

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОМПАЖНЫХ ТЕСТОВ НАГНЕТАТЕЛЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА Н-370-18-1

## INVESTIGATION OF THE FREQUENCY SPECTRUM OF ACOUSTIC SIGNALS OBTAINED DURING SURGE TESTING OF H-380 NATURAL GAS COMPRESSORS

**D. Popov  
A. Soldatov**

*Summary.* The paper presents an analysis of audio recordings captured during surge testing of a natural gas compressor. The recordings were processed using an algorithm based on the Fast Fourier Transform (FFT) method to evaluate the spectral characteristics of the sound waves. The experiment aimed to identify characteristic frequencies of specific signals occurring in pre-surge operating conditions of the compressor using a recording microphone. This study may contribute to the detection of pre-surge states of the compressor through acoustic signal analysis.

*Keywords:* compressor surge, early fault detection, acoustic sensor, Fourier transform, signal frequency spectrum.

**Попов Дмитрий Анатольевич**

Аспирант, Сургутский государственный университет  
ppropovda@yandex.ru

**Солдатов Алексей Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
Томский политехнический университет;  
профессор, Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
asoldatof@mail.ru

*Аннотация.* В статье представлен анализ звукозаписи во время проведения помпажных тестов нагнетателя природного газа, которая обрабатывалась алгоритмом на основе метода быстрого преобразования Фурье для анализа спектральной характеристики звуковых волн. Эксперимент направлен на выявление характерных частот определенных сигналов, возникающих на предпомпажных режимах работы нагнетателя с использованием звукозаписывающего микрофона. Данное исследование может помочь в выявлении предпомпажного состояния нагнетателя на основе звукоанализа.

*Ключевые слова:* помпаж нагнетателя, раннее обнаружение неисправностей, акустический датчик, преобразование Фурье, частотный спектр сигнала.

### Введение

Центробежные одноступенчатые компрессоры широко используются на компрессорных станциях природного газа. Одним из ключевых рисков при их эксплуатации является явление помпажа — неустойчивого гидродинамического режима, сопровождающегося большими колебаниями расхода и давления, резким увеличением шума, вибраций и вероятностью повреждения оборудования. Помпаж может привести к аварийному останову агрегата, снижению срока службы компонентов и значительным экономическим потерям [1].

Традиционная диагностика помпажа базируется на датчиках давления, расхода и вибрационных датчиках, а также на антипомпажных клапанах и системах управления [2]. Однако последние исследования продемонстрировали, что акустические методы мониторинга с применением спектральных методов (БПФ) позволяют обнаруживать предвестники помпажа на ранней стадии по характерным пиковым изменениям в акустическом спектре [3–5]. В частности, в серии опытов на односту-

пенчатом центробежном компрессоре, сопряжённом с SOFC-установкой, спектральный анализ давления и вибраций выявил предельные частоты, свидетельствующие о начале неустойчивости [3].

Тем не менее, большинство подобных исследований выполнялось на лабораторных стендах, и пока недостаточно доказательств в отношении промышленной эксплуатации компрессоров. Это создаёт актуальную задачу создания применимых на практике, неинвазивных систем акустического мониторинга для раннего выявления предпомпажного состояния промышленных установок.

### Постановка задачи

Авторы предлагают использовать частотный спектр акустических сигналов для идентификации возникновения предпомпажного состояния нагнетателей природного газа. Для определения частотного спектра акустического сигнала можно использовать преобразование Фурье [6–8]. Эту процедуру выполним в программном обеспечении MATLAB. Такое исследование позволит

определить характерные частоты, по которым станет возможным идентифицировать предпомпажное состояние до наступления самого помпажа нагнетателя.

К записанным акустическим сигналам была применена спектральная обработка, основанная на методе быстрого преобразования Фурье, так как данный метод характеризуется своим быстроедействием ввиду меньшего числа операций по умножению и суммированию всех коэффициентов.

Быстрое преобразование Фурье — это алгоритм, вычисляющий дискретное преобразование Фурье последовательности. В геометрической интерпретации это намотка сигнала на комплексную плоскость и вычисление центра масс. Вывод алгоритма БПФ представлен в [9] (в том числе с реализацией на Free Pascal) и основан на ДПФ, описываемым формулой 1.

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-\frac{2\pi i u x}{M}}, u = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

Быстрое преобразование Фурье осуществлялось применением функции FFT в аналитическом программном обеспечении MATLAB 2021 основываясь на документации [10].

**Описание эксперимента**

Было проведено 2 независимых эксперимента. В каждом эксперименте использовалось разное звукозаписывающее оборудование и разные образцы труб. При этом методы обработки и сравнения сигналов были одинаковы.

В табл. 1 представлены параметры и условия при проведении эксперимента.

Таблица 1.

Характеристики эксперимента

Параметр \ Эксперимент	Эксперимент 1	Эксперимент 2
Звукозаписывающее оборудование	Микрофон от гарнитуры A4tech Bloody G501 с интегрированной звуковой картой	Микрофон от гарнитуры A4tech Bloody G501 с интегрированной звуковой картой
ПО при записи сигналов с минимизацией шумов	Adobe Audition 2022	Adobe Audition 2022
ПО для обработки звуковых сигналов	MATLAB R2018b	MATLAB R2018b
Нагнетатель	370-18-1	370-18-1
Обороты при помпаже	3500	4300

В каждом из 2-х экспериментов с записью данного сигнала были записаны звуковые дорожки по 30 секунд с содержанием предпомпажного состояния нагнетателя, самого помпажа и состояния стабильной работы после открытия антипомпажного клапана.

В данном случае мы рассматриваем частоты от 0 до 300 Гц (от средне-средних до верхнесредних частот). Так как выше отметки 300 Гц располагаются высокие частоты с малой звуковой мощностью и с учетом нашей аппаратуры после первичного анализа всего спектра такой диапазон нам мало интересен.

**Методика проведения анализа спектров частот**

Первым рассмотренным сигналом является запись появления помпажа при оборотах нагнетателя на значениях 3500 оборотов в минуту. При проведении анализа в ПО Matlab производились следующие действия:

- 1) Определялась точка начала помпажа по характерным признакам (плавающие обороты, хлопки, высокая вибрация и шум). На записи с оборотами нагнетателя 3500 данный момент настал на пятой секунде записи, на записи помпажа при оборотах 4300 настал на 7-й секунде;
- 2) Затем определялся диапазон нормальной работы;
- 3) В последнюю очередь определились диапазоны предпомпажного режима работы со сдвигом в 1 секунду до наступления помпажа;
- 4) Выводились и рассчитывались графики следующих типов, диапазоны выбирались одинаковой продолжительности для корректного сравнения:
  - a) Тип 1 — содержит график спектра нормальной работы и предпомпажа с запасом 2 секунды до помпажа
  - b) Тип 2 — содержит график спектра нормальной работы и предпомпажа с запасом 1 секунду до помпажа
  - c) Тип 3 — содержит график спектра нормальной работы и помпажа
  - d) Тип 4 — содержит вычитание графика спектра нормальной работы из графика спектра предпомпажа с запасом 2 секунды до помпажа
  - e) Тип 5 — содержит вычитание графика спектра нормальной работы из графика спектра предпомпажа с запасом 1 секунду до помпажа
  - f) Тип 6 — содержит вычитание графика спектра нормальной работы из графика спектра помпажа.

Данные по выбранным диапазонам представлены в табл. 2.

По результатам первого приближения было видно как в зависимости от приближения к помпажу мощность частот растёт в области низких частот в районе 50–60 герц, где по мере приближения к помпажу растет мощность

Таблица 2.  
Данные по выбранным диапазонам

Номер эксперимента	Запись при 3500 об/мин.		Запись при 4300 об/мин.	
	Начало диапазона сек.	Конец диапазона сек.	Начало диапазона сек.	Конец диапазона сек.
Нормальная работа	19	23	0	4
Предпомпаж с запасом 2 сек.	0	4	2	6
Предпомпаж с запасом 1 сек.	1	5	3	7
Помпаж	5	9	7	11

в районе 52–54 Гц, как на первой, так и на второй записи. Ограничение диапазона в области до 70 Гц не потребуют высокой частоты дискретизации от анализирующих устройств согласно теореме Котельникова. На следующих рисунках представлены отображения спектров после быстрого преобразования Фурье с нормализацией относительно самого мощного сигнала частоты в спектре. Красной прерывистой линией отображается спектр взятый как «Нормальный режим работы», синей линией отображен сравниваемый с нормой график. Исключение составляет график с вычитанием «нормальной работы» из анализируемого спектра, чтобы увидеть разницу, какие сигналы относительно нормы начинают расти, а какие, наоборот, падать.

На участке записи эксперимента за 2 секунды от установленной отметки начала помпажа на оборотах 3500 относительно нормальной работы нагнетателя на ри-

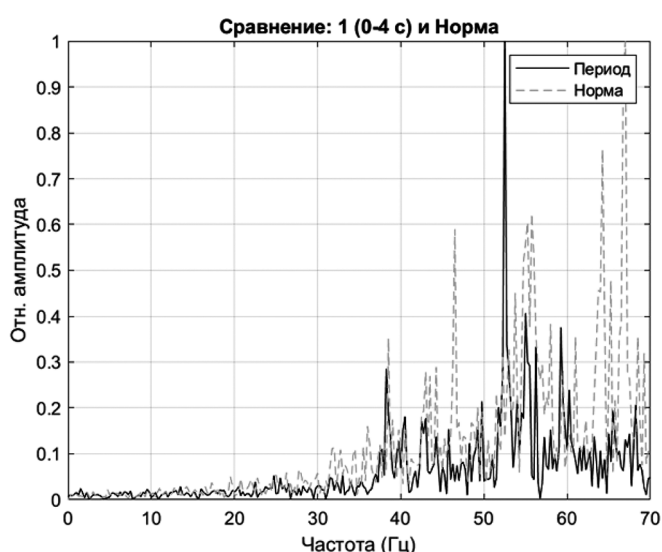


Рис. 1. Сравнение частотных спектров нормального режима работы и предпомпажного с запасом 2 секунды с нормализацией (3500 об/мин.)

сунке 1 и рисунке 2, видно заметное увеличение относительной мощности частот в области 52–54 Гц и одновременное уменьшение относительной мощности частот в свыше 60 Гц.

По мере приближения анализируемого участка записи к помпажу за 1 секунду от установленной отметки начала помпажа на оборотах 3500 относительно нормальной работы нагнетателя на рисунке 3 и рисунке 4, видим сохраняющуюся тенденцию увеличения относительной мощности частот в области 52–54 Гц и одновременное уменьшение относительной мощности частот в свыше 60 Гц.

На участке записи эксперимента за 2 секунды от установленной отметки начала помпажа на оборотах 4300 относительно нормальной работы нагнетателя на рисунке 5 и рисунке 6 можно отметить похожее на 1й эксперимент увеличение относительной мощности частот в точках 53 Гц и 58 Гц однако одновременного уменьшения относительной мощности частот в свыше 60 Гц выделить не удалось.

По мере приближения анализируемого участка записи к помпажу за 1 секунду от установленной отметки начала помпажа на оборотах 4300 относительно нормальной работы нагнетателя на рисунке 7 и рисунке 8, видим сохраняющуюся тенденцию увеличения относительной мощности частот в точках 53 Гц и 58 Гц и одновременное уменьшение относительной мощности частот в свыше 60 Гц прослеживается.

### Анализ результатов

Обращая внимание на спектральный анализ после быстрого преобразования Фурье, можно выделить ха-

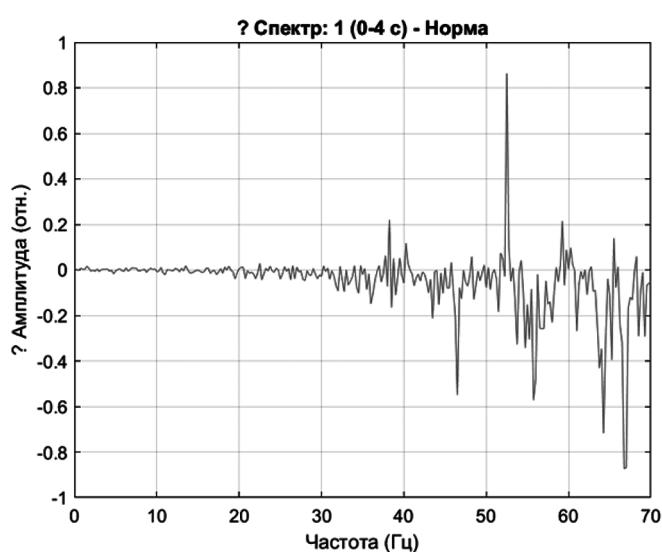


Рис. 2. Вычитание частотного спектра нормального режима работы из предпомпажного с запасом 2 сек. (3500 об/мин.)

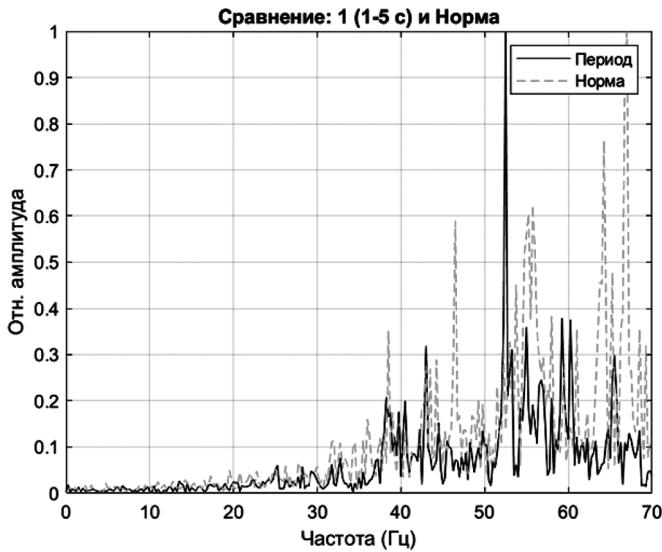


Рис. 3. Сравнение частотных спектров нормального режима работы и предпомпажного с запасом 1 секунду с нормализацией (3500 об/мин.)

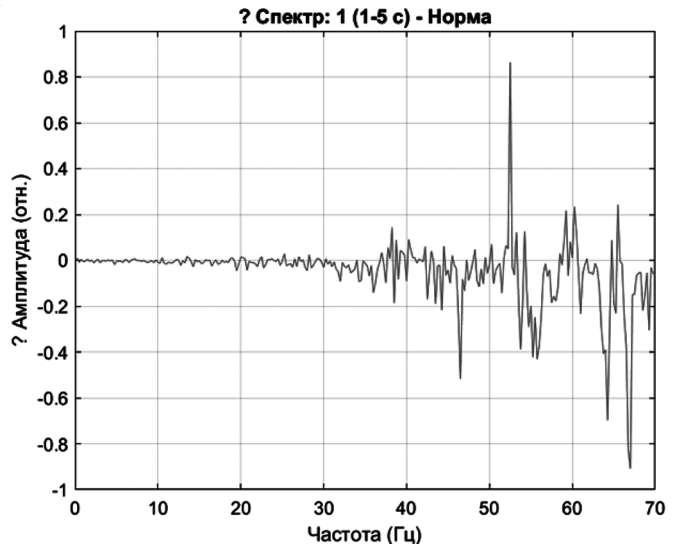


Рис. 4. Вычитание частотного спектра нормального режима работы из предпомпажного с запасом 1 сек. (3500 об/мин.)

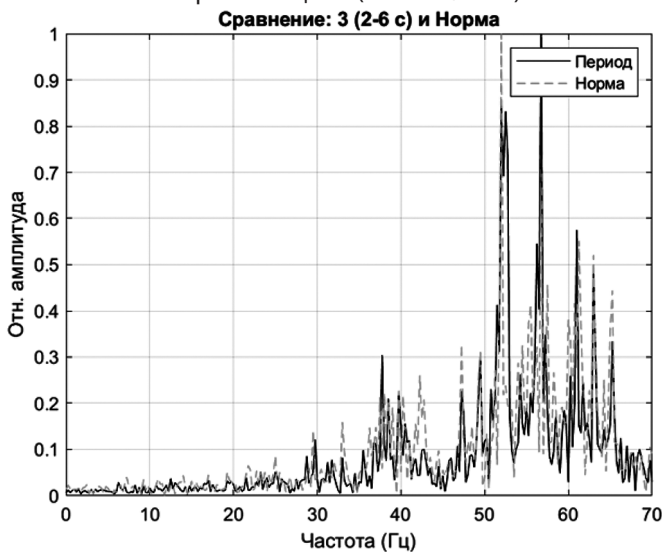


Рис. 5. Сравнение частотных спектров нормального режима работы и предпомпажного с запасом 2 секунды с нормализацией (4300 об/мин.)

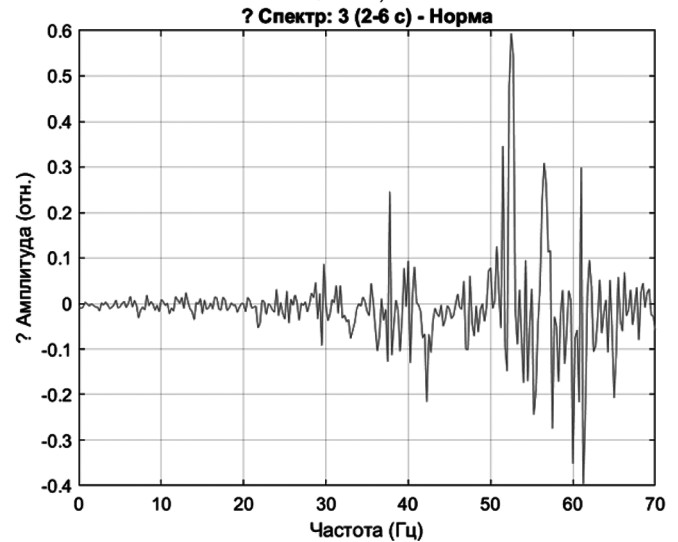


Рис. 6. Вычитание частотного спектра нормального режима работы из предпомпажного с запасом 2 сек. (4300 об/мин.)

рактерное увеличение амплитуды сигнала на частотах 52–54 Гц и 57–58 Гц по мере приближения к началу помпажа агрегата. Это согласуется с данными недавно опубликованного исследования, где авторы отмечают появление акустических признаков в диапазоне 30–85 Гц, предшествующих помпажу, хотя они не всегда отражаются в сигнале давления [11]. Наблюдаемое повышение амплитуд на указанных частотах, вероятно, связано с возбуждением субсинхронных осцилляций в системе — таких явлений прежде также связывали с предвестниками нестабильности потоков в центробежных компрессорах [12].

Дальнейший анализ с использованием параллельной записи давления на конфузоре и вибраций вала

и корпуса нагнетателя с использованием тех же методов может уточнить природу этих сигналов, а в перспективе — связать их с конкретными физическими механизмами: будь то роторно-полостные колебания, структурные резонансы трубопроводов или акустические резонансы элементов конструкции. Важно проверить, являются ли пики устойчиво воспроизводимыми при повторных заходах на помпаж, и как они изменяются с вариацией массового расхода или режима работы.

Следующим шагом предлагается:

Статистический анализ амплитудного роста на этих частотах при серии проходов режимов;

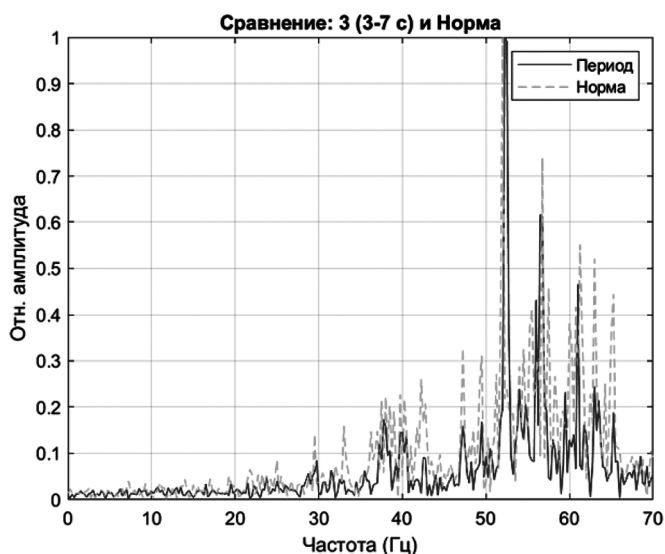


Рис. 7. Сравнение частотных спектров нормального режима работы и предпомпажного с запасом 1 секунду с нормализацией (4300 об/мин.)

Выделение относительных изменений амплитудного отношения сигнал / фон;

Сопоставление с сигналами давления и вибрации, записанными параллельно, для выделения комплексной картины предвестников помпажа.

### Заключение

Проведённое исследование спектрального анализа акустических сигналов, записанных вблизи промышленного одноступенчатого центробежного нагнетателя в процессе контролируемого перехода к помпажу, подтвердило эффективность метода быстрого преобразования Фурье для раннего выявления нестабильности. Выделены характерные частотные пики на 52–54 Гц и 57–58 Гц с выраженным увеличением амплитуды при приближении к помпажному режиму, что согласуется с описанием акустических предвестников в диапазоне до 85 Гц в центробежных установках [11].

Результаты исследования показали:

- Низкочастотные пики как индикатора приближения к помпажу, согласующиеся с описанными ранее акустическими признаками предвестников [13, 14].
- Высокая чувствительность метода к субсинхронным колебаниям, связанным с гидродинамическими изменениями в тракте.
- Практическая применимость FFT-анализа в условиях промышленной работы оборудования, что значительно расширяет возможности мониторинга.

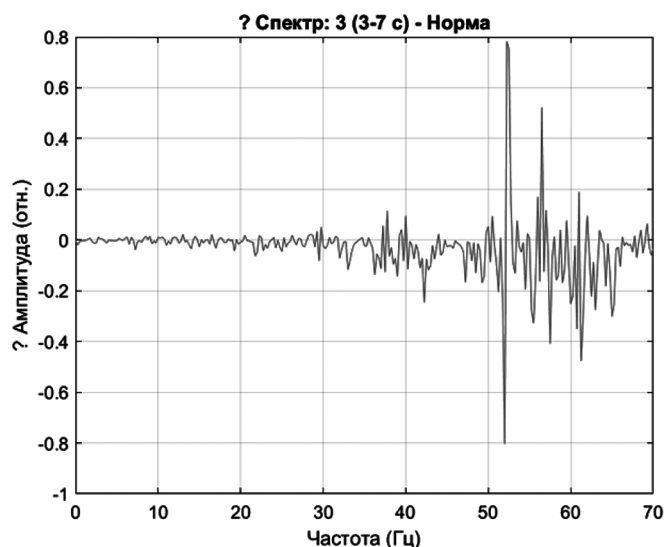


Рис. 8. Вычитание частотного спектра нормального режима работы из предпомпажного с запасом 1 сек. (4300 об/мин.)

При этом отмечены факторы, влияющие на точность диагностики:

- Инструментальная калибровка микрофонных сенсоров и вариации акустики корпуса;
- Окружающий фон и режим эксплуатации, влияющие на амплитудные характеристики спектра;
- Необходимость верификации стабильности частотных индикаторов при повторных циклах приближения к помпажу.

На основании выводов сформулирована стратегия дальнейшей работы:

- Разработка автоматизированного поиска пиков и пороговых значений амплитуды;
- Внедрение совместного анализа акустических, вибрационных и сигналов давления;
- Формирование базы эталонных спектров для последующего сравнения;
- Адаптация к различным условиям (температура, давление, конструктивные изменения) реальных установок.

В целом, проведённый эксперимент представляет собой весомый вклад в область неинвазивного акустического мониторинга центробежных компрессоров. FFT-анализ демонстрирует потенциал для создания системы предупреждения помпажа. Следующие этапы — верификация алгоритмов в реальном времени, использование усовершенствованных сигналов обработки (вейвлет-анализ), и тестирование на оборудовании с различной конструкцией корпуса и условиями эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грапов Ф., Лискивиц Г. Моделирование компрессора на основе модели Гритцера с верификацией по колебаниям давления // Труды Института гидродинамики Флоумашини № 133, 2016. С. 69–89.
2. Братек В., Ботрос К. Динамический анализ регулирования перенапряжений в системах центробежных компрессоров. Анализ оборудования Beta, 2013.
3. Сильвестри П., Марелли С., Usai В. Экспериментальное исследование вибрационного и гидродинамического поведения турбокомпрессора при переходе в режим помпажа // E3S Web of Conferences. 2023.
4. Сильвестри П. и др. Виброакустические характеристики и анализ сигналов давления для раннего обнаружения помпажа в компрессоре с турбонаддувом // J. Eng. Мощность газовых турбин. 2023. Т. 145, № 10. С. 101012.
5. Краверо А., Марсано Д. Обнаружение неустойчивости центробежных компрессоров путем акустических измерений // Rev. Feb 2024.
6. Шамсыев Э.Х., Павлов А.Д. Методы идентификации голоса человека // Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Scythia-Print, 2022. 3 с. Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_49432585\\_89798867.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49432585_89798867.pdf)
7. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Дискретное преобразование Фурье: учебно-методическое пособие. М.: МГУ, 2019. 88 с. ISBN 978-5-8279-0179-2
8. Воропаева Н.В., Новиков С.Я., Федина М.Е. Дискретное преобразование Фурье в обработке сигналов: учебное пособие. Самара: Самарский университет, 2015. 48 с. ISBN 978-5-86465-683-9
9. Койнов С. Быстрое преобразование Фурье (реализация на языке Free Pascal) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.freepascal.ru/download/text/20110816221600/fft.pdf>
10. Фурье преобразование (scipy.fft) [Electronic resource]. Режим доступа: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/fft.html>
11. Zhao B., Zhou T., Yang C. Экспериментальное исследование шума при помпаже центробежного компрессора // Journal of Turbomachinery. — 2023. — Т. 145, № 8. — С. 081014. — DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4062244>.
12. Reggio F., Ferrari M., Silvestri P., Massardo A.F. Вибрационный анализ для определения предвестников помпажа в газотурбинных установках // Meccanica. — 2019. — Т. 54, № 9. — С. 2239–2254. — DOI: 10.1007/s11012-019-01016-0.
13. Cabrera K., Pezzini P., Shadle L., Bryden K.M. Обнаружение помпажа и срыва потока с использованием акустического анализа в гибридных газотурбинных циклах // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2019. — Т. 142, № 4. — Ст. 041026. — DOI: 10.1115/1.4045218.
14. Bie F., Chen S., Lyu F., Zhu H., Li Q., Miao X. Исследование метода диагностики неисправностей клапана поршневого компрессора на основе модели IVMD-CMS // Journal of Mechanical Science and Technology. — 2023. — Т. 37. — С. 3931–3943. — DOI: 10.1007/s12206-023-0716-5.

© Попов Дмитрий Анатольевич (ppopovda@yandex.ru); Солдатов Алексей Иванович (asoldatof@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»