

УДК 620.1.08
DOI

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОСТАТОЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ДНИЩ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ MFL С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



А. И. Потапов,
д-р техн. наук,
Санкт-Петербургский
горный университет,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: apot@mail.ru



В. А. Сясько,
д-р техн. наук,
ООО «Константа»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: office@constanta.ru



О. П. Пудовкин,
Санкт-Петербургский
горный университет,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: pudovkin.oleg@gmail.ru



Д. А. Шаранова,
Санкт-Петербургский
горный университет,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: sharanova.dasha@mail.ru

Рассмотрены структура и модель магнитной системы MFL-преобразователя, основные принципы расчета ее характеристик с использованием метода конечных элементов, на основании которых выполнен анализ влияния электрофизических и геометрических параметров днищ цилиндрических вертикальных резервуаров, определяющих метрологические характеристики и погрешность результатов измерений их остаточной толщины с использованием преобразователей, реализующих технологию рассеяния магнитного потока MFL. Приведены основные результаты расчетов, позволяющие оценить погрешность измерения глубины искусственных дефектов при варьировании магнитной проницаемости и шероховатости стенки объекта контроля, а также технологического зазора, даны предложения по метрологическому обеспечению магнитных дефектоскопов с MFL-сканерами для выявления коррозионных повреждений днищ резервуаров.

Ключевые слова: технология MFL, остаточная толщина, коррозия, резервуары нефтехранилищ.

A. I. Potapov (National Mineral Resource University, St. Petersburg, Russia);
V. A. Syasko (LLC Constanta, St. Petersburg, Russia);
O. P. Pudovkin, D. A. Sharanova
(National Mineral Resource University, St. Petersburg, Russia)

ANALYSIS OF THE MEASUREMENT ERROR OF THE RESIDUAL THICKNESS OF THE BOTTOMS OF THE CYLINDRICAL VERTICAL TANKS FOR MFL TECHNOLOGY WITH USE OF THE FINITE ELEMENT METHOD

The article deals with the structure and the model of the magnetic system MFL converter. It is given the basic principles of calculation of its characteristics with use of the finite element method on the basis of which the analysis of the influence of the electrical and geometrical parameters of the bottoms of the vertical cylindrical tank. This influence defines the metrological performance and accuracy of measurements of residual thickness by using converters implementing technology scattering flux MFL. It is formulated the main results of the calculations, which make it possible to assess the measurement error of a depth of the artificial defects by varying the magnetic permeability and roughness of the wall of the control object as well as the technological gap. It presents the proposals for metrological support of magnetic flaw with MFL-scanners to detect corrosion damage to tank bottoms.

Keywords: The MFL, the residual thickness, corrosion, oil storage tanks.



Статья поступила в редакцию 09.06.2016

Received 09.06.2016

Проблема обеспечения надежности и безопасности эксплуатации цилиндрических вертикальных стальных резервуаров в нефтехимической промышленности с учетом возрастающих требований к экономической эффективности их эксплуатации

становится все более актуальной. Огромную роль в обеспечении нормируемой расчетной конструктивной прочности таких объектов играет остаточная толщина их стенок и днища, определяемая глубиной h коррозионных повреждений. На мировом

рынке представлена широкая номенклатура дефектоскопов и сканеров, реализующих технологию MFL (Magnetic Flux Leakage) – технологию магнитного вида неразрушающего контроля, использующую метод эффекта Холла для анализа магнитного поля рассеяния дефекта [1, 2].

В настоящее время большинство ведущих производителей (Silverwing, Rosen, NDT Technologies, «Интрон плюс» и др.) выпускают магнитные дефектоскопы с MFL-сканерами для выявления коррозионных повреждений днищ резервуаров с близкими параметрами магнитной системы и чувствительных элементов [3 – 5]. Для них заявленный предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения глубины коррозионных повреждений $\Delta h_d \leq \pm(0,10...0,15)h$ [6]. При этом подразумевается, что испытания и настройку систем проводят на контрольных образцах с искусственными дефектами [6]. Однако пользователю не предоставляется информация о влиянии мешающих параметров, вызывающих дополнительную погрешность измерения. Это может вводить их в заблуждение относительно достоверности результатов измерений в производственных условиях. Для исключения этого в руководстве по эксплуатации должны обязательно оговариваться не только диапазон контролируемых толщин стенок $T_{\min}...T_{\max}$, но также допустимая девиация магнитной проницаемости μ_{OK} материала объекта контроля (ОК), максимальная допустимая шероховатость Rz_{\max} и максимальная толщина покрытия, определяющая технологический зазор Z_{\max} до поверхности объекта контроля. При этом следует учитывать, что метрологические характеристики определяются также используемыми алгоритмами преобразования первичной измерительной информации при вычислении h [5].

Использование метода конечных элементов

Рассмотрим обобщенную структурную схему системы намагничивания MFL-сканера Handscan над объектом контроля (ферромагнитным листом) с искусственным дефектом, представляющим собой поперечный пропил, характеристики которого и основные мешающие параметры указаны на рис. 1.

Магнитная система (МС) измерительного преобразователя имеет следующие размеры: длина магнита $A = 25$ мм, высота магнита $C = 15$ мм, высота ярма $E = 35$ мм, высота полюса $D = 20$ мм, расстояние между полюсами $L = 50$ мм, технологический зазор $Z = 5$ мм. Ширина магнитопровода составляет 150 мм. Измерительный преобразователь предназначен для выявления плоскостной и питтинговой коррозии изделий с толщиной стенки до $T_{\max} = 15$ мм. В качестве чувствительных элементов используются преобразователи Холла, фиксирующие изменение составляющей B_z магнитной индукции в точке наблюдения при перемещении преобразо-

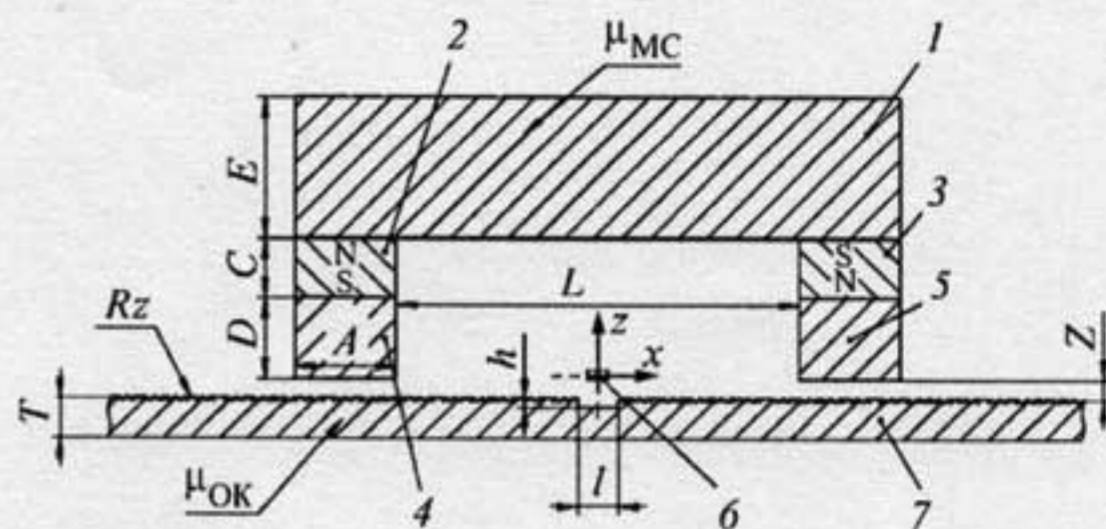


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы намагничивания MFL-сканера и объект контроля с искусственным дефектом в виде поперечного пропила (шириной l), имитирующим коррозионное повреждение стенки:

1 – ярмо магнитопровода; 2 и 3 – постоянные магниты (NdFeB); 4 и 5 – полюса магнитопровода; 6 – чувствительный элемент (точка наблюдения); 7 – стальной лист с искусственным дефектом

вателя относительно дефекта вдоль оси x (на рис. 1 начало системы координат связано с центром пропила).

Предварительно для оценки влияния мешающих параметров необходимо рассчитать характеристики магнитной системы, определяющие чувствительность преобразователя $dB_z(h, T)/dh$, погрешность измерения $\Delta h(h, T)$ и диапазон измерения $h_{\min}...h_{\max}$ при толщине стенки $T_{\min}...T_{\max}$.

Для преобразователя, представленного на рис. 1, будем полагать ширину магнитопровода много больше его высоты C и длины A , что позволяет исключить ее влияние при расчетах.

В настоящее время для решения задач, связанных с анализом магнитных полей, широко применяется метод конечных элементов [7]. Искомые значения параметров магнитного поля будем рассчитывать в узловых точках (узлах) – общих точках конечных элементов. Скалярный магнитный потенциал ϕ^M каждого конечного элемента представим в виде полинома с постоянными в пределах этого элемента коэффициентами:

$$\phi^M = a_i + b_i x + c_i y. \quad (1)$$

Основная задача расчета методом конечных элементов – определение коэффициентов a_i, b_i, c_i . После этого появляется возможность рассчитать магнитный потенциал в любой точке пространства модели. Исходные данные, дополненные граничными условиями, и энергетические зависимости позволяют вывести систему алгебраических уравнений, по которой можно рассчитать искомые коэффициенты полиномов во всех конечных элементах [7].

Применительно к рассматриваемой задаче при граничных условиях первого рода (условиях Дирихле) минимизируемым функционалом является величина, пропорциональная запасенной в пространстве магнитной энергии:

$$W_M = 0,5 \int \mu \mu_0 H^2 dv, \quad (2)$$

где dv – параметр интегрирования; v – минимальный рассматриваемый объем пространств.

Так как напряженность магнитного поля $H = -\text{grad}\varphi^M$, то минимизируемый функционал можно записать в виде

$$W_M = 0,5 \int \mu\mu_0 (\text{grad}\varphi^M)^2 dv, \quad (3)$$

а искомой (минимизирующей) функцией будет $\varphi^M(\xi, \zeta, \eta)$, при которой $W_M\{\varphi^M\} \Rightarrow \min(\xi, \zeta, \eta - \text{значения выбранных варьируемых параметров})$.

В качестве функционала выступает сумма магнитных энергий, накопленных во всех конечных элементах. В данной модели элементы соприкасаются в общих узловых точках. Энергия элементов определяется магнитными потенциалами узловых точек $W = W\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}$, где N – число точек.

На основании анализа и определения магнитных потенциалов общих узловых точек, при которых W_M минимальна, формируется система алгебраических уравнений, рассчитываются магнитные потенциалы, вычисляются магнитная индукция и напряженность магнитного поля [8].

При использовании программных продуктов, реализующих метод конечных элементов, можно сформулировать следующую постановку задачи расчета: двумерная, осесимметричная, стационарная, в общем случае нелинейная, с открытыми границами со следующими допущениями:

- в достаточно удаленной от преобразователя зоне создаваемое им магнитное поле бесконечно мало;
- отсутствуют внешние магнитные поля;
- модель полностью стационарна (отсутствует временной и температурный дрейф физических характеристик преобразователя).

Согласно первым двум допущениям в качестве граничных условий для моделей рассматриваемых преобразователей можно назначить граничные условия первого рода. В поставленной задаче это граничное условие применимо для задания нулевого значения нормальной составляющей вектора магнитной индукции на оси симметрии (в точке наблюдения) и для указания полного затухания поля на условно бесконечно удаленных от преобразователя границах. Варьируемыми параметрами будут толщина листа T , относительная координата $x^* = x/T$, глубина дефекта $h^* = h/T$ при постоянной относительной ширине пропила $l^* = l/T = 1$, шероховатость поверхности Rz , абсолютная магнитная проницаемость деталей магнитной системы $\mu_{мс}$ и абсолютная магнитная проницаемость объекта контроля $\mu_{ок}$. При расчетах примем магнитную индукцию в магнитопроводе $B_m \approx 1,12$ Тл, а величину конструктивную зазора $Z = 5$ мм, устанавливаемую в большинстве рассматриваемых измерительных преобразователей.

Расчет чувствительности рассматриваемой модели преобразователя

На рис. 2 представлены расчетные зависимости $B_{zm}(h^*, T)$ для рассматриваемой модели преобразователя над ферромагнитным листом из стали 10 с

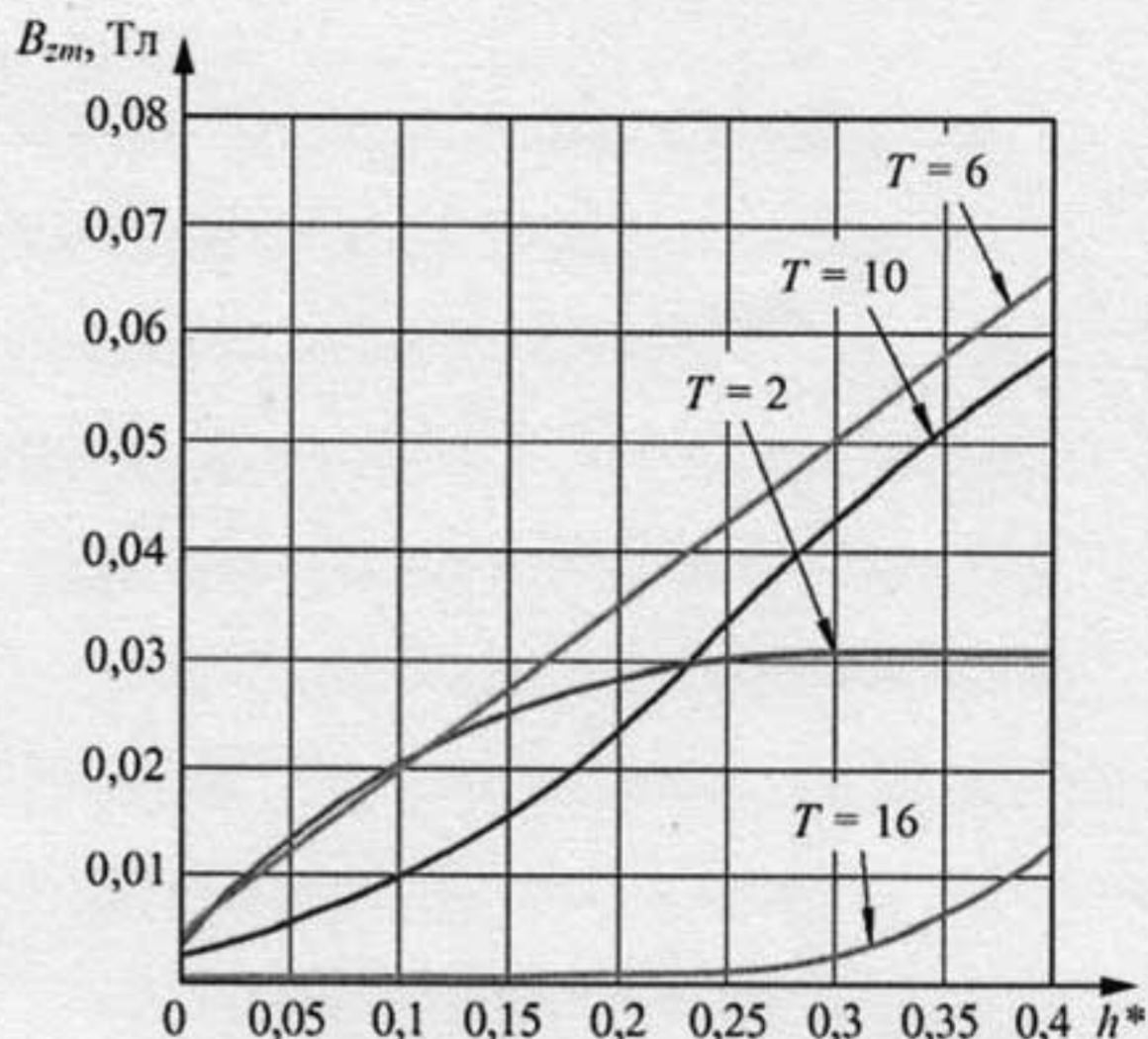


Рис. 2. Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от глубины h^* дефекта над листом из стали 10 толщиной T с искусственным дефектом в виде поперечного пропила шириной $l^* = 1$ при $Z = 5$ мм

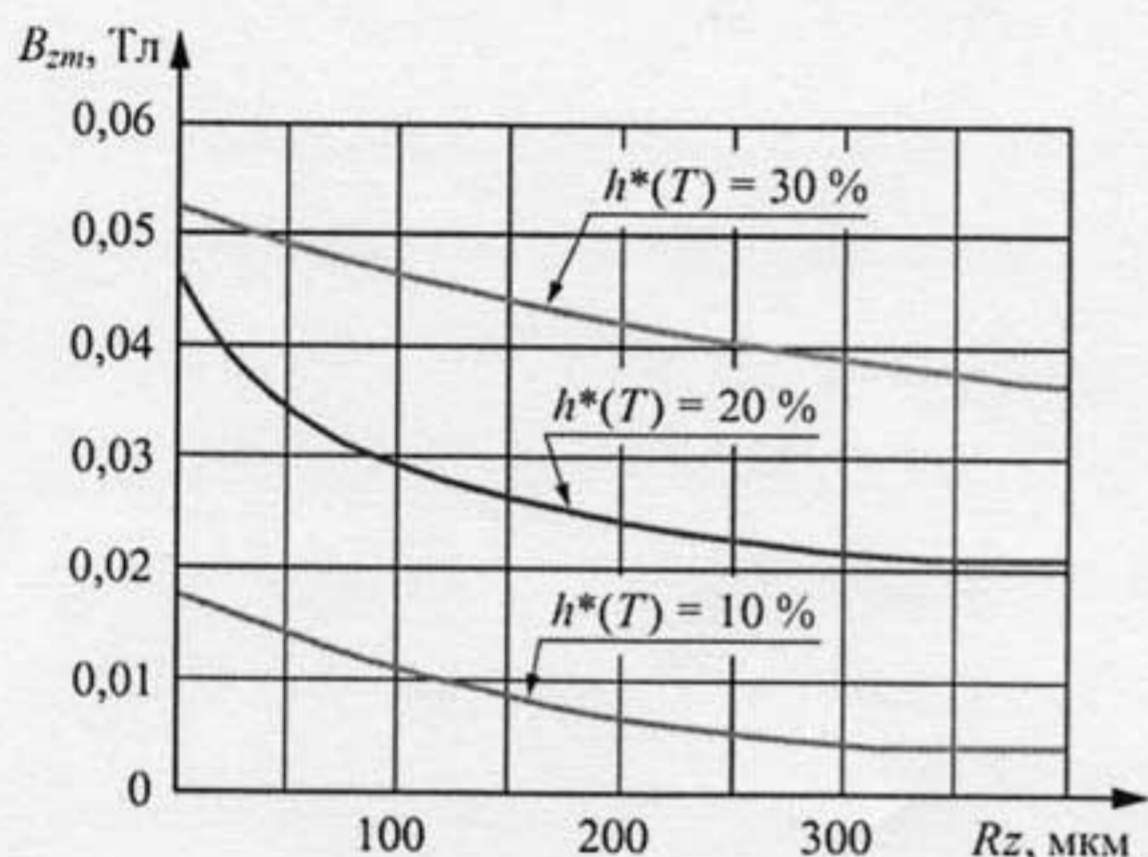
искусственным дефектом в виде поперечного пропила, выполненным в соответствии с рис. 1.

Из рис. 2 видно, что в диапазоне $h^* \approx 0,05...0,40$ преобразователь имеет наибольшую чувствительность при $T \approx 6$ мм. Если $T \approx 2$ мм, то наблюдается существенная нелинейность характеристики и уменьшение чувствительности при $h^* > 0,1$. При $T > 10$ преобразователь практически полностью теряет чувствительность в области $h^* < 0,15$. Расчеты показывают, что для $h^* \approx 0,05...0,35$ близкие характеристики обеспечиваются в диапазоне $T \approx 5...9$ мм.

Влияние мешающих параметров

В соответствии с представленной моделью рассчитаем влияние основных мешающих параметров.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости, иллюстрирующие влияние шероховатости внешней поверхности в диапазоне $Rz = 0...400$ мкм на величину магнитной индукции B_{zm} . Видно, что с увеличением Rz чувствительность преобразователя к дефектам снижается, а дополнительная погрешность измерения $\Delta h(Rz)$ увеличивается. В частности, для листа толщиной $T = 6$ мм с дефектом глубиной $h^* \approx 0,1$ дополнительная погрешность $\Delta h(Rz = 100) = 3\Delta h_d$. Соответственно, для листа толщиной $T = 10$ мм с дефектом глубиной $h^* \approx 0,1$ дополнительная погрешность $\Delta h(Rz = 100) = 2\Delta h_d$ и для $h^* \approx 0,2$ дополнительная погрешность $\Delta h(Rz = 100) = 4\Delta h_d$.



Девияция зазора Z при изменении толщины защитного покрытия в процессе сканирования также будет приводить к изменению чувствительности преобразователя и вызывать дополнительную погрешность измерения $\Delta h(\Delta Z)$, так как $B_{zm} \sim 1/Z$ при прочих равных условиях [9]. На рис. 5 приведены расчетные значения магнитной индукции B_{zm} в зависимости от зазора Z при базовом значении $Z = 5$ мм. При $h^* \approx 0,2$ для $T = 6$ мм дополнительная погрешность $\Delta h(\Delta Z = 1) = 2\Delta h_d$, а для $T = 10$ мм $\Delta h(\Delta Z = 1) = 3\Delta h_d$.

Анализ представленных на рис. 5 зависимостей показывает, что устанавливаемый для рассматриваемых преобразователей технологический зазор

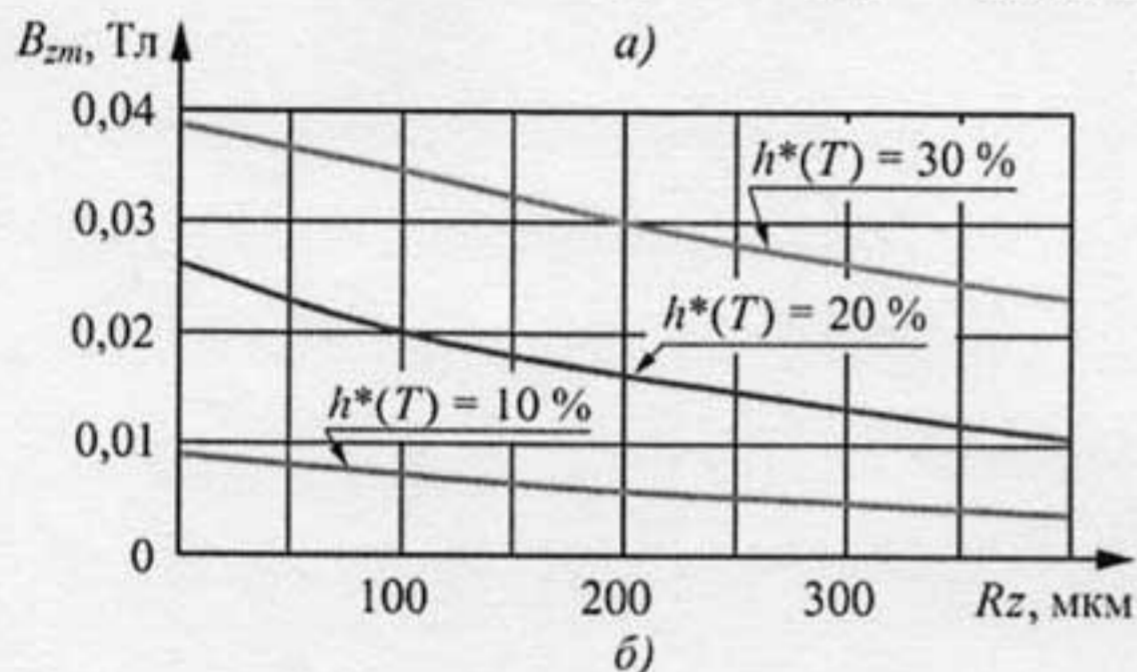


Рис. 3. Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от шероховатости поверхности Rz для листа толщиной $T = 6$ мм (а) и $T = 10$ мм (б) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила (шероховатая поверхность со стороны точки наблюдения)

Если шероховатой является поверхность с обратной стороны стенки объекта контроля, существенных изменений ее влияния не будет (рис. 4).

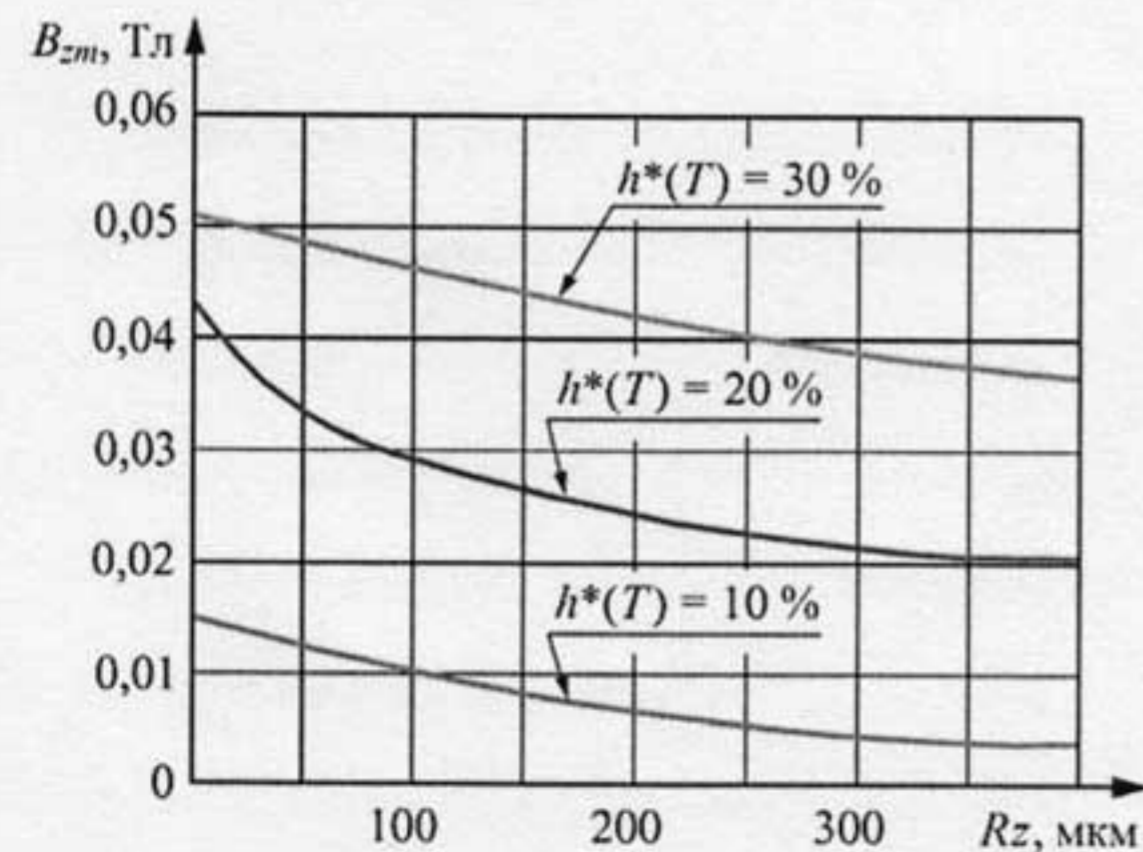
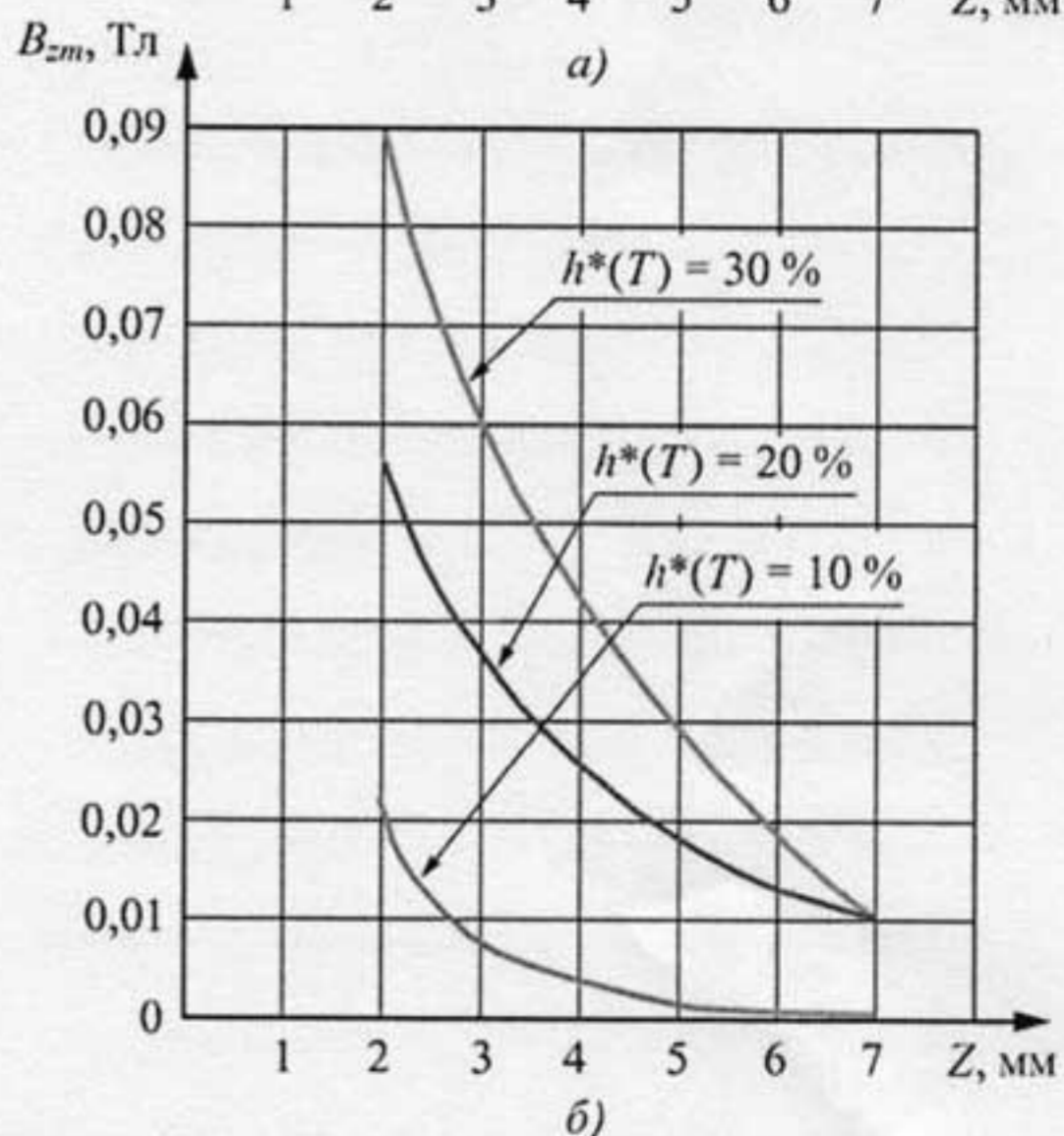
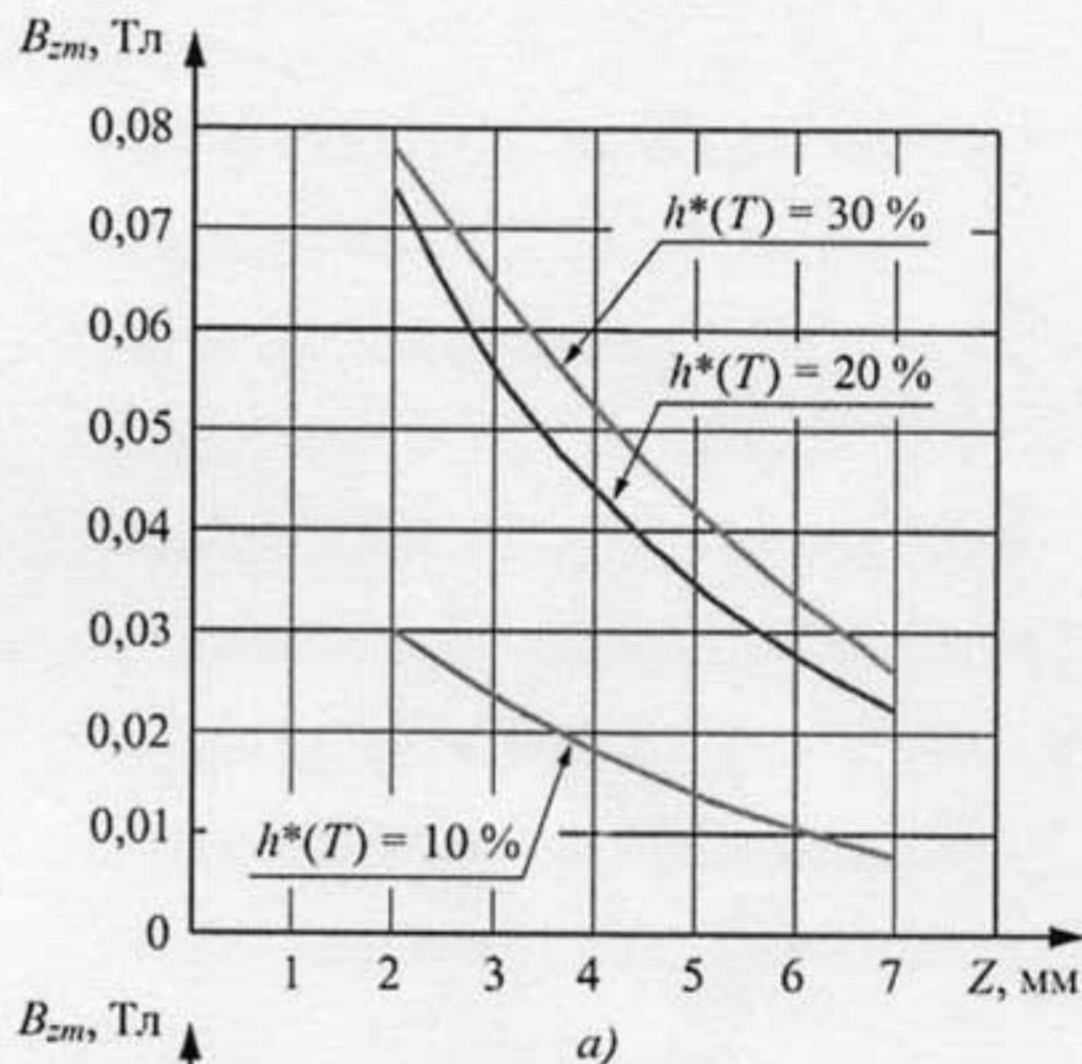


Рис. 4. Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от шероховатости Rz для листа толщиной $T = 6$ мм (а) и $T = 10$ мм (б) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила (шероховатая поверхность с противоположной стороны от точки наблюдения)

Рис. 5. Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от зазора Z при толщине листа $T = 6$ мм (а) и $T = 10$ мм (б)

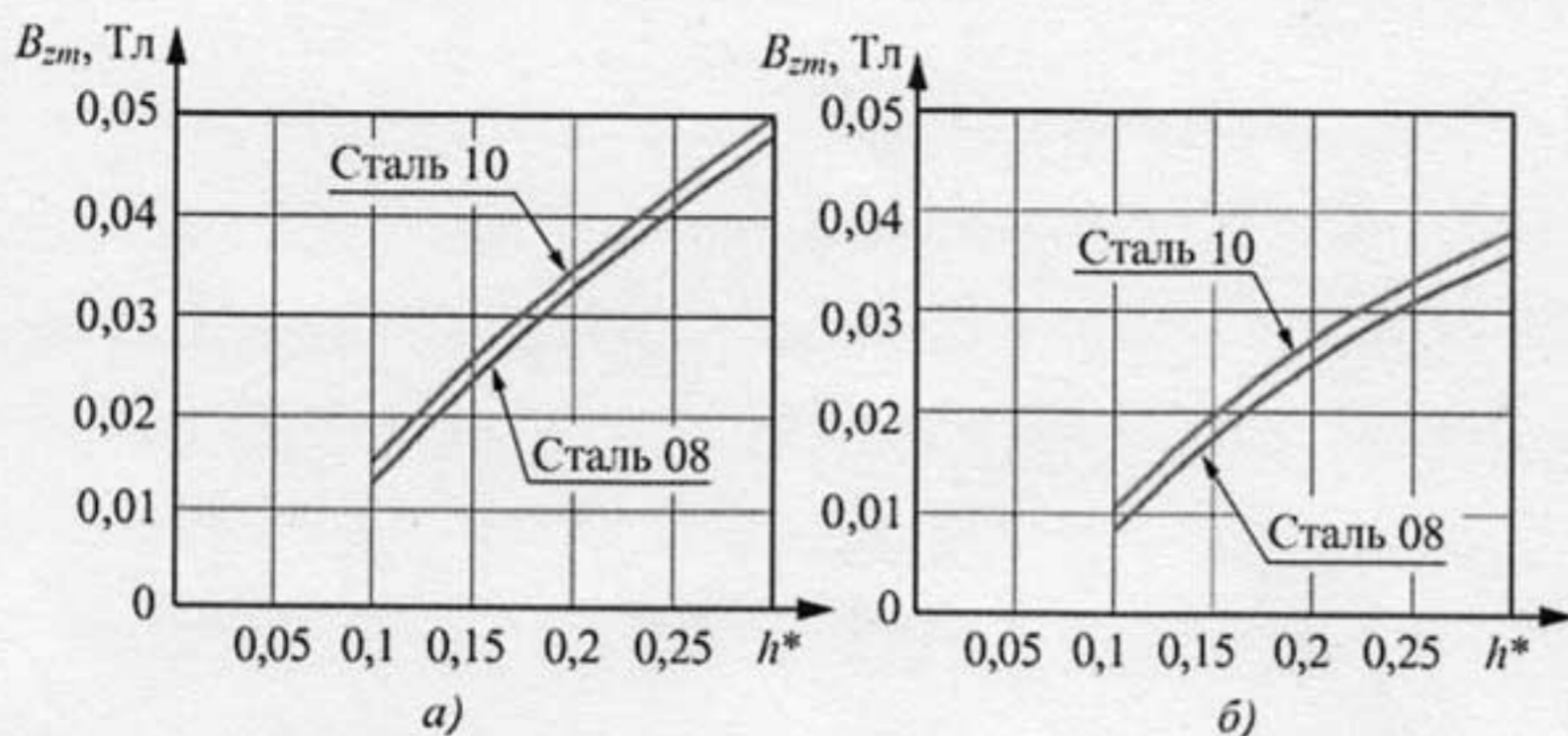


Рис. 6. Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от глубины h^* дефекта в случае выполнения деталей магнитной системы из сталей марок 10 и 08 над ферромагнитными листами толщиной $T = 6$ мм (а) и $T = 10$ мм (б) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила

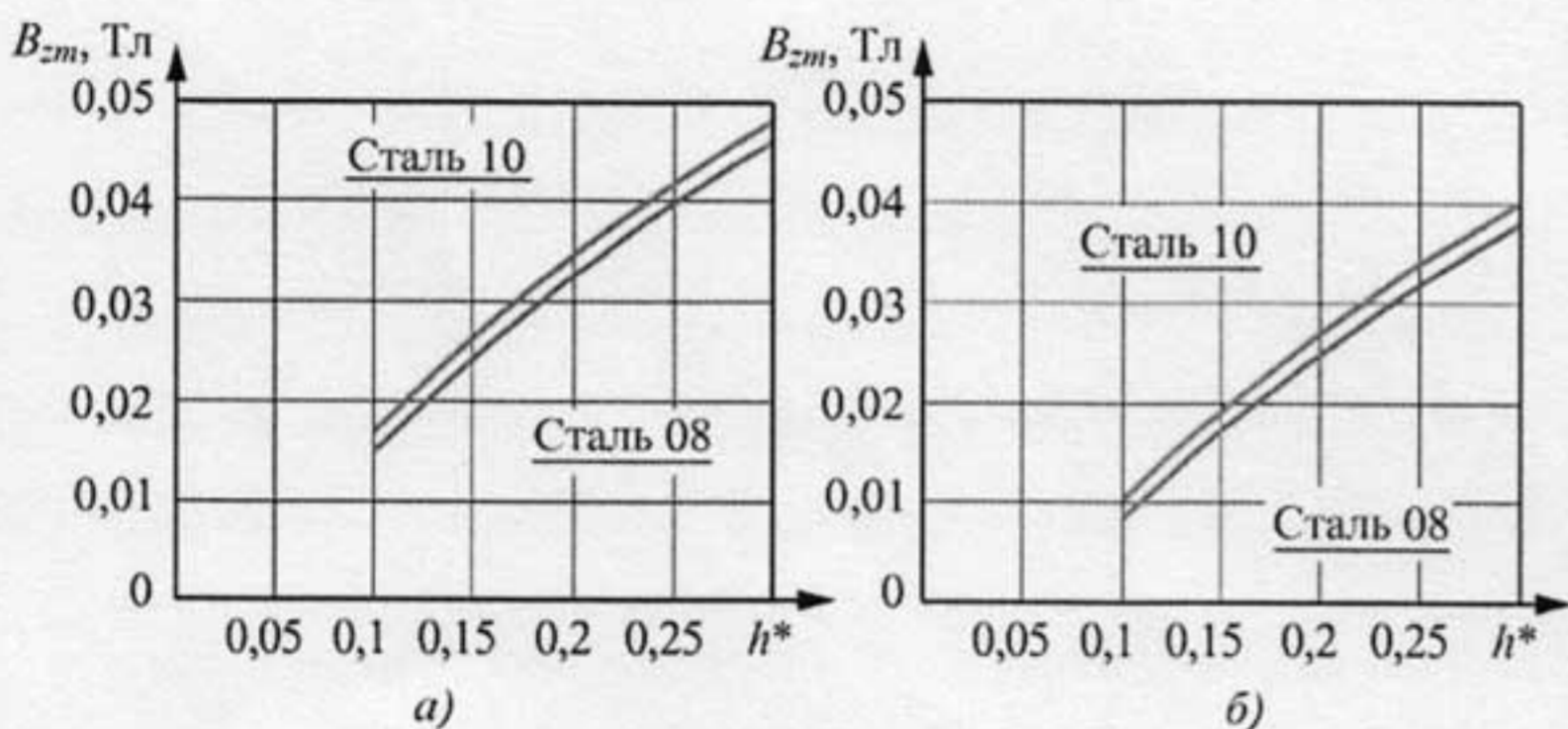


Рис. 7. Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от глубины дефекта h^* над ферромагнитными листами из сталей марок 10 и 08 толщиной $T = 6$ мм (а) и $T = 10$ мм (б) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила

$Z = 5$ мм является максимально допустимым, при наличии покрытий чувствительность может уменьшаться до критического уровня.

При анализе метрологических характеристик следует учесть также возможное влияние локальной девиации относительных магнитных проницаемостей $\mu_{МС}$ и $\mu_{ОК}$ деталей магнитной системы и материала объекта контроля соответственно, которые могут привести к снижению достоверности результатов измерений [5]. Для оценки были проведены расчеты $B_{zm}(h^*, T)$ для случая использования сталей 10 и 08 в качестве материала ярма и полюсов магнитной системы (рис. 6), отличие магнитных свойств которых сопоставимо с возможной локальной девиацией $\Delta\mu$ используемых для этого сталей [4].

Выполненные расчеты зависимостей $B_{zm}(h^*, T)$ показывают, что, например, в случае замены сталей 10 на 08 при изготовлении деталей магнитной сис-

темы при $h^* \approx 0,2$ для $T = 6$ мм и $T = 10$ мм дополнительная погрешность $\Delta h(\Delta\mu_{МС}) = 2\Delta h_d$.

В случае замены стали 10 на 08 при изготовлении стенки или днища объекта контроля при $h^* \approx 0,2$ для $T = 6$ мм и $T = 10$ мм в процессе сканирования поверхности $\Delta B_{zm}(h^*, T) = |B_{zm}(h^*, T)_{10} - B_{zm}(h^*, T)_{08}| < 0,002$ Тл, дополнительная погрешность $\Delta h(\Delta\mu_{ОК}) = 2\Delta h_d$. Разность типовых значений относительной магнитной проницаемости рассматриваемых сталей соответствует величине девиации $\mu_{ОК}$ в пределах партии листов.

Заключение

Выпускаемые в настоящее время дефектоскопы с MFL-сканерами не могут обеспечить заявляемую в руководстве по эксплуатации погрешность измерения глубины коррозионных повреждений $\Delta h \leq \pm(0,10...0,15)h$ в условиях разброса геометрических и электрофизических характеристик стальных листов днищ резервуаров. Так, например, при сканировании днища толщиной $T = 10$ мм в случае выявления дефекта глубиной $h^* \approx 0,2$ при девиации шероховатости поверхности в диапазоне $Rz = 0...100$ мкм, изменении ве-

личины зазора на величину $\Delta Z = 1$ мм и указанной вариации относительной магнитной проницаемости $\Delta\mu_{ОК}$ материала объекта контроля погрешность измерения может достигать величины $\Delta h \leq \pm 0,3h$.

Применяемые в настоящее время магнитные дефектоскопы с MFL-сканерами, исходя из их назначения и технических характеристик, следует рассматривать как средства измерения. В связи с этим они должны иметь поверочные схемы, эталоны и средства измерений, обеспечивающие прослеживаемость рабочих средств измерений (дефектоскопов) к первичному эталону и получение достоверных результатов измерений.

Эталоны и средства измерений, а также контрольные образцы должны изготавливаться по единой технологии согласно утвержденным требованиям для обеспечения повторяемости, например при поверке.

Библиографический список

1. ASTM E 570-97. Standard Practice for Flux Leakage Examination of Ferromagnetic Steel Tubular Products.
2. ГОСТ Р 55612–2013. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014.
3. **Неразрушающий контроль:** справочник: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. Магнитные методы контроля / В. В. Клюев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. 2-е изд. испр. М.: Машиностроение, 2006. 375 с.
4. Герасимов В. Г., Клюев В. В., Шатерников В. Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 190 – 198.
5. Слесарев Д. А., Абакумов А. А. Обработка и представление информации в MFL-методе неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2013. № 9. С. 3 – 9.
6. Drury J. C. A Comparison of the Magnetic Flux Leakage and Ultrasonic Methods in the Detection and Measurement of Corrosion Pitting in Ferrous Plate and Pipe / Silverwing (UK) Limited A., Marino, procontrol s.r.l. (Italy). URL: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn701/idn701.htm>
7. Вишняков С. В., Гордюхина Н. М., Федорова Е. М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. М.: МЭИ (ТУ), 2003.
8. Андреева Е. Г., Шамец С. П., Колмогоров Д. В. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ansys. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2005. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf] = Нефтегазовое дело.
9. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий: научное, методическое, справочное пособие. СПб.: Гуманистика, 2009. 904 с.

Библиографический список

1. ASTM E 570-97. Standard Practice for Flux Leakage Examination of Ferromagnetic Steel Tubular Products.
2. ГОСТ Р 55612–2013. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014.
3. **Неразрушающий контроль:** справочник: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. Магнитные методы контроля / В. В. Клюев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. 2-е изд. испр. М.: Машиностроение, 2006. 375 с.
4. Герасимов В. Г., Клюев В. В., Шатерников В. Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 190 – 198.
5. Слесарев Д. А., Абакумов А. А. Обработка и представление информации в MFL-методе неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2013. № 9. С. 3 – 9.
6. Drury J. C. A Comparison of the Magnetic Flux Leakage and Ultrasonic Methods in the Detection and Measurement of Corrosion Pitting in Ferrous Plate and Pipe / Silverwing (UK) Limited A., Marino, procontrol s.r.l. (Italy). URL: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn701/idn701.htm>
7. Вишняков С. В., Гордюхина Н. М., Федорова Е. М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. М.: МЭИ (ТУ), 2003.
8. Андреева Е. Г., Шамец С. П., Колмогоров Д. В. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ansys. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2005. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf] = Нефтегазовое дело.
9. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий: научное, методическое, справочное пособие. СПб.: Гуманистика, 2009. 904 с.