



ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СИСТЕМЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

А. А. ЛЕБЕДЕВ, С. А. НЕДОСЕКА, Н. Р. МУЗЫКА, Н. Л. ВОЛЧЕК

Рассмотрен неразрушающий метод контроля состояния металла труб, основанный на определении характеристик рассеяния твердости. Показана эффективность метода и достаточно хорошая корреляция с данными, полученными методом акустического сканирования материала труб, имеющих разную степень эксплуатационной поврежденности.

The non-destructive method for inspection of the state of metal in pipes, based on evaluation of the hardness dispersion characteristics, is considered. The efficiency of the method and its sufficiently good correlation with the data generated by acoustic scanning of the pipe material with a differing degree of service damage are shown.

Введение. Техническое состояние трубопроводов, в частности, их линейных участков, зависит от многих конструкционных, эксплуатационных и технологических факторов, совокупность которых приводит к сложной схеме температурно-силового нагружения основного несущего элемента — трубы, и, как следствие, к высокой степени неопределенности ее напряженно-деформируемого состояния, к труднопредсказуемой кинетике деградации свойств металла. Поэтому при кажущейся простоте конструктивного исполнения трубопроводных систем надежный расчет их несущей способности и долговечности на этапе проектирования практически отсутствует, а оценку остаточного ресурса проводят на стадии эксплуатации по данным контроля текущего состояния металла труб, выполняемого в рамках плановых мероприятий по техническому обслуживанию трубопроводов.

К одной из наиболее серьезных причин отказа трубопровода являются необратимые изменения (деградация) структуры и физико-механических свойств материала трубы под действием различных температурно-силовых воздействий, коррозии, старения, химического взаимодействия с транспортируемым продуктом. Деградация металла, как показывает статистика, является причиной каждого второго отказа. Она связана с накоплением рассеянных повреждений различной природы, трансформирующихся в дефекты типа трещин, которые приводят к снижению уровня работоспособности трубы или к полному ее отказу по показателям функционирования (местная потеря устойчивости, нарушение плотности в результате разрыхления металла и т.п.).

Скорость деградации, естественно, зависит от природы материала, его исходного структурного состояния и условий работы, в частности, режима нагружения. Большой объем работы по анализу эксплуатационной нагруженности труб линейного участка нефтепровода «Дружба» и статистическому анализу результатов около 400000 измерений давления в течение 5 лет выполнен в Белорусском государственном университете транспорта под руководством профессора Л. А. Сосновского [1]. Показано, в частности, что давление в трубе изменяется циклически с коэффициентом асимметрии от

0 до 1 и является случайной величиной. В течение всего срока эксплуатации нефтепровода реализуются более 10^5 циклов, разрушения носят типичный усталостный характер с длительным периодом стадии накопления рассеянных повреждений. В исходном состоянии металла трещин на наружной поверхности трубы приблизительно в шесть раз больше, чем на внутренней, после эксплуатации трубы — наоборот, меньше в 1,5 раза.

Режим нагружения газопровода, естественно, носит более мягкий характер, с меньшей частотой существенных колебаний давления, поэтому замечено, что разрушение труб газопроводов происходит по квазистатическому типу, скорее — по механизму малоциклового усталости. Однако и в этом случае контроль кинетики накопления повреждений в металле труб в процессе наработки как признака деградации материала, имеет огромное практическое значение.

Методы и задачи исследования. В настоящее время имеется обширная литература по способам оценки степени поврежденности металла в условиях эксплуатации по результатам прямых или косвенных измерений [2–4]. К числу наиболее результативных из тех, которые можно реализовать без разрушения исследуемой конструкции, следует отнести различные варианты метода акустической эмиссии (АЭ) и метод ЛМ-твердости.

Акустические методы весьма информативны, хотя и требуют применения дорогостоящего приборного обеспечения и сложной процедуры обработки результатов измерений.

Метод твердости, напротив, характеризуется недостаточной информативностью и низкой точностью, поскольку корреляция между твердостью материала и его поврежденностью в большинстве случаев очень слабая и, как будет показано ниже, не всегда однозначна.

В настоящем исследовании проведен сравнительный анализ оценки поврежденности материала методом акустического прозвучивания [2], проведенного на образцах, вырезанных из различных трубопроводов Украины, находящихся в длительной эксплуатации, и метода ЛМ-твердости [3], в котором в качестве информационных признаков состояния системы выбраны характеристики рассеяния показателей твердости металла трубы.



На основе прозвучивания металла действующих газопроводов сигналами акустической эмиссии в работе [2] сформулирован критерий оценки поврежденности, связанный с изменением скорости нарастания принимаемого сигнала, и показана его связь с разрыхлением материала, определяемым путем взвешивания малых проб в жидкости.

Метод ЛМ-твердости также имеет убедительное экспериментальное подтверждение при наработке в условиях кратковременного и длительного, в том числе циклического нагружения [4]. Физическое обоснование этого метода состоит в том, что рассеяние по крайней мере механических характеристик присуще всем материалам, а степень его рассеяния зависит в основном от структурного состояния. Поэтому об изменении структурного состояния, т.е. о деградации материала в заданных условиях работы, в том числе за счет старения под напряжением, можно судить по степени рассеяния характеристик его механических свойств, в том числе твердости, определение которой в любом объеме проводится без разрушения изделия и не требует сложной аппаратуры.

При наличии достаточно большой совокупности характеристик твердости, которые получены с помощью массовых измерений, используя те или иные законы распределения, можно определить параметры этих распределений, и в дальнейшем использовать их для оценки структурной неоднородности материала.

Существует большой опыт использования в механике материалов, а именно, при построении статистических теорий прочности, распределения Вейбулла [5], в котором параметр m , имеющий смысл коэффициента гомогенности, можно определить по формуле Гумбеля [6]. Применительно к испытаниям на твердость эта формула имеет вид

$$m = 0,4343d_n \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \lg H)^2 \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

где величину d_n определяют в зависимости от числа n измерений; H_i — значение твердости по i -му измерению; $\lg H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg H_i$ — среднее значение логарифмов твердости по результатам n измерений.

Испытания, проведенные с использованием метода твердости, показали, что достаточный для допустимой точности оценки однородности материала объем испытаний составляет $n = 20 \dots 30$ измерений. Естественно, что большим значениям коэффициента m соответствует низкий уровень рассеяния характеристик твердости и, соответственно, лучшая организация структуры, низкий уровень поврежденности. Меньшим значениям, наоборот, соответствует более высокий уровень поврежденности. Отметим, что уровню рассеяния определяемого свойства, в том числе твердости, можно ставить в соответствие и другие статистические критерии, например, коэффициент вариации, показывающий насколько велико рассеяние величин, составляющих рассматриваемую совокупность, по сравнению со средним значением,

$$v = \frac{1}{H} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - H)^2 \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

где H_i , H и n имеют тот же смысл, что и в (1).

Ниже представлены результаты исследования описанным методом состояния металла труб, изготовленных из низколегированных ферритно-перлитных сталей 17Г1С, 17ГС (отечественного) и 13030 (чех. производства), после эксплуатационной наработки от 15 до 48 лет в системе газопроводов Украины. Все пробы металла были взяты для испытаний только с тех действующих газопроводов, у которых сохранились резервные трубы с исходным состоянием металла.

В проведенных ранее исследованиях [2] для прозвучивания призматических образцов использовали АЭ систему диагностики «ЕМА-2». Непосредственно на тех же образцах, на которых проводили измерение твердости, был получен большой объем данных по изменению акустических свойств указанных металлов. Это позволило провести корректное сопоставление зависимостей поврежденности от эксплуатационной наработки, полученных на основе как акустических данных, так и измерения твердости.

Химический состав металла труб исследован на сканирующем микроскопе «Самскап» с рентгеновским спектрометром System 860 CP2-50. Результаты измерений показали, что содержание кремния и марганца во всех сталях, включая чехословацкую, находятся в пределах верхних значений этих элементов, регламентируемых ГОСТ для сталей 17Г1С и 17ГС, содержание хрома и никеля — в пределах сертификационных значений на поставку. Никелевый эквивалент сталей находится в интервале значений 4,283... 4,394. Основные механические характеристики сталей находятся в таких пределах: временное сопротивление $\sigma_B = 490 \dots 550$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 340 \dots 355$ МПа, остаточное удлинение $\delta > 22$ %, ударная вязкость КСИ = 0,34... 0,40 МДж/м².

Изменения химического состава за период эксплуатации находятся в пределах, не превышающих допустимых для используемой аппаратуры погрешностей.

Результаты исследования методом ЛМ-твердости. Схема вырезки образцов для испытаний показана на рис.1. Из каждой трубы-свидетеля и трубы с наработкой было изготовлено по три образца размером 10×10 мм с высотой, равной толщине стенки. Поверхности образцов, соответствующие внутренней и наружной сторонам трубы, были подготовлены для испытаний на твердость по Бринеллю на стандартном твердомере с нагрузкой 150 Н на индентор с углом при вершине 136°.

В качестве характеристики рассеяния принимался коэффициент вариации (2), рассчитанный по результатам не менее 25 измерений. В расчет принималось среднее из трех полученных значений коэффициента вариации, за исключением небольшого количества случаев, когда одно из трех значений имело характер явного выброса. Эти значения из дальнейших обсуждений исключались.

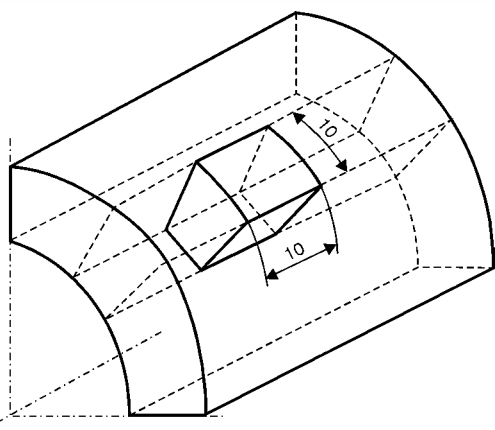


Рис. 1. Схема вырезки образцов

Название газопровода, размер трубы, марка стали и срок эксплуатации трубопровода (до 1996 г.), а также результаты обобщения данных измерений приведены в таблице.

Как видно, значения твердости исходного металла труб разных трубопроводов отличаются, причем в большей степени с наружной стороны; имеется различие в твердости металла, но в значительно меньшей мере, и в пределах одной трубы — со стороны наружной и внутренней поверхностей, в то же время их средние (по всем трубопроводам) значения отличаются незначительно $HV = 157,5$ МПа — со стороны наружной и $HV = 155,5$ МПа — со стороны внутренней поверхностей.

Приведенные данные, характеризующие механические свойства металла труб в исходном состоянии свидетельствуют об их сравнительно небольшом различии, что обеспечивается прежде всего единой природой и близким химическим составом сталей по основным элементам. Это дает основание рассматривать экспериментальные данные, полученные на разных трубопроводах после различной длительности их эксплуатации, как результаты исследования состояния металла трубы из низколегированной феррито-перлитной стали в составе некоторого виртуального газопровода на разных стадиях эксплуатации. Такой подход, как показано ниже, позволяет установить, по крайней мере, качественные закономерности деградации в процессе наработки металла труб из стали указанного класса.

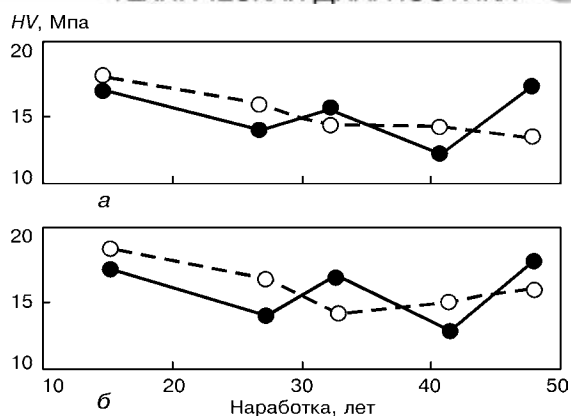


Рис. 2. Твердость исходного материала (темные точки) и материала после соответствующей наработки (светлые точки): а, б — для металла наружных и внутренних слоев соответственно

Предлагаемая модель основана на предположениях об относительно одинаковых свойствах металла труб в исходном состоянии, относительно одинаковых условиях механического нагружения труб и относительно одинаковых параметрах температурнохимических воздействий. Естественно, что эти предположения для рассматриваемого виртуального газопровода в большей или меньшей степени не выполняются, чем и объясняются заметные отклонения обсуждаемых ниже экспериментальных результатов от соответствующих среднестатистических значений. Тем не менее, такой подход позволяет достаточно четко проследить основные тенденции процесса деградации свойств металла труб. В процессе эксплуатации твердость металла труб в разных газопроводах, как видно из рис. 2, изменяется неоднозначно: она может как увеличиваться (трубопроводы 1, 2, 4), так и снижаться (трубопроводы 3, 5). Причину этой неоднозначности пока трудно объяснить физически. Однако этот экспериментально установленный факт сам по себе имеет большое практическое значение: он является еще одним прямым доказательством того, что твердость не всегда является параметром, по изменению которого можно адекватно судить об изменении состояния металла, т. е. о его деградации. Данные о рассеянии характеристик твердости металла труб в исходном состоянии (темные точки) и после наработки различной продолжи-

Таблица 1. Результаты исследования металла труб газопроводов

Номер	Газопровод	Размер трубы, мм	Материал трубы	Эксплуатационная наработка, лет	Твердость HV, МПа		Коэффициент вариации	
					Н	В	Н	В
1	Новопсков–Краматорск	1020×8	17Г1С	15	18,4	17,1	1,03	1,06
					18,6	18,2	1,77	2,00
2	Шебелинка–Славянск	720×8	17ГС	27	14,0	14,1	1,35	2,25
					16,8	16,9	2,10	2,60
3	Диканька–Кременчуг	720×8	17ГС	32	16,2	16,1	1,36	1,72
					16,0	15,8	1,75	2,14
4	Дашава–Киев	508×9,5	13030 (Чех.)	41	12,6	13,1	1,61	2,46
					14,4	14,2	2,57	5,30
5	Дашава–Киев	508×9,5	13030 (Чех.)	48	17,6	17,4	1,91	1,90
					14,1	15,6	3,10	5,04

Примечание. Над чертой приведены значения для металла трубы в исходном состоянии, под чертой — для металла после соответствующего срока эксплуатации трубы. HV — среднее значение твердости трубы по результатам не менее 25 измерений со стороны наружной (Н) и внутренней (В) поверхностей трубы



тельности (светлые точки) в оценке коэффициентов вариации приведены на рис. 3, из которого видно, что металл труб в исходном состоянии, судя по рассеянию характеристик твердости, можно считать сравнительно однородным. Однако степень однородности металла наружных и внутренних слоев неодинакова. Средние по всем трубам значения коэффициента вариации металла с внутренней стороны значительно выше ($v_{B_{cp}} = 0,190$) соответствующего среднего значения коэффициента металла наружных слоев ($v_{H_{cp}} = 0,142$), что свидетельствует о его сравнительно высокой исходной поврежденности и, следовательно, более низком качестве. Именно это является, очевидно, одной из главных причин повышенного темпа роста в процессе наработки коэффициента вариации v_B металла внутреннего слоя в сопоставлении с коэффициентом v_H .

Значения коэффициентов вариации v , определяемые по рассеянию характеристик твердости металла на различных стадиях эксплуатации рассматриваемого виртуального газопровода, хорошо аппроксимируются следующими уравнениями регрессии:

для металла наружных слоев

$$v_H = 1,42^{(0,1X^2 + 1)}, \quad (3)$$

для металла внутренних слоев

$$v_B = 1,9^{(0,07X^2 + 1)}. \quad (3a)$$

На рис. 3 эти кривые показаны сплошными линиями, X — десятая часть эксплуатационной наработки в годах.

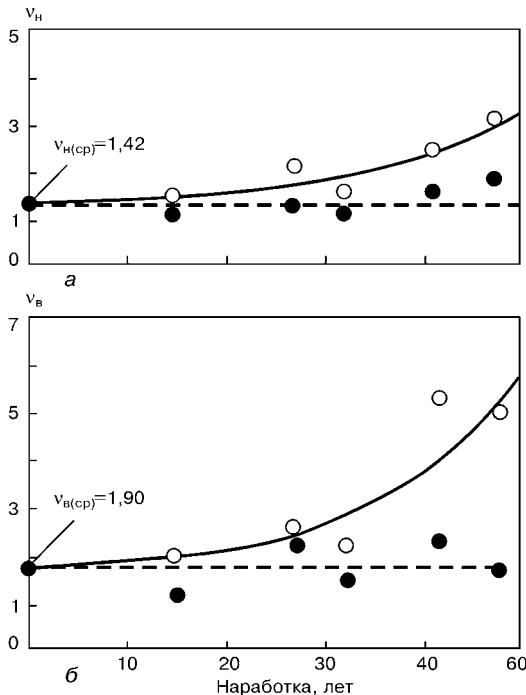


Рис. 3. Коэффициенты вариации характеристик твердости исходного материала (темные точки) и после соответствующей наработки (светлые точки). Сплошные линии — аппроксимация опытных данных по уравнениям регрессии (3) и (3а) (а, б — то же, что и на рис. 2)

Различный темп роста коэффициентов v_H и v_B в процессе работы газопровода особенно заметен после 25 лет эксплуатации, когда деградация металла внутренних слоев происходит особенно интенсивно. Так, если за первые 25 лет работы значения коэффициентов v_H и v_B возросли соответственно с 1,14 до 1,63 и с 1,90 до 2,27, то за последующие 25 лет, судя по аппроксимирующим кривым, они достигнут значений 3, 41 и 5,84. При этом темп роста коэффициента v_B значительно опережает таковой коэффициента v_H .

Для иллюстрации на рис. 4 приведена кривая, характеризующая изменение соотношения v_B/v_H за весь период эксплуатации газопровода с прогнозом до 60 лет. Видно, что если поврежденность металла внутреннего слоя в исходном состоянии превышала поврежденность металла наружного слоя приблизительно на одну треть, то к шестидесяти годам эксплуатации это превышение темпа достигнет почти 100 %.

Поврежденность металла наружных и внутренних слоев в оценке коэффициентами вариации за 60 лет эксплуатации увеличится в 3,5 и более чем в 5 раз соответственно, а абсолютные значения коэффициентов вариации достигнут величин $v_H = 5,02$ и $v_B = 9,58$.

Таким образом, представленные данные показывают, что по характеристикам твердости металла нельзя судить о его текущем состоянии и, следовательно, прогнозировать свойства металла трубы в процессе эксплуатации. Более представительными являются характеристики рассеяния его свойств, в частности коэффициент вариации или коэффициент гомогенности по Вейбуллу. Применительно к диагностике металла трубопроводов без их разрушения к наиболее показательным следует отнести характеристики рассеяния твердости.

Сопоставление с данными акустических исследований. Критерий поврежденности, представленный параметром W [2], позволяет связать акустические свойства материала с его деградацией. Величина W может меняться от 0 (неповрежденный материал) до 1 (поврежденный материал).

Кривые, связывающие параметр поврежденности W со сроком эксплуатационной наработки рассматриваемого виртуального газопровода, можно описать экспоненциальными уравнениями

$$W_H = 0,021e^{0,0787t}, \quad (4)$$

$$W_B = 0,1331e^{0,0336t}, \quad (4a)$$

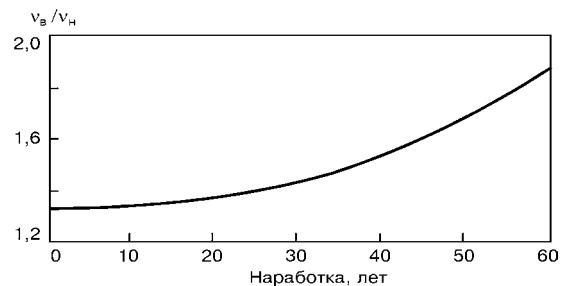


Рис. 4. Изменение соотношения между коэффициентами вариаций характеристик твердости внутренних и наружных слоев в процессе наработки



для наружных и внутренних слоев соответственно, где t — срок эксплуатационной наработки в годах.

На рис. 5 представлены графики зависимости параметра W от эксплуатационной наработки с экспоненциальными линиями тренда, описываемыми уравнениями (4) и (4а). Как видим, характер кривых аналогичен характеру кривых рассеяния твердости. Это указывает на то, что между принятыми параметрами АЭ прозвучивания (W) и метода ЛМ-твердости (v) существует устойчивая корреляция.

С целью оценки качества корреляции аппроксимируем результаты, полученные методом ЛМ-твердости, как и в случае анализа результатов АЭ-сканирования, экспоненциальной функцией. Для этого представим характеристики рассеяния v_i в относительных величинах $V_i = v_i/|v|$, взяв за базовую величину максимальное значение, полученное для металла трубы со стороны ее внутренней поверхности после 48-летней эксплуатационной наработки. У этого металла, естественно, $V = v_{\max}/v_{\min} = 1$, а в остальных местах измерений $0 \leq V_i \leq 1$.

Оптимальные значения параметров экспоненциальной функции, аппроксимирующей экспериментальные данные, полученные методом ЛМ-твердости, определены с использованием пакета анализа программы Microsoft Excel. XP.

Полученное корреляционное уравнение имеет вид для металла наружной поверхности

$$V_H = 0,501v_H - 0,69, \quad (5)$$

для металла внутренней поверхности

$$V_B = 0,198v_B - 0,21. \quad (5a)$$

Кривые, связывающие параметр поврежденности V со сроком эксплуатационной наработки, после

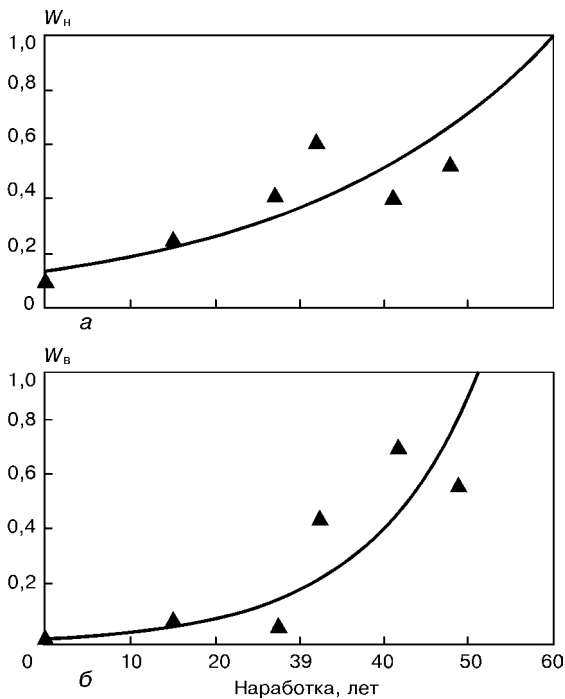


Рис. 5. Зависимости поврежденности металла труб от наработки по результатам испытаний акустическим методом для наружных (а) и внутренних слоев (б)

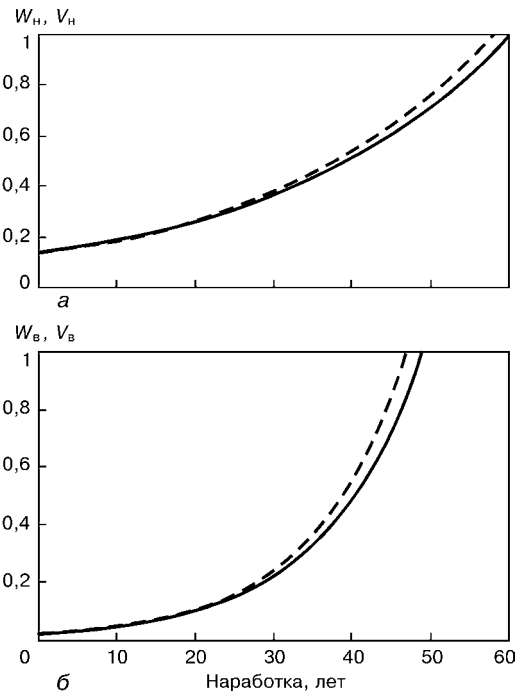


Рис. 6. Сопоставление характеристик поврежденности, определенных акустическим методом (сплошная кривая) и методом рассеяния твердости (штриховая) для наружных (а) и внутренних слоев (б)

такого преобразования можно описать экспоненциальными уравнениями:

$$V_H = 0,0210e^{0,0833t}, \quad (6)$$

$$V_B = 0,1293e^{0,0353t} \quad (6a),$$

для наружных и внутренних слоев соответственно; где t — срок эксплуатационной наработки в годах.

Ниже представлены данные, иллюстрирующие достаточно хорошее совпадение кривых $V_H(t)$, $W_H(t)$ для наружных слоев (рис. 6, а) и $V_B(t)$, $W_B(t)$ для внутренних слоев (рис. 6, б). Наиболее важным является то, что оба метода в результате прогнозируют почти одинаковый остаточный ресурс диагностируемого виртуального трубопровода.

Проведенный корреляционный анализ показал, что для наружных слоев коэффициент корреляции экспоненциальных кривых поврежденности составляет 89,86 %, а для внутренних слоев 90,72 %.

Таким образом, оба используемых метода оценки состояния металла трубопроводов, основанные на концепции связи эксплуатационной поврежденности с параметрами V и W свойств материала, могут быть использованы для получения достоверных данных о реальном состоянии металла труб.

Выводы

1. Метод оценки поврежденности металлов, основанный на анализе характеристик рассеяния твердости, может быть использован на практике. Преимуществом метода является относительно невысокая стоимость измерительного оборудования.

2. Сопоставление данных оценки поврежденности методом, основанным на получении акустических характеристик материала методом прозвучивания, и методом, основанным на анализе рассеяния твердос-



ти, показало достаточно хорошую корреляцию результатов, что позволяет рекомендовать методы как взаимозаменяемые или взаимодополняющие.

3. В настоящее время большая часть линейных участков газопровода «Дашава–Киев» находится в эксплуатации около 55 лет. За это время, как следует из приведенных данных, поврежденность металла труб значительно увеличилась. Это обстоятельство, а также все возрастающий по мере эксплуатационной наработки темп роста поврежденности, свидетельствует о необходимости проведения срочных работ по тщательному диагностированию технического состояния данного трубопровода и принятию эффективных мер по обеспечению его надежности.

1. *Сосновский Л. А., Воробьев В. В.* Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали // Пробл. прочности. — 2000. — № 6. — С. 44–53.
2. *Комплексная оценка поврежденности металла действующих газопроводов / А. А. Лебедев, А. Я. Недосека, Н. Г. Чаусов,*

*Ин-т проблем прочности НАН Украины,
МГП «Индпром»,
Киев*

3. *С. А. Недосека, И. О. Богинич // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 1. — С. 8–12.*
3. *Патент 52107А/МКИ⁷, G 01 №3/00, G 01 №3/40.* Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання «Метод LM- твердості» А. О Лебедев., М. Р. Музика, Н. Л. Волчек. — Оpubл. 16.12.02. — Бюл. № 12.
4. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л.* Определение повреждаемости конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. — 2002. — № 4. — С. 5–12.
5. *Weibull W.* A statistical distribution function of wide applicability // J. of Appl. Mechanics. — 1951. — Vol 18. — №3. — P. 293–297.
6. *Гумбель Э.* Статистика экстремальных значений. — М: Мир. — 1965. — 320с.
7. *Дрозд М. С.* Определение механических свойств металла без разрушения. — М.: Металлургия. 1965. — С. 147–156.
8. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Патона Б. Е. — Киев. Изд.-во метод. литературы и наглядных пособий ТК-78. — 1996. — 140 с.
9. *Махутов Н. А., Зацаринный В. В., Базарас Ж. Л. и др.* Статистические закономерности малоциклового разрушения — М.: Наука. — 1989. — 253 с.

*Поступила в редакцию
10.04.2003*

В Техническом комитете Украины № 78 «ТДНК»

Технический комитет Украины по стандартизации № 78 "Техническая диагностика и неразрушающий контроль" ТКУ-78 «ТДНК» и Главный учебно-методический центр Госнадзорхрантруда Украины (ГУМЦ)

в 2003 г. приступили к совместной подготовке технических экспертов по новой специализации: «Выполнение работ по акустико-эмиссионному (АЭ) диагностированию на объектах котлонадзора, газонефтехимического комплекса и подъемных сооружений».

Разработан и утвержден соответствующий учебно-тематический план, рассчитанный на срок обучения 24 дня. Этот план предусматривает два тематических раздела: первый — посвящен специализированным вопросам экспертного обследования объектов повышенной опасности; второй — общим положениям по диагностированию; практике и промышленному использованию АЭ средств; изучению АЭ аппаратуры и систем; практическим занятиям с использованием основных средств технической диагностики.

**По вопросам организации групп подготовки экспертов
по АЭ диагностированию обращаться в ГУМЦ Госнадзорхрантруда Украины:
04060, г. Киев ул. Вавилова, 10А ГУМЦ
Тел./факс: 440-14-77**