



КОНТРОЛЬ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
garnyshova@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** На предприятиях в эксплуатации находится большое количество теплообменников, которые работают в различных температурных условиях. В качестве греющего агента применяется пар, горячая вода, нагретые продукты нефтепереработки и других производств, в которых могут присутствовать окислы железа, алюминия, сульфат кальция, силикаты и др. От состояния поверхностей нагрева теплообменного оборудования зависит эффективность его работы. Загрязнения этих поверхностей различными отложениями резко снижают коэффициент теплопередачи, что приводит к значительному увеличению расхода тепла. Характер отложений зависит от свойств греющего агента и нагреваемой среды. **ЦЕЛЬ.** Цель заключается в оценке возможности контроля отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний. Наличие отложений изменяет массу конструкций и, следовательно, собственные частоты колебаний, по анализу которых можно определить не только наличие и толщину отложений, а также их вид. **МЕТОДЫ.** В работе показаны результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью аппаратно-программного комплекса, и расчетов собственных колебаний поверхностей теплообменного оборудования в программном комплексе ANSYS для выявления зависимости их от толщины и плотности отложений. В качестве поверхностей теплообмена были смоделированы пластина, труба, также труба под давлением. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результаты, полученные экспериментальным и расчетным путем, совпали, и был сделан вывод, что метод свободных колебаний позволяет определять не только наличие отложений на теплообменных поверхностях, но их толщину и вид. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Методом свободных колебаний можно своевременно обнаруживать отложения и контролировать их состояние, что в свою очередь позволит сократить общие эксплуатационные затраты, повысить энергоэффективность и продлить срок службы.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; отложения; собственные частоты; теплообменное оборудование; метод свободных колебаний; ANSYS.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по Государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-03-2024-226/1 от 15.02.2024 г.

Для цитирования: Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В. Контроль отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 55-64. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64.

CONTROL OF DEPOSITS ON PIPELINE SYSTEMS BY THE METHOD OF FREE OSCILLATIONS

Garnyshova E.V., Izmaylova E.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
garnyshova@mail.ru

Abstract: **RELEVANCE.** There are a large number of heat exchangers in operation enterprises that operate under various temperature conditions. Steam, hot water, heated products of oil refining and other industries, which may contain oxides of iron, aluminum, calcium sulfate,

silicates, etc., are used as a heating agent. The efficiency of the heat exchange equipment depends on the condition of the heating surfaces. Contamination of these surfaces with various deposits dramatically reduces the heat transfer coefficient, which leads to a significant increase in heat consumption. The nature of the deposits depends on the properties of the heating agent and the heated medium. THE PURPOSE. The purpose is to assess the possibility of controlling deposits on the surfaces of heat exchange equipment by the free oscillation method. The presence of deposits changes the mass of structures and, consequently, the natural frequencies of vibrations, the analysis of which can determine not only the presence and thickness of deposits, as well as their appearance. METHODS. The paper shows the results of experimental studies conducted using a hardware and software package and calculations of natural vibrations of the surfaces of heat exchange equipment in the ANSYS software package to identify their dependence on the thickness and density of deposits. A plate, a pipe, and a pressurized pipe were modeled as heat transfer surfaces. RESULTS. The results obtained experimentally and computationally coincided, and it was concluded that the free oscillation method makes it possible to determine not only the presence of deposits on heat exchange surfaces, but their thickness and appearance. CONCLUSION. The free oscillation method can detect deposits in a timely manner and monitor their condition, which in turn will, reduce overall operating costs, increase energy efficiency and extend service life.

Keywords: *non-destructive testing; deposits; natural frequencies; heat exchange equipment; free oscillation method; ANSYS.*

Acknowledgements: *The work on the results of which the article was completed was carried out according to the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-03-2024-226/1 dated 02/15/2024.*

For citation: Garnyshova E.V., Izmaylova E.V. Control of deposits on pipeline systems by the method of free oscillations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (4): 55-64. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64.

Введение (Introduction)

Цель исследования заключается в оценке возможности контроля отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний.

Заращение поверхностей теплообменного оборудования и трубопроводных систем происходит из-за физических, химических и биологических процессов [1]. В качестве греющего агента применяется пар, горячая вода, нагретые продукты нефтепереработки и т.д. В воде находится много различных растворенных веществ, начиная от карбонатов кальция, магния и заканчивая различными солями. Все это в зависимости от температуры, давления, кипения оседает или выпадает в осадок, что становится причиной заращения труб.

Задача неразрушающего контроля (НК) состоит в обнаружении дефектов и определении степени их допустимости. К эффектам разрушения можно отнести образование трещин, отложений, нарушение внутренней структуры материала и т.д. При решении задач НК используют акустические методы контроля. Это связано с тем, что они не требуют прямого контакта с контролируемым изделием, механически не нагружают объект контроля и не опасны для жизни и здоровья находящихся рядом людей [2].

В работе рассматривается один из методов НК – метод свободных колебаний (МСК), принцип которого заключается в изменении собственных частот детали или материала (объект контроля (ОК), при возникновении дефектов, что используется как информационный признак наличия дефекта. Иными словами, в основу МСК положены зависимости между упругими константами материала ОК и такими его свойствами, как прочность, пористость, упругость. Метод контроля, основанный на измерении частот собственных колебаний (ЧСК), находит применение также и для решения задач дефектоскопии различного рода литья, изделий [3, 4], используемых на железнодорожном транспорте, для контроля состояния трубопроводных систем и т.д.

Наряду с другими методами неразрушающего контроля, МСК кажется наиболее привлекательным и перспективным из-за безопасности и простоты операций контроля, малой трудоемкости, исключения субъективности в принятии решения, экономичности, возможности получения информации в документальной форме, способности контроля сложных изделий в труднодоступных местах, высокой чувствительности, экологической

чистоты [5, 6]. Рассматриваемый метод позволяет проводить диагностику объектов в условиях эксплуатации, учитывая форму и размеры изделий, без предварительной подготовки поверхности контроля, что существенно ускоряет и удешевляет процесс контроля [7].

Установлены следующие общие закономерности МСК, применяемые в современных дефектоскопах:

- наличие дефектов в ОК приводит к изменению спектра колебаний по сравнению с эталонным образцом. Если детализировать эту закономерность, то можно сказать, что в ОК появляются дополнительные моды колебаний, связанные с наличием нарушений во внутренней структуре. Колебательный процесс будет «дрожащим» из-за появления новых синусоидальных составляющих, вносимых дефектами;

- величина сдвига спектра зависит от места нахождения дефекта;

- наличие множественных дефектов во внутренней структуре ОК влечет за собой уменьшение длительности акустического отклика на возбужденные колебания;

- если дефект находится в «пучности» колебаний, то соответствующая частота сдвигается на «максимальную» величину для данного размера дефекта;

- нахождение дефекта в «узле» колебаний не приводит к сдвигу соответствующей частоты [3].

В процессе контроля измеряется частота собственных колебаний (ЧСК) изделия, соответствующая определенному виду колебаний, затем рассчитывается приведенная скорость распространения акустических волн (стержневая скорость звука C_i) по известной формуле:

$$f_i = F_i - C_i,$$

где f_i – частота собственных колебаний определенного вида i ;

F_i – коэффициент формы, зависящий от формы и размеров изделия, вида возбуждаемых колебаний и коэффициента Пуассона.

$$C_i = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E – модуль нормальной упругости;

ρ – плотность.

По предварительно заданным корреляционным зависимостям определяются необходимые физико-механические свойства. Параметр C является информативным и достаточно полно характеризует физико-механические свойства изделий, определяющие их поведение при эксплуатации. При контроле МСК используется слышимый диапазон частот 20 Гц – 20 кГц.

МСК относится к методам, которые используют эталон. В качестве эталона формируют спектр акустических колебаний того или иного объекта. Поэтому основной проблемой при измерениях бывают трудности, связанные с формированием такого эталона [8]. Если же каждый объект имеет произвольные размеры и форму, то эти трудности возрастают пропорционально числу диагностируемых объектов. Именно это обстоятельство, как оказалось на практике, является основной причиной ограничения широкого применения метода свободных колебаний. В связи с этим, метод чаще всего используют на однотипных объектах, которые встречаются в большом количестве при серийном производстве или находятся в эксплуатации [9].

Научная значимость исследования состоит в разработке методики обнаружения и идентификации дефектов на поверхностях теплообменного оборудования по параметрам свободных колебаний, а также созданию мобильного и компактного оборудования со специальным программным обеспечением, которое позволяет проводить экспресс контроль отложений в режиме реального времени.

Практическая значимость исследования заключается в разработке методики и оборудования, в получении результатов, которые могут быть использованы при контроле опасных производственных объектов и всех поверхностях теплообменного оборудования, а также в возможности внедрения на действующие производства.

Литературный обзор (Literature review)

Для реализации метода наиболее широкое распространение в отечественной промышленности нашли специальные измерители частот собственных колебаний типа «Звук» двух модификаций: «Звук-203» и «Звук-107», в основу которых положен метод

свободных колебаний. Из известных зарубежных аналогов наиболее широкое применение в мировой практике нашли приборы типа «Grindo Sonic» бельгийской фирмы и «J.W. Lemmens N.V.», действие которых основано на использовании метода свободных колебаний, но с применением несколько отличающейся методики измерения и расшифровки спектра ЧСК. При этом приборы «Grindo Sonic», также как «Звук-203», не могут использоваться для контроля малогабаритных изделий [10, 11]. Совместные разработки с фирмой «Абразив» (Чехия) позволили применить этот метод не только в отечественной промышленности, но и в ряде зарубежных фирм, в таких развитых странах как Австрия, Германия, Индия, Италия, Китай, Польша, США, Чехия, Швейцария и др. не только для контроля абразивных инструментов, но и изделий из других материалов. В работах Гельмана Л.М. [12] по выявлению зависимости между декрементом затухания виброакустического сигнала и размера трещины в титановой лопатке первой ступени компрессора, установлена связь размера трещины с изменением декремента затухания. Наряду с Л.М. Гельманом исследования колебаний упругих тел с «дышащей» несплошностью (или трещиной) материала проводили Матвеев В.В. [13] и Ройтман А.Б. [14]. Эти методы используют различные параметры колебательного процесса, начиная от изменения собственных частот объекта исследования, и заканчивая такими характеристиками, как асимметрия волны цикла колебаний по длительности и максимальному отклонению на полциклах разного знака. Также большой вклад в изучение, исследование и развитие МСК внесли Ваньков Ю.В. [5, 8], Ившин И.В., Кондратьев А.Е.

Наиболее широкое применение в отечественной и мировой практике указанный МСК нашел при контроле таких изделий с физико-механическими свойствами как: абразивные, огнеупорные, углеродные и углеграфитовые, из высокопрочной керамики и синтетических высокотвердых материалов, отливок из чугуна и других металлов; а также при контроле строительных изделий и диагностики состояний зданий, сооружений и других строительных конструкций, и частот собственных колебаний турбинных лопаток [15]. Применяемые в авиационной и космической технике многослойные конструкции из полимерных материалов наиболее эффективно контролируются именно МСК, хорошие результаты получены по применению этого метода для контроля сварных швов камер сгорания, разработаны методики для диагностики равноосных рабочих лопаток компрессора авиационного двигателя.

Материалы и методы (Materials and methods)

Ранее авторами были проведены экспериментальные исследования [16] с помощью аппаратно-программного комплекса по контролю отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний, состоящего из устройства для контроля толщины отложений и специализированной программы для регистрации, записи, обработки и анализа сигналов (рис. 1) [17].

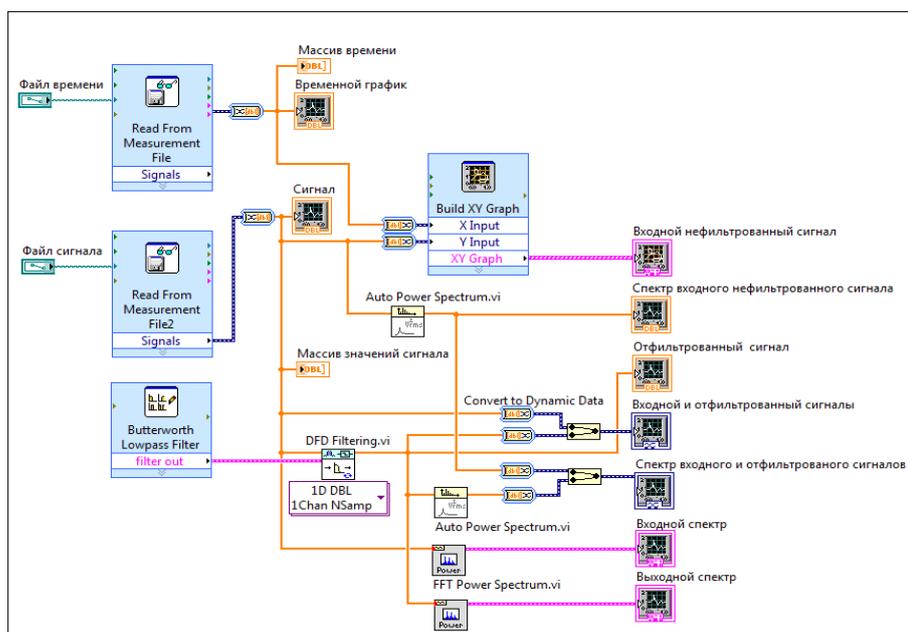


Рис. 1. Часть блок-диаграммы программы в LabVIEW Fig. 1. Part of the block diagram of the program in LabVIEW

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Программа позволяет переводить односторонний сигнал во временной области, и автоматически строить спектр мощности; усреднять спектр мощности сигнала времени; непрерывно фильтровать входной сигнал; вычислять предельную интеграцию сигнала путем интегрирования спектрограммы сигнала вдоль временной или частотной осей; отображать спектрограмму сигнала на графике интенсивности.

Для устранения недостатка, при котором колебания распространяются по всей площади поверхности теплообменного оборудования, применяется демпфирующая рамка, которая прижимается к исследуемой поверхности и ограничивает распространение колебаний только на интересующем нас участке. В качестве моделей поверхности теплообменного оборудования использовали пластину из структурной стали размером 400x160x2 мм и участок трубы длиной 400 мм из того же материала без дефектов, внешним диаметром – 159 мм, и толщиной 4 мм (рис. 2).

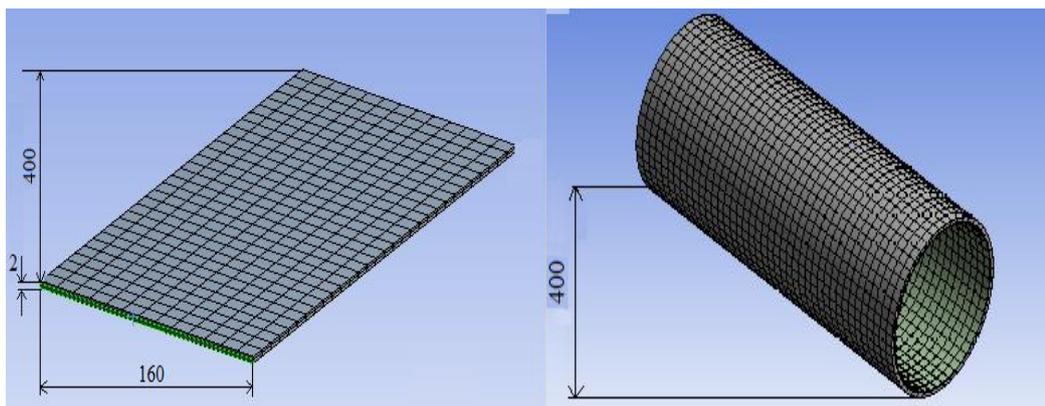


Рис. 2. Смоделированные чистые пластина и труба в ANSYS

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Методика контроля заключается в возбуждении собственных колебаний контролируемого объекта, записи и обработки сигналов, проведении анализа спектра собственных частот и выдаче заключения о состоянии изделия [18]. В контрольно - измерительной аппаратуре, использующей МСК, обычно производят возбуждение колебаний в изделии с помощью удара. При этом необходимо обеспечить такие параметры удара и ударного устройства, при которых в изделии будут наилучшим образом возбуждаться колебания в необходимом для измерения частотном диапазоне [19].

По результатам экспериментальных исследований можно судить о том, что с увеличением толщины и плотности отложений частоты собственных колебаний увеличиваются. Далее в программном комплексе ANSYS были проведены расчеты собственных частот колебаний поверхностей теплообменного оборудования для выявления зависимости их от толщины и плотности отложений [20].

На них были добавлены отложения (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 мм) с разной плотностью. В качестве отложений были взяты оксиды кремния, кальция, магния, железа – характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Характеристики отложений, использованных в ANSYS
Characteristics of deposits used in ANSYS

Характеристики	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
Плотность, г/см ³	2.65	3.37	3.58	7.8
Коэффициент Пуассона	0.262	0.25	0.3	0.29
Модуль Юнга, дин/см ²	16.9·10 ¹¹	2.0-2.5·10 ¹¹	4.25·10 ¹¹	21.2·10 ¹¹

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

В таблице 2 и 3 приведены результаты расчета частот колебаний пластины и трубы с разными видами отложений в ANSYS. Толщина отложений для каждого вида 2.5 мм [21].

Таблица 2
Table 2

Результаты расчета некоторых частот колебаний пластины с разными видами отложений
Results of calculation of some oscillation frequencies of a plate with different types of deposits

№ моды	Частота (Гц)			
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
1	90.26	97.29	114.34	266.87
5	487.75	525.58	617.74	1443.11
10	975.76	1052.41	1231.22	2882.75
25	2627.76	2659.32	3118.33	7523.93
50	5361.94	5589.73	6573.45	15933.01
75	7948.53	8525.74	9985.71	23651.25
100	10576.21	11178.12	13051.46	31106.13

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3
Table 3

Результаты расчета некоторых частот колебаний трубы с разными видами отложений
Results of calculation of some oscillation frequencies of pipes with different types of deposits

№ моды	Частота (Гц)			
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
1	1352.7	1395.1	1584.8	1866.5
5	2287.9	2382.1	2564.4	3001.1
10	2632.9	2803.9	3101.6	3654.7
25	4383.6	4749.2	5565.1	6577.4
50	6549.8	7086.2	8764.1	10284.2
75	8100.3	8848.1	10409.2	12272.4
100	9481.5	9992.5	12190.1	14396.1

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 3 показаны зависимости собственных частот колебаний конструкций (а – пластина, б – труба) от плотности отложений, где цифрами на графиках обозначены: 1 – Fe₂O₃, 2 – MgO, 3 – CaO, 4 – SiO₂. Толщина отложений для каждого вида 2.5 мм.

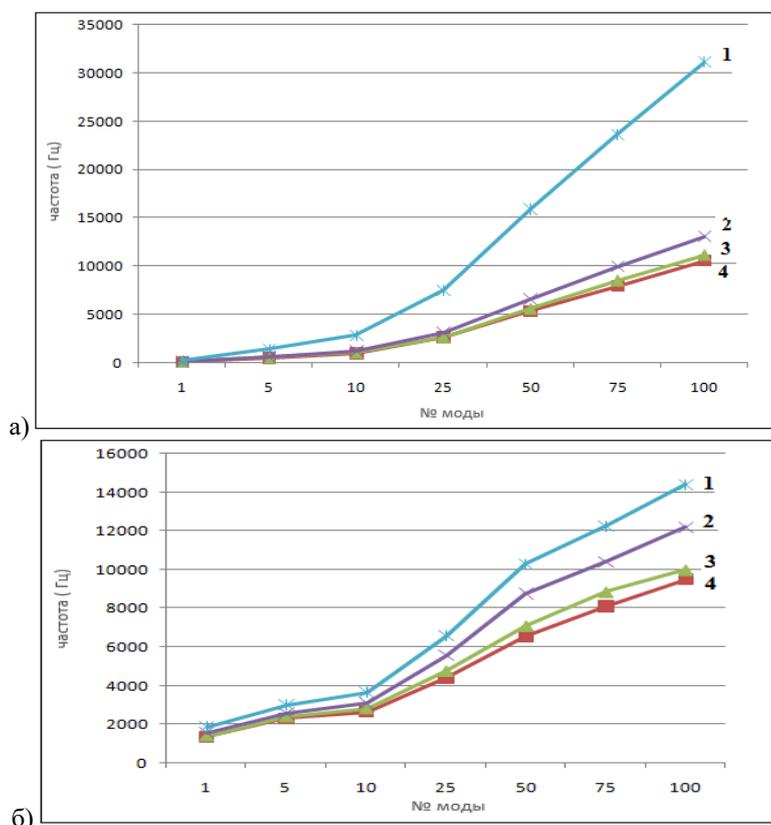


Рис. 3. График зависимости собственных частот колебаний от плотности отложений, где а) пластина, б) труба
Fig. 3. Graph of the dependence of natural frequencies of oscillations on sediment density, where a) plate, b) pipe

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По графикам на рисунке 3 (а, б) видно, что с увеличением плотности отложений возрастают собственные частоты колебаний конструкции, как плоской, так и объемной формы.

Для того чтобы правильно продиагностировать состояние трубопроводов по анализу собственных частот, необходимо еще учитывать давление транспортируемой среды. Давление жидкости влияет на амплитудно-частотную характеристику трубопровода. Для определения изменения частот при нагружении трубопровода давлением, было смоделировано воздействие среды на внутреннюю стенку трубопровода (1 МПа) и осуществлен анализ структурно-жидкостного взаимодействия в ANSYS (TotalDeformation).

В таблице 4 приведены некоторые полученные собственные частоты колебаний конструкции объемной формы (трубы) при разных условиях. В качестве отложения использовался оксид кальция толщиной 2.5 мм.

Таблица 4
Table 4

Собственные частоты колебаний трубы при разных условиях
Natural frequencies of pipe vibrations under different conditions

№ моды	Частоты трубы с отложением без давления	Частоты трубы с отложением с давлением 1 МПа
1	432.3	475.1
15	1219.4	1286.4
25	2327.3	2516.6
50	3746.3	3855.7
75	5462.6	5769.1
100	7641.9	7949.5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 показан график зависимости собственных частот колебаний трубы при созданном в нем давлении в 1 МПа.

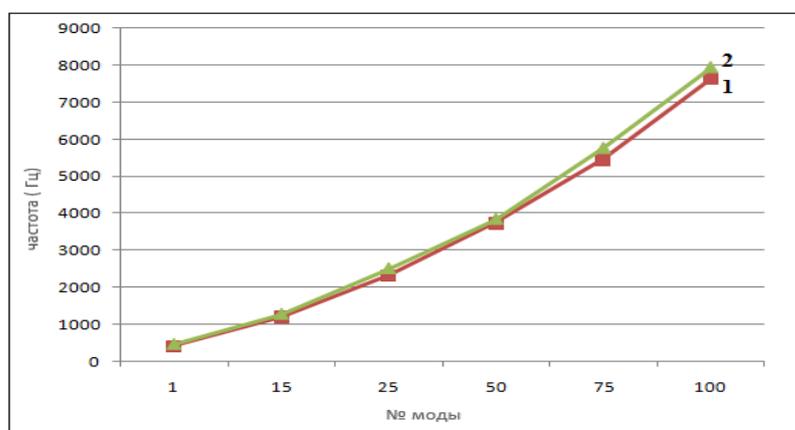


Рис. 4. График зависимости собственных частот колебаний трубы при созданном в нем давлении: 1 – чистая труба, 2 – труба с отложением

Fig. 4. Graph of the dependence of the natural frequencies of vibration of the pipe at the pressure created in it: 1 – clean pipe, 2 – pipe with deposits

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ графика на рисунке 4 показывает, что собственные частоты колебаний трубы (как чистой, так и с дефектами) возрастают при нагружении давлением. Причем у участков трубы с отложением изменение частоты больше, чем у чистой трубы.

Сделанный вывод по расчетам, выполненных в программном комплексе ANSYS, о том, что с увеличением толщины и плотности отложений увеличиваются частоты собственных колебаний конструкции, совпал с результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований.

Заключение (Conclusions)

Актуальной проблемой настоящего времени является поиск и создание энергосберегающих мероприятий и инженерных решений по созданию тепло- и технологических процессов с минимальными тепловыми потерями. Проблемы энергоэффективности, уменьшение потерь теплоты, существенно влияют на технико-экономические показатели и капитальные затраты [22]. Методом свободных колебаний можно своевременно обнаруживать отложения и контролировать их состояние, что в свою

очередь позволит сократить общие эксплуатационные затраты, повысить энергоэффективность и продлить срок службы. Наличие отложений изменяет массу конструкций, следовательно, и собственные частоты колебаний, по анализу которых можно определить не только наличие и толщину отложений, но и их вид, так как разные отложения имеют разную плотность.

Литература

1. Wisner B.; Mazur K., Perumal V., et al. Acoustic emission signal processing framework to identify fracture in aluminum alloys. *Eng. Fract. Mech.* 2019. Pp. 367–380.
2. Kong I.Y., Bennett C.J., Hyde C.J. A review of non-destructive testing techniques for the in-situ investigation of fretting fatigue cracks. *Materials & Design.* 2020. vol. 196. pp.109093. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109093.
3. Bonab M.M. Effects of different parameters on initiation and propagation of stress corrosion cracks in pipeline steels: A review. *Metals* 2019, 9, P. 590.
4. Mambetov R.F., Kushnarenko V.M., Hafizov, F.S. Causes of the field flowline weld joint rust-through damage. *Pipeline Sci. Technol.* 2020, 4. Pp. 98–107.
5. Ваньков Ю.В. Низкочастотные методы контроля. Метод свободных колебаний. Казань. Издательство КГЭУ, 2003. – 140 с.
6. Хатьков Д.Н. Применение информационного подхода к решению задачи дефектоскопии методом свободных колебаний. *Журнал Труды МАИ.* 2016. №88.
7. Козар, Н.К., Козар А.Н. Метод свободных колебаний для обнаружения межкристаллитной коррозии металлов: Монография. - Москва: Русайнс, 2016. - 205 с.
8. Ваньков Ю.В., Яковлева Э.Р. Об одном подходе к оценке затухания колебаний. *Техническая акустика.* 2005. Т.5. С.251–265.
9. Коварская Е.З., Московенко И.Б. Использование частот собственных колебаний при неразрушающем контроле физико-механических свойств материалов и изделий. *Журнал «В мире НК».* 2012. №4 (58). С.5–8.
10. Деловой журнал Точка опоры. №223 Февраль 2017 тема: Неразрушающий контроль <https://www.to-inform.ru/index.php/arkhiv/item/vehi-istorii-nerazrushaushego-kontrolya-v-rossii>.
11. Интернет ресурс: <https://armada-ndt.ru/articles/8341/?ysclid=lpic4e0mv20670480>.
12. Gelman Leonid M., Gorpnich Sergey V. Nonlinear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation. *Mechanical System and Signal Processing.* Vol. 14. Iss. 3. May 2000. P. 343–351.
13. Матвеев В.В., Богинич О.Е. Приближенное аналитическое определение вибродиагностических параметров наличия трещины в упругом теле при супергармоническом резонансе. *Проблемы прочности.* 2010. № 4. С. 5–19.
14. Ройтман А.Б. Вибрационная диагностика «дышащих» трещин в изделиях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* 2000. № 1. С. 58–66.
15. Ваньков Ю.В., Бусаров А.В., Александрович Ю.П. Контроль клепаного соединения лопаток ГТУ методом свободных колебаний. *Журнал «В мире НК».* 2012. №4 (58). С.10–12.
16. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний. *ИВУЗ. Проблемы энергетики.* 2020. Т.22. № 4. С.106-114.
17. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615470 «2RSoundSA». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 апреля 2019.
18. Shvetsov I.V., Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., et al. Reducing labor input of monitoring condition of heat exchange equipment surfaces. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 939 (2020) 012072.
19. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Ульябаева Ш.У. Анализ результатов численного моделирования колебательных процессов в бездефектных и дефектных трубопроводах. *Вестник Казанского государственного энергетического университета.* 2022. Т. 14 № 3 (55). С. 38 – 47.
20. Измайлова Е.В., Гарнышова Е.В., Ваньков Ю.В. Определение информативных критериев для контроля трубопровода с применением ANSYS. Сборник нац. науч.-практ. конф. «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». – Казань: КГЭУ, 2020. Т. 1, С. 413 – 416.
21. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., и др. Контроль отложений поверхностей теплообмена по анализу их частот колебаний. Сборник материалов 78-й Науч.-техн. конф. Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2023 СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 493 с.

22. Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В., Гарнышова Е.В., и др. Повышение энергоэффективности контролем трубопроводных систем: Монография – Казань: Издательство Казанского университета, 2022. – 142 с.

Авторы публикации

Гарнышова Елена Владимировна – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6320-9926>. garnyshova@mail.ru

Измайлова Евгения Вячеславовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). evgeniya-izmailova@yandex.ru

References

1. Wisner B.; Mazur K., Perumal V., et al. Acoustic emission signal processing framework to identify fracture in aluminum alloys. Eng. Fract. Mech. 2019, 210, Pp. 367–380.
2. Kong I.Y., Bennett C.J., Hyde C.J. A review of non-destructive testing techniques for the in-situ investigation of fretting fatigue cracks. Materials & Design. 2020, vol. 196, pp.109093. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109093
3. Bonab, M.M. Effects of different parameters on initiation and propagation of stress corrosion cracks in pipeline steels: A review. Metals 2019, 9, P. 590.
4. Mambetov, R.F.; Kushnarenko, V.M.; Hafizov, F.S. Causes of the field flowline weld joint rust-through damage. Pipeline Sci. Technol. 2020, 4. Pp. 98–107.
5. Vankov Yu.V. Low frequency control methods. Free vibration method. Kazan. Publishing house KGEU, 2003. – P. 140.
6. Khatkov D.N. Application of information approach to the solution of a problem of a defectoscopy by a method of free oscillations. The journal Proceedings of MAI. 2016. No.88.
7. Kozar, N.K., Kozar A.N. Free oscillation method for detecting intercrystalline corrosion of metals: Monograph. - Moscow: Rusains, 2016. - 205 p.
8. Vankov Yu.V., Yakovleva E.R. About one approach to an estimation of free vibrations decay. Technical acoustics. 2005. T.5. P.251 – 265.
9. Kovarskaya E.Z., Moskovenko I.B. Use of natural oscillation technique in non-destructive evaluation of physical mechanical properties of materials and products. In the world of non-destructive testing. 2012. No. 4 (58). P.5 – 8.
10. Business magazine Point of Support. No. 223 February 2017 topic: Non-destructive testing <https://www.to-inform.ru/index.php/arkhiv/item/vehi-istorii-nerazrushashhego-kontrolya-v-rossii>.
11. Internet resource: <https://armada-ndt.ru/articles/8341/?ysclid=lpic4e0mv20670480>.
12. Gelman Leonid M., Gorpnich Sergey V. Nonlinear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation. Mechanical System and Signal Processing. Vol. 14. Iss. 3. May 2000. P. 343–351.
13. Matveev V.V., Boginich O.E. Approximate analytical determination of the vibration diagnostic parameters of the presence of a crack in an elastic body with superharmonic resonance. Strength problems. 2010. No. 4. Pp. 5–19.
14. Roitman A.B. Vibration diagnostics of "breathing" cracks in products. Technical diagnostics and non-destructive testing. 2000. No. 1. Pp. 58–66.
15. Vankov Yu.V., Busarov A.V., Alexandrovich Yu.P. Gas-turbine unit blades. Inspection of riveted connection with free oscillation technique. The magazine "In the world of NK". 2012. №4 (58). Pp.10–12.
16. Garnyshova E.V., Izmailova E.V., Vankov Yu.V. Deposit thickness control of the heat exchange equipment by hardware and software complex. Institute of Higher Educational Institutions. Energy problems. 2020. T.22. No. 4. P.106 – 114.
17. Izmailova E.V., Vankov Yu.V., Garnyshova E.V., Ziganshin Sh.G., Zagretdinov A.R. Certificate of state registration of the computer program No. 2019615470 "2RSoundSA". Registered in the Register of Computer Programs on April 26, 2019.
18. Shvetsov I.V., Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., Vankov Y.V., Zagretdinov A.R. Reducing labor input of monitoring condition of heat exchange equipment surfaces. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 939 (2020) 012072, doi:10.1088/1757-899X/939/1/012072.
19. Gaponenko S.O., Kondratyev A.E., Ulyabaeva G.Sh. Numerical simulation of oscillatory process in defect-free and defective pipelines. Bulletin of the Kazan State Energy University. 2022. T. 14. No. 3 (55). pp. 38 – 47.
20. Izmailova E.V., Garnyshova E.V., Vankov Yu.V. To identify informative criteria for pipeline

monitoring with the use of ANSYS. Collection of National scientific-practical conf. "Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services." – Kazan: KGEU, 2020. Т. 1, pp. 413-416.

21. Garnyshova E.V., Izmailova E.V., Vankov Yu.V., Zagretdinov A.R. Control of deposits of heat exchange surfaces by analyzing their vibration frequencies. Collection of materials 78th Scientific and Technical. conf. St. Petersburg NTO RES named after. A.S. Popov, dedicated to Radio Day. 2023 SPb.: SPbSETU "LETI". 493 pp.

22. Vankov Yu.V., Izmailova E.V., Garnyshova E.V., Zagretdinov A.R. Increasing energy efficiency by monitoring pipeline systems: Monograph – Kazan: Kazan University Publishing House, 2022. – 142 p.

Authors of the publication

Elena V. Garnyshova – Kazan State Power Engineering University (KSPEU). *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-6320-9926>. garnyshova@mail.ru

Evgeniya V. Izmaylova – Kazan State Power Engineering University (KSPEU). evgeniya-izmailova@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **06.06.2024 г.**

Отредактировано **10.06.2024 г.**

Принято **17.06.2024 г.**