 7,5 \text{ МПа}$  безопасными являются дефекты с  $P_{\text{разр}} \leq 13,25 \text{ МПа}$ ). Дефекты, для которых расчетное разрушающее давление ниже нормативного давления гидроиспытаний, являются недопустимыми (для газопроводов недопустимыми являются дефекты с  $P_{\text{разр}} < 10,75 \text{ МПа}$ ). Исходя из изложенного, график выборочного ремонта может составляться по разному. Первый вариант графика заключается в ремонтах “недопустимых” дефектов в предположении, что гидравлические переиспытания не выявят разрывов. Второй вариант выборочного ремонта заключается в ремонтах как “недопустимых” дефектов, так и дефектов, снижающих прочность трубы, и реализуется для вывода показателей прочности трубопровода на проектный уровень. В предположении Пуассоновского характера распределение отказов конструкции, когда:

$$f_T(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ K(0) & \text{при } t \geq 0 \end{cases}; \quad v_T(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ e^{-\kappa_0 t} & \text{при } t \geq 0 \end{cases}$$

получено выражение для расчета соответствующей вероятности безотказной работы  $P_{\text{без}} = \nu'(t)/K(0) = \lambda_0$ , являющейся экспоненциальной функцией, и показано, что интенсивность ремонта  $z'(t)$  для различных графиков при  $t \rightarrow \infty$  стремится к величине, обратной среднему сроку службы.

Полученные результаты легли в основу методики технико-экономического сравнения альтернативных стратегий восстановительных мероприятий, стоимость  $C_j$  которых заменяется на полные ожидаемые затраты  $C$ :

$$C = C_j + P_0 C_0,$$

где  $C_0$  – затраты, вызванные отказом после выборочного ремонта;  $P_0 = 1 - P_{\text{без}}$  - вероятность отказа.

Решение задачи оценки полных ожидаемых затрат  $C$  осуществляется на основе теории принятия решений, в соответствии с которой для рассматриваемых абсолютных предельных состояний трубопровода (отказов) наилучшая стратегия ремонтно-восстановительных работ оценивается по максимальному среднему значению полезности  $E[C(y)/T]$ :

$$E[C(y)/T] = U^0 - C_j - C_0 P_0, \quad (10)$$

где,  $U^0$  - доход, получаемый от эксплуатации полностью исправленного трубопровода.

Для оценки функции  $E[C(y)/T]$  необходимо определить вероятность отказа  $P_0$  и доход  $U^0$ .

Для оценки  $P_0$  использовано правило Байеса, которое гласит, что апостериорная вероятность состояния  $P''[\sigma_i]$  определяется произведением вероятности  $P[z_k/\sigma_i]$  полученного исхода при заданном состоянии  $y_i(\sigma_i)$  на априорную вероятность  $P^I(\sigma_i)$ , деленным на нормализующую константу:

$$P_0 = P''[\sigma_i] = \frac{P[z_k/\sigma_i] \cdot P^I[\sigma_i]}{\sum_j P[z_k/\sigma_i] \cdot P^I[\sigma_i]}. \quad (11)$$

Проблема расчета  $P''[\sigma_i]$  состоит в том, что нужно установить нормализующую константу – вероятности возможных исходов, сценарии развития которых могут реализовываться, например, следующим образом:

- возможен отказ лишь на участке с подросшим дефектом;
- возможен отказ лишь на просевшем после ремонта участке;
- возможен отказ и на просевшем, и на неотремонтированном участках.

Зная вероятности возможных исходов нетрудно получить апостериорную вероятность отказа по априорной с учетом условной вероятности отказа  $P_c(t)$  из (5), а также по известным характеристикам нагрузок и металла стенки трубы.

Значение дохода  $U^0$  при отсутствии отказа за период  $[0, t]$  определяется следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для } t \leq T \\ \text{для } U^0(t) = t > T \end{array} \right\} \begin{cases} \int_0^t \epsilon (1 + r')^{-\tau} d\tau = \int_0^t \epsilon \ell^{-r\tau} d\tau \\ \int_0^t \epsilon \ell^{-\kappa\tau} \epsilon \tau \end{cases}, \quad (12)$$

где  $\epsilon$  - ежегодный доход при отсутствии отказа;  $T$  - расчетный срок службы;  $r = \ln(1 + r')$ ,  $r'$  - процент с капитала.

Вышеприведенные зависимости были использованы при расчете работоспособности условного трубопровода, восстанавливаемого выборочно. При этом оценивалась целесообразность двух стратегий ремонта: устранение лишь недопустимых дефектов и устранение всех потенциально опасных дефектов. Первоначально были проанализированы два способа расчета ремонтных напряжений. В рамках первого способа исследовался процесс изменения упругой энергии  $i$ -го конечного и соседних с ним элементов трубы, что позволило получить значение смещения  $i$ -го узла, но не дало возможности аналитически учесть осевые напряжения  $\sigma_{np}$  от прилегающих подземных участков и т.п. (предполагался инструментальный замер напряжений при выборочной шурфовке). При реализации второго способа анализировалась сумма потенциальных энергий трубопровода, потока продукта и грунта по поверхности контакта с трубой, что возмож-

но с использованием программ численного счета. Полученные в результате значения напряжений были использованы при оценке работоспособности трубопровода после выборочного ремонта, реализуемого по альтернативным стратегиям, в рамках модели, представленной зависимостями (6)÷(12).

Таким образом, адекватный расчет напряженно-деформируемого состояния трубопровода после выборочного ремонта и реализуемая на этой основе оценка апостериорной вероятности отказа трубы дают возможность формировать перспективные программы восстановительных мероприятий, являющихся оптимальными с надежность-стоимостных позиций.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

1. Сформирована концепция обеспечения эксплуатационной надежности и экологической безопасности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов после локального ремонта отдельных участков, основанная на расчете напряженно-деформированного состояния конструкции, учитывающем наличие дефектов стенки трубы, уровень послеремонтных напряжений.

2. На основе классификации дефектов стенки трубопровода по ремонтпригодности и сравнительном анализе современных технологий восстановления несущей способности трубы, разработаны зависимости для количественной оценки допустимых ремонтных напряжений, позволяющие выбрать рациональную технологию работ, гарантирующую сохранение целостности конструкции.

3. Разработан алгоритм расчета работоспособности трубопровода с локально отремонтированными участками. При этом учтена специфика взаимодействия конструкции с водонасыщенными грунтами, заключающаяся в возможности значительных осадок, перемещений в продольном направлении.

4. Предложена математическая модель расчета вероятности безотказной работы трубопровода после выборочного ремонта, позволяющая учесть различные стратегии реализации восстановительных работ. На основе разработанной математической модели создана методика технико-

экономического анализа альтернативных стратегий выборочного ремонта, реализация которой предполагает использование неопределенности в прогнозной информации о техническом состоянии линейной части.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Красников А.Ф. Обобщенный анализ факторов надежности магистральных газопроводов Западной Сибири / А.Ф. Красников, А.С. Семенов // Сб. науч. тр. «Вопросы состояния и перспективы развития нефтегазовых объектов Западной Сибири». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2002. – С.55-59.
2. Красников А.Ф. Анализ факторов, влияющих на уровень напряжений в стенке трубопроводов при ремонте // Сб. науч. тр. «Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта». — Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. — С. 147-151.
3. Красников А.Ф. Взаимодействие отремонтированных участков с мерзлыми грунтами / А.Ф. Красников, В.А. Иванов, А.В. Аксенов // Сб. науч. тр. «Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта». — Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. — С. 151-154.
4. Красников А.Ф. Расчет работоспособности трубопровода после реализации различных стратегий выборочного ремонта / А.Ф. Красников, С.В. Кузьмин // Изв. ВУЗов, Нефть и газ. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. — С.55-60.

Подписано к печати \_\_\_\_\_ 2005 г.

Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Отпечатано на RISO GR 3750

Бум. писч. № 1

Уч. – изд. л. 1,00

Усл. печ. л. 1,00

Тираж 100 экз.

---

**Издательство «Нефтегазовый университет»**

Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»  
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52