

РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ОБЛАСТЕЙ В АРМИРОВАННОМ БЕТОНЕ В УСЛОВИЯХ ИЗГИБА

© 2019 г. Т.В. Фурса^{1,*}, М.В. Петров^{1,**}, Д.Д. Данн^{1,***}

¹Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: *fursa@tpu.ru; **mvp17@tpu.ru; ***dddann@tpu.ru

Поступила в редакцию 19.10.2018; после доработки 28.12.2018;
принята к публикации 11.01.2019

Приведены результаты исследования пространственного изменения параметров электрического отклика на слабое ударное воздействие в условиях поэтапного нагружения бетонных балок, армированных стальной арматурой. В качестве диагностических параметров, характеризующих наличие дефектной области в армированных балках, предложено использовать максимальный коэффициент корреляции спектра электрического сигнала после поэтапного нагружения с исходным спектром, частотное смещение, при котором наблюдается максимальный коэффициент корреляции, коэффициент корреляции спектра сигнала на текущем этапе нагружения со спектром сигнала на предыдущем, центр тяжести спектра. Предложенный метод может быть использован для определения места расположения дефектной области в армированном бетоне в условиях изгиба.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, электрический отклик на ударное воздействие, армированный бетон, дефектная область, поэтапное нагружение на изгиб.

DOI:10.1134/S0130308219040067

ВВЕДЕНИЕ

Разрушение материалов на основе цемента является очень важным вопросом, так как структурная целостность инженерных сооружений имеет важное значение для обеспечения безопасности как инфраструктуры, так и людей. По объему использования в различных областях строительства железобетон находится на одном из первых мест. Это определяется прежде всего его сравнительно дешевой и долговечностью. Конструкции из армированного бетона часто эксплуатируются при изгибе, поэтому их поведение в данном состоянии широко изучается в литературе. В процессе длительной эксплуатации в естественных условиях происходит их постепенное разрушение. Поэтому существует необходимость разработки методов контроля с целью обеспечения безопасной эксплуатации инженерных конструкций и сооружений. В прошлом было предложено большое количество методов, позволяющих определять повреждения в бетоне: акустической эмиссии [1, 2], электрической и электромагнитной эмиссии [3, 4], импакт-эхометоды [5, 6], ультразвуковые и лазерные [7—10], импедансные [11, 12] и др. Наряду с этими методами разрабатывается метод оценки повреждения бетона, основанный на характеристиках электрического отклика, возникающего в бетоне в результате слабого механического воздействия [13, 14].

На практике существует необходимость контроля элементов конструкций со стороны, противоположной той, на которой происходит активное разрушение в процессе эксплуатации. Наиболее ярким примером такой ситуации является контроль железобетонных балок перекрытия мостов через реки. В этом случае на начальных этапах разрушения будут появляться и развиваться трещины с нижней стороны балок перекрытия моста. Такого типа разрушения являются проблемными с точки зрения их контроля, в некоторых случаях даже визуального. В данной работе приведены результаты исследований по поиску диагностических критериев, позволяющих определять место расположения дефектной зоны, формирующейся в армированном бетоне при изгибе. Для этих целей было проведено пространственное сканирование армированных бетонных балок в условиях поэтапного испытания на изгиб.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования были проведены на лабораторных моделях армированного бетона в условиях поэтапных механических испытаний на изгиб. Для этого согласно ГОСТ 7473—2010 были изготовлены бетонные балки размером 100×100×400 мм, содержащие арматурный каркас из четырех стальных стержней диаметрами 6 и 8 мм. Соотношение цемент/песок/крупный заполнитель было 1 : 2 : 4 с максимальным размером заполнителя 20 мм, водно-цементное отношение — 0,5.

Испытание на изгиб проводили на испытательной машине С090PN155 фирмы Matest с постоянной скоростью, равной 0,08 кН/с. Наряду с нагружением образцов в прессе с постоянной скоростью дополнительно через каждые 5-10 с боковую поверхность образца подвергали слабому импульсному механическому воздействию с помощью электромеханического ударного устройства с нормированной силой удара. С помощью дифференциального емкостного датчика регистрировали электрический отклик на это воздействие. Более подробно конструкция и достоинства дифференциального датчика, а также методика обработки и анализа электрических откликов изложены в [13].

На рис. 1 приведены схематическая иллюстрация армированной бетонной балки, конфигурация расположения арматуры и указаны все основные геометрические размеры. По описанной выше методике армированные балки были подвергнуты поэтапному нагружению с возрастанием на каждом последующем этапе максимальной нагрузки на 10 кН. После каждого этапа при последовательном смещении точки удара по центральной линии вдоль длины балки проводилось сканирование с помощью выносного измерительного зонда. Шаг сканирования составлял 3 см.

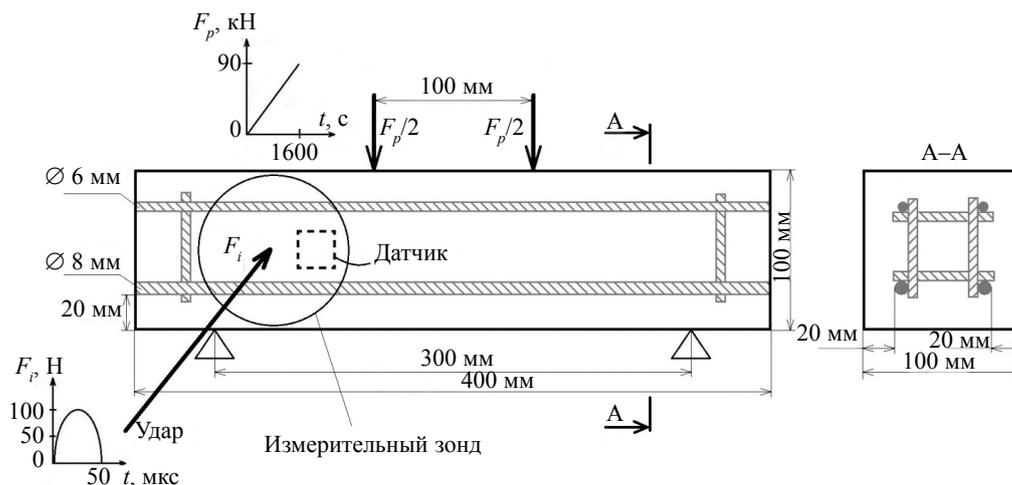


Рис. 1. Схема испытания балок на изгиб.

С целью выявления основных закономерностей связи электрического отклика с развитием в балках зон разрушения и их расположением был проведен сравнительный анализ пространственного изменения различных параметров электрического отклика. Были проанализированы такие параметры, как нормализованная относительно максимального значения спектральная плотность энергии, максимальный коэффициент корреляции спектра электрического сигнала после поэтапного нагружения с исходным спектром, частотное смещение, при котором наблюдается максимальный коэффициент корреляции, коэффициент корреляции спектра сигнала на текущем этапе нагружения со спектром сигнала на предыдущем, центр тяжести спектра. Некоторые из этих параметров были использованы для определения стадий напряженно-деформированного состояния при изгибе армированного бетона [14].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Были проведены исследования параметров электрического отклика на ударное воздействие при поэтапном изгибе бетона, армированного стальной арматурой. На начальном этапе рассмотрены результаты трансформации спектрального состава электрических откликов. На рис. 2 приведены двумерные карты по четырем этапам из девяти, иллюстрирующие характер изменения нормализованной спектральной плотности мощности в процессе изгиба. Видно, что при нагрузках 40, 60 и 90 кН наблюдается значительная трансформация спектров в процессе нагружения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что спектральные характеристики электрического отклика несут информацию о процессах разрушения армированного бетона в условиях изгиба.

На практике некоторые изделия (например, балки перекрытий) начинают разрушаться со стороны, которая недоступна для контроля. Поэтому в рамках данной работы нами подробно проана-

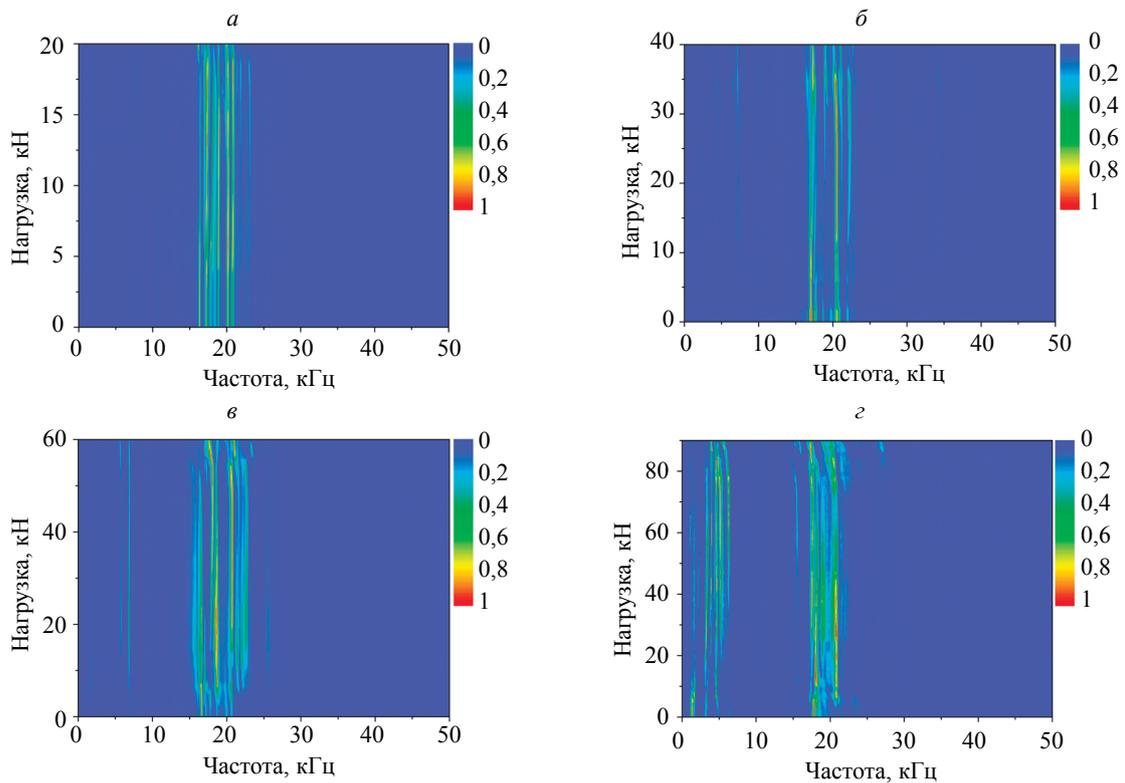


Рис. 2. Карты нормализованной спектральной плотности мощности электрического сигнала в процессе поэтапного изгиба до нагрузки: 20 кН (а); 40 кН (б); 70 кН (в); 90 кН (г).

лизированы результаты сканирования с противоположной от зоны активного разрушения стороны в условиях изгиба. Было проведено поэтапное нагружение бетонной балки вплоть до девятого этапа, когда произошло значительное прорастание трещин в зоне растянутого бетона, но не была потеряна целостность изделия. Визуально верхняя поверхность балки после девяти этапов нагружения не претерпела никаких видимых нарушений, на нижней образовались две трещины на расстоянии порядка 11-14 и 26-29 см от края образца. На девятом этапе эти трещины проросли вглубь образца на 6-7 см. В остальных зонах нижней поверхности балки видимых трещин не выявлено.

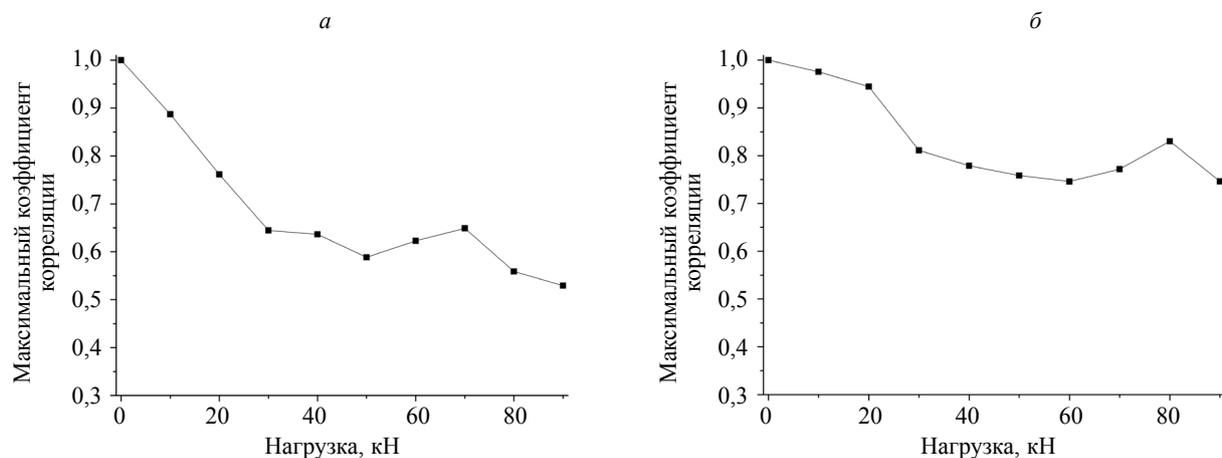


Рис. 3. Изменение максимального коэффициента корреляции в процессе поэтапного нагружения на изгиб в двух точках сканирования.

На рис. 3 приведено поэтапное изменение максимального коэффициента корреляции, а на рис. 4 — смещение по частоте, при котором наблюдался максимальный коэффициент корреляции (частотное смещение). На этом и всех последующих графиках фрагмент а соответствует

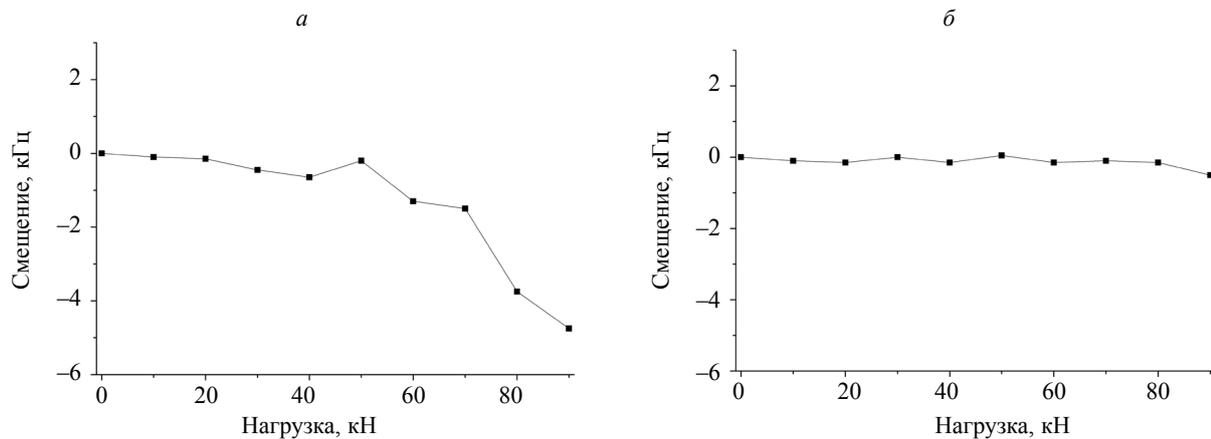


Рис. 4. Изменение частотного смещения в процессе поэтапного нагружения на изгиб для точек сканирования, соответствующих дефектной (а) и бездефектной (б) областей.

точке сканирования, расположенной на расстоянии 11 см (зона над дефектом), а фрагмент б — 35 см (бездефектная зона). Для наглядности этот и все последующие графики приведены в одном масштабе для двух областей сканирования — дефектной и бездефектной.

В процессе увеличения количества этапов и возрастания внешней нагрузки на изгиб происходит уменьшение максимального коэффициента корреляции для области, где более активно развивался процесс разрушения, до 0,55, а для ненарушенной области — до 0,75.

Частотное смещение (см. рис. 4) начинает значительно изменяться на этапах нагружения, когда величина внешней нагрузки на изгиб достигает 40 кН и более. Причем в зоне, где не образовались видимые трещины вплоть до 9 этапа, не наблюдается частотное смещение во всем исследованном диапазоне поэтапного нагружения.

В реальных условиях может существовать такая ситуация, когда начало процесса мониторинга не совпадает с началом эксплуатации изделия и нет данных об исходном состоянии изделия. В этом случае может быть применен метод определения текущего коэффициента корреляции (рис. 5), который позволяет получить информацию об изменениях спектра электрического отклика, а следовательно, и динамики разрушения от одного этапа к другому.

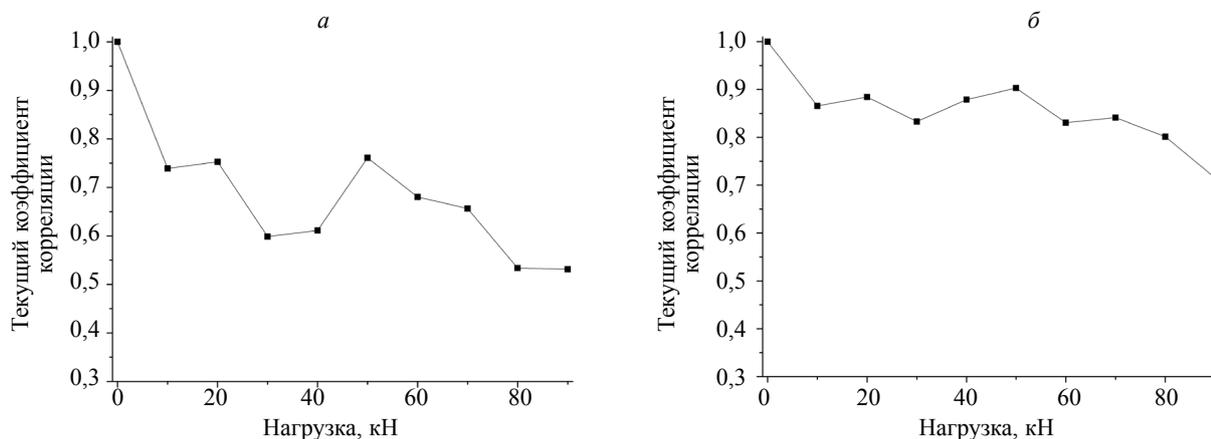


Рис. 5. Изменение текущего коэффициента корреляции в условиях поэтапного нагружения.

Если существует необходимость отследить более значительные нарушения, то может быть использован такой критерий, как центр тяжести спектра, который дает интегральную информацию о смещении спектра в целом.

На рис. 6 приведены зависимости частоты центра тяжести спектра электрического сигнала в условиях поэтапного нагружения. Видно, что в области, расположенной над зоной разрушения (фрагмент а), наблюдается уменьшение частоты центра тяжести на 5 кГц (на 25 %), а в области,

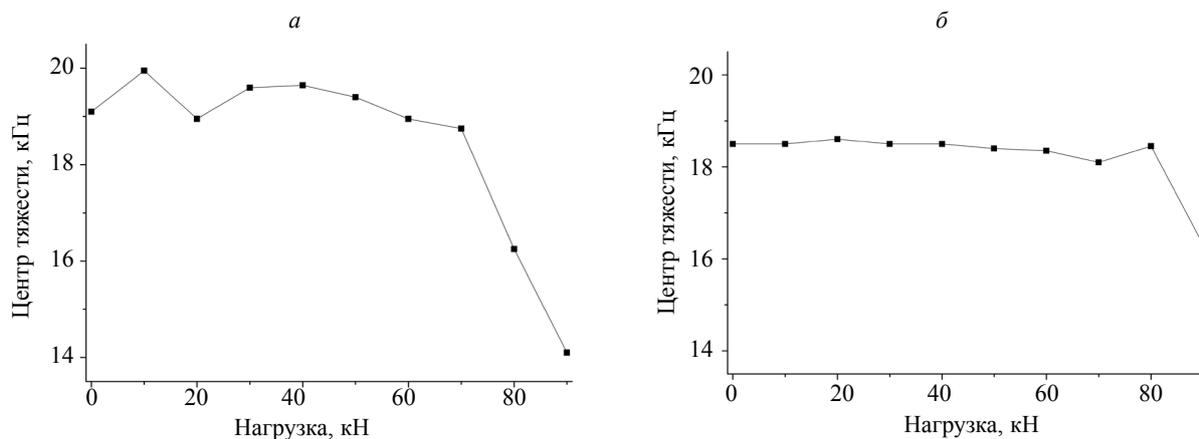


Рис. 6. Изменение частоты центра тяжести спектра электрического отклика в условиях поэтапного нагружения.

расположенной над зоной, где не наблюдается видимых глазом нарушений (фрагмент б), частота центра тяжести также уменьшается, но на 2,5 кГц (13 %). При значительном уровне произошедших изменений (на девятом этапе) начинают проявляться изменения в спектрах, регистрируемых в зонах, где отсутствуют видимые трещины. Это может служить свидетельством внутренних разрушений в армированном бетоне на границе между арматурой и бетоном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных исследованиях по разработке метода неразрушающего контроля места расположения дефектных областей процедура оценки основана на измерении электрического отклика на ударное воздействие путем последовательного сканирования изделия в процессе деградации армированной бетонной балки в условиях поэтапного изгиба. Показано, что по суммарному пространственному изменению нескольких параметров электрического отклика можно судить о месте расположения дефектной зоны, возникающей в условиях изгиба в армированном бетоне, что путем сканирования верхней ненарушенной поверхности изделия можно получать информацию о процессе разрушения в нижней растянутой зоне армированной бетонной балки.

Предложенный метод неразрушающего контроля является недорогим и достаточно простым в применении. По сравнению с широко используемыми эмиссионными методами он не требует непрерывного мониторинга и может быть использован в любое удобное для потребителя время. Кроме того, он позволяет осуществлять контроль трещин при любой их ориентации и конфигурации в отличие от акустических методов, которые не чувствительны к трещинам, расположенным перпендикулярно плоскости акустического приемника.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10119).

ВЫВОДЫ

1. *Shahidan S., Pulin R., Bunnori N.M., Holford K.M.* Damage classification in reinforced concrete beam by acoustic emission signal analysis // *Construction and Building Materials*. 2013. V. 45. P. 78—86.
2. *Soulioti D., Barkoula N.M., Paipetis A., Matikas T.E., Shiotani T., Aggelis D.G.* Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending // *Construction and Building Materials*. 2009. V. 23. No. 12. P. 3532—3536.
3. *Stergiopoulos C., Stavrakas I., Hloupis G., Triantis D., Vallianatos F.* Electrical and Acoustic Emissions in cement mortar beams subjected to mechanical loading up to fracture // *Engineering Failure Analysis*. 2013. V. 35. P. 454—461.
4. *Lacidogna G., Carpinteri A., Manuello A., Durin G., Schiavi A., Niccolini G., Agosto A.* Acoustic and Electromagnetic Emissions as Precursor Phenomena in Failure Processes // *Strain*. 2011. V. 47. No. 2. P. 144—152.
5. *Hsiao C., Cheng C.-C., Liou T., Juang Y.* Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method // *NDT & E International*. 2008. V. 41. No. 2. P. 98—107.
6. *Hola J., Sadowski L., Schabowicz K.* Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods // *Automation in Construction*. 2011. V. 20. No. 7. P. 799—807.

7. *Genovés V., Gosálbez J., Carrión A., Miralles R., Payá J.* Ultrasonic broadband signals monitoring of glass-fiber reinforced cement (GRC) bending tests // *Cement and Concrete Composites*. 2017. V. 80. P. 55—63.
 8. *In C.-W., Schempp F., Kim J.-Y., Jacobs L.J.* A Fully Non-contact, Air-Coupled Ultrasonic Measurement of Surface Breaking Cracks in Concrete // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2015. V. 34. Article 272.
 9. *Yilmaz T., Ercikdi B.* Predicting the uniaxial compressive strength of cemented paste backfill from ultrasonic pulse velocity test // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016. V. 31. No. 3. P. 247—266.
 10. *Algernon D., Gräfe B., Mielentz F., Köhler B., Schubert F.* Imaging of the Elastic Wave Propagation in Concrete Using Scanning Techniques: Application for Impact-Echo and Ultrasonic Echo Methods // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2008. V. 27. P. 83—97.
 11. *Narayanan A., Subramaniam K.V.L.* Experimental evaluation of load-induced damage in concrete from distributed microcracks to localized cracking on electro-mechanical impedance response of bonded PZT // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 105. P. 536—544.
 12. *Guo F., Yu Z., Liu P., Shan Z.* Practical issues related to application of electromechanical impedance-based method in concrete structural health monitoring // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2015. V. 27. P. 26—33.
 13. *Fursa T.V., Dann D.D., Petrov M.V., Lykov A.E.* Evaluation of Damage in Concrete Under Uniaxial Compression by Measuring Electric Response to Mechanical Impact // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2017. V. 36. Article 30.
 14. *Фурса Т.В., Петров М.В., Данн Д.Д.* Метод оценки процессов разрушения армированного бетона в условиях изгиба по параметрам электрического отклика на ударное воздействие // *Дефектоскопия*. 2018. № 7. С. 45—53. [*Fursa T.V., Petrov M.V., Dann D.D.* A Method for Evaluating Failure in Reinforced Concrete under Bending Based on the Response of Electrical Parameters to an Impact Action // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. No. 7. P. 519—527.]
-