

УДК: 629.7.067.8

OECD: 2.03 A1

Разработка бортового комплекса неразрушающего контроля конструкции летательного аппарата методом акустической эмиссии

Ремшев Е.Ю.¹, Соболев И.А.^{2*}, Олехвер А.И.³, Лукичев В.Ю.⁴¹ К.т.н., доцент, ² Магистр, ³ К.т.н., старший преподаватель, ⁴ К.т.н., доцент^{1,2,3,4} Балтийский государственный технический университет

«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Летательные аппараты (ЛА) являются сложными и дорогостоящими конструкциями, требующими постоянного технического контроля элементов конструкции для их безопасной эксплуатации. Вместо постоянного контроля состояния конструкции ЛА в авиации в настоящее время используется периодический контроль из-за ограничений традиционных методов технического контроля в процессе эксплуатации.

Изучив и проанализировав имеющуюся информацию по современным методам технического контроля применяемых, в настоящее время, в авиации, а также основываясь на результатах экспериментальных полётов, было выдвинуто решение проблемы по осуществлению постоянного неразрушающего контроля - использование бортового комплекса неразрушающего контроля, основанного на методе акустической эмиссии. Произведенный анализ результатов экспериментальных полетов на легкомоторном самолете Cessna 172 показал, что новый метод смог определить локации акустического отклика в структуре крыла и фюзеляжа, а значит бортовой комплекс может решить проблему в осуществлении непрерывного контроля целостности конструкции ЛА.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, летательные аппараты, контроль, крыло, идентификация.

Development of an on-board device for non-destructive testing of wings and landing gear of an aircraft of acoustic emission

Remshev E.Y.¹, Sobolev I.A.^{2*}, Olekhver A.I.³, Lukichev V.Y.⁴¹ PhD, assistant professor, ² Master student, ³ PhD, senior lecturer, ⁴ PhD, assistant professor
^{1,2,3,4} Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov, St.Petersburg, Russia

Abstract

Aircraft are complex and expensive structures that require constant technical control of elements for their safe operation. Instead of continuous inspection, aviation uses periodic inspection due to the limitations of traditional flaw detection methods.

Having studied and analyzed the available information on modern methods of technical control currently used in aviation, as well as based on the results of experimental flights, a solution to the problem of implementing continuous non-destructive testing was put forward - the use of an on-board non-destructive testing complex based on the acoustic emission method. The analysis of the results of experimental flights on the light-engine Cessna 172 aircraft showed that the new method was able to determine the location of the

acoustic response in the wing and fuselage structure, which means that the on-board complex can solve the problem in the implementation of continuous monitoring of the integrity of the aircraft structure.

Keywords: *acoustic emission, aircraft, control, wing, identification.*

Введение

В современной авиации для выявления дефектов в структуре конструкции летательного аппарата используются различные дефектоскопы. Данных приборов много. Они подразделяются на группы в зависимости от физических принципов, на которых они основаны. Проблема при выборе прибора будет зависеть от физических параметров объекта контроля. Проведенный анализ научных работ, статей, патентов показал, что метод акустической эмиссии обладает потенциалом применения в области контроля авиационной техники. Данный вывод был сделан на основе изучения областей применения метода. К примеру, он хорошо справляется с контролем слоистых материалов и материалов, обладающих стабильными акустическими характеристиками (при механическом возбуждении), а также с осуществлением поиска дефектов в больших (крупных) объектах. Рассмотрим подробнее область контроля крупных объектов. Чаще всего крупные объекты, помимо значительных размеров, обладают сложной формой. Это приводит к ограничению в применении большинства методов неразрушающего контроля из-за возникновения многократно отраженных сигналов. Например, рассмотрим рентгенографический и ультразвуковой методы. Применение первого метода не рационально поскольку в больших объектах контроля будет размываться радиационный сигнал и ослабляться поток излучения. Ультразвуковой же метод сложно применим, так как трудно осуществлять поиск отраженного от дефекта сигнала и этот сигнал может быть рассеян в различных направлениях. Кроме того, известные в настоящее время методы технического контроля могут быть применены только при проведении профилактических осмотров, что в авиации требует вывода из эксплуатации ЛА на момент технического осмотра и соответственно приводит к финансовым потерям. Таким образом, для устранения проблем, вызванных использованием традиционных методов дефектоскопии, в работе будет рассмотрено применение метода акустической эмиссии, который позволит выявлять точное положение локаций дефектов в больших объектах, обладающих произвольной формой, за один цикл нагружения в процессе эксплуатации ЛА, что позволит перейти от традиционных плановых осмотров ЛА, к контролю состояния в реальном режиме времени, что существенно скажется на эксплуатационных расходах на ЛА.

1. Методы неразрушающего контроля

1.1. Анализ состояния решения проблемы контроля летательных аппаратов

Главными целями контроля ЛА является уменьшение или исключение рисков аварийных ситуаций. Появление происшествий приводит к поломке оборудования. Во избежание данных ситуаций в авиации проводят внедрения современных технологий и методик, оценивающих состояния технических объектов. На сегодняшний день примерно 17,7% Российских судов – старые машины. Если рассматривать некоторые крупные авиакомпании, то средний возраст судов «S7 Group» ещё в 2015 году составлял 9-10 лет. Компания «Россия» на 15 января 2021 года в парке насчитывает 63 лайнера, средний возраст которых составляет 13,3 года. Одним из самых молодых парков обладает

компания «Аэрофлот». На момент 1 марта 2021 года насчитывается 230 самолётов, средний возраст которых 5,7 лет. Несмотря на то что техника развивается, частота авиакатастроф лишь растёт. В 2019 году, по данным To70, в коммерческой авиации произошло 86 авиапроисшествий с гибелью 257 человек, та же компания обнародовала статистику за 2020 год - 40 авиапроисшествий с 299 погибшими. В 2021 году, одной из крупных авиакатастроф (в мире) является падение пассажирского «Боинга 737-500» в Индонезии. Из 62 людей на борту никто не выжил. Причинами данных катастроф являются разные факторы: организационного, технического, погодного характера. Чаще всего причиной отказов является коррозионное или усталостное разрушение. Важно отметить, что резкое списание устаревших ЛА невозможно из-за больших потерь на перевозки и закупку нового оборудования. Эти факторы указывают на необходимость решения проблемы по внедрению оборудования, продлевающего срок эксплуатации самолётов путём проведения неразрушающего контроля и реализации системы постоянного мониторинга состояния.

1.2. Общая характеристика методов

Целью применения методов неразрушающего контроля (НК) является поиск локации дефектов, выявление степени их опасности и дальнейшее исключение элементов конструкции (или их замена), которые могут привести к аварийному состоянию. Общей особенностью данной группы методов является возможность осуществления контроля без повреждения или разрушения исследуемого объекта. Чаще всего в авиации применяются следующие методы НК [15]:

- Визуально-оптический – данный вид НК, основан на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом контроля;
- Вихретоковый – вид НК, который основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем;
- Магнитный - вид НК, основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами;
- Ультразвуковой (акустический) - вид НК, основан на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых и/или возникающих в контролируемом объекте (при частотах ниже 20 кГц применим термин "акустический");
- Капиллярный - вид НК, основан на проникновении жидких веществ в поверхностные полости объекта контроля и их выявлении при визуальном осмотре;
- Рентгенографический - вид НК, основан на анализе параметров, полученных после взаимодействия проникающего ионизирующего излучения в объект.

Каждый метод, обладает уникальными особенностями, которые как расширяют, так и ограничивают их применение. И только один из видов обладает возможностью непрерывного контроля – акустическая эмиссия. Следует рассмотреть метод подробнее и сопоставить его с наиболее близким аналогом – ультразвуковым методом.

1.3. Сопоставление акустической эмиссии с ультразвуковым методом

Ультразвуковой метод построен на физическом явлении возникновения в теле упругих колебаний, которые взаимодействуя с дефектами структуры изменяют свои параметры. Частота колебаний ультразвука выше порога слышимости у человека (от 1 до 5 МГц). Из-за большой частоты колебаний ультразвук обладает уникальными свойствами. Пучки ультразвуковой волны могут быть строго направлены, а отражение и преломление их может быть описано законами геометрической оптики. Волна в исследуемом теле генерируется извне (за счет работы прибора), далее она распространяется в теле,

сталкивается со структурными дефектами материала и образуется отраженное поле. Отраженная волна регистрируется специальным преобразователем. На основе параметров найденного сигнала судят о наличии дефекта. Например, уменьшение интенсивности волны указывает на наличие дефекта. Если найденный дефект имеет большие размеры, то за ним образуется «акустическая тень» [14].

Отличительными особенностями акустически-эмиссионного метода (АЭ) являются: процесс возникновения волн и возможность контроля свойств материала от момента возникновения дефекта до разрушения. Диапазон частот метода АЭ обычно от 20 кГц до 1 МГц [1]. В АЭ методе источником сигнала является сам материал. Волна возникает за счет появления или развития дефектов в виде трещин, коррозии, расслоений и т.д. На тело устанавливается датчик, который улавливает АЭ сигнал, далее сигнал преобразуется в электрический импульс, фильтруется. Полученные данные после фильтрации обрабатываются (по параметрам: амплитуды, числу сигналов, времени нарастания и т.д.). В результате программной обработки, определяется локация и степень опасности дефекта [14]. Подробное сравнение двух методик приведено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение метода акустической эмиссии и ультразвукового метода

Параметры сравнения	Метод акустической эмиссии	Ультразвуковой метод
Определяемые параметры	Движение, локация, степень опасности дефекта	Локация, размеры дефекта
Источник сигнала	Сам материал	Прибор
Наличие нагружения	Требуется	Не требуется
Слабые стороны метода	Чувствителен к шуму	Чувствителен к геометрии
Затрачиваемые усилия на проверку	Малые усилия	Значительные усилия
Поверхность контроля	Только к поверхности для установки датчиков	Требуется доступ ко всей поверхности
Контроль крупных объектов	Реализуется	Реализуется, но с проблемами
Циклы нагружения	Один цикл нагружения	Постепенное сканирование
Возможность снятия показаний дистанционно	Возможно	Невозможно
Возможность контроля объекта во время эксплуатации	Возможно	Невозможно

Как видно из таблицы, главным недостатком является необходимость фильтрации шумовых сигналов, осложняющих дальнейшую процедуру обработки [1,2,3]. Хотя данная проблема и присутствует, но современные методы фильтрации позволяют эффективно уменьшать влияние помех и получать достоверные результаты исследований. На сегодняшний день, используются множество методов, осуществляющих фильтрацию:

- По средним локациям;
- По попаданию на схему;
- По попаданию внутрь треугольника;
- По затуханию амплитуды;
- По координатам локации;
- По параметрам импульсов;

- По наборам датчиков;
- По затуханию энергетического параметра;
- По количественному затуханию энергетического параметра;
- и т.д.

С другой стороны, из таблицы 1 видно, что основными достоинствами метода, выделяющими его на фоне конкурентных, являются: возможность постоянного контроля, высокая степень чувствительности к развивающимся дефектам, возможность определения местоположений дефектов и присвоение им класса опасности.

2. Метод акустической эмиссии

2.1. Метод акустической эмиссии, как основа системы мониторинга конструкций

Ученые Иоффе А.Ф. и Классен М.В. обратили внимание на появление шумов при формоизменении нагретых заготовок из цинка и кристаллов каменной соли. Они изучили это явление и объяснили его указав на взаимосвязь между уровнем приложенной нагрузки и частотой возникающих акустических сигналов. Позже Кайзером Д. (рисунок 1В) были опубликованы первые работы по систематическому исследованию шумов, возникающих при нагружении и деформации материалов. В его работах показано, что акустический шум, возникающий при деформации, обнаруживается у многих материалов. Следует отметить, автор наблюдал возникновение акустического шума уже на первых стадиях нагружения [4]. Огромный вклад в развитие метода акустической эмиссии внесли российские и зарубежные исследователи: Иванов В. И., Муравин Г. Б., Дробот Ю. Б., Баранов В.М., Грешников В. А., Носов В.В., Otsu M., Dunegan H. L., Ono K., Forde M. C., Scruby C. V., и др. [14]. На сегодняшний день, метод применяется в различных отраслях промышленности. С помощью данного метода решаются проблемы:

- 1) Контроля состояний объектов;
- 2) Исследование процессов: релаксации напряжений, сопровождения механических испытаний, уточнения механизмов формоизменений (деформаций).

Метод обладает большой популярностью, так как обладает следующими преимуществами:

- 1) Осуществления контроля процессов изменения свойств материала в реальном режиме времени. Под процессами подразумевается изменение свойств из-за: сварки, трещинообразования, расслоения и т.д. Применение метода в области контроля сварных швов было подтверждено авторами работ [7,8]. В их работах исследовался вопрос контроля непроваров при сварке корабельной стали. Итогами экспериментов являются выявленные параметры акустических сигналов (при данном виде дефекта), а также методика по определению положения дефекта.

- 2) Возможности контроля объекта с установленным преобразователем или несколькими преобразователями. В работе автора [6] изучалась вероятность применения метода АЭ при определении течи в нефтепроводах. На исследуемый автором трубопровод устанавливалась система по сбору данных, состоящая из равноудаленных друг от друга преобразователей (Выдерживалось расстояние в 60 м). В результате анализа полученных данных было найдено положение течи и найдены очаги коррозии. Результат эксперимента был подтвержден использованием в качестве проверки визуально-измерительного метода.

- 3) Высокой чувствительности. В работе [9] осуществлялся анализ чувствительности метода, который показал точность равную $1 \cdot 10^{-6}$ мм². Данная точность получена в результате лабораторных исследований, т.е. она сложно достижима в практическом использовании из-за наличия производственных или промышленных

шумов. С другой стороны, в ходе практических испытаний метод АЭ позволял найти трещины с приращением в десятые доли миллиметра, что и указывает на его хорошую чувствительность [14].

2.2. Сущность метода

Акустико-эмиссионной волной можно условно назвать перемещающуюся в материале объекта звуковую волну, вызванную быстрым высвобождением энергии в материале. Примером модели быстрого освобождения энергии является: звук, который возникает в результате разрыва бумаги на части. Представим тело, подвешенное на пружине. Колебанием будет называться движение, которое совершает тело на пружине (в подвешенном состоянии), если его натянуть и отпустить. В результате этого действия, она будет колебаться во времени по синусоидальному закону вверх и вниз (относительно положения равновесия). Данный вид колебаний возникает только в случае, если движущая сила пружины будет увеличиваться пропорционально отклонению. Таким образом мы получаем упругую силу. Любое тело состоит из частиц. Частицы закреплены к своим местам упругими силами, и пока действуют нагрузки на растяжение или на сжатие (до предела упругости) оно будет вести себя аналогично пружине. Очень упрощенно твердое тело можно изобразить в виде модели, показанной на рисунке 1А, но только пространственной.

Допустим, что в частицах вещества расположенных на левой стороне модели рисунка 1А в один и тот же промежуток времени возникают синусоидальные колебания (в одинаковом такте). Тогда частицы первой плоскости будут колебаться с одинаковой амплитудой и частотой. Упругие силы будут передавать колебания частицам второй плоскости, а когда эти частицы начнут колебаться, колебания передаются третьей плоскости и т. д. Поскольку частицы во всем теле приходят в движение не одновременно и не находятся в одинаковом состоянии движения (постоянно), следует вывод – они не закреплены жёстко. Все иначе в упругих материалах. Чтобы движение передалось нужно время. частицы какой-то плоскости проходят положение равновесия, допустим при колебаниях справа налево, частицы, располагающиеся в плоскостях дальше (правее), только начинают свой путь. Т.е. плоскости, к которым движение дошло позже, отстают по фазе от передних. В теле могут возникать зоны уплотнения и расширения. Они появляются, когда присутствуют колебания с сдвинутой фазой. Пример зон расширения и сжатия приведен на рисунке 1Б. Упругая волна является множеством зон уплотнений и расширений, которые перемещаются с одной и той же скоростью. При этом перемещение зон происходит на одинаковое расстояние, но частицы остаются (колеблются) только около своего положения равновесия. В ходе движения возникает сопротивление растяжению или сжатию и именно эта особенность влияет на возможность передавать упругие волны. В начальный момент времени волна распространяется в зоне первоначального возбуждения, со временем зона увеличивается во все стороны. Вследствие расширения, объем занимаемый волновым движением увеличивается, интенсивность падает, т.е. происходит затухание волны. Уже при деформации в 100 микрон, возникающие звуковые волны в диапазоне от нескольких Гц до МГц могут быть зарегистрированы АЭ системой с последующим расчетом местоположения трещины. Данные волны и будут акустико-эмиссионными волнами. Существенным отличием метода АЭ от других методов дефектоскопии является то, что звуковые волны не индуцируются в среду. Волны возникают в среде самостоятельно (без внешнего по отношению к материалу объекта источника звука) под воздействием какой-либо нагрузки: давления, температуры, механического нагружения [9].

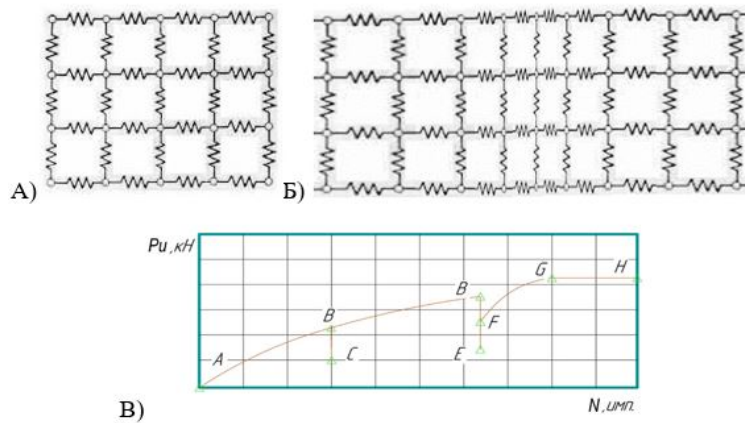


Рис. 1. А) Упрощённая модель твердого тела; Б) Упрощённая модель продольной волны; В) График Кайзера Д

Следует отметить, что предложенная ранее модель источника сигналов АЭ представлена для общего представления протекания процесса. Более подробной является модель источника сигнала АЭ упруго деформированного материала описанная в работах Носова В.В, связанная со структурными и прочностными характеристиками материала. Автор рассматривает АЭ как единое множество действующих в пространстве точечных источников упругого излучения, показанных на рисунке 2 [16,17].

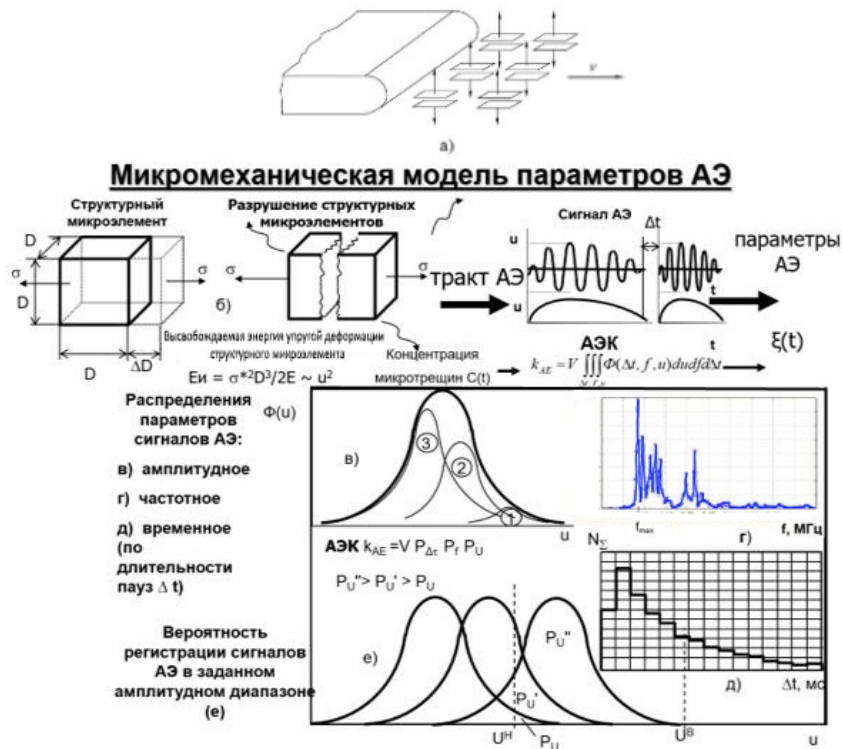


Рис. 2. Схема расположения точечных источников в окрестности устья трещины (а) и микромеханическая модель параметров АЭ (б, в, г, д, е)

Источники располагаются в окрестности устья усталостной трещины (при процессе развития трещины). Амплитуда импульсов АЭ находится по: скорости роста; площади поверхности, получившейся при скачке трещины; координатам источника АЭ; точки наблюдения; характеристике среды; глубине трещины; типу волн. Сутью

модели является разделение исходного объекта на ячейки, условием разрушения которых является наличие критического напряжения разрыва. Если происходит разрыв, возникает импульс. Активность АЭ будет равняться количеству разрушившихся ячеек за единицу времени. Автор работ смог связать выделяющуюся от трещины энергию E_c упругих колебаний с размерами микротрещины. Формула по расчету в поле нормальных напряжений σ , имеет вид:

$$E_c = \pi(1 - \nu)\sigma^2 D\alpha^2, \quad (1)$$

где D, α – поперечный и продольный размер зарождающейся трещины; ν – коэффициент Пуассона.

В некоторых случаях АЭ-наблюдения связывают с результатами микротрещинообразования, которое описывается по формуле:

$$dC(t) = [C_0 - C(t)]p(t)dt, \quad (2)$$

где C – число микротрещин; t – время роста трещин; $p(t)$ – вероятность появления трещин; C_0 – максимально допускаемая плотность трещин.

2.3. Параметры акустической волны

На рисунке 3 представлен график синусоидальной волны.

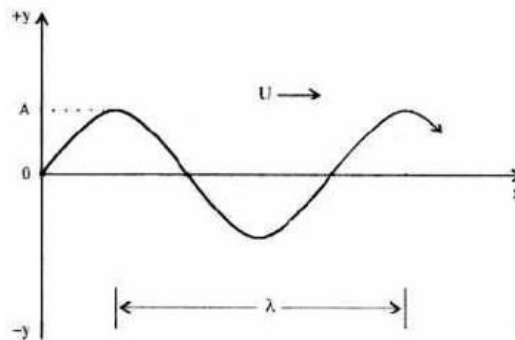


Рис. 3. График синусоидальной волны

Параметрами, характеризующими волну, являются:

Частота, обозначается символом « f » и отражает число колебаний частицы в секунду. Она одинакова для всех частиц (в одной волне) и равна частоте возмущения.

Длина волны, обозначается символом « λ ». Является расстоянием между двумя плоскостями, частицы которых находятся в одинаковых состояниях движения. Обратна пропорциональна частоте. При высоких частотах наблюдаются малые длины волн, а при низких частотах – большие длины волн.

Скорость звука, обозначается символом « V », является свойством вещества, отражающим скорость распространения определенного состояния. Обычно постоянна для всех длин волн и частот. Для веществ с стекловидным бесструктурным строением справедливо одинаковое значение величины. Кристаллические вещества, обладающие анизотропией упругих свойств, будут характеризоваться неодинаковой скоростью звука. В случае если выделяется какое-либо одно кристаллографическое направление, т.е. наблюдается текстура, то оно обнаруживается из-за того, что скорости звука в различных направлениях отличаются. Упругая анизотропия особенно резко выражена у меди и латуни. Такая же анизотропия наблюдается и в аустенитных сталях.

Звуковое давление, обозначается символом « P ». Если присутствует повышенная концентрация частиц (сжатие), давление будет превышать нормальное, если пониженная концентрация частиц (расширение), то давление падает. Звуковое давление изменяется по синусоидальному закону (чередуются места расширения и сжатия) и наблюдается не только в газах, но и в жидкостях, твердых телах [10].

2.4. Связь параметров акустической эмиссии с процессами разрушения

Нормативные документы подразделяют источники сигналов АЭ на четыре класса [2,3,11]:

- 1) Пассивный;
- 2) Активный;
- 3) Критически активный;
- 4) Катастрофически активный.

Классификация проводится, в большинстве случаев, по первичным параметрам акустического сигнала: амплитуды, импульса, энергии, активности и т.д. Одним из основных параметров, который связан с процессами разрушения является амплитуда. В связи с этим, в работе будут рассмотрены основные три метода классификации по амплитуде. Автором [9] был разработан и описан метод, отражающий зависимость между числом скачков с амплитудой u_m и параметром Λ . Расчет производился по формуле:

$$\Lambda = \sum_m u_m N_i, \quad (3)$$

где m – число принятых уровней дискриминации; N_i – число скачков с амплитудой u_m .

Была выведена зависимость, связывающая между собой пластическую деформацию ϵ_p , среднеквадратичное значение амплитуды \bar{u} , и скорость деформирования $\dot{\epsilon}$. Она получена на основе результатов экспериментов по статическому растяжению образцов из стали 10ГН2МФА и из стали 10 [3]:

$$\bar{u} = k_0 \sqrt{\dot{\epsilon}} e^{-d\epsilon_p}, \quad (4)$$

где k_0, d – константы.

Амплитудный критерий применим при расчете оценки состояния объекта (таблица 2). Для применения амплитудного критерия [2] необходимо выполнить следующие условия:

- 1) Восстановить амплитуду импульсов АЭ вблизи источника;
- 2) Определить граничное значение допустимой амплитуды.

Рассмотри метод, основанный на критерии состояния b-value. Этот критерий отражает аппроксимацию амплитудного распределения. Авторы научных работ [12,13] рассматривали его в качестве основного при сопоставлении состояния амплитудного распределения и критериев нагрузки. Эксперимент заключался в сжатии образцов из горных пород. Итогом работы является описание методики разделения стадий упругой деформации и стадии образования трещины (трещин). Процесс разрушения может быть описан методом основанным на связи параметров суммарной АЭ N_Σ , скорости счета \dot{N} и взаимосвязи параметров \dot{N} , $\dot{\epsilon}$, ϵ_p [3].

$$\dot{N} = A \exp[-k_0 \dot{\epsilon}^{-\frac{1}{2}} u_n \exp(d\epsilon_p)], \quad (5)$$

где A – амплитуда, k_0 – волновое число сдвиговых волн.

Как видно из формулы, суммарная АЭ зависит от коэффициента интенсивности напряжений (КИН), по значениям которого можно получить примерное представление о техническом состоянии объекта (размер трещины не однозначно связан с параметрами). Метод широко распространен при разработке критериальных параметров и исследователи описывали состояние объекта зависимостью суммарного счета от обобщенного параметра нагружения (время, КИН, нагрузка и т.д) [14].

Локально-динамический критерий [12], является одним из наиболее применяемых способов классификации источников сигналов и вычисляется по формуле:

$$m_{i(N)} = \frac{\Delta N_i P_i}{\Delta P_i N_i}, \quad (6)$$

где $\Delta N_i = N_{i+1} - N_i$, $\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$, N_{i+1} и N_i – суммарная АЭ, P_{i+1} и P_i – обобщенный параметр нагрузки в i -ый и $(i+1)$ -ый момент времени.

Признаки формирования класса источников АЭ по описанным методам приведены в таблице 2.

Таблица 2

Классификация источников АЭ по параметрам

Класс источника	Признаки формирования класса	
	Амплитудны критерий	Локально-динамический критерий
I (Пассивный)	Получено меньше трёх импульсов за наблюдение	$m_i < 1$
II (Активный)	$A_{cp} < A_t$	$m_i \approx 1$
III (Критически активный)	$A_{cp} > A_t$	$1 < m_i < 6$
IV (Катастрофически активный)	Источник, у которого не менее трёх зарегистрированных сигналов и $A_{cp} > A_t$	$m_i > 6$

Помимо указанных выше методик, следует обратить внимание на оценку состояния уровня повреждений по активности возникновения акустических сигналов и на анализ по информационно-кинетическому методу. Метод оценки по активности возникновения акустических сигналов состоит из расчета двух параметров: Load Ratio, Calm Ratio. Расчёт основан на эффектах Кайзера (рисунок 1В) и Фелисити. Эффект Кайзера заключается в отсутствии АЭ сигналов до момента, когда не будет превышен предыдущий уровень нагружения. Если условие выполняется, то это указывает на упругий процесс формоизменения. Если сигналов при повторной нагрузке множество, то это указывает на появление дефектов, т.е. на эффект Фелисити. Для нахождения параметра Load Ratio необходимо сопоставить активности на предыдущем и последующем этапе при повышении нагрузки. Для вычисления параметра Calm Ratio необходимо найти отношение суммарной АЭ к общему числу акустических сигналов за цикл. Данный метод хорошо себя показал в определении повреждений, которые могут привести к разрушению объектов.

Диагностика конструкций состоит в оценке конструкции и способности её выполнять заданные функции. Совместные силовые и АЭ данные, изложенные в работах Носова В.В. [16,17], позволят решить эту задачу с позиций информационно-кинетического

подхода. Рассмотрим первоначальные стадии разрушения. Число микротрещин на этих стадиях невелико, а разрушение элементов обладает статистическим характером. При увеличении количества микротрещин происходит объединение их в макротрещины. Характер протекания процесса разрушения определяется при этом соотношением между структурной неоднородностью материала и неоднородностью поля механических напряжений, а число единичных импульсов АЭ приравнивается к сумме всевозможных микротрещинообразований и объединений их в макротрещины. С позиций этих представлений автором была разработана микромеханическая модель, связывающая параметры АЭ ξ с параметрами C повреждаемости материала:

$$\xi(t) = R_{AЭ} C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t \frac{dt'}{\Theta(U_0, \omega(t'))} \right] \right\} d\omega \quad (7)$$

где ξ – информационный параметр АЭ; $R_{AЭ}$ – АЭ коэффициент; C_0 – начальная концентрация структурных элементов материала; t – текущее время; $\Psi(\omega)$ – функция плотности распределения ω (параметр прочностного состояния материала объекта), которая характеризует степень неоднородности материала; $\Delta\omega$ – нижняя граница и диапазон рассеяния значений.

АЭ коэффициент по сути является «звучащим» объемом и связан с долей сигналов АЭ, которые регистрируются из потока отфильтрованных импульсов.

$$R_{AЭ} = V \int \int \int_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) d\Delta t, df, du \quad (8)$$

$$\omega(t) = \frac{\gamma\sigma(t)}{KT} \quad (9)$$

где γ – активационный объем; σ – растягивающие напряжения, V – объем исследуемого материала; $\Phi(\Delta t, f, u)$ – плотность вероятности распределения откликов сигналов АЭ.

Формуле 8 можно присвоить смысл вероятности регистрации сигналов при прохождении фильтрации. Формула Журкова, определяющая время разрушения микроэлемента:

$$\Theta(U_0, \omega(t')) = \tau_0 \exp \left[\frac{U_0 - \gamma\sigma(t)}{KT} \right] \quad (10)$$

где U_0 – энергия активации процесса разрушения (не зависит от состояния структуры).

Информационными параметрами метода будут являться: суммарный счет АЭ, число регистрируемых импульсов, суммарная амплитуда или комбинация данных параметров.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Порядок проведения эксперимента

Летательные аппараты, на сегодняшний день, являются дорогостоящими и технически сложными конструкциями, которые требуют постоянного контроля для осуществления безопасной и стабильной работы. Традиционные методы контроля конструкции ЛА позволяют осуществлять только периодический контроль, без возможности исследования состояния конструкции во время эксплуатации. Метод АЭ

позволит решить данные проблемы при подтверждении возможности его использования в данной области В октябре 2020 года, на аэродроме «Гостилицы», были проведены экспериментальные вылеты на легкомоторном самолете CESSNA с установленными датчиками АЭ. Порядок проведения эксперимента осуществлялся согласно ГОСТ Р ИСО 22096-2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Метод акустической эмиссии» [1].

Цель эксперимента: исследование конструкции летательного аппарата и подтверждение экспериментальными данными возможности применения метода АЭ в области контроля конструкции летательных аппаратов.

Фотографии самолета с двух ракурсов, на котором были произведены вылеты, представлены на рисунке 4.



Рис. 4. Фотографии легкомоторного самолета CESSNA

На ЛА были установлены датчики акустической эмиссии. Установка осуществлялась с помощью специальных магнитных бандажей. В качестве точек установки были выбраны самые нагруженные элементы конструкции:

- 1 Лонжерон крыльев;
- 2 Фюзеляж хвостовой части.

Лонжерон является основным силовым элемент конструкции, располагающийся по длине конструкции. Схематично он приведен на рисунке 5А. Фотографии установленных датчиков представлены на рисунке 5Б и 5В. Данный элемент конструкции был выбран, поскольку воспринимает от 30. . . 50% веса и сопротивления самолета.

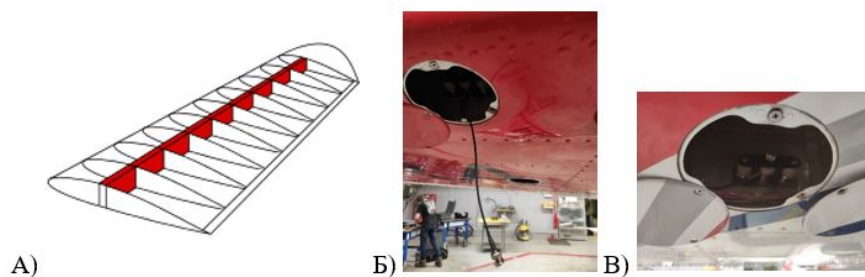


Рис. 5. А – Условная структура лонжерона;
Б, В – фотографии установленных датчиков на лонжероне

Фюзеляж – корпус летательного аппарата, связывающий между собой консоли крыла, оперения и, в некоторых случаях, шасси. Фюзеляж предназначен для размещения

целевой нагрузки от оборудования и от присоединённых к нему частей самолёта. После установки датчиков, для получения качественного сигнала, были расположены предусилители. Фото предусилителя (в установленном состоянии) показан на рисунке 6. Данный блок устанавливается непосредственно вблизи датчика АЭ. Он позволяет передавать сигнал от датчика на достаточные расстояния до прибора АЭ, увеличивая амплитуду сигнала, полученного с датчика.



Рис. 6. Фотография предусилителя

После разгона и взлёта самолёта, на крыло действует распределённая сила, создающая изгибающий момент и, поскольку крыло не ломается, в нём возникают внутренние силы, препятствующие перемещениям. Если материал элементов конструкции обладает какими-то отклонениями, датчик АЭ будет регистрировать сигнал. Схематичные примеры деформации крыла показаны на рисунке 7.

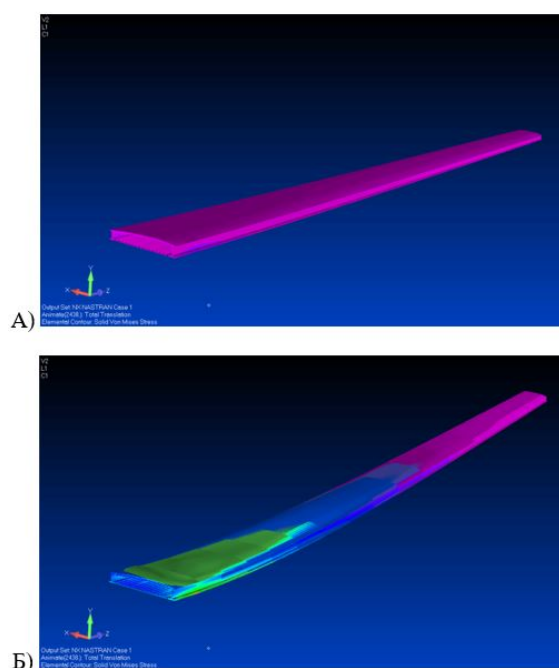


Рис. 7. Схематичные примеры деформации крыла самолета в полёте:
А) Крыло в не нагруженном состоянии; Б) Крыло под нагрузкой

В ходе эксперимента датчики зафиксировали импульсные сигналы, которые усиливались предусилителем, поступали в систему, вновь усиливались, регистрировались программой на компьютере и фильтровались. Этап фильтрации заключался в отсеивании результатов, которые не превышали установленный порог. После фильтрации были зафиксированы параметры: числа импульсов, энергии, суммарного счета, амплитуды (рисунок 8). Как видно из рисунка 8, графики не доходят до горизонтальной оси. Это происходит из-за того, что значения амплитуды регистрируются только в случае превышения порога фильтрации. Программным методом, по полученным данным, были рассчитаны координаты локаций потенциальных дефектов структуры. На рисунке 9 приведено схематичное отображение найденных положений локаций в конструкции летательного аппарата.

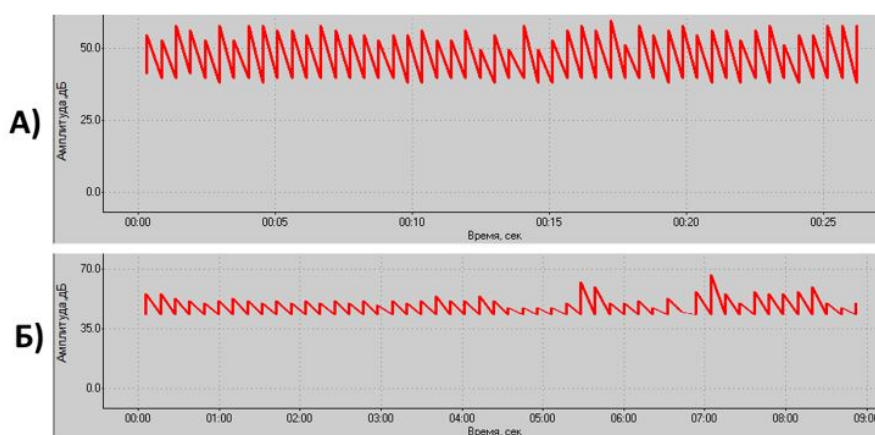


Рис. 8. Графики зарегистрированных АЭ амплитуд:
А – с фюзеляжа хвостовой части; Б – с лонжерона крыла

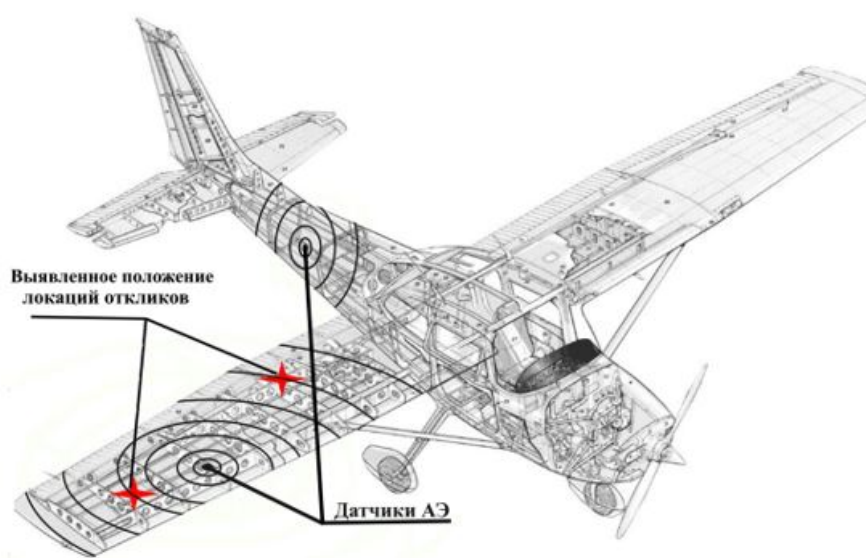


Рис. 9. Схематичное отображение найденных локаций на всей конструкции самолета

Таким образом, на основе полученных данных, были найдены две локации сигналов в конструкции крыла летательного аппарата. Т.е. метод подтвердил свою возможность использования в области дефектоскопии конструкции самолётов.

4. Экономическая выгода

Был произведен анализ рынка современных дефектоскопов. Условно было рассчитано, что для использования комбинации методов: визуально-оптический, радиационный и ультразвуковой – необходимо затратить сумму равную 5448120 р. Эта сумма отображает затраты на аттестацию (3 года) и покупку оборудования для контроля конструкции аппаратов. Данная сумма получена с сайта компании, осуществляющей аттестацию и закупку оборудования для лабораторий. Аналогичный расчет для комбинации методов акустической эмиссии и вихретокового метода показал сумму в 1523500 р, что примерно в 3,5 раза дешевле использования традиционных методов. Стоит так же выделить, что крупные отечественные авиакомпании вынуждены закупать импортную аппаратуру, осуществляющую контроль конструкции. Данная аппаратура является дорогостоящей. Это приводит к тому, что небольшие отечественные авиакомпании не могут закупать данные приборы. На сегодняшний день, помимо ОАО «Аэрофлот», имеющего, на момент 01.02.21 в своем распоряжении 236 воздушных судов, в России имеются еще 9 крупных компаний по числу внутренних и внешних перевозок. Данные компании представлены на рисунке 10.

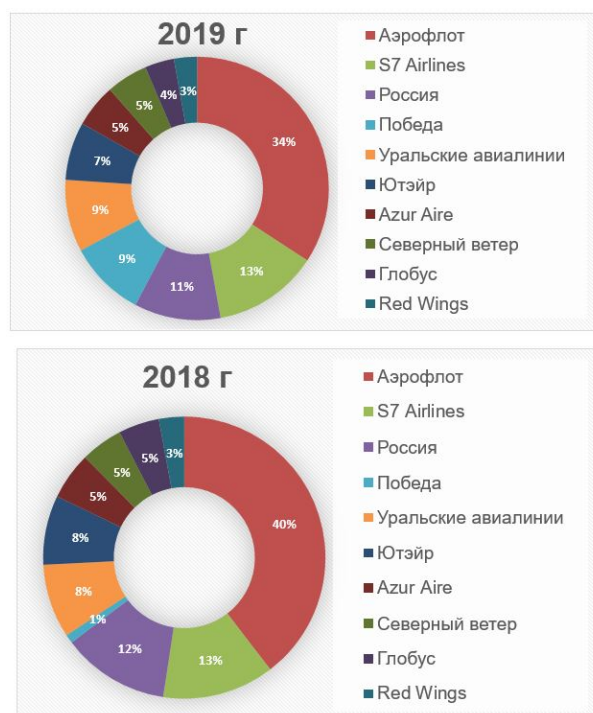


Рис. 10. Статистика перевозок Российских авиакомпаний за 2018-2019 г.

Потенциально данные компании являются покупателями нового бортового комплекса. Уже на данном этапе, такие компании как: Аэрофлот, ЮТР, Россия – видят большой потенциал в применении метода акустической эмиссии.

Заключение

Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

1) Проведенный анализ методов неразрушающего контроля показал большой потенциал в применении нового метода, основанного на акустической эмиссии, в связи с тем, что он обладает рядом сильных преимуществ: позволяет дистанционно контролировать конструкции во время эксплуатации самолета; не требует доступа ко

всей поверхности исследуемого объекта; анализ происходит за один цикл нагружения; метод применим для контроля габаритных объектов и обладает широким диапазоном исследуемых материалов.

2) Подробное изучение метода акустической эмиссии с точки зрения физического принципа работы привело к выводу о том, что метод может обладать потенциально большой точностью в определении положения развивающихся дефектов конструкции, поскольку существует несколько методик, определяющих связь параметров АЭ и процессов разрушения.

3) В результате проведенных экспериментальных полётов и последующего анализа результатов, было выявлено что метод позволяет определять локации потенциальных мест дефектов, в частности были найдены две локации в конструкции крыла самолёта. Таким образом метод АЭ доказал свою потенциальную возможность использования в области авиационной дефектоскопии в части создания бортовых систем неразрушающего контроля ЛА.

4) В ходе анализа современного рынка авиационных дефектоскопов было выявлено, что условно метод позволит сократить затрачиваемые ресурсы на исследование самолетов, примерно в 3,5 раза. Т.е. он будет доступен как для крупных, так и для развивающихся компаний.

Список литературы

1. ГОСТ Р iso 22096-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Метод акустической эмиссии.
2. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
3. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник; В 7 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т. 7. Кн. 1. М.: Машиностроение. 2005, – 340 с.
4. Kaiser J. Untersuchung uber das auftreten Gerauschen beim Zugversuch: PhD thesis. / J. Kaiser // Arkiv fur das Eisenhüttenwesen, AREIA. 1953. Vol. 24. №1-2. P. 43-45.
5. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.:ил.
6. Харебов В.Г., Жуков А.В., Кузьмин А.Н. Практическая оценка метода акустической эмиссии на технологических газопроводах // В мире неразрушающего контроля. 2008. №3(41). С. 24-26.
7. Степанова Л.Н., Чаплыгин В.Н., Кабанов С.И. и др. Исследование связи информативных параметров сигналов акустической эмиссии с процессом разрушения образцов с дефектами сварки // Дефектоскопия. 2012. №6. С. 11-21.
8. Носов В.В., Ярилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиев И.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций на основе микромеханической модели акустической эмиссии при статическом нагружении // Деформация и разрушение материалов. 2016. №11. С. 38-45.
9. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1982. 108 с.
10. Руководство пользователя акустико-эмиссионной системы ЛОКТОН // ЗАО «ЭЛТЕСТ». Москва. -254с.
11. Шнайдер Л.А., Кулешов В.К. Возможность акустико-эмиссионного мониторинга потенциально опасных узлов и участков линейной части магистральных нефтепродуктов //

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2002. №5. С. 143-146.

12. Sagar R.V. Importance of acoustic emission based b-value in the study of fracture process in reinforced concrete structures // 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-9. May 2016. DOI 10.21012/FC9.040.

13. Ono K. Application of acoustic emission for structure diagnosis // Diagnostyka – Diagnostics and structural health monitoring 2. 2011. pp. 3-17.

14. Чернов Д.В., [Текст]: Разработка методов диагностики усталостных трещин с помощью акустической эмиссии. Тема диссертации и автореферата по ВАК РФ 05.11.13, кандидат наук Чернов Дмитрий Витальевич– М., 2018. – 148 с.

15. ГОСТ Р 56542-2015: Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов [Текст]. – 2019 г. -19 с.

16. Носов В. В. Н 84 Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2012. — 384 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

17. Носов В. В., Ямилова А. Р. Метод акустической эмиссии. Санкт-Петербург: Лань, 2017 - 304

References

1. ISO 22096:2007 "Condition monitoring and diagnostics of machines - Acoustic emission", IDT

2. PB 03-593-03. Regulations on organization and execution for acoustic emission inspection of vessels boilers apparatus and process piping.

3. Ivanov V.I., Vlasov I.E. Acoustic emission. Handbook in 8 volumes edited by V.V.Kluev. Volume 7, Book 1, pp. 1 - 340 (in Russian).

4. Kaiser J. Untersuchung uber das auftreten Gerauschen beim Zugversuch: PhD thesis. / J. Kaiser // Arkiv fur das Eisenhüttenwesen, AREIA. 1953. Vol. 24. №1-2. P. 43-45.

5. Ivanov V. I., Barat V. A. Acoustic emission diagnostics: reference book. М.: Publishing house «Spectrum», 2017. 368 p.

6. Kharebov V.G., Zhukov A.V., Kuzmin A.N. Practical assessment of the method of acoustic emission on technological gas pipelines // In the world of non-destructive testing. 2008. No. 3 (41), 24-26.

7. Stepanova L.N., Chaplygin V.N., Kabanov S.I. et al. Investigation of the relationship of informative parameters of acoustic emission signals with the process of destruction of samples with welding defects // Defektoskopiya. 2012. No. 6, 11-21 p.

8. Nosov V.V., Yarmilova A.R., Zelensky N.A., Matviyan I.V. Assessment of strength and service life of welded structures based on a micromechanical model of acoustic emission under static loading // Deformation and destruction of materials. 2016. No. 11. 38-45 p.

9. O. V. Gusev, Acoustic Emission in Deformation of Single Crystals of Refractory Metals [in Russian], Nauka, Moscow (1982).

10. User's manual for the LOCKTON acoustic emission system // «ELTEST». Moscow. -254 p.

11. Schneider L.A., Kuleshov V.K. Possibility of acoustic emission monitoring of potentially dangerous nodes and sections of the linear part of main oil products // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2002. No. 5. 143-146 p.

12. Sagar R.V. Importance of acoustic emission based b-value in the study of fracture process in reinforced concrete structures // 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-9. May 2016. DOI 10.21012/FC9.040.

13. Ono K. Application of acoustic emission for structure diagnosis // Diagnostyka – Diagnostics and structural health monitoring 2. 2011. pp. 3-17.
14. Chernov D.V. [text]: Development of methods for diagnostics of fatigue cracks using acoustic emission. Topic of thesis and abstract for the Higher Attestation Commission of the Russian Federation 05.11.13, Candidate of Sciences Chernov Dmitry Vitalevich - M., 2018. - 148 p.
15. GOST R 56542-2015: Non-destructive testing. Classification of types and methods [Text]. - 2019 -19.
16. Nosov V. V. N 84 Diagnostics of machines and equipment: textbook. SPb.: Publishing house "Lan", 2012. - 384 p. (Textbooks for universities. Special literature).
17. Nosov V.V., Yamilova A.R. Method of acoustic emission. St. Petersburg: Lan, 2017 – 304.