

# Анализ масштабной инвариантности вибраакустических сигналов трубопровода с утечками

А. Р. Загретдинов, Ш. Г. Зиганшин, Е. В. Измайлова, И. И. Клюкин

*Казанский государственный энергетический университет*

azagretdinov@yandex.ru, shz@list.ru, evgeniya-izmailova@yandex.ru, ilya.klyukinbkru.96@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрена возможность обнаружения утечек трубопроводов по анализу масштабной инвариантности вибраакустических сигналов методом DFA-1. Авторами создан экспериментальный стенд, на котором получены вибраакустические сигналы трубопровода с утечками разного размера. В качестве моделей дефектов трубопровода использовались диски с отверстиями. Для регистрации и анализа сигналов использовалась программа, написанная в среде LabVIEW. Установлена связь размера утечки с величиной скейлинговой экспоненты вибраакустических сигналов.

**Ключевые слова:** *трубопровод; утечка; вибраакустические сигналы; масштабная инвариантность; скейлинг; анализ флуктуаций; метод DFA*

## I. ВВЕДЕНИЕ

Большую проблему для трубопроводных сетей представляют скрытые утечки. Трудность их обнаружения может приводить к значительным потерям технологического продукта или энергоносителя. В этой связи необходим контроль состояния трубопроводов.

Широкое применение на сегодняшний день находят методы оценки состояния трубопроводных систем по их вибраакустическим параметрам. Это связано с тем, что вибраакустический сигнал обладает достаточно емкой информацией о состоянии трубопровода. Для обеспечения эффективного контроля трубопроводов необходимо, чтобы эта информация была должным образом была извлечена из сигналов.

Как правило, задача анализа вибраакустических сигналов основывается на поиске резонансов и периодических колебаний, все остальное обозначается термином «шум». Однако в трубопроводных системах, внутри которых происходит движение жидкости или газа, всегда присутствуют сложные нестационарные колебания, вызванные турбулентностью потока. В потоке жидкости, вытекающей турбулентно через сквозное отверстие в стенке трубы, возникают хаотические пульсации плотности жидкости. Появление таких пульсаций приводит к возникновению упругих волн в самой жидкости и в стенках трубы. Определяющим параметром этих пульсаций является скорость истечения жидкости и размер отверстия.

Кроме этого наличие утечек приводит к изменению скорости потока в самой трубе.

Во временной динамике турбулентных флуктуаций могут присутствовать самоподобные структуры, повторяющие сами себя на определенных промежутках времени [1]. Можно сказать, что масштабная инвариантность (скейлинг) – одно из основных свойств турбулентности. Анализ скейлинга вибраакустических сигналов трубопроводов позволит получить новую более качественную информацию об их состоянии.

Особенности скейлинга могут изучаться с применением классических методов спектрально-корреляционного анализа. Однако эти методы применимы только к стационарным сигналам [2, 3]. Более универсальным является метод анализа флуктуаций относительно тренда (detrended fluctuation analysis, DFA), получивший широкое применение при обработке экспериментальных данных в физиологии, медицине, различных областях физики [2–6]. В рамках алгоритма DFA анализируется среднеквадратическая ошибка аппроксимации обобщенной модели блуждающей частицы в зависимости от размера аппроксимируемого участка. Порядок метода определяется порядком аппроксимирующего полинома, например: DFA-1 – линейного тренда, DFA-2 – квадратичного тренда и т. д.

В настоящей работе рассмотрена возможность обнаружения утечек трубопроводов по анализу масштабной инвариантности вибраакустических сигналов методом DFA-1.

## II. МЕТОДЫ

### A. Экспериментальный стенд

Для изучения масштабной инвариантности вибраакустических сигналов трубопровода с утечками разного размера создан экспериментальный стенд.

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1, где цифрами обозначены: 1 – вентиль, 2 – трубопровод (длина 2 м, внешний диаметр 0,159 м, толщина стенки 6 мм), 3 – датчик вибрационного ускорения AP2038P, 4 – дефект, 5 – манометр, 6 – емкость, 7 – насос XKJ-900I, 8 – согласующее устройство AG01-3, 9 – аналого-цифровой преобразователь NI USB-6229, 10 – компьютер.

Экспериментальный стенд представляет собой замкнутый контур с циркулирующей водой. Закрытием вентиля 1 поддерживалось давление нагнетания насоса 2 бара. Давление контролировалось с помощью манометра 5.

Акустические колебания трубопровода регистрировались пьезоэлектрическим датчиком 3.

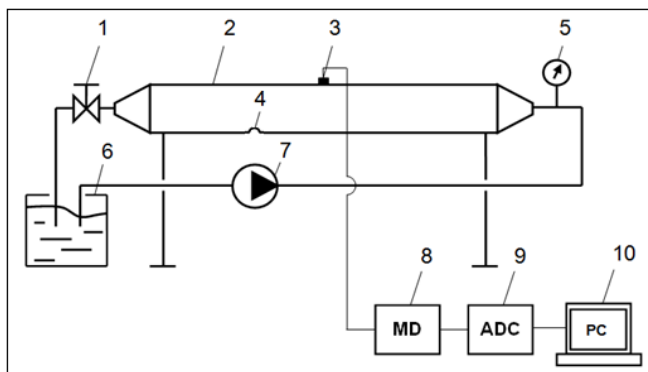


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Датчик вибрации имеет следующие характеристики: осевая чувствительность 100 мВ/г; собственная частота 35 кГц. Датчик позволяет проводить одновременное измерение сигнала в одной точке вибрации по трем координатным осям.

Исследовались акустические колебания в продольном направлении относительно оси трубопровода. Для регистрации и анализа сигналов применялся пакет программ, написанный в среде LabVIEW. Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя 9 принята равной 40 кГц.

В качестве моделей дефектов трубопровода использовались диски с отверстиями разного диаметра (от 1 до 5 мм), представленные на рис. 2. Диски устанавливались и зажимались на одном уровне со стенкой трубы (рис. 3).

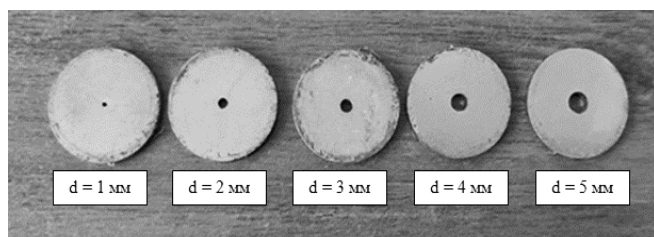


Рис. 2. Диски с отверстиями разного диаметра

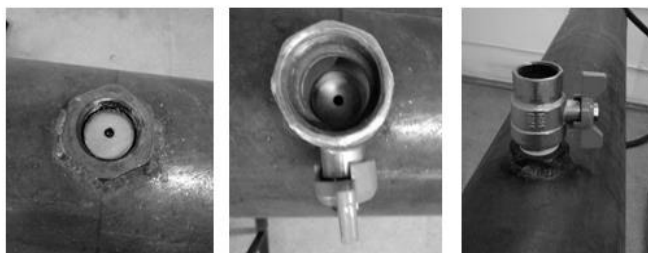


Рис. 3. Способ фиксации дисков на трубопроводе

### В. Алгоритм анализа виброакустических сигналов

Виброакустические сигналы анализировались с применением метода DFA-1 в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Так как виброакустический сигнал трубопровода  $z(i), i = 1, \dots, N$  имеет структуру подобную шуму (рис. 4), то для его анализа он преобразуется в вид, характерный для временного ряда случайного блуждания (рис. 5). Для этого вычисляется профиль (кумулятивная сумма):

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [z(i) - \bar{z}] \quad (1)$$

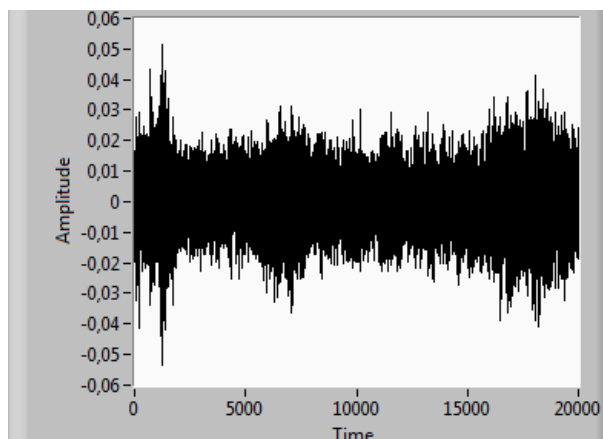


Рис. 4. Виброакустический сигнал трубопровода

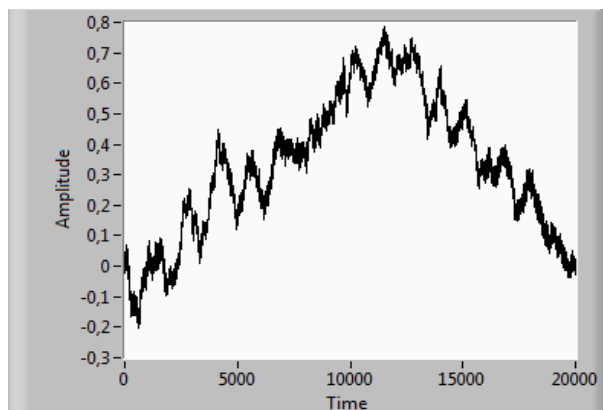


Рис. 5. Профиль виброакустического сигнала

2. Ряд значений  $y(k), k = 1, \dots, N$  разбивается на непересекающиеся интервалы длиной  $n$ .

3. В пределах каждого интервала методом наименьших квадратов осуществляется линейная аппроксимация последовательности  $y(k)$ . Найденная аппроксимация  $y_n(k)$  рассматривается в качестве локального тренда.

4. Вычисляется среднеквадратическая ошибка линейной аппроксимации:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (2)$$

Соответствующие расчеты проводятся в широком диапазоне значений  $n$ .

5. Для зависимости  $\lg F$  ( $\lg n$ ) вычисляется угол наклона  $\alpha$  линии регрессии (рис. 6, 7). Угол  $\alpha$  называется скейлинговой экспонентой метода DFA. Считается, что зависимость  $F(n)$  имеет степенной характер:

$$F(n) \sim n^\alpha$$

Скейлинговая экспонента может отличаться от разной длины интервала  $n$ , что свидетельствует об изменении свойств скейлинга при увеличении масштаба [2]. Для анализа виброакустических сигналов выбрано максимальное значение  $n = 1000$  отсчетов ( $\lg n = 3$ ).

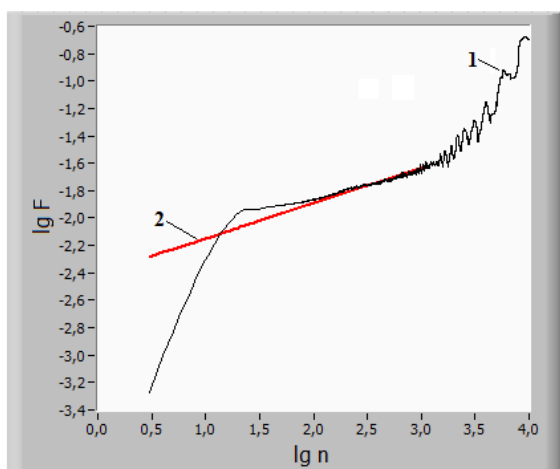


Рис. 6. Результат применения метода DFA к виброакустическому сигналу бездефектного трубопровода.

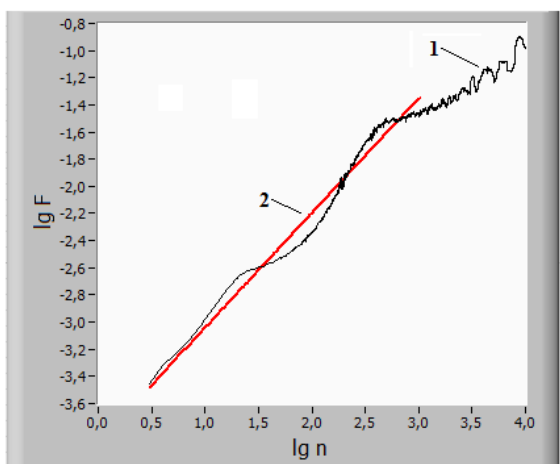


Рис. 7. Результат применения метода DFA к виброакустическому сигналу с дефектом 5 мм.

На рис. 6, 7: 1 – зависимость  $\lg F$  ( $\lg n$ ), 2 – линия регрессии.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 8 представлены результаты расчета скейлинговой экспоненты виброакустических сигналов. Анализируются виброакустические сигналы трубопровода длиной 20000 отсчетов. Значение

скейлинговой экспоненты получено медианным усреднением результатов анализа 20 виброакустических сигналов.

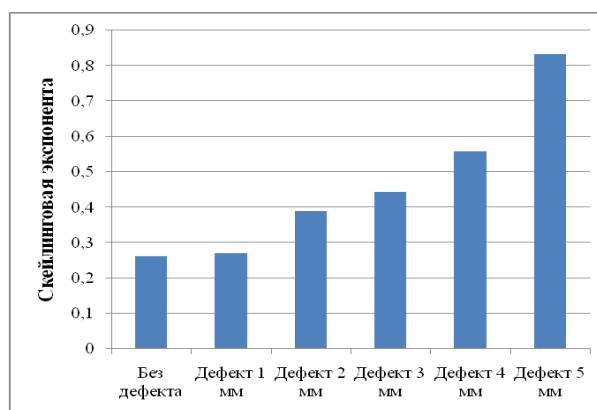


Рис. 8. Результаты расчета скейлинговой экспоненты виброакустических сигналов

Из рис. 8 видно, что с увеличением размера утечки растет скейлинговая экспонента виброакустических сигналов. Диапазон  $0 < \alpha < 0,5$  соответствует отрицательной корреляции (происходит чередование больших и малых амплитуд колебаний). При  $0,5 < \alpha < 1$  присутствует коррелированная динамика (большие амплитуды колебаний чаще следуют за большими, малые за малыми) [2, 3].

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением размера утечки упругие колебания стенки трубы приобретают коррелированную динамику. Это может объясняться снижением скоростей потока в отверстии и в трубопроводе, что приводит к уменьшению турбулентности. Экспериментальные исследования подтвердили возможность обнаружения утечек трубопроводов по анализу масштабной инвариантности их виброакустических сигналов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Колесниченко А.В., Маров М.Я. Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред: монография. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 413 с. ISBN 978-5-9963-0800-2.
- [2] Павлов А.Н., Сосновцева О.В., Зиганшин А.Р. Мультифрактальный анализ хаотической динамики взаимодействующих систем // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2003. Т. 11, № 2. С. 39-54.
- [3] Павлов А.Н., Павлова О.Н., Короновский А.А. Мл. Модифицированный метод флуктуационного анализа нестационарных процессов // Письма в Журнал технической физики, 2020. Т. 46. № 6. С. 47-50. DOI 10.21883/PJTF.2020.06.49166.18136.
- [4] Мартынов И.Д. Ранняя диагностика нарушений регуляции гемодинамики в ортостазе / Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук, 2016. Т. 1. № 5(111). С. 30-34.
- [5] Димитриев Д.А., Саперова Е.В., Димитриев А.Д., Индейкина О.С. Влияние дыхания на частоте резонанса на нелинейные динамики вариабельности сердечного ритма // Физиология человека, 2019. Т. 45. № 1. С. 64-72. DOI 10.1134/S0131164619010065.
- [6] Имашев С.А., Чешев М.Е. Фрактальный анализ геоакустических сигналов, регистрируемых на территории бишкекского геодинамического полигона // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, 2019. № 2-1(50). С. 286-292.