

## Диагностика и анализ шумовых параметров корпусов нагнетателей методом акустической эмиссии

© Х.Ф. Махмудов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 27 августа 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Проанализированы и оптимизированы алгоритм и программно-техническое обеспечение процессов обработки информативных сигналов для фильтрации данных акустической эмиссии в регистрируемом диапазоне 2–600 kHz. Метод спектрально-корреляционного анализа сигналов от широкополосного импульсного источника путем определения поглощающих свойств материала на том или ином участке прозвучивания может применяться для выявления дефектных участков корпусов нагнетателей. Выполнен спектрально-корреляционный анализ сигналов упругих волн. Проведен анализ шумовых параметров корпусов нагнетателей и установлена возможность регистрации сигналов акустической эмиссии на фоне шумов на основе определения диапазонов частот, а также величин сигналов акустической эмиссии и шумов от работающих агрегатов и течения транспортируемого газа.

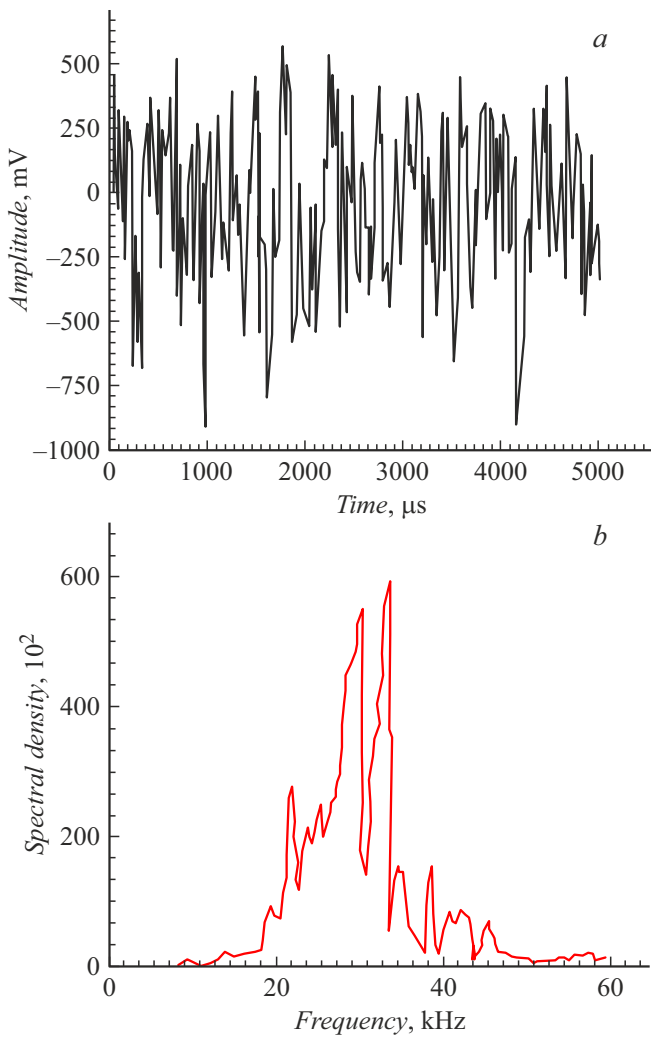
**Ключевые слова:** упругие волны, диагностика, частота, шумовые сигналы.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59410.6465k

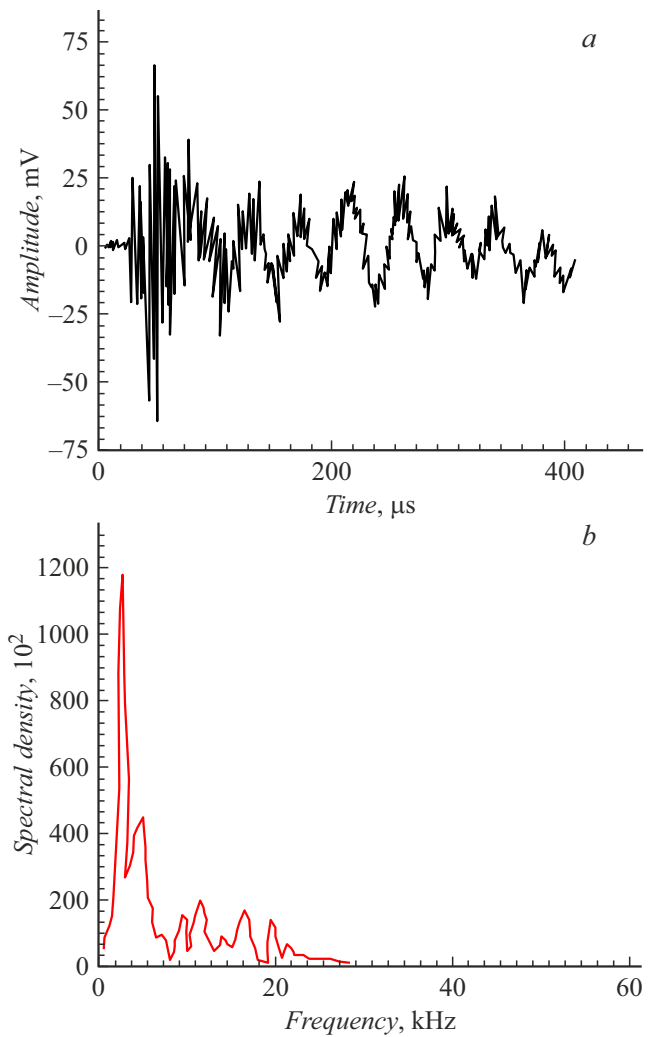
Проводимая акустико-эмиссионная диагностика базируется на регистрации упругого энерговыделения при разрушении. Использование для этих целей метода акустической эмиссии (АЭ), работающего в килогерцевом диапазоне, осложнено наличием акустических шумов, всегда присутствующих на промышленном оборудовании. Амплитудно-частотные параметры технологических шумов и „полезных“ сигналов сопоставимы, что делает их селекцию сложной задачей. В нашем случае общего решения, видимо, не существует, и требуется тщательный анализ фоновых акустического режима каждого конкретного предприятия и оборудования. Это указывает на актуальность и важность поиска возможности решения общих проблем. Методика оценки степени развития дефектов [1–3] в металлических корпусах центробежных нагнетателей (ЦБН), характеризующая техническое состояние исследуемого объекта, основана на регистрации сигналов АЭ [4,5]. В настоящей работе проведен анализ возможности регистрации сигналов АЭ на фоне шумов на основе определения диапазонов частот, а также величин сигналов АЭ и шумов от работающих агрегатов и течения транспортируемого газа [6,7]. В задачи исследования входило проведение АЭ-контроля (диагностики) корпусов ЦБН [8–10] и оценка технического состояния корпусов ЦБН с определением наличия или отсутствия дефектов (источников АЭ), препятствующих дальнейшей эксплуатации ЦБН и требующих их ремонта. В качестве объекта контроля использовались ЦБН типа ЭГПА 235-21-3 (производитель — ПО „Невский завод“, марка материала — сталь 20ГСЛ, рабочее давление 67 kgf/cm<sup>2</sup>, коэффициент затухания волн 2.5 dB/m). В экспериментах определялось граничное значение допустимой амплитуды  $A_t = 60$  dB. При этом в качестве программных средств диагностики

были использованы стандартное программное обеспечение применяемых систем управления, специальные программы (аппаратуры ALine\_32D) и программируемый интерактивный набор инструментов для АЭ-анализа „SEIMOST“ компании DMT.

С помощью пьезодатчиков типа П113-(0.2-2.0)-2 упругие волны превращались в электрические сигналы, которые затем усиливались и регистрировались двумя цифровыми запоминающими осциллографами (АСУ-3106) и акустико-эмиссионной аппаратурой ALine\_32D. Основными целями эксперимента являлись дальнейшая отработка и проведение акустико-эмиссионного контроля технического состояния ЦБН для выявления зон с повышенной активностью АЭ с целью их последующего изучения дублирующими методами неразрушающего контроля [11,12]. Датчики устанавливались на корпус ЦБН. В качестве АЭ-преобразователей использовались восемь дифференциальных преобразователей типа P-113 с диапазонами частот до 100 kHz и 100–500 kHz (с резонансной частотой 250 kHz). Оборудование штатное, рабочее тело — газ, температура объекта и окружающей среды от 5 до 17°C. Параметры режима нагружения ЦБН измерялись в двух циклах с выдержками при промежуточных и максимальном давлении ( $P = 67$  kgf/cm<sup>2</sup>), время выдержки при максимальном давлении 30 min. Рабочий диапазон частот от 100 до 1000 kHz. Чувствительность датчиков АЭ не менее 10 mV/Па. Динамический диапазон предварительного усилителя не менее 85 dB, уровень шумов, приведенный к его входу, не более 10 mV. Система АЭ обеспечивает определение следующих параметров сигналов акустической эмиссии и параметров, характеризующих АЭ, накопленных в процессе управления: амплитуда сигнала, количество колебаний сигнала, длительность сигнала, длительность



**Рис. 1.** Шумовые сигналы АЭ, зарегистрированные на корпусе ЦБН. *a* — амплитуды в рабочем режиме (от транспортируемого газа), *b* — кросс-спектр сигналов, полученный на основе анализа АЭ-шумов ЦБН.



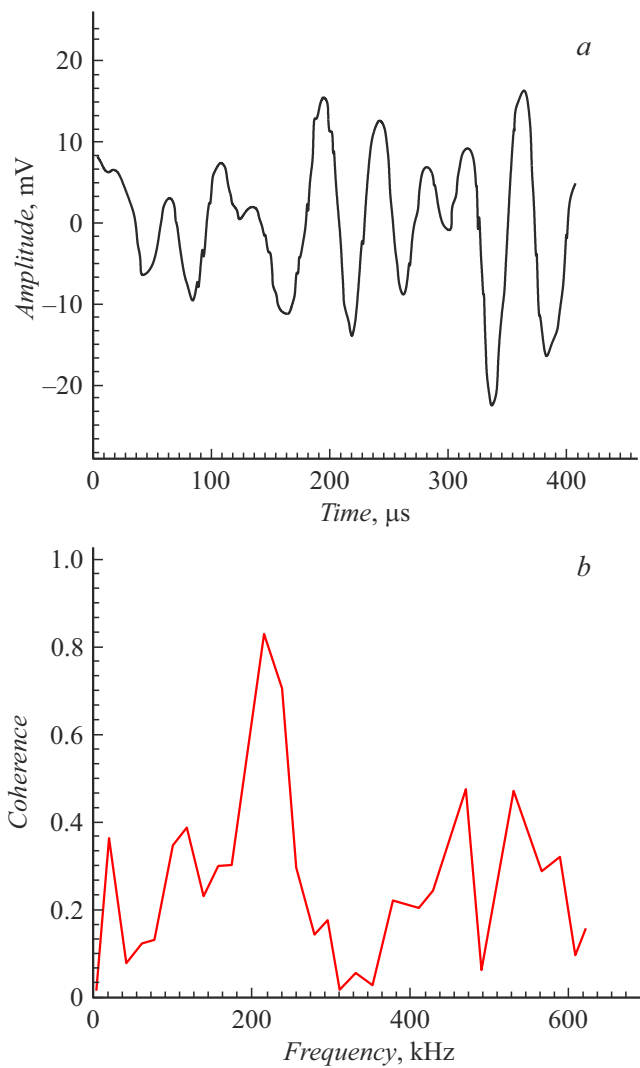
**Рис. 2.** Сигналы АЭ, зарегистрированные при давлении 19 atm. *a* — амплитуды без запуска в рабочий режим, *b* — кросс-спектр сигналов, полученный на основе анализа АЭ-шумов ЦБН.

переднего фронта сигнала, время регистрации этого сигнала, разница во времени поступления сигналов на преобразователи.

Спектральный анализ сигналов АЭ проводился с целью изучения соотношения амплитуд сигналов АЭ и шума от работающего агрегата и течения газа. На рис. 1, *a* приведены шумовые сигналы АЭ, зарегистрированные на корпусе ЦБН в рабочем режиме.

На рис. 1, *b* и 2, *b* приведены кросс-спектры сигналов, полученные на основе анализа шумов от транспортируемого газа на отводах трубопровода обвязки того же нагнетателя. Спектральная плотность шумовых акустических сигналов в рабочем режиме наблюдается в диапазоне частот менее 40 kHz. Если же давление составляет 19 atm, а запуск в рабочий режим не осуществляется, т. е. газ не транспортируется, но процесс вращения продолжается и уплотнители активны, спектральная плотность наблюдается в диапазоне частот менее 20 kHz.

Максимум спектральной плотности шумов в рабочем режиме от транспортируемого газа на отводах трубопровода обвязки того же нагнетателя (рис. 1, *b*) приходится на диапазон частот 20–40 kHz. Затем были проведены исследования соотношения амплитуд сигналов АЭ и шумов от работы масляного уплотнителя при повышении давления газа в корпусе нагнетателя ЦБН без запуска в рабочий режим. Давление увеличивали путем подачи газа в корпус нагнетателя через кран. Перед началом регистрации сигналов от пьезопленочных датчиков (ПД) акустической эмиссии, которые были установлены на поверхности ЦБН, была проведена их предварительная настройка (калибровка) [13]. Полученные данные приведены на рис. 2, *a*, на котором представлен сигнал АЭ, зарегистрированный при давлении 19 atm. Видно, что амплитуды сигналов АЭ равны примерно 60 mV. В ситуации, когда давление приближается к нулевому значению, транспортировка газа не осуществляется,



**Рис. 3.** Амплитуда сигнала АЭ-шумов без запуска в рабочий режим (а) и функция когерентности (b).

однако процесс вращения продолжается, и уплотнительные элементы остаются активными. Это наглядно показано на рис. 3, а, где приведена амплитуда сигнала АЭ-шумов ЦБН (без запуска в рабочий режим), которая равна примерно 20 mV.

Также получена амплитуда сигнала АЭ, зарегистрированного при давлении в агрегате  $P = 45$  и  $55$  atm. Данные показали, что амплитуда возрастает до 300–400 mV, амплитуда шума также больше (порядка 75–85 mV). На рис. 3, b представлена характерная функция когерентности, она не имеет значительных провалов, а отдельные участки хорошо аппроксимируются. В этом случае можно будет предварительно настроить алгоритм автоматической оптимизации параметров фильтра, который будет основываться на анализе фазы спектров в диапазоне частот от герц до килогерц, что может обеспечить высокую помехоустойчивость ПД акустической эмиссии при поиске утечек в условиях повышенного шума [9,13]. Также видно, что функция когерентности

максимальна на частоте, соответствующей частоте сигнала АЭ (200 kHz).

Такую же частоту имеют сигналы АЭ от микротрещин, зарегистрированные при лабораторных испытаниях до разрушения образцов из литевой стали 20ГСЛ, из которой отлиты корпуса нагнетателей. Это значит, что на фоне некоррелированного шума сигналы АЭ распространяются из одного локального источника.

Также было проведено исследование корпусов нагнетателя в режиме прозвучивания, на основе которого сделан вывод о возможности дальнейшей успешной диагностики. При этом было установлено, что импульсное ультразвуковое прозвучивание однозначно может определить наличие существенного дефекта (при дополнительном прозвучивании). В настоящей работе мы не можем указать диагностические возможности и оценить состояние конструкции в соответствии со следующими критериями: незначительный дефект, пассивный дефект, активный дефект и активный дефект с высоким уровнем (по классификации источников классы 1–4 соответственно). Дальнейший анализ приведенной на рис. 3, b функции когерентности — это еще один этап идентификации таких источников. Источник класса 1 — источник, для которого не проводилось вычисление средней амплитуды импульсов (получено менее трех импульсов за интервал наблюдения); источник класса 2 — источник, для которого выполняется неравенство для трех и более зарегистрированных импульсов  $A_{av} < A_t$  ( $A_{av}$  — среднее значение амплитуды АЭ-сигнала); источник класса 3 — источник, для которого выполняется неравенство для трех и более зарегистрированных импульсов  $A_{av} > A_t$ ; источник класса 4 — источник, включающий не менее трех серий из трех и более зарегистрированных импульсов, для которых выполняется неравенство  $A_{av} > A_t$ . Учитывая эти результаты, можно указать классификацию источников АЭ:

$N < 10$  при  $S_0 < 2$  — незначительный дефект;

$N \geq 10$  и  $N < 100$  при  $S_0 < 2$  — пассивный дефект;

$N > 4$  и  $N < 100$  при  $S_0 \geq 2$  — активный дефект;

$N \geq 100$  при  $S_0 \geq 2$  — активный дефект в условиях повышенных внешних акустических шумов.

Главными характеристиками АЭ-источников в металле (ЦБН) в рабочем режиме являются число сигналов  $N$ , набранных за время контроля, средняя амплитуда этих сигналов  $\langle A \rangle$ , среднеквадратичное отклонение амплитудного распределения  $S$ , параметр  $S_0$  — отношение  $S$  к пороговому уровню регистрации АЭ ( $\langle A \rangle$  и  $S$  измеряются mV, величина  $S_0$  безразмерная).

В дальнейшем будет подготовлена расширенная статья о спектральном анализе (функции когерентности) АЭ-сигналов прозвучивания ЦБН.

Анализ сигналов акустической эмиссии на фоне шума и решение задач первоначального этапа диагностики при исследовании шумовых параметров корпусов ЦБН методом акустической эмиссии показали отсутствие общего подхода в некоторых параметрах. Это означает, что при использовании метода акустической эмиссии

следует помнить, что каждый объект контроля имеет свои уникальные свойства. Важным параметром при настройке ПД акустической эмиссии на конкретном объекте является скорость распространения в нем волн. Скорость зависит от материала объекта, его заполнения, изоляции, толщины, типа ПД акустической эмиссии, рабочей полосы частот, порога, расстояния между ПД, а также, возможно, от других параметров. При осуществлении контроля и настройке локации очень важно провести предварительные измерения скорости распространения волн.

[H.F. Machmoudov, Tech. Phys., **67** (12), 1627 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.12.55198.181-22].

### Благодарности

Автор выражает благодарность В.Н. Савельеву за помощь в проведении полевых исследований и плодотворное обсуждение результатов.

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.И. Иванов, В.А. Барат, *Акустико-эмиссионная диагностика* (Спектр, М., 2017).
- [2] А.А. Сидягин, В.М. Косырев, *Расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения* (НГТУ, Н. Новгород, 2009).
- [3] В.В. Бардаков, С.В. Елизаров, В.А. Барат, В.Г. Харебов, К.А. Медведев, Д.А. Терентьев, в сб. *Всерос. конф. с международным участием „Актуальные проблемы метода акустической эмиссии“ (АПМАЭ-2021)* (СПб., 2021), с. 27. АРМАЭ-2021.pdf
- [4] O.G. Perveitalov, V.V. Nosov, A.M. Schipachev, A.I. Alehin, *Metals*, **13** (7), 1272 (2023). DOI: 10.3390/met13071272
- [5] В.В. Носов, А.Р. Ямилова, *Контроль. Диагностика*, № 6 (276), 30 (2021). DOI: 10.14489/td.2021.06.pp.030-045
- [6] K. Makhmudov, V. Saveliev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697**, 012066 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012066.
- [7] Х.Ф. Махмудов, У. Султонов, В.Н. Савельев, К.Е. Нигинаев, *Уч. зап. Худжанд. гос. ун-та. Сер. Естественные и экономические науки*, № 3 (58), 22 (2021). EDN: XHUBZS
- [8] С.И. Буйло, в сб. *Всерос. конф. с международным участием „Актуальные проблемы метода акустической эмиссии“ (АПМАЭ-2018)* (ТГУ, Тольятти, 2018), с. 14. EDN: MKDMSW
- [9] Х.Ф. Махмудов, П.И. Афанасьев, *Горная промышленность*, № S1, 142 (2023). DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-142-149
- [10] E. Grigorev, V. Nosov, *Appl. Sci.*, **12** (9), 4549 (2022). DOI: 10.3390/app12094549
- [11] А.В. Попов, А.О. Самуйлов, И.С. Черепанов, *Adv. Eng. Res. (Rostov-on-Don)*, **21** (4), 328 (2021). DOI: 10.23947/2687-1653-2021-21-4-328-336
- [12] А.В. Попов, Д.Н. Тесля, А.Б. Комлев, *Контроль. Диагностика*, № 8 (242), 34 (2018). DOI: 10.14489/td.2018.08.pp.034-039
- [13] Х.Ф. Махмудов, *ЖТФ*, **92** (12), 1869 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.12.53941.181-22