

УДК 620.19

**ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗАВИСИМОСТИ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ
ПЛАСТИНЫ ОТ ТОЛЩИНЫ ОТЛОЖЕНИЙ*****Е.Е. Ярославкина, А.В. Суслов***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: k0046979@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче нефти и нефтепродуктов. Изучены методы измерения отложений. Проведено компьютерное моделирование зависимости собственных частот колебаний металлической пластины от толщины отложений. Подтверждена корреляционная зависимость частоты колебаний объекта контроля от толщины отложений. Проведено экспериментальное исследование отложений. Полученные результаты дают возможность исследования толщины отложений трубопроводов.

Ключевые слова: собственные частоты, корреляционная зависимость, толщина, асфальтосмолопарафиновые отложения, неразрушающий контроль, акустические методы.

В настоящее время этап развития нефтяной промышленности характеризуется осложнениями условий добычи на большинстве нефтяных месторождений. Процессы добычи, сбора и транспортировки нефти сопровождаются комплексом проблем, обусловленных образованием нефтяных эмульсий, образованием на стенках оборудования и трубопроводов асфальтосмолопарафиновых отложений, отложений неорганических солей, наличием в нефти различных механических примесей, а также коррозионным разрушением оборудования и трубопроводов [1].

В настоящий момент большая часть месторождений страны вступает в позднюю стадию разработки и добычи нефти и вопрос о совершенствовании технологических процессов становится особо актуальным [2].

Одной из проблем в данной сфере является образование на стенках трубопроводов и технологического оборудования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) [1].

Под механизмом отложения АСПО понимается комплекс процессов, обуславливающий накопление твердой фазы смолопарафиновой смеси на поверхности трубопроводов и оборудования. Существует множество факторов, приводящих к процессу «парафинизации»: разность температур в пласте и на поверхности скважины, изменение давления и скорости потока, наличие газа в смеси нефти, а также сам состав углеводородов в смеси нефти [3]. В работе [2] отмечают, что основ-

Ярославкина Екатерина Евгеньевна (к.т.н., доц.), заведующая кафедрой «Информационно-измерительная техника».

Суслов Антон Владимирович, ведущий инженер кафедры НОАП «Политех НК».

ными объектами, в которых происходит образование отложений парафина, являются скважинные насосы, насосно-компрессорные трубы, линии от скважин, резервуары сборных пунктов. Наиболее интенсивно парафин осаждается на внутренней поверхности подъемных труб скважин. Стоит также отметить, что состав углеводородов зависит от географического расположения скважины, а также меняется с течением времени [4].

Образование АСПО в проточной части уменьшает проходное сечение трубопроводов, что приводит к выводу оборудования из оптимального режима работы и, как следствие, к экономическим потерям и сокращению межремонтных периодов [5, 6]. Помимо трубопроводов, АСПО снижает эффективность работы насосов и другого технологического оборудования, а также является причиной их поломок. Так, в работе [7] указывается, что масса колонны штанг насосных установок вследствие отложения на ней парафина в среднем увеличивается на 600 кг, а количество отказов насоса из-за отложений составляет 72 % от общего числа отказов. А в работе [8] отмечается, что толщина отложений парафинов на дне резервуаров за 3–5 лет может достигать 1,5–2,0 м, что существенно уменьшает объем самих резервуаров.

«Парафинизация» трубопроводов является одной из старых проблем, которая появилась с началом добычи нефти и нефтепродуктов и до настоящего времени остается актуальной [9]. На некоторых месторождениях процесс «парафинизации» и, следовательно, межочистной период занимает всего 15–40 ч [10].

В борьбе с отложениями АСПО можно выделить два направления:

- предотвращение образования отложений;
- удаление сформировавшихся отложений.

В случае применения теплоносителя идет нагрев жидкости в специальном нагревателе (например, в передвижной котельной установке) и затем осуществляется подача этой жидкости в скважину способом прямой или обратной промывки.

Из недостатков таких методов можно выделить их высокую энергоемкость, электроопасность, пожароопасность, ненадежность и низкую эффективность применяемых технологий.

Одним из наиболее известных и повсеместно распространенных методов удаления отложений АСПО является применение различных растворителей, хотя данный метод не лишен существенной проблемы – подбор применяемого растворителя зависит от условий конкретного месторождения и в настоящее время проводится опытным путем.

Для удаления уже образовавшихся отложений также используется механический метод. Существует множество специально разработанных скребков различной конструкции. Однако использование этой группы методов борьбы с отложениями осложняется тем, что для их реализации нередко необходимо остановить работу оборудования. [11].

Ежегодно страны тратят большие средства на очистку трубопроводов и оборудования от отложений АСПО. Для планирования и своевременного проведения очистных мероприятий необходима информация о текущей толщине слоя АСПО на стенках данного оборудования [12–14].

Методы определения толщины отложений

Сформируем ряд требований к методу определения толщины отложений, которые будут характеризовать его оптимальным как со стороны экономической эффективности, так и со стороны практической реализации:

- 1) метод должен быть неразрушающим и не нарушать целостность технологического оборудования;
- 2) метод должен реализовываться при одностороннем доступе к объекту контроля;
- 3) требуется отсутствие технически сложного и дорогостоящего оборудования для контроля;
- 4) должны использоваться простые алгоритмы обработки результатов контроля [15].

Методы определения толщины отложений можно разделить на две группы: прямые и косвенные [16]. Реализация прямых методов осуществляется с прямым доступом внутрь трубопровода или с помощью запуска снаряда.

Косвенные методы определяют толщину отложений, опираясь на различные характеристики как самого оборудования, так и отложений. Есть методы, использующие электрическое сопротивление, скорость потока продукта, теплопроводность, акустические свойства, давление, количество прошедшего продукта и др. [17, 18].

Основными недостатками косвенных методов являются:

- погрешности, вызванные косвенными измерениями;
- сложность алгоритмов вычислений;
- сложность технической реализации.

Анализ существующих методов показал, что для реализации поставленных выше требований подойдут акустические методы неразрушающего контроля. Однако проведенная работа [19] установила, что предложенные на настоящий момент акустические методы имеют ряд недостатков и существует необходимость в разработке нового подхода к измерению отложений.

Компьютерное моделирование

Для проведения теоретического исследования собственных частот была разработана имитационная модель в виде металлической пластины. Вид модели был следующий: материал пластины – сталь 20; плотность 7800 кг/м³; модуль упругости 210·10⁹ Па; коэффициент Пуассона – 0,3; геометрические размеры пластины: 150 мм вдоль оси *OX* и вдоль оси *OY*, толщина 12 мм.

Была поставлена следующая гипотеза: наличие отложений на стенках объекта контроля будет влиять на его частоту собственных колебаний. Для подтверждения поставленной гипотезы проведено исследование свободных колебаний металлической пластины в среде конечно-элементных расчетов T-Flex Анализ программного комплекса T-Flex CAD. В данном программном модуле возможно провести анализ расчета собственных (резонансных) частот конструкции и соответствующих форм колебаний. Результаты используются для повышения надежности и работоспособности изделия в условиях, исключающих возникновение резонансов [20].

Была определена собственная частота первой формы колебаний металлической пластины. Для квадратной пластины, заделанной по краям, аналитическое решение находится по следующему выражению:

$$\omega = \frac{2\pi^2(m+\frac{1}{3})^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (1)$$

где D – изгибная жесткость;

h – толщина пластины;
 ρ – плотность;
 a – размер пластины вдоль оси OX и вдоль оси OY ;
 m – целые числа 1, 2, 3 ... [22]. Для первой формы колебаний $m=1$.
 Изгибная жесткость находится по формуле

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

где E – модуль упругости;
 μ – коэффициент Пуассона;
 h – толщина пластины.

Подставив значения в выражение (1), получим частоту $\omega=29357,33$ Гц.

Соответственно, собственная частота первой формы $f_p = \omega/2\pi = 4674,73$ Гц.

Моделирование в программном комплексе T-Flex CAD с использованием конечно-элементного анализа для заданного объекта контроля показало значение собственной частоты колебаний $f_M = 4518,26$ Гц.

На рис. 1 представлен анализ определения частот пластины в программном комплексе T-Flex CAD.

Задача_1 [Собственные частоты]
 Относительные перемещения, модуль
 Форма 1 - резонансная частота: 4518.259 Гц
 Масштаб перемещений: 0.00

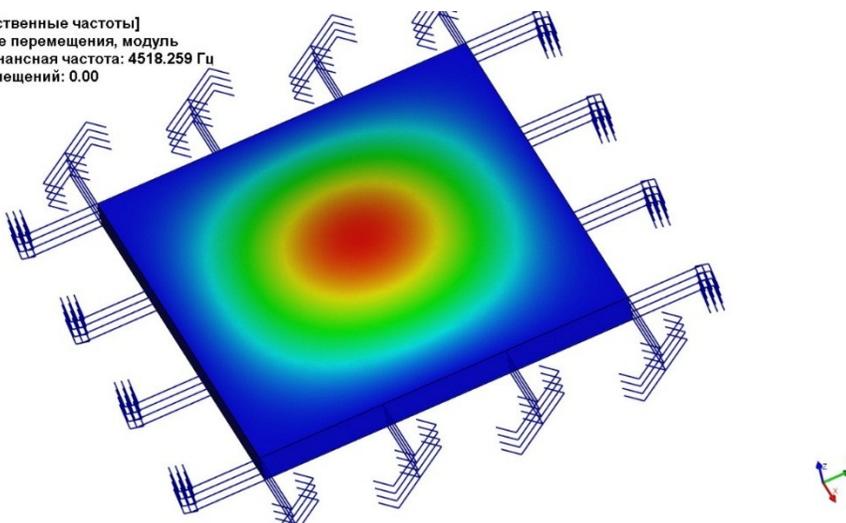


Рис. 1. Свободные колебания пластины

Для определения влияния парафиновых отложений на колебания пластины было проведено последовательное моделирование парафиновых отложений. Было решено провести моделирование последовательно с толщинами от 2 до 14 мм (с шагом в 2 мм).

На рис. 2 представлена модель колебаний пластины с отложением толщиной 14 мм.

По результатам моделирования проведен анализ зависимости резонансной частоты колебаний пластины на каждом шаге. С ростом толщины отложений резонансная частота колебаний стенки уменьшалась. Собственная частота с парафиновыми отложениями толщиной 14 мм составила 4347,92 Гц.

Анализ полученных значений результатов компьютерного моделирования был проведен с помощью метода наименьших квадратов. Для поиска коэффициентов уравнения a и b проведен регрессионный анализ. По результатам анализа получены следующие коэффициенты:

$$a = -11,88, b = 4507,51.$$

Задача_1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 1 - резонансная частота: 4347.924 Гц
Масштаб перемещений: 0.00

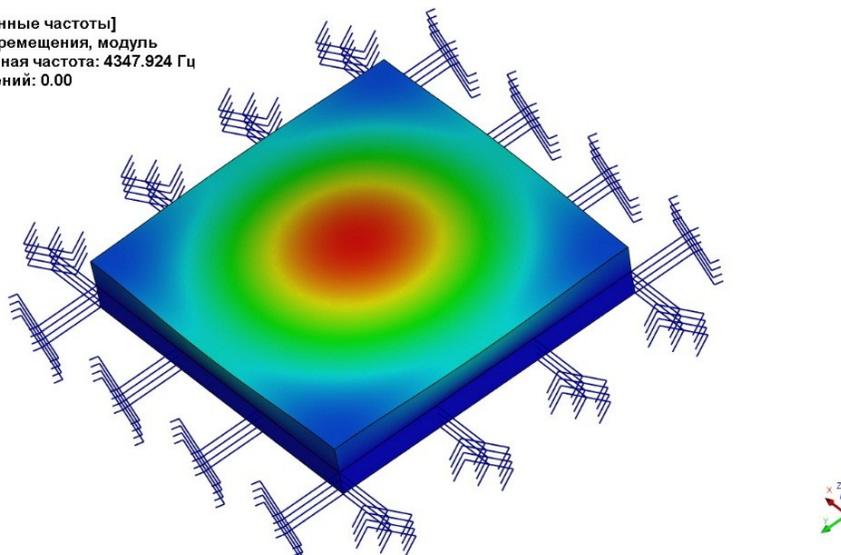


Рис. 2. Собственные частоты пластины с отложениями $h=14$ мм

И, соответственно, уравнение регрессии принимает вид

$$y = -11,88x + 4507,51.$$

Регрессионный анализ показал, что коэффициент детерминации составляет

$$R_2 = 0,99.$$

Результаты компьютерного моделирования представлены на графике (рис. 3).

Если рассматривать металлическую пластину и отложения как единую систему, то наличие отложений будет снижать жесткость системы, которая, в свою очередь, определяет частоту собственных колебаний.

Представим жесткость системы как сумму жесткостей отдельных ее частей. При сохранении граничных условий аналитическое решение примет вид

$$\omega = \frac{2\pi^2(m+\frac{1}{3})^2}{a^2} \sqrt{\frac{D_M+D_0}{\rho_M h_M + \rho_0 h_0}}, \quad (3)$$

где D_M – жесткость металлической пластины;

D_0 – жесткость парафиновых отложений;

ρ_M – плотность пластины;

h_M – толщина пластины;

ρ_0 – плотность отложений;

h_0 – толщина отложений.

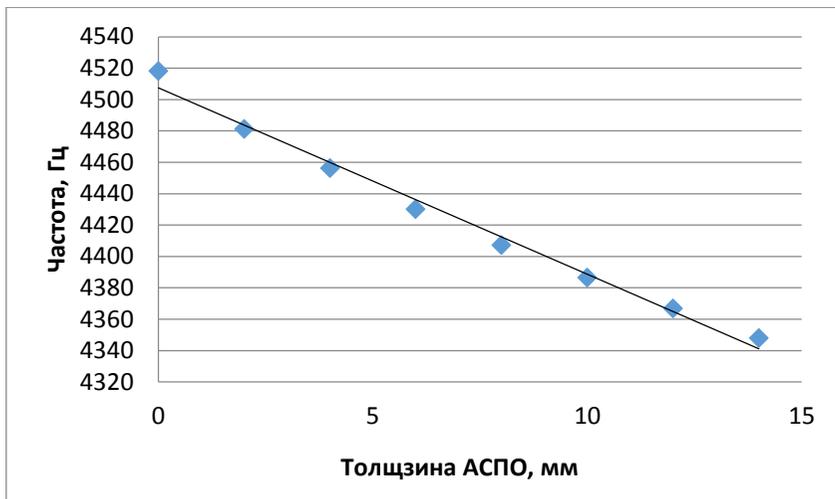


Рис. 3. График зависимости частоты колебаний от толщины отложений (по результатам компьютерного моделирования)

Найдено аналитическое решение для смоделированных ранее толщин парафиновых отложений и проведен их сравнительный анализ. Результаты анализа представлены в таблице.

Сравнение аналитического решения и результатов моделирования

Толщина отложений, мм	Аналитическое решение, Гц	Результат моделирования, Гц	Относительная погрешность, $\delta = \frac{ f_m - f_p }{f_m} \cdot 100\%$
0	4674,73	4518,26	3,47
2	4630,51	4481,22	3,33
4	4588,05	4456,34	2,96
6	4547,82	4430,15	2,66
8	4510,23	4407,24	2,34
10	4475,73	4386,50	2,03
12	4444,71	4366,83	1,78
14	4417,56	4347,92	1,60

На рис. 4 представлены графики аналитического решения и результатов моделирования.

Анализ моделирования показывает наличие прямолинейной зависимости частоты собственных колебаний объекта исследования от толщины отложений.

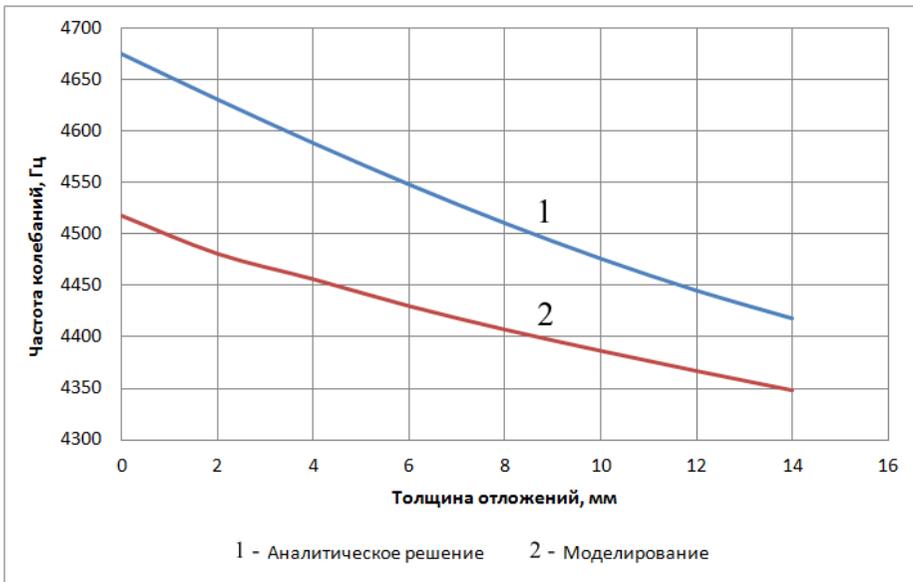


Рис. 4. Сравнение результатов аналитического решения и моделирования

Экспериментальное исследование

Для подтверждения компьютерного моделирования была разработана информационно-измерительная система с применением акустических методов. Принцип работы системы заключается в возбуждении на локальном участке объекта контроля свободных колебаний и измерении их параметров [21].

Эксперимент строился по следующему плану [15]: на участке трубопровода диаметром 91 мм и толщиной 6 мм возбуждались периодические акустические колебания импульсной формы. Свободные колебания участка трубопровода регистрировались приемником акустических колебаний, обрабатывались, и на полученном частотном спектре отмечалась частота с наибольшей амплитудой (рис. 5).

Во время эксперимента были проведены серии равноточных измерений: без отложений АСПО и с отложениями различной толщины. Толщина АСПО накладывалась с шагом, как и при компьютерном моделировании, в 2 мм в диапазоне от 2 до 18 мм.

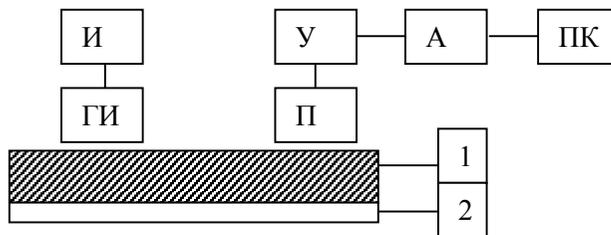


Рис. 5. Структурная схема информационно-измерительной системы:

1 – объект контроля; 2 – АСПО; ИН – источник напряжения; ГИ – генератор прямолинейного излучения; ПП – приемник акустического сигнала; У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер

На рис. 6 представлен спектр колебаний стенки трубопровода без отложений АСПО. Частота свободных колебаний составила 2005,3 Гц.

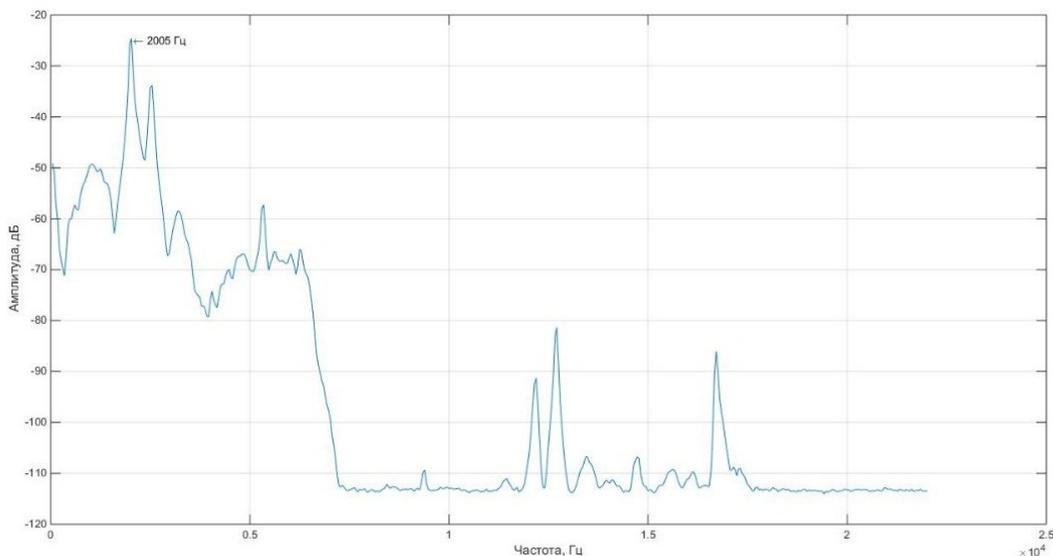


Рис. 6. Спектр колебаний стенки трубопровода без отложений АСПО

Как и в случае компьютерного моделирования, наличие отложений на внутренней стенке трубопровода приводит к изменению частоты собственных колебаний. Частота собственных колебаний стенки трубопровода с отложениями толщиной 18 мм составила 1920 Гц (рис. 7).

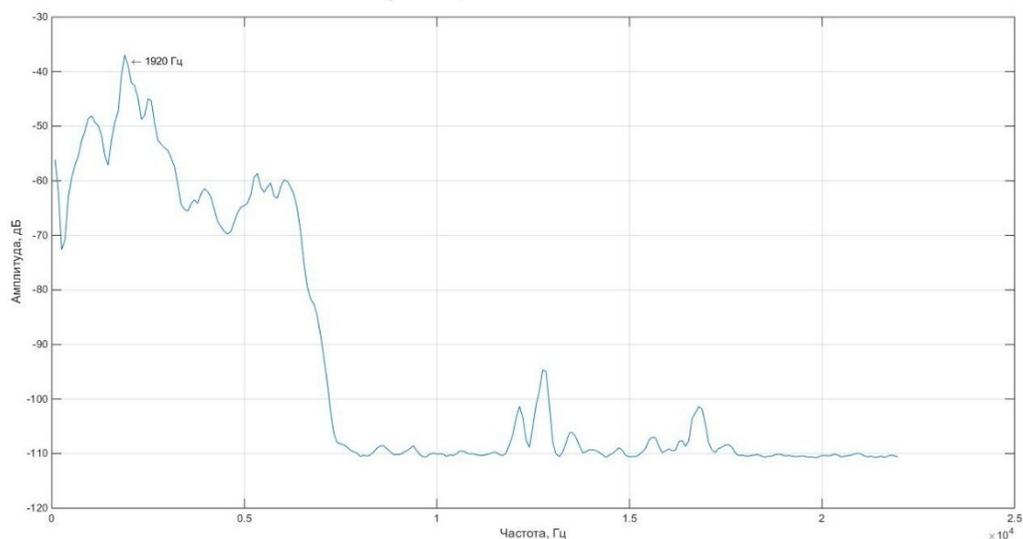


Рис. 7. Спектр колебаний стенки трубопровода с отложениями АСПО толщиной 18 мм

По результатам эксперимента обнаружена линейная зависимость частоты колебаний стенки трубопровода от толщины отложений.

Равнорасеянность дисперсий групп измерений была подтверждена критерием Фишера.

Далее с применением метода наименьших квадратов получено уравнение регрессии:

$$y = -4,64x + 2007,10.$$

Коэффициент детерминации составляет

$$R_2 = 0,97,$$

что говорит о хорошей линейной корреляционной зависимости.

На рис. 8 представлен график корреляционной зависимости экспериментальных данных.

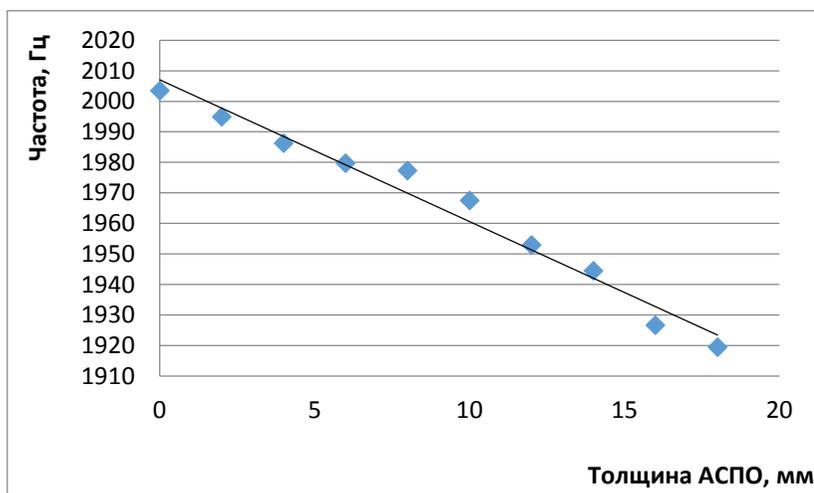


Рис. 8. График зависимости частоты колебаний от толщины отложений (по результатам экспериментального исследования)

Проведенный эксперимент и анализ полученных результатов показали наличие тесной зависимости частоты свободных колебаний трубопровода от толщины отложений на его внутренних стенках. Зависимость является линейной обратно пропорциональной, и с ростом толщины отложений частота колебаний уменьшается, что согласуется с компьютерным моделированием.

Заключение

В настоящее время проблема отложений АСПО на внутренних стенках трубопроводов и технологического оборудования остается актуальной. Соответственно, актуальным остается и вопрос об измерении толщины отложений. Данные измерения несут информацию о текущем состоянии технического оборудования и о необходимости или, наоборот, об отсутствии потребности в очистке трубопровода от отложений на данном временном отрезке его работы. Такая информация несет в себе не только экономическую выгоду, но и предупреждение возможных катастроф в результате выхода оборудования из строя.

Анализ предложенных на настоящий момент методов показал необходимость разработки нового подхода, который совмещал бы в себе решение обозначенных в данной статье проблем: метод должен быть неразрушающим; метод должен быть реализован через односторонний доступ к объекту контроля; метод не должен

быть дорогостоящим; должны использоваться простые алгоритмы для обработки результатов контроля.

Найденная по результатам экспериментального исследования и по результатам компьютерного моделирования зависимость частоты свободных колебаний стенки трубопровода от толщины отложений может быть положена в основу разработки нового метода измерения толщины АСПО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ибрагимов Н.Г., Хафизов А.Р.* Осложнения в нефтедобыче / Н.Г. Ибрагимов, Хафизов А.Р., Шайдаков В.В. и др. – Уфа: Монография, 2003. – 302 с.
2. *Рогачев М.К., Стрижнев К.В.* Борьба с осложнениями при добыче нефти. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2006. – 295 с.
3. *Тронов В.П.* Механизм образования смоло-парафиновых отложений и борьба с ними. – М.: Недра, 1969. – 191 с.
4. Waxes in asphaltenes of crude oils and wax deposits / Yulia M. Ganeeva, Tatiana N. Yusupova, Gennady V. Romanov. Springenlink.com, 2016.
5. *Денисламов И.З., Мусин И.И., Якупов Р.Р., Ситдииков И.А.* Количественная диагностика и удаление асфальтосмолопарафиновых отложений в скважинах и нефтесборных трубопроводах // Нефтегазовое дело. – 2019. – № 1. – С. 41–49.
6. Wenda Wang, Qiyu Huang. Prediction for wax deposition in oil pipelines validated by field pigging // Journal of the Energy Institute, 2014. – С. 196–207.
7. *Персиянцев М.Н.* Добыча нефти в осложненных условиях. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 653 с.
8. *Маркин А.Н., Низамов Р.Э., Суховерхов С.В.* Нефтепромысловая химия: практическое руководство. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 288 с.
9. Herbert Hofstatter. Application of ultrasound for the destruction of resin-paraffin deposits in pipeline transport of oil // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – С. 6–9.
10. *Чеботников В.А.* Исследование условий образования асфальтосмолопарафиновых отложений в скважинах и разработка технологии борьбы с ними: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 23.11.2011. – Тюмень, 2011. – 24 с.
11. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессе добычи, транспорта и хранения / Л.В. Иванова, Е.А. Буров, В.Н. Кошелев // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 1. – С. 268–284.
12. *Табет Н.К.А.* Система автоматического контроля толщины парафиновых отложений в нефтепроводах на основе модифицированного теплового метода измерения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 02.10.2020. – Уфа, 2020. – 20 с.
13. *Фетисов В.С., Табет Н.К.А.* Проблемы измерений толщины отложений асфальтопарафиновых отложений в нефтепроводах и пути их решения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – № 1. – Т. 14. – С. 55–60.
14. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review / A.L. Sousa, H.A. Matos, L.P. Guerreiro // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2019. No. 9. Pp. 2091–2017.
15. *Суслов А.В., Ярославкина Е.Е.* Исследование зависимости собственных частот колебаний стенки трубопровода от толщины отложений // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сборник научных статей 6-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (12 февраля 2021 г.) / отв. ред. А.А. Горохов. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2021. – С. 234–238.
16. *Валеев А.Р., Гирфанова Д.Ю.* Прямые и косвенные методы определения количества парафиноотложений в нефтепроводе // Нефтегазовое дело. – 2013. – Т. 11. – № 4. – С. 110–114.
17. Wax Thickness and Distribution Monitoring Inside Petroleum Pipes Based on External Temperature Measurements / Shumpei Ito, Yoshiaki Tanaka, Tatsuya Hazuku, Tomonori Ihara, Motoaki Morita, and Ivor Forsdyke // ACS Omega, 2021. – № 6. – С. 5310–5317.
18. Techniques for Measuring Wax Thickness During Single and Multiphase Flow / Chen X.T., Bulter T., Volk M., J.P. Brill // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 1997.
19. *Ярославкина Е.Е., Суслов А.В.* Методы определения толщины отложений в нефтепроводах // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – № 1(18). – С. 210–217.
20. Методические материалы для профессионального и высшего уровня образования. <https://www.tflex.ru/vuzam/methodology>

21. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
22. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.) – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. 1978. – 352 с.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2021 г.

THEORETICAL-EXPERIMENTAL STUDY OF DEPENDENCE OF NATURAL FREQUENCIES OF OSCILLATIONS PLATES FROM APPLICATION THICKNESS

E.E. Yaroslavkina, A.V. Suslov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

Abstract. *The paper considers the problem of asphalt-resin-paraffin deposits in the production of oil and oil products. Methods of sediment measurement have been studied. Computer simulation of dependence of natural frequencies of metal plate oscillations on thickness of deposits was carried out. Correlation dependence of oscillation frequency of the control object on thickness of deposits is confirmed. The obtained results allow prospective investigation of pipe-wires deposits thickness.*

Keywords: *additional signals, harmonic signals, error instantaneous values, phase-shift blocks, harmonic model.*

REFERENCES

1. Ibragimov N.G., Hafizov A.R. Complications in oil production / N.G. Ibragimov, A.R. Hafizov, V.V. Shaidakov. – Ufa: Monograph, 2003. – 302 p.
2. Rogachev M.K., Strizhnev K.V. Combating complications in oil production. Moscow: Nedra-Businesscenter LLC, 2006. – 295 p.
3. Tronov V.P. Mechanism for the formation of resin-paraffin deposits and the fight against them. – Moscow: Nedra, 1969. – 191 p.
4. Waxes in asphaltenes of crude oils and wax deposits / Yulia M. Ganeeva, Tatiana N. Yusupova, Gennady V. Romanov. Springenlink.com, 2016.
5. Denislamov I.Z., Musin I.I., Yakupov R.R., Sitdikov I.A. Quantitative diagnostics and removal of asphalt-resin-paraffin deposits in wells and oil collection pipelines // Oil and gas business. – 2019. – No. 1. – Pp. 41–49.
6. Wenda Wang, Qiyu Huang. Prediction for wax deposition in oil pipelines validated by field pigging // Journal of the Energy Institute, 2014. – С. 196–207.
7. Persiyantsev M.N. Oil production in complicated conditions. Nedra-Businesscenter LLC2000. 653 p.
8. Markin A.N., Nizamov R.E., Sukhoverkhov S.V. Neftepromyslovaya chemistry: practical leadership. Vladivostok: Dalnauka, 2011. 288 p.
9. Hofstatter H. Application of ultrasound for the destruction of resin-paraffin deposits in pipeline transport of oil // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – P. 6–9.
10. Chebotnikov V.A. Study of the conditions for the formation of asphalt-resin-paraffin deposits in wells and the development of technology for combating them. Auto-abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. 23.11.2011. Tyumen, 2011. 24 p.

Ekaterina E. Yaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Head of the Department of Measuring Technique.

Anton V. Suslov, lead engineer certification authority “Politeh NK”.

11. *Ivanova L.V., Burov E.A., Koshelev V.N.* Asphaltosmoloparaffin deposits in the process of production, transport and storage // *Oil and gas business*. 2011. No. 1. Pp. 268–284.
12. *Tabet N.K.A.* Automatic control system of paraffin deposit thickness in oil pipelines based on modified thermal measurement method. Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences. 02.10.2020. Ufa, 2020. 20 p.
13. *Fetisov V.S., Tabet N.K.A.* Problems of measuring the thickness of deposits of as-faltoparaffin deposits in oil pipelines and ways to solve them // *Elek-trotechnical and information complexes and systems*. 2018. No. 1. Vol. 14. Pp. 55–60.
14. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review / A.L. Sousa, H.A. Matos, L.P. Guerreiro // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019. No. 9. Pp. 2091–2017.
15. *Suslov A.V., Yaroslavkina E.E.* Study of the dependence of the natural frequencies of the pipeline wall oscillations on the thickness of deposits // *Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering: a collection of scientific articles of the 6th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation (February 12, 2021)* / Editor: Gorokhov A.A. (ed. edition); South-West. state. Un-t., Kursk: South-West. gos. un-t, 2021. Pp. 234–238.
16. *Valeev A.R., Girfanova D.Yu.* Direct and indirect methods of determining the amount of paraffin deposits in the oil pipeline // *Oil and gas business*. 2013. Vol. 11. No. 4. Pp. 110–114.
17. Wax Thickness and Distribution Monitoring Inside Petroleum Pipes Based on External Temperature Measurements / Shumpei Ito, Yoshiaki Tanaka, Tatsuya Hazuku, Tomonori Ihara, Motoaki Morita, and Ivor Forsdyke // *ACS Omega*, 2021. No. 6. Pp. 5310–5317.
18. Techniques for Measuring Wax Thickness During Single and Multiphase Flow / Chen X.T., Bulter T., Volk M., J.P. Brill // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 1997*.
19. *Yaroslavkina E.E., Suslov A.V.* Methods of determining the thickness of deposits in oil pipelines // *Information-measuring and control systems*. 2020. No. 1(18). Pp. 210–217.
20. Methodological materials for professional and higher education. <https://www.tflex.ru/vuzam/methodology>.
21. *Lange Yu.V.* Acoustic low-frequency methods and means of non-destructive testing of multilayer structures. M.: Engineering, 1991. 272 p.
22. *Vibrations in technology: Reference book*. In 6 t. / Ed. council: V.N. Chelomey (before). Moscow: Engineering, 1978. Vol. 1. Oscillations of linear systems / Ed. V.V. Bolotin. 1978. 352 p.