

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 5. С. 247–252
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 5, pp. 247–252

Научная статья
УДК 77.03:620.17
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188864>
EDN: <https://www.elibrary.ru/KSLNMP>

Исследование особенностей локации сигналов акустической эмиссии в сложных композитных конструкциях

Д.С. Яковлев^{1✉}, С.А. Хижняк², А.А. Зотов³

^{1,2}ПАО «ОАК» ОКБ ОТА, Москва, Российская Федерация

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

¹example.mail2015@yandex.ru✉

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования особенностей распространения и локализации сигналов акустической эмиссии (АЭ) в композиционных материалах (КМ). Актуальность работы обусловлена сложностью в определении локаций при ударных воздействиях применительно к авиационным композиционным конструкциям. Они представляют собой объекты сложной геометрии, что влияет на достоверность диагностики технического состояния исследуемого объекта.

Цель исследований – отработка методики локации источников сигналов АЭ на объекте, с учетом влияния на результат измерений особенностей геометрии объекта контроля (ОК) и структуры материалов. Оценка погрешности определения координат при различных схемах расстановки датчиков.

Проведены регистрация результатов АЭ-контроля, связанных с временами прихода сигналов акустической эмиссии, их амплитудой и частотным составом, включая анализ влияния структурных неоднородностей.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, локация источников, натурный эксперимент, волоконно-оптические датчики, решетка Брэгга

Для цитирования. Яковлев Д.С., Хижняк С.А., Зотов А.А. Исследование особенностей локации сигналов акустической эмиссии в сложных композитных конструкциях // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 5. С. 247–252. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188864>

Original article

Research of the features of location of acoustic emission signals in complex composite structures

D.S. Yakovlev^{1✉}, S.A. Khizhnyak², A.A. Zotov³

^{1,2}PSC "UAC" EDB OTA, Moscow, Russian Federation

³Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

¹example.mail2015@yandex.ru✉

Abstract. The article presents the results of an experimental study on the features of propagation and location of acoustic emission (AE) signals in composite materials (CM). The relevance of the work is determined by the complexity of location determination under impact loading as applied to aviation composite structures. These structures represent objects of complex geometry, which affects the reliability of technical condition diagnostics of the object under study.

The aim of the research is to develop a methodology for locating AE signal sources on an object, taking into account the influence of the geometric features of the test object (TO) and the material structure on the measurement results. Evaluation of the error in coordinate determination under various sensor placement schemes.

The complex multilayer and anisotropic structure of CM makes them vulnerable to specific damage types: delaminations, fiber breaks, and matrix cracking. The occurrence and accumulation of such defects significantly affects the structure's residual life, strength, and load-bearing capacity. Timely detection of internal damage substantially increases operational safety and reduces the risk of destruction during operation.

The method of locating AE signals using built-in monitoring systems is one of the most promising, and at the same time, one of the most complex in terms of software implementation, for monitoring the reliability of aviation structures.

The practical application of AE monitoring techniques for aviation structures is associated with a number of fundamental difficulties, such as:

- ambiguity in the interpretation of multiple reflections, especially in enclosed spaces and complex geometric configurations;
- the influence of temperature gradients and other operational factors on wave propagation velocity;
- distortion of wave fronts due to structural inhomogeneities, leading to errors in the calculation of signal arrival times.

Such problems, combined with a relative shortage of data on the behavior of AE signals on full-scale objects (due to the predominance of laboratory studies on model specimens that do not account for the operational features of structures), lead to difficulties in applying the control method to real objects.

Registration of AE monitoring results was carried out, including AE signal arrival times, their amplitude and frequency composition, along with analysis of the influence of structural inhomogeneities.

Keywords: acoustic emission, source location, field experiment, fiber optic sensors, Bragg grating

For citation. Yakovlev D.S., Khizhnyak S.A., Zotov A.A. Research of the features of location of acoustic emission signals in complex composite structures. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 5, pp. 247–252. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188864>

Введение

Сложная многослойная и анизотропная структура композиционных материалов делает их уязвимыми к специфическим видам повреждений

расслоениям, разрывам волокон, растрескиванием матрицы. Возникновение и накопление подобных дефектов в изделии оказывает большое влияние на остаточный ресурс конструкции, ее прочность

и способность выдерживать требуемые нагрузки. Своевременное выявление возникающих внутренних повреждений конструкции позволяет существенно повысить безопасность эксплуатации и снизить риск возникновения разрушений в процессе эксплуатации.

Главной задачей систем встроенного контроля является определение на ранних этапах очагов усталостных повреждений конструкций, вызванных теми или иными ударными воздействиями.

Метод локации сигналов акустической эмиссии системами встроенного контроля является одним из перспективных, и в то же время, одним из наиболее сложных в части программной реализации, при контроле надежности авиационных конструкций.

Практическое применение методик АЭ контроля авиационных конструкций сопряжено с рядом принципиальных трудностей, таких как:

- неоднозначность интерпретации множественных отражений, в особенности в замкнутых пространствах и сложных геометрических конфигурациях.
- влияние температурных градиентов и других эксплуатационных факторов на скорость распространения волн;
- искажение волновых фронтов из-за неоднородностей конструкции, приводящее к ошибкам в расчете времени прихода сигналов.

Подобные проблемы, в сочетании с относительным дефицитом данных по поведению сигналов АЭ на натуральных объектах, связанных с преобладанием лабораторных исследований с модельными образцами, не учитывающими эксплуатационные особенности конструкций, приводят к сложности применения контроля на реальных объектах.

Проведение эксперимента

Эксперимент проводился на многослойной составной конструкции – образце отъемной части крыла (ОЧК) самолета для изучения особенностей распространения сигналов АЭ в обшивке летательного аппарата (ЛА).

Силовой набор состоит из лонжеронов и нервюр. Обшивка представляет собой многослойную панель из полимерных композиционных материалов с металлическим сотовым заполнителем. В качестве датчиков были использованы пьезоэлектрические преобразователи (ПАЭ) и волоконно-оптические датчики (ВОД).

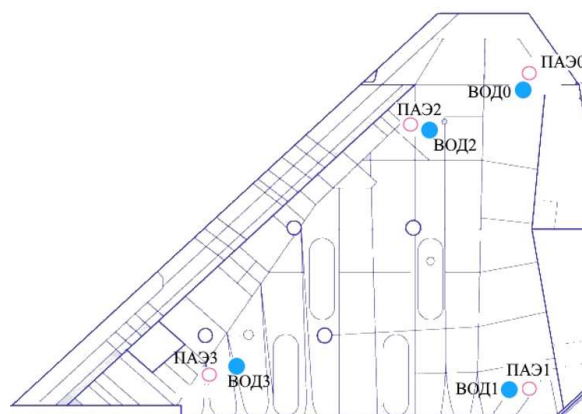


Рис. 1. Внешний вид ОЧК самолета с установленными датчиками ВОД и ПАЭ

Ударные воздействия на конструкцию имитировались с использованием отрезка заостренной стальной проволоки.

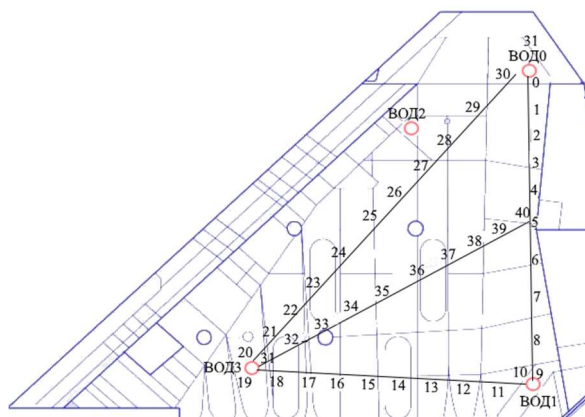


Рис. 2. Вид крыла с точками, в которых наносились воздействия

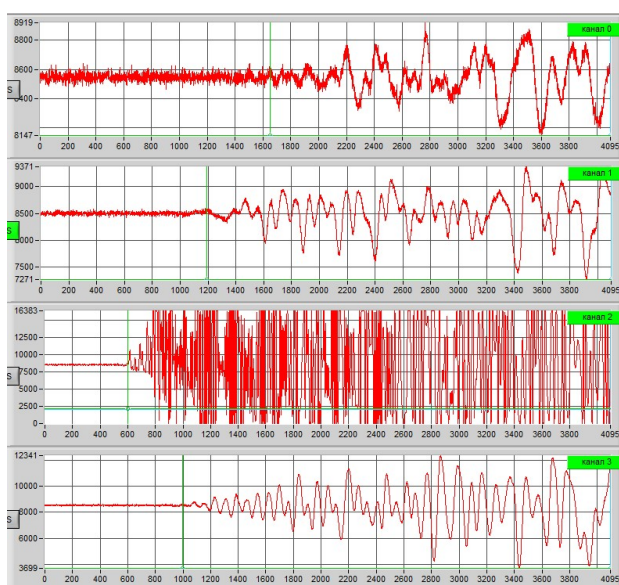


Рис. 3. Форма сигналов АЭ при ударе рядом с ВОД



Рис. 4. Форма сигнала АЭ при ударе на расстоянии от ВОД

Основная причина возникновения флуктуаций координат локации сигналов АЭ, определенных в данных испытаниях связана зависимостью их частоты и формы переднего фронта от расстояния до датчиков антенны. При этом разброс в определении координат локации источника сигналов АЭ, для источников из центральных областей, удаленных от датчиков антенны, будет составлять сотни миллиметров. Для уменьшения погрешности координат между точкой нанесения ударного воздействия и точкой, определенной антенной датчиков, а также для сокращения доли нелокализованных сигналов необходимо использовать метод определения времени прихода, чувствительный к времени и частоте переднего фронта регистрируемого сигнала.

Отклонение координат сигналов АЭ от точки нанесения удара возникают также и по причине температурных флуктуаций самой конструкции. Особенно критично данное явление проявляется в авиации, где температурные колебания наружных слоев обшивки на протяжении полета могут достигать сотен градусов.

Принцип работы датчиков основан на интерферометре Фабри–Перо (ИФП), который представляет собой оптический резонатор с двумя отражающими поверхностями. Свет, многократно отражающийся между этими зеркалами, создает интерференционные полосы.

Изменение температуры оказывает влияние на оптическую длину резонатора и показатели преломления зеркал, что порождает отклонения в определении разностей времен прихода (РВП).

Для решения этой проблемы применяются ряд решений, например:

- включение в конструкцию датчика волоконной-брэгговской решетки (ВБР), позволяющей определять и измерять температурные флуктуации, на основании которых рассчитываются коэффициенты температурной компенсации;

- использование сверхтонких пленок в конструкции зеркал датчиков, позволяющих повысить их сопротивляемость температурным флуктуациям среды;

- применение заполняющих материалов в полостях внутренней конструкции датчика, компенсирующих температурное расширение.

В датчиках, используемых для проведения эксперимента, были применены дополнительные датчики ВБР, совместно с нанесенными на зеркала пленками.

Определение температуры датчика на ВБР основывается на основной формуле для расчета брэгговской длины волны (λ_{Br}):

$$\lambda_{Br} = 2n_{eff} \times \Lambda, \quad (1)$$

где: λ_{Br} – брэгговская длина волны;

n_{eff} – эффективный показатель преломления моды волоконного световода;

Λ – период модуляции (период решетки).

Полученные в процессе эксперимента температурные данные были использованы в алгоритмах расчета РВП.

Для расчета отклонений определения координат сигналов АЭ были рассмотрены результаты локации при использовании антенн, состоящих из четырех датчиков ВОД. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 5:

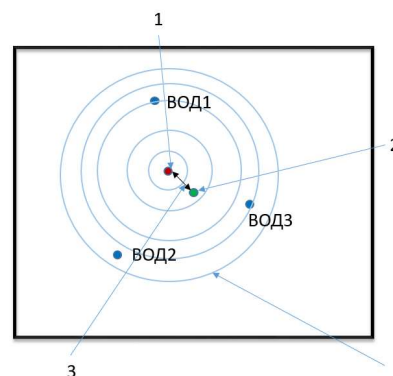


Рис. 5. Схема определения локации сигналов АЭ, где: 1 – точка возникновения АЭ сигнала (точка нанесения ударного воздействия); 2 – точка регистрации АЭ сигнала антенной датчиков (точка определенных координат ударного воздействия); 3 – расстояние между точкой возникновения АЭ сигнала (ударным воздействием) и точкой его определения антенной датчиков (погрешность определения координат локации ударного воздействия); 4 – волны распространения сигнала АЭ

Абсолютная погрешность определялась как разность между координатой, определенной АЭ-системой в каждой точке, и средним значением:

$$\begin{aligned}\Delta_X &= X_{изм} - \bar{X}; \\ \Delta_Y &= Y_{изм} - \bar{Y},\end{aligned}\quad (2)$$

где $X_{изм}$, $Y_{изм}$ – координаты, измеренные АЭ-системой, м; $\bar{X}$, $\bar{Y}$ – средние значения координат в каждой точке, м, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}; \\ \bar{Y} &= \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n},\end{aligned}\quad (3)$$

где X_i , Y_i – координаты сигналов АЭ, локализованные в каждой точке корреляции, м; n – количество локализованных сигналов в каждой точке корреляции.

Абсолютная погрешность характеризовала разброс координат относительно среднего значения.

Для расчета приведенной погрешности была использована формула:

$$\begin{aligned}\gamma_X &= \frac{\Delta}{X_n} \times 100\% = \frac{X_{изм} - \bar{X}}{X_n} \times 100\%; \\ \gamma_Y &= \frac{\Delta}{Y_n} \times 100\% = \frac{Y_{изм} - \bar{Y}}{Y_n} \times 100\%,\end{aligned}\quad (4)$$

где X_n , Y_n – нормированные значения координат, м.

При расчетах за нормированное значение при расчете координат было принято максимальное расстояние между датчиками ВОД, которое составило 4,5 м. Для определения времени прихода сигнала АЭ использовались два метода – двухинтервальный и метод среднеквадратичных отклонений (СКО) [3].

При использовании двухинтервального метода время прихода сигнала $t_{пр}$ АЭ на преобразователь принимается равным моменту времени t_0 , при котором двухинтервальный коэффициент достигает максимального значения. Время t_0 соответствует моменту максимальной скорости перестройки структуры сигнала, то есть моменту его прихода на преобразователь.

Метод СКО построен на использовании статистического показателя, характеризующего раз-

брос значений амплитуд сигналов АЭ относительно их среднего значения рассчитанное на временном интервале T , то есть в так называемом «окне», представляющем собой временной промежуток с одновременным наложением нескольких мод акустической волны, перемещающийся по временной оси.

На рис. 6 и 7 представлено распределение значений абсолютной и приведенной погрешностей для метода СКО и для двухинтервального метода. Распределение представлено по каждому отдельному измерению в точке.

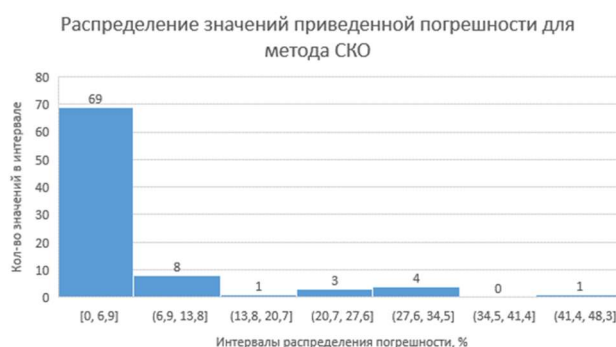


Рис. 6. Распределение значений приведенной погрешности методом СКО для всех точек, локализованных антеннами, состоящими из четырех ВОД



Рис. 7. Распределение значений приведенной погрешностей двухинтервального метода для всех точек, локализованных антеннами, состоящими из четырех ВОД

Как видно из графиков (рис. 6–7), максимальные значения приведенных погрешностей по осям X и Y значительные, и выделяются относительно средних показателей (до 70–80 % при среднем значении в пределах 7 %). Такие флуктуации являются следствием воздействием посторонних шумов при проведении эксперимента. Для предотвращения возникновения таких промахов, перед определением координат АЭ события, необходимо вводить фильтрацию сигналов.

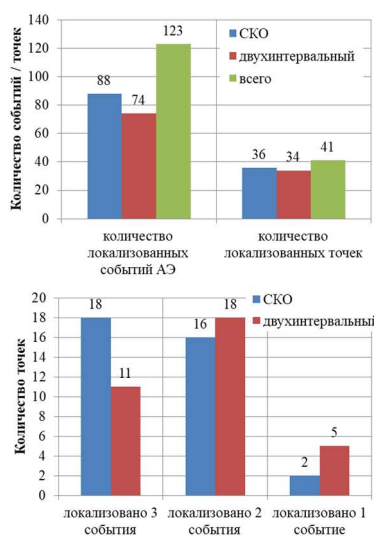


Рис. 8. Сравнительный анализ использования методов определения времен прихода сигналов АЭ

Заключение

Анализ распределений погрешностей для СКО (рис. 6) показал, что при использовании метода СКО для определения времен прихода сигналов АЭ, максимальная приведенная погрешность по оси X составила 45,4 %, а по оси Y – 69 %. Среднее значение по всем точкам не превышает 7 %.

Анализ распределений погрешностей для двухинтервального метода (рис. 7) показал, что для определения времен прихода сигналов АЭ максимальная приведенная погрешность по оси X составила 74,3 %, а по оси Y – 88,6 %. Среднее значение по всем точкам также не превышало 7 %. Точность определения локации и исключение «выбросов» можно повысить калибровкой ВОДАЭ.

Таким образом, сравнительный анализ (рис. 8), показал, что применение метода СКО для обработки информации позволило получить более точные координаты при локации большего количества событий.

Кроме того, при двухинтервальном методе увеличилось число точек, где были одновременно локализованы 2 и 1 события, что снижает достоверность оценки погрешности локации источников сигналов АЭ.

Подводя итог, можно сказать, что применение метода СКО для определения локации координат ударного воздействия на сложных конструкциях позволило повысить точность локации, сократив количество одновременных локализаций одного события.

Список источников

1. Федотов М.Ю. Некоторые аспекты практического применения волоконно-оптических систем мониторинга инженерных сооружений // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2021. № 3. с 23.
2. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. и др. Акустико-эмиссионный контроль авиационных материалов и конструкций из углепластиков. Новосибирск: Наука, 2024. 288 с.
3. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. М.: «Машиностроение – Полет», 2004, с. 74–81, с. 81–93.
4. Емельянова Н.И. (ред.). Современные методы неразрушающего контроля композитных материалов. М.: Физматлит, 2021. 248 с.
5. Петрова П.С. (ред.). Теория и практика применения волоконно-оптических систем мониторинга. М.: Наука, 2020. 312 с.
6. Смирнова А.В. Неразрушающий контроль композитных конструкций: современные подходы. СПб.: Политехника, 2022. 256 с.
7. Соколова В.А. (ред.). Методы локации источников акустической эмиссии в сложных конструкциях. М.: Машиностроение, 2021. 184 с.
8. Новикова М.П. (ред.). Волоконно-оптические системы мониторинга: теория и практика. М.: Наука, 2023. 296 с.

References

1. Fedotov MYu. Some aspects of the practical application of «Detikha» fiber-optic systems for engineering structures. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2021;(3):23. (In Russ.).
2. Ser'eznov AN, Stepanova LN, Kabanov SI et al. *Acoustic emission testing of carbon-fiber-reinforced plastic aircraft materials and structures*. Novosibirsk: Nauka; 2024. 288 p. (In Russ.).
3. Ser'eznov AN, Stepanova LN, Murav'ev VV. Diagnostics of transport facilities using the acoustic emission method. Moscow: Mashinostroenie – Polet; 2004. pp 74–81. pp 81–93. (In Russ.).
4. Emel'yanova NI. (ed.). *Modern methods of non-destructive testing of composite materials*. Moscow: Fizmatlit; 2021. 248 p. (In Russ.).
5. Petrova PS. (ed.). *Theory and practice of the application of fiber-optic monitoring systems*. Moscow: Nauka; 2020. 312 p. (In Russ.).
6. Smirnova AV. *Non-destructive testing of composite structures: modern approaches*. Saint Petersburg: Politekhnik; 2022. 256 p. (In Russ.).
7. Sokolova VA. (ed.). *Methods for locating acoustic emission sources in complex structures*. Moscow: Mashinostroenie; 2021. 184 p. (In Russ.).
8. Novikova MP. (ed.). *Fiber-Optic Monitoring Systems: Theory and Practice*. Moscow: Nauka; 2023. 296 p. (In Russ.).