

Прогнозирование долговечности конструкций магистральных газопроводов с учетом диагностики их технического состояния и условий безопасности

Б.И. Завойчинский, Э.Б. Завойчинская (МГУ им. М.В. Ломоносова)

Работоспособность конструкций магистральных газопроводов (МГ) в процессе эксплуатации обеспечивается периодической диагностикой их технического состояния и последующей оценкой остаточного срока их службы. В статье изложены основные задачи диагностики технического состояния и теоретические основы прогнозирования долговечности конструкций МГ при выполнении требований промышленной безопасности к опасным производственным объектам.

Основными задачами диагностирования конструкций МГ являются периодическое определение их технического состояния и прогнозирование динамики характерных параметров конструкций МГ под действием длительных и кратковременных воздействий окружающей среды [1–3], в том числе:

- проведение геодезической съемки и составление плана трассы газопровода;
- определение пространственного положения и глубины заложения газопровода;
- комплексный мониторинг технического состояния МГ на основных стадиях ин-

вестиционного проекта МГ (проектирование, строительство и эксплуатация);

- прогнозирование длительных и кратковременных воздействий окружающей среды и технического состояния МГ в процессе его дальнейшей эксплуатации;
- периодически проводимая оценка рекомендуемого срока службы конструкций МГ с учетом результатов комплексного мониторинга и требований промышленной безопасности (на стадии проектирования – оценка проектного срока службы конструкций МГ).

Мониторинг технического состояния МГ должен включать [2, 3]:

- проектную информацию о результатах изысканий, лабораторных исследований грунтов, материалов и конструктивных элементов (КЭ), заводских испытаний изделий и оборудования, сертификатов, исполнительной документации, приемо-сдаточных испытаний МГ (потенциально разрушающий метод диагностики – испытательное нагружение конструкций выше рабочего нагружения на 25–50 %);
- информацию о текущей эксплуатации системы по материалам периодических (плановых или эпизодических) обследований и измерений, наблюдений (в том числе за рабочим внутренним давлением и температурой продукта с помощью встроенных средств контроля – системы датчиков и контрольно-измерительных приборов, выполненных в общей конструкции газопровода) за динамикой системы и окружающей среды и экологической ситуации в зоне расположения МГ, включая получение информации о принятых мерах по поддержанию надежности и безопасности эксплуатации системы, о

Основные задачи КД технического состояния участков МГ

Основные задачи КД	Измерительные средства (см. Перечень)
1. Определение характеристик дефектности изоляционного покрытия (ИП), степени катодной защищенности участка по длине и времени эксплуатации	№ 7, № 8
2. Определение трассы, глубины заложения, особенностей пространственного положения и геометрических форм МГ	№ 13, № 1 (±)*, № 5
3. Определение зон потери металла, расслоений, включений, рисок, вмятин, гофров в стенке элементов	№ 2 (±), № 3 (±), № 7 (±), № 9 (±), № 5, № 2 (±), № 3 (±), № 9 (±), № 5**, № 6***, № 3 (±), № 9 (±), № 5*, № 6***
4. Определение поперечных трещин и трещиноподобных дефектов в основном металле и кольцевых сварных соединений, коррозионных повреждений и трещин произвольной ориентации на внутренней поверхности МГ	№ 3 (±), № 9 (±), № 5**, № 6***, № 12
5. Определение продольных трещин и трещиноподобных дефектов в основном металле и продольных сварных соединениях МГ	№ 4 (±), № 9 (±), № 5**, № 6***
6. Определение модельных нагружений участков и НДС конструктивных элементов МГ	№ 10
7. Поиск утечек по трассе МГ	№ 11

* (±) соответствует (и, или).

** Метод позволяет установить местоположение дефектов без определения их геометрических размеров.

*** Метод позволяет установить местоположение подрастающих трещин.

ремонтных и восстановительных работах, вплоть до реконструкции системы.

Основные задачи комплексной диагностики (КД) технического состояния участков МГ приведены в таблице, а инструментальное обеспечение их мониторинга перечислено в Перечне. Анализ результатов КД технического состояния в соответствии с таблицей включает: оценку степени опасности дефектов с учетом остаточной долговечности дефектных КЭ; определение объема ремонтных работ или изменения режимов эксплуатации участка; выбор метода проведения ремонтных работ; расчет остаточной работоспособности участка; определение срока последующего обследования участка.

Авторы специализируются в области прочности и долговечности материалов и конструкций и поэтому не претендуют на полноту систематизированного перечня приборов и инструментов. Основная цель – познакомить читателя с современным инструментарием для диагностирования участков МГ.

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИБОРОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ УЧАСТКОВ МГ

1. ВИС-профилемер типа Caliper ($D_n \geq 152$ мм), Galscan ($D_n \geq 100$ мм).

2. Ультразвуковой ВИС-дефектоскоп типа Ultra Scan WM.

3. Магнитный ВИС-дефектоскоп типа MFL, ДМТ, ДМТП, КОД, Magnescan HR ($D_n \geq 152$ мм).

4. Ультразвуковой ВИС-дефектоскоп типа Ultra Scan CD ($D_n = 600, 650$ мм).

5. Магнитный градиентометр типа МИ-03, магнитометр типа СКИФ МБС-04, ИДН.

6. Акустико-эмиссионный метод. Приборы типа Vulcan 8-SM, Losan 14-AG и 4610, «Локус ТМ», SAM-4610, LOCAN-320, Physical Acoustics Corporation, США; A-Line 32D, ООО «Интерюнис», Москва; СГП -3 -12, «СевМашПредприятие», Севергазпром.

7. Электрометрическая система типа C-SCAN, аппаратура типа Weilekes elektronik, УДИП-1М, ТИСПИ, ТИЕТИ-03, АНТПИ, АНПИ, ИПИТ-2, ИПИ-95, бесконтактный измеритель токов БИТ.

8. Измерительный комплекс станций катодной защиты типа «Минерва-3000», Simplex и Gaz de France; измерительный комплекс ПК-2, мультиметр 43313 ЭВ

2234, АИП, прибор «Минилог-128», прерыватели «Телетакт», «Синтакс», «Минитакт».

9. Визуально-измерительный комплекс (ВИК).

Коррозионная агрессивность грунта: ИКАГ, АКГК; толщина и адгезия изоляции: МТП-01, АМЦ 2-20, УКАП-1-100, УКТ-2, ИА-1, АР-2, СМ-1.

Твердомеры: коэрцитиметры – структуроскопы КРМ-ЦК-2, ДИТ-02, ИТ-50, «Темп-2», TQVOTIP; твердомеры MikroDur MTS II, KRAUTCRAMER, Германия; HLN-11A, GRC, Нидерланды; GRCHLN – 11A.

Зоны концентрации напряжений, качество сварных соединений: УД2-12, ИКН-1М, МИРА-2Д.

УЗК-дефектоскопы: ЕРОСН-11, PANAMETRICS, США; USK-6, USK-7S, USK-7D, KRAUTCRAMER; УД2-12, УИУ «Скаруч» фирмы «Конструкция», Москва; «Пеленг», ЗАО «Алтек», Санкт-Петербург; УД2-12.

УЗК-толщинометры: CL-204, DME-DL, KRAUTCRAMER; 36DL PLUS 26 MG, PANAMETRICS; «Кварц», УТ-93П, УТ-65М.

Феррозондовая установка Ф-205.30 А.

10. Измеритель НДС типа «ПИОН-1» (регистрация ЭДС магнитных шумов перемагничивания, обусловленных полем деформаций), «Уралец», Stresscan-50, индикатор концентрации напряжений типа ИКН-1М (метод магнитной памяти металла), индикатор типа ИНИ-1Ц (магнитоупругая индикация напряжений), магнитные структуроскопы КРМ-Ц, КРМ-Ц-К2М, КРМ-ЦК-3 (коэрцитивная сила).

11. Внутритрубный акустический дефектоскоп-течеискатель. Автоматическая система (принцип сравнения объемов перекачиваемого продукта; датчики, установленные по трассе). Система обнаружения и локализации утечек HSHD Modell 2000, Inventus Technologies, на базе летательного аппарата или автомобиля. Стационарная система LEOS, KWU/Siemens AG, D.

12. Внутритрубные вихретоковые дефектоскопы ВД-89НМ, ВД-12НФМ.

13. Трассоискатели ТЦ-1, ПТ-1, «Терекс-101», «Терекс-110», «Терекс-111», «Тропа», ГУП «Парсек».

Перед КД МГ проводят расчистку трассы участка и его подготовку к диагностированию, учитывают требования о контролепригодности участка, расставляют маркерные пункты по трассе, очищают внутреннюю полость трубопровода и подготавливают шурфы для проведения визуально-инструментального контроля.

Задача 1 КД заключается в определении характеристик дефектности, степени катодной защищенности участка по длине и времени эксплуатации с помощью измерительных комплексов и электрометрических систем.

При решении задачи 2 КД определяют трассу, глубину заложения и особенности пространственного положения трубопровода и геометрические дефекты типа вмятин и гофров, сужающие проходное сечение конструкции, с помощью трассоискателей, ВИС-профилемеров, магнитных градиентометров и т. п.

Задача 3 КД заключается в нахождении зон потери металла, расслоений металла, включений, рисок, вмятин, гофров в стенке элементов с помощью использования ультразвуковых и магнитных ВИС-дефектоскопов и наружного обследования с помощью магнитных градиентометров, акустико-эмиссионных приборов, толщиномеров и т. п.

Задача 4 КД включает определение поперечных трещин и трещиноподобных дефектов в основном металле и кольцевых сварных соединениях, коррозионных повреждений и неглубоких трещин произвольной ориентации на внутренней поверхности МГ с привлечением магнитных ВИС-дефектоскопов, внутритрубных вихретоковых дефектоскопов, магнитных градиентометров, акустико-эмиссионных приборов и т. п.

Задача 5 КД предписывает определять продольные трещины и трещиноподобные дефекты в основном металле элементов и продольных сварных соединениях с помощью ультразвуковых ВИС-дефектоскопов, магнитных ВИС-дефектоскопов, УЗК-дефектоскопов, магнитных градиентометров и т. п.

Задача 6 КД состоит в построении системы модельных нагружений расчетных участков МГ и определении НДС КЭ участка с помощью методов теории упругости и пластичности, реализованных в виде универсальных или специализированных программ, а также измерителей НДС и магнитных структуроскопов.

Задача 7 КД соответствует поиску утечек с помощью дефектоскопов-течеискателей и систем обнаружения и локализации утечек.

Задача 1, группа задач 2–5, задача 6 и задача 7 являются независимыми, и их решения находятся методами с привле-

чением приборов, аппаратуры и систем (см. таблицу).

В данной статье обсуждается системный подход к оценке прогнозируемых сроков службы конструкций на стадии эксплуатации, обеспечивающий возможность учета фактического качества конструкций МГ на основных стадиях инвестиционного проекта [1-5]:

- на стадии проектирования конструкций – качество проектных решений конструкций и качество проектных решений по технологии строительства, экономические аспекты и правила страхования объектов;
- на стадии строительства конструкций – качество строительно-монтажных работ, определяемое качеством заводского производства базовых КЭ, качеством монтажных сварных соединений, типом и качеством ИП, качеством собственно строительно-монтажных работ, применяемыми заводскими методами и объемами контроля за качеством КЭ;
- на стадии эксплуатации конструкций – качество эксплуатации, регламенты проведения КД их технического состояния (методы, объемы и периодичность диагностики).

Крупномасштабные разрушения конструкций МГ в процессе эксплуатации обусловлены стохастическими процессами развития во времени трещин, геометрических дефектов, коррозионных поражений металла КЭ с принятой в статье нумерацией дефектов $q = 1, \dots, q_c$.

База данных о трещинах и дефектах содержит следующую информацию:

- трещины и дефекты, подобные трещинам, в монтажных кольцевых сварных соединениях при возможном смещении кромок ($q = 1$), в заводских продольных сварных соединениях ($q = 2$), в основном металле КЭ ($q = 3$);
- расслоения ($q = 4$) и включения ($q = 5$) в основном металле и сварных соединениях;
- риски ($q = 6$), вмятины ($q = 7$) и гофры ($q = 8$) в стенке элементов;
- коррозионные трещины ($q = 9$), стресс- ($q = 10$) и био ($q = 11$) коррозионные трещины, коррозионная потеря металла ($q = 12$) и т. д.

Дефекты выявляются средствами внутритрубной и наружной диагностики с определенной достоверностью, а также гипотетически задаются по резуль-

татам предыдущей эксплуатации участка и по статистике аварий на аналогичных участках МГ.

Каждый вид указанных дефектов q , $q = 1, \dots, q_c$, обуславливает соответствующий поток разрушения КЭ участка.

Массивам каждого вида дефектов q , $q = 1, \dots, q_c$, обнаруживаемых средствами внутритрубной диагностики, ставят в соответствие массивы предельных времен $t_{y,q,v}$, где $t_{y,q,v}$ – предельные времена достижения критической ситуации v -м обобщенным КЭ с дефектом вида q с порядковым номером y , $y = 1, \dots, y_v$.

Массивам каждого вида дефектов q , $q = 1, \dots, q_c$, обнаруживаемых средствами наружного диагностического обследования, ставят в соответствие массив предельных времен $t_{z,q,v}$, где $t_{z,q,v}$ –

$$\begin{aligned} \text{Здесь } Q_{k,q,f}(t_f - t_{d,k}) = & \left\{ \sum_{y=1}^{y_v} \frac{P_{y,q,v}(t_f - t_{d,k})}{1 - P_{y,q,v}(t_f - t_{d,k})} + \sum_{z=1}^{z_v} \frac{P_{z,q,v}(t_f)[1 - P_{z,q,v}(t_{d,k})]}{1 - P_{z,q,v}(t_f)[1 - P_{z,q,v}(t_{d,k})]} \right\} + \\ & + \sum_{w=1}^{w_v} \frac{P_{w,q,v}(t_f - t_{d,k})}{1 - P_{w,q,v}(t_f - t_{d,k})} \left\{ \prod_{y=1}^{y_v} [1 - P_{y,q,v}(t_f - t_{d,k})] \prod_{z=1}^{z_v} [1 - P_{z,q,v}(t_f)[1 - P_{z,q,v}(t_{d,k})]] \right\} \times \\ & \times \prod_{w=1}^{w_v} [1 - P_{w,q,v}(t_f - t_{d,k})] + P_{q,v}(t_f)[1 - P_{q,v}(t_{d,k})] + P_{q,3f}(t_f)[1 - P_{q,3f}(t_{d,k})] + \\ & + P_{x,y}(t_f)[1 - P_{x,y}(t_{d,k})] q(y, z, w). \end{aligned}$$

предельные времена достижения критической ситуации v -м обобщенным КЭ с дефектом вида q с порядковым номером z , $z = 1, \dots, z_v$.

Массивам каждого вида дефектов q , $q = 1, \dots, q_c$, обнаруживаемых средствами как внутритрубной, так и наружной диагностики одновременно, соответствует массив предельных времен $t_{w,q,v}$, где $t_{w,q,v}$ – предельные времена достижения критической ситуации v -м обобщенным КЭ с дефектом вида q с порядковым номером w , $w = 1, \dots, w_v$.

Дефекты, которые не могут быть выявлены применяемыми средствами диагностического обследования, обуславливают достижение критической ситуации v -м обобщенным КЭ с дефектом вида q при значениях предельных времен $t_{q,v}$.

Порядковым текущим номерам y, z, w соответствуют координаты расположения дефектов по длине участка L_y, L_z, L_w .

Вероятность разрушения участка МГ $P_f = P(t_f)$ в течение прогнозируемого срока безопасной эксплуатации участка t_f оп-

ределяется по следующим соотношениям, учитывающим результаты его периодической технической диагностики:

$$P_f(t \leq t_f) = \sum_{k=1}^K P_{f,k}(t_f - t_{d,k}) / [1 - P_{f,k}(t_f - t_{d,k})] \prod_{k=1}^K [1 - P_{f,k}(t_f - t_{d,k})], \quad (1)$$

где $P_{f,k}(t_f - t_{d,k}) =$

$$\begin{aligned} & = \left\{ \sum_{q=1}^{q_k} \frac{Q_{k,q,f}(t_f - t_{d,k})}{1 - Q_{k,q,f}(t_f - t_{d,k})} \right\} \times \\ & \times \prod_{q=1}^{q_k} [1 - Q_{k,q,f}(t_f - t_{d,k})]. \end{aligned}$$

В формулах приняты следующие обозначения: $P_{f,k}$ – вероятность разрушения участка газопровода определенной длины в течение остаточного срока его эксплуатации $t_f - t_{d,k}$ с учетом результатов его диагностического обследования в момент времени $t_{d,k}$, $P_{f,k} = P_{f,k}(t_f - t_{d,k})$; $P_{y,q,v}$ – вероятность разрушения v -го обобщенного КЭ, имеющего дефекты q , $q = 1, \dots, q_c$, в течение остаточного срока $t_f - t_{d,k}$; дефекты расположены по его длине на расстоянии L_y , $y = 1, \dots, y_v$ и обнаружены только средствами внутритрубной диагностики в момент времени $t_{d,k}$; зависит от предельного времени $t_{y,q,i}$ достижения критической величины дефектом в v -м обобщенном КЭ с порядковым номером y , $P_{y,q,v} = P_{y,q,v}(t_f - t_{d,k})$; $P_{z,q,v}$ – вероятность разрушения v -го обобщенного КЭ, имеющего дефекты q , $q = 1, \dots, q_c$, в течение остаточного срока $t_f - t_{d,k}$; дефекты расположены по его длине на расстоянии L_z , $z = 1, \dots, z_v$, $L_z \neq L_y$ и обнаружены только средствами наружного диагностического обследования в момент времени $t_{d,k}$; зависит от предель-

ного времени $t_{z,q,e}$ достижения критической величины дефектом $q, q = 1, \dots, q_c$ с порядковым номером z в v -м обобщенном КЭ, $P_{z,q,v} = P_{z,q,v}(t_f - t_{d,k})$; $P_{w,q,v}$ – вероятность разрушения v -го обобщенного КЭ, имеющего дефекты $q, q = 1, \dots, q_c$, в течение остаточного срока $t_f - t_{d,k}$; дефекты расположены по его длине на расстоянии $L_w, w = 1, \dots, w_v$ и обнаружены совместно как средствами внутритрубной, так и наружной диагностики в момент времени $t_{d,k}$; зависит от предельного времени $t_{w,q,v}$ достижения дефектом $q, q = 1, \dots, q_c$ в v -м обобщенном КЭ с порядковым номером w критической величины, $P_{w,q,v} = P_{w,q,v}(t_f - t_{d,k})$; $P_{q,v}$ – вероятность разрушения v -го обобщенного КЭ, имеющего дефекты $q, q = 1, \dots, q_c$, в течение остаточного срока $t_f - t_{d,k}$, определяемая по результатам косвенных методов наружной диагностики (магнитные градиентометры, акустико-эмиссионный и вихрековый методы, электрометрические методы контроля технического состояния изоляционного покрытия и металла), анализа проектной, исполнительной и эксплуатационно-технической документации и статистики разрушений v -го обобщенного КЭ с дефектом $q, q = 1, \dots, q_c$; $P_{q,3f} = P_{q,3f}(t_f - t_{d,k})$; $P_{q,3f}$ – вероятность разрушения участка в течение срока $t_f - t_{d,k}$, определяемая по результатам предыдущей эксплуатации участка с учетом деятельности третьих лиц, $P_{q,3f} = P_{q,3f}(t_f - t_{d,k})$; $P_{x,v}$ – вероятность разрушения v -го обобщенного КЭ, имеющего дефекты с порядковым номером x , размеры которых не позволяют их выявить применяемыми средствами диагностики (конструктивные элементы с произвольно ориентированными трещинами длиной $l_0 \leq 50$ мм и глубиной $h_0 \leq 1,5$ мм), $P_{x,v} = P_{x,v}(t_f - t_{d,k})$; $t_{d,k}$ – время обнаружения дефектов, отсчитываемое от начала эксплуатации МГ; $q(y, z, w) = 1$ при отсутствии результатов внутритрубной и наружной диагностики; $q(y, z, w) = 0,5$ при отсутствии результатов или внутритрубной, или наружной диагностики; $q(y, z, w) = 0$ при использовании результатов внутритрубной и наружной диагностики.

Компоненты вероятности разрушения участка находятся на основе внутритрубной и наружной диагностики, с учетом результатов предыдущей эксплуатации участка из следующих соотношений:

$$P_{y,q,v}(t_f - t_{d,k}) = \varphi \left(\frac{t_f - t_{d,k}}{t_{y,q,v}} \frac{1}{N_v} \right); P_{z,q,v}(t_f - t_{d,k}) = \varphi \left(\frac{t_f - t_{d,k}}{t_{z,q,v}} \frac{1}{N_v} \right);$$

$$P_{w,q,v}(t_f - t_{d,k}) = \varphi \left(\frac{t_f - t_{d,k}}{t_{w,q,v}} \frac{1}{N_v} \right); P_{x,v}(t_f - t_{d,k}) = \varphi \left(\frac{t_f - t_{d,k}}{t_{x,v}} \frac{1}{N_v} \right); \quad (2)$$

$$P_{q,v}(t_f - t_{d,k}) = \varphi(\lambda_{q,v}(t_f - t_{d,k})L); P_{q,3f}(t_f - t_{d,k}) = \varphi(\lambda_{q,3f}(t_f - t_{d,k})L),$$

$$x = 1, \dots, x_v, y = 1, \dots, y_v, z = 1, \dots, z_v, w = 1, \dots, w_v,$$

где N_v – общее число составляющих членов v -го обобщенного КЭ, $v = 1, \dots, v_v$; N_1 – количество монтажных сварных соединений на расчетном участке; N_2 – то же, заводских сварных соединений; N_3 – число обобщенных КЭ на расчетном участке, основной металл которых содержит произвольно ориентированную трещину с характерными размерами $l_0 = 50$ мм, $h_0 = 1,5$ мм; N_4 – число штампосварных отводов на расчетном участке; N_5 – то же, тройниковых соединений; N_6 – то же, днищ; N_7 – то же, переходников и т. д.; $\lambda_{q,v}$ – коэффициент интенсивности потока разрушений расчетного участка с дефектами вида $q, q = 1, \dots, q_c$, определяемый по результатам косвенных методов наружной диагностики и анализа проектной, исполнительной и эксплуатационно-технической документации, а также по статистике разрушений аналогичных объектов; $\lambda_{q,3f}$ – коэффициент интенсивности потока разрушений расчетного участка с дефектами вида $q, q = 1, \dots, q_c$, определяемый по результатам предыдущей эксплуатации участка с учетом деятельности третьих лиц; $\varphi = \varphi(t)$ – функция распределения разрушений обобщенных КЭ расчетного участка; $t_{y,q,v}, t_{z,q,v}, t_{w,q,v}, t_{x,v}$ – предельные времена достижения критической ситуации v -м обобщенным КЭ с дефектами вида $q, q = 1, \dots, q_c$ порядковых номеров y, z, w .

Для описания разрушения участка в течение остаточного срока его службы в качестве функции распределения разрушений выбирают распределение Пуассона в следующей форме [2, 3, 5, 6]:

$$\varphi = K_v \frac{t_f - t_{d,k}}{t_{i,q,v}} \frac{1}{N_v} \exp \left(-K_v \frac{t_f - t_{d,k}}{t_{i,q,v}} \frac{1}{N_v} \right),$$

$$i = y, z;$$

$$\varphi = K_v \frac{t_f - t_{d,k}}{t_{x,v}} \frac{1}{N_v} \times \exp \left(-K_v \frac{t_f - t_{d,k}}{t_{x,v}} \frac{1}{N_v} \right); \quad (3)$$

$$\varphi = K_v \lambda_i (t_f - t_{d,k}) L \exp(-K_v \lambda_i (t_f - t_{d,k}) L),$$

$$i = q, 3f,$$

где K_v – коэффициент безопасности, обеспечивающий соответствие значений действительных и расчетных времен разрушения v -го обобщенного КЭ, $v = 1, \dots, v_v$.

Предельные времена $t_{y,q,v}, t_{z,q,v}, t_{w,q,v}, t_{x,v}$ эксплуатации v -го обобщенного КЭ участка, $v = 1, \dots, v_v$, вычисляются по методикам оценки долговечности КЭ с геометрическими дефектами технологического и эксплуатационного происхождения расчетного участка, находящегося под действием эксплуатационного нагружения и внешних воздействий [1–6].

Список литературы

1. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов. Теория, методы расчета, проектирование. – М.: Недра, 1992. – 271 с.
2. Рекомендации по оценке безопасности и долговечности газопроводов при проектировании. – М.: ИРЦ Газпром, 2002. – 160 с.
3. Машиностроение: Энциклопедия. Т. IV. Надежность машин. Гл. 4.7. Надежность газонефтепроводов. – 1998. – С. 525–585.
4. Методика оценки сроков службы газопроводов. – М.: ИРЦ Газпром, 1997. – 84 с.
5. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов. Ч. 1. Определение вероятности разрушения и сроков безопасной эксплуатации и очередного обследования участка трубопровода // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 5(95). – С. 15–23.
6. Zavoychinskaya E.B., Zavoychinskiy B.I. Estimation of Structure Durability using the State Diagnostic and Safety Requirements // Engineering & Automation problems. Intern. J. – 2006. – V. 5. – N 1. – P. 70–76.