

УДК 620.179.17

## АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТОВ

А. В. Попов<sup>1</sup>, А. О. Самуйлов<sup>2</sup>, В. Ю. Волошина<sup>3</sup>

<sup>2</sup>branco09@mail.ru

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

Поступила в редакцию 15.07.2021

**Аннотация.** Разработанные методы и средства акустико-эмиссионной диагностики на основе инвариантов позволяют оперативно определять наличие, местоположение и степень опасности дефектов, вне зависимости от формы, размеров и предыстории эксплуатации конструкций. Рассмотрен пример диагностирования конструкций планера воздушных судов.

**Ключевые слова:** прочность конструкций; авиационная техника; акустическая эмиссия; трещиностойкость; инварианты.

К особо критическим элементам конструкции воздушных судов (ВС), требующим обеспечения высокой надежности, относятся силовые элементы планера ВС. Все большую роль в авиации играют конструкции из композитных материалов (КМ), доля которых в конструкциях планера может достигать 70 %. Но конструкциям из композиционных материалов присущи такие дефекты как: расслоение, непроклей, трещины, воздушные или газовые раковины, инородные включения, которые являются зонами концентраций напряжений [2].

Разрушение силовых элементов планера ВС в полете приводит к тяжелым последствиям, начиная от прекращения полетного задания, что уже является авиационным происшествием, до аварии ВС и гибели летного состава. Только за последние 5 лет в государственной авиации зафиксировано более 20 авиационных событий, причиной которых явилось частичное или полное разрушение силовых элементов планера ВС.

В настоящее время на этапах разработки, производства и эксплуатации авиационной техники (АТ) применяется комплекс средств технической диагностики элементов и неразрушающего контроля (НК) конструкции ВС.

Определение трещиностойкости силовых элементов планера ВС в настоящее время производится оптическими методами, проникающими веществами, магнитными методами. Эти методы не позволяют обнаруживать развивающиеся дефекты, дефекты малых размеров, а также дефекты, находящиеся в труднодоступных местах.

В настоящее время особое место среди методов контроля прочностных характеристик занимает акустико-эмиссионный (АЭ) контроль. Его возможности при минимальных инструментальных и людских затратах могут позволить не только обнаруживать и регистрировать развивающиеся дефекты, но и классифицировать их по степени опасности.

Метод АЭ позволяет оценивать акустические сигналы, возникающие при образовании и развитии дефектов в силовых элементах конструкций при их деформировании. Параметры сигнала АЭ непосредственно связаны с параметрами развивающихся дефектов, которые представляют наибольшую опасность для конструкции, поэтому чем раньше он будет обнаружен, тем больше времени останется на принятие правильного решения. Способность АЭ метода оперативно регистрировать малейшие нарушения структуры материала позволяет

контролировать состояние не только испытываемых объектов, но и объектов, находящихся в эксплуатации без изменения технологического режима их работы.

Но, в настоящее время, не существует АЭ критериев разрушения, позволяющих с требуемой точностью диагностировать силовые элементы планера ВС. Это связано с разнородностью формы, материалов и размеров объекта контроля, влиянием предыстории эксплуатации, наличием остаточных напряжений, внешними шумами. Все предложенные критерии разрушения основаны на эмпирических данных, оценке амплитуды, интенсивности сигналов, и не предназначены для диагностирования сложных конструкций.

При проведении АЭ диагностики силовых элементов планера ВС неизбежно возникновение посторонних акустических шумов, регистрируемых аппаратурой, что усложняет анализ поступающей информации. Шумы от трения являются типичными для АТ. Наибольший уровень этих шумов создается на участке крепления крыла к корпусу. Сигналы от трения во многом подобны сигналам АЭ, и их подавление вызывает большие трудности. Сигналы от трения являются признаком неисправности в самолете, и их необходимо регистрировать и оценивать, как и сигналы АЭ от дефектов.

Поэтому необходимо разработать способ АЭ диагностики, позволяющий повысить оперативность оценки трещиностойкости силовых элементов планера ВС.

Акустическая эмиссия в конструкционных материалах представляет собой нестационарный случайный процесс, поэтому для ее анализа применимы методы статистической радиотехники.

На основе известного фундаментального соотношения для пуассоновского распределения между математическим ожиданием  $m[x]$  и дисперсией  $D[x]$  количества событий в случайном процессе имеем,

$$m[x] = D[x] = \lambda, \tag{1}$$

где  $\lambda$  – интенсивность событий (числа импульсов АЭ) на заданном интервале выборки.

Используя третий центральный момент числа импульсов, можно получить критерии разрушения, основанные на отличии потока импульсов АЭ от пуассоновского – инварианты:

$$m[\dot{x}^3] = m[x^3] - 3 \cdot m[x^2] \cdot m[x] + (m[x])^3, \tag{2}$$

где  $m[\dot{x}^3]$  – третий центральный момент количества импульсов АЭ;  $m[x^3]$  – третий начальный момент количества импульсов АЭ;  $m[x^2]$  – второй начальный момент количества импульсов АЭ.

Найдем третий начальный момент количества импульсов:

$$m[x^3] = \sum_{i=1}^N x^3 \frac{\lambda^x}{x!} \cdot e^{-\lambda} = \sum_{i=1}^N x^2 \frac{\lambda^{x-1}}{(x-1)!} \cdot e^{-\lambda}, \tag{3}$$

где  $N$  – количество подынтервалов рассматриваемой выборки. Обозначим  $k = x-1$ , получим:

$$m[x^3] = \sum_{i=1}^N k^2 \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda} + 2\lambda \sum_{i=1}^N k \cdot \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda} + \lambda \sum_{i=1}^N \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}. \tag{4}$$

Выразив выражение (4) через математическое ожидание количества импульсов, получим:

$$m[x^3] = \lambda \cdot m[x^2] + 2 \cdot \lambda \cdot m[x] + \lambda = \lambda^3 + 3\lambda^2 + \lambda. \tag{5}$$

Подставив выражение (5) в формулу (2), получим:

$$m[\dot{x}^3] = \lambda^3 + 3\lambda^2 - \lambda - 3(\lambda^2 + \lambda)\lambda + 2\lambda^3 = \lambda. \tag{6}$$

Таким образом, центральный момент третьего порядка количества импульсов АЭ равен интенсивности импульсов АЭ на заданном интервале выборки.

Это соотношение позволяет построить параметрические инварианты, справедливые только для пуассоновского процесса, и на этой основе оценивать отклонение анализируемого процесса от пуассоновского:

$$I_1 = (m[x^3] - 3 \cdot m[x^2] \cdot m[x] + (m[x])^3) - m[x] = 0. \quad (7)$$

Выражение (7) может использоваться как инвариант для определения степени отклонения потока АЭ импульсов от пуассоновского при проведении испытаний.

На основании (7) получим еще несколько выражений для определения степени отклонения потока импульсов АЭ от пуассоновского:

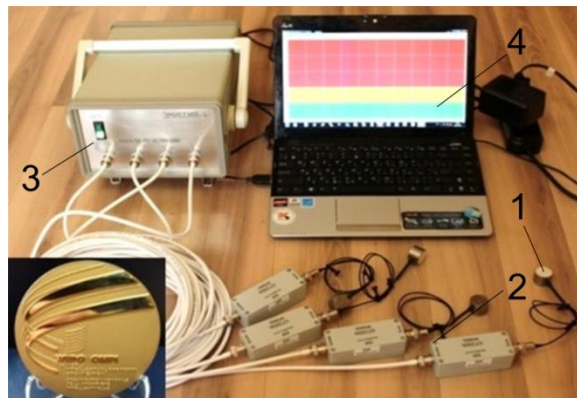
$$I_2 = \frac{m[x]}{m[\dot{x}^3]} = 1, \quad (8)$$

$$I_3 = \frac{m[x](1 - 2 \cdot (m[x]^2) + 3 \cdot m[x^2])}{m[x^3]}. \quad (9)$$

Когда деформация материала конструкции приводит к образованию макродефекта, характеристики потоков импульсов АЭ становятся зависимыми. Объединение микродефектов разрушает гипотезу пуассоновского потока и приводит к нарушению равенств (7)–(9).

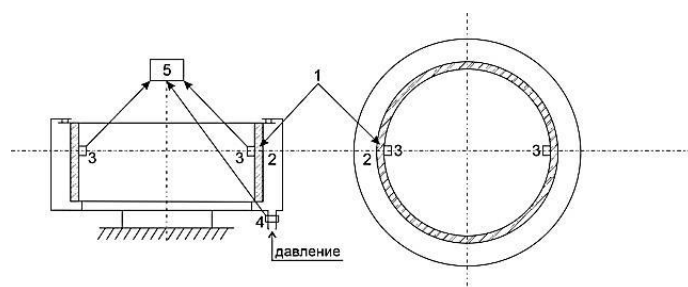
Для диагностики силовых элементов ВС конструкций из металла, композиционных материалов, сплавов алюминия разработаны многоканальные АЭ аппаратно-программные комплексы (АПК), методики экспериментальных исследований, методика моделирования напряженно-деформированного состояния, проведены экспериментальные исследования по изучению связи статистических закономерностей АЭ процессов с процессами разрушения.

Основные требования, предъявляемые к АПК АЭ для диагностики технического состояния силовых элементов планера ВС в процессе эксплуатации – возможность диагностирования дефектов на ранней стадии их возникновения, оперативное определение степени опасности и местоположения регистрируемых дефектов.



**Рис. 1.** Разработанный аппаратно-программный комплекс на основе метода акустической эмиссии:  
 1 – пьезодатчики АЭ; 2 – предусилители АЭ; 3 – блок цифровой обработки сигналов;  
 4 – ПЭВМ с разработанным программным обеспечением

Рассмотрим пример использования полученных результатов при оценке прочности воздухозаборника двигателя самолета Ил-96-400М (рис. 2, 3) из КМ. Испытания воздухозаборников на внутреннее разрежение до разрушения проводились в ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество».



**Рис. 2** - Схема стенда для испытания воздухозаборника:

1 – воздухозаборник; 2 – область избыточного давления; 3 – датчики АЭ; 4 – датчик давления; 5 – АПК АЭ



**Рис. 3.** Испытательный стенд и места установки датчиков акустической эмиссии из комплекта аппаратно-программного комплекса акустико-эмиссионного диагностирования «Эмиссия-4» на воздухозаборник самолета Ил-96-400М:

1 – конструкция воздухозаборника; 2 – датчики АЭ;  
3 – камера избыточного давления испытательного стенда

Перед началом испытаний воздухозаборника двигателя на внутреннее разрежение до разрушения на внутреннюю полость воздухозаборника были установлены датчики АЭ из комплекта разработанного АПК акустико-эмиссионного диагностирования «Эмиссия-4» (рис. 3).

В ходе испытаний регистрировались акустические импульсы, возникающие в материале воздухозаборника при создании избыточного давления в полости 2 (рис. 2). При достижении давления 2 атм было зарегистрировано образование и развитие дефекта воздухозаборника. Рост дефекта характеризует кривая графика степени опасности дефекта, которая резко возрастает при превышении давления 2 атм (рис. 4).

При достижении давления  $P = 2,9$  атм, произошла деформация и потеря устойчивости воздухозаборника, что привело к резкому уменьшению нагрузки и значительному уменьшению амплитуды акустических импульсов (рис. 4).

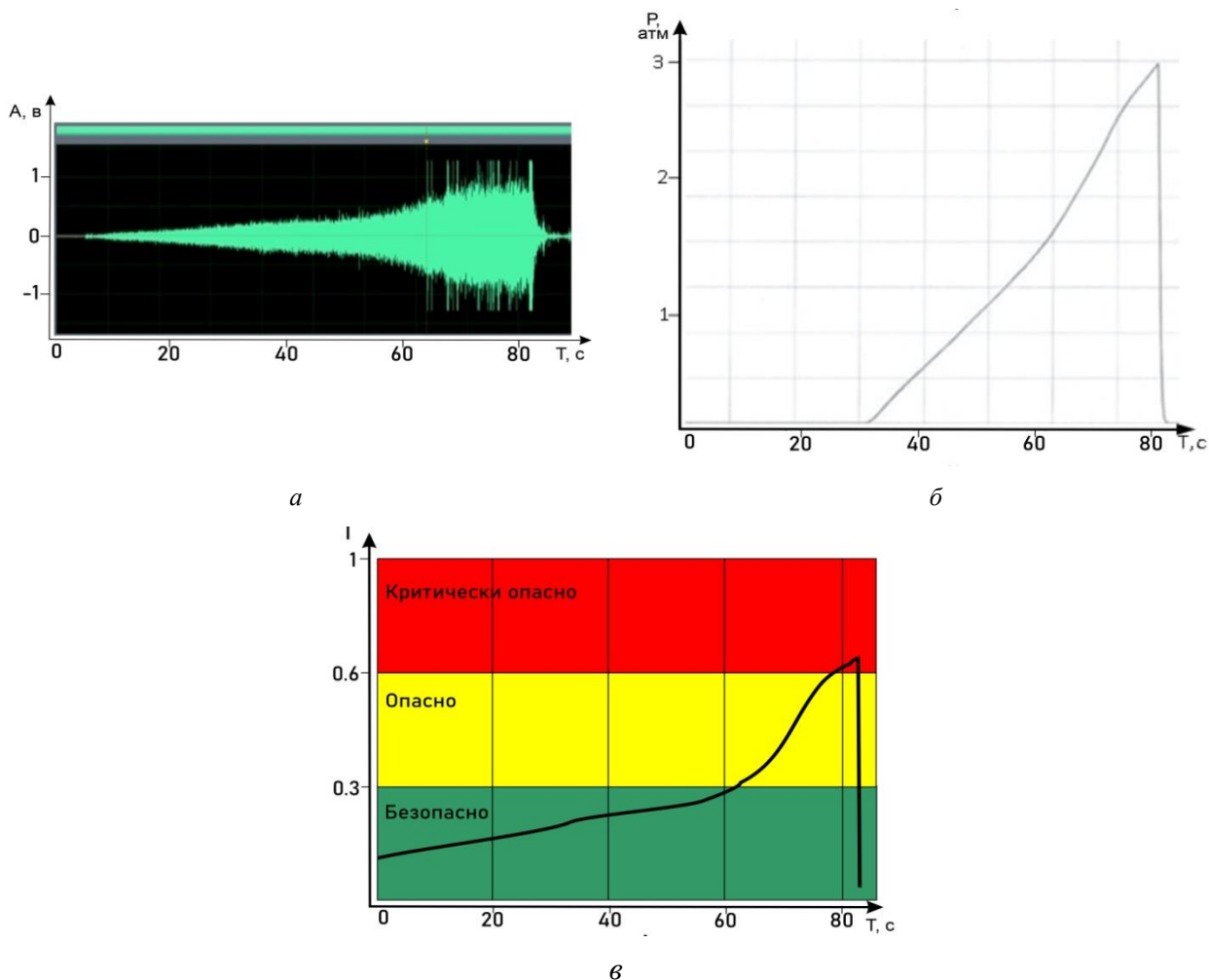
В процессе проведения диагностики на устройство отображения информации выводится кривая зависимости значения величины инварианта (критерия степени опасности дефекта) от времени диагностирования. Область построения кривой инварианта разделена на три зоны, выделенные цветами (зеленый – безопасно, желтый – опасно, красный – критически опасно).

Полученные экспериментальные данные о связи значений инвариантов АЭ процессов с параметрами нагрузки и деформации конструкционных материалов обеспечивают:

- выявление закономерностей связи процессов накопления повреждений в конструкционных материалах с параметрами нагружения;
- получение данных о характерных для начала трещинообразования значениях информативных параметров сигналов АЭ;
- получение реальных значений прочностных характеристик конструкций при испытаниях.

Разработанные инвариантные акустико-эмиссионные критерии разрушения могут быть использованы при идентификации стадий деформирования и предотвращения разрушения силовых элементов конструкций в машиностроении, строительстве, топливно-энергетическом комплексе [3–7].

Разработанная технология оценки эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций награждена Золотой медалью Всемирной организации интеллектуальной собственности Организации Объединенных Наций (рис. 2).



**Рис. 4.** Изменение информативных параметров акустической эмиссии и нагрузки при испытаниях воздухозаборника:

- а* – осциллограмма импульсов АЭ в материале объекта контроля;  
*б* – кривая, характеризующая уровень действующей на объект контроля нагрузки;  
*в* – кривая инварианта, характеризующая степень опасности дефекта

Разработанные методы и средства акустико-эмиссионной диагностики силовых элементов планера ВС, позволяют:

- 1) оперативно (в реальном масштабе времени) с помощью разработанного АПК обрабатывать многоканальную и многопараметрическую информацию об изменении информативных параметров АЭ и определять местоположение дефектов;
- 2) оценивать степень опасности дефектов и возможность дальнейшей эксплуатации конструкции;
- 3) обеспечивать оперативность, достоверность и снижение стоимости определения возможности эксплуатации силовых элементов конструкций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (ПБ 03-593-03) / Ростехнадзор России, 2003. 102 с. [ *Rules for the organization and conduct of acoustic emission control of vessels, apparatus, boilers and process pipelines (PB 03-593-03)*, (in Russian), Gostekhnadzor of Russia, 2003. ]
2. **Неразрушающий** контроль: справочник. В 7 т. / под общ. ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 2005. 829 с. [ V. V. Klyueva (ed.), *Non-destructive testing: a reference. In 7 v.*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2005. ]
3. **Расщепляев Ю. С., Попов А. В.** Метод инвариантов в задаче исследования потоков акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 79–82. [ Yu. S. Rasshcheplyayev, A. V. Popov, "Invariant method in researches of acoustic emission fluxes", (in Russian), in *Defektoskopiya*, no. 10, pp. 79-82, 2000. ]
4. **Попов А. В.** Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле // Патент РФ № 2233444. Опубл. 27.07.2004. Бюл. № 21. [ A. V. Popov, "Method of estimation of destruction of structures at acoustic emission monitoring", Patent RF 2233444, 2004. ]
5. **Расщепляев Ю. С., Попов А. В.** Обобщение метода инвариантов для оценки изменения характеристик акустической эмиссии при контроле прочности конструкций // Контроль. Диагностика. 2006. № 5. С. 28–30. [ Yu. S. Rascheplyayev, A. V. Popov, "Generalization of the invariant method for assessing the change in acoustic emission characteristics when controlling the strength of structures", (in Russian), in *Kontrol. Diagnostika*, no. 5, pp. 28-30, 2006. ]
6. **Попов А. В., Кондранин Е. А.** Метод контроля прочности силовых элементов конструкций на основе оценки численно-временных характеристик акустико-эмиссионных процессов // Контроль. Диагностика. 2008. № 7. С. 45–47. [ A. V. Popov, E. A. Kondranin, "Strength testing method for the load-bearing elements of constructions based on numerical-temporal estimating of acoustic emission processes characteristics", (in Russian), in *Kontrol. Diagnostika*, no. 7, pp. 45-47, 2008. ]
7. **Попов А. В., Жумай В. Э.** Определение прочностных характеристик конструкций на основе амплитудных инвариантов акустико-эмиссионных процессов // Контроль. Диагностика. 2008. № 10. С. 29–31. [ A. V. Popov, V. E. Zhumay, "Strength characteristics of construction definition based on acoustic emissive processes amplitude invariants", (in Russian), in *Kontrol. Diagnostika*, no. 10, pp. 29-32, 2008. ]

## ОБ АВТОРАХ

**ПОПОВ Алексей Владимирович**, проф. каф. восстановления авиационной техники. Д-р техн. наук, ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж).

**САМУЙЛОВ Александр Олегович**, адъюнкт каф. восстановления авиационной техники, ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж).

**ВОЛОШИНА Валентина Юрьевна**, канд. экон. наук.

## METADATA

**Title:** Acoustic-emission method of diagnostics of power elements of an aircraft airframe based on invariants.

**Authors:** A. V. Popov<sup>1</sup>, A. O. Samuylov<sup>2</sup>, V. Yu. Voloshina<sup>3</sup>

**Affiliation:** Air Force Academy. Voronezh, Russia

**Email:** <sup>2</sup> branco09@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 3 (93), pp. 50-55, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The developed methods and means of acoustic-emission diagnostics based on invariants allow us to quickly determine the presence, location and degree of danger of defects, regardless of the shape, size and prehistory of the operation of structures. An example of diagnosing aircraft airframe structures is considered.

**Key words:** structural strength; aviation equipment; acoustic emission; crack resistance; invariants.

**About authors:**

**ПОПОВ, Alexei Vladimirovich**, Prof., Dept. of Aviation Technology Restoration. Dr. of Tech. Sci., VUNC of the Air Force "VVA" (Voronezh).

**САМУЙЛОВ, Alexandr Olegovich**, Post graduation student, Dept. of Aviation Equipment Restoration, VUNC of the Air Force "VVA" (Voronezh).

**ВОЛОШИНА, Valentina Yuryevna**, Cand. of Econ. Sci.