

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЕЙ В МЕДИЦИНСКИХ ЦЕЛЯХ

© 2023 г. Ю.Я. Реутов¹, В.И. Пудов^{1,**}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *reutov@imp.uran.ru; **pudov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 05.10.2023; после доработки 26.10.2023
Принята к публикации 03.11.2023

Показано, что при выполнении хирургических операций по извлечению инородных металлических частиц из тела человека целесообразно использовать металлодетекторы различных типов: феррозондовые — для локализации ферромагнитных частиц, вихретоковые — для локализации неферромагнитных металлических частиц. Чувствительность медицинской аппаратуры должна быть достаточной для обнаружения мелких ферромагнитных осколков и частиц с расстояния не менее 10 мм. Показана целесообразность предварительного намагничивания постоянным магнитом области локализации инородных ферромагнитных тел. Приведены способы настройки металлодетекторов. Показана необходимость минимизации посторонних электромагнитных полей в операционном помещении.

Ключевые слова: металлические осколки, свинец, металлодетекторы, полюсоискатель, феррозонд, вихретоковый датчик.

EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF METAL DETECTORS FOR MEDICAL PURPOSES

Yu.Ya. Reutov¹, V.I. Pudov¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Sofia Kovalevskaya, st. 18, Ekaterinburg, 620108, Russia
E-mail: *reutov@imp.uran.ru, **pudov@imp.uran.ru

It is shown that when performing surgical operations to remove foreign metal particles from the human body, it is advisable to use metal detectors of various types: flux-gate detectors for localizing ferromagnetic particles, eddy current detectors for localizing non-ferromagnetic metal particles. The sensitivity of medical equipment must be sufficient to detect small ferromagnetic fragments and particles from a distance of at least 10 mm. The feasibility of preliminary magnetization of the search area with a strong permanent magnet is shown. Methods for setting up metal detectors are given. The need to minimize extraneous electromagnetic fields in the operating room is shown.

Key words: metal fragments, lead, metal detectors, pole detector, fluxgate, eddy current sensor.

DOI: 10.31857/S0130308223120072, EDN: XIMJOQ

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] рассматривается возможность применения феррозондовой аппаратуры для поиска металлических частиц в теле человека при их хирургическом извлечении. Авторы указывают, что поиск в процессе хирургической операции намагниченных металлических частиц предпочтительнее поиска по результатам просвечивания лучами Рентгена. Преимущества заключаются в простоте, дешевизне и полной безвредности процедуры как для пациента, так и для медицинского персонала.

Следует заметить, что ручные досмотровые металлодетекторы, выпускаемые в значительных количествах, успешно используются [2—9] во врачебной практике для отслеживания продвижения по пищеварительному тракту металлических предметов, заглатываемых преимущественно детьми. В подавляющем большинстве случаев эти предметы беспрепятственно продвигаются по пищеварительному тракту и металлодетекторы здесь применяются для мониторинга такого продвижения вместо небезопасного рентгеновского обследования. Достижимой в таких случаях точности локализации (десятки миллиметров) вполне достаточно.

Совсем другие требования по точности локализации предъявляются в случае применения поискового прибора для коррекции действий хирурга при хирургическом извлечении инородных металлических частиц из тела человека. Инородные частицы зачастую располагаются вблизи скопления кровеносных сосудов, нервных сплетений в труднодоступных органах человека. В этих случаях для проведения благоприятных операций необходимо применять по возможности поисковые дат-

чки малых размеров, но с высокочувствительными диагностическими параметрами. В частности, для глазной хирургии рабочий конец датчика должен быть не более 3 мм и длиной 30—50 мм. В то же время, размеры этого датчика должны обеспечивать удобство удержания его в руке, облаченной в хирургическую перчатку. Чувствительность медицинского поискового прибора должна быть достаточной для обнаружения инородного предмета с расстояния (в зависимости от размеров предмета) в 10—50 мм. Очевидно, что для выполнения таких требований необходим специализированный поисковый прибор.

ПОИСК ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОСКОЛКОВ И ЧАСТИЦ

Ферромагнитные (стальные, железные) частицы составляют не менее половины металлических частиц, оказывающихся в человеческом теле. Например, небрежно хранившиеся швейные иглы, обломки медицинского инструмента, использовавшегося в ходе хирургической операции, осколки слесарного инструмента, частицы стружки при обработке металла резанием и многое другое. Ферромагнитные частицы обладают свойством намагничиваться в естественном геомагнитном или искусственно созданном магнитном поле, вследствие чего сами создают вокруг себя магнитное поле, по которому и могут быть найдены с помощью приборов, реагирующих на постоянное магнитное поле. При этом индукция магнитного поля, создаваемого частицей, довольно резко убывает с увеличением расстояния до нее. По этой причине, перемещая чувствительный датчик магнитного поля в окрестности предполагаемого размещения магнитной частицы, по резкому возрастанию сигнала можно констатировать факт приближения к частице.

Поиск частицы по создаваемому ею магнитному полю приходится осуществлять в присутствии постоянно имеющегося в земных условиях геомагнитного поля, обладающего [10] вблизи экватора индукцией 33 микротесла, а вблизи земных полюсов и того больше — 66 микротесла. При этом индукция поля самой частицы составляет обычно не более нескольких микротесла. По этой причине, если осуществлять поиск непосредственно по измерениям индукции магнитного поля, то достаточно четкий сигнал будет получен лишь тогда, когда датчик магнитометра окажется в непосредственной близости к объекту поиска, что лишает смысла данную манипуляцию. Путь к решению этого противоречия давно известен и заключается он в использовании для поиска намагниченной частицы не индукции поля, создаваемого ею в окружающем пространстве, а пространственной неоднородности этой индукции (градиента). Дело в том, что естественное магнитное поле Земли обладает высокой степенью однородности. В средних широтах в точках на поверхности Земли, отстоящих друг от друга на километр, индукция земного поля различается [10] не более чем на 25 нанотесла (0,025 микротесла), в то время как в окрестности металлической частицы, подлежащей обнаружению (отысканию), неоднородность индукции ее поля может составлять десятки и сотни нанотесла в точках пространства, отстоящих всего на сантиметр друг от друга.

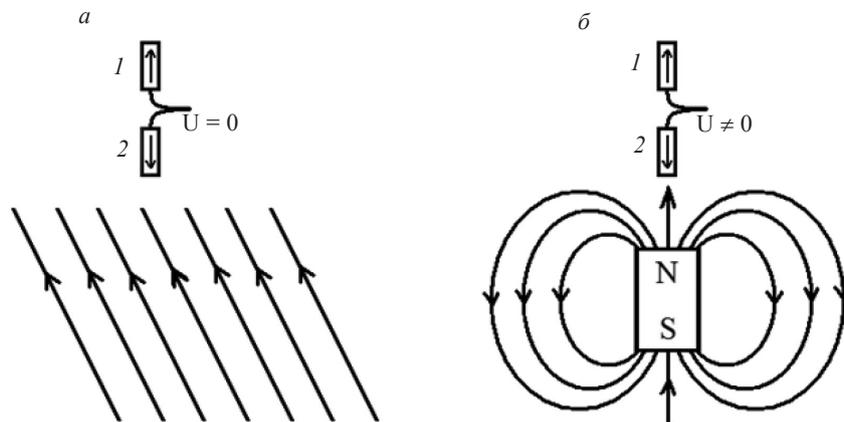


Рис. 1. Воздействие на сенсоры (1, 2) однородного геомагнитного поля (а) и неоднородного поля (б) намагниченного объекта.

Если использовать поисковый датчик, состоящий из двух жестко скрепленных идентичных сенсоров индукции магнитного поля, расположенных как показано на рис. 1, и вычитать их вы-

ходные сигналы друг из друга, то в случае помещения датчика в однородное магнитное поле (рис. 1а) мы получим на его выходе нулевое напряжение, поскольку на сенсоры будут действовать одинаковые магнитные поля.

В то же время, при расположении датчика вблизи намагниченной частицы (рис. 1б) на его сенсоры будут действовать поля с различающимися индукциями, а значит и результат взаимного вычитания их сигналов не будет равен нулю.

Из теории магнетизма следует, что с приближением к намагниченной частице возрастает не только индукция ее магнитного поля, но и неоднородность этого поля — градиент. По указанным причинам в земных условиях для поиска намагниченных частиц выгоднее использовать именно эту неоднородность (градиент), а не само поле. Градиент индукции магнитного поля принимает наибольшие значения у полюсов намагниченного металлического предмета. По этой причине приборы, применяемые нами для отыскания намагниченных частиц по неоднородности их постоянного магнитного поля, называются полюсоискателями или градиентометрами.

Известной фирмой F. FOERSTER (Reutlingen, Germany) еще в середине двадцатого века начали выпускаться полюсоискатели, предназначенные для контроля размагниченного состояния ответственных промышленных деталей и изделий. Размагниченное изделие не должно иметь на своей поверхности магнитных полюсов, в чем и позволяет убедиться его обследование полюсоискателем. Прибор фирмы FOERSTER состоял из небольшого электронного блока и соединенного с ним гибким кабелем поискового датчика, с размещенным внутри него феррозондовым преобразователем неоднородности магнитного поля в электрический сигнал. Внешне датчик представлял собой пластиковый цилиндр с наибольшим диаметром около 12 и длиной около 120 мм. Из одного торца цилиндра выходил соединительный кабель, а другим (диаметром 6 мм) датчик можно было подносить к обследуемому объекту. При приближении поискового торца датчика к полюсу намагниченной частицы стрелочный указатель прибора показывал соответствующее отклонение. Именно такая модель прибора на первых порах и была применена для поисков намагниченных металлических частиц при их хирургическом извлечении.

Важно отметить, что в работе [11] впервые было предложено предварительно намагничивать подлежащую удалению частицу кратковременным поднесением к поверхности тела пациента в месте ее предполагаемой локализации сильного постоянного магнита. Такая процедура существенно увеличивала реакцию поискового прибора на приближение датчика к частице, подлежащей извлечению, что способствовало успешности операции.

Можно указать два крайних случая ориентации вытянутой намагниченной частицы относительно поверхности человеческого тела, в котором она находится.

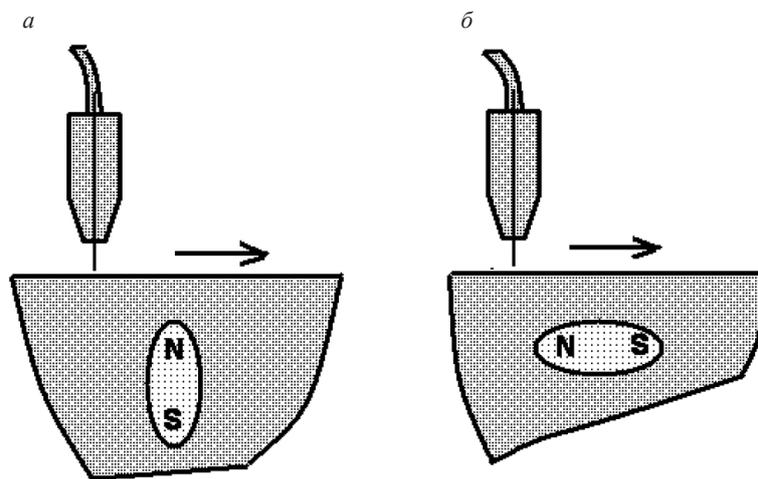


Рис. 2. Варианты ориентации намагниченной частицы относительно поверхности человеческого тела.

В первом случае (рис. 2а) частица своей длинной стороной перпендикулярна к поверхности тела, а во втором (рис. 2б) она ориентирована вдоль нее. Тогда, при поступательном перемещении поискового датчика по поверхности тела (на рис. 2 показано стрелками) получаем два возможных графика изменений показаний нашего прибора.

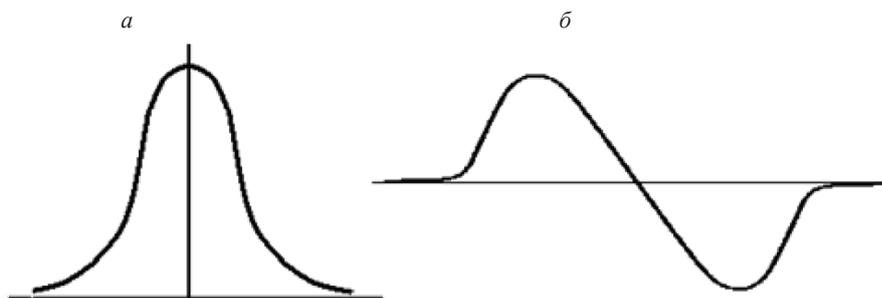


Рис. 3. Изменение показаний поискового прибора при перемещении поискового датчика вдоль поверхности человеческого тела.

В случае вертикальной ориентации намагниченной частицы это будет график, представленный на рис. 3а, а при горизонтальной, соответственно, рис. 3б. В первом случае максимум показаний поискового прибора будет наблюдаться непосредственно над верхним полюсом намагниченной частицы. Во втором же случае места наблюдения разнополярных максимумов связаны с расположением полюсов частицы не столь однозначно. Однако по мере приближения датчика к частице (заглубления в тело) положение максимумов будет все точнее приближаться к ее полюсам.

В случае промежуточной, то есть наклонной ориентации частицы (см. рис. 3б), один из максимумов будет заметно больше другого по абсолютному значению. На больший из максимумов (при отсутствии медицинских противопоказаний) и следует ориентироваться в этом случае.

Поступательно перемещая поисковый датчик вдоль поверхности тела пациента, сначала в одном направлении, а затем перпендикулярно ему, следует наметить место первоначального надреза. После неглубокого надреза следует ввести поисковый датчик (помещенный в стерильную оболочку) в него и, слегка перемещая его вдоль поверхности тела пациента, найти направление, вдоль которого показания прибора возрастают. В этом направлении и нужно корректировать дальнейшее направление разреза. Путем последовательных уточнений обязательно удастся выйти на объект поиска.

Максимальная дистанция, с которой посредством полюсоискателя можно индцировать объект поиска, ограничивается степенью совершенства изготовления поискового датчика, состоящего из двух магниточувствительных сенсоров. Дело в том, что при перемещениях датчика вдали от намагниченных частиц (объектов поиска) полюсоискатель дает ложные показания [12, 13], обусловленные воздействием на сенсоры однородного геомагнитного поля (H). Объясняется это воздействие двумя причинами (см. рис. 4 и 5).

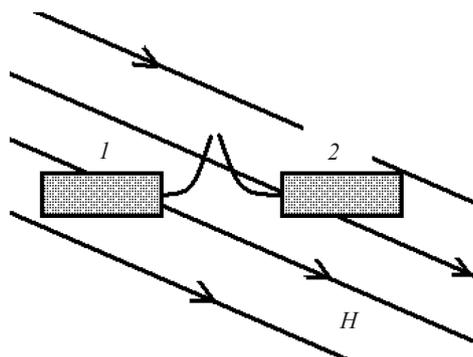


Рис. 4. Влияние неидентичности коэффициентов преобразования обмоток (катушек) сенсоров 1, 2 магнитного поля.

Во-первых, взаимно параллельные сенсоры могут иметь не полностью идентичные коэффициенты преобразования индукции поля в напряжение. В результате в идеально однородном Земном поле на выходе датчика напряжение не будет равно нулю, и его величина будет изменяться при

изменениях ориентации датчика, создавая иллюзию наличия намагниченной ферромагнитной частицы или осколка (рис. 4).

Во-вторых, пермаллоевые сердечники сенсоров могут быть не совсем параллельны друг другу (например, как показано на рис. 5) при идеальной идентичности коэффициентов преобразования. В этом случае, вдоль их осей будут действовать компоненты однородного геомагнитного поля (H), которые будут не вычитаться друг из друга, а суммироваться. При поворотах датчика вокруг продольной оси на его выходе будет наблюдаться ложное напряжение, имитирующее наличие намагниченной частицы.

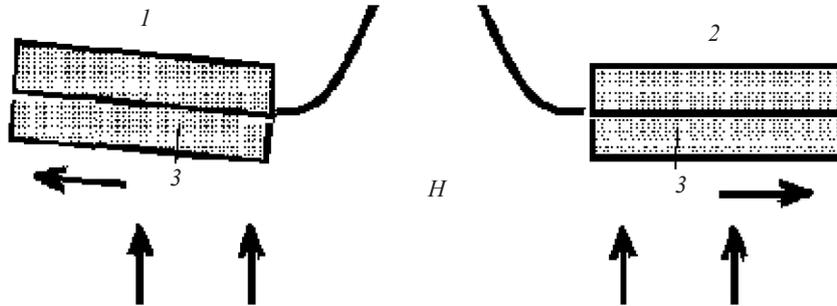


Рис. 5. Влияние взаимной непараллельности сердечников при максимальной чувствительности сенсоров датчика: 1, 2 — обмотка сенсоров; 3 — пермаллоевые сердечники.

В реальном поисковом датчике, в той или иной степени, имеют место оба указанных несовершенства, что вызывает ложные показания при его перемещениях, ограничивая дистанцию, с которой применение данной методики поиска становится оправданным. Свести к минимуму указанную погрешность можно тщательной юстировкой сенсоров в датчике, а также, перемещая поисковый датчик поступательно-параллельно самому себе и избегая его вращения вокруг продольной оси.

Из магнитостатики известно, что степень воздействия намагниченной частицы на датчик полюсоискателя приблизительно обратно пропорциональна третьей степени дистанции между ним и магниточувствительным элементом датчика [10]. Например, если дистанция увеличилась в два раза, то воздействие станет меньше в 8 раз. С другой стороны, в работе [14] показано, что при равных дистанциях ферромагнитная частица воздействует на концевой сенсор поискового датчика приблизительно пропорционально третьей степени своей длины. Отсюда следует, что если швейная игла длиной 50 мм обнаруживается полюсоискателем с расстояния 100 мм, то стальной гвоздик длиной 10 мм будет обнаружен им с расстояния приблизительно в 20 мм.

В разработках авторов в качестве датчиков магнитного поля были использованы феррозонды на основе пермаллоевых сердечников диаметром 0,1 и длиной 4—10 мм. Это позволяет уменьшить



Рис. 6. Медицинский феррозондовый полюсоискатель ПФ-05.

диаметр конца поискового датчика, вводимого в хирургический разрез, до 3—5 мм, что недостижимо при использовании современных микроэлектронных сенсоров (например, магниторезистивных или холловских).

Такие модели полюсоискателей [15, 16] позволяют обнаруживать обломок швейной иглы длиной 21 мм с расстояния 134 мм, пистолетную пулю калибра 9 мм длиной 12 мм — с расстояния 70—75 мм, стальную частицу диаметром 1 и длиной 1,8 мм — с расстояния 23—25 мм.

ПОИСК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Рассмотренный способ поиска очень удобен и чувствителен, но он применим лишь в отношении ферромагнитных частиц и предметов. К сожалению, немалый процент диагностируемых инородных частиц приходится на цветные металлы. Для их поисков применяют адаптированные для этого известные вихретоковые металлодетекторы. Заметим, что еще в 1881 году изобретатель телефона Александр Белл безуспешно пытался применить созданный им примитивный металлодетектор для облегчения поиска пули в теле двадцатого президента США Дж. Гартфилда. В последующем, более совершенные металлодетекторы с переменным успехом применялись для подобных целей. Наиболее известным в семидесятые годы прошлого столетия являлся прибор фирмы Roper Hall. Существенным недостатком этого прибора являлись большие размеры поискового датчика, что обуславливало его сложность для использования в медицинских целях.

Разработана модель вихретокового датчика (рис. 7) [17], которая позволяет более эффективно применять вихретоковую диагностическую аппаратуру в медицинских целях.

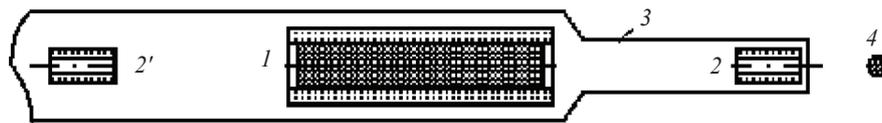


Рис. 7. Вихретоковый датчик для диагностики инородных тел из цветных металлов: 1 — намагничивающая цилиндрическая катушка с ферритовым сердечником; 2, 2' — приемные катушки; 3 — герметичный неметаллический корпус; 4 — объект поиска.

От электронного блока поискового устройства через кабель в намагничивающую катушку 1 с ферритовым сердечником подается гармонический переменный ток частотой 6—8 килогерц, в результате чего вокруг ферритового сердечника формируется переменное магнитное поле. Одинаковые приемные катушки 2 и 2', размещенные симметрично относительно ферритового сердечника, соединены последовательно-встречно и генерируемые ими, под действием намагничивающего поля, переменные напряжения в значительной степени взаимно компенсируются. В результате, при отсутствии вблизи датчика металлической частицы напряжение на его выходе близко к нулю. При появлении поблизости металлической частицы (объекта поиска) переменное магнитное поле ферритового сердечника вызывает в ней вихревые токи. Созданное этими токами переменное магнитное поле объекта поиска (поле переизлучения) воздействует на приемные катушки поискового датчика, вызывая появление на их зажимах переменных напряжений, когерентных с током в намагничивающей катушке. Благодаря тому, что приемные катушки датчика будут отстоять от объекта поиска на разных расстояниях, эти напряжения компенсируют друг друга лишь частично и на выходе поискового датчика появляется переменное напряжение полезного сигнала, являющееся мерой воздействия на датчик объекта поиска. Амплитуда этого напряжения (при прочих равных условиях) тем больше, чем ближе объект поиска к датчику. В электронном блоке поискового устройства это напряжение усиливается, отделяется от помех и, после детектирования, поступает на визуальный индикатор, показания которого тем больше, чем ближе объект поиска к торцевой части датчика. В зависимости от того, является объект поиска ферромагнитным или нет, он может усиливать поле ферритового стержня в своих окрестностях или ослаблять его. В результате отклонения визуального индикатора будут иметь различную полярность, что позволяет определять ферромагнитный (сталь, железо) или цветной (свинец, медь, олово, алюминий) обнаруженный материал. Это бывает важно, например, для выяснения целесообразности попыток извлечения инородного предмета из дыхательных путей ребенка посредством сильного постоянного магнита.

В работе [1] авторы уделили большое внимание выявлению варианта конструкции вихретокового датчика, обеспечивающего обнаружение инородного металлического объекта с наибольшей дистанции. Они справедливо подметили, что в случае, когда рамочные намагничивающая и приемная катушки размещаются внутри друг друга и в одной плоскости, максимальная дистанция обнаружения металлического объекта, как правило, не превышает диаметра намагничивающей катушки. Объясняется это тем, что в такой конструкции поле намагничивающей катушки в наибольшей степени воздействует на приемную, и это воздействие намного превышает поле переизлучения объекта поиска, воспринимаемое приемной катушкой, что затрудняет выделение последнего из суммарного воздействия. Выход здесь в оптимизации размещения намагничивающей катушки относительно приемной.

Указанный путь использован в поисковом датчике (см. рис. 7) [17]. Здесь намагничивающая катушка 1 длиной 28 мм и диаметром 16 мм с ферритовым сердечником 2 такой же длины отстоит от приемной катушки 3 длиной 9 мм на расстояние 30 мм (между серединами). По этой причине воздействие поля намагничивающей катушки (совместно с ферритовым сердечником) на приемную в данном случае сопоставимо с его воздействием на объект поиска, а не превышает его многократно, что облегчает выделение полезного сигнала. Благодаря этому, при внешнем диаметре приемной катушки 4 мм, pistolетная пуля калибром 9 и длиной 12 мм обнаруживается прибором [18] с расстояния 55 мм, алюминиевый шар диаметром 7 мм — с расстояния 41 мм, такой же шар диаметром 5 мм — с 26 мм, свинцовый шар (дробина) диаметром 5 мм — с 20 мм и медный стержень диаметром 3 мм и длиной 12 мм — с 26 мм.

Следует отметить ошибку, которую допустили авторы работы [1]. В предлагаемых ими датчиках приближения используются намагничивающие обмотки с длиной, существенно превышающей расстояние от ее торца до объекта поиска (на рис. 4 из [1] длина катушки составляет 80 мм). Между тем известно, что поле от кругового витка убывает пропорционально кубу расстояния до намагничиваемого объекта. По этой причине витки намагничивающей обмотки, отстоящие от объекта поиска на расстояние, в 1,5—2 раза превышающее дистанцию между ее торцом и объектом поиска, совершенно бесполезны. В нашем случае (см. рис. 7), длина обмотки мала по сравнению с расстоянием от нее до объекта поиска и вполне обоснована.

Наряду с гармоническим переменным током, в намагничивающую катушку поискового датчика можно подавать импульсный ток, как это сделано в работе [1]. В таком случае, в качестве полезного сигнала можно использовать напряжение на зажимах приемной катушки, появляющееся после выключения импульса намагничивающего тока вследствие переходных процессов в материале инородного предмета. При этом вторую приемную катушку 2' (см. рис. 4) можно исключить. Необходимо избегать применения такого способа поиска. В операционных помещениях имеется большое количество самых разнообразных электрических приборов, создающих интенсивные магнитные помехи. Поисковый прибор, использующий гармоническое намагничивающее поле, гораздо меньше восприимчив к магнитным помехам, по сравнению с использующим импульсное, что и позволяет отдать ему предпочтение, невзирая на его большую сложность.

Немаловажным является и вопрос обеспечения электробезопасности при пользовании поисковым прибором. В приборе, использующем переходный процесс (как в [1]), в момент выключения намагничивающего тока на выводах намагничивающей катушки возникает импульс напряжения в десятки и даже сотни вольт. Этот импульс присутствует в проводах, соединяющих датчик приближения с электронным блоком поискового прибора. В случае повреждения изоляции этих проводов возможно поражение электрическим током пациента или оперирующего хирурга. В приборе с использованием для намагничивания гармонического переменного тока, намагничивающая катушка настроена в резонанс с частотой тока намагничивания посредством конденсатора, соединенного с ней последовательно и размещенного в хорошо изолированном корпусе поискового щупа. По этой причине, несмотря на наличие на выводах намагничивающей катушки переменного напряжения почти в сотню вольт, на проводах, соединяющих поисковый щуп с электронным блоком, действует совершенно безопасное напряжение в несколько вольт.

В рабочем состоянии наибольшая индукция переменного магнитного поля создается катушкой поискового щупа на его цилиндрической поверхности, охватываемой рукой оперирующего хирурга. В приборе она не превышает 1 мТ, что гораздо меньше разрешенных значений.

Электрическая мощность, подводимая к поисковому щупу прибора, составляет менее 0,5 Вт и не вызывает его существенного нагрева.

В гораздо большей степени на работу прибора влияет нагрев приемной катушки 3 (см. рис. 7) при погружении конца поискового щупа в разрез тела пациента. Такой нагрев может иметь своим



Рис. 8. Вихретоковый металлоискатель для поисков в теле человека инородных частиц из цветных металлов.

следствием уход нуля поискового прибора. В устройстве такой уход компенсируется в любой момент нажатием специальной кнопки. Модель разработанного прибора представлена на рис. 8.

Во всех представленных поисковых приборах (как в полюсоискателях, так и в вихретоковых) используются два вида индикации полезного сигнала: визуальная и звуковая. Визуальная индикация применяется только аналоговая, поскольку оператору удобнее воспринимать изменение реального или виртуального отклонения, а не мелькание цифр. Цифровая индикация используется лишь как вспомогательная. Звуковая индикация осуществляется по изменению частоты щелчков, издаваемых встроенным в корпус прибора громкоговорителем. В отсутствие вблизи поискового датчика металлической частицы щелчки следуют с частотой в несколько герц, а при сильном сигнале их частота составляет 1—2 килогерца. Встроенный микрофон более удобен для оператора по сравнению с головными телефонами.

Следует отметить, что поисковый датчик вихретокового обнаружителя будет реагировать на появление вблизи него неферромагнитного металлического предмета несколько иным образом по сравнению с реакцией датчика полюсоискателя на ферромагнитные частицы (см. рис. 3). На рис. 9 показано, что если двигать вихретоковый датчик поступательно вдоль горизонтали (например, слева направо) над плоским проводящим диском, ориентированным вдоль горизонтальной плоскости (рис. 9а), то сигнал от него будет максимальным непосредственно над серединой объекта поиска. Происходит это потому, что переменное магнитное поле, создаваемое намагничивающей обмоткой щупа, вызывает в таком положении в предмете максимальные вихревые токи, поле которых в наибольшей степени воздействует на приемную катушку поискового щупа. Если же металлический диск ориентирован своей плоскостью, перпендикулярно плоскости рисунка (рис. 9б), то поле намагничивающей катушки будет вызывать в предмете максимальные вихревые токи несколько в стороне от оси симметрии щупа. Когда щуп расположен непосредственно над объектом поиска, его реакция на него минимальна. То же будет происходить, если плоский металлический диск и ось симметрии поискового щупа находятся в одной плоскости. Эти обстоятельства необходимо учитывать при пользовании вихретоковым поисковым прибором.

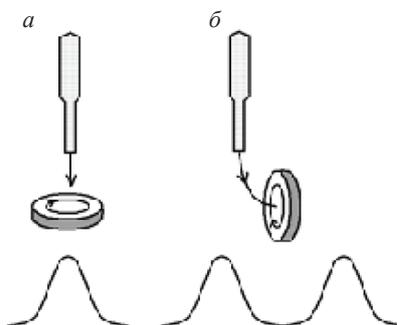


Рис. 9. Реакция прибора на перемещение поискового щупа при различных вариантах ориентации объекта поиска.

Как указывалось выше, первая попытка использования индукционного металлодетектора Александра Белла в медицине оказалась неудачной. Произошло это из-за влияния на поисковый прибор металлических деталей кровати, на которой лежал пациент. Это обстоятельство необходимо учитывать при организации подобных операций. Операционный стол должен быть немагнитным или с использованием толстой немагнитной подстилки, а сопутствующий инструмент (зажимы, ранорасширители) также немагнитным или из титана. В противном случае возможна неоправданная дискредитация полезного устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что чувствительность применяемых металлодетекторов должна быть достаточной для обнаружения инородного металлического тела с расстояния в 10—50 мм (в зависимости от его размеров). Для повышения точности локализации инородных ферромагнитных тел необходимо проводить предварительную обработку (намагничивание) области поиска сильным постоянным магнитом. Представлены оптимальные способы настройки металлодетекторов и способы сканирования зоны поиска. Показана необходимость минимизации посторонних электромагнитных полей в операционном помещении.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mithun Sakthivel, Bobby George, Mohanasankar Sivaprakasam.* A New Inductive Proximity Sensor Based Guiding Tool to Locate Metal Shrapnel During Surgery // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. V. 63. No. 12. P. 2940—2949.
2. *Wolter J.R., Wolter K.H.* A simple and inexpensive metal detector for magnetic and nonmagnetic metallic foreign bodies // Trans. Am. Ophthalmol. Soc. 1974. No. 72. P. 363—367.
3. *Arena L., Baker S.R.* Use of a metal detector to identify ingested metallic foreign bodies // AJR Am. J. Roentgenol. 1990. No. 155. P. 803—804.
4. *Sacchetti A., Carraccio C., Lichenstein R.* Hand-held metal detector identification of ingested foreign bodies // Pediatr. Emerg. Care. 1994. No. 10. P. 204—207.
5. *Ryan J., Perez-Avila C.A., Cherukuri A., Tidey B.* Using a metal detector to locate a swallowed ring pull [case report] // J. Accid. Emerg. Med. 1995. No. 12. P. 64—65.
6. *Gooden E.A., Forte V., Papsin B.* Use of a commercially available metal detector for the localization of metallic foreign body ingestion in children // J. Otolaryngol. 2000. No. 29. P. 218—220.
7. *Younger R.M., Darrow D.H.* Handheld metal detector confirmation of radiopaque foreign bodies in the esophagus // Arch. Otolaryngol. Head. Neck. Surg. 2001. No. 127. P. 1371—1374.
8. *Muensterer O.J., Joppich I.* Identification and topographic localization of metallic foreign bodies by metal detector // J. Paediatr. Surg. 2004. No. 39. P. 1245—1248.
9. *Schalamon J.H.E., Хаджия Э.К., Ainoedhofer H., Gössler A., Schleaf J.* The use of a hand-held metal detector for localisation of ingested metallic foreign bodies — a critical investigation // Eur. J. Pediatr. 2004. No. 163. P. 257—259. DOI: 10.1007/s00431-00431-004-1401-5.
10. Магниторазведка / Справочник геофизика. Под ред. Никитского В.Е., Глебовского Ю.С. М.: Недра, 1980. 367 с.
11. *Янус Р.И., Дрожжина В.И., Веденев М.А., Реутов Ю.Я., Леман В.П.* О применении феррозондового полюсоискателя при хирургическом извлечении инородных ферромагнитных предметов // Медицинская техника. 1967. № 4. С. 55—58.
12. *Реутов Ю.Я., Литвиненко А.А.* Об эффективности борьбы с помехами путем градиентометрического соединения магниточувствительных элементов // Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 76—82.
13. *Реутов Ю.Я., Пудов В.И.* О компенсации ложных сигналов градиентометрического феррозонда // Дефектоскопия. 1998. № 2. С. 18—22.
14. *Реутов Ю.Я., Щербинин В.Е., Волков А.В.* Возможности выбора преобразователей магнитного поля для дефектоскопии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 72—84.
15. *Пудов В.И., Реутов Ю.Я., Коротких С.А., Веденев М.А.* Применение универсального феррозондового полюсоискателя ПФ-1 в медицине // Медицинская техника. 1992. № 4. С. 19—22.
16. *Пудов В.И., Реутов Ю.Я., Корзунин Г.С., Коротких С.А.* Локализация инородных ферромагнитных тел с помощью феррозондового полюсоискателя ПФ-02 // Медицинская техника. 1996. № 6. С. 28—33.
17. *Литвиненко А.А., Пудов В.И., Леман В.П.* Вихретоковый локатор инородных тел // Медицинская техника. 1992. № 1. С. 42—43.
18. *Пудов В.И., Реутов Ю.Я., Коротких С.А.* Локализация и удаление инородных металлических тел с помощью локатора инородных тел ЛИТ-2 // Медицинская техника. 1996. № 4. С. 23—28.