



ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ ОТЛОЖЕНИЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПО ЗАТУХАНИЮ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В. Гарнышова, Е.В. Измайлова, Ю.В. Ваньков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

garnyshova@mail.ru

Резюме: Заращение теплообменных поверхностей отложениями является важной проблемой в сфере теплоэнергетики. Так как коэффициент теплопроводности отложений имеет низкие значения, то даже незначительный их слой создает большое термическое сопротивление. Отложения на поверхностях теплообменного оборудования снижают коэффициент теплопередачи, эффективность теплообмена и приводят к существенным потерям энергии. Для восстановления расчетного режима работы требуется вывод таких теплообменников из эксплуатации и чистка загрязненных поверхностей. Снизить энергетические потери можно, если своевременно выявлять отложения на поверхностях теплообмена. В работе обсуждается метод контроля толщины отложений на теплообменных поверхностях. Метод основан на анализе параметров затухания свободных колебаний контролируемого изделия. Исследования проводились на моделях поверхности теплообменного оборудования - стальных пластинах 400x160x2 мм, с разной толщиной отложений 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 мм. При исследовании акустических характеристик с каждым типом пластины проводилось десятикратное определение частот собственных колебаний. Обработка сигналов происходит в программе, которая позволяет получать и записывать данные от звукового устройства, вычислять амплитудный спектр сигнала во временной области и возвращать его в виде величины и фазы (получение спектра частот). Для определения динамики изменения спектров использовалась ранговая сумма Уилкоксона. Проведенные исследования показали, что метод свободных колебаний позволяет определять не только наличие отложений на теплообменных поверхностях, но и их толщину.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, отложения, теплообменное оборудование, метод свободных колебаний.

Для цитирования: 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. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114.

CONTROL OF THICKNESS OF DEPOSITS OF HEAT EXCHANGE EQUIPMENT BY HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX

EV. Garnyshova, EV. Izmaylova, YuV. Vankov

Kazan state power engineering University, Kazan, Russia

garnyshova@mail.ru

Abstract: The deposits formation on heat exchange surfaces is an important problem in the thermal power industry. Since the thermal conductivity coefficient of deposits has low values, even a small layer of them creates a large thermal resistance. Deposits on the heat exchange equipment surfaces reduce the heat transfer coefficient, heat transfer efficiency, and lead to significant energy losses. To restore the operation design mode, such heat exchangers must be decommissioned and contaminated surfaces must be cleaned. Energy losses can be reduced if deposits on heat exchange surfaces are detected in a timely manner. The paper discusses a method for controlling deposits thickness on heat exchange surfaces. The method is based on the damping parameters analysis of the controlled product free vibrations. The research was

carried out on models of the heat exchange equipment surfaces-steel plates 400x160x2 mm, with different deposits thickness 1 During studying of the acoustic characteristics, the natural vibrations frequencies were determined tenfold with each type of plate. Signal processing occurs in a program that allows you to receive and record data from an audio device, calculate the signal amplitude spectrum in the time domain, and return it as a value and phase (receiving the frequency spectrum). The Wilcoxon rank sum was used to determine the spectrum changes dynamics. The researches have shown that the free vibrations method allows us to determine not only the presence of deposits on the heat exchange surfaces, but also their thickness.

Key words: hardware and software complex, deposits, heat exchange equipment, free oscillation method.

For citation: Garnyshova EV, Izmaylova EV, Vankov YuV. Control of thickness of deposits of heat exchange equipment by hardware and software complex. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(4):106-114. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114.

Введение

Целью работы является оценка возможности контроля отложений на поверхностях теплообменного оборудования по параметрам свободных затухающих колебаний. Определение толщины должно выполняться с наружной стороны теплообменной поверхности в процессе эксплуатации.

В результате эксплуатации теплообменного оборудования с неудовлетворительной водоподготовкой на внутренней поверхности аппаратов происходит отложение осадка. Теплопроводность которого в десятки раз ниже теплопроводности металла [1]. Наличие даже тонкого слоя осадков приводит к резкому снижению теплопроводности, повышению температуры поверхностей нагрева. Эксплуатация конструкций в условиях перегрева снижает механическую прочность металла и как следствие ведет к повреждениям и снижению надежности системы.

Отдельно следует рассмотреть негативное влияние отложений в теплообменниках системы горячего водоснабжения. Наличие отложений приводит к существенному перерасходу топлива из-за ухудшения условий теплообмена (табл.1) и электрической энергии на перекачку теплоносителя из-за уменьшения проходного сечения и увеличения гидравлического сопротивления.

Таблица 1

Потери от накипи в системах отопления в зависимости от толщины слоя

Толщина слоя накипи (мм)	0,4	0,8	1,6	3,2	4,8	6,4	9,6	12,7	15,9	19,1
Перерасход жидкого топлива, л на 1000 л	40	70	110	180	270	380	480	600	740	900
Перерасход угля, кг на 1 т.н.	80	140	220	360	540	760	960	1200	1400	1800
Перерасход газа, м ³ на 1000 м ³	40	70	110	180	270	380	480	600	740	900
Перерасход энергоносителя в %	4	7	11	18	27	38	48	60	74	90

Снизить энергетические потери можно путем своевременного контроля толщины отложений поверхностей теплообменного оборудования. Для этого необходимо иметь доступные методики и оборудование, которые позволят провести контроль в режиме реального времени.

Контролировать состояние теплообменных поверхностей в процессе эксплуатации наиболее рационально неразрушающими методами. В настоящее время для определения широкой номенклатуры свойств материалов (прочностных, упругих, пластических, вязких) широко используются акустические методы контроля [2, 3]. Они основаны на измерении физических параметров, связанных с распространением упругих волн в твердых телах. Ультразвуковые методы, используемые при дефектоскопии изделий, требуют тщательной подготовки поверхности контроля, обеспечения надежного акустического контакта поверхности и датчиков, обладают большой трудоемкостью [4-6].

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.

Методика контроля заключается в возбуждении собственных колебаний контролируемого объекта, фиксации отклика, проведении анализа спектра собственных частот и выдачи заключения о состоянии изделия [8, 9].

Известно, что собственные колебания являются затухающими и описываются уравнением (1).

$$x(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0) \quad (1)$$

где A_0 – начальная амплитуда колебаний; ϕ_0 – начальная фаза; ω – циклическая частота; β – коэффициент затухания колебаний.

Величины A_0 и ϕ_0 определяются условиями возбуждения колебаний, а циклическая частота затухающих колебаний определяется по формуле (2):

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (2)$$

График затухающих колебаний представляет синусоиду (Рис. 1) с уменьшающейся с течением времени по экспоненциальному закону (3) амплитудой [10]:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t} \quad (3)$$

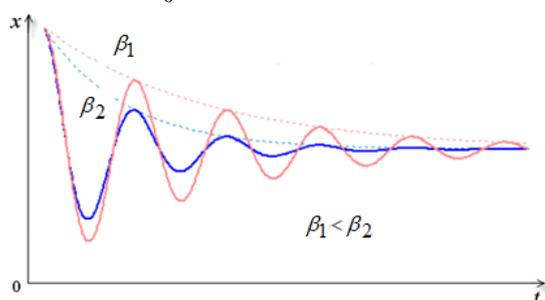


Рис. 1. Затухающие колебания

Оценку затухания колебаний по результатам экспериментов можно проводить по амплитудно-временному сигналу, по изменению амплитуд спектральных составляющих сигнала, по изменению с течением времени какого-либо критерия сравнения амплитудного спектра в начальный момент времени с последующими.

Оценка затухания колебаний по амплитудно-временному сигналу заключается в определении закона изменения огибающей графика сигнала. Другие способы связаны с анализом амплитудных спектров сигнала в разные моменты времени с начала возбуждения колебаний. В зависимости от спектрального состава сигнала при формировании спектра процедурой быстрого преобразования Фурье можно применять функции оконного взвешивания отсчетов выборки (окно Барлетта, Хэмминга и т.д.) [11, 12].

Методы

Для проведения исследований авторами использовался аппаратно-программный комплекс, блок-схема которого представлена на Рис.2, который включает в себя устройство для контроля толщины отложений на поверхностях теплообмена (Рис. 3), состоящее из двух систем – регистрации и обработки сигналов.



Рис. 2. Блок-схема аппаратно-программного комплекса

В систему регистрации входит объект контроля, датчик и ударник. В систему обработки входит аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и компьютер.

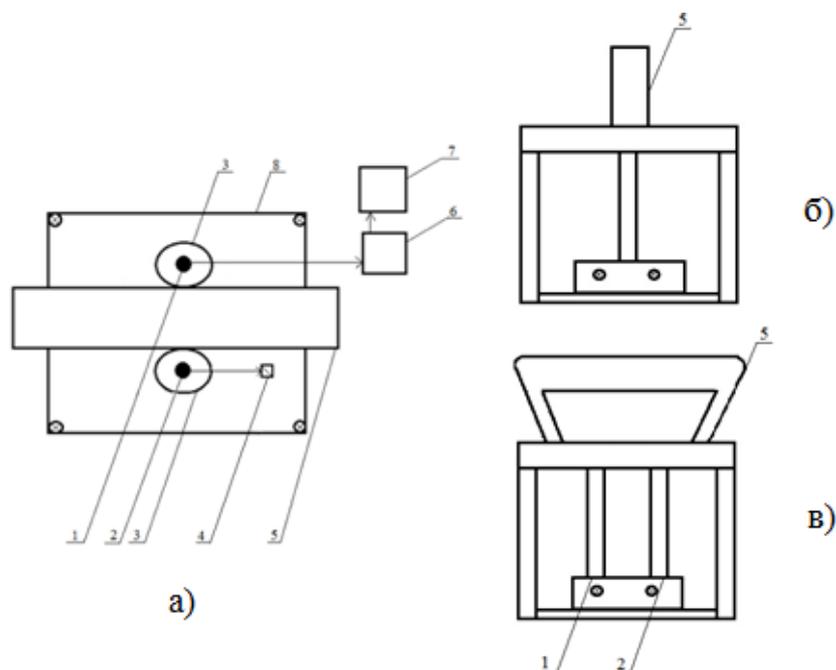


Рис. 3. Устройство для контроля для контроля толщины отложений на поверхностях теплообмена:
а) вид сверху; б) вид сбоку; в) вид спереди

Цифрами на Рис. 3 обозначены:

- 1 – пьезоэлектрический датчик (микрофон);
- 2 – ударник;
- 3 – отверстия для крепления ударника и датчика;
- 4 – тумблер;
- 5 – ручка;
- 6 – аналого-цифровой преобразователь;
- 7 – персональный компьютер;
- 8 – корпус.

Устройство для контроля отложений на поверхностях теплообмена работает следующим образом. На корпусе находятся два отверстия, тумблер и ручка. В первом отверстии располагается ударник, во втором – пьезоэлектрический датчик, соединенный с АЦП. Корпус устройства устанавливают на первый диагностируемый участок поверхности теплообмена. Ударник возбуждает колебания на поверхности теплообмена, пьезоэлектрический датчик принимает аналоговый сигнал. Постоянство силы удара обеспечивается отведением ударника на одно и то же расстояние.

После возбуждения колебаний контролируемого изделия аналоговый сигнал с датчика поступает в АЦП, оперативную память компьютера, подвергается обработке специализированным программным обеспечением [13] и результаты фиксируются на жестком диске в виде файла отчета.

Наличие рамки прибора, ограничивающей колебания локальной области позволяет уменьшать влияние смежных областей контролируемой поверхности на результаты измерений.

В лабораторных исследованиях в качестве моделей поверхности теплообмена использовались металлические пластины длиной 400 мм, шириной 160 мм и толщиной 2 мм. Исследовались пластины без осадка и с разной толщиной отложений 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 мм.

С каждым типом пластины проводилось по десять экспериментов. По пластине наносился нормированный механический удар, записывался акустический отклик и проводился анализ его амплитудно-частотных характеристик.

Результаты и обсуждение

На рис.4 представлен пример амплитудно-временного сигнала и его амплитудного спектра.

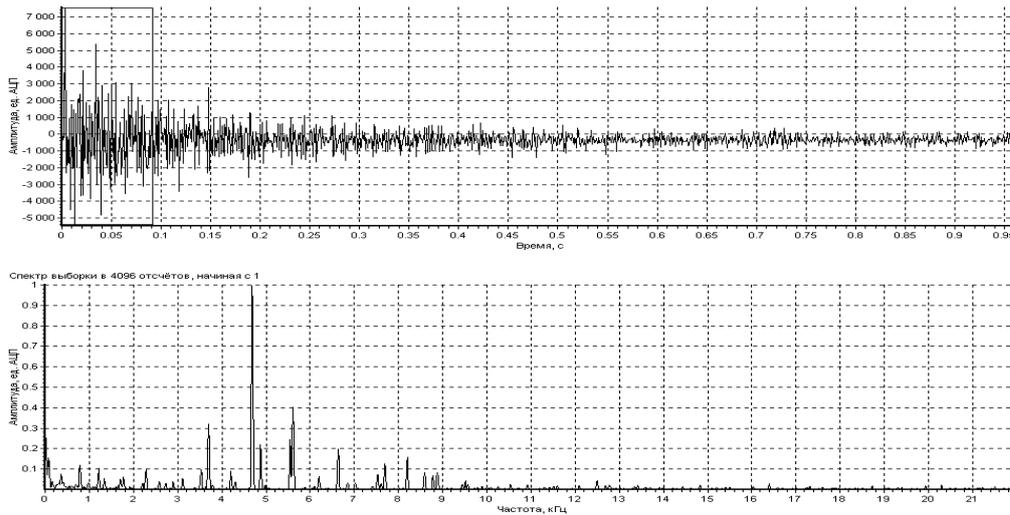


Рис. 4. Сигнал и его амплитудный спектр

На рис.5 приведены изменения амплитудных спектров сигнала с течением времени. Спектр в начальный момент времени расположен на дальнем плане, ось времени направлена к читателю.

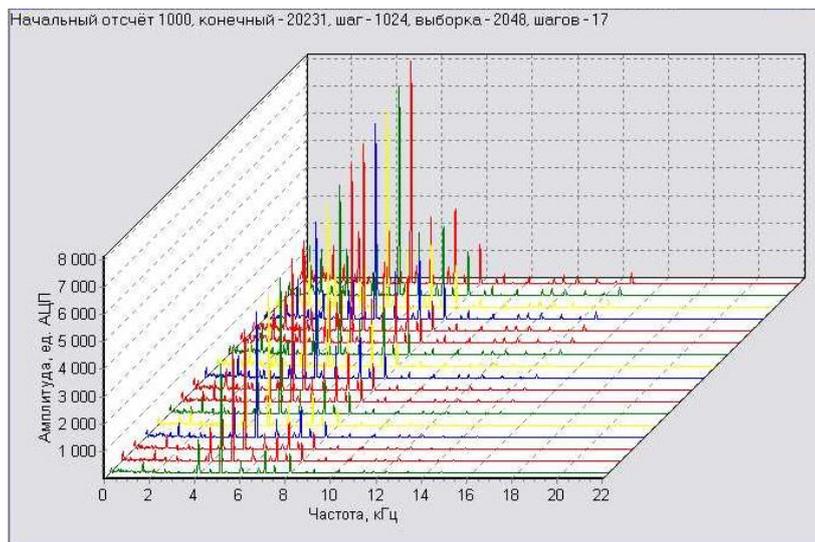


Рис. 5. Набор спектров сканирования сигнала

На рис.6 приведены текущий спектр *а*), эталонный (спектр пластины без осадка) *б*) и разница между ними.

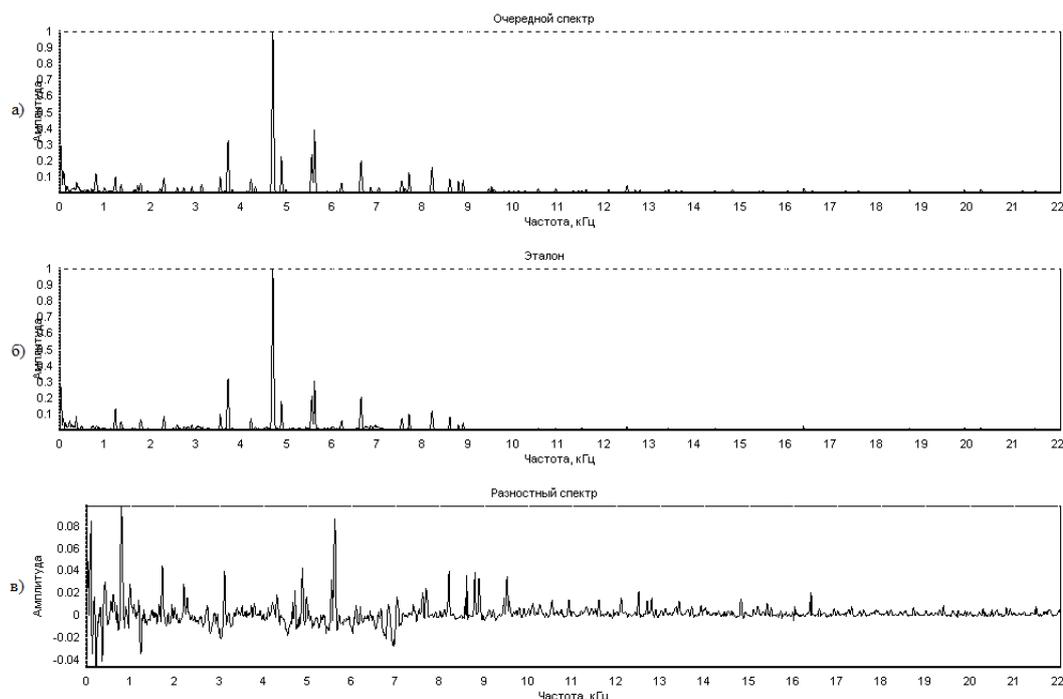


Рис. 6. Пример спектров:
а) текущий; б) эталонный; в) разностный

Для того, чтобы уйти от возможной зависимости от силы возбуждения колебаний на амплитудные спектры при разных экспериментах, анализ спектров проводится в относительных величинах. Относительные амплитуды спектральных составляющих получаются путем их деления на амплитуду максимальной составляющей спектра.

Анализ спектров колебаний, представленных на рис. 5 и 6 показал, что в сигналах присутствуют составляющие в диапазоне до 10 кГц.

Для оценки динамики изменения всех спектральных составляющих применили ранговую сумму Уилкоксона (*Wilcoxon rank-sum test, Wilcoxon's rank sum test*).

Ранговая сумма Уилкоксона является непараметрическим критерием используемым для сравнения двух выборок по уровню количественного признака, измеренного в непрерывной или порядковой шкале. Данный метод выявления различий между выборками предложен в 1945 году Френком Уилкоксоном (*F. Wilcoxon*) [14, 15].

В разработанном программном обеспечении сравнения спектров ранговая сумма Уилкоксона вычисляется по следующему алгоритму:

- Смешиваются амплитуды эталонного и текущего спектров.
- Смесь амплитуд упорядочивается по возрастанию.

Из полученного вариационного ряда выбираются и суммируются ранги амплитуд текущего спектра. При совпадении значений амплитуд текущего и эталонного спектра к сумме прибавляется полусумма рангов этих амплитуд.

Результаты обработки спектров сканирования чистой пластины и пластин с осадком приведены в табл.2 и на рис.7. За эталонный спектр при проведении анализа брался первый спектр в каждой из каждой серии сканирования.

Таблица 2

Значения статистики Уилкоксона для спектров сканирования образцов

№ спектра сканирования	Значения статистики Уилкоксона (W)				
	образец без осадка	толщина осадка 1 мм	толщина осадка 1,5 мм	толщина осадка 2,0 мм	толщина осадка 2,5 мм
1	0	0	0	0	0
2	-8,802	-12,414	-14,748	-18,594	-20,729
3	-14,391	-21,228	-24,453	-25,939	-25,599
4	-19,886	-25,038	-28,806	-29,79	-29,303
5	-22,741	-28,852	-31,341	-32,333	-31,245
6	-25,546	-30,608	-32,796	-33,885	-32,074
7	-27,103	-32,265	-33,316	-35,079	-33,501
8	-29,092	-33,286	-34,36	-35,736	-34,027
9	-30,585	-33,823	-35,181	-36,311	-34,944

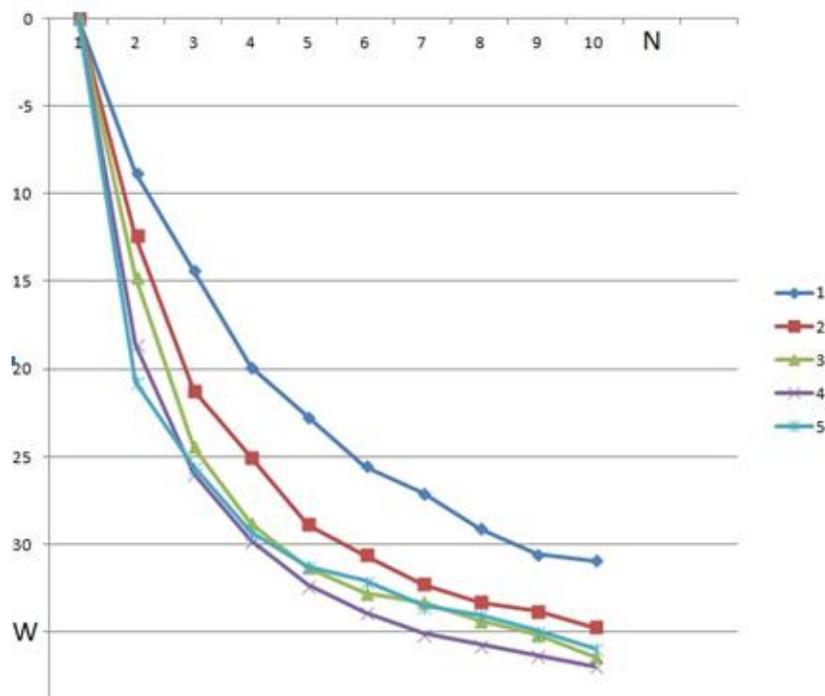


Рис. 7. Изменение статистики Уилкоксона исследуемых спектров сигналов с течением времени: 1 – Чистая пластина, 2 – толщина осадка 1,0 мм, 3 – толщина осадка 1,5 мм, 4 – толщина осадка 2,0 мм, 5 – толщина осадка 2,5 мм

Ниже представлены уравнения полиномиальной аппроксимации третьей степени с величиной достоверности аппроксимации R^2 полученные в *Excel* по результатам, представленным табл. 1.

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= -0,0433x^3 + 1,1428x^2 - 11,215x + 9,8658 & R^2 &= 0,999 \\
 Y_2 &= -0,0954x^3 + 2,11934x^2 - 17,382x + 14,789 & R^2 &= 0,997 \\
 Y_3 &= -0,1437x^3 + 3,0649x^2 - 21,817x + 18,307 & R^2 &= 0,997 \\
 Y_4 &= -0,1511x^3 + 3,2118x^2 - 22,537x + 17,743 & R^2 &= 0,985 \\
 Y_5 &= -0,1698x^3 + 3,4629x^2 - 23,092x + 17,321 & R^2 &= 0,966
 \end{aligned}$$

Заключение

Проведенные лабораторные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Метод локальных свободных колебаний позволяет обнаруживать наличие отложений на поверхностях теплообмена.
2. Наличие осадка приводит изменению частот собственных колебаний контролируемого изделия и увеличению затухания акустического отклика.
3. Для одновременной оценки изменения частот колебаний и их затухания целесообразно проводить анализ сигналов по оценке изменения их спектров с течением времени.
4. В качестве критерия сравнения спектров при обнаружении осадка на поверхностях теплообмена возможно использование ранговой суммы Уилкоксона.

Результаты полиномиальной аппроксимации третьей степени изменения статистики Уилкоксона с течением времени для исследуемых пластин показали, что предлагаемый метод позволяет обнаруживать осадок толщиной в доли миллиметра.

Литература

1. Saifullin E.R, Vankov Y.V., Izmaylova E.V., et al. Method of assessing the thermal state of the heat transfer surfaces. Journal of Physics: Conference Series, Low-temperature Plasma during the Deposition of Functional Coatings. Сер. "Scientific Technical Conference on Low Temperature Plasma during the Deposition of Functional Coatings, LTP Coatings 2017" 2018. С. 012058.
2. Алешин Н.П. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989.
3. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. Книга 2. Акустические методы контроля. М.: Высшая школа. 1991.
4. Vankov Yu.V., Ziganshin Sh.G., Izmailova E.V., et al. The effect of the size and position of transverse cracks in the natural frequencies of the rods. В сборнике: IOP Conference Series: Materials

Science and Engineering Сер. "International Scientific and Technical Conference "Innovative Mechanical Engineering Technologies, Equipment and Materials-2014", ISC IMETEM 2014" 2015. С. 012036.

5. Zagretdinov, A.R, Vankov, Y.V., Ivshin, I.V. The Analysis of Frequencies of Own Insulators Fluctuations for the Solution of a Problem of their Control. *Procedia Engineering*. 2016. V. 150. PP. 2334-2339. 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016, Chelyabinsk; Russian Federation; 19-20 May 2016.

6. Vankov Yu.V., Ziganshin Sh.G., Izmailova E.V, et al. Determination of the oscillation frequencies of corrosion defects finite element methods in order to develop methods of acoustic monitoring of pipelines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015.

7. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В. Контроль толщины отложений на теплообменном оборудовании // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М: МЭИ, 2019.

8. Зиганшин Ш.Г., Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В. Контроль технического состояния трубопроводов акустическими методами. Казань: Издательство Казанского университета. 2015.

9. Ваньков Ю.В. Низкочастотные методы контроля. Метод свободных колебаний. Казань. Издательство КГЭУ, 2003.

10. Ваньков Ю.В., Яковлева Э.Р. Об одном подходе к оценке затухания колебаний. *Техническая акустика*. 2005. Т.5. С.251-265.

11. Lawrence S. *Digital spectral analysis with applications*. Marple, Jr. 2007.

12. Newland D.E. *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis: Third Edition*. 2005.

13. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615470 «2RSoundSA». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 апреля 2019.

14. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. // *Annals of Mathematical Statistics*. 1947. № 18. pp. 50-60.

15. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods // *Biometrics Bulletin* 1. 1945. pp. 80-83.

Авторы публикации

Гарнышова Елена Владимировна – магистр 2-го года обучения, Казанский государственный энергетический университет.

Измайлова Евгения Вячеславовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Saifullin ER, Vankov YV, Izmaylova EV, et al. Method of assessing the thermal state of the heat transfer surfaces. *Journal of Physics: Conference Series, Low-temperature Plasma during the Deposition of Functional Coatings*. Scientific Technical Conference on Low Temperature Plasma during the Deposition of Functional Coatings, LTP Coatings 2017. 2018. С. 012058.

2. Aleshin NP. *Methods of acoustic control of metals*. Moscow: Mashinostroenie, 1989.

3. Ermolov IN, Aleshin NP, Potapov AI. *Nondestructive testing*. Book 2. Acoustic control methods. Moscow: Higher school. 1991.

4. Vankov YuV, Ziganshin ShG, Izmailova EV, et al. *The effect of the size and position of transverse cracks in the natural frequencies of the rods*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Сер. International Scientific and Technical Conference Innovative Mechanical Engineering Technologies, Equipment and Materials-2014, ISC IMETEM 2014 2015. С. 012036.

5. Zagretdinov AR, Vankov YV., Ivshin IV. *The Analysis of Frequencies of Own Insulators Fluctuations for the Solution of a Problem of their Control*. *Procedia Engineering*. 2016;150:2334-2339. 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016, Chelyabinsk; Russian Federation; 19-20 May 2016.

6. Vankov YuV, Ziganshin ShG, Izmailova EV, et al. *Determination of the oscillation frequencies of corrosion defects finite element methods in order to develop methods of acoustic monitoring of pipelines*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015.

7. Garnysheva EV, Izmailova EV. Control of thickness of deposits on heat exchange equipment proceedings Of the International scientific and technical conference. *Radioelectronics, electrical engineering and power engineering*. M: MEI, 2019.

8. Ziganshin ShG, Vankov YuV, Izmailova EV. *Control of technical condition of pipelines by acoustic methods..* Kazan: Kazan University Press. 2015.

9. Vankov YuV. *Low-Frequency control methods. Method of free oscillations*. Kazan. Publishing house of Kazan state power engineering University, 2003.

10. Vankov YuV, Yakovleva ER. On one approach to estimation of vibration damping. *Technical acoustics*. 2005;5:251-265.

11. Lawrence S. *Digital spectral analysis with applications*. Marple, Jr. 2007.

12. Newland DE. *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis: Third Edition*. 2005.

13. Izmailova EV, Vankov YuV, Garnysheva EV, et al. Certificate of state registration of the computer program N. 2019615470. 2RSound SA. Registered In the register of computer programs on April 26, 2019.

14. Mann HB, Whitney DR. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*. 1947;18:50-60.

15. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*. 1945. pp. 80-83.

Authors of the publication

Elena V. Garnyshova – Kazan state power engineering University, Kazan, Russia.

Evgeniya V. Izmaylova – Kazan state power engineering University, Kazan, Russia.

Yuri V. Vankov – Kazan state power engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

02 июня 2020г.