

Акустический метод определения толщины отложений в технологическом оборудовании

Суслов А.В. 

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация;
a.v.suslov@inbox.ru; ORCID: 0009-0004-1076-1257 (А.В.);

Поступила: 14.12.2024

Рассмотрена: 18.01.2025

Принята: 07.04.2025

Научная статья



Аннотация. Проведены исследования акустического метода измерения толщины отложений на внутренней стенке технологического оборудования; экспериментальные исследования по изучению совместного влияния толщины стенки, диаметра трубопровода и толщины отложений на параметры колебаний стенки трубопровода; измерения неизвестных толщин отложений с использованием метода, основанного на анализе параметров колебаний стенки трубопровода. Осуществлены исследования по измерению неравномерного распределения отложений. Полученные результаты позволяют с хорошей точностью измерять толщину асфальтосмолопарафиновых отложений в технологическом оборудовании.

Ключевые слова: колебания; технологическое оборудование; отложения, метод акустического неразрушающего контроля.

Введение

Одной из серьезных проблем, сопровождающей процесс добычи нефти и нефтепродуктов, является образование асфальтосмолопарафиновых отложений на внутренних стенках трубопроводов и технологического оборудования. Наличие отложений приводит к уменьшению пропускной способности трубопроводов, что, в свою очередь, увеличивает энергозатраты на перекачку нефти. Кроме этого, закупорка трубопроводов повышает износ оборудования и может приводить к возникновению аварийных ситуаций [1]. Неочевидным является негативный эффект, связанный с учетом нефти и нефтепродуктов. Сужение проходного сечения приводит к изменению скорости потока среды, что ведет к погрешности в работе расходомеров на станциях учета нефти и нефтепродуктов. Исследованиям в данном направлении посвящены работы [2; 3].

Ежегодно страны тратят огромные средства на очистку трубопроводов от отложений, а в научной сфере проводятся новые исследования, посвященные вопросам образования и борьбы с отложениями. Так, остается актуальным вопрос построения моделей образования отложений, позволяющих не только объяснить осаждение отложений на внутренних стенках, но и предсказывать такое осаждение во времени. Из последних исследований можно выделить работу [4], также хочется отметить использование нейросетей для прогнозирования отложений в работе [5]. В плане борьбы с отложениями продолжается поиск эффективного растворителя и внутреннего покрытия трубопровода, способного предотвращать образование асфальтосмолопарафиновых отложений [6].

В настоящее время актуальной остается задача измерения толщины отложений. Этот вопрос поднимается как при процессах транспортировки нефти и нефтепродуктов, например с целью планирования очистных мероприятий, так и при проведении лабораторных исследований.

На текущий момент предложено много способов определения толщины отложений: по измерению температуры, электрического сопротивления, методы прохождения ультразвуковой волны, методы падения давления, измерения объема продукта, использования радиации и др. [7]. Предложенные методы обладают рядом недостатков, ограничивающих их повсеместное применение: в одних случаях необходимо нарушить целостность трубопровода, в других необходимы остановка трубопровода и его очистка от продукта, некоторые способы имеют

ограничение ввиду их небезопасности для персонала. Таким образом, простого и эффективного метода, который бы получил распространение на практике, не существует.

В настоящей статье описано экспериментальное исследование, посвященное новому методу измерения толщины отложений, основанному на изучении параметров колебаний стенки трубопровода. В работах [8] и [9] установлена взаимосвязь между параметрами колебаний стенки трубопровода и толщиной отложений: наличие отложений приводит к смещению резонансной частоты колебаний, уменьшению амплитуды, энергии и длительности колебаний. Чем больше толщина отложений, тем больше идет изменение указанных параметров. Аналогичные результаты с отложениями на поверхности теплообменного оборудования получены исследователями в работе [10].

Проведены новые экспериментальные исследования с целью изучения влияния на колебания дополнительных факторов, таких как диаметр и толщина трубопровода. Проведена апробация предложенного в [11] метода измерения толщины отложений.

1. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились с целью изучения факторов, влияющих на акустические колебания стенки трубопровода. Основные параметры, по которым проводилась проверка, следующие: диаметр трубопровода; толщина трубопровода; толщина отложений на внутренней стенке трубопровода.

В процессе исследования с помощью электромагнитного вибратора возбуждались свободные колебания на участках трубопроводов без отложений и на тех же участках трубопроводов, но с отложениями 3, 6, 9 и 12 мм (рис. 1.1). Для исключения случайных погрешностей в каждом случае проводилось не менее 100 измерений. Колебания регистрировались и подвергались дальнейшей обработке в разработанном специальном программном обеспечении. Найденные параметры (частота, амплитуда, энергия, длительность) в дальнейшем были подвергнуты двухфакторному дисперсионному анализу.

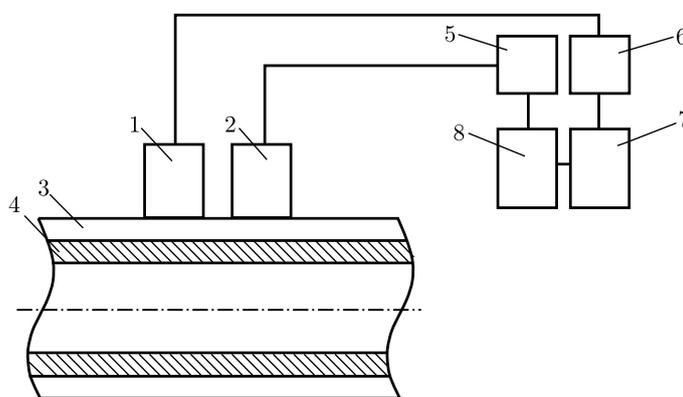


Рис. 1.1. Схема измерения: 1 – возбудитель колебаний, 2 – приемник, 3 – стенка трубы, 4 – отложения, 5 – усилитель, 6 – генератор, 7 – микроконтроллер, 8 – АЦП

Fig. 1.1. Measurement scheme: 1 – oscillation exciter, 2 – receiver, 3 – pipe wall, 4 – deposits, 5 – amplifier, 6 – generator, 7 – microcontroller, 8 – ADC

Первая серия равноточных экспериментов проводилась на трубопроводах одного диаметра, но разной толщины стенки. В первом исследовании использованы участки труб $\varnothing 159 \times 10$ мм, $\varnothing 159 \times 8$ мм и $\varnothing 159 \times 6$ мм.

Вторая серия осуществлялась на трубопроводах одной толщины стенки, но разных диаметров. Во втором эксперименте использованы участки труб $\varnothing 159 \times 6$ мм, $\varnothing 108 \times 6$ мм и $\varnothing 73 \times 6$ мм.

Третья серия экспериментов была нацелена на апробацию предложенного акустического метода. В данной серии толщины отложений были неизвестны. По результатам обработки

измерительных сигналов, полученных от трубопровода $\varnothing 159 \times 8$ мм, составлены уравнения зависимости энергии колебаний от толщины отложений и длительности колебаний от толщины отложений. Далее, на участке этого же трубопровода нанесены отложения неизвестной толщины и проведены измерения параметров колебаний стенки трубопровода для трех различных слоев. По установленным в процессе измерения параметрам энергии и длительности определена толщина отложений в каждом из трех случаев.

Дополнительно была проведена *четвертая серия* экспериментальных исследований. Данные эксперименты направлены на измерение толщины отложений в случае неравномерного их распределения по сечению трубопровода. На участке трубопровода $\varnothing 159 \times 8$ мм нанесены отложения согласно рис. 1.2. Распределение отложений следующее: сечение 1 — 5 мм, сечения 2 и 8 — 8 мм, сечения 3 и 7 — 10 мм, сечения 4 и 6 — 12 мм, сечение 5 — 15 мм. Зафиксированы измерения в 8 точках по периметру трубопровода.

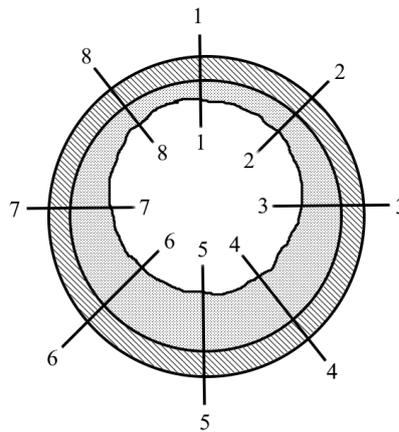


Рис. 1.2. Схема измерения при неравномерном распределении толщины отложений
Fig. 1.2. Measurement scheme for uneven distribution of deposit thickness

2. Результаты и обсуждения

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа влияния на отдельные параметры колебаний взаимосвязи таких факторов, как толщина отложений и толщина стенки трубопровода, представлены в таблице 2.1.

Во всех рассматриваемых случаях проверялись следующие гипотезы: H_0 — толщина отложений не влияет на исследуемый параметр; H_1 — толщина стенки не влияет на исследуемый параметр. Гипотезы отвергнуты во всех случаях, кроме параметра "амплитуда", т. к. p -значение параметра "амплитуда" для толщины отложений составляет 0.122, что больше 0.05.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа определения зависимости влияния таких факторов, как толщина отложений и диаметр трубопровода на параметры колебаний, отражены в таблице 2.2.

Во всех рассматриваемых случаях проверялись следующие гипотезы: H_0 — толщина отложений не влияет на исследуемый параметр, H_1 — диаметр трубопровода не влияет на исследуемый параметр. Гипотезы отвергнуты во всех случаях, кроме параметра "частота", т. к. p -значение параметра "частота" для толщины отложений составляет 0.182, что больше 0.05.

На рис. 2.1 и 2.2 представлены гистограммы результата проведенного двухфакторного анализа для анализа взаимосвязи параметров толщины отложений от толщины стенки и диаметра трубопровода соответственно.

Как видно из построенных диаграмм, наибольший вклад в изменение частоты и амплитуды колебаний вносят толщина стенки и диаметр трубопровода, а в изменении параметров энергии и длительности колебаний большую роль начинает играть толщина отложений.

Таблица 2.1

Анализ параметров колебаний в зависимости от толщины отложений и толщины стенки трубопровода

Table 2.1

Analysis of vibration parameters depending on the thickness of deposits and the thickness of the pipeline wall

Исследуемые параметры	Толщина отложений / Толщина стенки трубы / Частота колебаний		
	Значение F	p -значение	F критическое
Толщина отложений	8.206	0.006	3.838
Толщина стенки	16241.541	$3.675 \cdot 10^{-15}$	4.459
	Толщина отложений / Толщина стенки трубы / Амплитуда колебаний		
	Значение F	p -значение	F критическое
Толщина отложений	2.536	0.122	3.838
Толщина стенки	19.586	$8.272 \cdot 10^{-4}$	4.459
	Толщина отложений / Толщина стенки трубы / Энергия колебаний		
	Значение F	p -значение	F критическое
Толщина отложений	59.589	$5.416 \cdot 10^{-6}$	3.838
Толщина стенки	15.088	0.002	4.459
	Толщина отложений / Толщина стенки трубы / Длительность колебаний		
	Значение F	p -значение	F критическое
Толщина отложений	80.452	$1.697 \cdot 10^{-6}$	3.838
Толщина стенки	26.548	$2.939 \cdot 10^{-4}$	4.459

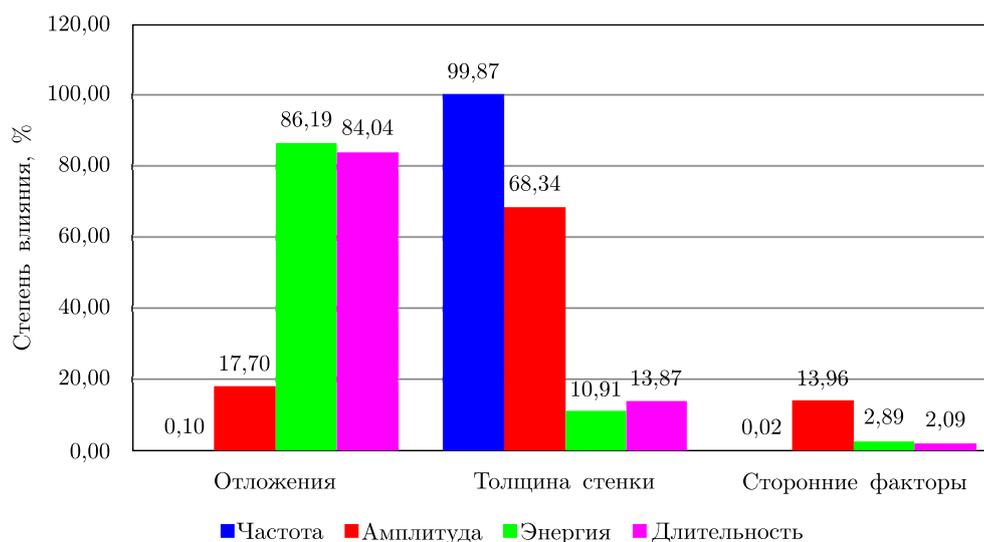


Рис. 2.1. Двухфакторный дисперсионный анализ взаимосвязи параметров колебаний от толщины отложений и толщины стенки трубопровода

Fig. 2.1. Two-way ANOVA of the relationship between the oscillation parameters and the thickness of the deposits and the thickness of the pipeline wall

Таблица 2.2

**Анализ параметров колебаний в зависимости от толщины отложений
и диаметра трубопровода**

Table 2.2

**Analysis of vibration parameters depending on the thickness of deposits
and the diameter of the pipeline**

Исследуемые параметры	Толщина отложений / Диаметр трубы / Частота колебаний		
	Значение F	p -значение	F критическое
Толщина отложений	2.038	0.182	3.838
Диаметр стенки	4677.451	$5.330 \cdot 10^{-13}$	4.459
	Толщина отложений / Диаметр трубы / Амплитуда колебаний		
	Значение F	p -значение	F критическое
Толщина отложений	8.518	0.006	3.838
Диаметр стенки	21.077	0.001	4.459
	Толщина отложений / Диаметр трубы / Энергия колебаний		
	Значение F	p -значение	F критическое
Толщина отложений	14.835	$0.901 \cdot 10^{-4}$	3.838
Диаметр стенки	17.445	0.001	4.459
	Толщина отложений / Диаметр трубы / Длительность колебаний		
	Значение F	p -значение	F критическое
Толщина отложений	12.120	0.002	3.838
Диаметр стенки	28.172	$0.238 \cdot 10^{-4}$	4.459

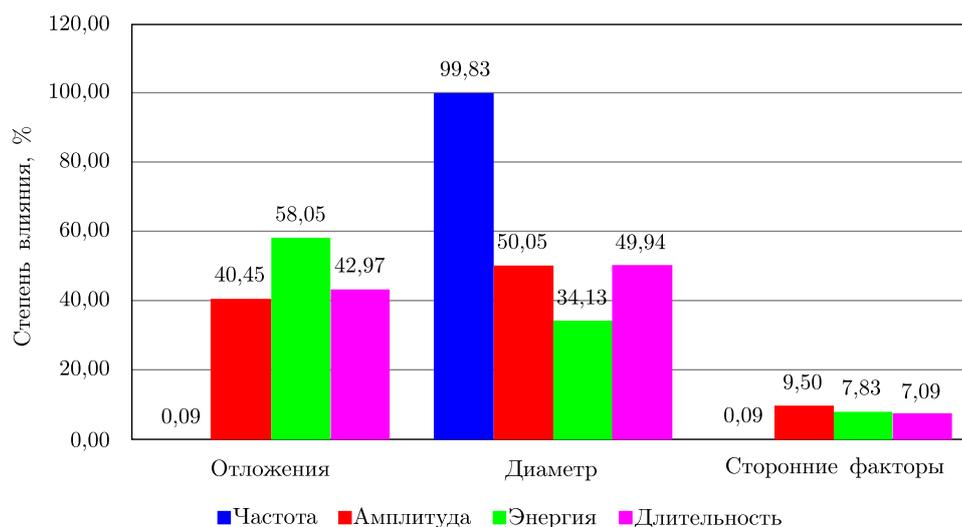


Рис. 2.2. Двухфакторный дисперсионный анализ взаимосвязи параметров колебаний от толщины отложений и диаметра стенки трубопровода

Fig. 2.2. Two-way ANOVA of the relationship between the oscillation parameters and the thickness of the deposits and the diameter of the pipeline wall

Влияние толщины стенки и диаметра трубопровода на частоту и амплитуду колебаний объясняется тем, что наряду с упругими свойствами материала это основные характеристики, входящие в систему дифференциальных уравнений колебаний замкнутой цилиндрической оболочки [12; 13]:

$$\begin{cases} D\Delta\Delta w + \frac{1}{R}\frac{\partial^2\chi}{\partial x^2} - \rho h\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0; \\ \frac{1}{Eh}\Delta\Delta\chi - \frac{1}{R}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \end{cases}$$

где ρ — плотность; h — толщина; R — радиус; w — перемещение; E — модуль упругости; χ — функция напряжений; D — цилиндрическая жесткость:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)},$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Поэтому изменение данных параметров приводит к изменению частоты и амплитуды колебаний.

Уменьшение энергии системы и длительности колебаний можно объяснить демпфированием колебаний, которое вносит в колебательную систему слой отложений. Чем больше слой отложений, тем больше демпфирование свободных колебаний.

Таким образом, по результатам работы [9] и текущего исследования в качестве основных информативных параметров выбраны энергия и длительность колебаний.

Составленные графики зависимости энергии и длительности колебаний по результатам исследований на участке трубопровода $\varnothing 159 \times 8$ мм представлены на рис. 2.3 и 2.4.

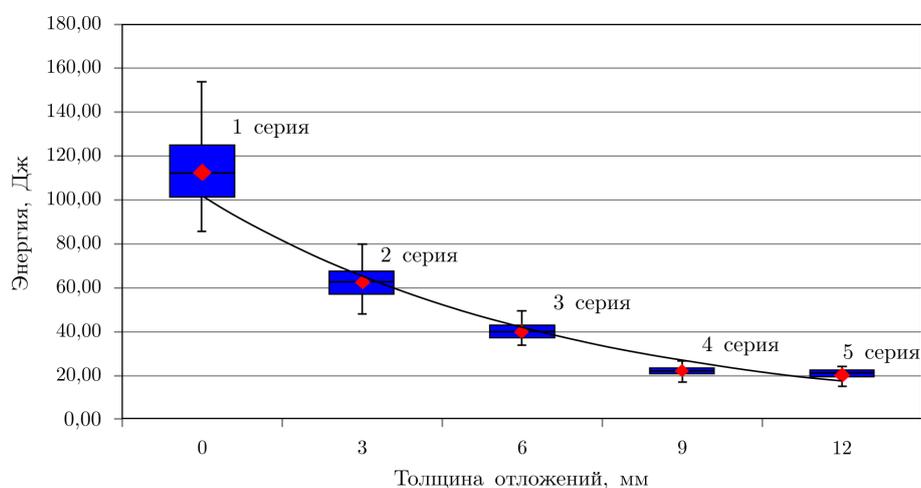


Рис. 2.3. График зависимости энергии колебаний от толщины отложений

Fig. 2.3. Graph of the dependence of the vibration energy on the thickness of the deposits

Установленные зависимости энергии и длительности колебаний от толщины отложений в дальнейшем использовались для определения неизвестной толщины отложений. Результаты измерений показаны в таблице 2.3.

Стоит отметить, что совместное использование параметров, а именно нахождение толщины отложений как среднее значение по обоим параметрам энергии и длительности колебаний, позволило снизить погрешность измерений. Максимальное значение составило 2 %.

Результаты измерения при неравномерном распределении толщины отложений представлены в таблице 2.4.

Как видно из таблицы 2.4, в реализуемом акустическом методе измерения определение толщины отложений осуществляется не по конкретному сечению в месте расположения датчика, а

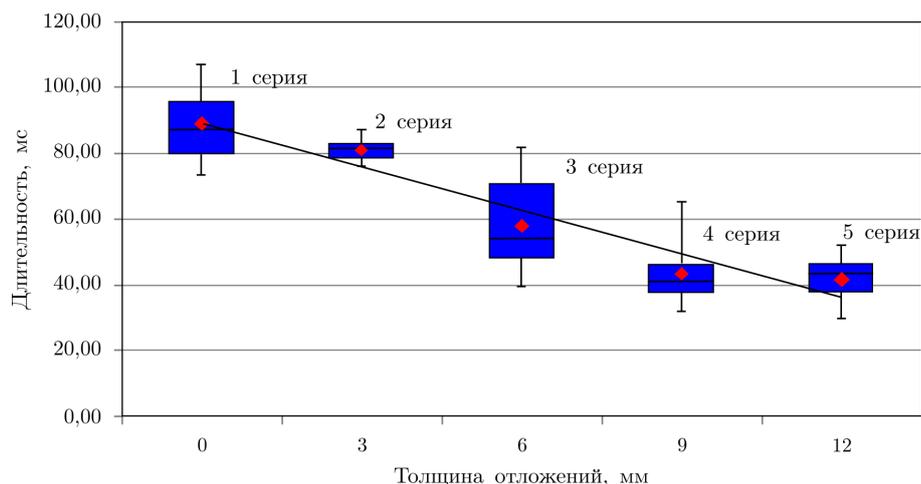


Рис. 2.4. График зависимости длительности колебаний от толщины отложений
 Fig. 2.4. Graph of the dependence of the duration of oscillations on the thickness of deposits

Таблица 2.3

Результаты измерений толщины отложений

Table 2.3

Results of deposit thickness measurements

Параметры	Измеренный параметр	Расчетное значение толщины, мм	Реальное значение толщины, мм	Относительная погрешность, %
1-я серия экспериментов				
Энергия	45.91 Дж	5.37	5.00	2.00
Длительность	67.99 мс	4.82		
Обобщенный параметр		5.10		
2-я серия экспериментов				
Энергия	34.74 Дж	7.23	8.00	0.25
Длительность	50.77 мс	8.73		
Обобщенный параметр		7.98		
3-я серия экспериментов				
Энергия	17.55 Дж	11.87	11.00	0.36
Длительность	44.34 мс	10.20		
Обобщенный параметр		11.04		

по среднему значению толщины отложений. Это можно объяснить следующим фактом: колебания системы пропорциональны не толщине входящих в систему компонентов, а распределению массы по толщине или массовой плотности:

$$m_0 = \rho h.$$

Среднее значение распределенной массы показано на рис. 2.5.

Расчет совокупности отдельных датчиков показал, что оптимальным является использование двух датчиков: одного, расположенного по верхней образующей трубы (на самом "тонком" слое), и второго, размещенного на нижней образующей трубы (на самом "толстом"

Таблица 2.4

Результаты измерения неравномерно распределенных отложений

Table 2.4

Results of measurement of unevenly distributed deposits

Номер датчика	Показатель энергии, Дж	Показатель длительности, мс	Измеренное значение толщины, мм
1	11.16	7.93	9.60
2	12.03	10.21	11.10
3	13.02	10.12	11.60
4	13.14	11.96	12.60
5	12.29	9.87	11.10
6	12.20	11.80	12.00
7	10.92	7.66	9.30
8	11.02	10.3	10.70

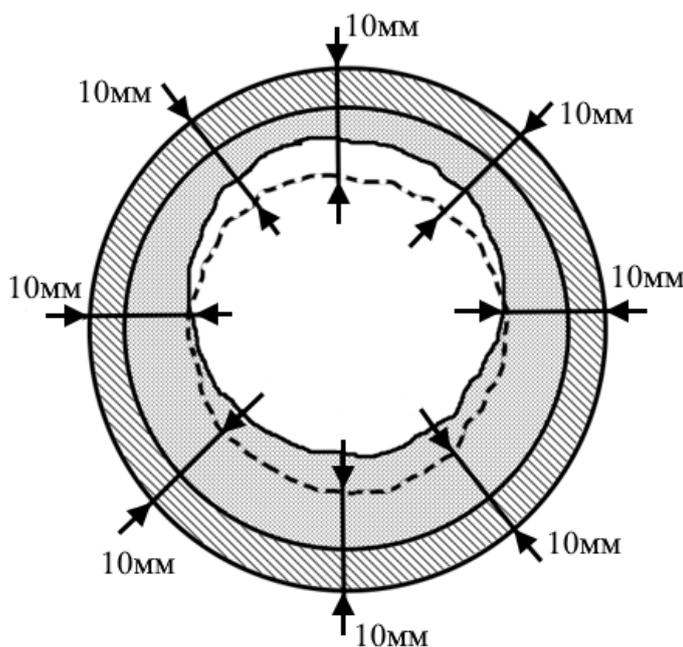


Рис. 2.5. Определение "среднего" значения распределения отложений по сечению трубопровода
 Fig. 2.5. Determination of the "average" value of the distribution of deposits across the pipeline cross-section

слое). Специфика образования отложений такова, что по нижней образующей трубы будет образовываться толстый слой. При использовании такой (сечения 1 и 5 на рис. 1.2) пары датчиков погрешность измерения составила 3,1 %.

Заключение

Анализ предыдущих и проведенных новых экспериментальных исследований определил наиболее значимые параметры колебаний стенки трубопровода, зависящие от толщины отложений. Такими параметрами выступают энергия и длительность колебаний.

Измерение неизвестной толщины отложений показало работоспособность предложенного метода определения толщины отложений на практике с достигнутой хорошей точностью измерений.

Измерения на участке трубопровода с неравномерным распределением отложений выявили зависимость колебаний от среднего значения толщины отложений, что позволяет использовать для измерений с достаточной степенью точности два датчика — одного, расположенного на верхней образующей трубы, и второго, размещенного на нижней образующей трубы.

Информация о конфликте интересов: автор и рецензенты заявляют об отсутствии конфликта интересов.

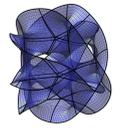
Цитирование. Суслов А.В. Акустический метод определения толщины отложений в технологическом оборудовании // Вестник Самарского университета. Естественная серия / Vestnik of Samara University. Natural Science Series. 2025. Т. 31, № 1. С. 64–74. DOI: 10.18287/2541-7525-2025-31-1-64-74.

© Суслов А.В., 2025

Антон Владимирович Суслов (a.v.suslov@inbox.ru) – старший преподаватель кафедры информационно-измерительной техники, Самарский государственный технический университет, 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Литература

- [1] Хасанов И.И., Каширина Д.А. Влияние состава асфальтосмолопарафиновых отложений на процесс парафинизации магистральных нефтепроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 3–4. С. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2022-3-4-26-31>.
- [2] Krasnov A.N., Prakhova M.Yu., Novikova Yu.V. Measurement of Oil Consumption by Turbine Flow Meters in Conditions of Wax Deposition // International Conference on Automatics and Energy (ICAЕ 2021). 2021. Vol. 2096. P. 012065. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012065>.
- [3] Неинвазивные методы контроля расхода жидкостей с применением накладных преобразователей и учетом отложений в трубопроводах // ИСУП. 2022. № 3 (99). С. 68–71. URL: [https://isup.ru/upload/pdf-zhurnala/2022/3/03\(99\)%202022_068_071_Konstanta.pdf](https://isup.ru/upload/pdf-zhurnala/2022/3/03(99)%202022_068_071_Konstanta.pdf).
- [4] Ilushin P., Vyatkin K., Kozlov A. Development of a New Model for the Formation of Wax Deposits through the Passage of Crude Oil within the Well // Sustainability. 2023. Vol. 15, issue 12. Article number 9616. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129616>.
- [5] Chen Zh., Wang N., Jin W., Li D. Prediction Model of Wax Deposition Rate in Waxy Crude Oil Pipelines by Elman Neural Network Based on Improved Reptile Search Algorithm // Energy Engineering. 2024. Vol. 121, no. 4. P. 1007–1026. DOI: <https://doi.org/10.32604/ee.2023.045270>.
- [6] Богатов М.В., Юдин П.Е., Веревкин А.Г., Берков Д.В. Предотвращение образования асфальтосмолопарафиновых отложений на поверхности насосно-компрессорных труб путем нанесения внутренних покрытий // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20, № 1. С. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-1-74-81>.
- [7] Alnaimat Fadi, Ziauddin Mohammed. Wax deposition and prediction in petroleum pipelines // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 184. P. 106385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106385>.
- [8] Суслов А.В. Ярославкина Е.Е. Теоретико-экспериментальное исследование зависимости собственных частот колебаний пластины от толщины отложений // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. Т. 29, Вып. № 2. С. 88–99. DOI: <https://doi.org/10.14498/tech.2021.2.6>.



- [9] Суслов А.В., Ярославкина Е.Е. Применение статистических исследований при выявлении зависимости параметров акустических колебаний на участке трубопровода от толщины отложений // Автоматизация в промышленности. 2023. Март. С. 13–16. DOI: <https://doi.org/10.25728/avtprom.2023.03.02>.
- [10] Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по загуханию собственных колебаний // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 4. С. 106–114. DOI: <http://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>.
- [11] Суслов А.В., Ярославкина Е.Е. Способ определения толщины отложений на внутренней стенке трубопроводов и технологического оборудования // Патент РФ на изобретение №2804261 от 26.09.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2804264C1/ru>.
- [12] Вибрации в технике: справочник: в 6 т. / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В.В. Болотина. Москва: Машиностроение, 1978. 352 с.
- [13] Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластин и оболочек. Москва: Наука, 1972. 432 с. URL: <https://djvu.online/file/nAycMFOD1SE33?ysclid=m85vrkx0gn669043016>.

DOI: 10.18287/2541-7525-2025-31-1-64-74

Acoustic method for measuring the thickness of deposits on the inner wall of technological equipment

Suslov A. V. 

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation; a.v.suslov@inbox.ru;
ORCID: 0009-0004-1076-1257 (A. V.);

Received: 14.12.2024

Revised: 18.01.2025

Accepted: 07.04.2025

Scientific article



Abstract. In the paper researches of the acoustic method for measuring the thickness of wax deposits on the inner wall of technological equipment are carried out. Experimental studies were conducted to study the combined effect of wall thickness, pipeline diameter and deposit thickness on the parameters of pipeline wall oscillation. Measurements of unknown deposit thicknesses have been carried out using a method based on the analysis of the parameters of pipeline wall oscillation. Experimental studies have been conducted to measure the irregular distribution of deposits. The obtained results allow, with good accuracy, to measure the thickness of wax deposits in technological equipment.

Key words: oscillations; technological equipment; wax deposits; acoustic non-destructive testing method.

Information about the conflict of interests: author and reviewers declared no conflict of interest.

Citation. Suslov A.V. Acoustic method for measuring the thickness of deposits on the inner wall of technological equipment. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya / Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2025, vol. 31, no. 1, pp. 64–74. DOI: 10.18287/2541-7525-2025-31-1-64-74. (In Russ.)

© Suslov A.V., 2025

Anton V. Suslov (a.v.suslov@inbox.ru) – senior lecturer of the Department of Information and Measurement Technology, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation.

References

- [1] Khasanov I.I., Kashirina D.A. Effect of the composition of asphaltene deposits on the process of waxing of main oil pipelines. *Transport and storage of Oil Products and hydrocarbons*, 2022, no. 3–4, pp. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2022-3-4-26-31>. (In Russ.)
- [2] Krasnova A.N., Prakhova M.Yu., Novikova Yu.V. Measurement of Oil Consumption by Turbine Flow Meters in Conditions of Wax Deposition. *International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021)*, 2021, vol. 2096, p. 012065. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012065>.
- [3] Non-invasive methods of monitoring liquid flow using clamp-on transducers and taking into account deposits in pipelines. *ISUP*, 2022, no. 3 (99), pp. 68–71. Available at: [https://isup.ru/upload/pdf-zhurnala/2022/3/03\(99\)%202022_068_071_Konstanta.pdf](https://isup.ru/upload/pdf-zhurnala/2022/3/03(99)%202022_068_071_Konstanta.pdf). (In Russ.)
- [4] Ilushin P., Vyatkin K., Kozlov A. Development of a New Model for the Formation of Wax Deposits through the Passage of Crude Oil within the Well. *Sustainability*, 2023, vol. 15, issue 12, Article number 9616. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129616>.
- [5] Zhuo Chen, Ningning Wang, Wenbo Jin, Dui Li. Prediction Model of Wax Deposition Rate in Waxy Crude Oil Pipelines by Elman Neural Network Based on Improved Reptile Search Algorithm. *Energy Engineering*, 2024, vol. 121, no. 4, pp. 1007–1026. DOI: <https://doi.org/10.32604/ee.2023.045270>.
- [6] Bogatov M.V., Yudin P.E., Verevkin A.G., Berkov D.V. Prevention of asphalt resin paraffin deposition on pump and compressor pipe surfaces by internal coating application. *Petroleum Engineering*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-1-74-81>. (In Russ.)
- [7] Alnaimat Fadi, Ziauddin Mohammed. Wax deposition and prediction in petroleum pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 184, p. 106385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106385>.
- [8] Suslov A.V., Yaroslavkina E.E. Theoretical-experimental study of dependence of natural frequencies of oscillations plates from application thickness. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2021, vol. 29, no. 2, pp. 88–99. DOI: <https://doi.org/10.14498/tech.2021.2.6>. (In Russ.)
- [9] Suslov A.V., Yaroslavkina E.E. Application of statistical methods for investigating the relationship between the parameters of acoustic oscillations in a pipeline section and the thickness of deposits. *Automation in industry*, 2023, March, pp. 13–16. DOI: <https://doi.org/10.25728/avtprom.2023.03.02>. (In Russ.)
- [10] Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., Vankov Yu.V. Control of thickness of deposits of heat exchange equipment by hardware and software complex. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 106–114. DOI: <http://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>. (In Russ.)
- [11] Suslov A.V., Yaroslavkina E.E. Method for determining thickness of deposits on the inner wall of pipelines and process equipment. Industrial patent RF №2804261, 26.09.2023. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2804264C1/ru>. (In Russ.)
- [12] Chelomey V.N. (ed.) Vibrations in technology: reference book: in 6 vols. Vol. 1. Bolotin V.V. (ed.) Oscillations of linear systems. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 352 p. Available at: <https://djvu.online/file/qvRpag0IArFL8?ysclid=m85vlfw8vh252268323>. (In Russ.)
- [13] Volmir A.S. Nonlinear dynamics of plates and shells. Moscow: Nauka, 1972, 432 p. Available at: <https://djvu.online/file/nAycMFOD1SE33?ysclid=m85vrkx0gn669043016>. (In Russ.)