

# Контроль отложений поверхностей теплообмена по анализу их частот колебаний

Е. В. Гарнышова, Е. В. Измайлова, Ю. В. Ваньков, А. Р. Загретдинов

*Казанский государственный энергетический университет*

garnyshova@mail.ru, evgeniya-izmailova@yandex.ru, yvankov@mail.ru, azagretdinov@yandex.ru

**Аннотация.** Заращение отложениями поверхностей теплообмена систем теплоснабжения является серьезной проблемой. В работе перечислены основные виды отложений. Наличие отложений изменяет массу конструкций и, следовательно, собственные частоты колебаний, по анализу которых можно определить не только наличие и толщину отложений, а также вид. В программном комплексе ANSYS были проведены расчеты собственных частот колебаний поверхностей теплообмена систем теплоснабжения для выявления зависимости их от толщины и плотности отложений. В качестве поверхности теплообмена была смоделирована пластина. Для подтверждения результатов, полученных расчетным путем, проведены экспериментальные исследования на аппаратно-программном комплексе, созданным авторами. Было выявлено, что с увеличением толщины и плотности отложений увеличивается и собственные частоты колебаний пластины. Своевременный контроль поверхностей теплообмена, выявление отложений и его чистка позволяет уменьшить затраты на энергию и, как следствие, сократить общие эксплуатационные затраты, а также повысить энергоэффективность и продлить срок службы.

**Ключевые слова:** отложения, поверхность теплообмена, обработка сигналов, частота колебаний

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для систем с открытыми тепловыми сетями характерна проблема, связанная с интенсивным накипеобразованием на поверхностях теплообмена систем теплоснабжения, заращением и «заклиниванием» систем различными отложениями, присутствующими в сетевой воде, и продуктами коррозии [1].

Образование отложений может блокировать работу системы, ускорить коррозию и привести к перегревам, прогарам и разрывам труб. Один из методов решения задачи повышения энергоэффективности, а также продления срока, заключается в уменьшении отрицательного влияния отложений, формирующихся на поверхностях теплообмена [2].

Наличие отложений ухудшают условия теплообмена и увеличивают гидравлическое сопротивление системы, вызывают опасное повышение температуры металла,

поэтому целью работы является разработка методики обнаружения наличия и толщины отложений по анализу частот оборудования, также определение вида отложений [3].

В зависимости от химического состава исходной воды в отложениях могут присутствовать окислы железа, меди, алюминия, сульфат кальция, силикаты и др. Поступление солей жесткости в сетевую воду происходит чаще всего с подпиточной водой, оксидов и гидроксидов – при коррозии металла [4].

## II. МЕТОДОЛОГИЯ

В программном комплексе ANSYS были проведены расчеты собственных частот колебаний поверхностей теплообмена систем теплоснабжения для выявления зависимости их от толщины и плотности отложений [5].

В качестве модели поверхности теплообмена систем теплоснабжения была взята пластина из структурной стали, защемленная с двух сторон (рис. 1).

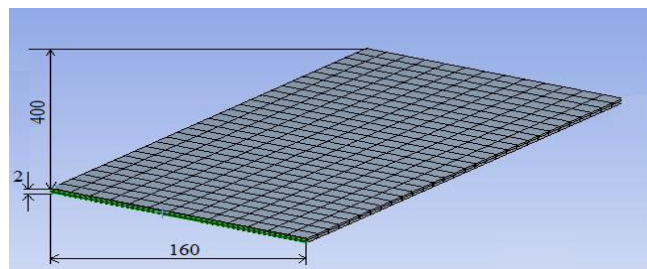


Рис. 1. Смоделированная пластина

Для выявления зависимости собственных частот колебаний поверхностей теплообмена систем теплоснабжения от толщины отложений, проведено моделирование частот колебаний этой пластины без осадка, и с разной толщиной отложений (0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75; 2,00 мм). В качестве отложений использовалась известь.

На рис. 2 представлены формы колебаний пластины с толщиной слоя отложений 2,00 мм в зависимости от номера моды.

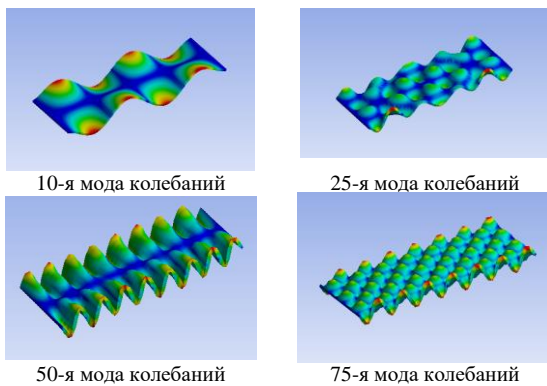


Рис. 2. Формы колебаний пластины с отложением в зависимости от номера моды.

На рис. 3 показаны графики зависимости некоторых частот колебаний пластины от толщины отложений.

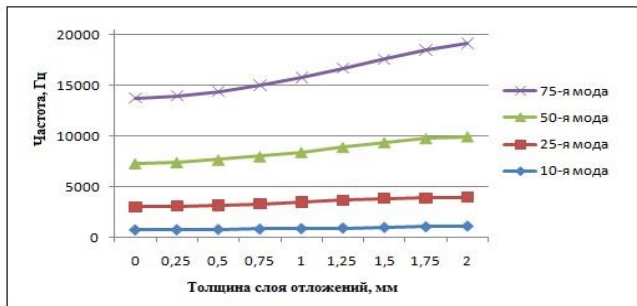


Рис. 3. Результат моделирования пластины с разными слоями отложений

По полученным данным можно сделать вывод, что с увеличением толщины отложений увеличивается и собственные частоты колебаний пластины.

Для выявления зависимости собственных частот колебаний от плотности отложений проведено моделирование частот колебаний пластины из того же материала, того же размера. В качестве отложений были взяты: CaO – оксид кальция, MgO – оксид магния, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – оксид железа, SiO<sub>2</sub> – оксид кремния, характеристики которых приведены в табл. 1. Толщина отложений для каждого вида 2,00 мм.

ТАБЛИЦА I. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТЛОЖЕНИЙ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ В ANSYS

Характеристики	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,65	3,37	3,58	7,80
Модуль Юнга, дин/см <sup>2</sup>	16,9·10 <sup>11</sup>	2,0-2,5·10 <sup>11</sup>	4,25·10 <sup>11</sup>	21,2·10 <sup>11</sup>
Коэффициент Пуассона	0,262	0,25	0,3	0,29

В табл. 2 приведены результаты расчета частот колебаний пластины с разными видами отложений в ANSYS.

ТАБЛИЦА II. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НЕКОТОРЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИНЫ С РАЗНЫМИ ВИДАМИ ОТЛОЖЕНИЙ

№ моды	Частота (Гц)			
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	90,26	97,29	114,34	266,87
5	487,75	525,58	617,74	1443,11
10	975,76	1052,42	1231,24	2882,76
25	2627,73	2659,35	3118,39	7523,91
50	5361,93	5589,74	6573,47	15933,01
75	7948,52	8525,76	9985,71	23651,31
100	10576,44	11178,53	13051,39	31106,27

На рис. 4 показаны графики зависимости плотности отложений от собственных частот колебаний, где 1 – оксид железа, 2 – оксид магния, 3 – оксид кальция, 4 – оксид кремния.

По полученным данным видно, что с увеличением плотности отложений увеличиваются собственные частоты колебаний пластины.

После создания и построения математической конечно-элементной модели и проведении аналитического расчета в ANSYS [6] были проведены экспериментальные исследования, целью которых являлась оценка возможности контроля отложений на поверхностях систем теплоснабжения по параметрам свободных затухающих колебаний.

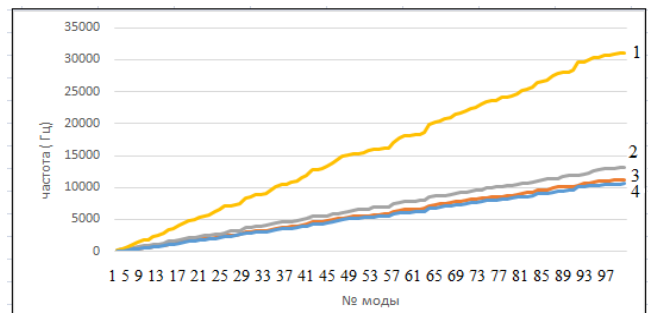


Рис. 4. График зависимости собственных частот колебаний от плотности отложений

Контролировать состояние поверхностей систем теплоснабжения наиболее рационально неразрушающими методами. Для контроля толщины отложений предлагается применить низкочастотные акустические методы, в частности метод свободных колебаний [7]. При контроле методом свободных колебаний используется слышимый диапазон частот 20 Гц – 20 кГц.

Возбуждение собственных колебаний контролируемого объекта, запись и обработка сигналов, проведение анализа спектра собственных частот и выдача заключения о состоянии изделия, в этом заключается методика контроля.

В качестве модели поверхности контролируемого объекта использовалась стальная пластина длиной 400 мм, шириной 160 мм и толщиной 2 мм. Исследования проводились на чистой пластине и на пластинах с разной толщиной отложений (рис. 5).



Рис. 5. Исследуемые образцы: слева чистая пластина, справа – со слоем отложений

Экспериментальные исследования были проведены с помощью аппаратно-программного комплекса, состоящего из устройства для контроля толщины отложений [8] и специализированной программы для регистрации, записи, обработки и анализа сигналов [9], которая реализует:

- визуализацию и запись в файл сигнала от микрофона через звуковую плату ПК или плату сбора данных;
- формирование спектров текущих сигналов и эталонных спектров;
- сравнение спектров с эталонными спектрами с вычислением площади спектра, коэффициента корреляции (в т.ч. коэффициента ранговой корреляции Спирмена), статистики амплитуд, статистики знаков (Фишера), ранговой суммы и статистики знаковых рангов Вилкоксона–Имана;
- построение доверительных интервалов и контроль выхода статистик за их пределы;
- протоколирование событий;
- автоматизацию контроля.

Обнаружение мелких дефектов в протяженных конструкциях также связано с определенными трудностями, так как изменение спектра колебаний протяженного объекта от мелкого дефекта незначительно. Поэтому, для повышения точности результатов контроля желательно заставить колебаться только интересующий нас участок конструкции. Этого можно добиться с помощью демпфирующей рамки [8], прижимаемой к конструкции (рис. 6), где цифрами обозначены: 1 – датчик (микрофон); 2 – ударник; 3 – отверстия; 4 – тумблер; 5 – ручка; 6 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 7 – компьютер; 8 – корпус устройства; 9 – исследуемая поверхность; 10 – демпфирующая рамка.

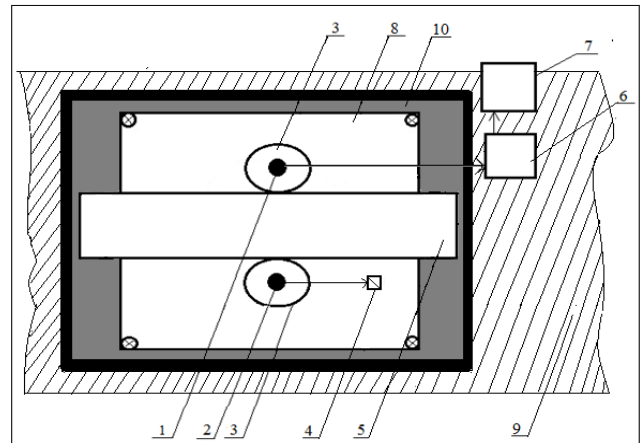


Рис. 6. Устройство для контроля отложений на поверхностях теплообмена

С целью определения изменения целевых функций сравнения акустических характеристик при наличии отложений с разной толщиной и плотностью, были проведены исследования образцов чистой пластины и с отложениями [10].

Исследования акустических характеристик проводились с каждым типом пластин по девять экспериментов следующим образом: исследуемая пластина жестко крепилась в зажимах установки с двух сторон, определялись собственные частоты колебаний пластины методом свободных колебаний, на участок пластины устанавливалось устройство, наносился нормированный удар, датчик фиксировал колебания данного участка пластины, которые через АЦП поступали в компьютер в специальную программу [9].

По завершению наносился слой отложений на пластину и исследования повторялись. В конце принимается решение о наличии отложений.

На рис. 7 приведены сигнал и спектр колебания пластины с отложением.

Анализ спектров колебаний, полученных экспериментальным путем показал, что в сигналах присутствуют составляющие в диапазоне до 10 кГц [7].

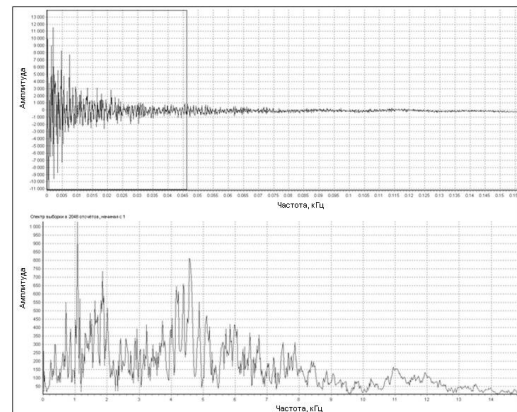


Рис. 7. Сигнал и спектр колебания пластины с отложением

Экспериментальная оценка затухания свободных колебаний возможна по спектрам сканирования сигнала. Под сканированием сигнала понимается процесс перемещения по оси времени с постоянным шагом окна фиксированного размера. Из отсчетов сигнала, попавших в окно в том или ином его положении на оси времени, формируется выборка сигнала для формирования по ней спектра. Каждому спектру сканирования можно сопоставить определенное время. Проведя сканирование, получаем зависимость спектра сигнала от времени [11].

Сравнение спектров проводилось следующим образом:

1. По девяти спектрам бездефектной пластины формировался эталонный спектр. По результатам сравнения параметров эталонного спектра и спектров бездефектной пластины определялись доверительные интервалы с уровнем значимости  $P = 0,95$ .
2. С полученным эталоном сравнивались усредненные спектры каждого участка исследуемой пластины с отложениями.
3. Результаты обработки экспериментов приведены на рис. 8. По оси абсцисс отмечены номера экспериментов, а по оси ординат – значения целевых функций сравнения.

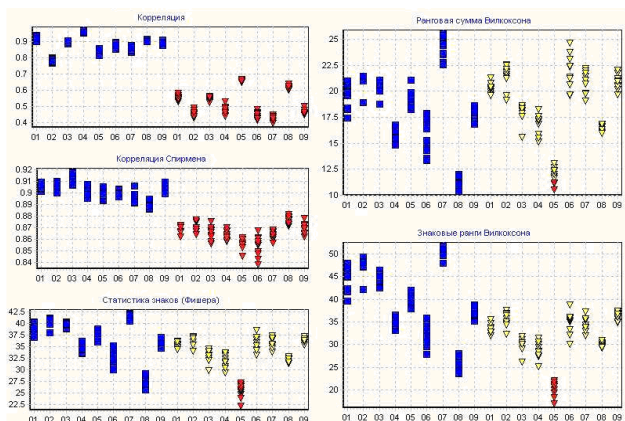


Рис. 8. Спектры сканирования сигнала

За эталонный спектр при проведении анализа принимался первый спектр в каждой серии сканирования.

### III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 3 сведены некоторые значения собственных частот колебания пластины с разной толщиной осадка, полученные расчетным и экспериментальным путем.

ТАБЛИЦА III. ЗНАЧЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЯ ПЛАСТИНЫ С РАЗНОЙ ТОЛЩИНОЙ ОСАДКА

Толщина отложений, мм	Полученные значения частот колебаний пластин, Гц	
	Расчетным путем в ANSYS	Экспериментальным путем
0,00	4285,23	4167,41
1,00	4936,17	4736,56
1,50	5527,14	5178,35

На рис. 9 приведен график, показывающий результаты исследований собственных частот колебаний пластины с разной толщиной осадка, полученные расчетным и экспериментальным путем.

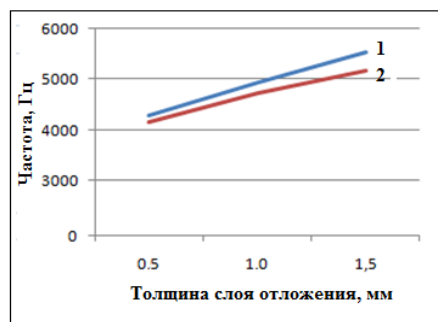


Рис. 9. Зависимость собственной частоты колебаний пластины от толщины осадка, полученная: 1 – расчетным и 2 – экспериментальным путем

Рассматривали поведение основной частоты – при увеличении толщины слоя получили сдвиг в сторону больших частот, как в расчетах, так и экспериментальным путем.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контролировать состояние поверхностей теплообмена систем теплоснабжения наиболее рационально неразрушающими методами. Для контроля толщины отложений предлагается применить низкочастотные акустические методы, в частности метод 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 вид, так как разные отложения имеют разную плотность.

Расчетным и экспериментальным путем было выявлено, что с увеличением толщины и плотности отложений увеличиваются и собственные частоты колебаний пластины.

Своевременный контроль поверхностей теплообмена, выявление отложений и его чистка позволяет уменьшить затраты на энергию и, как следствие, сократить общие эксплуатационные затраты, а также повысить энергоэффективность и продлить срок службы [12].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зиганшин Ш.Г., Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В.. Контроль технического состояния трубопроводов акустическими методами: монография. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. 160 с.
- [2] Поведение примесей пара в пароперегревателе. Интернет ресурс: <https://poznayka.org/s88276t1.html>.
- [3] Saifullin E.R., Vankov Yu.V., Izmaylova E.V., Bazukova E.R. Method of assessing the thermal state of the heat transfer surfaces. IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/1058/1/012058. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1058, 012058, 2018.
- [4] Mambetov R.F., Kushnarenko V.M., Hafizov F.S. Causes of the field flowline weld joint rust-through damage. Pipeline Sci. Technol. 4, 2020. 107 p.

- [5] Измайлова Е.В., Гарнышова Е.В., Ваньков Ю.В. Определение зависимости собственных частот колебаний поверхностей теплообмена от плотности отложений // Материалы XVII Всероссийской (IX Международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ-2022». Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2022. Т. 1. С. 128.
- [6] Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Нижний Новгород. 2006. 115 с.
- [7] Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В., Гарнышова Е.В., Загретдинов А.Р. Повышение энергоэффективности контролем трубопроводных систем. Казань: Издательство Казанского университета, 2022. 142 с.
- [8] Патент на полезную модель РФ № 198469 U1 / Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., Зиганшин Ш.Г. Устройство для контроля отложений на поверхностях теплообмена; Опубл. 13.07.2020. Бюл. № 20.
- [9] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615470 «2RSoundSA» / Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., Зиганшин Ш.Г., Загретдинов А.Р. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.04. 2019 г.
- [10] Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. № 4. С.106-114.
- [11] Ваньков Ю.В., Яковлева Э.Р. Об одном подходе к оценке затухания свободных колебаний // Электронный журнал «Техническая акустика» <http://webcenter.ru/~eeaa/ejta/>, 2005, 21.
- [12] Izmailova E.V., Garnyshova E.V., Kazakov R.B., Serov V.V. Determination of the sediment thickness on the heat-exchange surfaces by free vibration method. SES-2019, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405069>. E3S Web of Conferences 124, 05069. 2019.