

ОПТИМИЗАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПОВ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

© 2024 г. Л.В. Михайлов^{1,*}, А.В. Михайлов^{1,**}, Ю.Л. Гобов^{1,***}, А.В. Никитин¹,
Я.Г. Смородинский¹, В.Н. Костин¹

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

Поступила в редакцию 17.05.2024; после доработки 28.06.2024
Принята к публикации 28.06.2024

Рассмотрены методики оптимизации намагничивающих систем портативных дефектоскопов для бурильных труб, основной целью которых являются уменьшение массы, снижение энергопотребления и создание более однородного магнитного поля в рабочей области. Изложены недостатки традиционно используемых систем и предложены три пути их улучшения.

Ключевые слова: магнитный контроль, магнитные поля рассеяния, бурильные трубы, намагничивающие системы, моделирование.

OPTIMIZATION OF MAGNETIZING SYSTEMS FOR FLAW DETECTORS OF DRILL PIPES

© 2024 L.V. Mikhailov^{1,*}, A.V. Mikhailov^{1,**}, Yu.L. Gobov^{1,***}, A.V. Nikitin¹,
Ya.G. Smorodinskii¹, V.N. Kostin¹

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia 620137 Yekaterinburg, S. Kovalevskoy St., 18
E-mail: *mikhaylov_lv@imp.uran.ru; **mikhaylov@imp.uran.ru; ***go@imp.uran.ru

The paper discusses methods for optimizing magnetizing systems of portable flaw detectors for drill pipes, the main purpose of which is to reduce weight, reduce energy consumption and create a more uniform magnetic field in the working area. The disadvantages of traditionally used systems are outlined and three ways to improve them are proposed.

Keywords: magnetic testing, magnetic flux leakage, drill pipes, magnetizing systems, modeling.

DOI: 10.31857/S0130308224090075

ВВЕДЕНИЕ

Проведение неразрушающего контроля бурильных труб непосредственно на нефтесервисных площадках с целью выявления возможности их повторного использования позволяет снизить эксплуатационные затраты. Для контроля тела трубы широко используются дефектоскопы, регистрирующие в приложенном магнитном поле поля рассеяния над дефектами. В таких устройствах в качестве намагничивающих систем используются катушки («Vedaq 2000-С», США; «МАГПОРТАБУР», Россия) [1, 2], которые устанавливаются с торца бурильной трубы. Создаваемое такими катушками магнитное поле в рабочей области на практике не превышает 150 А/см, что является недостаточным для обнаружения наименьшего дефекта по американскому стандарту DS-1 — сквозного сверления диаметром 1 мм [3, 4]. С целью повышения чувствительности метода, для увеличения амплитуды полей рассеяния, необходимо создавать в рабочей области поле повышенной напряженности (200—300 А/см). Попытки достичь таких значений с использованием катушек приводят к увеличению числа ампер-витков, и, как следствие, к увеличению массогабаритных характеристик и энергопотребления. Электрическая мощность катушек может достигать 1 кВт. На рис. 1 представлены амплитуды напряженности магнитного поля, создаваемого тремя катушками, входящими в комплект поставки Vedaq 2000-С, с массами обмоток 18, 20 и 23 кг. Так как средняя производительность контроля тела бурильной трубы составляет 200 штук за смену [5], производители приборов неразрушающего контроля стремятся к уменьшению массы намагничивающих систем.

Более точная локализация дефектов требует увеличения разрешающей способности дефектоскопов, для чего необходимо уменьшать размеры датчиков магнитного поля. В настоящее время для измерения магнитного поля используются индукционные датчики, чувствительность которых прямо пропорциональна их размерам. Чувствительность индукционных датчиков

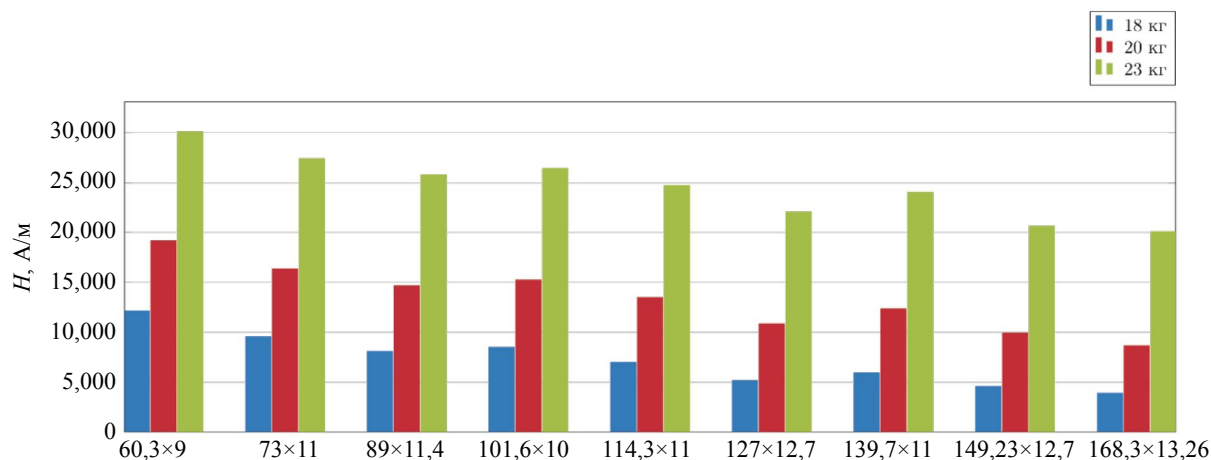


Рис. 1. Амплитуды напряженности магнитного поля в рабочей области при использовании трех катушек намагничивания с массами обмоток 18, 20 и 23 кг на всех существующих типоразмерах бурильных труб.

также зависит от скорости перемещения прибора неразрушающего контроля. Датчики Холла лишены этих недостатков, поэтому их применение является более целесообразным. Полного охвата трубы системой датчиков Холла можно добиться, устанавливая сектора с массивами датчиков в шахматном порядке [6], т.е. с двух сторон от оси симметрии катушки. Вследствие чего требуется обеспечение однородности магнитного поля во всей рабочей области, в которой располагаются датчики. Увеличение области однородного поля может быть достигнуто за счет увеличения, например, длины катушки, однако в этом случае будет снижаться напряженность магнитного поля. Как следствие, для увеличения напряженности следует снова увеличивать количество ампер-витков катушки, что приведет к еще большим энергозатратам и увеличению размеров и массы.

Помимо указанных выше недостатков катушки намагничивания обладают еще и конструктивным: катушку можно установить на трубу только с ее торца. Для увеличения удобства эксплуатации следует создавать намагничивающие системы, дающие возможность надевать их в произвольном месте на трубе. Достичь этого можно, сконструировав систему в распашном или разборном исполнении. В данной работе все описанные системы состоят из нескольких частей, соединенных шарнирами. В развернутом состоянии система накладывается на трубу, подвижные части сводятся между собой, и затем вся конструкция закрывается на замок.

Целью данной работы является разработка распашной намагничивающей системы магнитного сканера-дефектоскопа для бурильных труб, способной создавать в рабочей области однородное магнитное поле напряженностью порядка 200—300 А/см и обладающей при этом как можно меньшей массой.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Создаваемое разработанными намагничивающими системами магнитное поле было рассчитано методом конечных элементов в трехмерном случае с использованием программ с открытым исходным кодом: FreeCAD (построение геометрии), Gmsh (построение сеток), Elmer FEM (решение задач методом конечных элементов), ParaView (постобработка результатов).

Были разработаны трехмерные модели намагничивающих систем, представленные на рис. 2. Первая намагничивающая система представляет собой П-образный магнит (рис. 2а), она выполнена в распашном исполнении, таким образом ее можно устанавливать в произвольном месте трубы, а не только с торцов. Разработка данной системы описана в работе [7].

Для уменьшения влияния на напряженность магнитного поля магнитного сопротивления воздушного зазора по пути магнитопровод—стенка трубы была разработана система с ферромагнитными колесами (рис. 2б), которые служат продолжением магнитопровода.

Принципиально другой подход в увеличении магнитного потока реализует третья намагничивающая система (рис. 2в). За счет применения современных высокоэнергетических постоянных магнитов NdFeB наличие воздушного зазора 10—15 мм не становится причиной для значительного уменьшения магнитного потока. Магниты в этой системе представляют собой сектора с радиальной намагниченностью, направленной от оси симметрии на одном

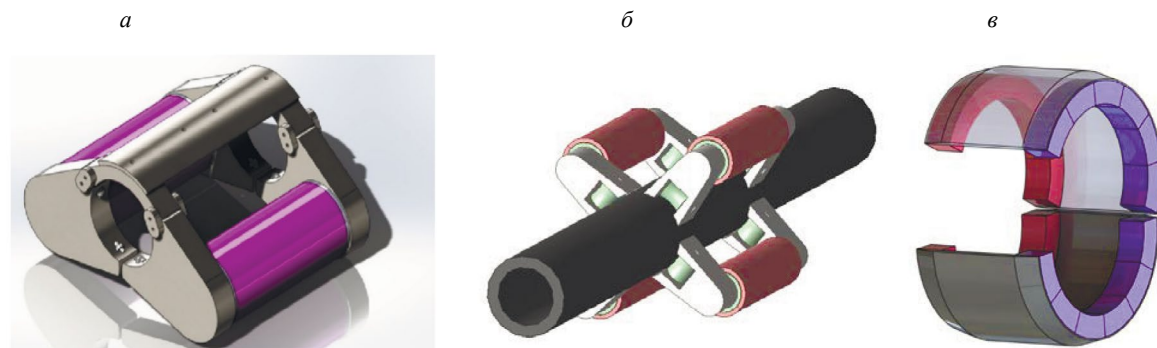


Рис. 2. Трехмерные модели намагничивающих систем: *а* — распашной с воздушным зазором 5 мм; *б* — с ферромагнитными колесами; *в* — с постоянными магнитами NdFeB с воздушным зазором 10 мм.

конце системы и к оси на другом. В качестве магнитопровода используются две половины трубы из магнитомягкого материала.

Задачи с каждой из моделей намагничивающих систем были сконфигурированы в случае намагничивания наибольшего типоразмера бурильных труб 168,3×13,26 мм согласно ГОСТ 631—75 [8]. Длина трубы составляла 2000 мм для исследования влияния размагничивающего фактора, ослабляющего напряженность магнитного поля, а значит ослабляющего и чувствительность магнитного контроля на участках, близких к концам трубы. Для обеспечения наибольшей достоверности результатов для материала трубы в задачу была введена полученная с использованием магнитометрического комплекса Remagraph C-500 [9] начальная кривая намагничивания стали марки 36Г2С, из которой изготавливается буровой инструмент согласно [10]. Определялась тангенциальная компонента напряженности магнитного поля на поверхности трубы вдоль ее оси в рабочей области. В этой области для минимизации ошибки расчетного метода было сосредоточено наибольшее количество конечных элементов наименьшего размера.

Во время расчетов геометрия намагничивающих систем корректировалась в тех зонах магнитопровода, в которых наблюдалось состояние технического насыщения ($B > 1,7$ Тл) ввиду падения в этих местах магнитной проницаемости, что является причиной уменьшения напряженности магнитного поля в рабочей области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности трубы вдоль ее оси для каждой исследуемой намагничивающей системы представлены на рис. 3. Наибольшая длина намагниченого участка наблюдается в случае применения распашных систем с электромагнитами (куполообразные кривые), при этом разброс значений напряженности в области размещения датчиков составляет 3 %. Масса системы с воздушным зазором — 25 кг,

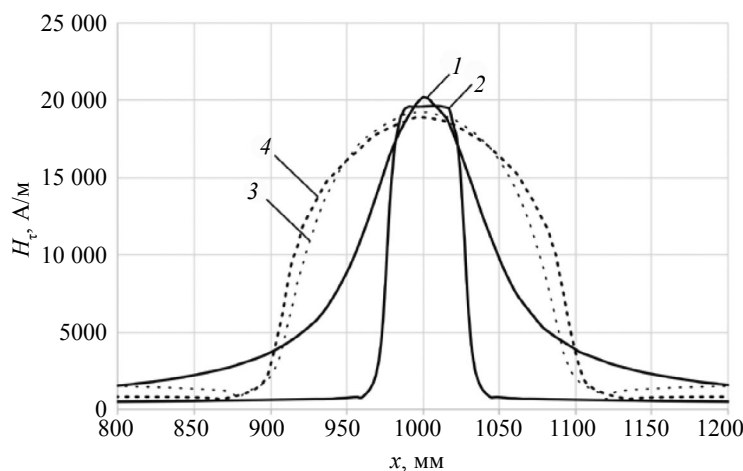


Рис. 3. Распределение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности трубы вдоль ее оси от намагничивающих систем: 1 — катушки; 2 — распашной с постоянными магнитами; 3 — распашной с воздушным зазором; 4 — распашной с ферромагнитными колесами.

системы с ферромагнитными колесами — 20 кг. Система с колесами имеет меньшую массу и энергопотребление, однако ее недостаток заключается в проходимости, поскольку жестко закрепленные колеса мешают преодолению зоны высадки бурильной трубы. Вследствие чего на теле трубы возникают не проконтролированные области в местах соединения тела трубы с замком. Также намагниченные контактирующие поверхности будут собирать мелкодисперсные ферромагнитные частицы, что приведет к затруднению вращения колес и ускорению их износа.

Намагничивающая система с постоянными магнитами NdFeB массой 18 кг создает поле с максимальной длиной однородно намагниченного участка (50 мм), что является достаточным для размещения датчиков магнитного поля. При этом зазор по пути магнит — стенка трубы составляет 10 мм, что не влияет на проходимость дефектоскопа. Энергопотребление такой системы сведено к нулю. Систему такого типа возможно сконструировать в распашном исполнении.

ВЫВОДЫ

Разработаны намагничивающие системы распашного типа с электромагнитами и с постоянными магнитами NdFeB для дефектоскопа бурильных труб, геометрические параметры которых были оптимизированы с целью максимизации напряженности и увеличения однородности магнитного поля в рабочей области. Поле, создаваемое разработанными намагничивающими системами, составляет 200—300 А/см, что соответствует полю катушки массой более 23 кг, при этом масса предлагаемых систем не превышает 20 кг.

Показано, что за счет применения современных высокоэнергетических постоянных магнитов возможно создать намагничивающую систему с увеличенным воздушным зазором, позволяющим сохранить проходимость дефектоскопа в зоне высадки бурильной трубы.

Показано, что применение постоянных магнитов вместо электромагнитов (как в форме соленоидов, так и П-образных систем) позволяет уменьшить массу намагничивающей системы на 20 % и существенно снизить потребляемую мощность приборов магнитного неразрушающего контроля бурильных труб, благодаря чему становится возможным создание их в портативном исполнении.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drill Pipe Inspection System. URL: <https://www.newtechsystems.com/products/emi-equipment/vedaqa-2000-c/> (дата обращения: 02.05.2024).
2. Портативная установка контроля бурильных труб магнитными методами неразрушающего контроля МАГПОРТАБУР. URL: <https://www.vimatec.ru> (дата обращения: 02.05.2024).
3. Хмелев С.В., Кетов А.Б., Шефер А.Г. Неразрушающий контроль бурового оборудования по стандарту DS-1 // БУРЕНИЕ И НЕФТЬ. 2022. № 3. С. 40—42.
4. DS-1. V. 3. Drill Stem Inspection. TH Hill Associates.
5. Марченко И., Юдаков Е., Чекмазов В., Кондратьев В. Методы и виды неразрушающего контроля в процессе инспекции (дефектоскопии) бурильных труб и условия ее проведения // ТехНАДЗОР. 2015. Т. 10. № 107. С. 128—129.
6. Wu J., Fang H., Li L., Wang J., Huang X., Kang Y., Sun Y., Tang C. A Lift-Off-Tolerant Magnetic Flux Leakage Testing Method for Drill Pipes at Wellhead // Sensors (Basel, Switzerland). 2017. V. 17. No. 1. P. 201.
7. Mikhailov A.V., Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E., Mikhailov L.V., Antokolsky L.I. Simulation of a closed-loop magnetizing system for a portable drill pipe magnetic flaw detector // AIP Conference Proceedings. 2022. V. 2466. No. 1. P. 040009.
8. ГОСТ 631—75 Трубы бурильные с высаженными концами и муфты к ним. Технические условия.
9. Hysteresegraph: PERMAGRAPH® und REMAGRAPH®. URL: <https://www.magnet-physik.de/messtechnik/hysteresegraphen/> (дата обращения: 06.05.2024).
10. ГОСТ Р 50278—92 Трубы бурильные с приваренными замками. Технические условия (с Поправкой, с Изменениями No. 1, 2).

REFERENCES

1. Drill Pipe Inspection System. URL: <https://www.newtechsystems.com/products/emi-equipment/vedaqa-2000-c/> (access date: 02.05.2024).
2. Portativnaya ustanovka kontrolya buril'nyh trub magnitnymi metodami nerazrushayushchego kontrolya MAGPORTABUR. URL: <https://www.vimatec.ru> (access date: 02.05.2024). (In Russian).
3. Khmelev S.V., Ketov A.B.I., Shafer A.G. Non-destructive testing of drilling equipment according to DS-1 standard // «Drilling and oil» magazine. 2022. No. 3. P. 40—42. (In Russian).

4. DS-1. V. 3. Drill Stem Inspection, TH Hill Associates.
 5. *Marchenko I., YUdakov E., CHEkmazov V., Kondrat'ev V.* Metody i vidy nerazrushayushchego kontrolya v processe inspekcii (defektoskopii) buril'nyh trub i usloviya ee provedeniya // *TexНАДЗОР*. 2015. V. 10. No. 107. P. 128—129. (In Russian).
 6. *Wu J., Fang H., Li L., Wang J., Huang X., Kang Y., Sun Y., Tang C.* A Lift-Off-Tolerant Magnetic Flux Leakage Testing Method for Drill Pipes at Wellhead // *Sensors* (Basel, Switzerland). 2017. V. 17. No. 1. P. 201.
 7. *Mikhailov A.V., Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E., Mikhailov L.V., Antokolsky L.I.* Simulation of a closed-loop magnetizing system for a portable drill pipe magnetic flaw detector // *AIP Conference Proceedings*. 2022. V. 2466. No. 1. P. 040009.
 8. GOST 631—75 Truby buril'nye s vysazhennymi koncami i mufty k nim. Tekhnicheskie usloviya. (In Russian).
 9. Hysteresograph: PERMAGRAPH® und REMAGRAPH®. URL: <https://www.magnet-physik.de/messtechnik/hysteresegraphen/> (access date: 06.05.2024).
 10. GOST R 50278—92 Truby buril'nye s privarennymi zamkami. Tekhnicheskie usloviya (s Popravkoj, s Izmeneniyami No. 1, 2). (In Russian).
-