

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**  
**CONSTRUCTIONS AND ARCHITECTURE**

**Сысоев О. Е.**  
**O. E. Sysoyev**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**AN AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING THE LIMIT STATES OF THE STRUCTURE OF BUILDINGS AND INSTALLATIONS**

**Сысоев Олег Евгеньевич** – кандидат технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8 (4217) 241141. E-mail: fks@knastu.ru.

**Mr. Oleg E. Sysoyev** – PhD in Engineering, Professor, Dean of the Faculty of Civil Engineering and Cadastre, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 27 Lenin Str., Komsomolsk-on-Amur, 681013, phone: +7 (4217) 241-141. E-mail: fks@knastu.ru

**Аннотация:** В статье рассматривается автоматизированная комплексная система мониторинга предельных состояний строительных конструкций, которая позволит гарантировано предотвратить внезапные разрушения зданий и сооружений.

**Summary.** The paper considers an automated integrated system for monitoring limit states of civil engineering structures that will reliably prevent simultaneous failures of buildings and installations.

**Ключевые слова:** предельные состояния конструкций, акустическая эмиссия, циклические нагрузки, автоматизированная система мониторинга.

**Key-words:** limit states of structures, acoustic emission, cyclic loading, automated monitoring system.

УДК 539.3:354.2

Анализируя ряд аварий зданий и сооружений, произошедших в последние годы в России и за рубежом, мы можем констатировать, что все они являются следствием воздействия в большей мере циклических (снеговые, ветровые, движение людских потоков, воздействие оборудования и перемещение материалов) и в меньшей – квазистатических (собственная масса конструкций) нагрузок. Но несмотря на полтора века систематических широкомасштабных исследований циклической усталости конструкций, и сегодня с пугающей частотой происходят обрушения отнюдь не ветхих зданий и сооружений, которые возведены не более 30 лет назад. Яркие примеры катастроф: обрушение покрытий – купола крытого аквапарка «Трансвааль-парк» в г. Москва (2004 г.), Басманного рынка в г. Москва (2006 г.), оптового рынка в г. Калининград (2010 г.), спорткомплекса им. В. А. Алексеева в г. Санкт-Петербург (2011 г.), обрушение моста «Bridge 9340» через р. Миссисипи (2007 г.), моста через р. И провинции Хэнань КНР (2010 г.), разрушение части путепровода на федеральной трассе М-4 «Дон» РФ (2010 г.), обрушение кровли металлического ангара на авиабазе США в Афганистане (2013 г.) и др. Причины катастроф: ошибки при проектировании, отступление от проекта при проведении строительных и ремонтных работ, некорректная замена материалов и изделий, нарушения технологии строительных работ, ненадлежащая эксплуатация, а также износ и усталость материала в конструкции. Во многих случаях истинную причину трудно выявить, т.к. с обрушением связано несколько причин, и какая из них стала последней каплей, трудно определить. Внезапные разрушения происходят по совокупности нескольких причин, наслоившихся друг на друга, а катализатором может стать несущественная мелочь, но после разрушения эта мелочь представляется как главная причина обрушения.

Все здания и сооружения рассчитываются с учетом климатического района строительства и условий работы. Однако существующие методы расчета не обеспечивают дли-

тельную прочность работы конструкции, т.к. не учитывают изменение микроструктуры конструкционного материала от воздействия циклических нагрузок, которое происходит неравномерно и скачкообразно.

Процессы эволюции микроструктуры материала нужно отслеживать путем организации мониторинга предельных состояний конструкций для предотвращения катастроф зданий и сооружений. Требования к мониторингу предельных состояний конструкционных материалов и конструкции уникальных зданий и сооружений [1] предусматривают создание автоматизированных стационарных систем (станций), которые должны:

- проводить комплексную обработку результатов проводимых измерений, анализ изменений параметров строительных конструкций;
- выявлять на ранней стадии тенденции негативного изменения напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, приводящего к аварийной ситуации.

Из известных методов для неразрушающего контроля предельных состояний конструкции, учитывающих образование диссипативных субструктур при деградации микроструктуры материала от воздействия циклических нагрузок в режиме реального времени, хорошо подходит метод акустической эмиссии (АЭ). Сигналы АЭ возникают в материале конструкций от перестроения микроструктуры материала и при образовании и развитии микро- и макротрещин под воздействием как динамических, так и квазистатических нагрузок [2; 3], т.е. все изменения микроструктуры материала наблюдаются в динамике процесса нагружения. Вместе с тем метод АЭ обладает высокой чувствительностью и может регистрировать сигналы АЭ, возникающие от электромагнитных, вибрационных и других воздействий, не связанных с изменением микроструктуры материала, и эта особенность метода АЭ вынуждает организовывать параллельный контроль. Учитывая, что большинство строительных конструкций находится в труднодоступных для визуального наблюдения местах, для дублирующей системы подойдет система видеонаблюдения. Работа комплексной системы мониторинга, основанная на методе регистрации сигналов АЭ с одновременным видеонаблюдением [4], решит проблему безопасной эксплуатации зданий и сооружений.

Для реализации автоматической системы мониторинга и регистрации сигналов АЭ в наиболее ответственных узлах несущих строительных конструкций размещаются пьезоэлектрические датчики. Сигналы АЭ обладают большой информативностью о происходящих процессах в материале и, как следствие, некоторой хаотичностью. При этом регистрация записи и обработки информации сигналов АЭ вызывает определенные трудности. Для обработки такого объема информации требуется длительное время. Даже самая современная вычислительная техника не в состоянии обработать весь объем информации сигналов АЭ в *on-line* режиме, поэтому нужно выделить те параметры сигналов АЭ, которые наиболее четко идентифицируют вхождение конструкционного материала в предельное состояние. Разработанное в КнАГТУ специальное компьютерное обеспечение [5] позволяет устанавливать порог для посторонних шумов и регистрировать непосредственно сигналы, отражающие изменение структуры материала, которая, в свою очередь, характеризует изменения прочностных характеристик конструкции.

Также для уменьшения объема обрабатываемой информации можно сузить спектр частот регистрируемых и подлежащих обработке сигналов. Наиболее информативным является участок от 100 до 400 кГц (см. рис. 1). Сигналы АЭ на этих частотах возникают от процессов формирования микротрещин и их слияния в макротрещину, что является глобально опасным фактором для несущих конструкций [6]. Это позволит уменьшить объем обрабатываемой информации без потери качества результатов.

Регистрируемые сигналы АЭ соответствуют проявлению дефектов структуры материала, а энергия сигналов является отражением степени опасности дефектов, поэтому функция  $\Phi(t)$  линии тренда энергии сигналов АЭ (см. рис. 2) является показателем деградации структуры материала конструкции во времени.

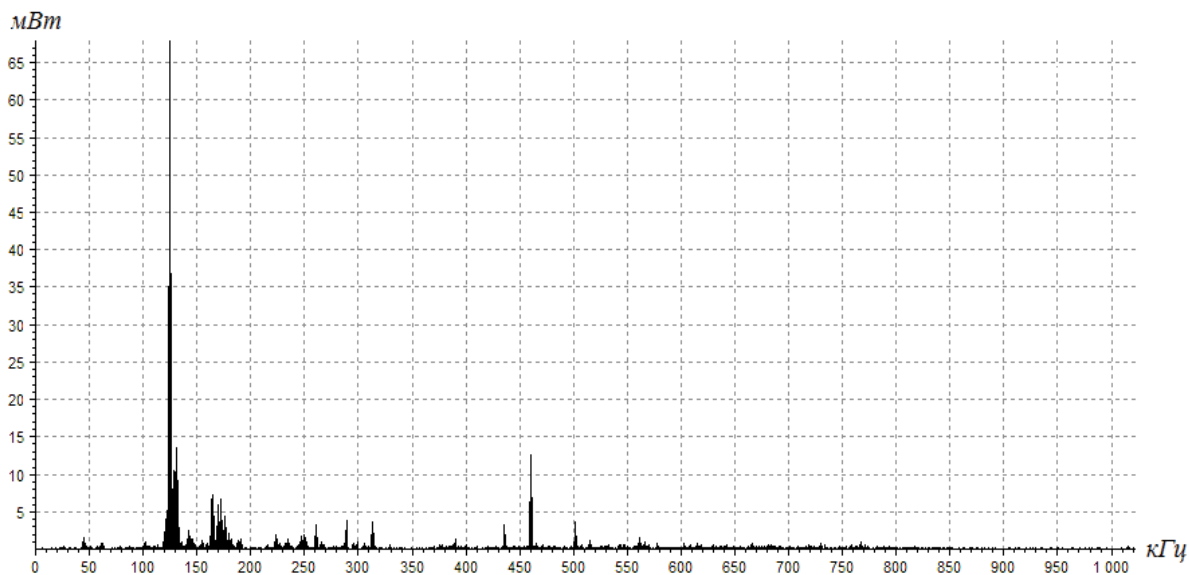


Рис. 1. Диаграмма частотных характеристик сигналов АЭ при циклическом нагружении образца из сплава алюминия Д20

Всплеск АЭ происходит вначале нагружения, затем сигналы АЭ стабилизируются – их энергия становится минимальной. При этом можно заметить минимальную скорость накопления дефектов структурой материала, что является признаком стабильности структуры в этот период времени (примерно с 5-го по 13400-й цикл нагружения на рис. 2).

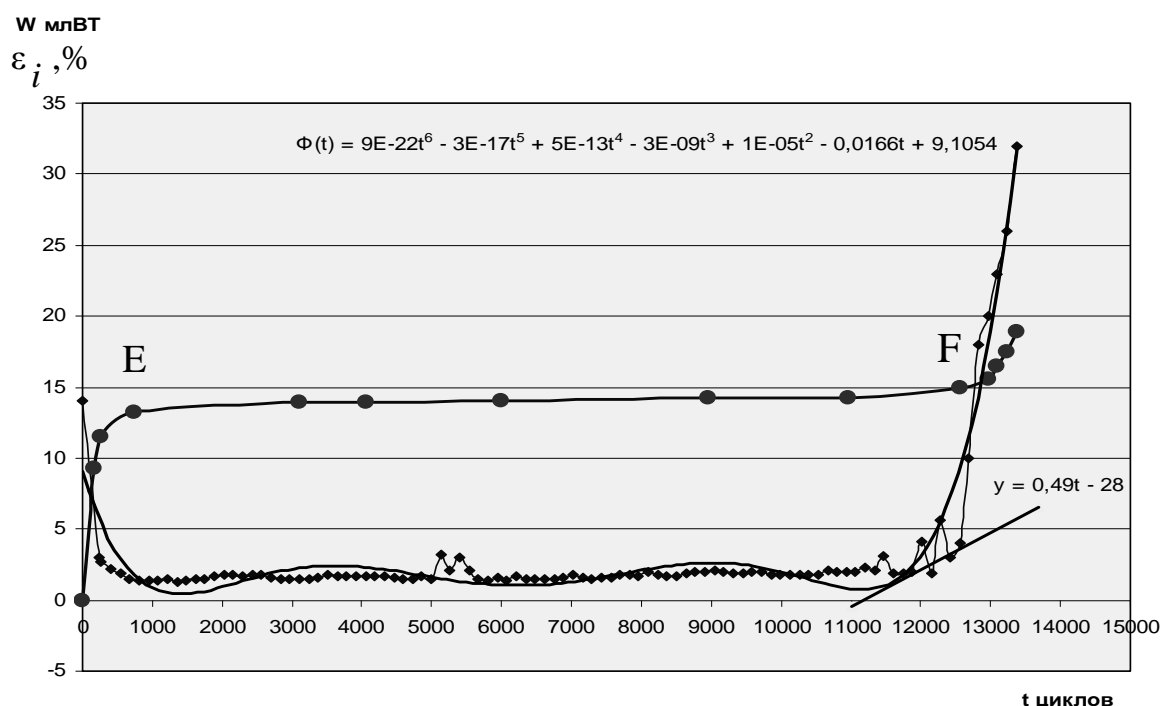


Рис. 2. Совмещенная диаграмма циклической ползучести образца из стали 40Х при  $\omega = 0, \sigma_i = 800 \text{ МПа}$  и энергии АЭ за цикл нагружения и аппроксимирующей линии тренда  $\Phi(t)$

С накоплением усталостных повреждений материала резко увеличивается количество и энергия сигналов АЭ, что соответствует увеличению скорости накопления дефектов струк-

турой материала (на рис. 2 примерно с 13400-го цикла), и материал конструкции приближается к разрушению. Определить этот момент можно, если построить касательную  $y = at + c$  к линии тренда  $\Phi(t)$  в точке увеличения количества и энергии акустических сигналов за цикл нагружения.

Современная вычислительная техника позволяет выполнять эту операцию в режиме реального времени. На рис. 2 касательная  $y = at + c$  в точке увеличения АЭ получена, при этом значение  $a = 0,49$  (скорость накопления дефектов) значительно выше, чем на предыдущем участке. То есть определен момент, когда структура материала больше не может стабильно работать и начинает разрушаться, следовательно, должно выполняться условие

$$\begin{cases} \dot{\hat{O}}(t) \leq a = 0,5 \{t_{n-300}; t_n\}, \\ W_n \leq \tilde{N} \cdot W_1 \end{cases}$$

где  $\Phi(t)$  – функция, аппроксимирующая энергию АЭ;  $a$  – скорость накопления дефектов;  $W_n$  – энергия сигналов АЭ в  $n$ -м цикле нагружения;  $C$  – коэффициент, зависящий от материала;  $W_1$  – энергия сигналов АЭ в первом цикле нагружения.

Условие  $W_n \leq C \cdot W$  принимается из необходимости учитывать случайные перегрузки и может служить критерием при работе ответственных конструкций с небольшим ресурсом.

Критерий минимальной скорости накопления дефектов структурой материала  $\dot{\hat{O}}(t) \leq a = 0,5$  может служить для определения предельных состояний строительных конструкций с длительным сроком эксплуатации, при этом автоматическая обработка параметров сигналов АЭ ведется в интервале  $\{t_{n-300}; t_n\}$  циклов нагружения [5]. На этом принципе разработана комплексная система безопасности несущих конструкций зданий и сооружений (см. рис. 3) [7].

Установка видеокамер позволит отслеживать деформации конструкции с параллельным отслеживанием и обработкой параметров акустических сигналов, с использованием программного обеспечения [4]. Одновременно происходит анализ данных, полученных с камер видеонаблюдения. Изменения геометрических размеров конструкции будут зафиксированы на видеосъемке. Превышение деформации в элементе конструкции сверх расчетной приводит к наступлению второго предельного состояния строительных конструкций и, как следствие, к разрушению.

Устройство системы мониторинга состоит (см. рис. 3 и 4) из пьезоэлектрических датчиков 1, крепящихся к металлической конструкции 10, которые считывают сигналы АЭ, возникшие от действия сосредоточенной нагрузки, распределенной нагрузки или от реакции опор. Далее данные посредством усилителей акустических сигналов 2 отправляются на устройство приема передачи 3. Затем информация поступает в ПЭВМ 4, с помощью программного обеспечения 5 происходит анализ данных [5]. В случае возникновения критического состояния в структуре материала происходит вывод сигнала на панель оператора 6 со звуковым и световым сопровождением об осмотре или эвакуации.

Видеоблок системы состоит из видеокамер 7, расположенных в зонах, наиболее подверженных геометрическим изменениям конструкций. Информация поступает в усилитель видеосигнала 8, после чего отправляется в ПЭВМ 4. С помощью программного обеспечения 9 производится осмотр критических точек в прямом эфире с последующим выводом на панель оператора 6 [4].

При возникновении критически опасной ситуации данная система обеспечит своевременную реакцию на возникшую чрезвычайную ситуацию и эвакуацию людей.

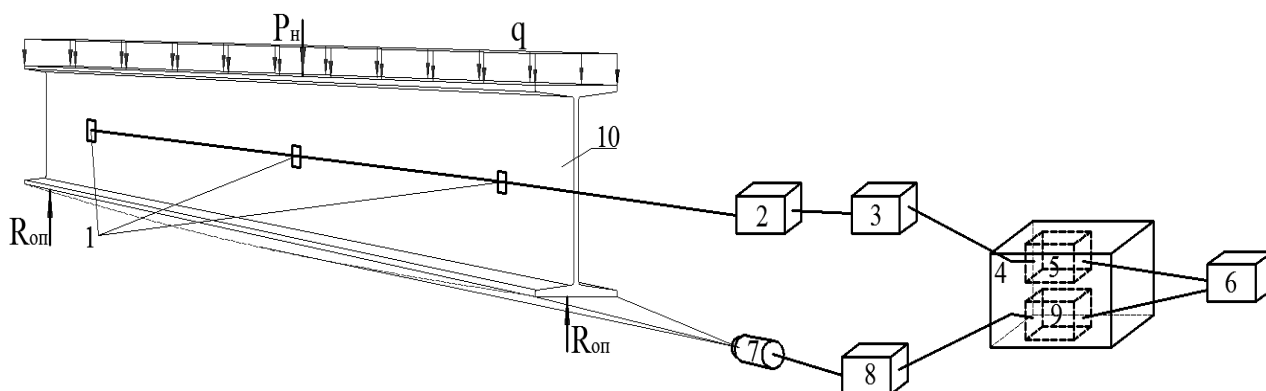


Рис. 3. Принципиальная схема работы комплексной системы:

- 1 – пьезоэлектрические датчики; 2 – усилитель акустических сигналов; 3 – устройство приема передачи; 4 – ПЭВМ; 5 – программное обеспечение для регистрации и обработки сигналов АЭ [5]; 6 – панель оператора; 7 – видеокамера; 8 – усилитель видеосигнала; 9 – программное обеспечение для дистанционного измерения перемещений [4]; 10 – металлическая конструкция;  $P_n$  – сосредоточенная нагрузка;  $R_{оп}$  – опорная реакция,  $q$  – распределенная нагрузка

Предлагаемая система контроля позволит:

- заблаговременно выявить предельные состояния конструкции материала по параметрам АЭ;
- с помощью видеонаблюдения классифицировать степень опасного состояния в труднодоступных местах;
- установить, превысят ли фактические деформации конструкций предельно допустимые по нормативным документам;
- принять решение о дальнейшей эксплуатации, усилении или демонтаже несущих конструкций зданий и сооружений.

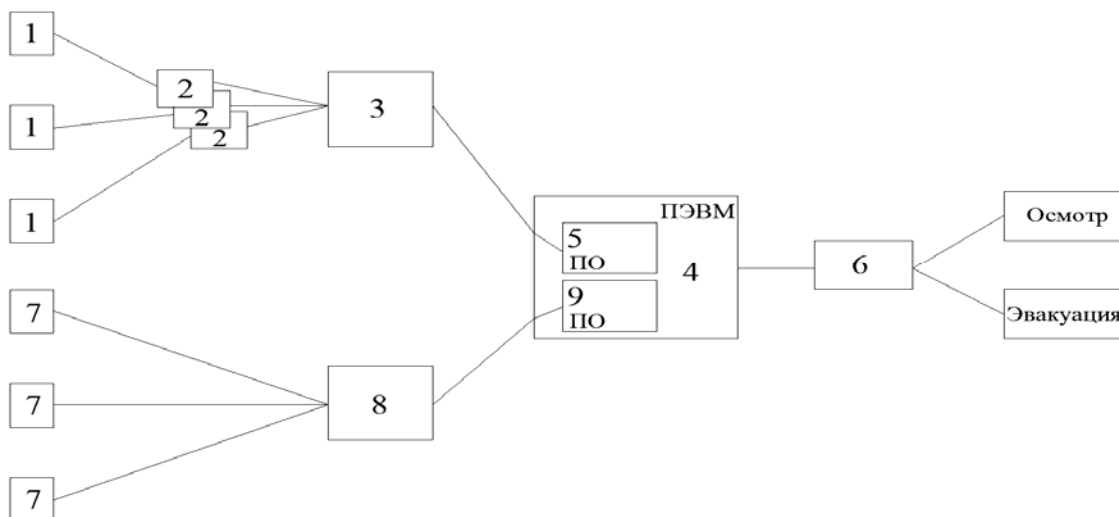


Рис. 4. Блок-схема комплексной системы контроля предельных состояний строительных конструкций

Применение системы комплексной безопасности позволит прогнозировать и надежно предотвращать внезапные разрушения зданий и сооружений.



**ЛИТЕРАТУРА**

1. ГОСТ Р 53778-2010. НСРФ. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2010. – 66 с.
2. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А. Н. Серьёзов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьёв и др.; под ред. Л. Н. Степановой, В. В. Муравьёва. – М.: Машиностроение, 2004. – 368 с.
3. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н. А. Семашко, В. И. Шпорт, Б. Н. Марьин и др.; под общ. ред. Н. А. Семашко. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
4. Программное обеспечение для дистанционного измерения перемещений «Photodim 2D v1.0» (ПО «Photodim 2D v1.0») / В. А. Дзюба, О. Е. Сысоев, А. В. Меньков, А. Л. Ковалёв // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2011617204 2011 г.
5. Сысоев, О. Е. Определение предельного состояния конструкционных материалов on-line (ОПСКМ-2012) / О. Е. Сысоев, А. В. Меньков, Е. А. Кузнецов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2012613409 2012 г.
6. Сысоев, О. Е. Новые критерии предельных состояний конструкционных материалов, определяемые по параметрам акустической эмиссии // Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – № 9. – С. 43-47.
7. Решение о выдаче патента на полезную модель ФС по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) от 19.09.2012 № 2012129793/28(046830) / Сысоев О. Е., Квачан Е. Е., Марьин Б. Н. Система комплексной безопасности эксплуатации конструкций зданий и сооружений; заяв. 13.07.2012.