

Received: 31.10.2023

Revised: 24.12.2023



Accepted: 29.12.2023



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.165-174

THE POSSIBILITIES OF RAPID TESTING OF STEEL ELEMENTS IN REINFORCED CONCRETE

Yu. Ya. Reutov^{a), *} and V. I. Pudov^{b)}

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

a)  <https://orcid.org/0000-0002-7847-6004>  asija1@yandex.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0003-3143-7195>  pudov@imp.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: asija1@yandex.ru

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russian
Tel.: +7 (343) 378-3674

An electromagnetic device has been developed for rapid testing of ferromagnetic reinforcement in reinforced concrete structures. The device consists of two flat frame magnetizing coils and a receiver of the stray magnetic field from the magnetized reinforcement. Numerical simulation of the proposed device has been performed, allowing one to select the optimal ratio of its dimensions and evaluate its expected characteristics. The possibility of receiving a signal functionally related to a change in the reinforcement diameter is shown.

Keywords: reinforced concrete, reinforcement, frame coil, magnetization, numerical simulation, magnetic permeability, field strength, induction

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education, theme Diagnostics, No. 122021000030-1.

References

1. Gulunov, A.V. Techniques and instruments for nondestructive testing of concrete. V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya, 2002, 2 (16), 24–25. (In Russian).
2. Pudov, V.I. Electromagnetic devices for assessment of the state of reinforcement elements in reinforced-concrete structures. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2006, 42, 369–377. DOI: 10.1134/S1061830906060039.
3. Litvinenko, A.A., Reutov, Yu.Ya., Dyakin, V.V., and Dudarev, M.L. Determination of the diameter and depth of reinforcement occurrence in concrete structures. Defektoskopiya, 1995, 9, 63–70. (In Russian).
4. Zatsepin, N.N., Gusev, A.P., and Pushkin, S.G. SU Patent 1243479, 1994.
5. Zatsepin, N.N., Gusev, A.P., and Pushkin, S.G. USSR Author Certificate 1408948, 1994.
6. Albom usovershenstvovannykh zhelezobetonykh konstruktsiy dlya kapitalnogo remonta zhilykh domov [An Album of Improved Reinforced-Concrete Constructions for Thorough Repair of Blocks of Flats]. Stroyizdat Publ., Leningrad, 1988, 302 p.
7. Kandaev, V.A., Kuznetsov, A.A., Ponomarev, A.V., and Buchelnikova, O.S. SU Patent 167680, 2016.
8. Garcia-Martin, J., Gomez-Gil, J., and Vazquez-Sanchez, E. Non-destructive techniques based on eddy current testing. Sensors, 2011, 11, 2525–2565. DOI: 10.3390/s110302525.





9. Butyrin, P.A., Dubitskii, S.D., and Korovkin, N.V. The use of computer modeling in teaching the electromagnetic field theory. *Elektrichestvo*, 2014, 10, 66–71. (In Russian).
10. Reutov, Yu.Ya. A peculiarity of the magnetization of a ferromagnet by an alternating field. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, 6, 35–47. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.6.035-047. Available at: http://dream-journal.org/issues/content/article_313.html

Подана в журнал: 31.10.2023
УДК 620.179.14:620.179.147
DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.165-174

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ю. Я. Реутов^{а)}*, В. И. Пудов^{б)}

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия*

а)  <https://orcid.org/0000-0002-7847-6004>  asija1@yandex.ru;
б)  <https://orcid.org/0000-0003-3143-7195>  pudov@imp.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: asija1@yandex.ru
Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия
Тел.: +7 (343) 378-36-74

Разработано электромагнитное устройство для экспресс-анализа ферромагнитной арматуры железобетонных конструкций. Устройство состоит из двух плоских рамочных намагничивающих катушек и приемника магнитного поля рассеяния от намагниченной арматуры. Выполнено численное моделирование предложенного устройства, позволяющее выбрать оптимальное соотношение его размеров и оценить его ожидаемые характеристики. Показана возможность получения сигнала, функционально связанного с изменением диаметра арматуры.

Ключевые слова: железобетон, арматура, рамочная катушка, намагничивание, численное моделирование, магнитная проницаемость, напряженность поля, индукция

1. Введение

Армирование железобетонных конструкций (ЖБК) ферромагнитной арматурой широко применяется при возведении строительных сооружений. При этом количество устанавливаемой арматуры регламентируется отношением общей длины сечения рабочей арматуры к сечению бетонной части конструкции. В зависимости от назначения конструкции коэффициент принимается равным от 0,5 до 2 % при использовании гибкой арматуры (т. е. проволочной, диаметром 0,4–0,9 мм) и более 3 % при жесткой арматуре периодического профиля (1,0 см и более). Однако при образовании на поверхности конструкций трещин или при их длительной эксплуатации неизбежно происходит уменьшение эффективного диаметра рабочей арматуры, обусловленное коррозионным процессом. Это приводит к снижению прочности ЖБК, а следовательно, и к уменьшению ее эксплуатационной надежности. Поэтому требуется периодически контролировать арматуру во избежание нежелательных последствий разрушения железобетонных конструкций [1–7]. Одним из способов такого контроля является электромагнитный неразрушающий контроль, широко применяемый в современной дефектоскопии.

Особенностью такого контроля является односторонний доступ к ЖБК. Устройство для контроля арматуры приходится локально перемещать по относительно плоской поверхности каркасно армированной конструкции и диагностировать рабочее состояние арматуры, залегающей на глубине 2–6 сантиметров и более от ее поверхности. При активном контроле металлическую арматуру необходимо намагничивать (или перемагничивать) зондирующим полем и измерять возникающее в арматуре магнитное поле рассеяния. Для этого применяют поисковую аппаратуру с накладным преобразователем (датчиком) [8, 9]. Такой преобразова-

тель локально намагничивает исследуемый объект полем, направленным к его поверхности, и фиксирует в качестве сигнала переизлученное магнитное поле арматуры ЖБК.



Рис. 1. Схема работы бетона и арматуры в разных участках железобетонной конструкции под нагрузкой: 1 – ферромагнитная арматура

В нашем случае исследуемая арматура представляет собой ферромагнитный цилиндрический стержень. Его локальная магнитная проницаемость в сечении диаметра всего лишь в два раза превышает проницаемость в условиях сформированного защитного слоя бетона и не подходит для достоверной оценки. Такую арматуру необходимо намагничивать вдоль ее длины. Для этого используют накладные преобразователи с магнитным подковообразным ярмом [10]. Однако расстояние между полюсами (башмаками) ярма такого преобразователя должно быть по крайней мере не меньше глубины расположения объекта контроля, в нашем случае – арматурного стержня. Использование в испытательном приборе столь громоздкого и тяжелого ферромагнитного ярма совершенно неприемлемо, поскольку поисковый преобразователь должен быть достаточно легким и компактным, позволяющим перемещать его вручную одним оператором на значительных высотах.

2. Основная часть

Один из вариантов решения такой задачи заключается в разработке и применении плоских прямоугольных рамочных катушек. Они отстоят друг от друга на расстоянии, соизмеримом с глубиной залегания арматуры. Их перемещают вручную вдоль поверхности объекта контроля. Благодаря встречному включению катушек обеспечивается перемагничивание арматуры вдоль ее длины. Вследствие конечности расстояния между полюсами намагничиваемого участка арматуры восприятие его поля рассеяния, ориентированного вдоль ее длины, не является проблемой. Такой преобразователь представлен на рис. 2.

Намагничивающие катушки 1 и 2 с расстоянием l между их центрами, а также приемник поля переизлучения 4 расположены в одной плоскости и могут поступательно перемещаться по поверхности контролируемого объекта вдоль арматуры 3 на расстоянии Z от него. При этом ось максимальной чувствительности приемника 4 ориентирована вдоль плоскости объекта контроля и вдоль линии, соединяющей намагничивающие катушки 1 и 2.

Намагничивающие катушки соединены последовательно, так чтобы создаваемые ими магнитные поля H_1 и H_2 были ориентированы поперек плоскости объекта контроля и имели противоположные направления. В таком случае в месте расположения контролируемой арматуры образуется магнитное поле H_m , ориентированное вдоль его длины. Под действием этого поля участок арматуры, ограниченный проекциями катушек 1 и 2, намагничивается вдоль ее длины, и вокруг него возникает вторичное магнитное поле H_s , несущее информацию об электромагнитных характеристиках материала арматуры 3. Это поле воспринимается приемником магнитного поля 4 и обрабатывается электронной схемой поискового устройства. Указанная конфигурация элементов устройства обеспечивает минимальное воздействие магнитного поля намагничивающих катушек на приемник 4, облегчая выделение полезного сигнала.

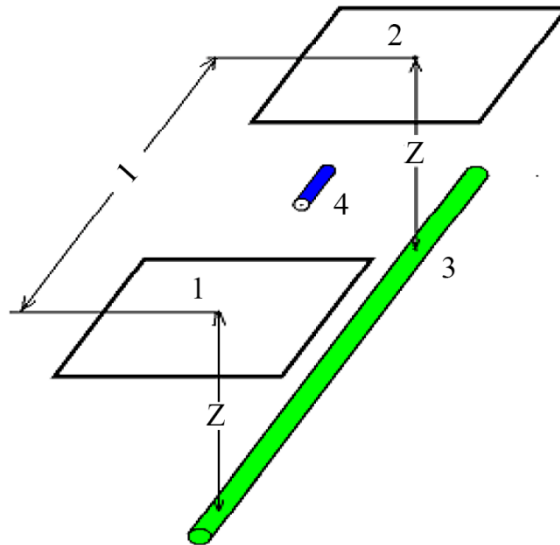


Рис. 2. Первая (1) и вторая (2) намагничивающие катушки; арматура (3); приемник поля переизлучения арматуры (4)

Рассмотрению перспектив применения данной модели устройства для экспресс-диагностики коррозионного состояния арматуры железобетонных конструкций и других металлических изделий (труб и т. д.) посвящена данная статья.

3. Численное моделирование устройства

Аналитическое рассмотрение процесса намагничивания объекта контроля в данной конфигурации контрольного устройства связано с определенными трудностями. В частности, со значительной неоднородностью магнитного поля, воздействующего на локальный участок контролируемого стержня со стороны намагничивающих катушек и сложностью расчета напряженности поля этого участка, воспринимаемого сенсором магнитного поля устройства. В данной работе выполнялось численное моделирование работы контрольного устройства в программном пакете ELCUT отечественной разработки [9, 10]. В пакете моделируются двумерные задачи – плоские или круговые осесимметричные. Здесь применено осесимметричное моделирование.

Объемное изображение компьютерной модели показано на рис. 3. На этом рисунке изображены намагничивающие катушки 1 и 2, соответствующие рис. 2. Они представлены парами круговых витков с токами одинаковой силы, текущими в указанных стрелками направлениях. Намагничивающие поля от этих витков действуют на размещенную на оси симметрии системы контролируемую арматуру 3 (согласно рис. 2) в указанных на рисунке направлениях. Поле рассеяния намагниченной таким способом арматуры вычисляется на цилиндрической поверхности, опирающейся на круговые витки с током.

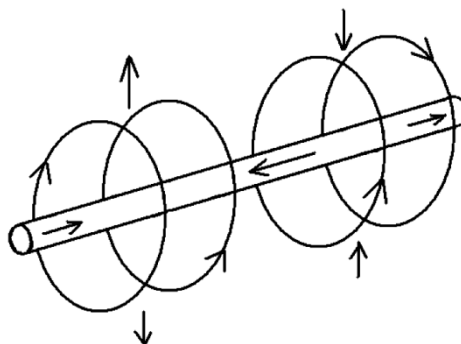


Рис. 3. Модель намагничивающей системы, принятая для численного моделирования

Радиусы круговых витков компьютерной модели были приняты равными 250 мм, а силы текущих по ним токов заданы равными одному амперу. Рассматривалась линейная задача, и поэтому силы токов заданы произвольно. С учетом принципа суперпозиции нетрудно пересчитать напряженность и индукцию полей, возникающих в модели, применительно к представленному на рис. 2 устройству, рассматривая ширину намагничивающих катушек 1 и 2 как часть окружности намагничивающего витка и считая их не совсем плоскими. Полями, создаваемыми частями катушек и ориентированными вдоль намагничиваемого стержня, можно пренебречь, поскольку они взаимно компенсируются.

4. Результаты численного моделирования

Прежде всего необходимо выяснить, как влияет расстояние l между серединами пар намагничивающих витков (база) на топографию магнитных полей в системе (рис. 4). Расстояние между витками в каждой паре было задано равным 150 мм. Диаметр арматуры соответствовал 20 мм, а относительная магнитная проницаемость его материала μ задавалась равной 100 или 1000.

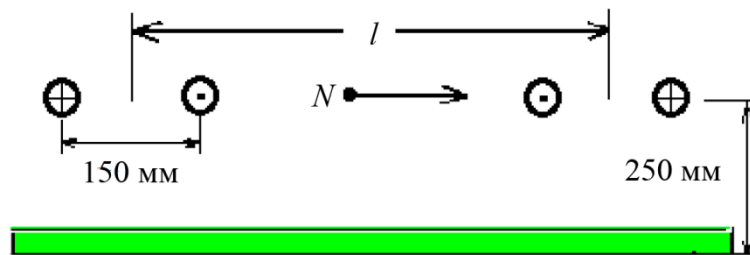


Рис. 4. Основные размеры устройства, принятые для моделирования

На рис. 5 представлен скан изображения, иллюстрирующего результат моделирования в пакете ELCUT. Зеленым цветом изображена контролируемая арматура. В точке N вычисляется ее поле рассеяния.

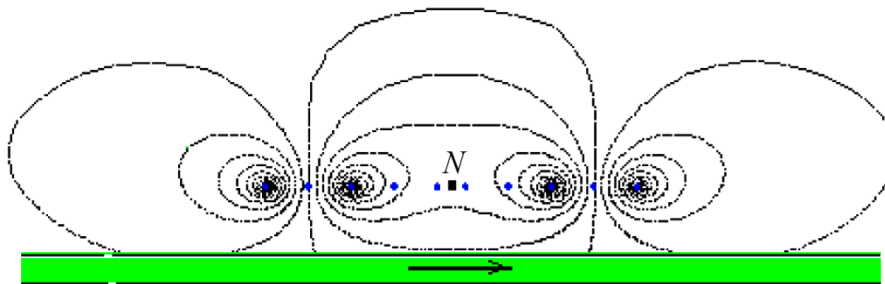


Рис. 5. Скан результатов численного моделирования

На рис. 6 представлены вычисленные моделированием зависимости напряженности намагничивающего образец поля H_m от продольной координаты Z , отсчитываемой от центра симметрии системы при разных задаваемых значениях базы l , то есть от расстояния между центрами пар намагничивающих витков. На этом рисунке, а также на последующих рис. 7, 8 и 9 красные линии соответствуют значению $l = 200$ мм, синие – $l = 350$ мм, зеленые – $l = 500$ мм. Как видим, после значения $l = 350$ мм амплитуда зависимости намагничивающего поля от абсолютного значения координаты Z прекращает нарастать, а сама кривая зависимости упрощается и расширяется вдоль длины арматуры. Расстояния между точками перехода намагничивающего поля через ноль составляют 314, 405 и 517 мм при l , равных 200, 350 и

500 мм соответственно. Вместе с тем видно, что при изменении базы l в 2,5 раза максимум напряженности намагничивающего арматуру поля изменился всего на 13 %.

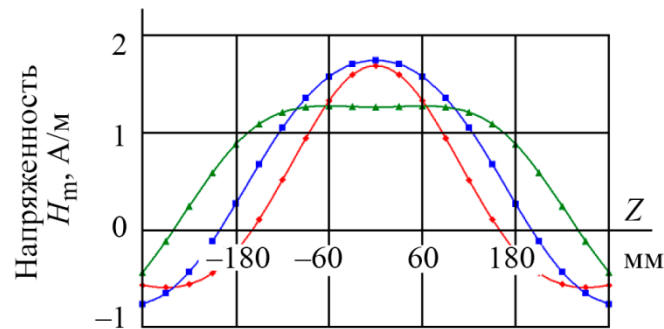


Рис. 6. Напряженность поля, намагничивающего арматуру, в зависимости от расстояния от центра системы

На рис. 7 и 8 представлены аналогичные зависимости индукции в намагничиваемой арматуре от продольной координаты Z при разных значениях базы l .

Рис. 6 соответствует относительной магнитной проницаемости материала арматуры $\mu = 100$, а рис. 7 – $\mu = 1000$. Диаметр прута $D = 20$ мм.

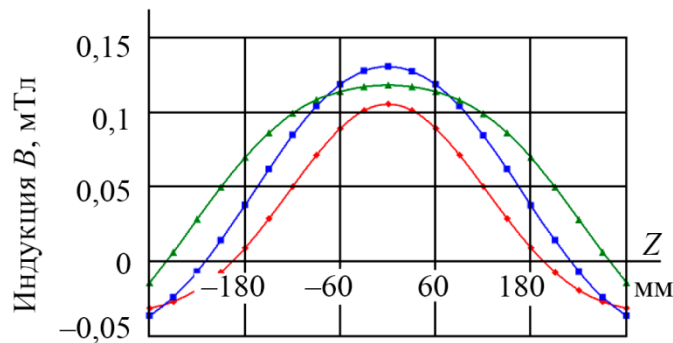


Рис. 7. Распределение индукции по длине ферромагнитной арматуры при проницаемости материала, равной 100

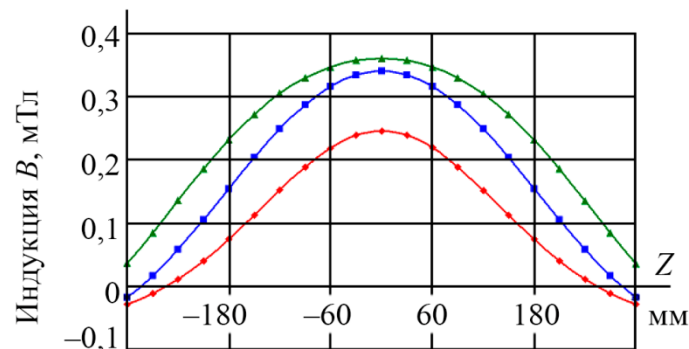


Рис. 8. Распределение индукции по длине ферромагнитной арматуры при проницаемости материала, равной 1000

Как и для случая намагничивающего поля, максимумы индукции в арматуре изменились не более чем в полтора раза, то есть выбор величины базы не очень критичен.

Из рисунков видно, что расстояния между точками перехода индукции через ноль заметно превышают расстояния между точками смены полярности намагничивающего поля при всех трех значениях базы l , а максимумы кривых выросли немногим больше чем в два

раза при росте проницаемости на порядок. Очевидно, здесь сказывается влияние размагничивающего действия локальных магнитных полюсов в арматуре.

На рис. 9 представлены результаты моделирования поля рассеяния ферромагнитной арматуры H_s в точке N , обусловленного действием вдоль него продольной компоненты поля H_m пар намагничивающих витков по рис. 3, при разных значениях базы l . Диаметр арматуры равнялся 20 мм, а относительная магнитная проницаемость ее материала была задана равной 100 или 1000. Красным цветом на рисунке изображены результаты моделирования, соответствующие l , равной 200 мм, синим – 350 мм и зеленым – 500 мм. Видно, что с ростом проницаемости материала арматуры сигнал от него растет, хотя и непропорционально, а начиная с базы в 350 мм практически не зависит от нее. Получается, что увеличивать базу l (а значит, габариты устройства до значений более 500 мм) в данном случае нецелесообразно. Вполне можно ограничиться базой в 350 мм.

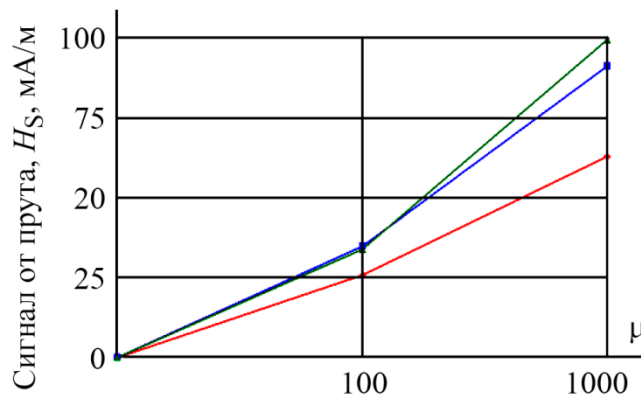


Рис. 9. Поле рассеяния ферромагнитной арматуры в точке N при диаметре прута 20 мм

На рис. 10 приведены полученные моделированием графики зависимости поля рассеяния арматуры H_s от ее диаметра D . База l моделируемого устройства равнялась 500 мм. Коричневая кривая соответствует стержню с проницаемостью μ материала, равной 100, а лиловая – 1000.

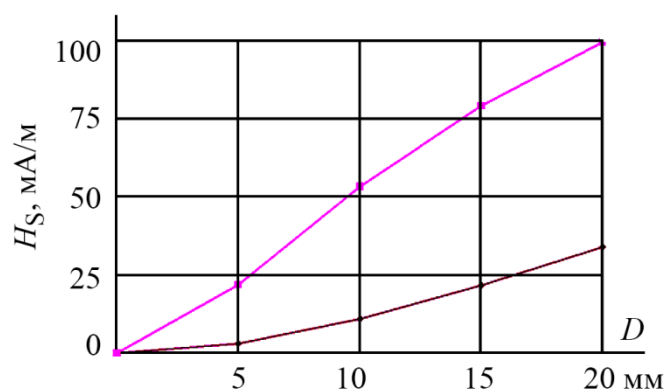


Рис. 10. Сигнал от арматуры в точке N в зависимости от его диаметра D

Видно, что сигнал H_s от ферромагнитного образца монотонно нарастает с ростом его диаметра D , но в значительной степени зависит и от проницаемости его материала μ .

Можно заметить, что при малых значениях проницаемости материала арматуры градуировочная кривая близка к параболической, в то время как при больших значениях μ она близка к линейной. Такое различие можно объяснить изменением соотношения между про-

нищаемостью материала арматуры и проницаемостью, зависящей от формы намагничиваемого участка при изменении диаметра.

Не подлежит сомнению, что сигнал H_s зависит и от расстояния Z , то есть от глубины размещения ферромагнитной арматуры под поверхностью проверяемой конструкции.

Таким образом, мы убедились в принципиальной возможности контролировать изменение длины и диаметра арматуры рассматриваемым электромагнитным устройством.

5. Заключение

Предложена модель поискового электромагнитного устройства для контроля коррозионного изменения диаметров арматуры в железобетонных конструкциях магнитным способом при одностороннем доступе. Выполнено численное моделирование предложенного устройства в магнитостатическом варианте. В результате модельного исследования определены эффективные параметры, позволяющие оценить технические возможности для практической реализации устройства. Достоинствами предложенного устройства являются его малая масса, малое энергопотребление и простота использования. Моделирование показало принципиальную возможность реализации предложенной конфигурации устройства для контроля изменения диаметров арматуры. Можно предположить, что использование для намагничивания арматуры не постоянного, а переменного поля определенной частоты или нескольких частот одновременно повышает технические возможности данного устройства.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

Литература

1. Гулунов А. В. Методы и средства НК бетона и железобетонных изделий // В мире неразрушающего контроля. – 2002. – № 2 (16). – С. 24–25.
2. Pudov V. I. Electromagnetic devices for assessment of the state of reinforcement element in reinforced-concrete structures // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2006. – Vol. 42. – P. 369–377. – DOI: 10.1134/S1061830906060039.
3. Определение диаметра и толщины арматуры железобетонных изделий с пространственной структурой / А. А. Литвиненко, Ю. Я. Реутов, В. В. Дякин, М. Л. Дударев // Дефектоскопия. – 1995. – № 9. – С. 63–70.
4. Зацепин Н. Н., Гусев А. П., Пушкин С. Г. Способ измерения толщины защитного слоя бетона и диаметра арматуры строительных конструкций и устройство для его осуществления: а.с. 1243479 СССР. – 1994. – Бюл. № 23.
5. Зацепин Н. Н., Гусев А. П., Пушкин С. Г. Способ измерения толщины защитного слоя бетона и диаметра арматуры строительных конструкций и устройство для его осуществления : а.с. 1408948 СССР. – 1994. – Бюл. № 22.
6. Альбом усовершенствованных железобетонных конструкций для капитального ремонта жилых домов. ЛНИИ АКХ. – Л. : Стройиздат, 1988. – 302 с.
7. Кандаев В. А., Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Бучельникова О. С. Устройство для определения количественного состава продуктов коррозии арматуры на труднодоступных поверхностях железобетонных изделий : пат. 167680 РФ. – 2016. – Бюл. № 1.
8. Garcia-Martin J., Gomez-Gil J., Vazquez-Sanchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing // Sensors. – 2011. – Vol. 11. – P. 2525–2565. – DOI: 10.3390/s110302525.
9. Бутырин П. А., Дубицкий С. Д., Коровкин Н. В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля // Электричество. – 2014. – № 10. – С. 66–71.

10. Reutov Yu. Ya. A peculiarity of the magnetization of a ferromagnet by an alternating field // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2020. – Iss. 6. – P. 35–47 – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.6.035-047. – URL: http://dream-journal.org/issues/content/article_313.html