Разработка акустико-эмиссионной системы для мониторинга состояния гидротехнического сооружения

У.Т. Ашрапов[*1], И.И. Садиков[1], Ш.М. Махкамов[1], Б.Б. Мирзаев[1], А.Г. Естифеева[2]

[1] Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, ул. Хуросон, 1 ,100214, Ташкент, Узбекистан
[2] АО «Гидропроект», ул. Бобура, 20, 100022, Ташкент, Узбекистан

Получена 15.10.2021

* Corresponding author: e-mail ashrapov@inp.uz, Phone: +98712893118, Fax: ++98712893118

В работе приведены исследования по разработке, изготовлению, градуировке и испытанию акустико-эмиссионной (АЭ) системы для неразрушающего контроля и мониторинга состояния бетонных конструкций гидротехнических сооружений. АЭ система содержит: четыре АЭ пьезодатчика, процессорный блок, состоящий из промышленного компьютера, модуля счетчиков СЧМ-16 и программного обеспечения для сбора и обработки АЭ данных, клавиатуры и монитора. Проведена градуировка пьезоэлектрического детектора АЭ системы на полосе частот от 45 кГц до 75 кГц и от 95 кГц до 125 кГц по АЭ спектру дефектообразования в образце монокристаллического кремния, гамма-облученного источником ионизирующего излучения ^{60}Co дозой $\geq 1\times10^{8}$ Рад. Проведены лабораторные испытания АЭ системы на бетонных стендах и получены АЭ спектры трещинообразования. При помощи АЭ системы определены трехмерные координаты x, y, z развивающейся трещины в бетонных образцах.

Ключевые слова: пьезодатчик, системный блок, блок анализа данных, бетонный стенд, трещина, АЭ спектр.

The paper presents the results of research on the development, manufacture, calibration and testing of acoustic emission (AE) system for non-destructive control and monitoring of the states of concrete structures of hydrotechnical structures. AE system contains four AE piezoelectric sensors, a processing unit, consisting of industrial computer, module of counters SCHM-16, software for collection and processing of AE data, keyboard and monitor. The piezoelectric detector of the AE system was calibrated in a frequency bands from 45 kHz to 75 kHz and from 95 kHz to 125 kHz according to the obtained AE spectrum of defect formation in a sample of monocrystalline silicon gamma-irradiated by ionizing radiation source ^{60}Co with dose of $\geq 1\cdot10^{8}$ Rad. Laboratory tests of acoustic emission systems on concrete stands was conducted and the AE spectra of cracking were obtained. Using the AE system the three-dimensional coordinates x, y, z of developing cracks in concrete blocks are determined.

Keywords: piezosensor, system unit, data analysis unit, concrete stand, crack, AE spectrum.

DOI: https//doi.org/10.52304/.v23i3.270

I. Введение

В Узбекистане эксплуатируются свыше 60 гидротехнических сооружений (ГТС). С течением времени основная часть элементов ГТС изнашивается, что требует пристального внимания и возникает острая необходимость комплексного мониторинга их безопасного состояния. Обеспечение безопасной и надежной работы ГТС является важнейшей задачей, направленной на обеспечение экономической, социальной и экологической

безопасности в глобальном масштабе. Поэтому проведение научных исследований по разработке методов и приборов по мониторингу состояния ГТС приобретает актуальное значение.

II. Описание объекта и методов исследования

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод является высокочувствительным методом неразрушающего контроля для определения трещин в металлических и бетонных конструкциях [1, 2]. В бетонном объекте ГТС источниками акустической эмиссии являются локальные области, в которых при образовании и росте трещины происходит динамическая перестройка структуры материала в виде пластической деформации и фазовых превращений с образованием АЭ сигналов [3].

Цель исследования – разработка, изготовление, градуировка и испытание АЭ системы для определения трехмерных координат развивающихся дефектов и трещин в бетонных конструкциях гидротехнических сооружений.

АЭ система содержит: четыре АЭ пьезодатчика (ПАЭ), процессорный блок (компьютер, модуль счетчиков СЧМ-16, программное обеспечение для сбора и обработки АЭ данных, клавиатуру) и монитор (рис. 1).

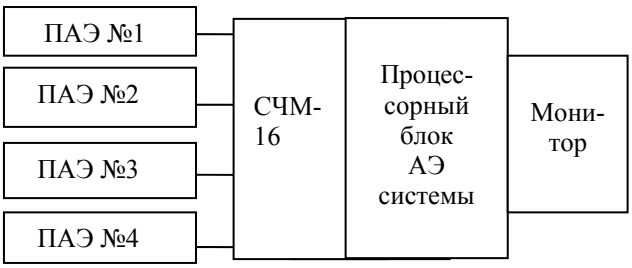


Рисунок 1. Функциональная схема АЭ системы: ПАЭ (пьезодатчики) №1, №2, №3, №4, процессорный блок с модулем счетчика СЧМ-16, монитор.

II.1. Разработка и изготовление пьезодетектора АЭ системы

В АЭ системе чувствительным элементом ПАЭ является поляризованная пьезокерамика ЦТС-19 – твердый раствор титаната свинца и цирконата свинца с общей формулой $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$. Принцип работы ЦТС-19 основан на пьезоэлектрическом эффекте, заключающемся в преобразовании механических колебаний в электрические [4]. Основные физические характеристики ЦТС-19, полученные экспериментальным путем по методике, описанной в работе [5], приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные физические характеристики пьезокерамики типа ЦТС-19.

Физические характеристики пьезокерамики ЦТС-19	Значения
Частотная постоянная, k_h, кГц·мм	1650
Плотность, 10^3 кг/м^3	7.40
Пьезомодуль, 10^{-12} Кл/Н: d_{33}, d_{31}	250, 120
Диэлектрическая проницаемость ε_{33}, 10^{-11} ф/м	1551
Коэффициент электромеханической связи k_{33}	0.4
Пьезоконстанта e_{33}, Кл/м^2	16
Пьезоконстанта деформации h_{33}, 10^9 В/м	12
Модуль Юнга E', 10^{11} Па	0.7
Коэффициент Пуассона	0.33

Экспериментально определено, что для изготовления чувствительного элемента ПАЭ наиболее целесообразным является использование пьезокерамики ЦТС-19 в форме диска (∅=16 мм, h=8 мм), который обеспечивает резонансный режим работы ПАЭ при увеличении амплитуды АЭ сигналов при наиболее высокой чувствительности $\sim 1.0\times10^{-3}$ В/Н.

Рабочую частоту ПАЭ выбирали, исходя из условий шумов и затухания АЭ сигнала в исследуемом бетонном объекте. Коэффициент электроакустического преобразования ПАЭ не меняется более чем на 3 дБ в измеряемом диапазоне температур. Разброс коэффициентов преобразования ПАЭ для партии преобразователей, используемых при контроле бетонного объекта, не превышает 3 дБ. Максимальная длина коаксиального кабеля, соединяющего предусилитель с АЭ системой составляет 150 м, потеря сигнала в кабеле не превышает 1 дБ на 30 м длины кабеля, а электрическая емкость не превышает 30 пФ/м.

В АЭ системе внешние помехи обусловлены электромагнитными воздействиями непосредственно на элементы электронной аппаратуры ПАЭ и пьезокерамику, а также мешающими акустическими и механическими воздействиями на бетонный объект и ПАЭ. Для подавления мешающих акустических помех использовали их отличие от

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

регистрируемых сигналов по спектральным, амплитудным и временным характеристикам. В АЭ системе используется регистрация сигналов по амплитудному анализу, который из общего сигнала позволяет легко подавить (срезать) ложные сигналы дискриминатором, объединенным с предварительным усилителем. Поскольку окружающий шум ограничен сверху частотами порядка 50–100 кГц [6], устранение низкочастотных составляющих позволило существенно ограничить прохождение на регистратор ложных сигналов, связанных с шумами.

С распространением АЭ сигнала на расстояние сильно уменьшается высокочастотная составляющая АЭ сигнала, что было учтено при выборе полосы пропускания предварительного усилителя, т.е. была выбрана полоса пропускания АЭ сигнала в интервале частот от 100 кГц до 500 кГц. Если пьезокерамика нагружена на активное сопротивление усилительного каскада $R_{вх}$, то дисперсия шума устраняет пропорционально активную составляющую импеданса электрической цепи из параллельно включенных $Z_{пп}$ и $R_{вх}$.

При малых по сравнению с $\mathrm{Re}[Z_{пп}(\omega)]$ значениях входного сопротивления усилителя среднеквадратичное значение шумового напряжения на его входе пропорционально $\sqrt{R_{вх}}$, а напряжение сигнала – R. Поэтому стремились повысить входное сопротивление усилителя до значения ~2 МОм, при этом шунтированием пьезокерамики входной цепью усилителя можно было пренебречь, т.к. среднеквадратичные значения уровня шума, приведенного к входу предварительного усилителя, при полосе пропускания в сотни килогерц составляют порядка единиц микровольт.

С учетом указанных выше требований был разработан предварительный усилитель АЭ сигнала с использованием во входном каскаде малошумящей микросхемы КР544УД2. Усиленный по напряжению АЭ сигнал пропускался через фильтр, имеющий полосу пропускания от 45 кГц до 300 кГц, и дополнительно усиливался с помощью усилителя, собранного на микросхеме типа КР544УД2. С выхода усилителя сигнал подается на вход дискриминатора, выполненного на микросхеме КР544СА3.

Технические характеристики предусилителя ПАЭ показаны в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики предусилителя ПАЭ АЭ дефектоскопа.

Наименование показателя	Значение
Коэффициент усиления	60 дБ
Полосовой фильтр	95кГц–125кГц 45кГц–75кГц
Напряжение питания	±12 В
Потребляемый ток	+40 мА
Неравномерность АЧХ в пределах частотного диапазона, не более	±3 дБ
Ослабление сигнала при расстройке на октаву относительно граничных частот, не менее	30 дБ
Эффективное значение напряжения собственных шумов, не более	5 мкВ

Конструкционная схема пьезодетектора ПАЭ показана на рис. 2.

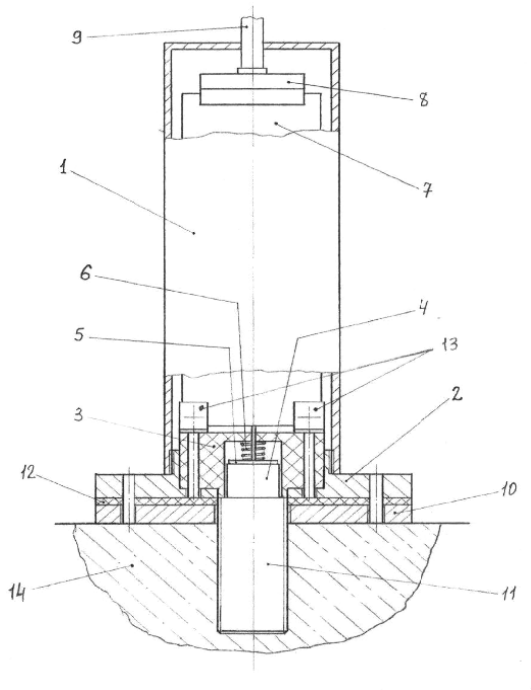


Рисунок 2. Конструкционная схема пьезодетектора ПАЭ: 1 – корпус; 2 – диск-основание; 3 – электроизоляционная втулка; 4 – пьезоэлемент; 5 – диск токопроводящего стержня; 6 – пружина; 7 – плата электроники для микросхем предварительного усилителя, дискриминатора и формирователя импульсов; 8 – разъем; 9 – кабель; 10 – фланец крепежного элемента; 11 – резьбовая шпилька крепежного элемента, 12 – резиновая прокладка, 13 – уголок, 14 – бетонный объект ГТС.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

В АЭ системе дискриминатор нижнего уровня имеет регулируемый порог и отсекает шумы предусилителя, а также преобразует синусоидальный сигнал в импульсный, а формирователь импульсов обеспечивает формирование выходных импульсов с длительностью 2 мксек. Усилитель и дискриминатор смонтированы на печатной плате, размещенной непосредственно внутри корпуса пьезодатчика. Электрическое питание (±12 В) предварительного усилителя с дискриминатором осуществляется от отдельного блока питания. Выходной сигнал с ПАЭ передается через блок преобразования в компьютер.

ПАЭ АЭ системы крепится на объект бетонной конструкции при помощи стационарного цилиндрического звукопровода (L=50мм, Ø=20мм) с фланцем (Ø=65мм).

II.2. Разработка и сборка процессорного блока АЭ системы

Процессорный блок АЭ системы был разработан на основе промышленного компьютера PEAK 602VL (NEXCOM, Тайвань) и модуля счетчиков СЧМ-16 (ЗАО «НПЦ «АСПЕКТ», Россия).

Плата счетчиков СЧМ-16 устанавливается в процессорный блок компьютера. Модуль счетчика СЧМ-16 подсчитывает количество импульсов, пришедших на каждый счетный канал, или определяет интенсивности поступающих импульсов с помощью встроенных таймеров. Управление модулем счетчиков СЧМ-16 и чтение результатов накопления производится с помощью компьютерной программы.

II.3. Градуировка АЭ системы

Для предварительной настройки АЭ системы был использован метод относительной градуировки ПАЭ, основанный на коррозии металлов под напряжением [7].

В работе [8] описан процесс коллективного отрыва дислокаций от точки закрепления, который сопровождается образованием АЭ сигналов. В работе [9] показано, что при гамма-облучении в кремнии формируется ячеистая микроструктура, которая в интервале дозы 10^6–10^9 Рад становится нестабильной, и после прекращения облучения определенное время излучает АЭ волны. Для градуировки АЭ системы были использованы образцы монокристаллического кремния в форме призматических стержней с размерами 1.0×3.0×35 мм и 1.2×4.1×28.7 мм, которые облучали гамма-квантами источника ионизирующего излучения (ИИИ) Co-60 на гамма-установке ИЯФ АН РУз при поглощенных дозах $\geq 1\times10^8$ Рад. Образцы кремния после проведения гамма-облучения фиксировали на пьезодетекторе ПАЭ АЭ системы и измеряли АЭ спектр дефектообразования [10]. АЭ спектр гамма-облученного монокристаллического кремния дозой $\geq 1\times10^8$ Рад показан на рис. 3.

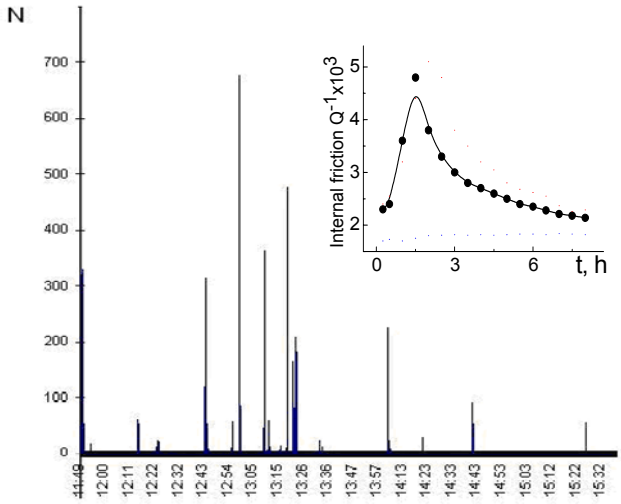


Рисунок 3. Акустико-эмиссионный спектр гамма-облученного образца кремния дозой $\geq 1\cdot10^8$ Рад. *N* – число импульсов в секунду. На вставке показана временная зависимость внутреннего трения (Q^{-1}) гамма-облученного образца кремния дозой $\geq 1\times10^8$ рад.

В гамма-облученном образце монокристаллического кремния в течение длительного времени возникают АЭ сигналы, которые регистрируются ПАЭ, использованного нами для настройки АЭ системы [11].

III. Описание и анализ результатов

Экспериментальные исследования детектирования АЭ сигналов трещинообразования в образцах бетонных стендов проводили в лабораторных условиях. В качестве образцов стендов использовали бетонные блоки размерами 380×130×50 мм. Каждый бетонный образец содержал 3 отверстия (∅=40 мм), расположенных на одной половине бетонного блока, а на второй половине бетонного блока были установлены ПАЭ (рис. 4). Для создания источника АЭ в данных образцах использовали сухие деревянные бруски (∅ = 40 мм, h = 55 мм), которые были

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

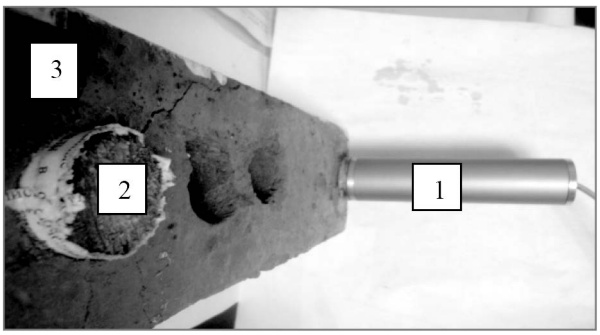


Рисунок 4. Образец бетонного стенда (3), ПАЭ АЭ системы (1) и деревянный брусок (2).

плотно установлены в отверстия бетонного блока и погружались в воду. Впитывание влаги сухими деревянными брусками приводило к их набуханию и, вследствие этого, к деформированию бетонного блока (рис. 4), сопровождавшемуся трещинообразованием и возникновением АЭ сигналов, которые регистрируются ПАЭ АЭ системы, а на мониторе компьютера возникает АЭ спектр трещинообразования (рис. 5).

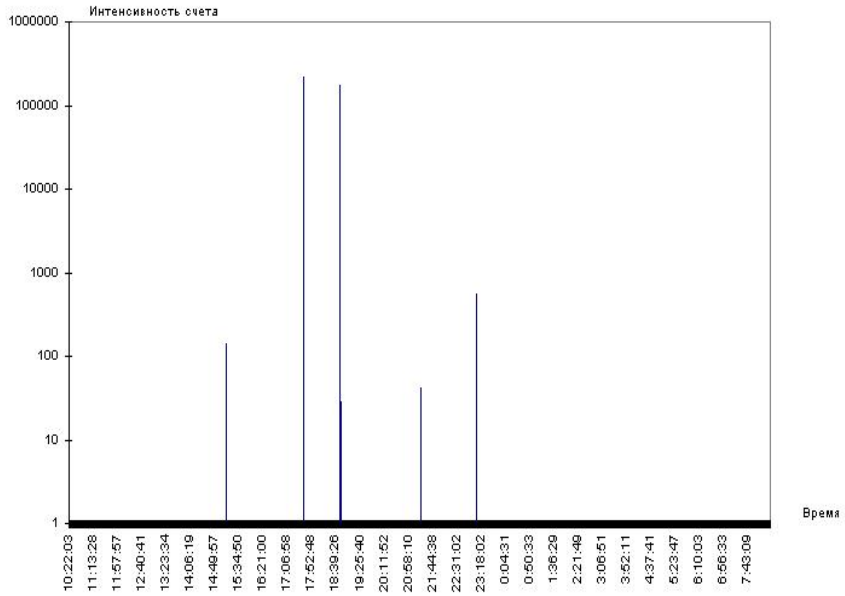


Рисунок 5. Акустико-эмиссионный спектр образования трещины в бетонном образце в режиме реального времени.

Для АЭ системы была разработана компьютерная программа по определению координат *x*, *y*, *z* развивающейся трещины в бетонных образцах, а также были проведены предварительные испытания по определению координат *x*, *y*, *z* развивающейся трещины в бетонном образце [8].

IV. Заключение

Разработан и изготовлен опытный образец высокочувствительной АЭ системы с пьезодатчиками ПАЭ, имеющий коэффициент усиления 58 дБ, полосу пропускания от 45 КГц до 300 кГц, регулируемый уровень дискриминации 1–50 мВ. Процессорный блок имеет модуль счетчиков СЧМ-16 для сбора и анализа АЭ данных. Получены АЭ спектры трещинооообразования в образцах бетонных стендов. Разработана компьютерная программа для определения координат *x*, *y*, *z* развивающейся трещины в бетонных образцах.

Благодарности. Работа была выполнена при финансовой поддержке проекта ГНТП ФА-А14-Ф070.

Авторы выражают благодарность Т. Хайдарову и Ю.Н. Каримову за помощь при проведении экспериментальных исследований и обсуждение результатов.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

Метаданные

Development of an acoustic emission system for monitoring the states of hydrotechnikal structure

U.T. Ashrapov[1], I.I. Sadikov[1], SH.M. Makhkamov[1], B.B. Mirzaev[1], A.G. Estifeeva[2]

[1]Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of Uzbekistan, Khurasan st., 1, 100214, Tashkent, Uzbekistan
[2]JSC "Hydroproject", Bobur st. 20, 100022, Tashkent, Uzbekistan

The paper presents the results of research on the development, manufacture, calibration and testing of acoustic emission (AE) system for non-destructive control and monitoring of the states of concrete structures of hydrotechnical structures. AE system contains the four AE piezoelectric sensors, a processing unit, consisting of industrial computer, module of counters SCHM-16, software for collection and processing of AE data, keyboard and monitor. The piezoelectric detector of the AE system was calibrated in a frequency band from 45 kHz to 75 kHz and from 95 kHz to 125 kHz according to the obtained AE spectrum of defect formation in a sample of monocrystalline silicon gamma-irradiated by ionizing radiation source ^{60}Co with dose of $\geq 1 \cdot 10^8$ Rad. Laboratory tests of acoustic emission systems on concrete stands was conducted and the AE spectra of cracking were obtained. Using the AE system the three-dimensional coordinates *x*, *y*, *z* of developing cracks in concrete blocks are determined

Keywords: piezosensor, system unit, data analysis unit, concrete stand, crack, AE spectrum

Литература (References)

[1] Y. Tinghu and E.J.Barry. Acoustic emission testing on large structures. Mesurement+Control **37,** 168 (2004).
[2] L.A. Oglezneva. Comparative characteristics of acoustic emission systems. Bulletin of Science of Siberia **1**, 211 (2011).
[3] S. Ranganayakulu, B. Samrat Goud, P. Sastry, B. Ramesh Kumar. Calibration of acoustic emission system for materials characterization. Universal Journal of Materials Science **3**, №4, 62 (2015).
[4] I.A. Glozman. Piezoceramic (Energiya, Moscow, 1972).
[5] V.M. .Baranov. Acoustic measurements in nuclear power engineering (Energoatomizdat, Moscow, 1990).
[6] V.M. .Baranov, A.I. Gritsenko et al. Acoustic diagnostics and control at the enterprises of the fuel and energy complex (Nauka, Moscow, 1998).
[7] V.M. .Baranov, T.V/ Gubina. About calibration of acoustic emission equipment. Defectoscopy **5**, 91 (1988).
[8] F.R. Breckenridge, G.E. Tschiegg, M. Greenspan. Acoustic emission: some application of Lamb's problem. J. Acoust. Soc. Amer. **57**, No. 3, 626 (1975).
[9] G.A. Malygin, Processes of self-organization of dislocations and plasticity of crystals. Advances in Physical Sciences **169**, 979 (1999).
[10] U.T. Ashrapov, G.R. Alimov, K.D. Salyamova, A.G. Estifeeva. Development of an acoustic emission system to control the formation of cracks in concrete structures of hydraulic structures. II All-Russian Scientifik and Practical Conference. Current Trends and Prospects for the Development of Hydrometeorology in Russia. ISBN 978-5-9624-1747-9 107 (Russia, Irkutsk State University, 2019)
[11] T. Khaydarov, I.Kh. Abdukadyrova, Yu.N. Karimov, U.T. Ashrapov. Ispol'zovanie signala akusticheskoy emissii obluchennogo kremniya dlya nastroyki defektoskopov v stroitel'noy tekhnike.Nanotekhnologii v stroitel'stve **2**, No.5, 74 (2010)

Гидротехник иншоатлар холатини мониторинг қилиш учун акустик-эмиссион системасини ишлаб чиқариш

У.Т. Ашрапов[1], И.И. Садиков[1], Ш.М. Махкамов[1], Б.Б. Мирзаев[1], А.Г. Естифеева[2]

[1] Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Ядро физикаси институти, Хуросон кўчаси, 1, 100214, Тошкент, Ўзбекистон
[2] «Гидропроект» Акционерлик Jамияти, Бобур кўчаси, 20, 100022, Ташкент, Ўзбекистон

Мақолада гидротехник иншоатлари бетон конструкцияларини путур етказмай текшириш ва мониторинг қилиш учун акустик эмиссион системасини ишлаб чиқариш, ясаш, градуировкалаш ва синаш тадқиқотлари келтирилган. АЭ система куйидагилардан таркиб топган: 4 дона АЭ пьезодатчиклари, процессор блоки, саноат компьютери, СЧМ-16 ҳисоблаш модули ва АЭ кўрсаткич-ларини йиғиш ва қайта ишлаш учун программа таъминоти, клавиатура ва монитор. АЭ системасининг пъезоэлектрик детекторини градуировкаси 45 кГц дан 75 кГц гача ва 95 кГц дан 125 кГц гача частоталар оралиғида монокристалл кремнийни гамма-нурлари дозаси $\geq 1 \times 10^8$ Рад бўлган ^{60}Co ионлаштирувчи нур манбаси билан нурлатишда дефектлар ҳосил бўлиш жараёнининг АЭ спектрини ўлчаш ёрдамида калибровка қилинди. Лаборатория шароитида АЭ системасини бетонли стендларда синаш ишлари бажарилди ва ёриқлар ҳосил бўлишининг АЭ спектрлари олинди. АЭ системаси ёрдамида бетон блоклари намуналаридаги ёриқлар ҳосил бўлишини x, y, z координаталари аниқланди.

Калит сўзлар: пьезодатчик, процессор, блок анализа данных, бетон конструкциялари, ёриқлар, АЭ спектри

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.