

ИНЖЕНЕРНАЯ МАГНИТОМЕТРИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

В. С. Стариков

ЗАО Предприятие подводно-технических работ «Пётр» (г. Воронеж)

Поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.

Аннотация: рассматриваются вопросы применения каппаметрического метода для анализа технического состояния металлических труб большого диаметра. Прямыми измерениями на трубах большого диаметра выявлены особенности распределения магнитной восприимчивости по длине трубы и в её краевой зоне. Показана возможность диагностики состояния трубы по данным каппаметрии.

Ключевые слова: стальная труба, каппаметрия, контроль технического состояния.

ENGINEERING MAGNETOMETRY IN THE STUDY OF TECHNICAL STATE OF LARGE DIAMETER STEEL PIPELINES

Abstract: discusses the application of kappametry method for analysis of technical condition of large diameter steel pipes. Direct measurements of the large diameter pipes revealed the allocation features magnetic susceptibility on tube length and the marginal zone. The possibility of diagnosing the condition of pipes according to kappametry.

Key words: steel tube, kappametry, control of technical state.

Введение

В последние два десятилетия методы магниторазведки находят широкое применение в решении инженерных и геологических задач по изучению верхней части разреза (до первых десятком метров) с целью определения физических параметров и характеристик процессов, протекающих в приповерхностной части изучаемой среды. Особое место здесь занимают задачи дефектоскопии различных инженерных сооружений, в том числе и трубопроводов, где используются сверхдетальные и высокоточные наземные магнитные съёмки [1, 2, 3]. Такие исследования нацелены на обнаружение типовых инженерных объектов, или наличия в них некоторых неоднородностей, с линейными размерами до первых дециметров и различием физических свойств искоемых объектов в первые десятки процентов на глубинах до 3–5 метров [2, 4, 5, 6].

Существующие методы дистанционных магнитных исследований нефте- и газопроводов предназначены как для определения планово-высотного положения стальных трубопроводных систем, так и для диагностирования эксплуатационного состояния труб. При этом, оценки параметров искоемых объектов (стальных труб) во многом зависят от точности используемой магнитометрической аппаратуры, мето-

дики магнитной съёмки [7, 8], реальных величин исходных магнитных свойств стальных труб, а также различных изменений этих свойств, возникающих в процессе монтажа и эксплуатации трубопровода [5, 6, 9, 10].

Несмотря на все имеющиеся объективные трудности применения магниторазведки для изучения трубопроводов, без непосредственного доступа к объекту исследования, работы такого рода, как явствует из приведённого краткого списка публикаций, интенсивно развиваются как в России, так и за рубежом. При этом требует решения задача оценки магнитных свойств прямошовных стальных труб и степени изменения этих свойств под воздействием внешних факторов. Реализация таких оценок позволит более корректно выполнять локацию трубопроводов, или отдельных его элементов, а также обеспечивать более достоверную диагностику технического состояния действующих трубопроводных систем. Решению именно этой задачи и посвящено предлагаемое исследование. В качестве натурального объекта изучения использовались реальные прямошовные трубы (или их фрагменты) большого диаметра. Специфика изготовления таких труб заключается в методах горячей прокатки стального листового изделия, служащего заготовкой для трубы [11, 12].

Методика исследований

Инструментом изучения магнитных свойств стальных прямошовных труб большого диаметра служил полевой измеритель магнитной восприимчивости КТ-7 [13], используемый для полевых и лабораторных измерений магнитных свойств пород и руд, отличающийся широким диапазоном и высокой точностью результатов измерений. Стандартная методика измерений магнитной восприимчивости χ [14, 15] была несколько модифицирована нами для определения относительной величины восприимчивости стальных труб, для которых величина χ может быть больше 1 единицы СИ, что является верхней границей измерений капаметра КТ-7. При измерениях использовался фиксированный по размерам и положению немагнитный переходный элемент из пластика, который снижает влияние ферромагнитной составляющей измеряемого тела. Такая модификация измерительной системы потребовала введения коэффициента пересчёта, который вычислялся на эталонном ферромагнитном объекте из стального сплава с известными свойствами в форме пластины геометрически соизмеримой с поверхностью измерений прибора КТ-7. В итоге, использованная система измерений позволила достоверно оценивать относительную величину магнитной восприимчивости χ на реальных измеряемых объектах.

Результаты

Объектами практических наблюдений стали различные стальные трубы, используемые в нефтегазовом комплексе. Были изучены:

- бывшие в употреблении нефтегазовой отрасли трубы, имевшие разную степень износа, но при этом являющиеся пригодными для использования в других хозяйственных сферах жизнедеятельности человека;
- «лежалые» – новые трубы, которые не были в употреблении, не подвергались различного рода внешним воздействиям и длительное время пролежавшие в складских помещениях, сохраняющие в полной степени свои функциональные особенности;
- новые, не подвергавшиеся никаким видам нагрузок с момента производства, кроме транспортировочных при перегрузках;
- отсечённый от остального тела трубы участок подверженный значительной коррозии (в единственном образце).

С целью равномерного покрытия измерениями поверхности тела трубы, соответствующий объект исследования с помощью необходимого инструментария делился на круговые сечения с заданным шагом – условные часовые сектора, отсчитываемые от продольного шва трубы. На каждом секторе в центре дуги окружности выбиралась точка промера. Общее количество сегментов измерения по окружности трубы равнялось двенадцати, что позволило достаточно полно описать магнитные характеристики всего изделия.

Работа с применением измерителя КТ-7 производилась в зимнее время на подготовительной площадке

предприятия вне зоны воздействия других намагниченных объектов. В течение отпущенного для исследований времени производственная часть всего предприятия не останавливалась, и как следствие ежедневно происходила ротация труб. В силу этого можно считать, что объекты, подвергшиеся изучению, были выбраны абсолютно произвольно из набора типового сортамента продукции. Всего было исследовано четыре типа стальных труб, описание которых дается ниже.

1. Труба диаметром 1420 мм (лежалая) с толщиной стенки равной 15 мм. Этот объект является типовым в составляющей плети стандартного магистрального газопровода высокого давления. Шаг измерений по длине трубы составлял 0,5 м, а по окружности – 12 секторов, как описано выше. Данные измерений демонстрируют особенности поведения величины χ по длине и периметру трубы (рис. 1). По мере удаления от края трубы установлен рост величины магнитной восприимчивости в среднем на 30–60 % при удалении до 0,5 м от края. Далее этот рост практически не выражен. Следует отметить, что по внешней поверхности трубы величина χ в целом имеет несколько меньшие значения, чем по внутренней. Характер поведения графиков магнитной восприимчивости по секторам на периметре трубы показывает, что в области заводского сварного шва, отвечающего в нашей системе координат 12 часам, имеет место некоторое снижение значений величины χ (рис. 1).

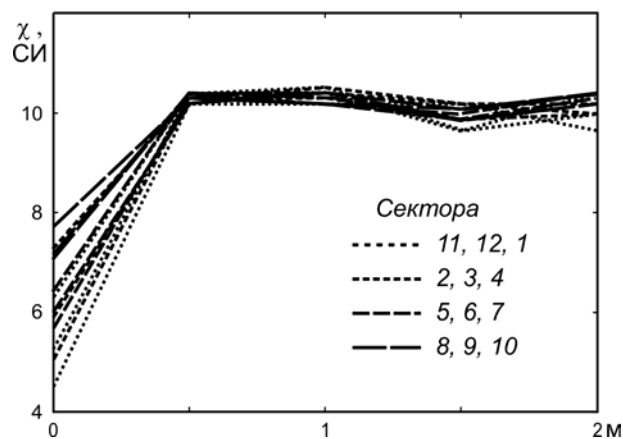


Рис. 1. Графики магнитной восприимчивости по внутренней поверхности трубы диаметром 1420 мм для групп секторов (значения в часах).

2. Труба диаметром 530 мм с толщиной стенок равной 8 мм. Данный фрагмент рабочей трубы общей протяжённостью 11,5 м, стандартно использующийся в газовой отрасли для транспортировки продукта, как в магистральных сетях, так и в сетях местных – газораспределения и газопотребления, представлял собой сложный объект. Эта составная труба состояла из двух фрагментов длиной 6,25 м и 5,15 м, соединённых заводским сварным швом на предприятии (или автоматической сварной установкой в полевых условиях). По данным визуального контроля тело более коротко-

го фрагмента трубы имело более сильный износ. Кроме того, на этом отрезке трубы имелся ручной сварной стыковой шов, соединяющий два элемента относительно изношенной трубы.

По данным измерений магнитной восприимчивости, проведенным с шагом по длине трубы равным 0,25 м, краевые части объекта, также как и в рассмотренном выше случае, отмечаются значимым уменьшением величины χ (рис. 2). Помимо этого выявлено некоторое различие величины магнитной восприимчивости для изношенного и нового участков, которые различаются хотя и не столь значительно, но достоверно могут быть установлены по дисперсии величины χ . Эти различия особенно ярко выражены на конце

более короткого фрагмента трубы, где уменьшение величины магнитной восприимчивости свидетельствует о степени износа материала объекта. Положение шва, соединяющего два указанных отрезка трубы однозначно можно идентифицировать по смене характера дисперсии изменяемой величины (рис. 2). Характер поведения графиков магнитной восприимчивости по секторам на периметре трубы, полученный для различных её участков, демонстрирует некоторое снижение величины магнитной восприимчивости в области продольного заводского сварного шва. На это общее снижение накладываются изменения величины χ , характерные для поперечного стыкового шва (рис. 2).

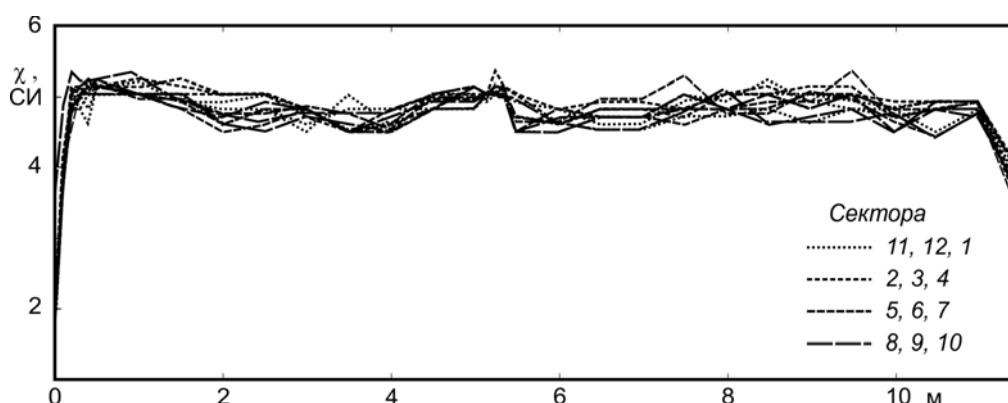


Рис. 2. Графики магнитной восприимчивости по внешней поверхности трубы диаметром 530 мм для групп секторов (значения в часах).

3. Фрагмент трубы диаметром 530 мм, снятый из зоны разрушения трубопроводной системы. Протяжённость изученного фрагмента составлял примерно 0,5 м, причём сам объект имел существенные коррозионные повреждения тела трубы, которые в некоторых местах, вплоть до расслаивания металла. В изученном фрагменте отсутствовали сектора трубы принятые за 11 и 12 часов. Имеющиеся повреждения объекта позволили провести измерения только по одному сечению на внешнем периметре дуги трубы. В целом для данного фрагмента трубы измерения магнитной восприимчивости выполнялись без использования переходного элемента на измерительной системе каппаметра, что было возможно в виду низкого уровня измеряемой величины χ (рис. 3). Измерения с каппаметром проводились по доступным секторам трубы, примерно на середине её длины. Приведённая полярная диаграмма магнитной восприимчивости по внешнему периметру трубы, показывает, что значения χ отличаются почти на два порядка по сравнению с новой или даже уже эксплуатировавшийся трубой (см. рис. 2). Очевидной причиной этого является интенсивное неоднородное окисление материала трубы, которое и порождает изменение её магнитных свойств. То есть по данным изучения магнитной восприимчивости можно практически однозначно идентифицировать повреждённые участки стальной трубы большого диаметра.

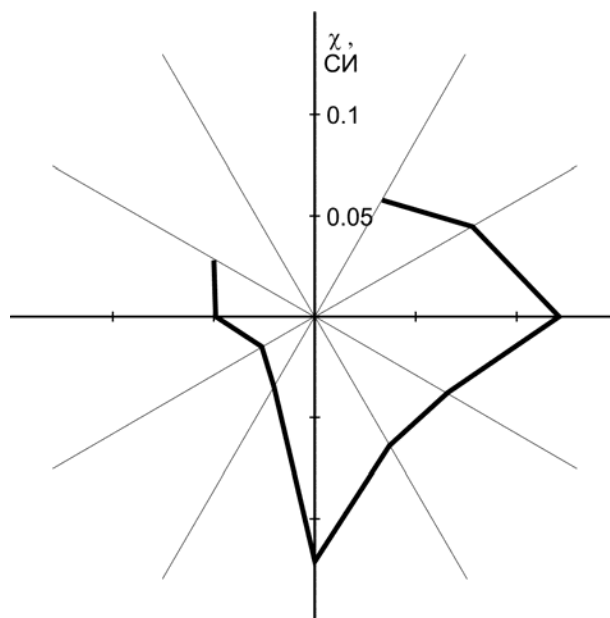


Рис. 3. Полярная диаграмма магнитной восприимчивости по внешней поверхности трубы диаметром 530 мм, подвергшейся интенсивному разрушению.

Обсуждение

Таким образом, приведённые материалы натурных измерений магнитной восприимчивости прямошовных труб большого диаметра позволяют сделать

соответствующие выводы:

1. Магнитная восприимчивость краевых сечений трубы всегда меньше, чем в любых других сечениях. В настоящее время точных причин данного явления не описано. Этот факт может быть отнесён к эффекту размагничивания [16]. При этом в нашем случае возникает вопрос о том, к какому типу описанных простых фигур следует отнести трубу – круговой цилиндр с коэффициентом размагничивания $N=1/2$ или бесконечный плоскопараллельный слой с коэффициентом размагничивания $N=1$. Специфика процесса изготовления готового продукта основана на ряде технологических преобразований: цилиндрическая заготовка, листовая заготовка, готовый продукт – труба. При этом изменение магнитных свойств можно ассоциировать с этапом горячей прокатки цилиндрической трубной заготовки и получением листовой заготовки. Процесс охлаждения листа проходит неоднородно – первыми остывают краевые участки в неоднородном внешнем магнитном поле, а затем постепенно формируются участки намагниченности основного тела трубы с вероятным развитием собственного размагничивания. Отметим, что этот процесс, не описанный подробно в литературе, требует более детального изучения.

2. Магнитная восприимчивость по внутренней поверхности трубы всегда немного больше (5–15 %) чем по внешней её поверхности; в отдельных случаях (износа, некачественной сварки) достигает 60 %. Из этого следует, что напряжённость магнитного поля внутри трубы всегда выше, чем по внешней её поверхности. В результате можем сказать, что по внутреннему периметру трубы происходит подмагничивание. В результате тело намагничивается в земном и собственном магнитном поле. Это подтверждают результаты промеров на участке с некачественной стыковой сваркой, когда при выполненном полном проваре тела трубы на внутреннем периметре значения магнитной восприимчивости значительно превышают показания прибора с внешнего периметра в той же точке.

3. В зоне продольного заводского сварного шва отмечается снижение значений магнитной восприимчивости, по сравнению с соседним однородными участками, примерно на 7–15 % и в отдельных случаях (износ, некачественная сварка) достигает 21 %. Указанные значения позволяют говорить о том, что продольный сварной шов будет влиять на магнитное поле каждой отдельно взятой трубы. Но при использовании магнитометрии будет тяжело отследить положение продольного сварного шва с удалением от тела трубы. К тому же смысловая нагрузка для общей оценки состояния обследуемой трубы снижена, так как все подобные сварные швы выполняются в процессе производства (на заводе), где проводится многоуровневый контроль качества. Однако, в случае, когда снижение магнитной восприимчивости более выражено по отношению к прилегающим участкам, то подобные изменения, зафиксированные приборами, должны быть проверены обязательным вскрытием

тела заложённой трубы, и в последующем могут быть отнесены к дефектам продольного сварного шва.

4. Температурные воздействия в зоне стыковочного шва изменяют однородный характер магнитной восприимчивости по поверхности трубы: на 5–10 % в зоне заводского сварного стыка и до 30–60 % на участке с некачественной ручной сваркой. Такие изменения магнитных свойств позволят получить ступени-образные изменения магнитного поля, при прохождении магнитных измерений вдоль планового положения трубопровода, тем самым фиксируя маркеры переходов от одной трубы к другой. Кроме того, резкое изменение магнитного поля укажет на развитие неблагоприятных процессов на данном стыковом участке.

5. В проведённом исследовании основное внимание было уделено магнитной восприимчивости тела трубы, поскольку именно этот параметр определяет формирование индуктивной намагниченности объекта и, соответственно, величину измеряемого магнитного поля над объектом. При этом некоторые авторы [4] оценивают изменения магнитной восприимчивости тела трубы в сравнительно небольших пределах ($\pm 20\%$), связывая эти изменения с различным составом трубной стали и его изменением с течением времени. В силу этого авторы предполагают, что выявляемые изменения магнитного поля над трубопроводом не связаны с изменением магнитной восприимчивости материала трубы. Выполненные нами прямые измерения магнитной восприимчивости показали, что магнитная восприимчивость может варьировать по длине и периметру трубы в значительно больших пределах, то есть значимо влияет на величину намагниченности объекта и его внешнее магнитное поле.

Выводы

В целом выполненные натурные измерения магнитных свойств материала труб большого диаметра показали, что степень изменения магнитной восприимчивости вполне достоверно может оцениваться по данным стандартных методов полевой магнитометрии.

Для повышения эффективности таких методов следует накапливать ситуационную статистику, совместно с данными о магнитном поле трубопровода, что позволит проводить диагностирование прямошовной стальной трубы в полевых условиях. При этом методы магнитометрии могут реализовываться как при непосредственном контакте с трубопроводом [17], так и дистанционно [3, 7, 18, 19, 20, 21, 22], что будет существенно снижать стоимость работ по диагностике состояния трубопроводных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владов, М. Л. Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М.: ГСД Продакшен. – 1998. – 67 с.
2. Манштейн, А. К. Малоглубинная геофизика. (Пособие по спецкурсу) / А. К. Манштейн. – Новосибирск: Изд-во НГУ. – 2002. – 135 с.

3. Глазнев, В. Н. Применение методов магнитометрической съёмки для исследования подводных переходов трубопроводов различной протяжённости в условиях мелководья / В. Н. Глазнев, В. С. Стариков // Сб. докл. 5-ой Междун. научно-практической конференции и выставки. «Инженерная и рудная геофизика 2009» [Электронный ресурс] DOI: 10.3997/2214-4609.201403827.
4. Крапивский, Е. И. Дистанционная магнитометрия газонефтепроводов / Е. И. Крапивский, В. О. Некучаев. – Ухта: Изд. УГТУ. – 2011. – 142 с.
5. Zhao, W. A detection system for pipeline direction based on shielded geomagnetic field / W. Zhao, X. Huang, S. Chen, Z. Zeng, S. Jin // Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 2014. – 113. – № 1. – P. 10–14.
6. Huang, S. New Technologies in Electromagnetic Non-destructive Testing. Springer Series in Measurement Science and Technology / S. Huang, S. Wang // Tsinghua University Press, 2016. – 233 p. [Электронный ресурс] DOI 10.1007/978-981-10-0578-7.
7. Глазнев, В. Н. Оценка разрешающей способности магнитного градиентометрического метода при решении инженерных геофизических задач: мат-лы XVI междун. конф. «Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы». Под ред.: Н. М. Чернышова, А. А. Маловичко / В. Н. Глазнев, В. С. Стариков. – Воронеж: Изд-во «Научная книга». – 2010. – С. 193–196.
8. Загидулин, Т. Р. Расчёт магнитного поля стальной трубы конечной протяжённости в постоянном однородном намагничивающем поле / Т. Р. Загидулин // Контроль и диагностика, 2014. – № 6. – С. 15–24. [Электронный ресурс] DOI: 10.14489/td.2014.06.
9. Конов, В. В. Некоторые вопросы оптимизации магнитометрического метода контроля напряжённо-деформированного состояния подземного стального трубопровода / В. В. Конов // Нефтегазовое дело, 2012. – № 6. – С. 163–178.
10. Xinjing, H. Magnetic charge and magnetic field distributions in ferromagnetic pipe / H. Xinjing, C. Shili, G. Shixu, Z. Wei, J. Shijiu // Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2013. – 28. – № 8. – P. 737–746.
11. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Технология изготовления. (Учебное пособие) / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М.: Высшая школа. – 1983. – 344 с.
12. Сокурено, В. П. Трубы стальные электросварные прямошовные. ГОСТ 10704-91. / В. П. Сокурено, В. М. Ворона, П. Н. Ившин, Н. Ф. Кузнецов, В. Ф. Ганзина. – М.: Росстандарт. – 2015.
13. Полевые геофизические инструменты. [Электронный ресурс] <http://www.satisgeo.com>
14. Физические свойства пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика / Ред. Н. Б. Дортман. – М.: Недра. – 1984. – 455 с.
15. Справочник геофизика / Под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. – М.: Недра. – 1990. – 367 с.
16. Блох, Ю. И. Решение прямых задач гравиразведки и магниторазведки: Учебное пособие / Ю. И. Блох. – М.: МГГА. – 1993. – 79 с.
17. Агинеи, Р. В. Моделирование магнитных аномалий при проведении магнитометрического контроля трубопроводов с поверхности грунта / Р. В. Агинеи, В. В. Мусонов, С. С. Гуськов // Трубопроводный транспорт: теория и практика, 2013. – № 1. – С. 40–44.
18. Альбанова, Е. В. Исследование возможностей оценки технического состояния трубопроводов с помощью магнитных методов / Е. В. Альбанова, Е. И. Крапивский, В. О. Некучаев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2005. – № 11. – С. 9–12.
19. Альбанова Е. В. Исследование постоянного магнитного поля наземного магистрального трубопровода / Е. В. Альбанова, Е. И. Крапивский, В. О. Некучаев // Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла: мат-лы междун. научно-технической конференции. – М. – 2007. – С. 27–29.
20. Галлямов, И. И. Введение в высокоточную магнитную съёмку внутрипромысловых подземных трубопроводов / И. И. Галлямов. – М. – 2000. – 72 с.
21. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / Под ред. И. Н. Модина, В. А. Шевнина. – М.: РУССО. – 1999. – 511 с.
22. Горошевский, В. П. Бесконтактный магнитометрический метод обследования подземных трубопроводов / В. П. Горошевский, С. С. Камаева, И. С. Колесников // Реконструкция, ремонт и строительство трубопроводных систем: мат-лы конференции. – 2002. – С. 223–228.

ЗАО Предприятие подводно-технических работ «Пётр»,
г. Воронеж

Стариков В. С., инженер – геофизик
E-mail: stvase@mail.ru
Тел.: +7-920-400-57-20, +7-910-346-11-30

«PETER» JOINT – STOCK C°. Diving Services (Voronezh)

Starikov V. S., engineer – geophysicist
E-mail: stvase@mail.ru
Tel.: +7-920-400-57-20, +7-910-346-11-30