

УДК 614.8

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И РЕСУРСА
БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА**

**ESTIMATION OF TECHNICAL CONDITION AND RESOURCE
OF TECHNOLOGICAL PIPELINES SAFE OPERATION BASED ON
ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC EFFECT**

И.Г. Хуснутдинова, М.Г. Баширов

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

Ivina G. Khusnutdinova, Mussa G. Bashirov

**Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation
e-mail: eapp@yandex.ru**

Аннотация. Более 30 % всех аварий на предприятиях нефтегазовой отрасли приходится на технологические трубопроводы. Разгерметизация технологических трубопроводов часто сопровождается выбросом углеводородов, что может привести к взрывам и пожарам. В настоящее время оценка соответствия технологических трубопроводов нефтегазовых производств требованиям промышленной безопасности производится с применением традиционных методов неразрушающего контроля. Данные методы позволяют выявлять и измерять параметры уже развитых дефектов. В зонах концентрации механических напряжений фактическое напряжение может достичь предела текучести и даже превысить его, в этих зонах создаются благоприятные условия для зарождения и развития дефектов структуры металла. Поэтому существует необходимость

выявления дефектов на раннем этапе их развития, в «преддефектном» состоянии металла, когда в структуре металла произошли необратимые изменения, которые впоследствии могут стать причиной разрушения трубопровода.

В статье для оценки технического состояния и ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов предложено применение передаточной функции локальной зоны контроля участка трубопровода, получаемой на основе использования электромагнитно-акустического эффекта. В качестве сигнала внешнего воздействия используется зондирующий сигнал, генерируемый электромагнитно-акустическим преобразователем, а откликом является донный акустический сигнал, отраженный от противоположной поверхности объекта контроля. Параметры передаточной функции – коэффициенты полиномов числителя и знаменателя, а соответственно и значения их корней – отражают совокупность комплекса электрических, магнитных и акустических свойств металла, характеризующих техническое состояние трубопровода. Анализ параметров передаточной функции позволяет идентифицировать их изменения, оценить техническое состояние и ресурс безопасной эксплуатации трубопровода.

Abstract. More than 30 % of all breakdowns in the oil and gas industry fall at technological pipelines. Technological pipelines depressurization is often accompanied by hydrocarbons release, which can lead to explosions and fires. Currently, the correspondence assessment of oil and gas production technological pipelines to industrial safety requirements is carried out using traditional non-destructive testing methods. These methods allow to detect and measure the existing developed defects parameters. In the concentration areas of the mechanical stress the actual stress can reach the yield point and even exceed it, in these areas of some favorable conditions for the origin and development of defects in the structure of the metal are appeared. Therefore, there is some need to identify some defects at an early stage of their development, in the «pre-

defect» metal state, when irreversible changes have occurred in the metal structure, which can subsequently cause the pipeline destruction.

In this article for the technical condition assessment and the safe operation resource of technological pipelines the transfer function application for control local zone of pipeline some site is offered which is received on the basis of electromagnetic-acoustic effect use. As external influence signal, a sounding signal generated by an electromagnetic-acoustic transducer is used, and the response is a bottom signal reflected from the opposite controlled object surface. The transfer function parameters – numerator coefficients and denominator polynomials, and, accordingly, the values of their roots, reflect the electrical, magnetic and acoustic properties complex of the metal characterizing the pipeline technical condition. The analysis of the transfer function parameters allows to identify their changes and to assess the technical condition and resource of the pipeline safe operation.

Ключевые слова: электромагнитно-акустический эффект, интегральный параметр безопасности, напряженно-деформированное состояние, ресурс, оценка риска аварий, потенциальный риск, технологические трубопроводы

Key words: electromagnetic-acoustic effect, integral safety parameter, stress-strain state, resource, risk assessment, potential risk, technological pipeline

Введение

Объекты нефтегазовой отрасли характеризуются повышенными показателями риска возникновения аварийных ситуаций. Более 30 % всех аварий на предприятиях нефтегазовой отрасли приходится на технологические трубопроводы [1]. В зависимости от времени эксплуатации отказы трубопроводов распределены следующим образом: от 7 до 10 лет – 10,4 %, от 11 до 15 лет – 16,8 %, от 16 до 20 лет – 26,2 %, от 21 до 25 лет – 20,8 %, от 26 до 30 лет – 15,8 %.

старше 20 лет – 29,2 %. Аварии на технологических трубопроводах часто сопровождаются взрывами и пожарами, долгосрочными остановами технологических процессов.

Результаты расследования аварий, связанных с технологическими трубопроводами, показывают, что при выполнении экспертизы промышленной безопасности не учитывалось старение металла трубопроводов, расчет остаточного ресурса проводился по утонению стенки труб при исходных механических свойствах металла. Также не учитывалось повышение механических напряжений в стенках трубопроводов из-за локальных изменений их толщины в процессе эксплуатации. Большая часть отказов технологических трубопроводов (разгерметизация) происходит в зонах концентрации механических напряжений и пластических деформаций, возникших из-за технологических дефектов, дефектов монтажа, очагов коррозионных повреждений, подвижек грунта [2]. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) является неотъемлемым этапом оценки технического состояния и ресурса трубопроводов. Практика показывает, что на стадии эксплуатации технологических трубопроводов недостаточно использование только расчетных методов определения НДС, обязательно необходимо использование физических методов и средств. Поэтому для обеспечения безопасности технологических трубопроводов при проведении экспертизы промышленной безопасности необходим переход от использования традиционных методов неразрушающего контроля к методам диагностики, позволяющим количественно оценивать напряженно-деформированное состояние, выявлять зарождение дефектов структуры металла и отслеживать их развитие на фоне напряженно-деформированного состояния. Одним из перспективных направлений для решения этой задачи является использование электромагнитно-акустического (ЭМА) эффекта, позволяющего бесконтактно сканировать объект контроля акустическими волнами и считывать информацию о его техническом состоянии.

Основная часть

В настоящее время оценка соответствия технологических трубопроводов нефтегазовых производств требованиям промышленной безопасности производится с применением традиционных методов неразрушающего контроля, позволяющих выявлять и измерять параметры уже развитых дефектов. В зонах концентрации механических напряжений фактическое напряжение может достичь предела текучести и даже превысить его, в этих зонах создаются благоприятные условия для зарождения и развития дефектов структуры металла. Поэтому существует необходимость выявления дефектов на раннем этапе их развития, в «преддефектном» состоянии металла, когда в структуре металла произошли необратимые изменения, которые впоследствии могут стать причиной разрушения трубопровода.

До последнего времени в нормативных документах эксплуатирующих организаций должным образом не отражалась необходимость контроля напряженно-деформированного состояния технологического оборудования. Однако с введением новых стандартов это положение изменилось [3]. В настоящее время ведутся интенсивные исследования и разработка методов и средств контроля НДС, основанных на различных физических принципах. Перспективным направлением для решения этой проблемы является использование ЭМА эффекта [4, 5].

Анализ публикаций по практическому использованию ЭМА эффекта показывает, что существующие ЭМА методы используют только информативные параметры акустической волны, анализируют изменение акустических свойств материала, т.е. информативный потенциал ЭМА эффекта используется не в полной мере [4, 5]. В данной статье предлагается в качестве интегрального параметра, характеризующего совокупность механических, акустических, магнитных и электрических свойств материала и соответствующих им параметров, использовать передаточную функцию объекта контроля. Передаточная функция

является математической моделью динамики объекта и представляет собой отношение приращения сигнала отклика объекта к приращению сигнала внешнего воздействия, записанное в операторной форме при нулевых начальных условиях. Это понятие, традиционно используемое в теории автоматического управления, в последние годы начало широко применяться и в других областях науки и техники. Например, в медицине передаточная функция сердца была использована для выявления и идентификации кардиологических заболеваний, в механике передаточную функцию применили для автоматического управления НДС сложных крупногабаритных металлических конструкций, контроля НДС элементов зданий, для определения предельного состояния металла оборудования, оценки содержания углерода и размеров зерна металлов [6-9].

Изменения в структуре металла, зарождение и развитие повреждений отражаются в изменении параметров передаточной функции – значений коэффициентов полиномов числителя и знаменателя и, соответственно, значений корней полиномов, поэтому анализ параметров передаточной функции позволяет идентифицировать эти изменения. Как известно, в общем виде передаточная функция любой системы или отдельных объектов в операторной форме может быть записана как [10]

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = K \frac{b_0 + b_1 \cdot p + \dots + b_m \cdot p^m}{a_0 + a_1 \cdot p + \dots + a_n \cdot p^n} = K \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (1)$$

где $Y(p)$ и $X(p)$ – приращения сигналов отклика и внешнего воздействия в операторной форме;

$B(p)$ и $A(p)$ – полиномы числителя и знаменателя;

K – коэффициент усиления;

a_i, b_i – коэффициенты полиномов.

Исследуемый объект контроля представляется в виде «черного ящика», на вход которого подается сигнал, генерируемый электромагнитно-акустическим преобразователем (ЭМАП), а откликом является донный акустический сигнал, отраженный от противоположной поверхности

объекта. На основании опыта предыдущих исследований [8, 9] в качестве математической модели локальной зоны контроля участка трубопровода в данной работе использована передаточная функция второго порядка без запаздывания.

Передаточная функция объекта может быть определена методами идентификации, позволяющими по временной характеристике сигнала отклика рассчитать её параметры – коэффициенты полиномов числителя и знаменателя. В отличие от классического понимания передаточной функции объекта как математической модели с постоянными параметрами, в данной работе передаточная функция рассматривается как интегральная характеристика, параметры которой изменяются при взаимосвязанном изменении механических, электрических, магнитных и акустических свойств объекта контроля.

Отслеживая изменение значений корней характеристического полинома (полинома знаменателя), или, что более наглядно, отслеживая миграцию их координат на комплексной плоскости, можно отслеживать изменение свойств объекта контроля, определять предельное состояние и оценивать остаточный ресурс. Для интегральной количественной оценки состояния объекта контроля использована площадь области комплексной плоскости, за пределы которой не должны выходить корни характеристического полинома при заданных эксплуатационных свойствах объекта. Координаты корней – наиболее близкого к оси мнимых значений $x_{\text{пред}}$ и наиболее отдаленного от оси вещественных значений $u_{\text{пред}}$, определенных при доведении объекта до предельного состояния при испытаниях, задают границы области заданных эксплуатационных свойств объекта D (рисунок 1) [11].

Координаты корней при исходном, исправном состоянии объекта $\{x_1, y_1\}$ совместно с границами области заданных эксплуатационных свойств D определяют границы области работоспособного состояния объекта D_1 (рисунок 1), которая характеризует удаленность исходного

состояния объекта от его предельного состояния, количественно её можно выразить формулой:

$$D_1 = \int_{x_{\text{пред}}}^{x_1} (\text{tg } \alpha \cdot x - y_1) dx, \quad (2)$$

где $\text{tg } \alpha = y_{\text{пред}}/x_{\text{пред}}$.

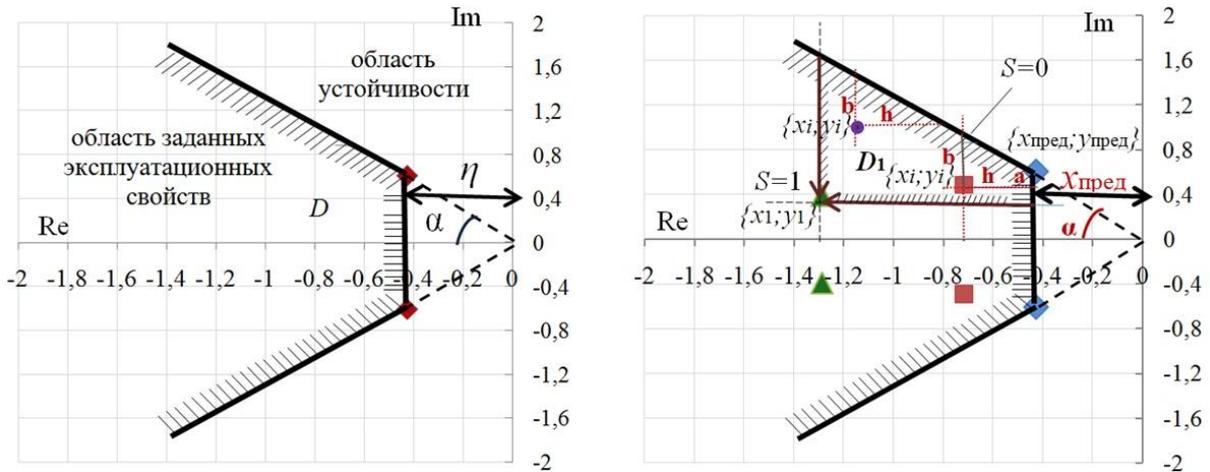


Рисунок 1. Оценка текущего технического состояния и ресурса трубопровода по координатам корней характеристического полинома

В процессе эксплуатации или при испытаниях координаты корней характеристического полинома $\{x_i, y_i\}$ мигрируют к границам области заданных эксплуатационных свойств D , и область работоспособного состояния объекта уменьшается от первоначального значения D_1 до значения 0 при достижении предельного состояния. Эта текущая область работоспособного состояния обозначается D_i , количественно её можно выразить формулой:

$$D_i = \int_{x_{\text{пред}}}^{x_i} (\text{tg } \alpha \cdot x - y_i) dx. \quad (3)$$

Отношение $S = D_i / D_1$, характеризующее техническое состояние и остаточный ресурс объекта, называется интегральным параметром безопасности. По мере истощения ресурса объекта его значение уменьшается от 1 до 0. Из-за симметрии области заданных

эксплуатационных свойств объекта относительно оси абсцисс в данной работе использованы только корни характеристического полинома с положительной мнимой частью.

Для экспериментальных исследований закономерностей взаимосвязи информативных параметров ЭМА сигнала с изменениями свойств металла технологических трубопроводов при статических и циклических нагрузках созданы установки, обобщенная структурная схема которых изображена на рисунке 2. Испытания в условиях квазистатического нагружения образцов проводились с использованием универсальной испытательной машины УММ-5 и компьютеризованной испытательной машины Walter + Bai, для испытания плоских образцов на малоцикловую усталость использовалась установка (патент № 2262682 РФ), разработанная на кафедре «Оборудование предприятий нефтехимии и нефтепереработки» ФГБОУ ВО «УГНТУ».

На основе анализа сортамента марок стали, применяемых для изготовления технологических трубопроводов, для проведения экспериментальных исследований выбраны стали марок СтЗсп, 09Г2С, 10 и изготовлены образцы плоского типа с различными геометрическими размерами согласно ГОСТ 25.502-79 и ГОСТ 1497-84.

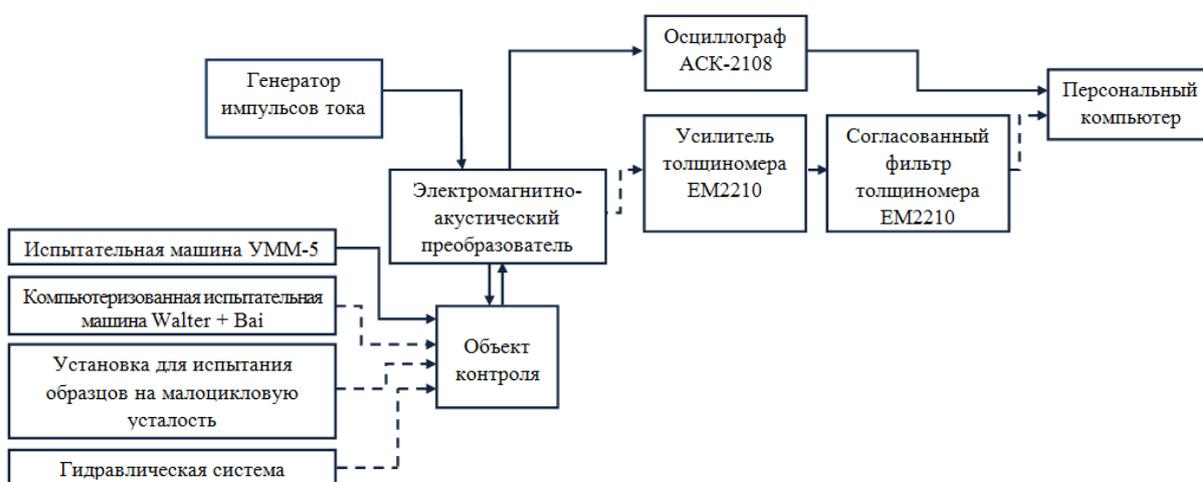


Рисунок 2. Обобщенная структурная схема экспериментальной установки

При проведении экспериментальных исследований использовался ЭМА толщиномер EM2210 компании ООО «НПО «Октанта» с программным обеспечением ScanView, позволяющий генерировать зондирующие акустические импульсы с оптимальными параметрами, осуществлять считывание и временную развёртку сигнала отклика для дальнейшей обработки компьютерной программой.

На рисунке 3 представлено изменение ЭМА сигнала при растяжении образцов из стали 09Г2С. Идентификация передаточной функции осуществляется по импульсной временной характеристике сигнала ЭМАП методом динамической идентификации с использованием компьютерной программы, разработанной на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «УГНТУ», которая позволяет при произвольном виде входного сигнала и отклика на него получить параметры передаточной функции [12].

На рисунке 4 изображена миграция координат корней характеристического полинома передаточной функции на комплексной плоскости при растяжении образцов из стали 09Г2С.

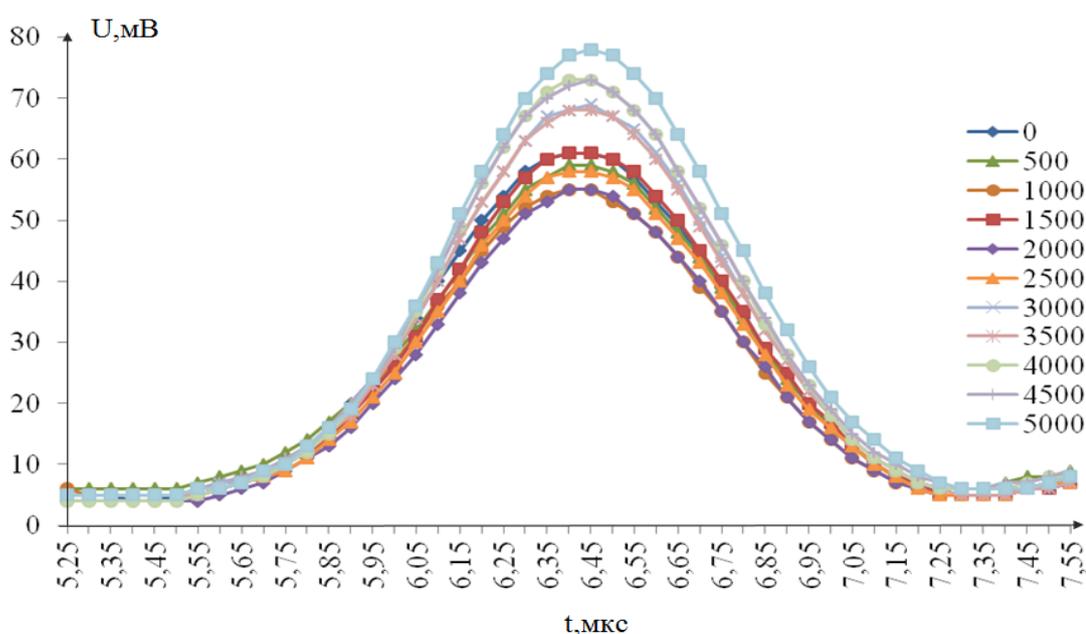


Рисунок 3. Изменение донного (отраженного) ЭМА сигнала при растяжении образца стали марки 09Г2С (0-5000 кгс)

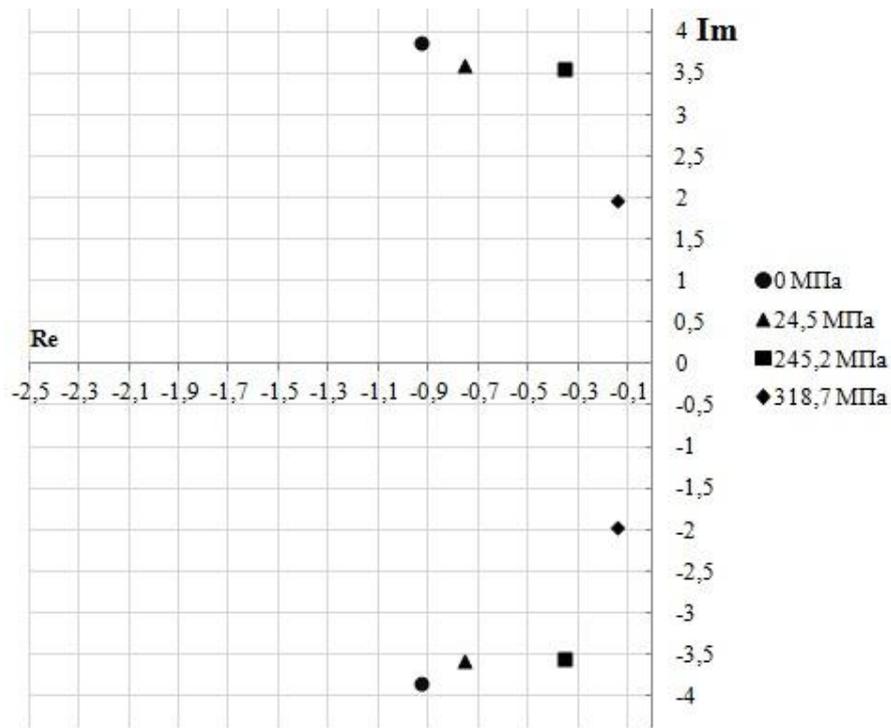


Рисунок 4. Миграция координат корней характеристического уравнения при увеличении статической нагрузки (09Г2С, по ГОСТ 1497-84, тип № 1)

По вычисленным значениям корней характеристического полинома рассчитывается интегральный параметр безопасности S , характеризующий техническое состояние объекта и его остаточный ресурс (рисунок 5).

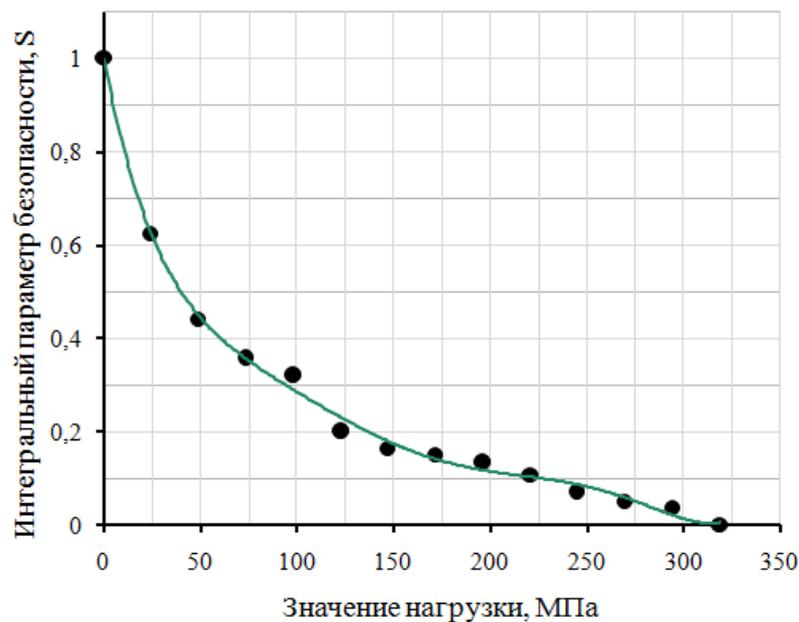


Рисунок 5. Изменение интегрального параметра безопасности S при действии статических нагрузок (сталь марки 09Г2С)

Переход к оценке остаточного ресурса в единицах измерения времени или в количестве циклов осуществляются согласно РД 03-421-01 и РД 26.260.004-91, при этом интегральный параметр безопасности S используется как параметр технического состояния. При действии статической нагрузки ресурс работоспособности металла технологического трубопровода определяется по формуле:

$$T = \frac{T_{\phi}}{(1 - S)}, \quad (4)$$

где S – интегральный параметр безопасности, характеризующий текущее техническое состояние металла технологического трубопровода;

T_{ϕ} – время эксплуатации трубопровода с момента его пуска, лет.

Ресурс остаточной работоспособности определяется по формуле:

$$T_{ост} = T - T_{\phi}, \quad (5)$$

где $T_{ост}$ – остаточный ресурс элемента, лет.

В соответствии с ГОСТ Р 55047-2012 «Техническая диагностика. Безэталонная калибровка средств измерений для диагностирования напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов. Общие требования» произведена калибровка ЭМА устройства с разработанным программным обеспечением на участке упругих деформаций диаграммы растяжения стали СтЗсп при гидравлическом испытании модели участка технологического трубопровода. Результаты калибровки ЭМА устройства сопоставлялись с результатами параллельной калибровки тензометра ИТЦ-03-32 с проволочными тензодатчиками.

На рисунке 6, а представлена установка для гидравлического испытания модели трубопровода. Модель трубопровода представляет собой цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 209 мм и толщиной стенки 10 мм. По результатам калибровки построены тарировочные кривые (рисунок 6, б). Для удобства сопоставления с результатами калибровки тензометра тарировочная кривая для ЭМА устройства построена в виде $(1 - S)$.

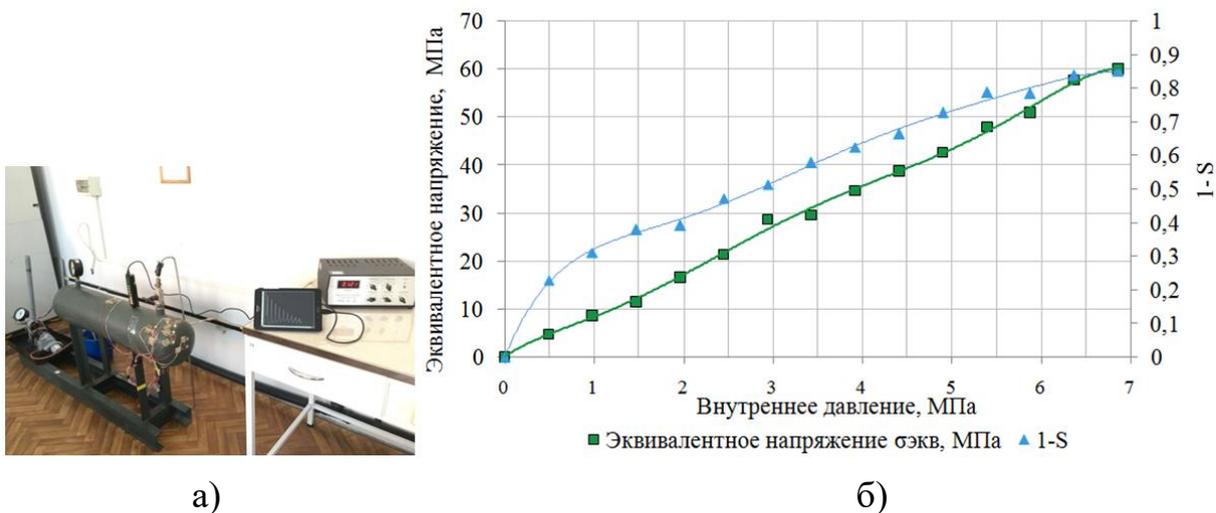


Рисунок 6. Тарировочные кривые ЭМА устройства и тензометра ИТЦ-03-32 при безэталоной калибровке ЭМА устройства с разработанным программным обеспечением

Для проверки результатов калибровки проводилось измерение напряжений в зоне 2, отстоящей на расстоянии 500 мм по образующей модели трубопровода от зоны 1. Измерения проводились при тех же значениях давления, что и в процессе тарировки. Максимальная погрешность определения предельного состояния металла трубопровода по значению параметра безопасности S , соответствующему пределу текучести, в сопоставлении с показаниями проволочного тензометра составила 5,4 %. Согласно ГОСТ Р 55047-2012 максимальная погрешность, не превышающая 10 %, свидетельствуют о достаточно высокой точности определения напряжений. При этом существенным преимуществом ЭМА метода является его бесконтактность.

Оценка технического состояния и остаточного ресурса технологических трубопроводов тесно связаны с безопасностью их эксплуатации. Необходимым условием обеспечения промышленной безопасности является количественная оценка потенциальной опасности при анализе риска аварий. Для оценки риска аварий используют показатели риска, одним из которых является потенциальный риск.

Использование методов, позволяющих получить больше информации о состоянии материала и выявить повреждения на ранней стадии развития,

снижает риск возникновения аварии. В качестве объекта для оценки эффективности разработанного метода использован технологический трубопровод установки обезвоживания и обессоливания нефти. Материал трубопровода – сталь СтЗсп, внутренний диаметр – 426 мм, толщина стенки по паспорту – 9 мм, длина трубопровода – 7,1 м, транспортируемая среда – жидкость, давление транспортируемой среды – 1,7 МПа. Разработанный метод (вариант 2) оценивался в сопоставлении с используемым в настоящее время для этих целей ультразвуковым методом контроля (вариант 1) с контактным пьезопреобразователем (ГОСТ 26266-90, дефектоскоп УСД-50). При оценке частоты разгерметизации трубопровода методом «дерева отказов» в качестве оценок вероятностей «исходных» событий использовались значения, представленные в нормативных документах. Результаты расчетов показывают, что потенциальный пожарный риск при применении бесконтактного ЭМА метода контроля уменьшается на 38,6 % (таблица 1).

Таблица 1. Перечень пожароопасных ситуаций и сценариев их развития

Наименование пожароопасной ситуации	Сценарий развития пожароопасной ситуации	Частота, год ⁻¹ (вариант 1)	Частота, год ⁻¹ (вариант 2)
Разгерметизация 50 мм	Пожар пролива	$1,151 \cdot 10^{-7}$	$5,803 \cdot 10^{-8}$
Разгерметизация 50 мм	Взрыв ТВС	$3,224 \cdot 10^{-9}$	$2,212 \cdot 10^{-9}$
Разгерметизация 50 мм	Пожар-вспышка	$1,401 \cdot 10^{-8}$	$7,004 \cdot 10^{-9}$
Разгерметизация 50 мм	Пожар пролива	$5,677 \cdot 10^{-8}$	$4,838 \cdot 10^{-8}$
Значение потенциального пожарного риска		$1,89 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$

Расчеты показателей рисков и потенциального риска выполнены в программной среде «PromRisk – расчет риска на производственных объектах» (лицензия Hardware ID: 23B88-07AE6-C729C-A18F3) в соответствии с «Методикой определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (утверждена приказом МЧС России № 404 от 10.07.2009, изменения от 14.12.2010) и другими нормативными

документами в области проведения анализа опасностей и оценки риска аварий для обеспечения требований промышленной безопасности.

Выводы

В статье рассмотрен подход к решению задачи повышения безопасности технологических трубопроводов на основе определения их технического состояния с использованием электромагнитно-акустического эффекта и метода динамической идентификации.

Для количественной оценки технического состояния и остаточного ресурса технологических трубопроводов из параметров передаточной функции сформирован интегральный параметр безопасности S , значения которого изменяются от 1 до 0 по мере исчерпания ресурса. Максимальная погрешность определения предельного состояния металла трубопровода по значению параметра безопасности S , соответствующему пределу текучести, в сопоставлении с показаниями проволочного тензметра составила 5,4 %. Согласно ГОСТ Р 55047-2012 максимальная погрешность, не превышающая 10 %, свидетельствуют о достаточно высокой точности определения напряжений. Разработаны программно-аппаратный комплекс (патент на полезную модель №169803, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617490) и методика для оперативного контроля технического состояния и оценки ресурса технологических трубопроводов на основе использования электромагнитно-акустического эффекта.

Оценка степени снижения риска аварии на примере разгерметизации технологического трубопровода установки обезвоживания и обессоливания нефти показала, что применение разработанного метода оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопровода позволяет снизить значение потенциального пожарного риска на 38 %.

Список используемых источников

1. Абросимов А.А. Экология переработки углеводородных систем: учебник для студентов и аспирантов вузов, обучающихся по хим.-технол. специальностям. М.: Химия, 2002. 608 с.
2. Шайбаков Р.А., Давыдова Д.Г., Жуков А.В., Журавлев Д.Б., Абдрахманов Н.Х., Марков А.Г. Основные аспекты оценки технического состояния технологических трубопроводов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. № 4. С. 258-270. Режим доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/ShaybakovRA/ShaybakovRA_1.pdf.
3. Дубов А.А. Контроль напряженно-деформированного состояния газопроводов при оценке их ресурса // Газовая промышленность. 2011. № 4. С. 41-43.
4. Щипаков Н.А. Применение электромагнитно-акустического способа возбуждения ультразвука для контроля механических напряжений // Сварка и диагностика. 2010. № 4. С. 55-56.
5. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Бялуга А.П. Взаимосвязь структуры и механических свойств инструментальной углеродистой стали со скоростью распространения ультразвуковых колебаний // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1992. № 2. С. 69-71.
6. Цибульский В.Р., Сергейчик О.И., Абрамов М.В. Методы получения передаточной функции на основе частотных характеристик ЭКГ // Вестник кибернетики. 2008. № 7. С. 79-85.
7. Управляемые конструкции и системы: методические указания / Н.П. Абовский, А.В. Максимов, Н.И. Марчук, В.И. Палагушкин, В.И. Савченко, Б.А. Стерехова. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 149 с.
8. Шарипкулова А.Т. Разработка метода оценки предельного состояния металла технологических трубопроводов по электромагнитным параметрам: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2009. 110 с.

9. Баширова Э.М. Оценка предельного состояния металла оборудования для переработки углеводородного сырья с применением электромагнитного метода контроля: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2005. 140 с.

10. Яковлев В.Б. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 567 с.

11. Репин П.Г., Самородов А.В., Талаев В.Л., Баширова Э.М. Электромагнитно-акустический метод контроля напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла технологического оборудования // Нефтепереработка и нефтехимия. 2018. № 10. С. 38-44.

12. Аязян Г.К., Ахметсафин Р.Д., Ахметсафина Р.З. Алгоритм идентификации линейных моделей с кратными запаздываниями методом моментов: сб. науч. тр. Уфа, 1989. С. 147-150.

References

1. Abrosimov A.A. *Ekologiya pererabotki uglevodorodnykh sistem: ucheb. dlya studentov i aspirantov vuzov, obuchayushchikhsya po khim.-tehnol. spetsial'nostyam* [The Ecology of Processing of Hydrocarbon Systems: Textbook for Undergraduate and Graduate Students of Universities of Chemical-Tehmol. Specialties]. Moscow, Khimiya Publ., 2002. 608 p. [in Russian].

2. Shaybakov R.A., Davydova D.G., Zhukov A.V., Zhuravlev D.B., Abdrakhmanov N.Kh., Markov A.G. Osnovnye aspekty otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya tekhnologicheskikh truboprovodov [Principal Aspects of the Industrial Pipelines Evaluation]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2013, No. 4, pp. 258-270. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/ShaybakovRA/ShaybakovRA_1.pdf. [in Russian].

3. Dubov A.A. Kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gazoprovodov pri otsenke ikh resursa [Control of the Stress-Strain State of Gas Pipelines in the Assessment of Their Resource] *Gazovaya promyshlennost' – Gas Industry*, 2011, No. 4, pp. 41-43. [in Russian].

4. Shchipakov N.A. *Primenenie elektromagnitno-akusticheskogo sposoba vzbuzhdeniya ul'trazvuka dlya kontrolya mekhanicheskikh napryazheniy* [The Application of Electromagnetic-Acoustic Method of Excitation of Ultrasound to Monitor the Mechanical Stresses] *Svarka i diagnostika – Welding and Diagnostics*, 2010, No. 4, pp. 55-56. [in Russian].

5. Muravyev V.V., Zuev L.B., Byaluga A.P. *Vzaimosvyaz' struktury i mekhanicheskikh svoystv instrumental'noy uglerodistoy stali so skorost'yu rasprostraneniya ul'trazvukovykh kolebaniy* [Interrelation of Structure and Mechanical Properties of Tool Carbon Steel with the Speed of Ultrasonic Vibrations Propagation]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol' – Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 1992, No. 2, pp. 69-71. [in Russian].

6. Tsibulsky V.R., Sergeichik O.I., Abramov M.V. *Metody polucheniya peredatochnoy funktsii na osnove chastotnykh kharakteristik EKG* [Methods of Obtaining Transfer Function Basing on Frequency Characteristics of Electrocardiogram]. *Vestnik kibernetiki – The Bulletin of Cybernetics*, 2008, No. 7, pp. 79-85. [in Russian].

7. Abovsky N.P., Maximov A.V., Marchuk N.I., Palagushkin V.I., Savchenko V.I., Sterekhova B.A. *Upravlyaemye konstruksii i sistemy: metodicheskie ukazaniya* [Managed the Design and System]. Krasnoyarsk, IPK SFU, 2009, 149 p. [in Russian].

8. Sharipkulova A.T. *Razrabotka metoda otsenki predel'nogo sostoyaniya metalla tekhnologicheskikh truboprovodov po elektromagnitnym parametram: dis. kand. tekhn. nauk* [Development of a Method for Assessing the Limiting State of the Metal of Process Pipelines by Electromagnetic Parameters: Dis. Kand. Engin. Sci.]. Ufa, 2009, 110 p. [in Russian].

9. Bashirova E.M. *Otsenka predel'nogo sostoyaniya metalla oborudovaniya dlya pererabotki uglevodorodnogo syr'ya s primeneniem elektromagnitnogo metoda kontrolya: dis. kand. tekhn. nauk* [Assessment of the Limit State of Metal Equipment for Processing of Hydrocarbon Raw Materials Using Electromagnetic Control Method: Dis. Kand. Engin. Sci.]. Ufa, 2005, 140 p. [in Russian].

10. Yakovlev V.B. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 567 p. [in Russian].
11. Repin P.G., Samorodov A.V., Talaev V.L., Bashirova E.M., Khusnutdinova I.G. *Elektromagnitno-akusticheskiy metod kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i povrezhdennosti metalla tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Electromagnetic-Acoustic Control Method of Stress-Strain State and Damage of Metal of Technological Equipment]. *Neftepererabotka i neftekhimiya – Oil Refining and Petrochemistry*, 2018, No. 10, pp. 38-44. [in Russian].
12. Ayazyan G.K., Akhmetsafin R.D., Akhmetshina R.Z. *Algoritm identifikatsii lineynykh modeley s kratnymi zapazdyvaniyami metodom momentov* [Algorithm for Identification of Linear Models with Multiple Delays by the Method of Moments]. Ufa, 1989, pp. 147-150. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Хуснутдинова Ильвина Гамировна, старший преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», ФГБОУ ВО УГНТУ, филиал в г. Салавате, Российская Федерация

Ilvina G. Khusnutdinova, Senior Lecturer of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, USPTU, Branch, Salavat, Russian Federation

e-mail: ilvina011@mail.ru

Баширов Мусса Гумерович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» УГНТУ, филиал в г. Салавате, Российская Федерация

Mussa G. Bashirov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, USPTU, Branch, Salavat, Russian Federation

e-mail: eapp@yandex.ru