

УДК 620.19

## К ВОПРОСУ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ ЖКХ

Шакурова Р.З., Гапоненко\* С.О., Кондратьев А.Е.

### Аннотация

Рассматриваются и анализируются вопросы, связанные с диагностикой технического состояния трубопроводов ЖКХ. Основное внимание уделено инерциальному возбуждению диагностических низкочастотных вибрационных колебаний в стенке трубопровода с помощью разработанного устройства. Приведены результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** повышение надежности, возбуждение колебаний, инерциальный резонатор, свободные колебания, спектр колебаний.

### Введение

Энергетика является одной из фундаментальных отраслей российской экономики. Это обусловлено тем, что все технологические процессы в промышленности, в сельском хозяйстве, на транспорте и во всех сферах обслуживания населения связаны с большими затратами энергии. [1]. В этой связи уделяется большое внимание надежности энергосистемы и безопасной эксплуатации энергетических объектов. Одним из направлений обеспечения надежности является проведение диагностики оборудования с целью своевременного выявления дефектов и их последующего устранения [2-4].

### Постановка проблемы

Регулирование вопросов, касающихся надежной и безопасной эксплуатации производственных объектов и направленных на предупреждение аварий и опасных ситуаций в производственных процессах осуществляется Федеральным законом №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997. Кроме того, безаварийная эксплуатация оборудования и трубопроводов промышленных объектов обеспечивает экологическую безопасность и санитарно-эпидемиологическое благополучие населения, предписываемые Федеральным законом №170-ФЗ «О санитарно - эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 г., Федеральным законом №7-ФЗ «Об охране окружающей природной среды» от 10.01.2002 г.

В настоящее время проблема износа объектов коммунальной инфраструктуры и их технологическая отсталость стоит очень остро. Об-

---

\* Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Республика Татарстан, Россия, e-mail: [aekondr@mail.ru](mailto:aekondr@mail.ru)

щий износ сетей составляет порядка 70%, что приводит к высокой аварийности и потере воды, тепла, электричества в процессе производства и транспортировки до потребителей [5-7]. Кроме того, подобные аварии несут за собой большие материальные затраты, значительный вред экологии, а порой и человеческие жертвы.

В этой связи необходим жёсткий контроль и регулярный мониторинг технического состояния трубопроводов ЖКХ.

### **Инерциальное возбуждение диагностических низкочастотных вибрационных колебаний**

В настоящее время для диагностики труб применяют некоторые методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковой контроль, магнитный метод контроля, капиллярный метод, однако каждый из перечисленных методов позволяет выявлять дефекты определенного типа, таким образом, данные методы не являются универсальными [8].

*Для оценки технического состояния разработана универсальная методика и устройство для поиска различных дефектов трубопроводов.* Суть методики состоит в возбуждении диагностических низкочастотных вибрационных колебаний в стенке трубопровода с помощью инерциального резонатора с последующей регистрацией колебаний с помощью чувствительного элемента и анализом полученных спектров [9].

Возбуждение колебаний осуществляется с помощью стенда, схема которого представлена на рис. 1.

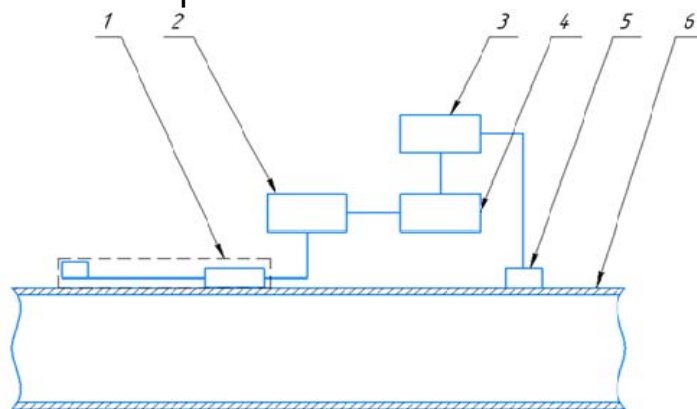


Рис. 1 – Стенд для возбуждения диагностических вибрационных низкочастотных колебаний: 1 – инерциальный резонатор; 2 – регулятор частоты вращения; 3 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 4 – персональный компьютер; 5 – чувствительный элемент; 6 – трубопровод.

Основным элементом данного стенда является инерциальный резонатор, позволяющий генерировать в стенке исследуемого объекта диагностические низкочастотные вибрационные колебания.

На стенку трубопровода 6 устанавливают инерциальный резонатор 1 и чувствительный элемент 5. Из персонального компьютера 4 подаётся сигнал на регулятор частоты вращения 2, который приводит в действие инерциальный резонатор 1, состоящий из электропривода и закреплённого на его валу эксцентрика, при вращении которого возникают инерционные силы, реализующие вибрационное воздействие на стенки

трубопровода 6. Чувствительный элемент 5 измеряет параметры колебаний стенок трубопровода, сигнал от него направляется через аналого-цифровой преобразователь 3 в персональный компьютер 4 для регистрации возбуждаемых инерциальным резонатором колебаний стенок трубопровода и дальнейшего анализа их параметров. При этом обеспечивается возможность варьирования частоты вращения эксцентрика посредством электропривода с числовым программным управлением, состоящим из персонального компьютера, регулятора частоты вращения и инерциального резонатора.

Таким образом, анализируя параметры возбуждаемых инерциальным резонатором колебаний стенок трубопровода, регистрируемых чувствительным элементом, можно выявлять и локализовать дефекты, т.е. определять техническое состояние трубопровода.

Для контроля вибрационного воздействия на исследуемый трубопровод, а также для сбора, хранения и обработки сигналов, поступающих с микрофона, в среде LabVIEW [10-12] была разработана программа для ЭВМ «Condition monitoring system». На рис. 2 представлена панель программы «Генерация», в которой можно контролировать и регулировать частоту вращения инерциального резонатора. На рис. 3 представлена панель программы «Регистрация», в которой происходит регистрация сигналов с микрофона и преобразование этих сигналов в спектр для дальнейшего анализа [13-15].

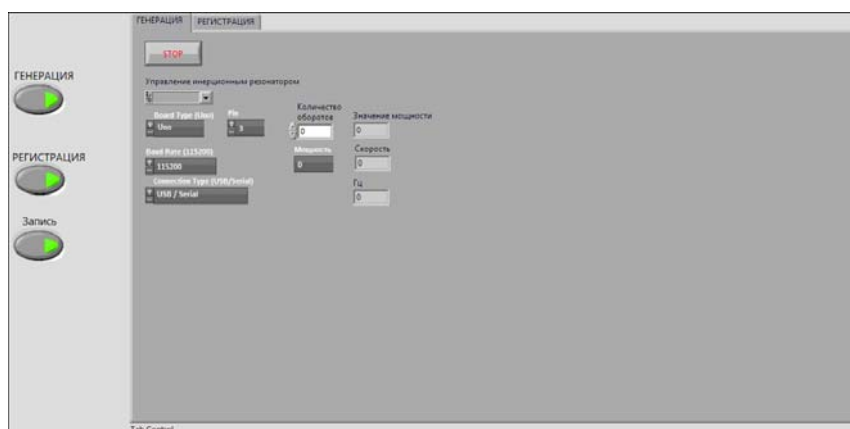


Рис. 2 – Панель программы «Генерация».

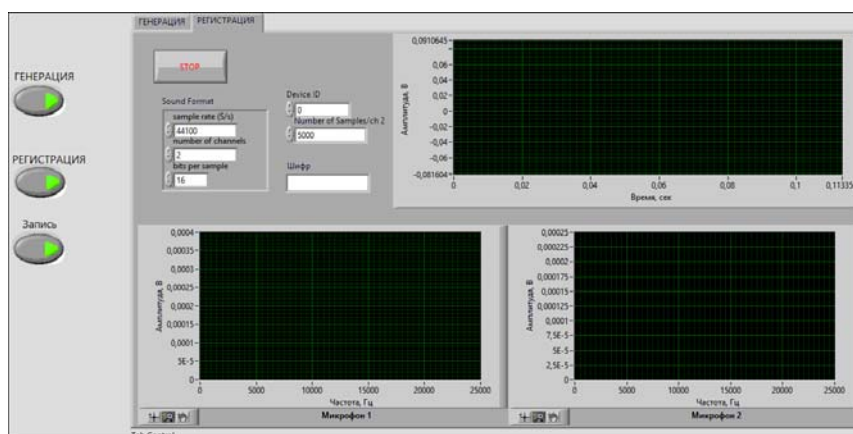


Рис. 3 – Панель программы «Регистрация».

### Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на стеклопластиковой бездефектной трубе размерами 400\*72\*4 мм.

Для возбуждения колебаний использовался инерциальный резонатор. Для регистрации колебаний использовался пьезоэлектрический датчик, сигнал от которого поступал в персональный компьютер через аналого-цифровой преобразователь фирмы National Instruments. Анализ и обработка колебаний производились в программе «Condition monitoring system».

У исследуемого трубопровода имеются разные собственные частоты колебаний, найденные аналитически в программном комплексе ANSYS с помощью модального анализа. ANSYS представляет собой программный пакет конечно-элементного анализа, решающий задачи из широкого спектра инженерной деятельности. ANSYS нашел применение как средство моделирования процессов и их прогнозирования в таких отраслях промышленности как двигателестроение, машиностроение, энергетика, автомобилестроение, судостроение, железнодорожный транспорт и т. д.

Результаты расчета собственных колебаний трубопровода представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты модального анализа стеклопластиковой трубы

Номер моды	Частота, Гц	Номер моды	Частота, Гц
1	262,69	<b>11</b>	<b>864,03</b>
2	292,19	12	1049,3
3	475,99	13	1065,
4	498,7	14	1076,2
5	527,59	15	1135,8
6	532,88	16	1143,6
7	623,76	17	1231,1
8	656,43	18	1404,
9	710,81	19	1410,3
10	862,45	20	1447,1
21	1453,8	36	2083,7
22	1468,5	37	2088,4
23	1483,4	38	2096,3
24	1511,9	39	2129,5
25	1549,2	40	2280,9
26	1554,5	41	2303,7
27	1626,	42	2354,2
28	1682,	43	2383,9
29	1693,9	44	2446,7
30	1770,7	45	2456,2
31	1779,6	46	2510,2
32	1856,2	47	2608,9
33	1915,2	48	2643,8
34	1924,3	49	2648,3
35	1965,6	50	2651,7

Для проведения экспериментальных исследований была выбрана наиболее явная частота, равная 864 Гц, при которой наблюдалась максимальная амплитуда сигнала. Были проведены многократные экспериментальные измерения с изменением точек возбуждения и точек съема колебаний, в разных точках трубопровода, при соблюдении правила: расстояние между инерциальным резонатором и пьезодатчиком было одинаковым и равнялось длине волны генерируемого сигнала.

На рис. 4 представлена фотография экспериментальной установки.

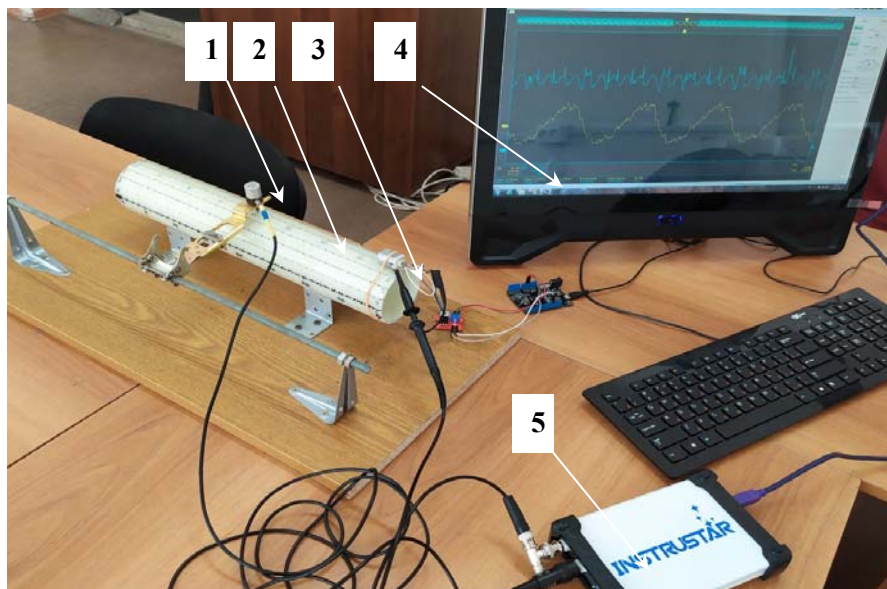


Рис. 4 – Экспериментальная установка с трубой из стеклопластика: 1 – пьезоэлектрический датчик; 2 – исследуемый трубопровод; 3 – инерциальный резонатор; 4 – персональный компьютер; 5 – аналого-цифровой преобразователь.

В процессе экспериментальных исследований генерировался опорный сигнал в 860 Гц, далее с помощью пьезоэлектрического датчика, расположенного на расстоянии, равном 1 длине волны, регистрировался выходной сигнал.

На рис. 5 изображен спектр опорного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы 400\*72\*4 мм. На спектре по оси ОХ показана частота сигнала в герцах (Гц), по оси ОУ амплитуда сигнала в вольтах (В).

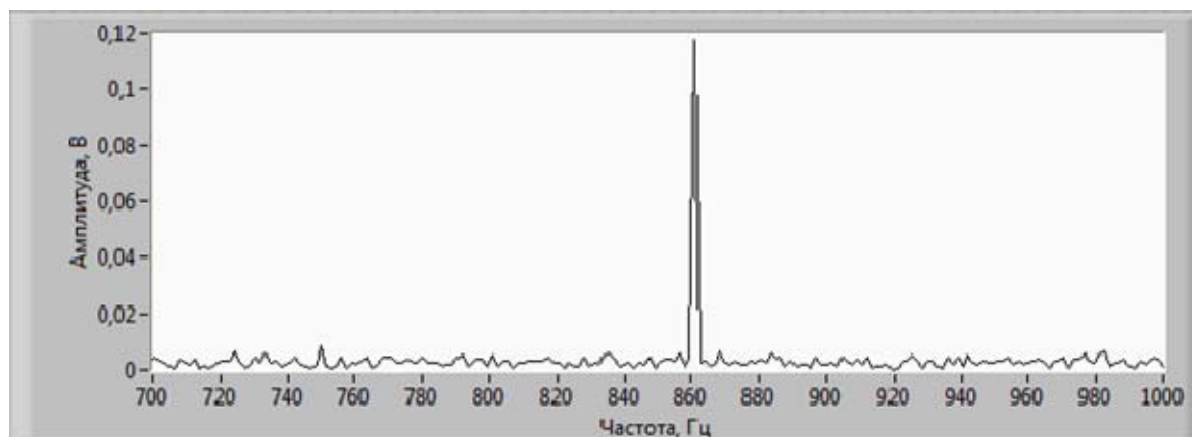


Рис. 5 – Спектр опорного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы.

На рис. 6 изображен спектр выходного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы, регистрируемого пьезодатчиком.

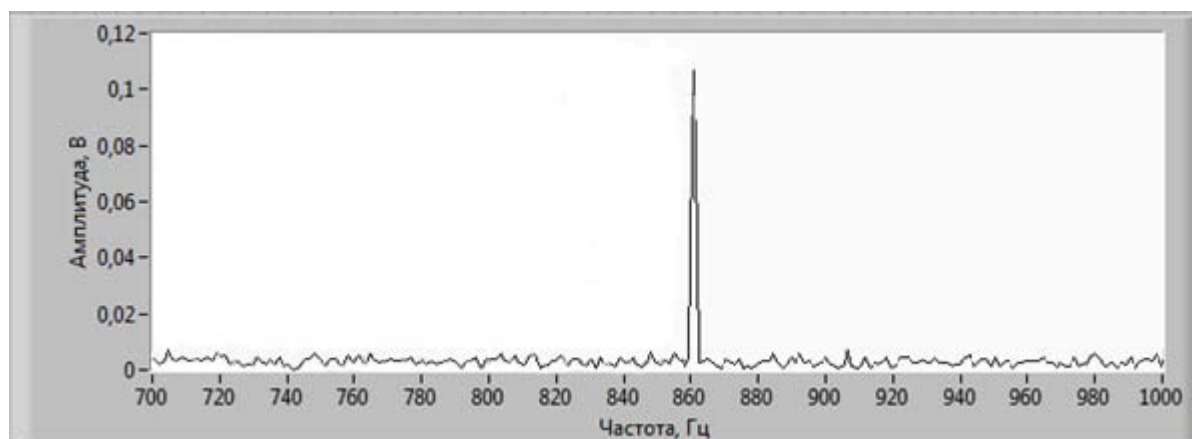


Рис. 6 – Спектр выходного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы.

Из спектров видно, что частоты опорного и выходного сигналов одинаковы, но при этом происходит диссипация колебательной энергии за счёт прохождения через стенку бездефектного трубопровода. Известно, что любое нарушение структуры материала (несплошность, трещина и пр.), характеризующееся как дефект, приводит к увеличению степени рассеивания колебательной энергии, соответственно выходной сигнал, регистрируемый пьезодатчиком, будет заметно слабее опорного, генерируемого инерциальным резонатором. По степени ослабления сигнала можно судить не только о наличии дефекта, но также и о его размерах.

### **Заключение**

В статье предложена методика оценки технического состояния трубопроводов, представлено устройство инерциального возбуждения колебаний в стенке исследуемого объекта. В статье представлены результаты экспериментальных исследований на трубопроводе из стеклопластика размерами 400\*72\*4 мм. Результаты показали, что амплитуда сигнала на бездефектном трубопроводе меняется незначительно. Происходит процесс нормального рассеивания колебательной энергии за счёт её прохождения через твердое тело, однако, учитывая, что любой дефект является изменением структуры материала, соответственно коэффициент рассеивания колебательной энергии в месте дефекта будет больше, что приведет к ослаблению сигнала, регистрируемого пьезодатчиком. Предлагаемая методика является основой создания нового измерительно-диагностического комплекса для вибрационного контроля трубопроводов.

### **Литература**

1. Макаров О.А., Барбашина Е.А. Анализ проблем современной электроэнергетической отрасли и стратегические пути их решения в соответствии с концепцией энергетической стратегии до 2035 года // Вестник ВГУИТ. 2016, №2 (68).

2. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1959, 440 с.
3. Юрко В.А. Введение в теорию обратных спектральных задач. М: Физматлит, 2007, 384 с.
4. Gladwell G.M.L. Inverse Problems in Vibration. 2nd ed. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004. (Русский перевод: Гладвелл Г.М.Л. Обратные задачи теории колебаний. М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2008).
5. Zachwieja, J. Effectiveness of diagnosing damage to an industrial pump rotor by analysing its vibrations / Zachwieja, J. // Diagnostyka. 2019, Vol. 20. Iss. 1. pp. 33-39.
6. Zachwieja, J. Pipeline stress analysis under supporting structure vibrations / Zachwieja, J. // Diagnostyka. 2017. Vol. 18. Iss. 2. pp. 23-30.
7. Stein, Y. Development and improvement of methods of diagnostics of heating systems in modern conditions / Stein, Y., Zonova, N., Kubrak, I., Andreeva L. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 90. Iss. 1. Article number 012139.
8. Диагностика типовых повреждений трубопроводов и физико-механических свойств котло-турбинных сталей энергооборудования ТЭС и АЭС: учебное пособие / [В. Г. Канцедалов, В. С. Королев, В. Н. Балтян и др.]; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет». Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. 90 с.
9. Способ инерциального возбуждения механических колебаний в упругой оболочке // Патент России № 2705515 от 07.11.2019. / Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Шакурова Р.З.
10. Цифровая обработка звуковых и вибросигналов в LabVIEW [Текст]: справочник функций системы NI Sound and Vibration LabVIEW / Федосов В. П. Москва: ДМК Пресс, 2009. 1289 с.: ил., табл.; ISBN 978-5-94074-600-3.
11. Капранов Б.И., Короткова И.А. Спектральный анализ в неразрушающем контроле. Учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2008.
12. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series // Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects // A.E. Kondratiev, S.O. Gaponenko, R.Z. Shakurova, S.A. Nazarychev 2019.
13. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series // Information-measuring system for monitoring the location of underground gas pipelines on the basis of improved acoustic resonance method // A.E. Kondratiev, S.O. Gaponenko, R.Z. Shakurova, S.A. Nazarychev 2019.
14. E3S Web of Conferences, SES 2019 // Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes // A.E. Kondratiev, S.O. Gaponenko, R.Z. Shakurova, R. Dimova 2019.
15. E3S Web of Conferences, SES 2019 // Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage // A.E. Kondratiev, S.O. Gaponenko, R.Z. Shakurova, R. Dimova 2019.