

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ярославский государственный технический университет»

**Семьдесят шестая всероссийская
научно-техническая конференция
студентов, магистрантов и аспирантов
с международным участием**

Часть 1

Сборник материалов конференции

Электронное издание

Ярославль
2023

© Ярославский государственный технический университет, 2023
ISBN 978-5-9914-0999-5

УДК 378:001.891

ББК 74.58

С30

С30 Семьдесят шестая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. 19-20 апреля 2022 г., Ярославль: сб. материалов конф. В. 3 ч. Ч. 1. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2023. – 688 с. – 1 CD-ROM. – Текст: электронный.

В первую часть сборника вошли материалы, представляющие результаты научно-исследовательской деятельности студентов, магистрантов и аспирантов в области химии и химической технологии, промышленной экологии, физико-математических наук, наземных транспортно-технологических комплексов, дорожного и автомобильного транспорта, энергетического машиностроения.

Минимальные системные требования:
PC PentiumIV, 512 Мб ОЗУ, Microsoft Windows XP,
Adobe Acrobat Reader, дисковод CD-ROM, мышь

© Ярославский государственный технический университет, 2023

Программное обеспечение:
Microsoft Office Word, Adobe Acrobat

Программное обеспечение для воспроизведения электронного издания:
Adobe Acrobat Reader, браузеры Google Chrome, Yandex

Редакционная коллегия: Е.О. Степанова, Л.А. Андриянова, И.Г. Абрамов,
С.И. Волгин, Д.Д. Бахаева, Е.Ю. Вавилова, В.Б. Доброхотов, А.С. Ерми-
шин, М.Н. Кюребекова, М.А. Майорова, К.М. Муратова, А.С. Морев,
Т.М. Гусева, К.И. Порсев, П.Б. Разговоров, Т.А. Сиротина, А.А. Павлов,
А.Ю. Соколов, Е.Ф. Трофимов, Л.А. Тюкина, И.В. Тюкин, С.В. Шкиотов,
В.С. Федотов

Редакторы: М.А. Канакотина, Е.В. Круглова

Ответственные за электронные издания: М.А. Канакотина, Е.В. Круглова

Подписано к использованию/размещению на сайте

17.04.2023/18.04.2023

Объем издания: 14,1 Мб

Комплектация издания 1 CD-ROM

Тираж 50 экз.

Ярославский государственный технический университет

150023, г. Ярославль, Московский пр., 88

<http://www.ystu.ru>

Контактный телефон: 8 (4852) 44-12-70

СЕКЦИЯ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

УДК 620.179

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Е.В. Гарнышова, Е.В. Измайлова

Научный руководитель – **Е.В. Измайлова**, канд. техн. наук, доцент

Казанский государственный энергетический университет

В работе рассматривается метод конечных элементов, позволяющий решать большой круг инженерных задач (в том числе контроль трубопроводных систем), и платформа Comsol Multiphysics, которая реализует этот метод.

Ключевые слова: метод конечных элементов, FEM, трубопроводные системы, акустический метод неразрушающего контроля, Comsol Multiphysics

DETERMINATION OF VIBRATION FREQUENCIES OF PIPELINE SYSTEMS BY FINITE ELEMENT MODELING

E.V. Garnyshova, E.V. Izmaylova

Scientific Supervisor – **E.V. Izmaylova**, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor

Kazan State Power Engineering University

The paper considers the finite element method, which allows solving a large range of engineering problems (including control of pipeline systems), and the Comsol Multiphysics platform, which implements this method.

Keywords: finite element method, FEM, pipeline systems, acoustic method of non-destructive testing, Comsol Multiphysics

Работа большинства программ основывается на методе конечных элементов, являющемся численным методом решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко применяется для решения задач механики деформируемого твёрдо-

го тела, гидродинамики, теплообмена и электродинамики и дает возможность решить большой круг инженерных задач.

В основу акустического метода неразрушающего контроля, основанного на измерении частоты собственных колебаний, положено наличие корреляционных зависимостей между упругими константами материала, из которых изготовлено изделие, и такими физико-механическими свойствами, как твердость, пористость, плотность, прочность и т.п., а также эксплуатационными характеристиками изделий и параметрами их изготовления [1].

В процессе контроля измеряют частоты собственных колебаний изделия, соответствующих определенному виду колебаний, рассчитывают по зависимости приведенную скорость распространения акустических волн C_l и по ранее найденным корреляционным зависимостям определяют необходимые физико-механические свойства:

$$f_i = F_i \cdot C_l,$$

где f_i – частоты собственных колебаний определенного вида i ;

F_i – коэффициент формы, зависящий от формы и размера изделия, вида возбуждаемых колебаний и коэффициента Пуассона;

$C_l = (E/\rho)^{1/2}$ – приведенная скорость распространения акустических волн;

E – модуль упругости материала;

ρ – плотность.

Параметр C_l является весьма информативным параметром и в ряде случаев достаточно полно характеризует физико-механические свойства изделий, определяющие их поведение при эксплуатации.

Физический процесс, на котором основывается акустический метод диагностирования, заключается в следующем. Толщина осадка коррозионного дефекта в виде утонения стенки трубы рассматривается как мембрана, которая в соответствии с фундаментальным решением теории акустики имеет собственную частоту f_0 . По оценке диапазон частот для дефектов линейных размеров более 20 мм составляет от 500 до 5000 Гц (акустический диапазон) [2].

Силовым фактором, инициирующим вынужденные колебания рассматриваемого элемента, является пульсация давления в воде за счет работы насосов, тока воды и т.п. Эти пульсации представлены набором импульсов, имеющих различную частоту (f_k). Когда частота импульса близка или совпадает с собственной частотой дефекта ($f_k \sim f_0$), возникают резонансные колебания дефекта с излучением различных волн, которые распространяются по металлу трубы и воде.

Для успешного применения акустического метода необходимо иметь информацию о частотах колебаний годных и дефектных участков

трубопроводов. Кроме всего этого существуют акустические методы обнаружения дефектов трубопроводных конструкций. Они имеют недостатки при решении двух важных задач:

1) определение частотных диапазонов наличия нескольких очагов коррозионного поражения трубопроводов;

2) изменение информативных критериев наличия дефектов в зависимости от давления теплоносителя в системе. Раскрытие данных вопросов в работе становится возможным с помощью применения конечно-элементного моделирования.

Для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE) методом конечных элементов подходит платформа COMSOL Multiphysics [3].

С этим программным пакетом расчет не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, объемная мощность и т.п. в зависимости от выбранного физического раздела. Преобразование этих параметров в коэффициенты математических уравнений происходит автоматически. Взаимодействие с программой возможно стандартным способом – через графический интерфейс пользователя (GUI), либо программированием с помощью скриптов на языке COMSOL Script.

Для решения PDE, COMSOL Multiphysics использует метод конечных элементов (FEM). Программное обеспечение запускает конечно-элементный анализ вместе с сеткой учитывающей геометрическую конфигурацию тел и контролем ошибок с использованием разнообразных численных решателей. Так как многие физические законы выражаются в форме PDE, становится возможным моделировать широкий спектр научных и инженерных явлений из многих областей физики, таких как акустика, химические реакции, диффузия, электромагнетизм, гидродинамика, фильтрование, тепломассоперенос, оптика, квантовая механика, полупроводниковые устройства, сопломат и многих других.

При проектировании и строительстве трубопроводных сетей необходимо принимать во внимание факторы, связанные с распространением акустических волн по упругим трубам этих сетей. Для анализа распространения акустических волн в трубопроводных системах в рамках одномерных моделей предназначены интерфейсы *Pipe Acoustics* (рис. 1) [4].

При совместном использовании с модулем «Акустика» можно строить комбинированные трёхмерные и одномерные модели распространения акустических волн как в частотной, так и во временной областях. Интерфейс *Pressure Acoustics, Frequency Domain* предназначен для

гармонического анализа акустических волн в спокойной жидкости, а интерфейс *Pressure Acoustics, Transient* – для анализа переходных процессов.

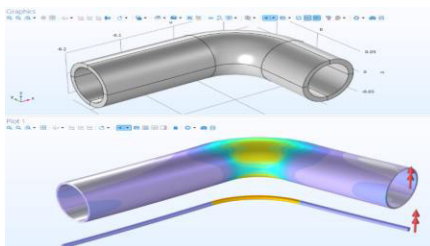


Рис. 1. Часть трубопроводной системы в ComsolMultiphysics

Узел мультифизической связи *Acoustic-Pipe Acoustic Connection*, представленный в модуле «Акустика», позволяет комбинировать интерфейсы *Pressure Acoustics* и *Pipe Acoustics* для моделирования акустических процессов в частотной и временной областях. Сопряжение осуществляется между точкой, определённой в интерфейсе акустики трубы, и поверхностью, связанной с интерфейсом аэроакустики.

Для выявления зависимости собственных частот колебаний поверхностей трубопроводных систем от толщины отложений автором планируется смоделировать часть трубопроводной системы и провести расчет частот ее колебаний без дефекта, и с разной толщиной отложений COMSOL Multiphysics.

Работа выполняется в рамках гос. задания № 075-03-2023-291/1 от 16.01.2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарнышова Е.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний / Е.В. Гарнышова, Е.В. Измайлова, Ю.В. Ваньков // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2020. Т.22, № 4. С. 106-114.
2. Ваньков Ю.В. Повышение энергоэффективности контролем трубопроводных систем / Ю.В. Ваньков, Е.В. Измайлова, Е.В. Гарнышова, А.Р. Загретдинов Казань: Изд-во Казанского университета, 2022. 142 с.
3. Буркова Е.Н. Система автоматизированных расчетов Comsol: учеб. пособие / Е.Н. Буркова, А.Н. Кондрашов, К.А. Рыбкин Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2019. 133 с.
4. Специальные методы постобработки и визуализации в ComsolMultiphysics®. Руководство. 2015. URL: https://www.comsol.jp/sc/resources/pdf-offers/COMSOL_HANDBOOK_SERIES_Essentials_of_Postprocessing_and_Visualization.ru.HR.pdf