

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 6. С. 99–111.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (6): 99–111.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.179.18

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-99-111

EDN: GWCKRL

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ АРМИРОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕТОНА

Борис Александрович Люкшин, Григорий Евгеньевич Уцын

Томский государственный университет

систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Разработка новых методов неразрушающего контроля особенно актуальна для таких строительных материалов, как бетон, в связи с широким его применением. Выполнен анализ результатов экспериментальных данных, полученных на основе механоэлектрических явлений в изделии из материала, содержащего пьезоэлектрические включения, и результатов математического моделирования волнового процесса в этом же изделии.

Метод основан на явлении механоэлектрических преобразований в пьезосодержащей среде при импульсном механическом воздействии. Расчеты выполнены как с помощью авторской программы, так и с использованием специального пакета программ.

Результаты. Рассмотрено два варианта: однородный образец и образец, содержащий дефекты в виде включений. На основе взаимного соответствия экспериментальных и расчетных данных сделан вывод о наличии перспектив у нового метода неразрушающего контроля изделий из материалов с пьезоэлектрическими включениями на основе механоэлектрических явлений.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, моделирование, бетон, численные методы, акустические методы контроля

Для цитирования: Люкшин Б.А., Уцын Г.Е. Анализ возможностей метода неразрушающего контроля армированных изделий из бетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 99–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-99-111. EDN: GWCKRL

ORIGINAL ARTICLE

EXPLORATORY STUDY OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

Boris A. Lyukshin, Grigory E. Utsyn

Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract. The paper presents the experimental data based on dynamoelectric phenomena in a product made of a material containing piezoelectric inclusions and mathematical simulation results of the wave process in this product. Calculations are based on the author's program and

special software package. Two variants are considered: a homogeneous sample and a sample with defect inclusions. Based on the mutual correspondence of experimental and calculated data, it is concluded that there are prospects for a new method of non-destructive testing of products made of materials with piezoelectric inclusions based on dynamoelectric phenomena.

Keywords: non-destructive testing, mathematical simulation, concrete, numerical method, acoustic control method

For citation: Lyukshin B.A., Utsyn G.E. Exploratory Study of Non-Destructive Testing of Reinforced Concrete Products. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 99–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-99-111. EDN: GWCKRL

Введение

В зависимости от физической природы положенных в основу методов неразрушающего контроля, они подразделяются на девять основных видов: акустический, магнитный, вихретоковый, проникающими веществами, радиоволновый, радиационный, оптический, тепловой и электрический.

С одной стороны, это свидетельствует о широком спектре изделий, которые подвергаются такому контролю, с другой – об отсутствии единственного надежного способа контроля. Например, применительно к бетону ГОСТ 22690–2015 «Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» устанавливает механические методы определения прочности на сжатие бетонов в конструкциях по упругому отскоку, ударному импульсу, пластической деформации, отрыву, скалыванию ребра и отрыву со скалыванием. Эти методы диагностики состояния бетона, содержащего арматуру, часто требуют громоздкого оборудования и длительного времени обработки результатов [1, 2].

Ниже обсуждается метод, позволяющий повысить, в частности, качество контакта основного материала и арматуры с использованием явления механо-электрических преобразований в пьезоэлектрических материалах при импульсном возбуждении. Перспективность этого метода обсуждается в работе [3]. Точность метода повышается, если использовать результаты математического моделирования процессов, происходящих в изделии под действием импульсной нагрузки. При тестировании метода результаты математического моделирования были сопоставлены с лабораторными исследованиями. Расхождение полученных при моделировании результатов с экспериментальными объясняется тем, что в лабораторных образцах присутствуют мелкая пористость и незначительные дефекты, в то время как математическая модель реализуется для идеальной среды.

Модель для определения параметров напряженно-деформированного состояния расчетной области

Вычислительный алгоритм, используемый при решении краевой задачи теории упругости для неоднородной расчетной области, основан на применении нецентральной разностной схемы, когда для аппроксимации пространственных производных в схеме типа «предиктор-корректор» поочередно используются левые и правые конечные разности [4, 5, 6, 7, 8].

Система уравнений, которая описывает поведение деформируемого твердого тела под действием импульсной нагрузки с амплитудой, исключаящей не-

упругие эффекты, включает в себя уравнения движения, соотношения Коши, закон Гука и постановку краевых условий. Далее обсуждаются результаты, полученные для плоской постановки задачи. Расчетная область представляет собой прямоугольник ABCD (рис. 1).

Условия жесткого закрепления на нижней границе DC:

$$U_y = 0; \quad U_x = 0,$$

где U_y и U_x – перемещения вдоль вертикальной и горизонтальной оси соответственно.

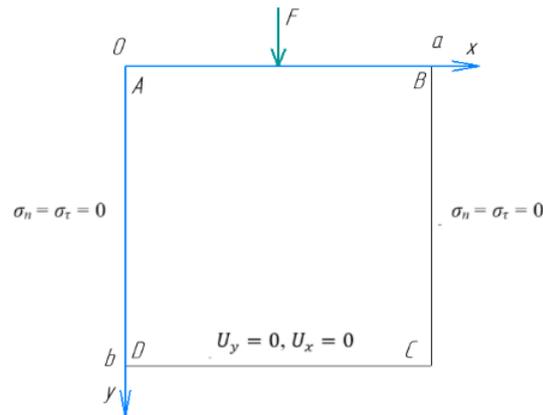


Рис. 1. Расчетная область
Fig. 1. Computational domain

На боковых свободных границах AD и BC значения нормальной и тангенциальной составляющей напряжения:

$$\sigma_n = \sigma_\tau = 0.$$

На верхней границе AB вдоль нормали к ней приложена нагрузка в виде

$$\sigma_n = T(t)F(x),$$

касательные напряжения пренебрежимо малы:

$$\sigma_\tau = 0.$$

$T(t)$ – функция времени t , определяющая закон изменения нагрузки во времени; $F(x)$ – функция, определяющая закон изменения нагрузки по поверхности, в двумерном случае вдоль линии контура:

$$F(x) = A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2d}\right),$$

где x_0 – координата центра приложенного импульса; d – расстояние от центра импульса, на котором нормальное напряжение уменьшается в e раз.

Зависимость $T(t)$ задавалась в виде половины затухающей по экспоненте синусоиды:

$$T(t) = e^{-\beta t} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \eta(t);$$

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & t > \tau, \end{cases}$$

где τ – время приложения импульсной нагрузки.

Для оценки корректности полученных результатов проводилось сопоставление с расчетами по программе ANSYS, использующей метод конечных элементов [9, 10].

Результаты показаны в виде изолиний перемещений для последовательных моментов времени (рис. 2, 3).

Время, мкс	Результаты разрабатываемой модели	Результаты ANSYS
5		
10		
15		

Рис. 2. Изолинии продольных смещений, полученные при численном моделировании и в пакете ANSYS (5–15 мкс)

Fig. 2. Isolines of longitudinal displacements obtained by numerical modeling and in the ANSYS package

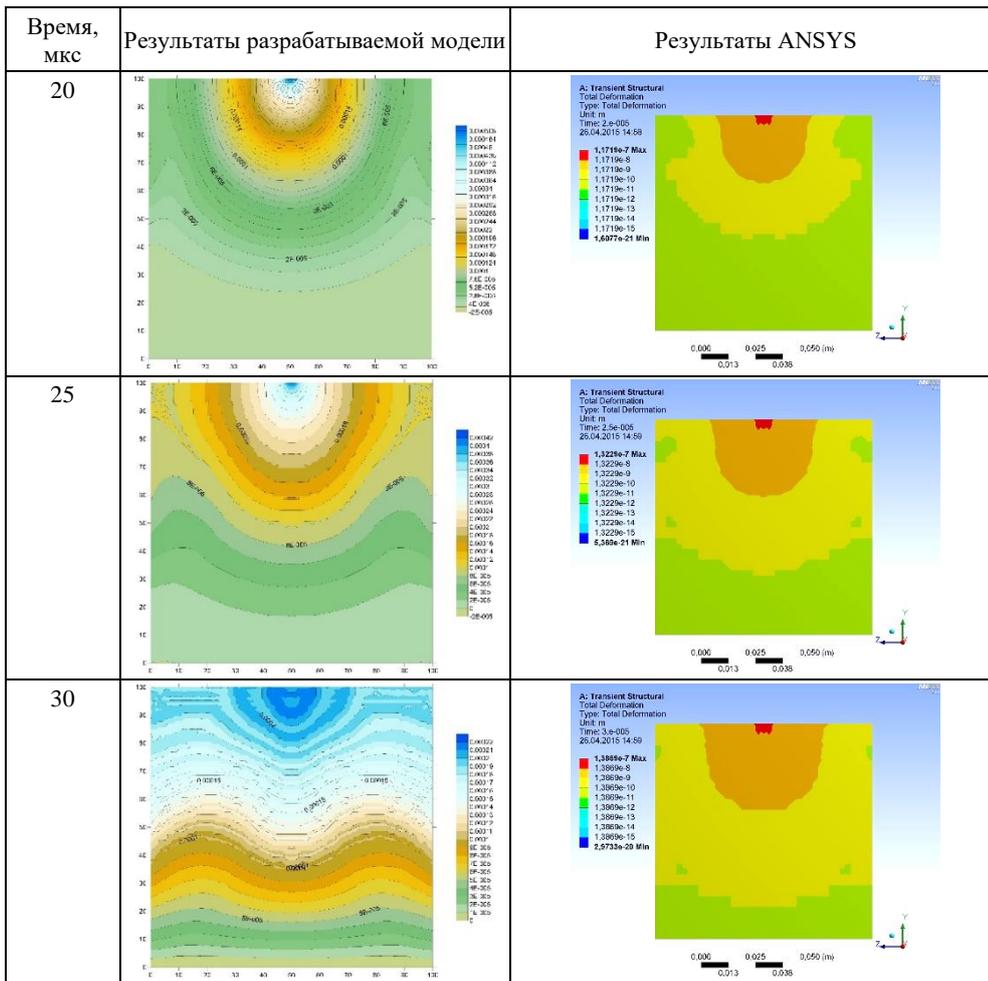


Рис. 3. Изолинии продольных смещений, полученные при численном моделировании и в пакете ANSYS (20–30 мкс)

Fig. 3. Isolines of longitudinal displacements obtained by numerical modeling and in ANSYS finite element program

Приведено сравнение результатов в плоской постановке (авторский пакет) и в осевом сечении расчетной области для трёхмерной постановки (ANSYS). Показано качественное совпадение результатов расчетов в случае моделирования волновых процессов, при этом скорости продольных и поперечных волн в двух- и трехмерных постановках совпадают, что соответствует теоретическому анализу волновых процессов в упругих средах. Корректность представленных результатов подтверждается тем, что фронт волны имеет сферическую форму, хотя расчеты проведены на прямоугольных сетках.

В дальнейшем результаты численного моделирования в плоской постановке используются для расчета электрического отклика.

Это связано с тем, что время расчета существенно различается при решении задач в пространственной и плоской постановке. Более того, в трехмерном

случае при наличии неоднородностей пакет ANSYS автоматически генерирует неравномерную сетку, измельчая ее там, где ожидаются большие градиенты искомым параметров НДС. Такими неоднородностями могут быть трещины или пустоты, галька, щебень, арматура.

При моделировании лабораторного эксперимента расчетная область имеет размеры 100×100 мм, что соответствует размерам реального образца. Горизонтальная вставка (арматура) находится на равном удалении от верхней и нижней граней и имеет толщину 10 мм (рис. 4). Задание граничных условий, описанных выше, соответствует лабораторному эксперименту.

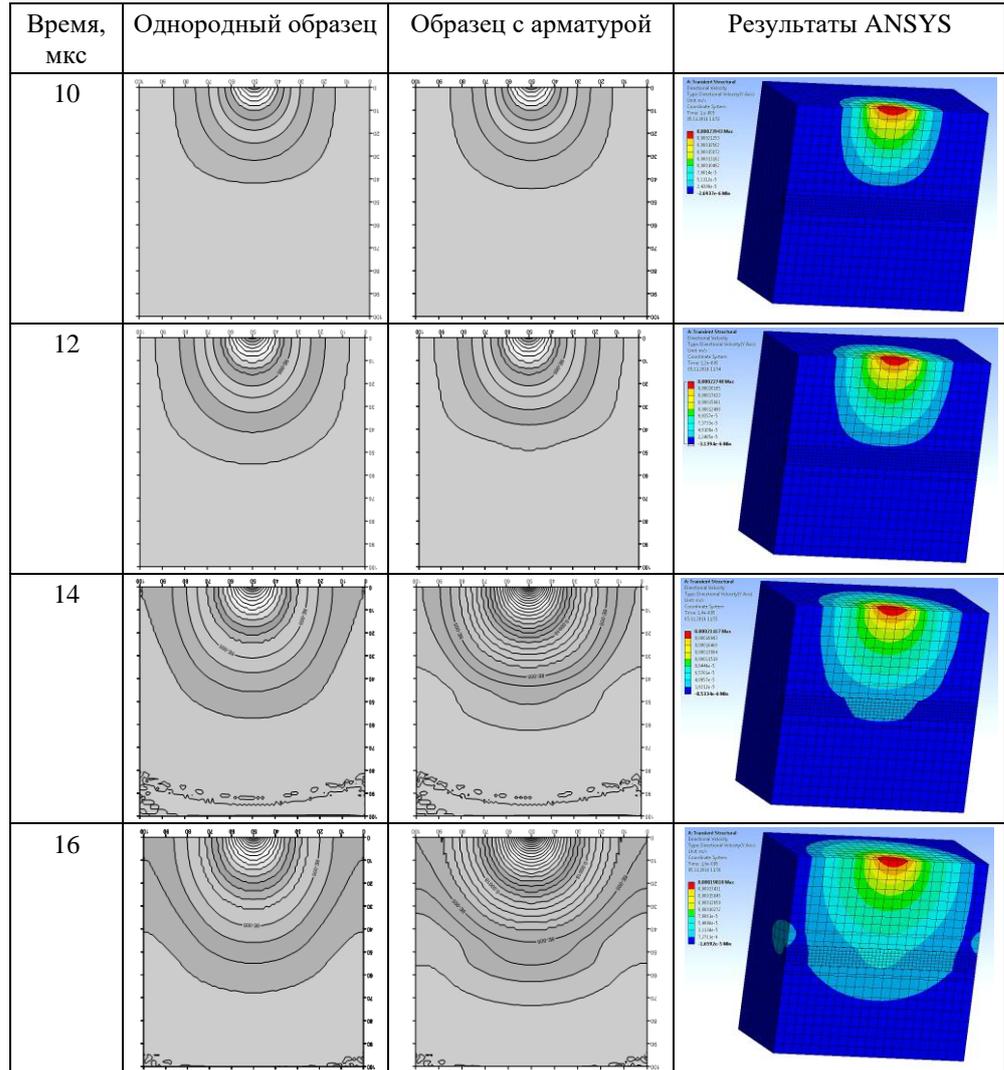


Рис. 4. Изолинии продольных смещений, полученные при численном моделировании для однородной расчетной области и области, содержащей жесткую вставку – арматуру
 Fig. 4. Isolines of longitudinal displacements obtained by numerical modeling for a homogeneous computational domain and area with a rigid reinforcement insert

Наличие вставки меняет как форму фронта волны, он перестает быть сферическим, так и скорость фронта – по вставке с более высокими прочностными свойствами волна движется быстрее.

Модель механоэлектрических преобразований

Для вычисления электромагнитного отклика используется модель, основанная на классических уравнениях электродинамики [7, 8]. Результаты моделирования волнового процесса применяются при анализе параметров электромагнитного отклика импульсно нагруженных диэлектрических образцов [11, 12].

Напряженность поля диполя, расположенного на расстоянии r от точки приема, определяется по формуле [13, 14]:

$$E = \frac{3(Pn)n - P}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3},$$

где n – единичный вектор в направлении r ; r – радиус-вектор от источника-диполя к заданной точке поверхности приемного датчика; P – электрический момент диполя; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м – электрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

В результате появления на поверхности приемного электрода свободных носителей заряда, индуцированных электрическим полем, через входное сопротивление измерительной схемы начинает протекать ток (рис. 5).

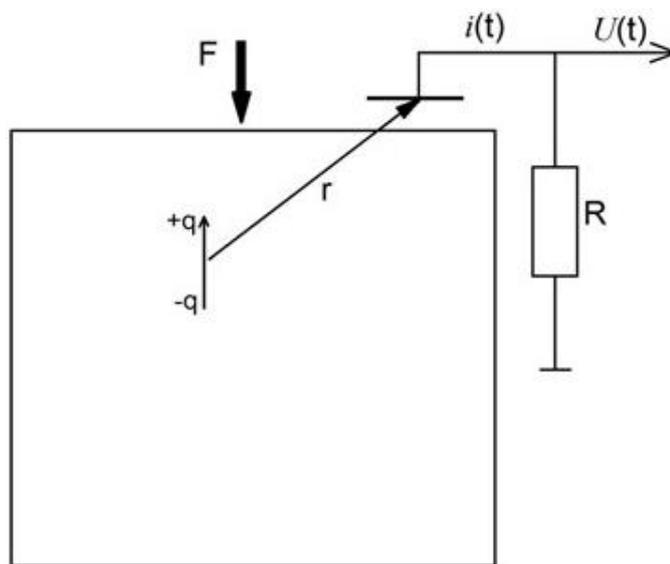


Рис. 5. Схема измерения
Fig. 5. Schematic of measurement

Электрический приемник представляет собой заземленную через входное сопротивление (R) металлическую пластину, расположенную вблизи поверхности исследуемого образца, и находится в зоне действия электрического поля, созданного внутренними источниками.

Напряженность поля диполя в двумерной постановке (рис. 6):

$$E = \frac{P \cos(\varphi)}{2\pi\epsilon_0 r^3},$$

где $r = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}$ – радиус-вектор, в котором рассматриваемая точка имеет координаты x_0, y_0 , а центр приемного устройства имеет координаты x_1, y_1 .

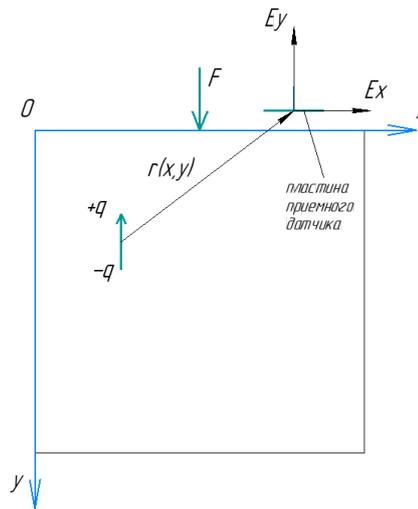


Рис. 6. Компоненты напряженности поля диполя
Fig. 6. Components of the dipole field strength

В случае если необходимо получить компоненты вдоль соответствующих осей, то в декартовых координатах получим

$$E_r^x = \frac{P_x (\cos(\varphi_x))^2}{2\pi\epsilon_0 r^3}; \quad E_r^y = \frac{P_y (\cos(\varphi_y))^2}{2\pi\epsilon_0 r^3},$$

где

$$\cos(\varphi_x) = \frac{(x_0 - x_1)}{r}; \quad \cos(\varphi_y) = \frac{(y_0 - y_1)}{r}.$$

Модуль вектора напряженности в точке $|E| = \sqrt{(E_r^x)^2 + (E_r^y)^2}$.

Компоненты вектора напряженности, сформированные системой зарядов, согласно принципу суперпозиции, для компоненты вдоль оси X:

$$E_r^x = \oint \frac{P_x (\cos(\varphi_x))^2}{2\pi\epsilon_0 r^3} dr$$

или в координатном виде:

$$E_r^x = \oint \frac{P_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dr;$$

$$\frac{\partial |E|}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \oint \frac{P_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dr.$$

С учетом $\frac{\partial q(t)}{\partial t} = \frac{d \cdot S \cdot E_{\text{упр}}}{L} \frac{\partial \Delta L}{\partial t} = \frac{d \cdot S \cdot E_{\text{упр}}}{L} V(t)$

получим $\frac{\partial |E|}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \oint \frac{dSE_{\text{упр}} V_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 l_x r^5} dr,$

где (q) – заряд, возникающий при деформации пьезоэлемента, определяется через пьезомодуль (d) и силу (F) как $q = d \cdot F$.

Временная зависимость $q(t)$ определяется силой, с которой волна при своем движении воздействует на источник в виде пьезовключения. Временная зависимость $r(t)$ обусловлена деформациями пьезовключения и материала образца в зоне источник – приемник под действием той же силы F , действующей в объеме образца в соответствии с законом Гука, $E_{\text{упр}}$ – модуль Юнга, L – размер модели в направлении возбуждения, $V(t)$ – скорость смещения по лучу возбуждения, l_x – толщина пьезоэлемента.

Остальные компоненты записываются аналогично.

$$\frac{\partial |E|}{\partial t} = \sqrt{\left(\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \frac{dSE_{\text{упр}} V_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 l_x r^5} dx dy \right)^2 + \left(\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \frac{dSE_{\text{упр}} V_y (y_0 - y_1)^2}{2\pi\epsilon_0 l_y r^5} dx dy \right)^2}.$$

Получив таким образом модуль вектора, «придадим» ему направление относительно площадки приема, используя направление нормали:

$$\frac{\partial |E|}{\partial t} = \sum_i \frac{\sigma_{ij}}{|\sigma_{ij}|} \sqrt{\left(\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \frac{P_x (x_0 - x_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dx dy \right)^2 + \left(\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \frac{P_y (y_0 - y_1)^2}{2\pi\epsilon_0 r^5} dx dy \right)^2}.$$

Здесь $\frac{\sigma_{ij}}{|\sigma_{ij}|}$ определяет знак в зависимости от того, сжимается или растягивается элемент, суммирование производится в каждый момент времени.

Поток вектора напряженности через замкнутую площадку (пластина принимающего устройства):

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho(\vec{r}) dV.$$

Здесь интегрирование производится по площади принимающего устройства.

На основе параметров волнового процесса рассчитаны электромагнитные отклики (рис. 7, 8). Приведена начальная часть электромагнитного отклика до 75 мкс.

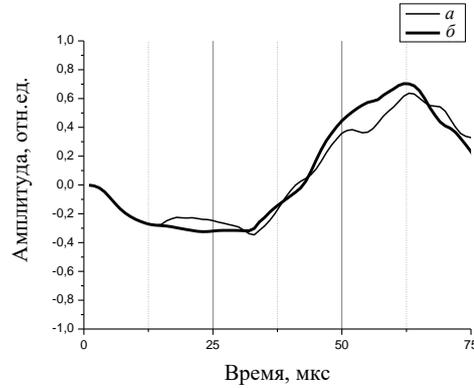


Рис. 7. Результаты численного моделирования для армированного образца:
a – образец с металлической арматурой; *b* – однородный образец
 Fig. 7. Numerical simulation of reinforced samples:
a – with metal reinforcement; *b* – homogeneous sample

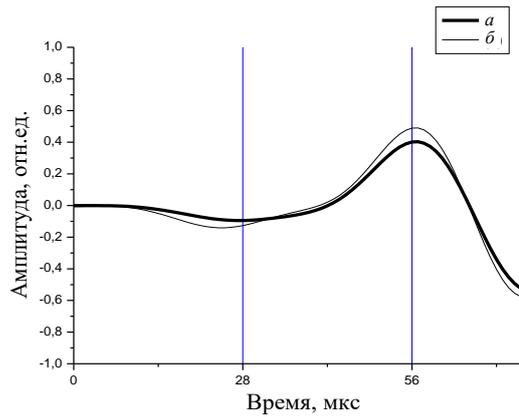


Рис. 8. Измеренный электромагнитный отклик для армированного образца:
a – однородный образец; *b* – образец с металлической арматурой
 Fig. 8. Electromagnetic response of reinforced samples:
a – homogeneous sample; *b* – with metal reinforcement

Разбивая на равные промежутки времени, равные периоду отражения от противоположных границ, получим растущую разницу в сигналах. Накопление различий позволяет воспользоваться разрабатываемым методом для определения степени дефектности, при наличии в основном массиве дефектов в виде вставок с более высоким модулем упругости и плотностью.

Как видно из приведенных на рис. 7 и 8 зависимостей, наличие вставки (или дефекта) заметно меняет форму электромагнитного отклика как в расчетах, так и в экспериментах. Таким образом, сопоставляя результат теоретиче-

ски полученного электромагнитного отклика для изделия без дефекта и полученного экспериментально, можно судить о наличии или отсутствии неоднородностей в реальном изделии.

Заключение

Сравнение представленных результатов численного моделирования импульсного нагружения однородных образцов и образцов, содержащих арматуру, с экспериментальными данными показало, что существует корреляция между получаемыми теоретически и экспериментально электромагнитными откликами. Импульсная нагрузка, приложенная к поверхности образца, содержащего пьезовключения, приводит к возникновению электрического поля, которое регистрируется датчиком. Поле сгенерировано суперпозицией сигналов от пьезовключений, распределённых по всему объёму бетонной матрицы.

Результаты, полученные на данном этапе, позволяют отслеживать наличие дефекта по различию расчетного и измеренного электромагнитного отклика на качественном уровне.

Следует заметить, что в отличие от акустических методов разрабатываемый метод не предъявляет особых условий к контакту образец – датчик и является удобным при использовании в полевых условиях. Основным критерием применения метода является наличие пьезоисточников в материале изделия. Дальнейшее развитие метода связано с расширением его использования на различные типы арматуры.

Математическое моделирование позволяет создать банк эталонных электромагнитных откликов, по которым возможен анализ и распознавание дефектов с помощью метода неразрушающего контроля, основанного на эффекте механоэлектрических преобразований.

Можно отметить, что эффект электромагнитного отклика позволяет проводить непрерывный мониторинг строительных конструкций из материалов, содержащих пьезовключения. Установив сеть датчиков по всему объекту и получая данные об уровне сигнала, по резкому изменению уровня можно судить об опасности разрушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Martínez I., Andrade C.* Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures // *Cement and Concrete Composites*. 2009. V. 31. P. 545–554.
2. *Nakan Yalciner, Ozgur Eren, Serhan Sensoy.* An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level // *Cement and Concrete Composites*. 2012. V. 42. P. 643–655.
3. *Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Дани Д.Д.* Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований // *Дефектоскопия*. 2011. № 5. С. 39–47.
4. *Кужуджанов В.Н.* Численное решение неоднородных задач распространения волн напряжений в твердых телах // *Сообщения по прикладной механике*. Москва : ВЦ АН СССР, 1976. Вып. 6. С. 11–37.
5. *Кужуджанов В.Н., Кондауров В.И.* Численное решение неоднородных задач динамики твердого деформируемого тела // *Проблемы динамики упругопластических сред*. Сер. Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 5. Москва : Мир, 1975. С. 39–84.
6. *Новацкий В.К.* Волновые задачи теории пластичности. Москва : Мир, 1978. 307 с.

7. Уорминг Р.Ф., Кутлер П., Ломакс Г. Нецентральные разностные схемы второго и третьего порядков точности для решения нелинейных уравнений гиперболического типа // Ракетная техника и космонавтика. 1973. Т. 11. № 2. С. 76–85.
8. Численное решение многомерных задач газовой динамики / под ред. К. Годунова. Москва : Наука, 1976. 400 с.
9. Клебанов Я.М., Давыдов А.Н., Папировский В.Л. Использование программного комплекса ANSYS в учебном процессе (Самарский государственный технический университет). Самара : Изд-во СГТУ, 1998. 124 с.
10. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Нижний Новгород, 2006. 115 с. URL: https://savenkovvn.ucoz.ru/zhidkov_ansys.pdf
11. Selle A., Fedkiw R., Kim B.-M., Liu Y., Rossignac J. An unconditionally stable Maccormack method // Journal of Scientific Computing. 2008. V. 35. № 2–3. P. 350–371.
12. Dupont T.F., Yingjie Liu. Back and forth, error compensation and correction methods for semi-lagrangian schemes with application to level set interface computations // Math. Comp., In Press. 2006. P. 311–324.
13. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. Москва : Наука, 1977. 944 с.
14. Люшкин Б.А., Уцын Г.Е., Фурса Т.В. Электромеханическая модель пьезосодержащей среды: математическое моделирование механоэлектрических процессов. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 101 с.

REFERENCES

1. Martínez I., Andrade C. Examples of Reinforcement Corrosion Monitoring by Embedded Sensors in Concrete Structures. *Cement and Concrete Composites*. 2009; 31: 545–554.
2. Hakan Yalciner, Ozgur Eren, Serhan Sensoy. An Experimental Study on the Bond Strength Between Reinforcement Bars and Concrete as a Function of Concrete Cover, Strength and Corrosion Level. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 42: 643–655.
3. Fursa T.V., Osipov K.Yu., Dann D.D. Development of Non-Destructive Method for Testing Concrete Strength with Defect Structure Based on Dynamoelectric Transformations. *Defektoskopiya*. 2011; (5): 39–47. (In Russian)
4. Kukudzhanov V.N. Numerical Solution of Non-Dimensional Problems of Stress Wave Propagation in Solids. *Soobshcheniya po prikladnoi mekhanike*. 1976; (6): 11–37. (In Russian)
5. Kukudzhanov V.N., Kondaurov V.I. Numerical Solution of Non-Dimensional Problems of Dynamics of Solid Deformable Body. *Problemy dinamiki uprugoplasticheskikh sred. Ser. Mekhanika. Novoe v zarubezhnoi nauke*. 1975; (5): 39–84. (In Russian)
6. Novatsky V.K. Wave Problems in the Theory of Plasticity. Moscow: Mir, 1978. 307 p. (In Russian)
7. Warming R.F.P., Kutler G. Lomax Second and Third-Order Noncentered Difference Schemes for Nonlinear Hyperbolic Equations. *ARS Journal*. 1973; 11(2): 6–85.
8. Godunov K. Numerical Solution of Multidimensional Problems of Gas Dynamics. Moscow: Nauka, 1976. 400 p. (In Russian)
9. Klebanov Ya.M., Davydov A.N., Papirovsy V.L. ANSYS FE Program in the Educational Process (Samara State Technical University). Available: cadfem.ru (In Russian)
10. Zhidkov A.V. Application of ANSYS FE Program for Solving Problems of Geometric Modeling. Nizhny Novgorod, 2006. 115 p. Available: https://savenkovvn.ucoz.ru/zhidkov_ansys.pdf (In Russian)
11. Selle A., Fedkiw R., Kim B.-M., Liu Y., Rossignac J. An Unconditionally Stable Maccormack Method. *Journal of Scientific Computing*. 2008; 35 (2–3): 350–371.
12. Dupont T.F., Yingjie Liu. Back and Forth, Error Compensation and Correction Methods for Semi-Lagrangian Schemes with Application to Level Set Interface Computations. *Mathematics of Computation*. 2006; 311–324. (In press)
13. Yavorsky B.M., Detlaf A.A. Handbook of Physics. Moscow: Nauka, 1977. (In Russian)
14. Lyukshin B.A., Utsyn G.E., Fursa T.V. Electromechanical Model of Piezo-Containing Medium: Mathematical Modeling of Dynamoelectric Processes. Tomsk: TPU, 2015. 101 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Борис Александрович Люкишин, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, lba2008@yandex.ru

Григорий Евгеньевич Уцын, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, uge23@yandex.ru

Authors Details

Boris A. Lyukshin, DSc, Professor, Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, 40, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, lba2008@yandex.ru

Grigory E. Utsyn, PhD, A/Professor, Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, 40, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, uge23@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.03.2024
Одобрена после рецензирования 28.09.2024
Принята к публикации 14.11.2024

Submitted for publication 13.03.2024
Approved after review 28.09.2024
Accepted for publication 14.11.2024