

ISSN 2072-6007



КГЭУ

ВЕСТНИК

КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



KAZAN STATE POWER ENGINEERING
UNIVERSITY BULLETIN

2022, том 14

№ 3 (55)

ВЕСТНИК КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Свидетельство о регистрации СМИ:
журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций
ПИ № ФС77-34079 от 14 ноября 2008 г.

2022
T.14, №3(55)

Периодичность – 4 раза в год

ISSN 2072-6007 (Print)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий
по специальностям: 05.14.00 «Энергетика»

УЧРЕДИТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

ОСНОВНАЯ РУБРИКА ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Главный редактор:	АБДУЛЛАЯНОВ Э. Ю.
Заместитель главного редактора	АХМЕТОВА И.Г.
Ответственный секретарь	ГРАЧЕВА Е.И.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	ВАЛЛЕВА С.Н.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ТОРКУНОВА Ю.В.	ГРАЧЕВА Е.И.	ЗВЕРЕВА Э.Р.
НОВИКОВА С.В.	ФЕДОТОВ А.И.	МИНГАЛЕЕВА Г.Р.
ОРАЗБАЕВ Б.Б.	KOLCUN MICHAEL	ЛАПТЕВ А.Г.
КАБАЕВА Г.Д.	STANIMIR VALTCHEV	ВАЛЛЕВА Ю.С.
ИВШИН И.В.	ВИНОГРАДОВ А.В.	ЗОРИНА Т.Г.
ГИЗАТУЛЛИН З.М.	БОЧКАРЕВ И.В.	ЧИРКОВА И.Г.
ДОВГУН В.П.	БРЯКИН И.В.	КОЛИБАБА В.И.
ИЛЮШИН П.В.	АХМЕТОВА И.Г.	TAN LIGUO
САФИН А.Р.	ВАНЬКОВ Ю.В.	

Подписка:	Каталог интернет-подписки «Почта России» – П6739
Сайт:	www.kgeu.ru
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	vkgeu@bk.ru
Типография:	Издательско-полиграфическая компания «Бриг», г. Казань,
Адрес типографии:	420097, г. Казань, ул. Академическая, 2, 009.

VESTNIK KAZANSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ENERGETICHESKOGO UNIVERSITETA

Founder:
Kazan State Power Engineering University

2022
Vol.14, №3(55)

Publication Frequency – Quarterly

ISSN 2072-6007 (Print)

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Chief Editor: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

SECTIONS:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND PROCESSING OF INFORMATION

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials. Language of publications: Russian, English.

Editorial board:

TORKUNOVA YULIYA
NOVIKOVA SVETLANA
ORAZBAEV BATYR
KABAEVA GULNARA
IGOR IVSHIN
GIZATULLIN ZINNUR
DOVGUN VALERY
ILYUSHIN PAVEL
SAFIN ALFRED

GRACHEVA ELENA
FEDOTOV ALEXANDER
KOLCUN MICHAIL
STANIMIR VALTCHEV
VINOGRADOV ALEXANDER
BOCHKAREV IGOR
BRIAKIN IVAN
AKHMETOVA IRINA
VANKOV YURY

ZVEREVA ELVIRA
MINGALEEVA GUZEL
LAPTEV ANATOLY
VALEEVA YULIYA
ZORINA TATYANA
CHIRKOVA IRINA
KOLIBABA VLADIMIR
TAN LIGUO

Address

Tel./fax:

Email:

Site:

Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation
+7 (843) 527-92-76
vkgeu@bk.ru
www.kgeu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ФИЛИМОНОВА А.А., ЧИЧИРОВ А.А., ЧИЧИРОВА Н.Д., БАТАЛОВА А.А. Спектроскопическое исследование поведения органических примесей в технологических водах тепловых электростанций.	3
АХМЕТОВА И.Г., ЛАПИН К.В. Исследование нестационарных процессов теплообмена в тепловых сетях централизованного теплоснабжения.	13
МУСТАФИН Р.М. Повышение энергетической эффективности работы металлургической печи за счет внедрения технологии бортового производства водородного топлива.	27
ГАПОНЕНКО С.О., КОНДРАТЬЕВ А.Е., УЛЪЯБАЕВА Г.Ш. Анализ результатов численного моделирования колебательных процессов в бездефектных и дефектных трубопроводах.	38
КАЗАКОВ В.Г., ГРОМОВА Е.Н., АЛЕШИНА А.С. Энерготехнологический комплекс для глубокой переработки древесины.	48
АЛХАДЖ ХАССАН Ф., ГАЙНУЛЛИНА Л.Р., ТИМЕРБАЕВ Н.Ф. Методика оценки и прогнозирования среднегодовой скорости и направления ветра на основе данных ветроизмерений.	59

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

СЕМЕНОВ Д.А., СИДОРОВА А.В., РУСИНА А.Г. Субоптимальность децентрализованных методов расчета оптимальных потоков мощности.	69
ТОШХОДЖАЕВА М.Н., ТОШХОДЖАЕВ Н.А., ГРАЧЕВА Е.Н. Применение метода Парето для оптимизации вариантов реконструкции ВЛ-110 кВ: алгоритм решения и технико-экономическое обоснование.	81

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

ГУРИНА Л.А., ЗОРИНА Т.Г., ТОМИН Н.В., ПРУСОВ С.Г. Угрозы и уязвимости объектов киберфизической энергетической системы при цифровой трансформации ее свойств.	89
ХАЛЪЯСМАА А.Н., РЕВЕНКОВ И.С., СИДОРОВА А.В. Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования.	99
ТАНЬ ЛИНГО, НОВИКОВА С.В. Применение пошагового метода обучения для эволюционного алгоритма в задачах многокритериальной оптимизации.	114
МАДИ И.Ш., АЛЫКИНА А.Д., ЮРЧЕНКО А.В., МЕХТИЕВ А.Д., АЙМАГАМБЕТОВА Р.Ж. Аппаратно-программный комплекс для контроля смещения бортов карьеров.	126

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В БЕЗДЕФЕКТНЫХ И ДЕФЕКТНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Улябаева Г.Ш.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

gulyabaeva@bk.ru, sogaponenko@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Определить зависимости влияния дефектов трубопроводов на собственные частоты колебаний в среде конечноэлементного моделирования ANSYS. Выявить информативный частотный диапазон для контроля технического состояния исследуемых трубопроводов. МЕТОДЫ. При выполнении работы применялись методы математического моделирования, численные, логико-вычислительные методы, вероятностно-статистические методы математической обработки результатов измерений. РЕЗУЛЬТАТЫ. Определены собственные (резонансные) частоты трубопроводов с использованием модального анализа. В качестве объектов исследований использовали стальной трубопровод без дефекта и трубопроводы с дефектами 2 мм, 3 мм, 5 мм и 6 мм. На основе расчетов были определены информативные диапазоны частот для контроля технического состояния бездефектных и дефектных трубопроводов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В результате исследований, проведенных с помощью модального анализа, были рассчитаны собственные (резонансные) частоты трубопроводов без дефектов и с дефектами различных размеров. Полученные данные можно использовать для определения размеров дефекта по наличию выявленных частот. Основываясь на расчетах, можно сделать вывод, что частоты 6681; 7156; 7240.1; 7682.5; 8240.2; 8839.2 Гц наиболее характерны для дефекта 2 мм; 6724.4; 7255.7; 7687.6; 8203.9; 8858.1; 9413.4 Гц для дефекта 3 мм; 5772; 6705.5; 7176.7; 7204.4; 7656.1; 8831.8 Гц для дефекта 5 мм; 5799.9; 6644.9; 7035.3; 7216.4; 8189.9; 8869.9 Гц для дефекта 6 мм.

Ключевые слова: трубопровод; модальный анализ; колебания; информативно-частотный диапазон; дефект.

Для цитирования: Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Улябаева Г.Ш. Анализ результатов численного моделирования колебательных процессов в бездефектных и дефектных трубопроводах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №3 (55). С. 38-47.

NUMERICAL SIMULATION OF OSCILLATORY PROCESS IN DEFECT-FREE AND DEFECTIVE PIPELINES

SO. Gaponenko, AE. Kondratiev and GSh. Ulyabaeva

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
gulyabaeva@bk.ru, sogaponenko@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. To determine the dependences of the influence of pipeline defects on the natural oscillation frequencies in the ANSYS finite element modeling environment. To identify an informative frequency range for monitoring the technical condition of the pipelines under study. METHODS. Methods of mathematical modeling, numerical, logical-computational methods, probabilistic-statistical methods of mathematical processing of measurement results were used in the performance of the work. RESULTS. The natural (resonant) frequencies of pipelines are determined using modal analysis. As objects of research, a steel pipeline without a defect and pipelines with defects of 2 mm, 3 mm, 5 mm and 6 mm were used. Based on the calculations, informative frequency ranges were determined for monitoring the technical condition of defect-free and defective pipelines. CONCLUSION. As a result of studies conducted using modal analysis, the natural (resonant) frequencies of pipelines without defects and with defects of various sizes were calculated. The obtained data can be used to determine the size of the defect by the presence of detected frequencies. Based on the calculations, it can be concluded that the

frequencies 6681; 7156; 7240.1; 7682.5; 8240.2; 8839.2 Hz are most characteristic of a 2 mm defect; 6724.4; 7255.7; 7687.6; 8203.9; 8858.1; 9413.4 Hz for a defect of 3 mm; 5772; 6705.5; 7176.7; 7204.4; 7656.1; 8831.8 Hz for a 5 mm defect; 5799.9; 6644.9; 7035.3; 7216.4; 8189.9; 8869.9 Hz for a 6 mm defect.

Keywords: pipeline; modal analysis; oscillations; informative frequency range; defect.

For citation: Gaponenko SO, Kondratiev AE. and Ulyabaeva GSh. Numerical simulation of oscillatory process in defect-free and defective pipelines. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2022;14;3(55):38-47.

Введение (Introduction)

Актуальность данного исследования заключается в повышении качества оценки технического состояния и диагностики трубопроводного транспорта. Полученные результаты информативных частот, по которым можно идентифицировать дефект, позволяют достоверно оценивать техническое состояние трубопроводов, определять безопасные технологические режимы работы оборудования, устанавливать необходимость и порядок изъятия участков трубопроводов для ремонта. На сегодняшний день для перекачки различных энергоносителей используется трубопроводный транспорт из различных металлических и неметаллических материалов [1]. Надежная работа трубопроводного транспорта заключается в отсутствии различных дефектов [2, 3]. Основными дефектами рассматриваемых трубопроводов являются неоднородность физико-механических свойств и наличие таких дефектов, как одиночные сквозные отверстия диаметром до 6 мм, расслоение, растрескивание (трещины), крупнозернистость структуры, неклеякость, выгорание, пористость, усадочные оболочки и различные механические повреждения поверхности [4, 5, 6]. В связи с этим разработка методики неразрушающего контроля и диагностики особенно актуальна для этих трубопроводов.

Методология исследования (Materials and methods)

Для численного моделирования была разработана 3D-модель стенда для исследования виброакустических параметров заглубленных трубопроводов для оценки технического состояния (рис. 1) в продукте *Autodesk Inventor*. *Autodesk Inventor* представляет собой программу, нацеленную на проектирование больших сборок, включающих тысячи или десятки тысяч элементов. Уникальные возможности – адаптивные слои, поименованные видовые экраны, доступные компоненты, отслеживание чертежа и параллельная работа над проектом.

Стенд для мониторинга технического состояния трубопроводов позволяет моделировать и учитывать влияние давления, создаваемого грунтом, с учетом таких факторов, как тип грунта, плотность грунта и его толщина [7-8].

В качестве объекта исследования были выбраны металлические дефектные и бездефектные трубопроводы диаметром $d = 60$ мм, толщиной стенки $\delta = 5$ мм, длиной $L = 1200$ мм с размерами дефектов 2, 3, 5 и 6 мм [9].

Дальнейшая работа заключалась в расчете собственных (резонансных) частот трубопровода с использованием модального анализа. Модальный анализ является основой любого динамического анализа, который позволяет оценить динамическое поведение объекта. Он используется для определения собственных частот и форм (мод) собственных колебаний [10].

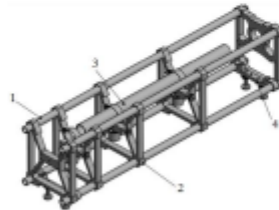


Рис. 1. Стенд для мониторинга технического состояния трубопровода: 1-направляющая; 2-опора с фиксатором; 3-исследуемый трубопровод; 4-основание с ножками

Fig. 1. Stand for monitoring the technical condition of the pipeline: 1-guide; 2-support with a lock; 3-pipeline under study; 4-base with legs

Определение собственных частот было проведено в следующей последовательности:

- импортировали геометрию исследуемого трубопровода в среду *ANSYS WB* из *Autodesk Inventor CAD*;

- установили граничные условия;

- задали свойства материала: плотность 7800 кг/м^3 ; модуль упругости $2,1 \cdot 10^6 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона равен 0,29.

После успешного создания и проверки критериев качества сетки, которые программа представляет при анализе модели, загружаются результирующие сетки с указанием количества граничных и внутренних элементов и общего количества вычисленных сеток [11]. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Полученные данные по сеткам		
	Граничные значения	Внутренние значения
Узлы	1 033 187	6 147 248
Грани	385 330	19 911 328
Общее количество вычислительных сеток		1 986 197

В результате проведенного исследования были рассчитаны первые моды колебаний исследуемого трубопровода. При анализе результатов модального расчета рассчитана форма свободных колебаний в относительных единицах [12].

Исследования бездефектного трубопровода

На рис. 2 и рис. 3 показана геометрия в программном комплексе *ANSYS* и фотография исследуемого трубопровода без дефектов соответственно.

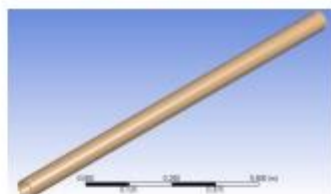


Рис. 2. Импортированная геометрия бездефектного трубопровода Fig. 2. Imported intact pipeline geometry



Рис. 3. Фотография исследуемого бездефектного трубопровода Fig. 3. Photo of the investigated defect-free pipeline

В результате исследования были определены моды колебаний бездефектного трубопровода. Результаты обобщены в таблице 2. Форма колебаний дефектного трубопровода с частотой 3630,2 Гц показана на рис. 4.

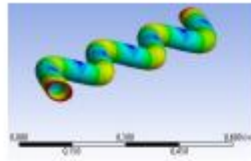


Рис. 4. Форма колебаний дефектного трубопровода на частоте 3630,2 Гц

Fig. 4. Waveform of non-defective pipeline at frequency 3630.2 Hz

Таблица 2

Результаты расчета исследуемого бездефектного трубопровода

Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц
1	240.38	17	4413.9	33	5929.2
2	645.43	18	4421.7	34	6295.6
3	1220.2	19	4466.1	35	6368.1
4	1304.3	20	4486.2	36	6424.5
5	1929.5	21	4537.6	37	6521.7
6	2102.6	22	4571.7	38	6858.7
7	2608.6	23	4595.1	39	6923
8	2742	24	4645.5	40	7396.5
9	3630.2	25	4749.5	41	7472.2
10	3912.9	26	4798.8	42	7557.4
11	4202.3	27	4956.7	43	7826.5
12	4326.6	28	5005.1	44	7977
13	4343	29	5217.2	45	8068.2
14	4368.7	30	5269.8	46	8378.8
15	4380.2	31	5546.1	47	8569.8
16	4396.2	32	5595	48	8707.3

Исследование трубопровода с размером дефекта 2 мм

На рис. 5 показана фотография исследуемого трубопровода с размером дефекта 2 мм.



Рис. 5. Фотография исследуемого трубопровода с размером дефекта 2 мм

Fig. 5. Photograph of inspected pipeline with defect size 2 mm

В результате проведенного исследования были определены информативные частоты для контроля дефектного трубопровода с размером дефекта 2 мм. Результаты обобщены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчета исследуемого дефектного трубопровода

Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц
1	241.94	17	6854.4	33	8839.2
2	649.87	18	6874.4	34	9223.7
3	1230.9	19	6898	35	9389
4	1319.5	20	7005.3	36	9496.5

Продолжение таблицы 3

5	1950.1	21	7105.4	37	10021
6	2096.8	22	7156	38	10141
7	2649.4	23	7240.1	39	10477
8	2782.2	24	7344.7	40	10504
9	3720.7	25	7363.3	41	10853
10	3986.5	26	7476.2	42	10962
11	4206.7	27	7682.5	43	11530
12	4696.6	28	7864.6	44	12593
13	4716.3	29	8016.2	45	12693
14	5328.6	30	8240.2	46	13284
15	6681	31	8441.2	47	13363
16	6777	32	8730.6	48	13709

Наиболее характерными частотами, идентифицирующими дефект, являются 6681; 7156; 7240,1; 8240,2; 8839,2 Гц.

Форма колебаний исследуемого трубопровода с размером дефекта 2 мм на частоте 6681 Гц показана на рис. 6.

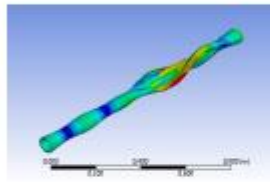


Рис. 6. Форма волны трубопровода с размером дефекта 2 мм на частоте 6681 Гц

Fig. 6. Waveform of pipeline with defect size 2 mm at frequency 6681 Hz

Исследование трубопровода с размером дефекта 3 мм

На рис. 7 показана фотография исследуемого трубопровода с размером дефекта 3 мм.



Рис. 7. Фотография исследуемого трубопровода с размером дефекта 3 мм

Fig. 7. Photograph of inspected pipeline with defect size 3 mm

В результате проведенного исследования были определены информативные частоты для контроля дефектного трубопровода с размером дефекта 3 мм. Результаты обобщены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты расчета исследуемого дефектного трубопровода

Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц
1	241.53	17	4187.1	33	7177.3
2	242.08	18	4703.6	34	7255.7

Продолжение таблицы 4

3	649.37	19	4720	35	7391.1
4	651.3	20	5320.2	36	7437.9
5	1229.5	21	5732.3	37	7545.4
6	1232.3	22	5754.1	38	7687.6
7	1325.9	23	6305.3	39	7853.3
8	1950.1	24	6660.4	40	8005.3
9	1955.5	25	6694.6	41	8047.5
10	2109.7	26	6724.4	42	8076
11	2643.6	27	6801.4	43	8203.9
12	2787.5	28	6821.5	44	8381.5
13	2792.7	29	6859.2	45	8396.8
14	3699.8	30	6897.4	46	8729.2
15	3705.3	31	6920	47	8858.1
16	3984.9	32	7081.5	48	9413.4

Наиболее характерными частотами, идентифицирующими дефект, являются 6724.4; 7255.7; 7687.6; 8203.9; 8858.1; 9413.4 Гц.

Исследование трубопровода с размером дефекта 5 мм

На рис. 8 показана фотография исследуемого трубопровода с размером дефекта 5 мм.



Рис. 8. Фотография исследуемого трубопровода с размером дефекта 5 мм

Fig. 8. Photograph of inspected pipeline with defect size 5 mm

Результаты (Results and Discussions)

В результате проведенного исследования были определены информативные частоты для контроля дефектного трубопровода с размером дефекта 5 мм. Результаты обобщены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты расчета исследуемого дефектного трубопровода

Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц
1	242.64	17	5754.6	33	7835.4
2	649.43	18	5772	34	7950.1
3	652.21	19	6288.3	35	8013.5
4	1231.8	20	6675.5	36	8032.2
5	1234	21	6705.5	37	8051.7
6	1323.3	22	6827.6	38	8306.6
7	1954.3	23	6885.7	39	8377.6
8	1955.9	24	6927.2	40	8507.7
9	2106.7	25	6995.9	41	8733.2
10	2656.7	26	7050	42	8831.8
11	2781.3	27	7176.7	43	9205.6
12	3702.7	28	7204.4	44	9255.6
13	3976.1	29	7255.6	45	9309.1
14	4218.6	30	7332.9	46	9394.5
15	4714.1	31	7495.1	47	9442.1
16	5316.5	32	7656.1	48	10116

Наиболее характерными частотами, идентифицирующими дефект, являются 5772; 6705.5; 7176.7; 7204.4; 7656.1; 8831.8 Гц.

Форма волны исследуемого трубопровода с размером дефекта 5 мм на частоте 6705,5 Гц показана на рис. 9.

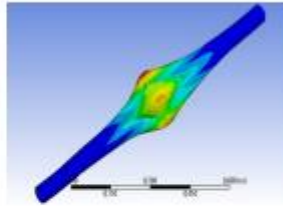


Рис. 9. Форма волны трубопровода с размером дефекта 5 мм на частоте 6705,5 Гц *Fig. 9. Waveform of pipeline with defect size 5 mm at frequency 6705.5 Hz*

Исследование трубопровода с размером дефекта 6 мм

На рис. 10 показана фотография исследуемого трубопровода с размером дефекта 6 мм.

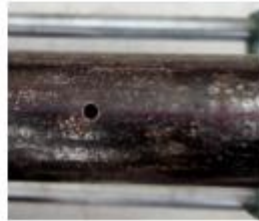


Рис. 10. Фотография исследуемого трубопровода с размером дефекта 6 мм *Fig. 10. Photograph of inspected pipeline with defect size 6 mm*

В результате проведенного исследования были определены информативные частоты для контроля дефектного трубопровода с размером дефекта 6 мм. Результаты обобщены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты расчета исследуемого дефектного трубопровода

Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц	Мода колебания	Частота, Гц
1	240.86	17	6271.1	33	8020.8
2	241.9	18	6644.9	34	8053.6
3	647.86	19	6844.2	35	8091.3
4	1230.9	20	6877	36	8123.8
5	1323.7	21	6915.4	37	8189.9
6	1946.5	22	6937.7	38	8397.1
7	2106.1	23	7015.8	39	8409.6
8	2646.6	24	7035.3	40	8540.1
9	2791.3	25	7138.4	41	8869.9
10	3712.6	26	7216.4	42	9063
11	3970.3	27	7356	43	9351.3
12	4192.4	28	7445.8	44	9374.4
13	4708.6	29	7541.5	45	9453.7
14	4721.8	30	7569.7	46	9583.6
15	5336.4	31	7756	47	9668.7
16	5795.4	32	7810.3	48	10120

Наиболее характерными частотами, идентифицирующими дефект, являются 5799.9; 6644.9; 7035.3; 7216.4; 8189.9; 8869.9 Гц.

Форма волны исследуемого трубопровода с размером дефекта 6 мм на частоте 6644,9 Гц показана на рис. 11.

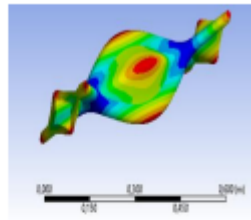


Рис. 11. Форма волны трубопровода с размером дефекта 6 мм на частоте 6644,9 Гц

Fig. 11. Waveform of pipeline with defect size 6 mm at frequency 6644.9 Hz

Заключение (Conclusions)

В результате численного моделирования, проведенного с использованием модального анализа, были рассчитаны собственные (резонансные) частоты трубопроводов без дефектов и с дефектами различных размеров в диапазоне от 200 до 10 000 Гц.

Таким образом, численное математическое моделирование позволило определить следующие информативные частоты для дефектов различных размеров:

- 6681; 7156; 7240.1; 7682.5; 8240.2; 8839.2 Гц наиболее характерны для дефекта 2 мм;
- 6724.4; 7255.7; 7687.6; 8203.9; 8858.1; 9413.4 Гц наиболее характерны для дефекта 3 мм;
- 5772; 6705.5; 7176.7; 7204.4; 7656.1; 8831.8 Гц наиболее характерны для дефекта 5 мм;
- 5799.9; 6644.9; 7035.3; 7216.4; 8189.9; 8869.9 Гц наиболее характерны для дефекта 6 мм.

Остальные частоты являются общими как для дефектных, так и для бездефектных трубопроводов и не могут служить основой для распознавания повреждений. Учитывая, что модальный анализ собственных частот колебаний проводился для стальных трубопроводов, информативные диапазоны частот для трубопроводов, изготовленных из других материалов, могут отличаться.

Анализ результатов показал:

1. Частоты собственных колебаний дефектных трубопроводов, в отличие от бездефектных, имеют устойчивую тенденцию к увеличению своего значения в зависимости от наличия дефекта и его размера [13].
2. В диапазоне от 6000 до 10000 Гц дефект обнаруживается на большинстве частот собственных колебаний, эта область наиболее информативна, так как в большей степени характеризует наличие и размер дефектов.
3. Для повышения достоверности определения дефекта необходимо проводить анализ параметров собственных колебаний трубопровода не только в рекомендуемом диапазоне частот, но и в соседних, параметры которых также зависят от определяемого дефекта [14]. Наличие косвенных признаков дефекта в соседних диапазонах является устойчивым подтверждением правильности выбора основного информативного диапазона [15].
4. Используя рассчитанный информативный диапазон частот, полученный в результате исследований, впоследствии планируются экспериментальные исследования для проверки результатов численного моделирования. Теоретические и экспериментальные исследования позволят разработать методику практического обнаружения дефектов и их размеров по наличию этих частот в спектре колебаний трубопровода.

Литература

1. Матросова Ю.Н. Неразрушающий контроль качества материалов. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2019.

2. HuangYi-min, LiuYong-shou, LiBao-hui, LiYan-jiang, YueZhu-feng. Natural frequency analysis of fluid conveying pipeline with different boundary conditions. Nuclear Engineering and Design. 2018. Vol. 3.
3. HuangYi-min, Ge Senga, Wu, Weia, He Jie, A direct method of natural frequency analysis on pipeline conveying fluid with both ends supported. Nuclear Engineering and Design. 2017. Vol. 1.
4. MehrdadShemshadi, Mahdi Karimi, FarzadVeysi A Simple Method to Design and Analyze Dynamic Vibration Absorber of Pipeline Structure Using Dimensional Analysis. Fabio Rizzo. 2020. Vol. 1.
5. Liu, G.; Li, S.; Li, Y.; Chen, H. Vibration analysis of pipelines with arbitrary branches by absorbing transfer matrix method. J. Sound Vib. 2013.
6. NoritakaYusa, Haicheng Song, Daiki Iwata, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi & Makoto Moroi. Probabilistic analysis of electromagnetic acoustic resonance signals for the detection of pipe wall thinning. Nondestructive Testing and Evaluation. V. 36:1. 2021.
7. Гапоненко, С.О. Разработка комплексной методики контроля технического состояния инженерных коммуникаций на основе математического моделирования и экспериментальных исследований / С.О. Гапоненко // Научному прогрессу – творчество молодых. 2020. № 2. С. 17-20. EDN MNLKPH.
8. Чаичина В.Е., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., и др. Применение методов математического моделирования для определения влияния грунта на частоты собственных колебаний трубопроводов // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 2. С. 142-147. DOI 10.24223/1999-5555-2021-14-2-142-147. EDN QQARWP.
9. ГОСТ 10704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент (с Изменениями N 1, 2, 3)» от 15 ноября 1991 г. М.: Стандартинформ, 2007 год.
10. Шахурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика проведения оперативного диагностирования трубопроводов энергетических систем и комплексов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 188-201. DOI 10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201. EDN QRCFCN.
11. Балбукова Е.В., Олейник А.Г. Разработка системы автоматизированного мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса теплоэнергетического оборудования // Труды Кольского научного центра РАН. 2017.
12. Чистякова А.В., Орлов В.А., Чухин В.А. Диагностика технического состояния металлических трубопроводов // Природообустройство. 2016. № 2.
13. Маркеленко Д.Е., Огороднова Ю.В. Техническая диагностика магистральных трубопроводов // Наука сегодня: вызовы и решения: материалы международной научно-практической конференции, Вологда, 25 января 2017 года / Научный центр «Диспут». Вологда: ООО «Маркер», 2017.
14. Абрамов А.М. Неразрушающий контроль обсадных колонн и магистральных трубопроводов ультразвуковым // Сборник тезисов к международной научно-практической конференции: СБОРНИК ТЕЗИСОВ КОНФЕРЕНЦИИ, Ижевск, 14 апреля 2020 года. Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 2020.
15. Чайкина А.Ю., Иванников В.П. Основные методы неразрушающего контроля при выявлении дефектов магистральных трубопроводов // Управление техносферой. 2018..

Авторы публикации:

Гапоненко Сергей Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Кондратьев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гузель Шакирьяновна Узябаева – студент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Matrosova Yu.N. *Non-destructive quality control of materials*. M.: LAP LambertAcademicPublishing, 2019.

2. Huang Yi-min, Liu Yong-shou, Li Bao-hui, Li Yan-jiang, Yue Zhu-feng. Natural frequency analysis of fluid conveying pipeline with different boundary conditions. *Nuclear Engineering and Design*. 2018. V.3.
3. Huang Yi-min, Ge Seng Wu, Weia He Jie A direct method of natural frequency analysis on pipeline conveying fluid with both ends supported. *Nuclear Engineering and Design*. 2017. V. 1.
4. Mehrdad Shemshadi, Mahdi Karimi, Farzad Veysi. A Simple Method to Design and Analyze Dynamic Vibration Absorber of Pipeline Structure Using Dimensional Analysis. *Fabio Rizzo*. 2020. V. 1.
5. Liu, G; Li, S; Li, Y; Chen, H. Vibration analysis of pipelines with arbitrary branches by absorbing transfer matrix method. *J. Sound Vib*. 2013.
6. Noritaka Yusa, Haicheng Song, Daiki Iwata, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi & Makoto Moroi. Probabilistic analysis of electromagnetic acoustic resonance signals for the detection of pipe wall thinning. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2021. V.36:1.
7. Gaponenko, S.O. Development of a comprehensive methodology for monitoring the technical condition of engineering communications based on mathematical modeling and experimental research. Scientific progress – creativity of the young. 2020;2:17-20. EDN MNLKPH.
8. Changchun V.E., Gaponenko S.O., Kondratiev A.E, et al. Application of mathematical modeling methods to determine the influence of soil on the natural vibration frequencies of pipelines. Reliability and safety of energy. 2021;14(2):142-147. DOI 10.24223/1999-5555-2021-14-2-142-147. EDN QQARWP.
9. GOST 10704-91 «Straight-welded steel pipes. Assortment (with Amendments N 1, 2, 3)» dated November 15, 1999. Moscow: Standartinform, 2007.
10. Shakurova R.Z., Gaponenko S.O., Kondratiev A.E. Methodology for conducting operational diagnostics of pipelines of energy systems and complexes. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2020;22(6):188-201. DOI 10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201. EDN QRCFCH.
11. Balukova E.V., Oleinik A.G. Development of a system for automated monitoring and forecasting of the residual life of thermal power equipment. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017.
12. Chistyakova A.V., Orlov V.A., Chukhin V.A. Diagnostics of the technical condition of metal pipelines. *Environmental management*. 2016. № 2.
13. Markelenko D.E., Ogorodnova Yu.V. Technical diagnostics of main pipelines // Science today: Challenges and Solutions: materials of the International scientific and practical conference. 2017.
14. Abramov A.M. Non-destructive testing of casing strings and main pipelines by ultrasonic. *Collection of abstracts of the x International scientific and practical conference*. 2020.
15. Chaikina A.Yu., Ivannikov V.P. The main methods of non-destructive testing in detecting defects of trunk pipelines. *Technosphere management*. 2018.

Authors of the publication

Sergey O. Gaponenko - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Aleksandr E. Kondratiev - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Guzel Sh. Ulyabueva - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

22.08.2022г.

Отредактировано

12.09.2022г.

Принято

19.09.2022г.