

UDC 534.113

**SCALING DETECTION IN A PIPELINE WITH FLUID UNDER
PRESSURE USING NATURAL FREQUENCIES OF FLEXURAL
VIBRATIONS**

**ДИАГНОСТИКА ТРУБОПРОВОДА С ОТЛОЖЕНИЯМИ НА
СТЕНКАХ И С ЖИДКОСТЬЮ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПО
СОБСТВЕННЫМ ЧАСТОТАМ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

A.G. Khakimov

**Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Scientific Centre, Russian Academy
of Sciences, Ufa, Russian Federation**

ХАКИМОВ А.Г.

**ФГБУН Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН,
г. Уфа, Российская Федерация**

e-mail: hakimov@anrb.ru

Abstract. Pipelines can form scale deposits on their walls. Erosion-corrosion processes in pipelines are characterized by the fact that deposition of corrosion products in some of their portions occurs simultaneously with wall thinning in the others.

In this paper consideration is given to natural frequencies of flexural vibrations in a pipeline clamped at both ends and subjected to the action of tension force. The pipeline has wall scale deposits and is filled with fluid under pressure. The scale deposits are supposed to be uniformly distributed on the inner surface of the pipeline. Here, the Kirchhoff's equation for flexural vibrations is applied. The frequency equation has been derived from the equation that dictates the type of flexural vibrations and also the boundary conditions for a pipeline clamped at its ends. Solutions have been found to the

primal problem to determine the first and the second natural frequencies of flexural vibrations in the pipeline for the given scale density in the pipeline, axial force, wall thickness, inside pressure of the pipeline and uniform scale thickness on the pipe wall as well as to the inverse problem to determine scale density on the pipe wall and deposition thickness using two natural frequencies of flexural vibrations in the pipeline.

It has been found that an increase in the density of scale deposits on the pipe wall results in smaller natural frequencies of pipe flexural vibrations. Besides, the research has shown that a reduction in the pipe inside area or an increase in the scale thickness results in smaller natural frequencies of pipe flexural vibrations. Using two natural frequencies of pipe flexural vibrations we can determine the density of scale deposits on the pipe wall and pipe inside area or scale thickness.

The investigation outcomes can be applied to assess axial loading and pipe wall thickness using two natural frequencies of flexural vibrations.

Аннотация. Трубопроводы могут содержать на стенках отложения. Механизм эрозионно-коррозионного износа трубопроводов характеризуется тем, что одновременно с утонением стенок на одних участках происходит формирование отложений продуктов коррозии на других.

В статье исследуются собственные частоты изгибных колебаний защемленного по краям трубопровода, находящегося под действием растягивающей силы. Трубопровод имеет отложения на стенках и жидкость под давлением. Предполагается, что отложения распределены по внутренней поверхности трубопровода равномерно. Используется уравнение изгибных колебаний трубопровода по модели Кирхгоффа. На основе уравнения, определяющего форму изгибных колебаний, и граничных условий для защемленного по краям трубопровода получено частотное уравнение. Решена прямая задача для определения первой и второй собственных частот изгибных колебаний трубопровода для

заданных: плотности отложений в трубопроводе, осевого усилия, толщины стенки трубы, давления внутри трубопровода, толщины равномерных отложений на стенке трубопровода и обратная задача по определению по двум собственным частотам изгибных колебаний трубы плотности отложений на стенке трубы и толщины отложений.

Получено, что с увеличением плотности отложений на стенке трубы происходит уменьшение собственных частот изгибных колебаний трубы. Установлено, что с уменьшением площади в свету трубы или увеличением толщины отложений происходит также уменьшение собственных частот изгибных колебаний трубы. По двум собственным частотам изгибных колебаний трубы можно определить плотность отложений на стенке трубы и остаточную площадь в свету трубы или толщину отложений.

Результаты работы могут быть применены для определения плотности отложений на стенке трубы и остаточной площади в свету трубы по двум собственным частотам изгибных колебаний.

Key words: scaled pipeline, flexural vibrations, natural frequencies, pipe inside area, density of scale deposits, primal and inverse problems.

Ключевые слова: трубопровод, изгибные колебания, собственные частоты, площадь в свету трубы, плотность отложений, прямая и обратная задачи.

Introduction

In the extended systems such as long-distance pipelines, some of their portions can be inaccessible for visual examination and diagnostic instrument test [1]. There are many research works on failure detection in the rod systems reviewed, for example, in [2-4]. Paper [5] describes a non-destructive method for detecting gas pipe wall thickness based on electromagnetic flux leakage and gives an overview of the subject. Paper [6] proposes the types to represent

known dependences that make it possible to directly calculate the desired pipe wall thickness. Paper [7] presents an algorithm for finding the mathematical expectation of the longitudinal crack length in a defective pipe in the case that the standard reliability level of the gas pipeline is preserved. The solution has been obtained for the condition that destruction viscosity of pipe steel, compressive force, gas pressure, linear expansion coefficient, Young's modulus, wall temperature gradient, pipe diameter and thickness are normally distributed. Paper [8] considers the determination of fluid density or axial moment of inertia in the cross section and internal pressure using natural frequencies of flexural vibrations in a pipeline. Pipelines can form scale deposits on their walls; for example, paper [9] analyzes erosion-corrosion damage in the elements of pipeline systems at the nuclear power plants with RBMK-1000 reactors. It is shown that the mechanism for erosion corrosion is characterized by the fact that deposition of corrosion products in some of their portions occurs simultaneously with wall thinning in the others. Based on the equations and methods of multiphase mechanics, paper [10] addresses the simulation of hydrodynamic, thermophysical, heat and mass exchange processes that take place as natural gas flows through the horizontal pipeline with consideration for gas hydrate deposition on its inner walls. A numerical investigation has been performed to determine the effect of some factors on hydrate formation. Paper [11] deals with the study of paraffin wax deposition in seasonally pigged pipelines. This paper considers natural frequencies of flexural vibrations in a pipeline having scale deposits on its walls and filled with pressurized fluid under the action of tension force and gives the solution to the inverse problem of determining scale thickness and pipe inside area using two natural frequencies of flexural vibrations.

Statement of the problem

The research is focused on natural frequencies of flexural vibrations in a pipe clamped at its ends that have scale deposits on its walls and is filled with

pressurized fluid under the action of tension force. It is necessary to determine the scale density and the pipe inside area using natural frequencies of flexural vibrations. The scale deposits are supposed to be uniformly distributed on the inner surface of the pipeline.

The equation of the pipe flexural vibrations based on the Kirchhoff's model has the form:

$$EJ \frac{\partial^4 w_*}{\partial x^4} - (T - P_i F_i) \frac{\partial^2 w_*}{\partial x^2} + [\rho F + \rho_i F_i + \rho_s (F_{i0} - F_i)] \frac{\partial^2 w_*}{\partial t^2} = 0,$$

where E , ρ , J , F are the elasticity modulus, density, axial moment of inertia and cross section area of the pipeline, ρ_i , P_i , F_i , F_{i0} , are the density and pressure of the fluid inside the pipeline, inside area of the pipeline with and without scale deposits, ρ_s is the density of the deposits, T is the tension force in the pipeline, w_* is the deflection of the pipeline, x is the coordinate directed along the axis of the pipeline, t is the time. The equation determining the shape of flexural vibrations in the pipeline is written down as:

$$\frac{\partial^4 w_*}{\partial x^4} - \frac{T - P_i F_i}{EJ} \frac{\partial^2 w_*}{\partial x^2} - \frac{[\rho F + \rho_i F_i + \rho_s (F_{i0} - F_i)] \omega^2}{EJ} w_* = 0, \quad (1)$$

$$F_i = \pi R_i^2, \quad F_{i0} = \pi R_{i0}^2, \quad F = \pi [(R_{i0} + h)^2 - R_{i0}^2], \quad J = \pi [(R_{i0} + h)^4 - R_{i0}^4] / 4,$$

where ω is the frequency, R_i , R_{i0} is the internal radius of the pipeline with and without scale deposits, h , L is the pipe wall thickness and length.

On measuring the coordinate x from the point of fixation, let us write down the boundary conditions for the pipe clamped at its ends:

$$w_* = 0, \quad \frac{\partial w_*}{\partial x} = 0 \quad (x = 0, L). \quad (2)$$

Using the following notations:

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad w = \frac{w_*}{L}, \quad p = \frac{(T - P_i F_i) L^2}{2EJ}, \quad \lambda = L^4 \sqrt{\frac{[\rho F + \rho_i F_i + \rho_s (F_{i0} - F_i)] \omega^2}{EJ}},$$

let us give the general solution to equation (1) and boundary conditions (2) in the form:

$$w = A \cos\left(\xi \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p}\right) + B \sin\left(\xi \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p}\right) +$$

$$+ C \operatorname{ch}\left(\xi \sqrt{p + \sqrt{p^2 + \lambda^4}}\right) + D \operatorname{sh}\left(\xi \sqrt{p + \sqrt{p^2 + \lambda^4}}\right),$$

$$w_1 = 0, \frac{\partial w}{\partial \xi} = 0 \quad (\xi = 0, 1). \quad (3)$$

Boundary conditions (3) in expanded form are written down as:

$$A + C = 0,$$

$$B \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} + D \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} = 0,$$

$$A \cos \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} + B \sin \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} +$$

$$+ C \operatorname{ch} \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} + D \operatorname{sh} \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} = 0,$$

$$\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} \cdot \left(-A \sin \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} + B \cos \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p}\right) +$$

$$+ \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} \cdot \left(C \operatorname{sh} \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} + D \cdot \operatorname{ch} \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p}\right) = 0.$$

In order that A, B, C, D do not vanish simultaneously, the determinant of the essential matrix should be zero. This condition gives the frequency equation:

$$\lambda^2 \left(1 - \cos \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} \cdot \operatorname{ch} \sqrt{p + \sqrt{p^2 + \lambda^4}}\right) +$$

$$+ p \sin \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} \cdot \operatorname{sh} \sqrt{p + \sqrt{p^2 + \lambda^4}} = 0.$$

Thus, the simplest model of a pipeline given above has the parameters p and λ that depend on the tension force in the pipe T , wall thickness h , density ρ_i and fluid pressure P_i inside the pipeline, scale density ρ_s and inside cross-section

area F_i . Let us consider in detail the effect and determination of only the latter two factors using natural frequencies of flexural vibrations.

Primal problem

Calculations have been performed for the following pipeline parameters: the modulus of elasticity $E = 2.0 \cdot 10^{11}$ N/m², the density of the pipe material $\rho = 7800$ kg/m³, the scale density of the pipeline $\rho_s = 2000$ kg/m³, the inner radius of the pipeline without wall scale deposits $R_{i0} = 0.259$ m, the inner radius of the pipeline with wall scale deposits $R_i = 0.25$ m, $h = 5$ mm, the axial force $T = 0$, the inside pressure $P_i = 0.1$ MPa, the pressure of the fluid inside the pipe $\rho_i = 800$ kg/m³ and the length of the pipeline between the supports $L = 25$ m. The solution to the primal problem for the pipe with the given parameters shows the first and the second natural frequencies of the pipeline to be $f_1 = 2.665$ Hz, $f_2 = 7.396$ Hz. Figure 1 demonstrates the dependences of the first (fragments *a*, *c*) and the second (fragments *b*, *d*) natural frequencies of flexural vibrations in the pipeline on the scale density in the pipeline ρ_s with the axial force $T = 0$, the wall thickness $h = 5$ mm under the inside pressure $P_i = 0$ MPa (fragments *a*, *b*) and 0.5 MPa (fragments *c*, *d*), the uniform deposition thickness on the pipe walls being 9; 19; 29 mm (curves 1-3, respectively). Figure 1 shows that an increase in the scale density on the pipe wall results in reducing natural frequencies of natural vibrations. It should also be noted that the intersection of the curves in Figures 1 *a*, *b* occurs when the density of the scale density on the pipe is $\rho_s = 800$ kg/m² with the inside pressure $P_i = 0$ MPa; in the case that the inside pressure $P_i = 0.5$ MPa; the intersection point of the curves is displaced to higher density values of the scale density on the pipe. Figure 2 gives the dependences of the first (fragment *a*) and the second (fragment *b*) natural frequencies of flexural vibrations in the pipeline on the inside cross-section area of the pipeline F_i having scale deposits with the axial force $T = 9$, the wall thickness $h = 0.5$ mm, the inside pressure of the pipe $P_i = 0.5$ MPa and the scale density in the pipeline

$\rho_s = 1500; 200; 2500 \text{ kg/m}^2$ (curves 1-3, respectively). An increase in the natural frequencies of the pipe flexural vibrations occurs with an increase in the inside cross-section area of the pipeline having scale deposits F_i or with a decrease in the thickness of deposition.

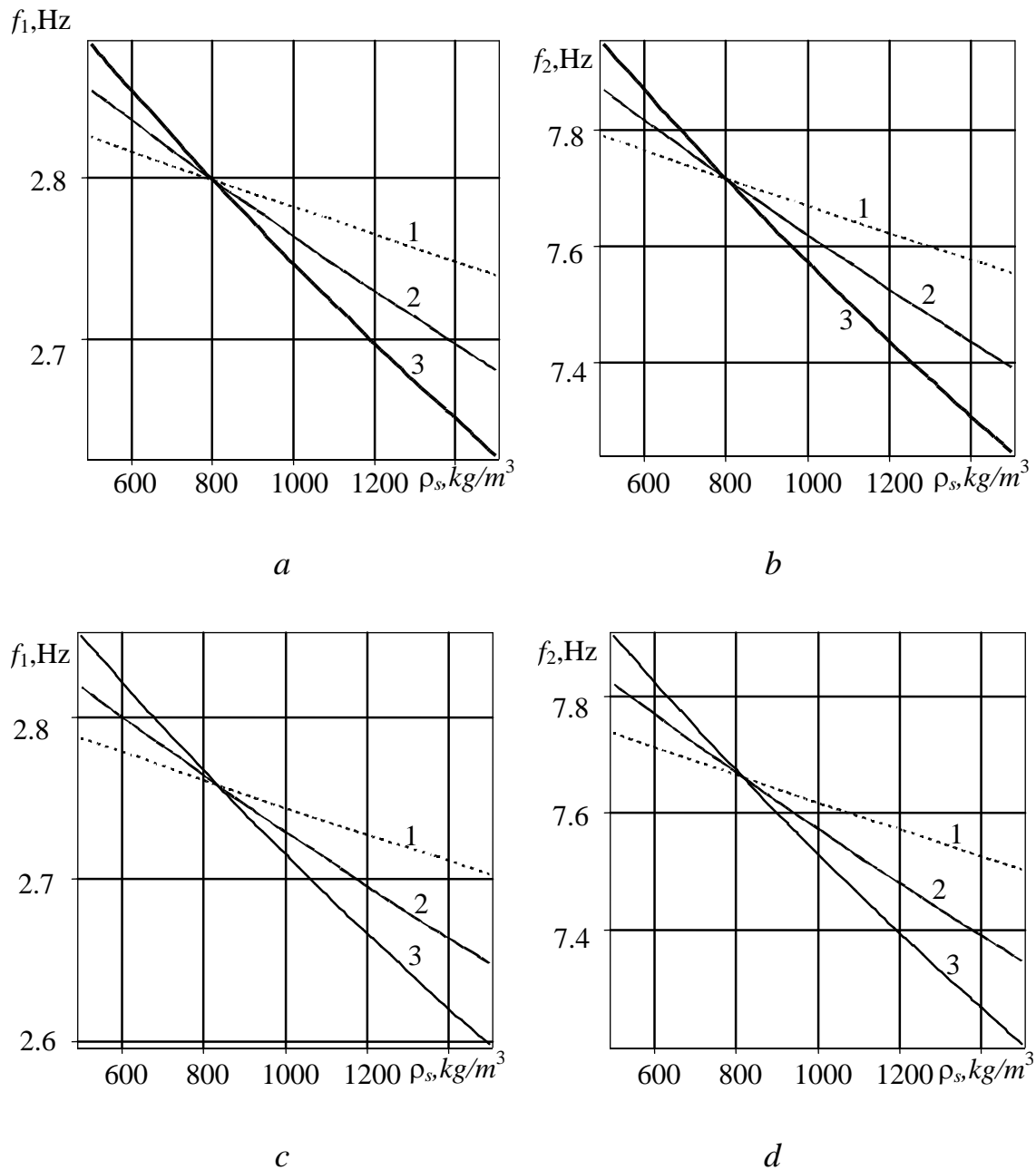


Figure 1. Dependences of the first (fragments *a*, *c*) and the second (fragments *b*, *d*) natural frequencies of flexural vibrations in the pipeline on the scale density of the pipeline ρ_s with the axial force $T = 0$, wall thickness $h = 5 \text{ mm}$, inside pressure $P_i = 0 \text{ MPa}$ (fragments *a*, *b*), 0.5 MPa (fragments *c*, *d*) and uniform scale thickness on the pipe walls 9; 19; 29 mm (curves 1-3, respectively).

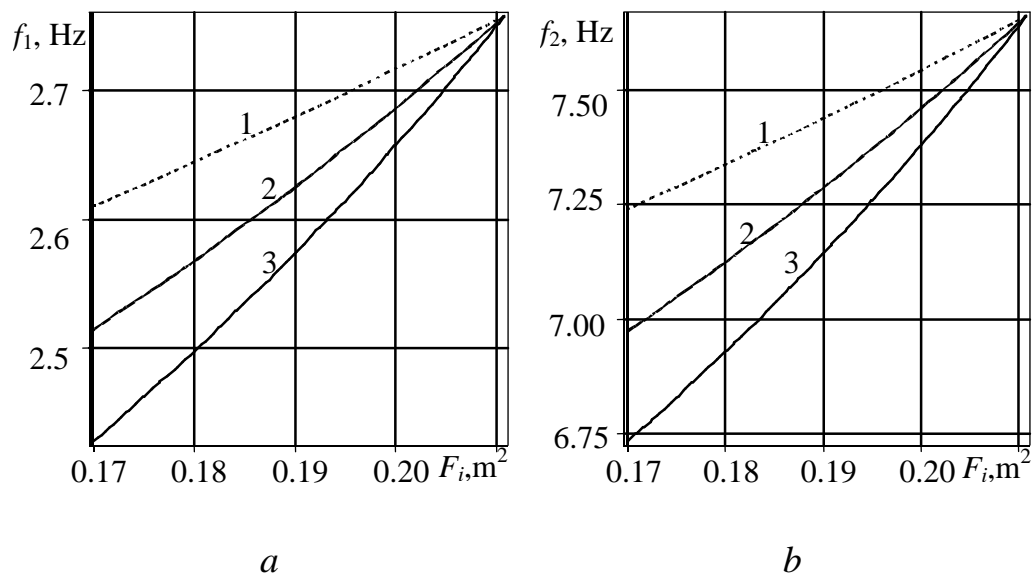


Figure 2. Dependences of the first (fragment *a*) and the second (fragment *b*) natural frequencies of flexural vibrations in the pipeline on the inside cross-section area of the scaled pipeline F_i with the axial force $T = 0$, wall thickness $h = 5$ mm, inside pressure $P_i = 0.5$ MPa and scale density $\rho_s = 1500; 2000; 2500$ kg/m² (curves 1-3, respectively)

Inverse problem

The solution to the inverse problem for the pipeline with the given parameters and the wall thickness $h = 5$ mm, the axial force $T = 0$, the inside pressure of the pipeline $P_i = 0.5$ MPa, the density of the fluid inside the pipe $\rho_i = 800$ kg/m³ at the natural frequencies of flexural vibrations $f_1 = 2.660$ Hz and $f_2 = 7.375$ Hz shows that the inside cross-section area $F_i = 0.164$ m² and the the scale density in the pipeline $\rho_s = 1213.549$ kg/m². Figure 3 demonstrates the dependences of the first frequency of flexural vibrations f_1 on the scale density in the pipeline ρ_s (fragment *a*) and the inside cross-section area of the scaled pipeline F_i (fragment *b*) for different frequencies of natural vibrations f_2 : 7.375 Hz – curve 1; 7.380 Hz – 2; 7.385 Hz – 3.

Thus, the investigation results show that using two frequencies of flexural vibrations we can also determine the scale density in the pipeline ρ_s and the inside cross-section area of the scaled pipeline F_i .

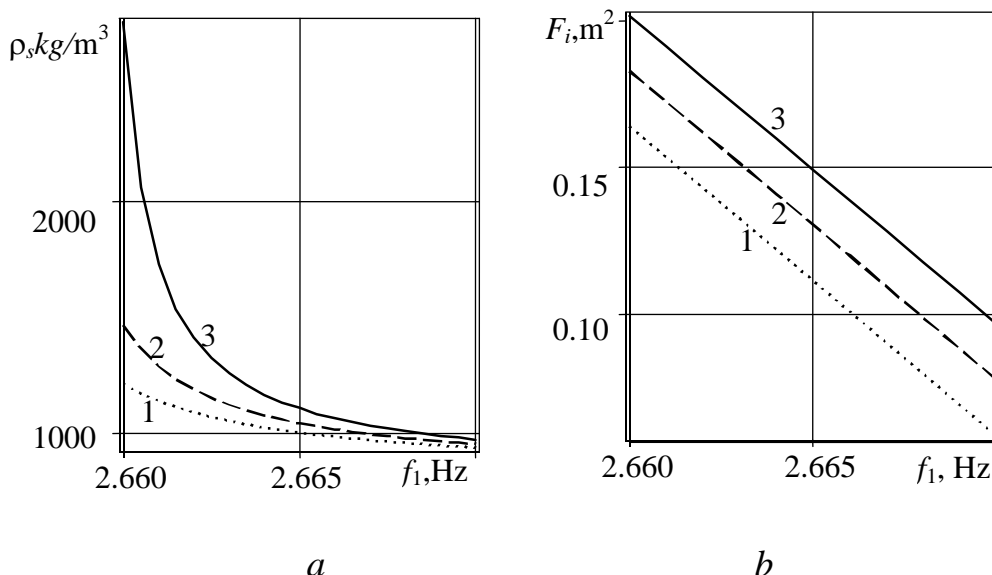


Figure 3. Dependences of the first frequency of flexural vibrations f_1 on the scale density in the pipeline ρ_s (fragment *a*) and the inside cross-section area of the scaled pipeline F_i (fragment *b*) for different frequencies of natural vibrations f_2 : 7.375 Hz – curve 1; 7.380 Hz – 2; 7.385 Hz – 3

Conclusions

On the basis of the proposed model, we have derived the frequency equation that connects the parameters of the pipeline clamped at both ends, subjected to the action of tension force, having wall scale deposits and filled with fluid under pressure.

The primal problem has been solved to determine the first and the second natural frequencies of flexural vibrations in the pipeline for the given scale density in the pipeline, axial force, wall thickness, inside pressure of the pipeline and uniform scale thickness on the pipe wall as well as to the inverse problem to determine scale density on the pipe wall and deposition thickness using two natural frequencies of flexural vibrations in the pipeline.

It has been found that an increase in the scale density on the pipe wall results in reducing natural frequencies of the pipe flexural vibrations. It has also been obtained that an increase in the inside cross-section area of the scaled pipeline or a decrease in the thickness of deposition results in an increase in natural frequencies of the pipe flexural vibrations. Using two frequencies of

flexural vibrations we can determine the scale density in the pipeline and its inside cross-section area.

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Projects 14-01-97010-povolzhie_a, 14-01-97013-povolzhie_a, 14-01-00740_a).

Введение

В протяженных объектах типа магистральных трубопроводных систем не все участки могут быть доступны для визуального осмотра и приборного диагностирования [1]. Проблемам диагностики дефектов в стержневых системах посвящено много работ, обзор которых можно найти, например, в [2-4]. В [5] представлен способ неразрушающего контроля толщины стенки газопровода, основанный на методе магнитного поля рассеяния и дается обзор работ по данной теме. В [6] предложены формы представления известных зависимостей, позволяющие непосредственно рассчитать необходимую толщину стенки труб. В статье [7] разработан алгоритм, позволяющий найти математическое ожидание длины продольной трещины дефектной трубы, при которой сохраняется нормативный безопасный уровень надежности газопровода. Решение получено для условия, когда вязкость разрушения трубной стали, сжимающее усилие, давление газа, коэффициент линейного расширения, модуль Юнга, температурный перепад стенки трубы, ее диаметр и толщина нормально распределены. В [8] определяется плотность жидкости или осевой момент инерции поперечного сечения и внутреннее давление по собственным частотам изгибных колебаний трубопровода. Трубопроводы могут содержать на стенках отложения, например, в [9] приведен анализ эрозионно-коррозионного износа элементов трубопроводных систем на АЭС с РБМК-1000. Показано, что механизм эрозионно-коррозионного износа характеризуется тем, что одновременно с

утонением стенок трубопроводов на одних участках происходит формирование отложений продуктов коррозии на других, а в [10] на основе уравнений и методов механики многофазных сред моделируются гидродинамические, теплофизические и тепломассобменные процессы, происходящие при течении природного газа в горизонтальном трубопроводе с учетом образующихся на внутренних стенках канала отложений газовых гидратов. Проведено численное исследование влияния некоторых факторов на процесс гидратообразования. Исследованию отложений парафина в трубопроводах, подвергаемых сезонной чистке посвящена работа [11]. Здесь исследуются собственные частоты изгибных колебаний трубопровода с отложениями на стенках и с жидкостью под давлением, находящейся под действием растягивающей силы. Решена обратная задача определения плотности отложений и площади в свету трубы по двум собственным частотам изгибных колебаний.

Постановка задачи

Исследуются собственные частоты изгибных колебаний трубопровода с отложениями на стенках и с жидкостью под давлением, находящейся под действием растягивающей силы и заземленной по краям. Требуется определить плотность отложений и площадь в свету трубы по собственным частотам изгибных колебаний. Предполагается, что отложения распределены по внутренней поверхности трубопровода равномерно.

Уравнение изгибных колебаний трубопровода по модели Кирхгоффа имеет вид:

$$EJ \frac{\partial^4 w_*}{\partial x^4} - (T - P_i F_i) \frac{\partial^2 w_*}{\partial x^2} + [\rho F + \rho_i F_i + \rho_s (F_{i0} - F_i)] \frac{\partial^2 w_*}{\partial t^2} = 0,$$

где E , ρ , J , F – модуль упругости, плотность, осевой момент инерции и площадь поперечного сечения трубопровода, ρ_i , P_i , F_i , F_{i0} , – плотность и

давление жидкости внутри трубопровода, площадь сечения в свету трубопровода с отложениями и без отложений, ρ_s – плотность отложений, T – усилие растяжения в трубопроводе, w_* – прогиб трубопровода, x – координата, направленная по оси трубопровода, t – время. А уравнение, определяющее форму изгибных колебаний трубопровода, записывается:

$$\frac{\partial^4 w_*}{\partial x^4} - \frac{T - P_i F_i}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w_*}{\partial x^2} - \frac{[\rho F + \rho_i F_i + \rho_s (F_{i0} - F_i)] \omega^2}{EJ} w_* = 0, \quad (1)$$

$$F_i = \pi R_i^2, F_{i0} = \pi R_{i0}^2, F = \pi [(R_{i0} + h)^2 - R_{i0}^2], J = \pi [(R_{i0} + h)^4 - R_{i0}^4] / 4,$$

где ω – частота, R_i, R_{i0} – внутренний радиус трубопровода с отложениями и без отложений, h, L – толщина стенки и длина трубопровода.

Отсчитывая координату x от точки крепления, запишем граничные условия для заземленного по краям трубопровода:

$$w_* = 0, \frac{\partial w_*}{\partial x} = 0 \quad (x = 0, L). \quad (2)$$

Пользуясь в дальнейшем обозначениями:

$$\xi = \frac{x}{L}, w = \frac{w_*}{L}, p = \frac{(T - P_i F_i) L^2}{2EJ}, \lambda = L \sqrt{\frac{[\rho F + \rho_i F_i + \rho_s (F_{i0} - F_i)] \omega^2}{EJ}},$$

общее решение уравнения (1) и граничные условия (2) представим в виде:

$$w = A \cos\left(\xi \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p}\right) + B \sin\left(\xi \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p}\right) + C \operatorname{ch}\left(\xi \sqrt{p + \sqrt{p^2 + \lambda^4}}\right) + D \operatorname{sh}\left(\xi \sqrt{p + \sqrt{p^2 + \lambda^4}}\right),$$

$$w_1 = 0, \frac{\partial w}{\partial \xi} = 0 \quad (\xi = 0, 1). \quad (3)$$

Граничные условия (3) в развернутом виде записываются:

$$A + C = 0,$$

$$\begin{aligned}
 & B\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} + D\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} = 0, \\
 & A\cos\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} + B\sin\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} + \\
 & + C\operatorname{ch}\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} + D\operatorname{sh}\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} = 0, \\
 & \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} \cdot \left(-A\sin\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} + B\cos\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} \right) + \\
 & + \sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} \cdot \left(C\operatorname{sh}\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} + D \cdot \operatorname{ch}\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} + p} \right) = 0.
 \end{aligned}$$

Для того, чтобы A , B , C , D не были равны нулю одновременно, необходимо, чтобы определитель основной матрицы был равен нулю. Это условие дает частотное уравнение:

$$\begin{aligned}
 & \lambda^2 \left(1 - \cos\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} \cdot \operatorname{ch}\sqrt{p + \sqrt{p^2 + \lambda^4}} \right) + \\
 & + p \sin\sqrt{\sqrt{p^2 + \lambda^4} - p} \cdot \operatorname{sh}\sqrt{p + \sqrt{p^2 + \lambda^4}} = 0.
 \end{aligned}$$

Таким образом, в приведенной простейшей модели трубопровода фигурируют параметры p и λ , которые зависят от усилия растяжения в трубе T , толщины стенки трубопровода h , плотности ρ_i и давления P_i жидкости внутри трубопровода, плотности отложений ρ_s , площади сечения в свету трубопровода F_i . Подробнее остановимся на влиянии и определении только последних двух факторов по собственным частотам изгибных колебаний.

Прямая задача

Расчеты проведены для следующих параметров трубы: модуль упругости материала $E = 2,0 \cdot 10^{11}$ Н/м², плотность материала трубы $\rho = 7800$ кг/м³, плотность отложений в трубопроводе $\rho_s = 2000$ кг/м³, внутренний радиус трубопровода без отложений на стенках $R_{i0} = 0,259$ м, внутренний радиус трубопровода с отложениями на стенках $R_i = 0,25$ м,

толщина стенки трубопровода $h = 5$ мм, осевое усилие $T = 0$, давление внутри трубопровода $P_i = 0,1$ МПа, плотность жидкости в трубопроводе $\rho_i = 800$ кг/м³, длина трубопровода между опорами $L = 25$ м. Решение прямой задачи для трубы с вышеприведенными параметрами дает, что первая и вторая собственные частоты трубопровода $f_1 = 2,665$ Гц, $f_2 = 7,396$ Гц. На рисунке 1 даются зависимости первой (фрагменты *a, в*), второй (фрагменты *б, г*) собственных частот изгибных колебаний трубопровода от плотности отложений в трубопроводе ρ_s при осевом усилии $T = 0$, толщине стенки трубы $h = 5$ мм при давлении внутри трубопровода $P_i = 0$ (фрагменты *a, б*); $0,5$ МПа (фрагменты *в, г*) при толщине равномерных отложений на стенке трубопровода 9; 19; 29 мм (кривые 1-3, соответственно). Из рисунка 1 видно, что с увеличением плотности отложений на стенке трубы происходит уменьшение собственных частот изгибных колебаний. Также отметим, что пересечение кривых на рисунках 1, *a, б* происходит при плотности отложений внутри трубопровода $\rho_s = 800$ кг/м² при давлении внутри трубопровода $P_i = 0$ МПа, а при давлении внутри трубопровода $P_i = 0,5$ МПа точка пересечения кривых смещается в сторону большей плотности отложений внутри трубопровода. На рисунке 2 даются зависимости первой (фрагмент *a*), второй (фрагмент *б*) собственных частот изгибных колебаний трубопровода от площади сечения в свету трубопровода F_i с отложениями при осевом усилии $T = 0$, толщине стенки трубы $h = 5$ мм, давлении внутри трубопровода $P_i = 0,5$ МПа, плотности отложений в трубопроводе $\rho_s = 1500; 2000; 2500$ кг/м² (кривые 1-3, соответственно). С увеличением площади сечения в свету трубопровода с отложениями F_i или уменьшением толщины отложений происходит увеличение собственных частот изгибных колебаний трубопровода.

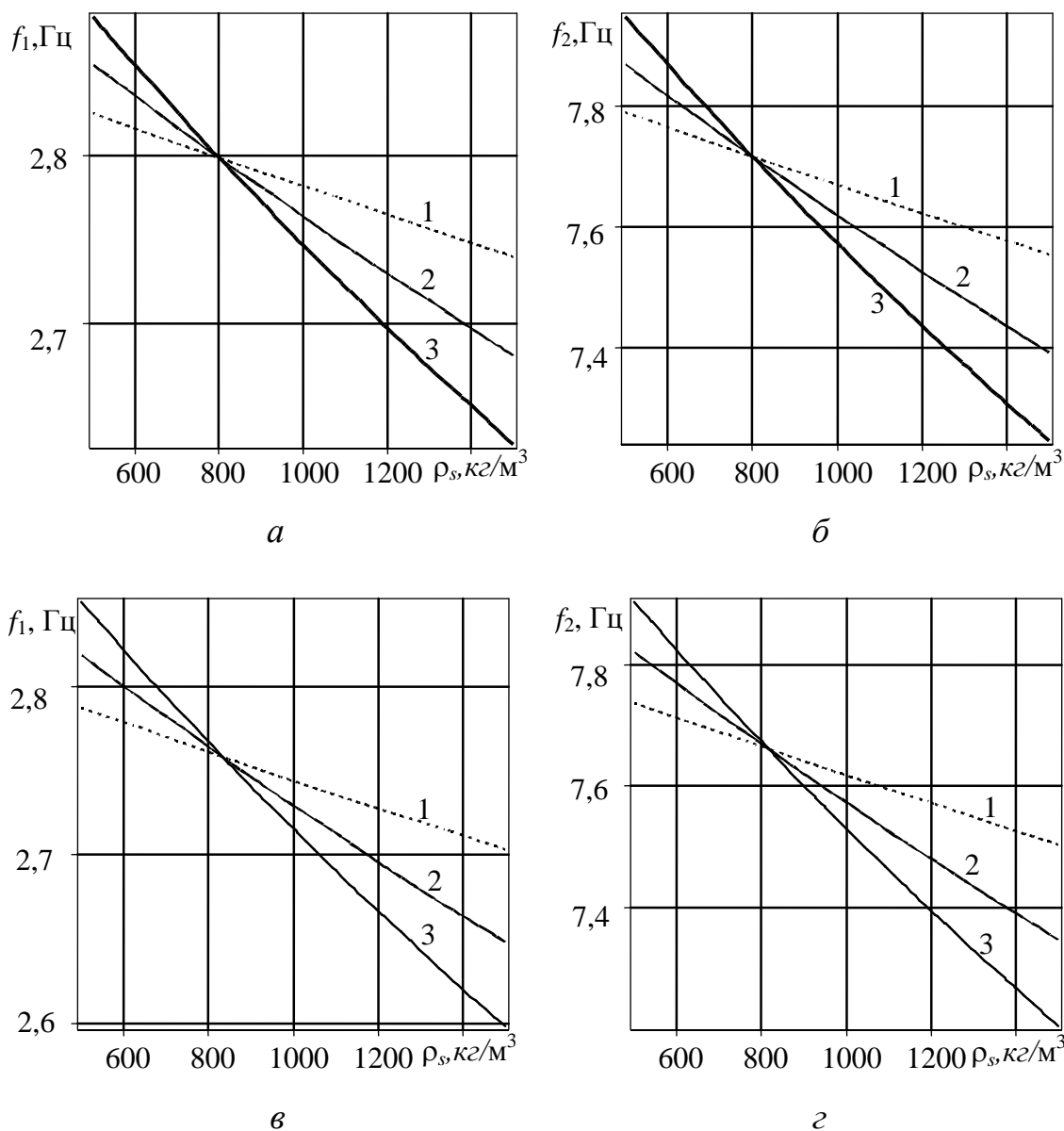


Рисунок 1. Зависимости первой (фрагменты *а,в*), второй (фрагменты *б,г*) собственных частот изгибных колебаний трубопровода от плотности отложений в трубопроводе ρ_s при осевом усилии $T = 0$, толщине стенки трубы $h = 5$ мм при давлении внутри трубопровода $P_i = 0$ МПа (фрагменты *а,б*), 0,5 МПа (фрагменты *в,г*) при толщине равномерных отложений на стенке трубопровода 9; 19; 29 мм (кривые 1-3, соответственно)

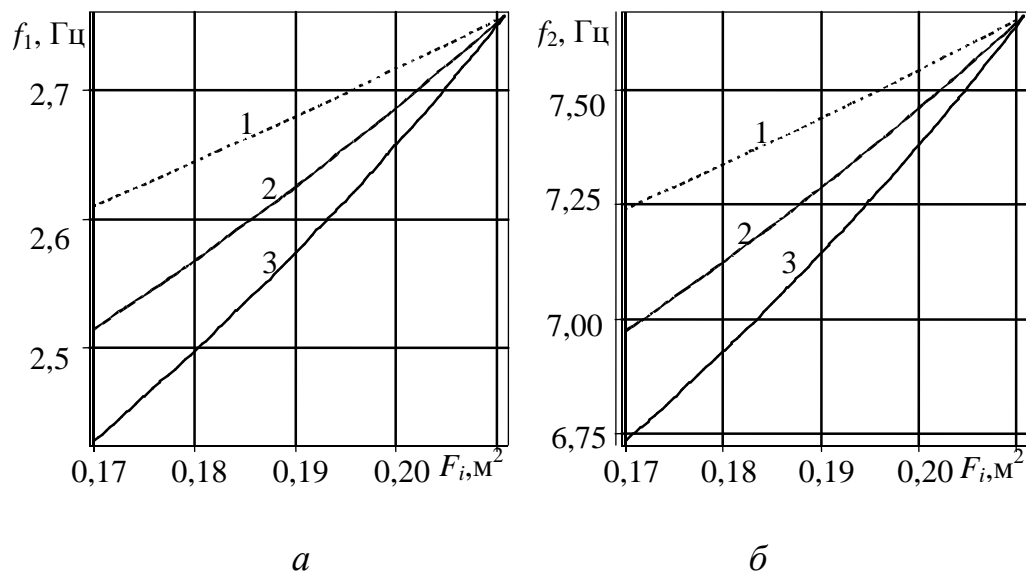


Рисунок 2. Зависимости первой (фрагмент *a*), второй (фрагмент *б*) собственных частот изгибных колебаний трубопровода от площади сечения в свету трубопровода F_i с отложениями при осевом усилии $T = 0$, толщине стенки трубы $h = 5$ мм, давлении внутри трубопровода $P_i = 0,5$ МПа, плотности отложений в трубопроводе $\rho_s = 1500; 2000; 2500$ кг/м² (кривые 1-3, соответственно)

Обратная задача

Решение обратной задачи для трубопровода с вышеприведенными параметрами и толщиной стенки $h = 5$ мм, осевым усилием $T = 0$, давлением внутри трубопровода $P_i = 0,5$ МПа, плотностью жидкости внутри трубопровода $\rho_i = 800$ кг/м³ при собственных частотах изгибных колебаний $f_1 = 2,660$ Гц, $f_2 = 7,375$ Гц дает, что площадь сечения в свету трубопровода с отложениями $F_i = 0,164$ м², плотность отложений в трубопроводе $\rho_s = 1213,549$ кг/м². На рисунке 3 приводятся зависимости от первой частоты изгибных колебаний f_1 плотности отложений в трубопроводе ρ_s (фрагмент *a*) и площади сечения в свету трубопровода с отложениями F_i (фрагмент *б*) для различных частот изгибных колебаний f_2 : 7,375 Гц – кривая 1; 7,380 Гц – 2; 7,385 Гц – 3.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что по двум частотам изгибных колебаний также можно определить плотность

отложений в трубопроводе ρ_s и площадь сечения в свету трубопровода с отложениями F_i .

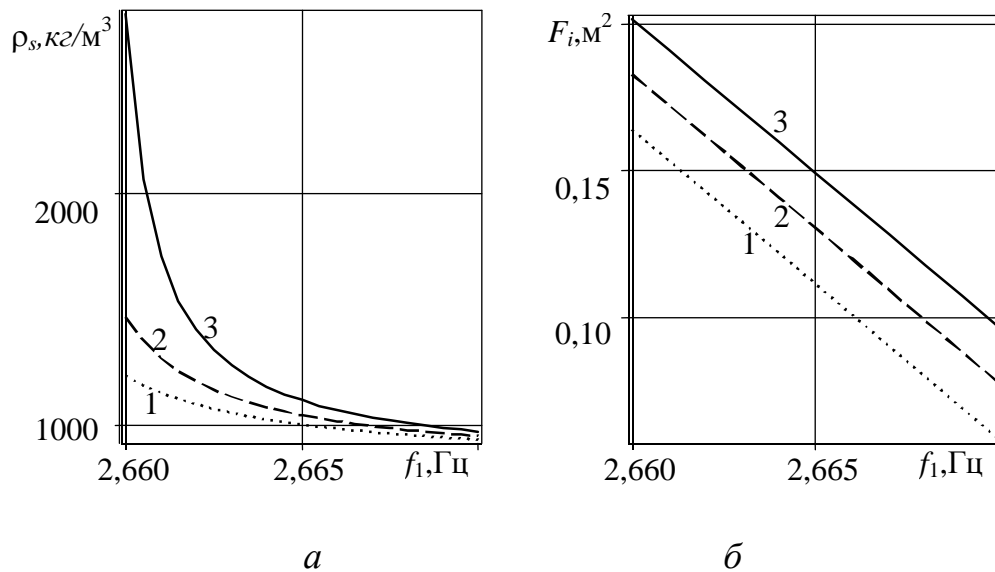


Рисунок 3. Зависимости от первой частоты изгибных колебаний f_1 плотности отложений в трубопроводе ρ_s (фрагмент *a*) и площади сечения в свету трубопровода с отложениями F_i (фрагмент *б*) для различных частот изгибных колебаний f_2 : 7,375 Гц – кривая 1; 7,380 Гц – 2; 7,385 Гц – 3

Выводы

На основе предложенной модели получено частотное уравнение, которое связывает параметры трубопровода, заземленного по краям, находящегося под действием растягивающей силы, имеющего отложения на стенках и жидкость под давлением.

Решены прямая задача для определения первой и второй собственных частот изгибных колебаний трубопровода для заданных: плотности отложений в трубопроводе, осевого усилия, толщины стенки трубы, давления внутри трубопровода, толщины равномерных отложений на стенке трубопровода и обратная задача по определению по двум собственным частотам изгибных колебаний трубы - плотности и толщины отложений на стенке трубы.

Получено, что с увеличением плотности отложений на стенке трубы происходит уменьшение собственных частот изгибных колебаний трубы.

Установлено, что с увеличением площади сечения в свету трубопровода с отложениями или уменьшением толщины отложений происходит увеличение собственных частот изгибных колебаний трубопровода. По двум частотам изгибных колебаний можно определить плотность отложений в трубопроводе и площадь сечения в свету трубопровода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-01-97010-поволжье_а, № 14-01-97013-поволжье_а, № 14-01-00740_а).

References

- 1 Sidorov B.V., Martynov S.A. Recommended technology of diagnostics of buried pipelines. *Control. Diagnostics*, 2005, no. 12, p. 18–19. [in Russian].
- 2 Gladwell G.M.L. *Inverse problems in vibration*. – Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004. (Russian edition: Gladwell G.M.L. *Obratnye zadachi teorii kolebaniy*. – Moscow–Izhevsk: NITs, 2008. 608 p.).
- 3 Guangming Dong, Jin Chen. Vibration analysis and crack identification of a rotor with open cracks. – *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 2011, vol. 28, no. 1, p. 171–182.
- 4 Akopyan V.A., Cherpakov A.V., Rozhkov E.V., Solovyev A.N. Integral diagnostic feature for identifying damage in the elements of rod constructions. – *Control. Diagnostics*, 2012, no 7, p. 50–56. [in Russian].
- 5 Yunwei Zhang, Guozheng Yan. Detection of gas pipe wall thickness based on electromagnetic flux leakage. *Defectoscopy*, 2007, no. 2, p. 78–89.
- 6 Kulikov V.V. Wall thickness of a pipe loaded with pressure. 2009, no 7, p. 6–8. [in Russian].
- 7 Kucheryavyu V.I., Milkov S.N. Reliability calculations for a compressed portion in a gas pipeline in the presence of longitudinal cracks. 2011, no. 3, p. 112–116. [in Russian].

8 Khakimov A.G. Determination of fluid density and inner pressure in a pipeline using natural frequencies of flexural vibrations. 2014, no. 1, p. 37–43. [in Russian].

9 Baranenko V.I., Yanchenko Yu.A. Erosion-corrosion damage in the elements of pipeline systems at the nuclear power plants with RBMK-1000 reactors. – Теплоэнергетика, 2010, no. 5, p. 26–33. [in Russian].

10 Musakaev N.G., Urazov R.R., Shagapov S.Sh. Dynamics of hydrate formation during natural gas transportation. Teplofizika i aeromekhanika, 2006, vol. 13, no. 2, p. 295–302. [in Russian].

11 Wang Wenda, Huang Qiyu, Huang Jun, Pang Quan, Fu Jun, Wang Fenghui. Study of paraffin wax deposition in seasonally pigged pipelines. – Chemistry & Technology of Fuels & Oils, 2014, no 1 (581), p. 27–33. [in Russian].

Список используемых источников

1 Сидоров Б.В., Мартынов С.А. Рекомендуемая технология диагностики подземных трубопроводов // Контроль. Диагностика. 2005. № 12. С. 18-19.

2 Gladwell G. M. L. Inverse problems in vibration. –Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004. (Русский перевод: Глэдвелл Г.М.Л. Обратные задачи теории колебаний. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. С.608.

3 Guangming Dong and Jin Chen. Vibration analysis and crack identification of a rotor with open cracks // Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics. 2011. Vol. 28. No. 1. P. 171-182.

4 Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций/ Акопьян В.А. [и др.]// Контроль. Диагностика. 2012. № 7. С. 50-56.

5 Yunwei Zhang, Guozheng Yan. Detection of gas pipe wall thickness based on electromagnetic flux leakage // Defectoscopy 2007. № 2. P. 78-89.

6 Куликов В.В. Толщина стенки трубы, нагруженной давлением // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2009. № 7. С. 6-8.

7 Кучерявый В.И., Мильков С.Н. Расчет надежности сжатого участка газопровода при наличии продольных трещин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 3. С. 112-116.

8 Хакимов А.Г. Определение плотности жидкости и внутреннего давления в трубопроводе по собственным частотам изгибных колебаний // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. № 1. С. 37-43.

9 Бараненко В.И., Янченко Ю.А. Эрозионно-коррозионный износ элементов трубопроводных систем на АЭС с РБМК-1000 // Теплоэнергетика. 2010. № 5. С. 26-33.

10 Мусакаев Н.Г., Уразов Р.Р., Шагапов В.Ш. Динамика образования гидратов при транспортировке природного газа // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13. № 2. С. 295-302.

11 Исследование отложений парафина в трубопроводах, подвергаемых сезонной чистке/ Ван Вэньда [и др.] // Химия и технология топлив и масел. 2014. № 1 (581). С. 27-33.

About the author

Сведения об авторе

A.G. Khakimov, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Federal State Budget Scientific Institution, R.R. Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Ufa, the Russian Federation

Хакимов А.Г., канд. физ.-мат. наук, ФГБУН Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра Российской академии наук (Имех УНЦ РАН), г. Уфа, Российская Федерация

e-mail: hakimov@anrb.ru