



## К ВОПРОСУ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКИ\*

А. С. МИЛЕНИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В мировой и отечественной практике эксплуатации сухопутных магистральных трубопроводов наблюдается тенденция использования различных методов их ремонта сваркой без сопутствующей остановки транспорта продукта. При этом планирование определенного метода ремонта, являющееся важным этапом гарантирования эффективности и безопасности восстановления несущей способности дефектных участков магистральных трубопроводов, требует разработки соответствующих методологических основ анализа поврежденности конструкции, оценки допустимости эксплуатации и прогнозирования остаточного ресурса. В рамках настоящей работы предложена многоуровневая методика численного анализа результатов внутритрубной диагностики состояния линейных частей магистральных трубопроводов, учитывающая специфику их ремонта без вывода из эксплуатации и позволяющая на основе численного ранжирования дефектов различной природы оптимизировать ремонтно-восстановительные работы на протяженных участках трубопровода. В зависимости от имеющихся данных технической диагностики состояния конкретного линейного участка магистрального трубопровода предлагается использовать различные уровни ранжирования: на основе разделения всех дефектов на группы допустимости посредством оценки остаточного коэффициента запаса прочности в области конкретного дефекта или с помощью расчета вероятности нарушения целостности стенки трубопровода. Различная степень консервативности предложенной методологии в зависимости от полноты входных данных позволяет анализировать результаты внутритрубной диагностики с необходимой точностью и эффективно планировать устранение обнаруженных дефектов методами ремонта трубопроводов без вывода их из эксплуатации. Библиогр. 12, табл. 10, рис. 5.

*Ключевые слова:* магистральный трубопровод, ремонт без вывода из эксплуатации, внутритрубная диагностика, дефект, планирование, ранжирование

Использование различных методов ремонта без вывода из эксплуатации магистральных трубопроводов (МТ) является одним из современных подходов поддержания их работоспособности. Интерес к подобному рода технологиям прежде всего обусловлен экономической выгодой и незначительным негативным воздействием на окружающую среду. Кроме того, возможно долгосрочное планирование локальных ремонтных работ, которое позволяет непрерывно поддерживать ресурс безопасной эксплуатации трубопровода на необходимом уровне [1–3].

Проведение ремонтных работ на действующем МТ сопряжено со следующими характерными технологическими и методологическими задачами [4]:

— планированием локальных ремонтных работ на протяженных участках МТ с различной степенью эксплуатационной поврежденности с точки зрения минимизации риска аварийных ситуаций;

— выбором параметров ремонта с позиций гарантирования безопасности проведения ремонт-

ных работ на трубопроводе под внутренним давлением;

— обеспечением работоспособности участков МТ, несущая способность которых была восстановлена методами ремонта без вывода из эксплуатации.

Решение этих задач является комплексным и включает как разработку новых методологических основ планирования и оптимизации параметров ремонта, так и реализацию наукоемких технологий ремонта дефектных участков МТ под давлением. Современные нормативные документы и практические рекомендации по большей части ориентированы на капитальный ремонт дефектных сухопутных МТ, что не позволяет учитывать специфику ремонта под давлением и эффективно планировать восстановительные работы, в частности, по результатам внутритрубной диагностики (ВТД) состояния линейных участков МТ. К таким особенностям следует отнести вопросы ранжирования обнаруженных в процессе ВТД дефектов; учет естественного разброса имеющихся данных о размерах и положении дефектов, фактических свойствах металла трубопровода; выбор метода ремонта с точки зрения максимального ресурса эксплуатации отремонтированной конструкции. С целью учета характерных особеннос-

\* Публикуется по материалам доклада, представленного на Шестой международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 29 мая–1 июня 2012 г., пос. Кацивели.



тей планирования ремонтно-восстановительных работ на магистральных трубопроводах без вывода их из эксплуатации в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины была разработана многоуровневая методика ранжирования обнаруженных при технической диагностике дефектов.

Основными дефектами МТ являются дефекты типа несплошности металла коррозионной, стресс-коррозионной природы (локальная и общая коррозионная потеря металла, трещины стресс-коррозии), дефекты сварных швов (непровары, поры), дефекты формы (вмятины) [5]. Их допустимость определяется различными национальными и отраслевыми стандартами и регламентными нормами, основанными на детерминированных критериальных соотношениях. При этом для учета стохастических отклонений входных данных от известных значений используются различные коэффициенты запаса прочности и надежности [6–8], что является максимально консервативным подходом. Так, предельное состояние участка МТ с дефектом типа коррозионного утонения (рис. 1, а) может быть оценено на основе детерминированного критерия [9]

$$Y = t_{\min} - W\Delta t - t_p R_f \quad (1)$$

где  $t_{\min}$  — минимальная остаточная толщина стенки МТ;  $t_p$  — минимальная допустимая толщина стенки МТ, определяемая либо конструктивно-эксплуатационными требованиями к МТ на рассматриваемом участке, либо дополнительным расчетом;  $\Delta t$  — рассматриваемый период времени;  $W$  — скорость равномерной коррозии (консервативно может быть принята равной 1 мм/год);  $R_f$  — функция формы дефекта утонения, определяемая следующим образом (рис. 2, а):

$$R_f = \begin{cases} 0,2 & \text{при } \lambda = \frac{1,285 s}{\sqrt{Dt_p}} \leq 0,3475, \\ \left(0,9 - \frac{0,9}{\sqrt{1,0 + 0,48\lambda^2}}\right) \left(1,0 - \frac{0,9}{\sqrt{1,0 + 0,48\lambda^2}}\right)^{-1} & \text{при } \lambda > 0,3475, \end{cases} \quad (2)$$

где  $D$  — внутренний диаметр трубы.

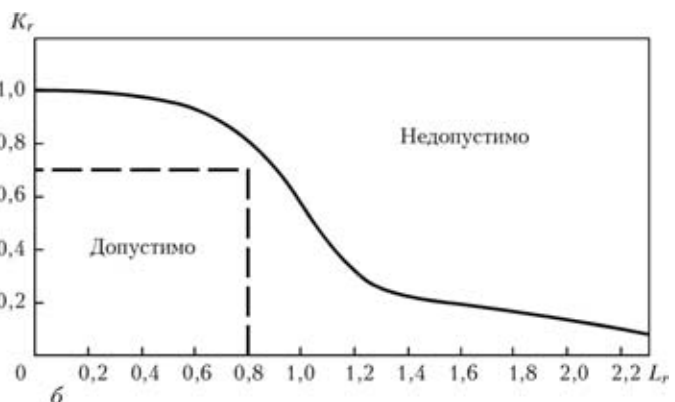
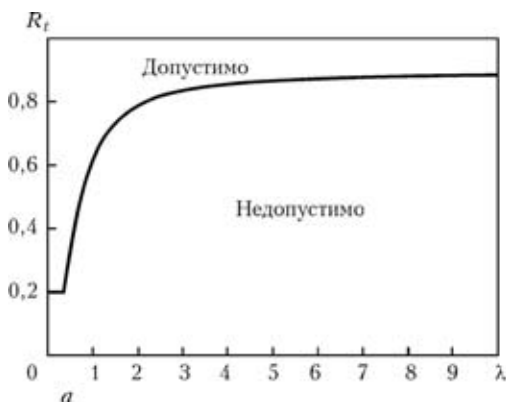


Рис. 2. Критериальные диаграммы допустимости дефектов локальной коррозионной потери металла (а) и трещинообразных дефектов (б)

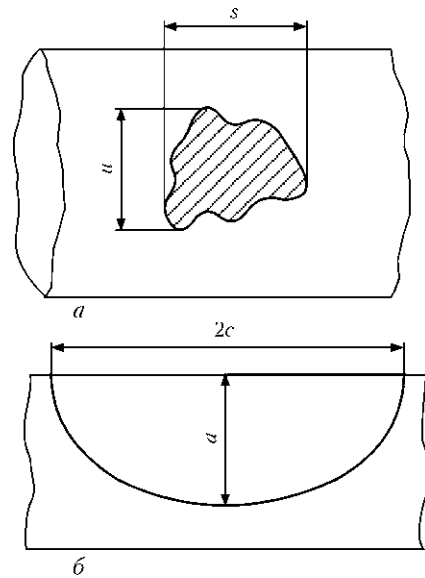


Рис. 1. Схематизация дефектов типа локальной коррозионной потери металла (а) и трещинообразных дефектов (б)

Условие  $Y > 0$  гарантирует целостность дефектного участка МТ в рассматриваемых условиях.

В качестве детерминированного критерия допустимости трещинообразного дефекта (рис. 1, б) наиболее применяемым является двухпараметрический критерий хрупковязкого разрушения (рис. 2, б), имеющий следующее выражение [10]:

$$Y = f(L_r) - K_r \quad (3)$$

где

$$f(L_r) = \begin{cases} (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)] & \text{при } L_r \leq L_r^{\max} = \frac{\sigma_B + \sigma_T}{2\sigma_T}, \\ 0 & \text{при } L_r > L_r^{\max}; \end{cases} \quad (4)$$

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IC}}; \quad L_r = \frac{\sigma_{\text{ref}}}{\sigma_T}$$

$K_I$  — коэффициент интенсивности напряжений в рассматриваемой точке контура поверхностной полуэллиптической трещины;  $\sigma_{\text{ref}}$  — реферативное напряжение в области дефекта, методика рас-



чета которого приведена, в частности, в работе [11].

Соответственно условие  $Y > 0$  является достаточным для гарантированной допустимости рассматриваемого дефекта.

При анализе допустимости трещинообразного дефекта через определенный период времени  $\Delta t$  необходим учет возможности роста трещины, а именно

$$\begin{cases} a(\Delta t) = a_0 + V_a \Delta t, \\ c(\Delta t) = c_0 + V_c \Delta t, \end{cases} \quad (5)$$

где  $a_0, c_0$  — начальные размеры трещины;  $V_a, V_c$  — скорости роста трещины вдоль соответствующего размера, которые могут быть оценены следующим образом:

$$V_{a,c}(K_I) = \begin{cases} V_{\max}, & \text{если } K_I \geq K_{ISCC}; \\ 0, & \text{если } K_I < K_{ISCC}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $V_{\max}$  — максимальная скорость роста трещины, определяемая по диаграмме статической коррозионной трещиностойкости материала в данных условиях.

Следует отметить, что в сравнении с изложенными детерминированными подходами использование вероятностных методик при анализе состояния дефектных участков МТ позволяет корректно описывать возможный разброс значений входных данных, основываясь как на имеющемся опыте исследований дефектных трубопроводных систем, так и на технологических характеристиках используемой аппаратуры и специфике анализа.

Основными методами ремонта МТ под давлением являются контролируемая шлифовка поверхностных дефектов, заваривание поверхностных дефектов и установка усиливающих конструкций (муфт, бандажей) [12]. Выбор технологии

ремонта определяется степенью поврежденности трубопровода, а также эффективностью каждого конкретного метода. Для этого, в частности, могут быть консервативно использованы подходы актуальных нормативных документов [8] (табл. 1). Для снижения консервативности выбора метода ремонта может быть произведено моделирование процесса ремонта при конкретных технологических параметрах и на основе соответствующих критериев безопасности, требований эффективности и достаточного ресурса отремонтированного участка сделан вывод о возможности использования того или иного метода восстановления несущей способности дефектной конструкции.

Как показывает практика, количество геометрических аномалий, обнаруженных при пропуске серии дефектоскопов ВТД, может достигать нескольких тысяч (рис. 3). При этом порядок их ремонта, основанный на существующих детерминированных регламентных нормах, которые подразделяют дефекты на определенные группы по степени опасности (до четырех), может быть неоднозначным при большом количестве дефектов ввиду необходимости ранжирования геометрических аномалий в рамках одной группы. Поэтому при планировании ремонта без вывода МТ из эксплуатации рационально использовать непрерывное ранжирование. В рамках разработанной методики предлагается использовать следующие уровни оценки порядка устранения дефектов в зависимости от полноты имеющихся данных и требуемой консервативности:

уровень 1. Разделение всех дефектов на четыре группы по степени допустимости: незначительные, умеренные, значительные, критические;

уровень 2. Определение коэффициента запаса прочности участка МТ с конкретным обнаруженным дефектом;

**Таблица 1. Выбор метода ремонта дефектных участков магистрального трубопровода в зависимости от степени развития поврежденности [8]**

Природа дефекта и параметр	Метод ремонта
Коррозионно-механические повреждения:	Шлифовка
внешние $a \leq 0,2t$	Установка усиливающей конструкции
внешние $0,2t < a \leq 0,5t$	
внешние $0,5t < a \leq 0,8t$	» »
внешние $a > 0,2t; t_{\min} \geq 5 \text{ мм}$	» »
внешние $s \leq 100 \text{ мм}$ или группа близко расположенных язв $a > 0,4t$	» »
дефекты, протяженные в окружном направлении $a > 0,2t; s \geq 1/6\pi D$	» »
в околошовной зоне кольцевых швов $a > 0,4t$	» »
внутренние $a > 0,2t$	» »
Трещины:	» »
внешние $a < 0,2t; 2c \leq 2\sqrt{Dt}$	Шлифовка

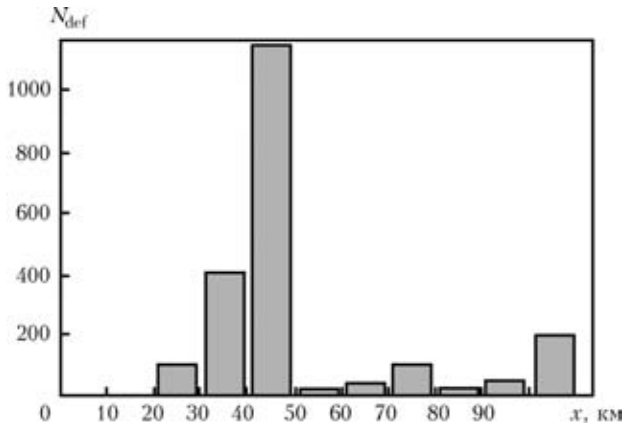


Рис. 3. Диаграмма распределения количества дефектов потери металла  $N_{def}$  по данным ВТД участка магистрального газопровода «Уренгой–Центр 2»

уровень 3. Расчет вероятности разрушения стенки трубопровода в области рассматриваемого дефекта.

Согласно уровню 1 ранжирования все дефекты, обнаруженные при ВТД линейного участка МТ, разделяются на четыре группы по степени допустимости в соответствии с национальным стандартом ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. При этом приоритет ремонта определяется принадлежностью к группе более опасных дефектов. Этот подход применим в случае, если все умеренные дефекты технически возможно удалить в срок до шести месяцев, значительные — в срок до двух месяцев. Наличие критических дефектов предполагает изменение условий эксплуатации трубопровода вплоть до его полной остановки. Определяющим параметром является коэффициент запаса прочности  $n$ , который вычисляется на основе критерия допустимости состояния участка с дефектом конкретного типа.

Оценка коэффициента запаса прочности для трехмерного дефекта локальной коррозионной потери металла определяется на основе модифицированной диаграммы предельного состояния участ-

тка (рис. 4, а), где функция  $R_\tau$ , получаемая нормированием функции  $R_p$  имеет следующий вид:

$$R_\tau = \frac{1}{3,87R_l} - 0,292. \quad (7)$$

Если состояние дефекта описывается положением  $A_1$  на диаграмме, то коэффициент запаса прочности определяется отношением

$$n = \frac{OA_1}{OA_2}. \quad (8)$$

Длина отрезка  $OA_2$  оценивается либо графически, либо численным решением следующего уравнения относительно координаты  $\lambda$  точки  $A_2$

$$\frac{R_\tau^{A_1}}{\lambda^{A_1}} - R_\tau(\lambda) = 0. \quad (9)$$

Коэффициент запаса прочности для трещинообразного дефекта определяется аналогично изложенному подходу для локальной коррозионной потери металла, но кривой предельного состояния в этом случае является двухпараметрическая диаграмма допустимости трещин (рис. 4, б). При этом коэффициент запаса прочности оценивается соотношением длин отрезков согласно формуле (8). Длина отрезка  $OA_2$  определяется либо графически, либо численным решением следующего уравнения относительно координаты  $L_r$  точки  $A_2$ :

$$\frac{K_r^{A_1}}{L_r^{A_1}} L_r - K_r(L_r) = 0. \quad (10)$$

Для дефектов МТ различной степени допустимости интервалы значений коэффициента запаса прочности  $n$  следующие [6]:

- $n > k$  — незначительный;
- $1,1\sigma_B/\sigma_T \leq n < k$  — умеренный;
- $1,1 \leq n < 1,1\sigma_B/\sigma_T$  — значительный;
- $n < 1,1$  — критический,

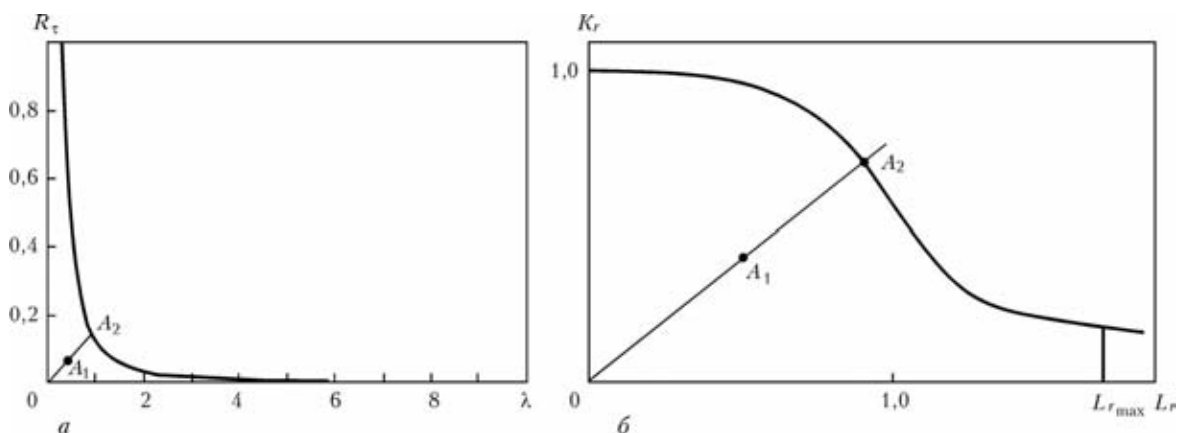


Рис. 4. Определение значения коэффициента запаса прочности участка МТ с дефектом типа локальной коррозионной потери металла (а) и трещинообразным дефектом (б)



где  $k = 0,9k_1k_n/m$ ;  $m$  — коэффициент условий работы трубопровода;  $k_1$  — коэффициент надежности по материалу;  $k_n$  — коэффициент надежности трубопровода по назначению.

Первый этап уровня 2 ранжирования повторяет уровень 1, посредством которого все дефекты делятся на четыре группы по степени их допустимости на момент диагностики. Планированию ремонта подлежат дефекты, относящиеся к незначительным, умеренным или значительным. В рамках этих групп производится ранжирование на основе значения вычисленного коэффициента запаса прочности с учетом естественного роста дефектов по соответствующим методикам. Рассмотрение ремонта критических дефектов основано на определенном изменении параметров эксплуатации дефектного участка МТ (снижения внутреннего давления) и переводе дефекта в разряд значительных или умеренных. Приоритет устранения каждого изолированного (объединенного) дефекта определяется минимизацией определенных значений коэффициента запаса прочности при конкретных условиях эксплуатации: чем ниже коэффициент запаса прочности дефектного участка, тем выше приоритет его ремонта.

Уровень 3 ранжирования является наименее консервативным и позволяет естественный разброс входных данных с целью более точного определения порядка устранения дефектов, которые в рассматриваемый период могут изменить степень допустимости, а также в случае недостаточной информации о геометрических и эксплуатационных параметрах дефектного участка и/или механических характеристиках материала трубопровода. В данном случае параметром ранжирования является вероятность аварийной ситуации на дефектном участке при фактических условиях эксплуатации, расчет которой проводится на основе метода Монте-Карло посредством следующего алгоритма:

исходя из известных плотностей распределения входных данных находится репрезентативная выборка их конкретных значений в известных диапазонах варьирования; при этом считается, что вероятность характеристики дефекта принять конкретные значения произвольная и варьируется от 0 до 1. Заметим, что под репрезентативной выборкой подразумевается количество  $N_s$  равновероятных комбинаций, достаточное для стабильного значения вероятности разрушения конкретного дефекта согласно выбранному критерию предельного состояния;

на основе детерминированных критериев разрушения определяется допустимость обнаруженного дефекта для каждого набора геометрических и эксплуатационных характеристик из репрезентативной выборки;

в рамках репрезентативной выборки производится подсчет количества недопустимых состояний трубопровода с конкретным дефектом  $N_i$ . Таким образом, под вероятностью аварийной ситуации  $P_i$  в области изолированного или множественного дефекта понимается соотношение  $P_i = N_i/N_s$ ;

в случае необходимости определяется суммарная вероятность аварийной ситуации  $P_\Sigma = 1 - \prod(1 - P_i)$  на участке МТ с независимыми дефектами для выявления участка приоритетного ремонта.

Учет стохастического отклонения значений различных входных данных описывается посредством усеченного гауссового распределения (геометрические размеры дефекта, прочностные свойства материала трубопровода, скорость коррозии) и распределения Вейбулла (характеристики трещиностойкости материала). Порядок ремонта в каждый момент времени после диагностики состояния линейного участка МТ определяется вероятностью  $P_i$ : чем выше вероятность аварийной ситуации, тем выше приоритет ремонта.

Приведенная методология анализа базы данных о дефектах, обнаруженных при ВТД состояния МТ, была реализована в виде графического пользовательского компьютерного пакета. В качестве примера ее применения было проведено ранжирование модельных дефектов с точки зрения порядка ремонта под давлением (см. табл. 2). Геометрические и эксплуатационные параметры исследуемого линейного участка МТ следующие:

длина участка $L$ .....	2000 м
внутренний диаметр $D$ .....	1420 мм
толщина стенки $t$ .....	20 мм
минимальная допустимая толщина	
стенки $t_{\min}$ .....	16 мм
материал трубопровода — сталь 17Г1С.....	$\sigma_s = 360$ МПа;
	$\sigma_b = 510$ МПа
давление на входе исследуемого	
участка $P_{\max}$ .....	7,5 МПа
давление на выходе исследуемого	
участка $P_{\min}$ .....	6,5 МПа
скорость коррозии на участке 0... 800 м .....	0,2 мм/год
на участке 800... 1400 м .....	0,4
на участке 1000... 2000 м .....	(консервативно принято значение 1)
регулярные нагрузки, обусловленные	
несовершенством геометрии рассматриваемого	
участка, отсутствуют.	

Результаты расчета параметров ранжирования согласно предложенной методике применительно к модельным дефектам с учетом их развития в процессе дальнейшей эксплуатации МТ в различные моменты времени приведены в табл. 3–6 соответственно, приоритет ремонта каждого из дефектных участков МТ согласно различным уровням ранжирования — в табл. 7. Следует отметить, что метод ремонта конкретного участка МТ, определенный согласно табл. 1, меняется в процессе развития дефекта и предельные значения размеров в рамках конкретного метода ремонта могут


**Т а б л и ц а 2. Параметры модельных дефектов линейной части МТ**

Номер дефекта	Тип дефекта	Положение дефекта		Размер дефекта, мм			Внутреннее давление МТ в области дефекта, МПа
		по длине, м	по окружности, град	аксиальный	тангенциальный	радиальный	
1	Утонение	150	30	160	17	4,7	7,4
2		230	0	200	20	7	7,4
3		680	120	60	8	5	7,2
4		681	60	100	10	15	7,2
5		800	40	120	11	14,7	7,1
6		1150	90	80	15	8	6,9
7		1200	80	25	7	10	6,9
8		1200	10	35	5	13	6,9
9		1200	120	170	13	6	6,9
10		1370	0	95	11	15	6,8
11		1560	140	150	18	6	6,7
12		1710	30	50	26	9	6,7
13		1750	90	75	16	8	6,6
14		1780	0	45	8	8	6,5
15	Продольная трещина	530	50	25	—	2	7,2
16		710	110	15	—	2	7,2
17		750	30	10	—	3	7,1
18		1100	70	6	—	1	7,0
19		1520	20	20	—	2	6,7

**Т а б л и ц а 3. Параметры ранжирования модельных дефектов и метод ремонта на момент диагностики МТ**

Номер дефекта	Группа допустимости	Коэффициент запаса прочности	Вероятность разрушения	Метод ремонта
1	Незначительная	1,648299	0,011	Шлифовка
2	Критическая	0,885463	0,4	Заваривание
3	Незначительная	2,933383	0	Шлифовка
4	Критическая	0,666297	0,983	Заваривание
5	»	0,603503	0,621	»
6	Значительная	1,523807	0,035	»
7	Незначительная	2,610481	0	Шлифовка
8	»	1,618357	0,0777	»
9	Значительная	1,340008	0,198	Заваривание
10	Критическая	0,694965	0,969	»
11	Незначительная	1,626517	0,125	Шлифовка
12	»	1,893557	0,003	»
13	»	1,686921	0,0255	»
14	»	2,391991	0	»
15	Значительная	1,534515	0,06273	Заваривание
16	Незначительная	1,540512	0,04391	Шлифовка
17	Значительная	1,463110	0,116	Заваривание
18	Незначительная	1,730804	0,005535	Шлифовка
19	»	1,651180	0,0246	»



**Т а б л и ц а 4. Параметры ранжирования модельных дефектов и метод ремонта через один год эксплуатации**

Номер дефекта	Группа допустимости	Коэффициент запаса прочности	Вероятность разрушения	Метод ремонта
1	Незначительная	1,552745	0,02	Шлифовка
2	Критическая	0,859123	0,43	Заваривание
3	Незначительная	2,756573	0	Шлифовка
4	Критическая	0,652421	0,992	Установка герметичной муфты
5	»	0,592111	0,646	Заваривание
6	Значительная	1,439648	0,0695	»
7	Незначительная	2,511972	0	Шлифовка
8	»	1,547994	0,0837	»
9	Значительная	1,224116	0,25	Заваривание
10	Критическая	0,669225	0,985	Шлифовка
11	Значительная	1,254279	0,273	Заваривание
12	Незначительная	1,699346	0,028	Шлифовка
13	Значительная	1,478064	0,0857	Заваривание
14	Незначительная	2,073059	0,00125	Шлифовка
15	Значительная	1,364442	0,3641	Заваривание
16	»	1,356944	0,22386	»
17	»	1,291293	0,2952	»
18	»	1,484581	0,09594	»
19	»	1,453562	0,18819	»

**Т а б л и ц а 5. Параметры ранжирования модельных дефектов и метод ремонта через два года эксплуатации МТ**

Номер дефекта	Группа допустимости	Коэффициент запаса прочности	Вероятность разрушения	Метод ремонта
1	Значительная	1,465154	0,0365	Заваривание
2	Критическая	0,839193	0,457	»
3	Незначительная	2,622561	0	Шлифовка
4	Критическая	0,638599	0,992	Установка герметичной муфты
5	»	0,580757	0,672	Заваривание
6	Значительная	1,371563	0,0963	»
7	Незначительная	2,413463	0	Шлифовка
8	Значительная	1,477631	0,162	Заваривание
9	»	1,129953	0,309	»
10	Критическая	0,630616	0,995	Установка герметичной муфты
11	»	1,060068	0,429	Заваривание
12	Значительная	1,529412	0,608	»
13	»	1,317405	0,182	»
14	Незначительная	1,860438	0,0085	Шлифовка
15	Значительная	1,180542	0,7651	Заваривание
16	»	1,285151	0,51537	»
17	Критическая	1,091123	0,7515	»
18	Значительная	1,310414	0,30134	»
19	»	1,256049	0,37066	»



**Т а б л и ц а 6. Параметры ранжирования модельных дефектов и метод ремонта через три года эксплуатации МТ**

Номер дефекта	Группа допустимости	Коэффициент запаса прочности	Вероятность разрушения	Метод ремонта
1	Значительная	1,393489	0,0632	Заваривание
2	Критическая	0,819303	0,486	»
3	Незначительная	2,489434	0	Шлифовка
4	Критическая	0,624833	0,997	Установка герметичной муфты
5	»	0,569441	0,689	»
6	Значительная	1,319313	0,145	Заваривание
7	Незначительная	2,364209	0,0005	Шлифовка
8	Значительная	1,442449	0,234	Заваривание
9	Критическая	1,05752	0,351	»
10	»	0,604877	0,997	Установка герметичной муфты
11	»	0,930594	0,564	Заваривание
12	Значительная	1,40803	0,137	»
13	»	1,188877	0,308	»
14	Незначительная	1,674394	0,0415	Шлифовка
15	Критическая	0,9414836	1,0	Заваривание
16	Значительная	1,224571	0,96801	»
17	Критическая	0,834522	1,0	»
18	Значительная	1,107456	0,69741	»
19	Критическая	1,014003	0,92865	»

**Т а б л и ц а 7. Приоритет устранения модельных дефектов согласно различным уровням ранжирования**

Номер дефекта	На момент диагностики			Через 1 год эксплуатации			Через 2 года эксплуатации			Через 3 года эксплуатации			Тип дефекта
	уровень 1	уровень 2	уровень 3	уровень 1	уровень 2	уровень 3	уровень 1	уровень 2	уровень 3	уровень 1	уровень 2	уровень 3	
1	3	12	14	3	15	16	2	14	16	1	14	16	Уто- не- ние
2	1	4	4	1	4	4	1	4	8	1	4	10	
3	3	19	19	3	19	19	3	19	19	3	19	19	
4	1	2	1	1	2	1	1	3	2	1	3	4	
5	1	1	3	1	1	3	1	1	5	1	1	8	
6	2	7	11	2	10	14	2	13	15	1	13	14	
7	3	18	18	3	18	18	3	18	18	2	18	18	
8	3	10	8	3	14	13	2	15	14	3	16	13	
9	2	5	5	2	5	8	1	7	11	1	9	11	
10	1	3	2	1	3	2	1	2	1	1	2	3	
11	3	11	6	2	6	7	1	5	9	1	6	9	
12	3	16	16	3	16	15	2	16	6	2	15	15	
13	3	14	12	2	12	12	2	12	13	2	11	12	
14	3	17	17	3	17	17	3	17	17	3	17	17	
15	2	8	9	2	9	5	2	8	3	1	7	2	
16	3	9	10	2	8	9	2	10	7	2	12	5	
17	2	6	7	2	7	6	1	6	4	1	5	1	
18	3	15	15	2	13	11	2	11	12	2	10	7	
19	3	13	13	2	11	10	2	9	10	1	8	6	





**Таблица 8. Характеристики дефектов типа локального утонения на участке газопровода «Уренгой–Центр 2»**

Номер дефекта	$s$ , мм	$u$ , мм	$t_{\min}$ , мм	Положение по длине дефекта, м
1	330	200	16	2
2	210	200	16,8	250
3	350	350	15,7	450
4	400	350	15,1	600
5	380	460	15,5	900

**Таблица 9. Характеристики трещинообразных дефектов на участке газопровода «Уренгой–Центр 2»**

Номер дефекта	Трещина	$c$ , мм	$a$ , мм	Положение по длине дефекта, м
6	Продольная	110	1,60	10
7	»	90	1,60	400
8	Окружная	75	1,50	710
9	»	150	1,55	820
10	Продольная	100	1,55	1000

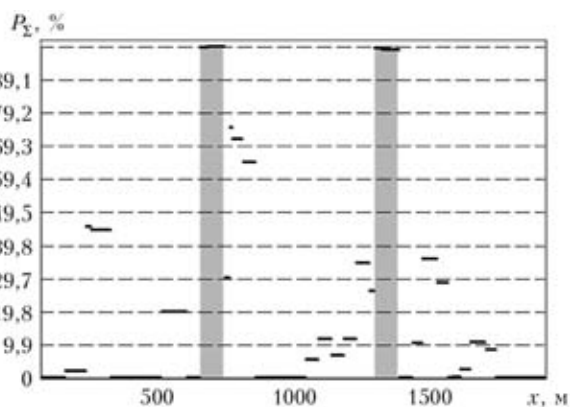


Рис. 5. Распределение суммарной вероятности аварийной ситуации на базовом участке шурфа 10 м по длине исследуемого участка МТ

Предложенная методика была применена к реальным результатам ВТД линейных частей МТ. В частности, в табл. 8, 9 приведены данные о нескольких дефектах участка магистрального газопровода «Уренгой–Центр 2», в табл. 10 — результаты ранжирования согласно уровню 3.

**Таблица 10. Вероятность аварийной ситуации обнаруженных дефектов на газопровode «Уренгой–Центр 2»**

Номер дефекта	Время эксплуатации, лет				
	0	0,5	1,0	1,5	2
1	0,0 (8)	0,00025 (10)	0,0055 (9)	0,052 (9)	0,179 (9)
2	0,0 (8)	0,0 (12)	0,0015 (11)	0,0142 (10)	0,063 (10)
3	0,0 (8)	0,00125 (9)	0,026 (8)	0,131 (8)	0,338 (7)
4	0,0041 (5)	0,0562 (3)	0,240 (4)	0,490 (4)	0,758 (4)
5	0,0 (8)	0,007 (7)	0,0715 (7)	0,263 (7)	0,494 (7)
6	0,0130 (1)	0,139 (1)	0,436 (1)	0,796 (1)	0,979 (1)
7	0,0050 (2)	0,0962 (2)	0,269 (2)	0,600 (3)	0,864 (3)
8	0,0010 (6)	0,0353 (6)	0,0612 (5)	0,462 (5)	0,720 (5)
9	0,0040 (3)	0,054 (4)	0,251 (3)	0,317 (2)	0,9369 (2)
10	0,0020 (5)	0,0412 (5)	0,177 (6)	0,419 (6)	0,715 (6)
11	0,005 (2)	0,005 (8)	0,005 (10)	0,005 (11)	0,005 (11)
12	0,001 (7)	0,001 (11)	0,001 (12)	0,001 (12)	0,001 (12)

Примечание. В скобках указан приоритет ремонта.

служить ориентиром для определения сроков ремонта с точки зрения минимизации затрат и трудоемкости ремонта, тогда как параметры ранжирования позволяют определить только последовательность устранения дефектов.

Из распределения суммарной вероятности дефектов на базе ремонта 10 м, определенной согласно уровню 3 и представленной на рис. 5, видно, что устранение всех дефектов на двух наиболее опасных участках (отмечены серым) существенно снижает суммарную аварийность МТ.

### Выводы

1. В рамках разработки комплексной методики планирования ремонта без вывода из эксплуатации МТ предложен численный подход по ранжированию дефектов, обнаруженных при ВТД. В основу подхода положен многоуровневый анализ степени поврежденности трубопровода на конкретном участке в зависимости от полноты имеющихся данных о фактическом состоянии конструкции и нормативных требований к ее несущей способности.



2. Различная консервативность разработанной методики при необходимости позволяет учитывать специфику методов диагностики состояния линейных частей МТ и характерные особенности их ремонта под давлением. В частности, использование вероятностной оценки допустимости обнаруженных дефектов предполагает анализ естественного разброса данных о свойствах металла трубопровода и параметрах дефектов.

3. На примере модельной задачи ранжирования недопустимых дефектов типа локальной коррозионной потери металла и поверхностных трещин, а также на основе численного анализа результатов диагностики состояния участка магистрального газопровода «Уренгой–Центр 2» показаны границы применимости разработанной методики и специфика прогнозируемого развития поврежденности с позиции последующего устранения дефектов методами ремонта под давлением.

1. Bjornoy O. H., Marley M. J. Assessment of corroded pipelines: Past, present and future // Proc. of 11th Intern. offshore and polar engineering conf., Stavanger, Norway, June 17–22, 2001. — 2001. — 1. — P. 93–101.
2. Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И. Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2008. — № 5. — С. 5–10.

3. LaMorte C. R., Boring M., Porter N. Advanced welding repair and remediation methods for in-service pipelines // Final Report. Columbus: EWI, 2007. — 283 p.
4. Махненко В. И., Миленин А. С. К вопросу ремонта сухопутных магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации // Сб. докл. науч.-техн. семинара «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта», 10–11 июня 2009, Киев. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2009. — С. 12–18.
5. Трубопроводный транспорт нефти и газа / Р. А. Алиев, В. Д. Белоусов, А. Г. Немудров и др. — М.: Недра, 1988. — 368 с.
6. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. Настанова. Визначення залишкової міцності магистральних трубопроводів з дефектами. — К.: Мінрегіонбуд України, 2008. — 91 с.
7. СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила. — М.: ВНИИСТ Миннефтегазстроя, 1997. — 146 с.
8. ВБН В.3.1-00013471-07:2007. Магістральні нафтопроводи. Методи ремонту дефектних ділянок. — К.: Мін-во палива та енергетики України, 2007. — 112 с.
9. Fitness-for-service. American petroleum institute. Recommended practice 579. — Washington: API Publications and Distribution, 2000. — First ed. — 625 p.
10. BS 7910:2005. British standard. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. — London: BSI, 2005. — 306 p.
11. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 619 с.
12. Kiefner J. F., Bruce W. A., Stephens D. R. Pipeline repair manual. — Houston: Technical Toolboxes, Inc., 1994. — 167 p.

Поступила в редакцию 19.02.2013

## 2-й Международный форум «АЛЮМИНИЙ-21/ТРАНСПОРТ»

01–03 октября 2013

г. Санкт-Петербург

В рамках форума будет проходить конференция и выставка «Алюминий-21/ТРАНСПОРТ». На ней предусматривается обсудить следующие вопросы:

- Потребление алюминия в мировом транспортном секторе
- Алюминий в наземном, воздушном и морском транспорте
- Транспорт и экология
- Снижение веса транспорта
- Деформируемые и литейные сплавы
- Плоский прокат и прессованные полуфабрикаты транспортного назначения
- Литые заготовки и изделий для транспорта
- Полиметаллические и гибридные материалы
- Соединение конструкций в транспортном машиностроении
- Гармонизация требований качества сварных изделий
- Коррозия и защита
- Транспортные инфраструктуры, в том числе мосты
- Стандарт качества IRIS
- Оценка показателей устойчивости по жизненному циклу

www.alusil.ru