

**В. Е. Пониматкин, С. Г. Шпилева, В. А. Гоглев
В. И. Бурмистров, А. А. Попов**

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАДИОЧАСТОТНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

74

Работа относится к области прикладной электродинамики и посвящена усовершенствованию передающих антенных систем, используемых в радиочастотных методах исследования вещества. Функционирование поисковых и иных устройств в дистанционном режиме накладывает определенные условия на параметры передающих контуров, которые должны учитываться при их построении. Намечены пути оптимизации ряда конструктивных характеристик передающих антенных систем, что позволит повысить эффективность работы радиотехнических комплексов, используемых для обнаружения и анализа объектов, находящихся в объеме поликристаллических веществ.

This work is related to the field of applied electrodynamics and is devoted to the improvement of transmitting antenna systems used in radio frequency methods of substance research. The operation of search and other devices in remote mode imposes certain conditions on the parameters of transmitting contours, which must be taken into account when building them. The authors outline ways to optimize a number of design characteristics of transmitting antenna systems, which will increase the efficiency of radio engineering systems used for detecting and analyzing objects that are in the volume of polycrystalline substances.

Ключевые слова: антенная система, многосекционная катушка индуктивности, эквивалентное сопротивление, дальность распространения, возбуждение сигналов ядерного резонанса, обнаружение объектов в диэлектрических средах.

Keywords: antenna system, multi-section inductor, equivalent resistance, propagation range, excitation of nuclear resonance signals, detection of objects in dielectric substances.

Радиотехнические устройства, обеспечивающие электромагнитное воздействие на диэлектрические среды с целью определения их физико-химических свойств [1], как правило, содержат типовой набор основных элементов: систему управления, генератор переменной частоты, передающий и приемный радиочастотные тракты с электромагнитными контурами, анализатор спектра и пр. Данная работа посвящена усовершенствованию конструктивных параметров антенной системы, обеспечивающей радиочастотную накачку образца или его выделенной области, которая является, в данном случае, объектом контроля (поиска) [2; 3]. Несмотря на большое число публикаций, посвященных аналогичным проблематикам [2; 4–7], значительные затруд-



нения, возникающие при построении такого рода излучателей, остаются нерешенными. Частично это вызвано физическими явлениями, сопровождающими процесс создания переменных электромагнитных полей в неоднородных поликристаллических средах, частично — особенностями излучения электромагнитных волн на частотах поиска.

Очевидно, что ход физических процессов в веществе при электромагнитном воздействии существенно зависит от частоты возбуждения. В нашем случае радиочастотный спектр, определяемый спецификой практических приложений метода, может составлять $0,01 \div 10$ МГц (то есть излучатель должен уверенно работать в диапазоне от метрических до декаметровых волн). Уровень атмосферных и промышленных помех на этих частотах достаточно высок, что существенно затрудняет работу систем обнаружения. Открытые электромагнитные контуры указанных диапазонов, работающие в режиме собственной длины волны [3], велики и громоздки и в нашем случае непосредственно использоваться не могут.

В качестве источника переменного магнитного поля, как правило, применяются катушки индуктивности типа соленоида или рамочные излучатели [2; 4–8]. С учетом особенностей функционирования таких конструкций существенную проблему представляет неравномерность их входного сопротивления, влияющего на мощность излучения в рабочей полосе частот. Причем входное сопротивление антенн указанных диапазонов $Z_A = R_A + jX_A$ имеет комплексный (в основном емкостный) характер. Здесь R_A — полное активное входное сопротивление; X_A — полное реактивное входное сопротивление антенны. При этом антенна выполняет относительно генератора функцию нагрузки, потребляющей мощность, часть которой P_Σ расходуется на электромагнитное излучение, а часть — на повышение температуры проводников, наведение поляризации в конструктивных элементах, токи утечки и т. п.

Сопротивление излучения определяется как $R_\Sigma = P_\Sigma / I_\Pi^2$, где I_Π — максимальный ток (ток пучности в антенне). Соответственно, для повышения КПД антенны следует увеличивать R_Σ относительно величины сопротивления потерь. В свою очередь, в рассматриваемом диапазоне сопротивление излучения оценивается посредством действующей длины антенны следующим образом: $R_\Sigma = 1600(l_D / \lambda)$. Учитывая, что характеристики подобных антенных систем в общем случае имеют ярко выраженный резонансный характер $2\Delta f = (4/\pi)f_0(R_A/W_A)$, важно обеспечить минимальную зависимость их импеданса от частоты.

Две последние задачи могут быть реализованы посредством оптимизации эквивалентного сопротивления индуктивной части передающего контура в рабочем диапазоне частот. Для расчетов используем программные пакеты *AutoCAD* и *MMANA-GAL*. Начнем рассматривать вариант облучающей системы на примере односекционной цилиндрической катушки (рис. 1). Определим величину ее эквивалентного сопротивления R между клеммами «а» и «б» в зависимости от количества витков для диапазона частот 10 кГц \div 10 МГц.

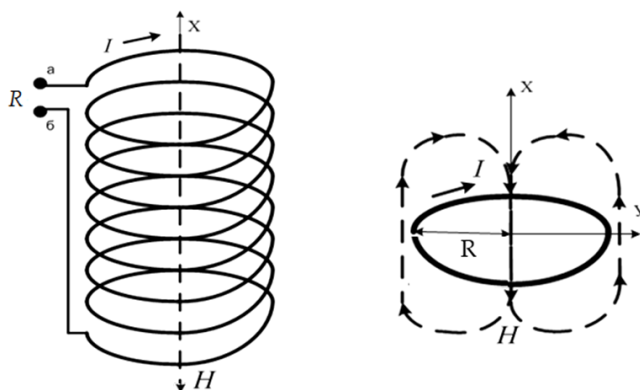


Рис. 1. Схематическое изображение индуктивной части передающего контура, характеризуемой эквивалентным сопротивлением R , и структура электромагнитного поля, создаваемого его одиночным витком

На рисунке 2 представлены графики зависимости эквивалентного сопротивления R контура между клеммами «а» и «б» от частоты в пределах указанного диапазона при разных параметрах катушек.

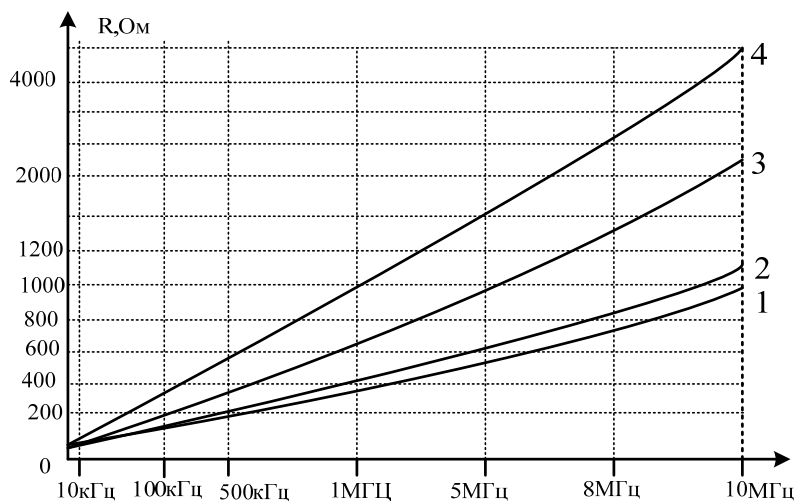


Рис. 2. Графики зависимости эквивалентного сопротивления R катушки от частоты при разных конструктивных параметрах

График 1 характеризует эквивалентное сопротивление катушки со следующими параметрами: внешний диаметр — 5 см; длина — 5 см; количество витков — 25; радиус проводника — 1 мм; материал — алюминий. Из графика следует, что в диапазоне от 10 кГц до 10 МГц импеданс входного сопротивления линейно возрастает от 0,87 до 909,3 Ом. График 2 отображает сопротивление катушки с параметрами: внешний диаметр — 5 см; длина — 5 см; количество витков — 25; радиус провод-



ника – 1 мм; материал – медь. Как следует из графика, в диапазоне от 10 кГц до 10 МГц импеданс катушки линейно возрастает от 0,87 до 1109,3 Ом. Очевидно, что изменение материала проводника не повлияло на значение импеданса. График 3 характеризует сопротивление катушки с параметрами: внешний диаметр – 5 см; длина – 10 см; количество витков – 40; радиус проводника – 1,25 мм; материал – медь. Как видим, импеданс катушки линейно возрастает до 2,27 кОм. Очевидно, что увеличение количества витков с 25 до 40 приводит к увеличению импеданса в среднем в 2,3 раза. График 4 отображает сопротивление катушки с параметрами: внешний диаметр – 5 см; длина – 10 см; количество витков – 50; радиус проводника – 1,0 мм; материал – медь. Соответственно, в диапазоне от 10 кГц до 10 МГц импеданс входного сопротивления линейно возрастает от 3,0 Ом до 4 кОм. Увеличение количества витков с 40 до 50 приводит к увеличению импеданса в среднем в 2,5 раза. Из проведенного анализа следует, что использование односекционных катушек не обеспечивает необходимой величины входного сопротивления.

Положим, что число секций катушки равно двум (рис. 3).

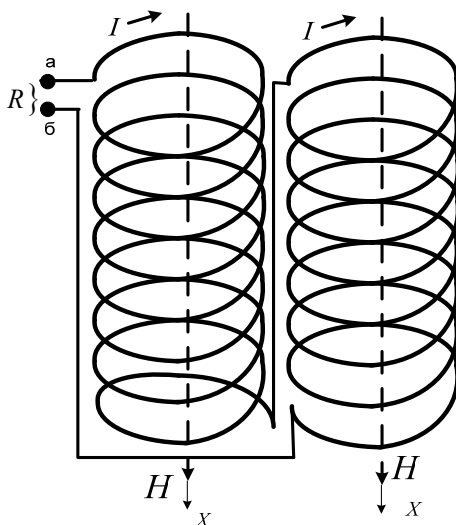


Рис. 3. Схема двухсекционной катушки облучающей системы

Расчет двухсекционной катушки с указанными параметрами каждой из секций (внешний диаметр – 5 см; длина – 10 см, количество витков – 40; радиус проводника – 1,25 мм; материал – медь) показывает, что в диапазоне 10 кГц ÷ 10 МГц импеданс входного сопротивления линейно возрастает от 0,9 Ом до 4,6 кОм. Аналогичным образом можно рассчитать катушку, составленную из трех и четырех секций. Результаты, полученные в последнем случае при совместном использовании четырех антенн и указанных параметрах катушек (диаметр – 5 см; высота – 10 см; количество витков – 40; радиус провода – 1,25 мм; материал – медь), представлены на рисунке 4.

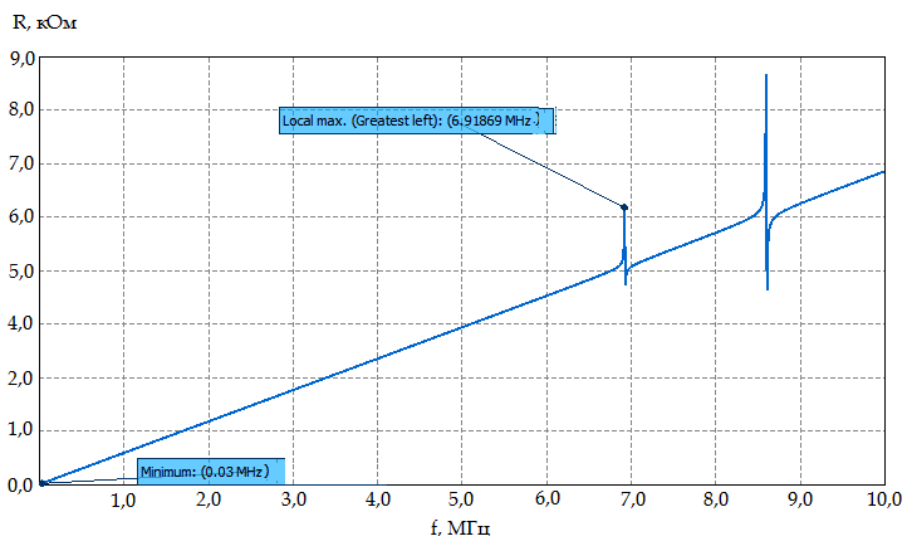


Рис. 4. Зависимость импеданса антенны, составленной из четырех секций, от частоты в диапазоне 10 кГц – 10 МГц

Как видим, график имеет два локальных резонансных максимума: на частотах 6,9 и 8,6 МГц. Исходя из данных последнего варианта, наиболее целесообразным является построение облучателя по принципу совместно работающих четырех катушек возбуждения (рис. 5), что позволит создать необходимые условия для возбуждения сред магнитными излучателями при наименьших потерях за счет равномерного распределения сопротивления катушек в диапазоне частот от 10 кГц до 10 МГц.

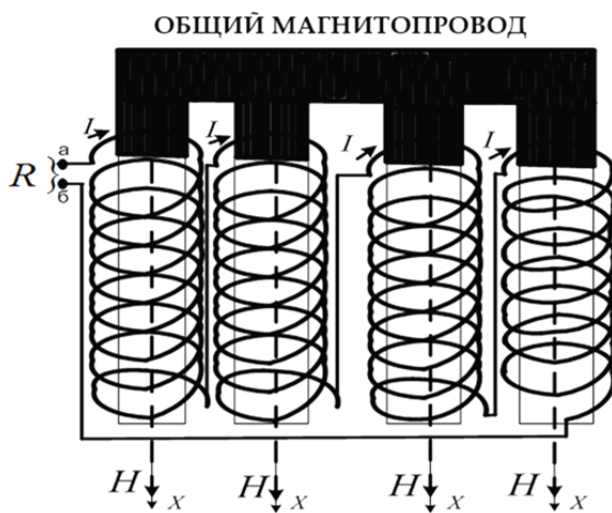


Рис. 5. Конструктивное исполнение облучающей системы на основе четырех идентичных катушек



Распределение уровня магнитной составляющей поля H , ориентированной вдоль оси X относительно центра возбуждающей системы [7], зависит от величины тока I в витках, числа витков W и геометрических размеров катушки контура (b — ее сечения; R — среднего радиуса витков) и определяется соотношением:

$$H_{x,0} = 0,89918 \frac{I \cdot W}{R} \cdot \left[1 - \frac{b^2}{15R^2} - 0,144 \left(8 \cdot \frac{x^4}{R^4} \right) \right].$$

Для возбуждения в веществе сигнала ядерного резонанса с приемлемой интенсивностью необходимо обеспечить доведение достаточной электромагнитной энергии до элемента возбуждения, находящегося в среде с неизвестными магнитными и диэлектрическими параметрами. При этом энергия электромагнитной волны, излученной в воздушном пространстве, занимаемом излучателем, должна пройти через границу раздела сред. С наименьшими потерями в поликристаллическую среду проникает нормально поляризованная электромагнитная волна [3]. Следовательно, передающая антенная система должна возбуждать излучение преимущественно такой поляризации.

Целесообразно оценить предельную дальность распространения магнитной составляющей поля от источника возбуждения в виде многовитковой катушки на рисунке 1. Увеличение числа витков катушки существенно не изменяет конфигурацию поля за ее пределами по сравнению с одиночным витком.

Значение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля внутри и за пределами аналогичной облучающей системы (рис. 6) определяется выражением

$$H = 0,89918 \frac{I \cdot W}{R} \cdot \left[\begin{array}{l} 1 - \frac{b^2}{15R^2} - 0,042667 \left(2 \frac{x^2}{R^2} - \frac{y^2}{R^2} \right) \left(36 \frac{a^2}{R^2} - 31 \frac{b^2}{R^2} \right) - \\ - 0,144 \left(8 \cdot \frac{x^4}{R^4} - 24 \frac{x^2 y^2}{R^4} + 3 \frac{y^4}{R^4} \right) \end{array} \right],$$

где H — горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля, А/м; I — ток в катушке, А; W — число витков катушки; R, d, a, b — линейные размеры системы, обозначения которых показаны на рисунке 6; x, y — декартовы координаты.

На рисунке 7 представлены результаты расчетов относительного ослабления напряженности магнитного поля вдоль оси x при различной длине обмоток b : график 1 — при $b=R/2$; график 2 — при $b=R/4$; график 3 — при $b=R/8$. Графики позволяют оценить связь между геометрическими размерами катушки и размерами рабочей области для выполнения натуральных исследований источников вторичного излучения. С целью увеличения зоны действия магнитной составляющей за пределами излучающей катушки целесообразно использование сердечников из магнитных материалов. Учитывая, что в данном случае катушка 2, размещенная на магнитопроводе 1 (рис. 8, а) будет обеспечивать преимущественно параллельно поляризованную волну и лишь в нижней части структуры — нормально поляризованную, следует изменить форму магнитопровода на U-образную (рис. 8, б).

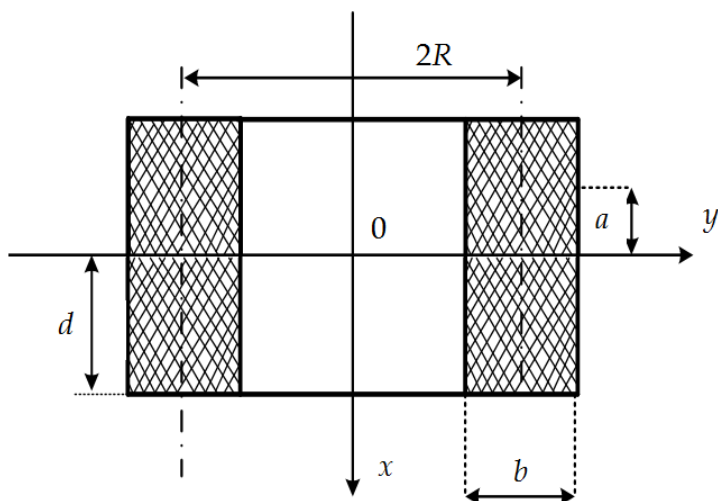


Рис. 6. Схема многовитковой цилиндрической катушки для расчета параметров ее электромагнитного воздействия

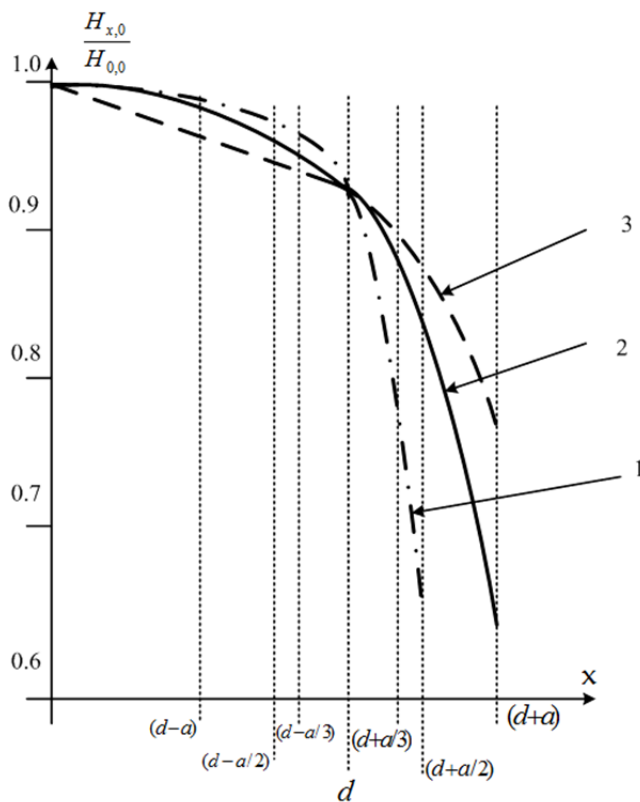


Рис. 7. Зависимость величины относительной напряженности магнитного поля вдоль оси x облучающей катушки

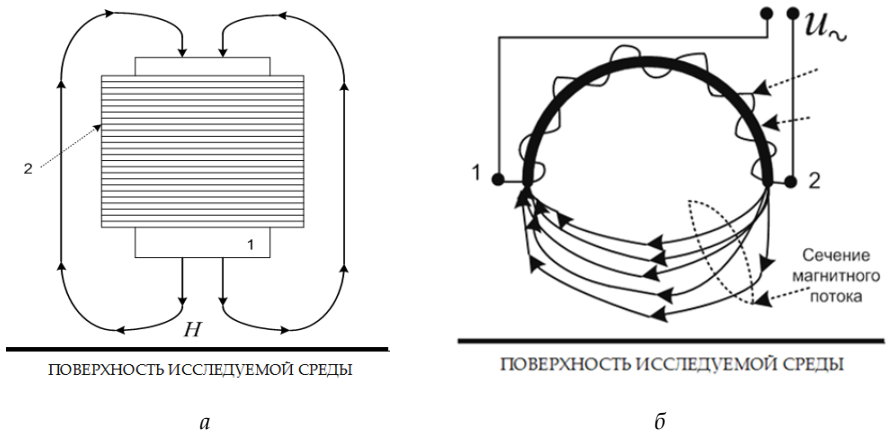


Рис. 8. Варианты облучающих катушек на основе магнитопроводов:
 а – стержневого; б – U-образного

Как видно из рисунка 8, структура магнитного потока катушки на U-образном сердечнике неоднородна. Поле изменяется от параллельно поляризованной волны в области сердечника катушки до нормально поляризованной волны в центральной части магнитного потока. Следовательно, процессом формирования необходимой поляризации волны можно управлять с помощью придания магнитопроводу специальной формы.

На рисунке 9 представлены варианты облучающих систем, обеспечивающих создание нормально поляризованной волны для исследования поликристаллических сред методом ядерного резонанса. Модель, показанную на рисунке 7, б, можно считать наилучшей с точки зрения возбуждения магнитной составляющей поля в объеме исследуемой среды. Конфигурация магнитопровода позволяет создавать магнитное поле требуемой поляризации за пределами облучающей системы.

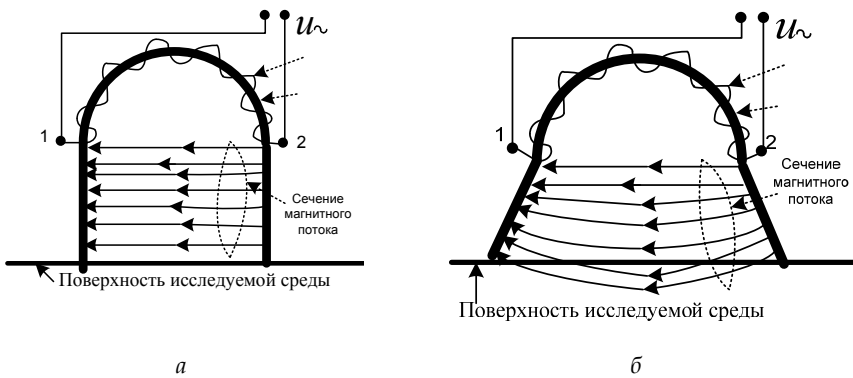


Рис. 9. Варианты облучающих катушек на основе видоизмененных U-образных магнитопроводов:
 а – первый вариант; б – второй вариант



Таким образом, рассмотренные вопросы электродинамики передающих электромагнитных контуров благодаря обоснованию модели с оптимальными параметрами позволят повысить эффективность работы радиотехнических комплексов, используемых для обнаружения и анализа объектов, находящихся в объеме поликристаллических веществ.

Список литературы

1. Гомонов А.Н., Духан Е.И., Звездинский С.С. и др. Магнитометрические средства обнаружения. Теория и практика построения. М., 2013.
2. Устройство обнаружения сигналов ядерного квадрупольного резонанса : пат. 2697023 Рос. Федерация. №2018142728 ; заявл. 08.08.2019.
3. Устройство исследования электромагнитного поля вторичных излучателей : пат. 2538318 Рос. Федерация. №2013114517 ; заявл. 19.11.2014.
4. Устройство контроля электромагнитного поля вторичных излучателей : пат. 2527315 Рос. Федерация. №2013108753 ; заявл. 08.07.2014.
5. Белый Ю.И., Поценья О.А., Семин Г.К. Аппаратура для борьбы с терроризмом на основе эффекта ЯКР // Специальная техника. 2002. №2. С. 22–31.
6. Гречишкин В.С., Шpileвой А.А., Бурмистров В.И. О возможности применения ЯКР для обнаружения взрывчатых веществ на теле человека // Специальная техника. 2004. №5. С. 29–35.
7. Синявский Н.Я., Шpileвой А.А. Особенности косвенной регистрации сигналов ядерного квадрупольного резонанса взрывчатых веществ // Радиотехника. 2009. №2. С. 131–134.
8. Miller J.B., Barrall G.A. Explosives Detection with Nuclear Quadrupole Resonance // American Scientist. 2005. Vol. 93. P. 50–57.

Об авторах

Виктор Ефимович Пониматкин – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Светлана Геннадьевна Шpileвая – канд. пед. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: SSHpilevaya@kantiana.ru

Владислав Алексеевич Гоглев – студент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Валерий Иванович Бурмистров – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: VBurmistrov@kantiana.ru

Андрей Алексеевич Попов – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: popandro@gmail.com



The authors

Dr Viktor E. Ponimatkin, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Dr Svetlana G. Shpilevaya, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SSHpilevaya@kantiana.ru

Vladislav A. Goglev, Undergraduate Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Valery I. Burmistrov, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VBurmistrov@kantiana.ru

Andrey A. Popov, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: popandro@gmail.com