

Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П.

Потапов А.И. д.т.н., профессор Санкт – Петербургского Горного университета, зав. кафедры приборостроения, E-mail: [apot@mail.ru](mailto:apot@mail.ru). Сясько В.А. д.т.н., профессор, место работы: ООО «Константа», генеральный директор, E-mail: [office@constanta.ru](mailto:office@constanta.ru). Пудовкин О.П. аспирант каф. приборостроения Санкт – Петербургского Горного университета, E-mail: [pudovkin.oleg@gmail.com](mailto:pudovkin.oleg@gmail.com)

*Неразрушающий контроль днищ резервуаров для хранения нефтепродуктов с использованием технологии MFL (Magnetic Flux Leakage)*

Рассмотрены вопросы применения технологии рассеяния магнитного потока MFL для обеспечения безопасности эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов.

Ключевые слова: Коррозия, вертикальные резервуары, нефтехранилища, неразрушающий контроль, безопасность

Potapov A.I., Syasko V.A., Pudovkin O.P.

*Non-destructive testing of the bottoms of storage tanks using technology MFL (Magnetic Flux Leakage)*

The problems of scattering technology MFL magnetic flux for safety vertical cylindrical storage tanks.

Keywords: Corrosion, vertical tanks, storage tanks, non-destructive testing, security

Для хранения продуктов нефтегазового комплекса наиболее распространены, как у нас в стране, так и за рубежом, стальные резервуары. В соответствии с [1] применяются следующие типы стальных резервуаров:

- вертикальные цилиндрические резервуары РВС (резервуары вертикальные стальные) со стационарной конической или сферической крышей вместимостью до 50000 м<sup>3</sup>;
- резервуары вертикальные цилиндрические со стационарной крышей и плавающим понтоном вместимостью до 50000 м<sup>3</sup>;
- резервуары вертикальные цилиндрические с плавающей крышей вместимостью до 120000 м<sup>3</sup>.

Одной из основных причин выхода из строя резервуаров для хранения нефти является коррозия. Коррозия не только снижает срок службы резервуара, но и непосредственно оказывает влияние на промышленную

безопасность при его эксплуатации. Опыт эксплуатации таких резервуаров показывает, что внутренняя поверхность, как правило, подвергается равномерной, щелевой, питтинговой и ножевой коррозии. Наиболее уязвимым элементом конструкции резервуаров является днище, которое постоянно контактирует с подтоварной водой, насыщенной химически активными элементами, ускоряющими процесс коррозии [2,3]. Результаты анализа аварий резервуаров [4] говорят о том, что именно сквозные отверстия днищ, вызванные образованием язвенной коррозии, были причиной наиболее крупных катастроф. При изготовлении днищ для таких резервуаров применяется сталь толщиной не менее 4 мм [5]. В емкостях малого объема (до 1000 м<sup>3</sup>) днище резервуара изготавливается с уклоном от центра или в центр (рис.1). Уклон делается в отношении 1 к 100. На днище устанавливается кольцевая окрайка [6].

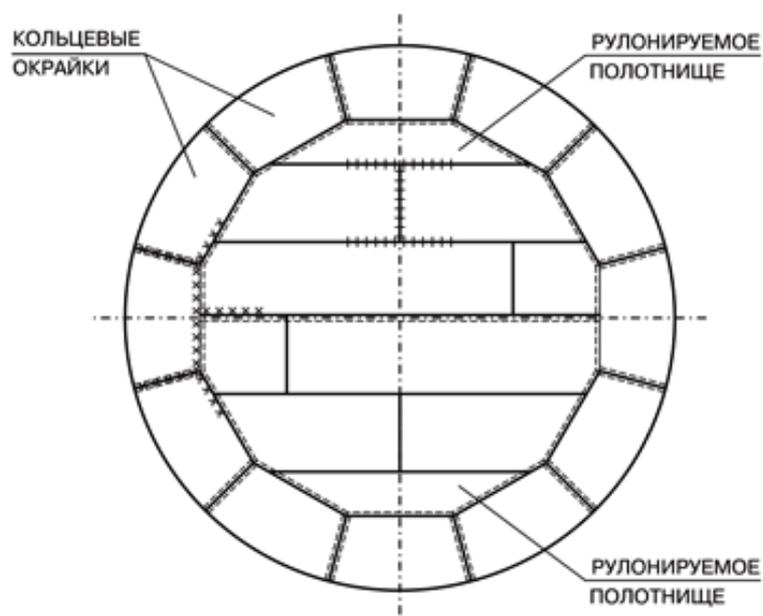


Рисунок 1. Схема днища цилиндрического резервуара для хранения нефтепродукта.

Толщина стали для окрайки – от 6 до 16 мм в зависимости от толщины нижнего пояса резервуара. Отсюда следует, что для контроля днища необходимо выявлять дефекты в диапазоне толщин от 4 мм (минимальная толщина рулонированного полотнища) до 16 мм (максимальная толщина окрайки).

На сегодняшний день, согласно [7] решение о применении того или иного метода неразрушающего контроля или их комбинации принимается экспертной организацией. В комбинацию практически всегда включают технологию MFL (Magnetic Flux Leakage – технология магнитного вида неразрушающего контроля, использующая, в соответствии с ГОСТ Р 55612-2013, метод эффекта Холла для анализа магнитного поля рассеивания дефекта), т.к. при ее использовании не требуется специальная подготовка поверхности металла и допускается наличие изолирующих покрытий (лакокрасочных, эпоксидных и др.) толщиной до 5 мм. Стоит отметить, что оборудование реализующее эту технологию обладает высокой производительностью (до 150 м<sup>2</sup>/час). Для исключения недобраковки при контроле выборочно используют ультразвуковой эхо-метод для измерения остаточной толщины стенки в зоне дефекта.

Основной целью контроля MFL дефектоскопом является оперативное выявление дефектов на первоначальном этапе их формирования, для исключения предпосылок техногенных катастроф. Следовательно, необходимо выявлять дефекты глубиной не более 10...30% от толщины дна. На сегодняшний день ни один из существующих MFL – дефектоскопов не способен гарантированно выявлять дефекты глубиной до 30% утонения во всем диапазоне толщин от 4 до 16 мм. Это связано с тем, что не для всего диапазона контролируемых толщин дна параметры магнитных систем выпускаемых MFL дефектоскопов являются оптимальными, что существенно влияет на чувствительность к дефектам. Из этого следует, что необходимо разбить весь диапазон контролируемых толщин на поддиапазоны и спроектировать конструкцию измерительных преобразователей так, чтобы для каждого из поддиапазонов гарантированно выявлялись дефекты глубиной не более 10%.

Рассмотрим обобщенную структурную схему системы намагничивания MFL сканера над объектом контроля (ферромагнитным листом) с искусственным дефектом, представляющим собой поперечный пропил,

характеристики которого и основные мешающие параметры указаны на рис.2

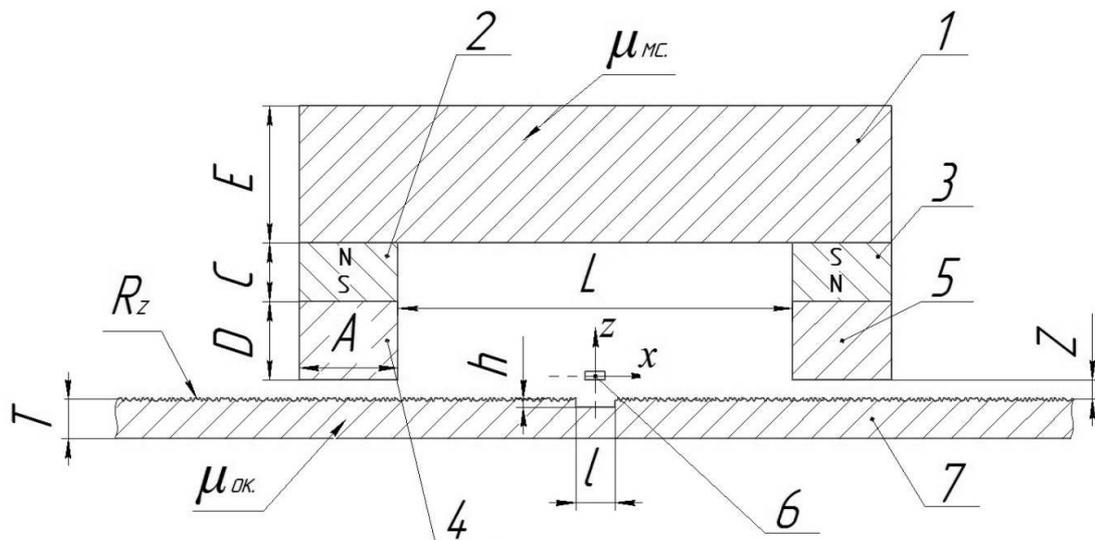


Рисунок 2.Обобщенная структурная схема системы намагничивания MFL-сканера и объект контроля с искусственным дефектом в виде поперечного пропила, имитирующим коррозионное повреждение стенки. 1 – ярмо магнитопровода, 2 и 3 – постоянные магниты (NdFeB), 4 и 5 – полюса магнитопровода, 6 – чувствительный элемент (точка наблюдения), 7 – стальной лист с искусственным дефектом.

Магнитная система 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 преобразователя относительно дефекта вдоль оси  $x$  (на рис.2 начало системы координат связано с центром пропила).

В настоящее время для решения задач, связанных с анализом магнитных полей, широко применяется метод конечных элементов [8]. Разработанная модель системы намагничивания и чувствительного элемента над ферромагнитным листом с пропилом позволила рассчитать максимальное значение составляющей  $B_{zm}$  магнитной индукции в точке наблюдения при перемещении преобразователя относительно дефекта вдоль оси  $x$  (рис.3).

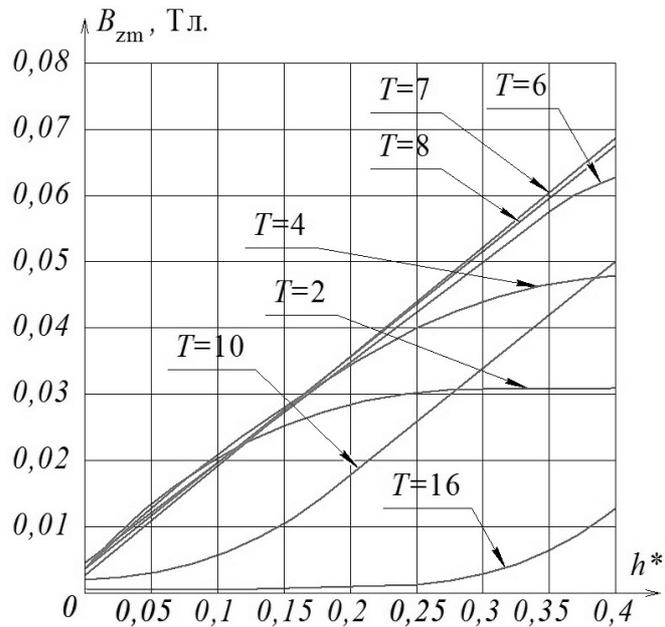


Рисунок 3. Зависимость  $B_{zm}(h^*, T)$  над листом из стали 1010 с искусственным дефектом в виде поперечного пропила шириной  $l^* = 1$  при  $Z = 5$  мм

Из рис. 3 видно, что в диапазоне  $h^* = h/l \approx 0,05 - 0,4$  преобразователь имеет наибольшую чувствительность при  $T \approx 6 - 8$  мм. Если  $T < 4$  мм, то наблюдается существенная нелинейность характеристики и уменьшение чувствительности при  $h^* > 0,1 - 0,2$ . 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. Из этого можно сделать вывод о величине оптимальной намагниченности металла для проведения контроля.

В зоне контроля (расположения датчиков Холла) в металле (низкоуглеродистой стали) без дефекта при намагничивании должна быть индукция  $B_m \approx 1,9...2,1$  Тл, близкая к насыщению. Ниже приведены иллюстрации, характеризующие интенсивность силовых линий магнитного поля и картины поля рассеяния для типового преобразователя, используемого большинством производителей систем.

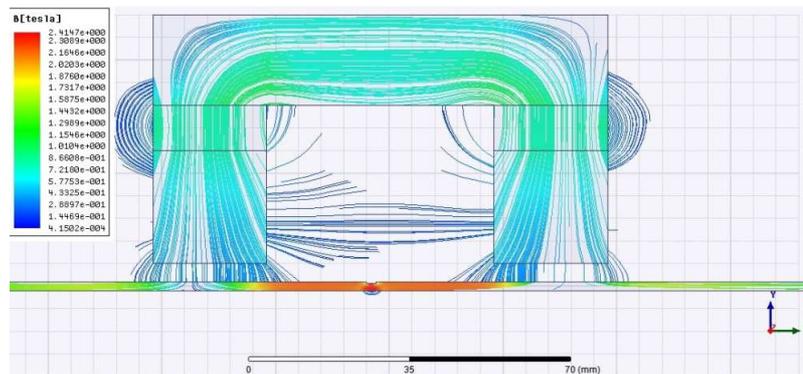


Рисунок 4. Картина поля рассеивания при толщине листа  $T = 2$  мм

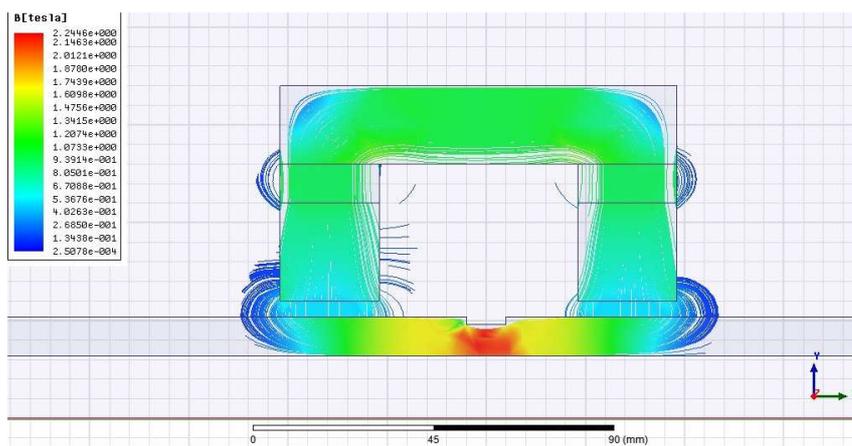


Рисунок 5. Картина магнитного поля рассеивания при толщине листа  $T = 10$  мм

На рис.4 и рис.5 видно, что магнитопровод находится не в насыщении. Также видна область насыщения ферромагнитного листа в зависимости от  $T$  по длине и в зоне дефекта (утонения).

Введем относительные размеры преобразователя:  $A^* = A/T$ ,  $C^* = C/T$ ,  $E^* = E/T$ ,  $D^* = D/T$ ,  $L^* = L/T$ ,  $Z^* = Z/T$ . При  $T_0 = 7$  мм для рассматриваемого преобразователя обозначим как оптимальные:  $A_0^* = 3,57$ ,  $C_0^* = 1,43$ ,  $E_0^* = 2,86$ ,  $D_0^* = 3,57$ ,  $L_0^* = 7,14$ ,  $Z_0^* = 0,71$ . В диапазоне контроля  $\Delta T$  от 5 до 9 мм относительные размеры преобразователя будут изменяться в пределах:  $\Delta A^* \sim (5 - 2,77)$ ,  $\Delta C^* \sim (2 - 1,11)$ ,  $\Delta E^* \sim (4 - 2,22)$ ,  $\Delta D^* \sim (5 - 2,77)$ ,  $\Delta L^* \sim (10 - 5,55)$ ,  $\Delta Z^* \sim (1 - 0,55)$ .

При условии геометрического подобия магнитных систем преобразователей, можно разбить весь диапазон контролируемых толщин  $T$  на поддиапазоны, для каждого из которых относительные размеры

преобразователей будут соответствовать оптимальным и изменяться в установленных для них пределах.

Таблица 1. Расчетные значения размеров магнитной системы преобразователей и диапазоны контролируемых толщин

$N$	$T_0$ , мм	$A$ , мм	$C$ , мм	$E$ , мм	$D$ , мм	$L$ , мм	$Z$ , мм	$\Delta T$ , мм
1	3,8	13,6	5,4	10,8	13,6	27,2	2,7	2,7 - 5,3
2	7	25	10	20	25	50	5	5 - 9
3	12	42,8	17,1	34,3	42,8	85	8,5	9,2 - 15,9

На основании расчетов, спроектирован (рис.6) и изготовлен опытный образец MFL – преобразователя (рис.7) со сменной системой намагничивания и многоканальных преобразователей, оптимизированных по диапазонам (табл.1), для исследований описываемой технологии НК стальных листов.

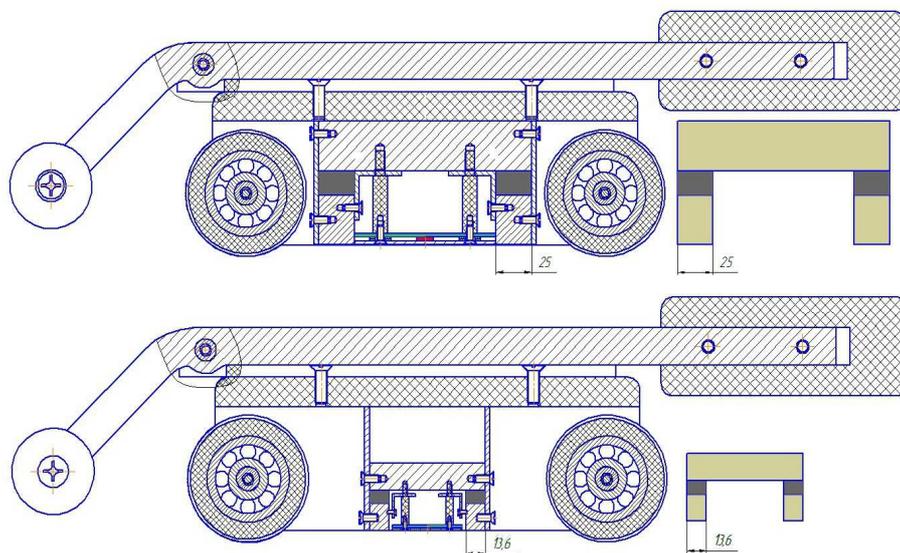


Рисунок 6. схема MFL – преобразователя со сменной системой намагничивания и многоканальных преобразователей

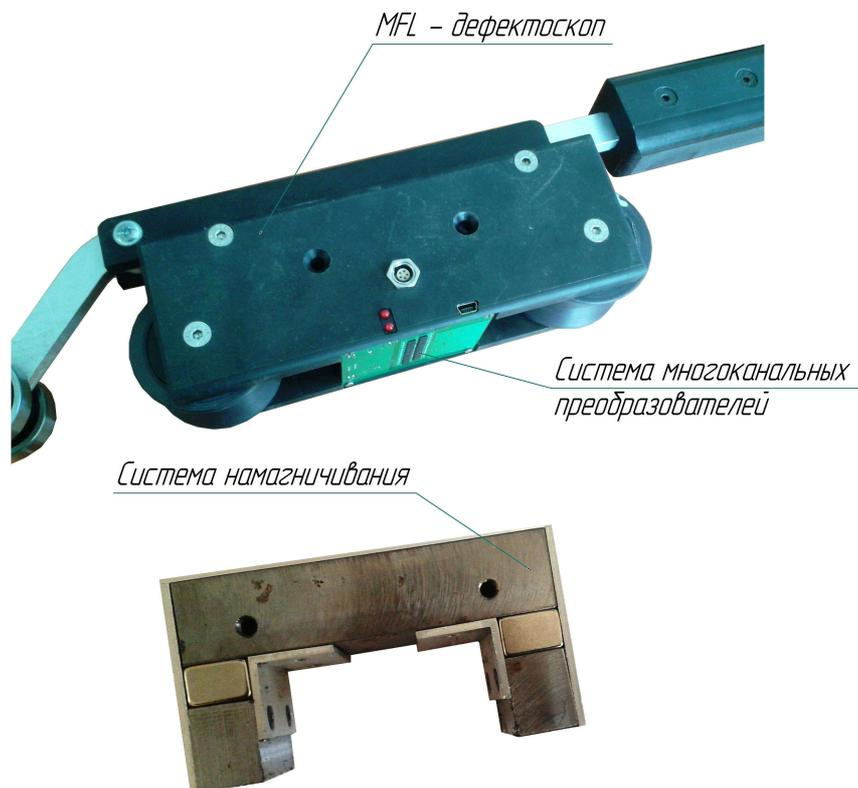
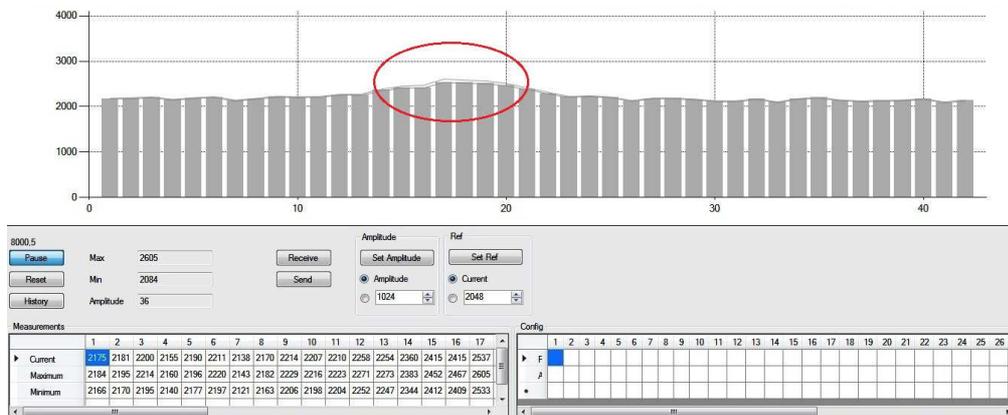
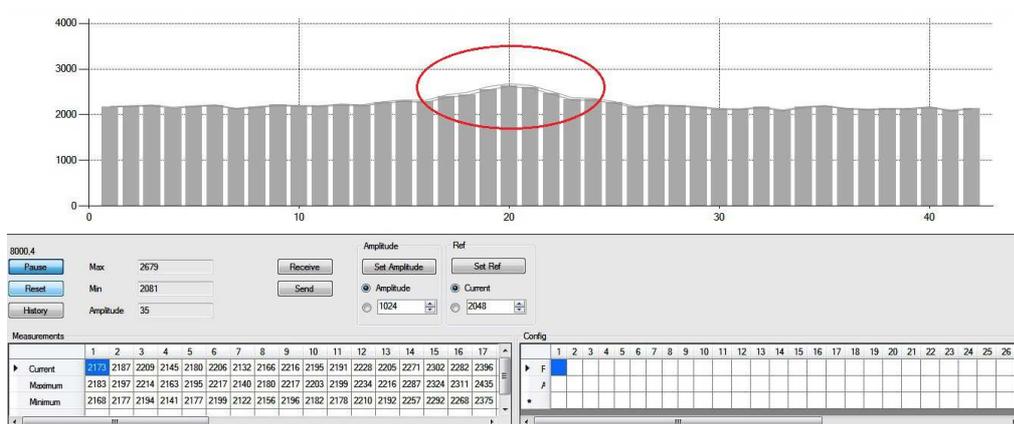


Рисунок 7. Опытный образец MFL – преобразователя.

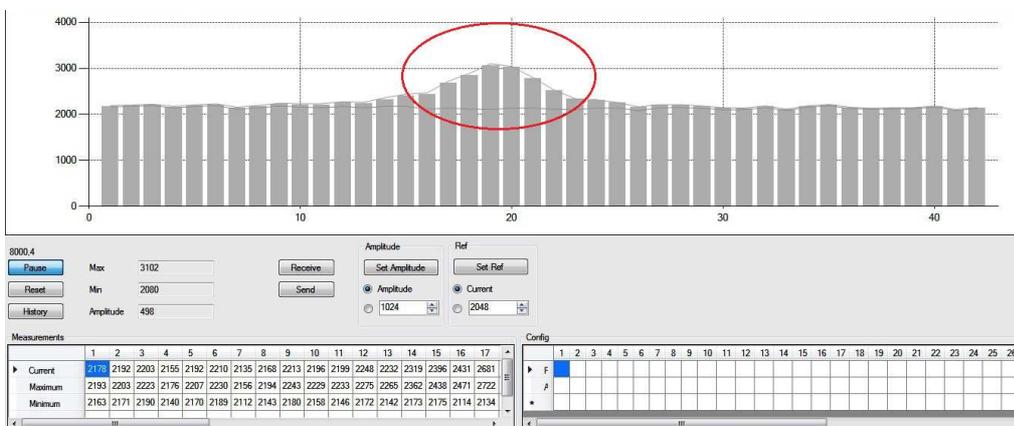
Для исследования характеристик был выполнен ряд экспериментов с использованием объекта контроля в виде стального листа  $T = 6$  мм с искусственными дефектами, имитирующими реальную язвенную коррозию. Выявление дефектов осуществлялось разработанным MFL – преобразователем с многоканальной системой преобразователей (42 датчика Холла). Результатом экспериментов являются гистограммы уровней сигналов в виде единиц кода, эквивалентных выходному напряжению преобразователей. На полученных гистограммах представлен результат обработки сигнала с выхода датчика Холла, при пересечении им области искусственного дефекта. (Рис.8).



а)



б)



в)

Рисунок 8. Результаты обработки сигналов с датчика Холла при пересечении области искусственного дефекта: а) искусственный дефект 10% утонения; б) дефект 20% утонения; в) дефект 30% утонения.

Макетирование MFL – преобразователей показало сходимость результатов моделирования и расчетов с экспериментальными данными. По результатам исследований разработан преобразователь со сменными оптимизированными магнитными системами, который обеспечивает гарантированное выявление язвенной коррозии на начальном этапе ее развития. Использование

рассмотренных преобразователей в системах сканирования MFL дефектоскопов позволит повысить промышленную безопасность эксплуатации стальных цилиндрических резервуаров и существенно снизить вероятность техногенных катастроф.

#### **Список литературы:**

1. ГОСТ Р 52910-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия.
2. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии.
3. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.
4. Кондрашова О.Г., Назарова О.М. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров //Нефтегазовое дело, 2004, № 2. С. 21-29
5. ГОСТ 19903-74. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент (с Изменениями N 1-6)
6. СНиП II-23-81\* Нормы проектирования. Стальные конструкции.
7. СА-03-008-08. Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности.
8. Вишняков С.В., Гордюхина Н.М., Федорова Е.М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. - М: МЭИ (ТУ) Кафедра электрофизики, 2003 г.

Потапов А.И. 9556085, Сясько В.А. 89219334343, Пудовкин О.П. 89500378044