

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫЯВЛЯЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕМНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛН РЭЛЕЯ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

© 2021 г. Н.П. Алешин^{1,2,*}, Н.В. Крысько^{1,2,**}, А.Г. Кусый^{1,2,***}, С.В. Скрынников^{3,****},
Л. Ю. Могильнер^{4,*****}

¹Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1

³ПАО «Газпром», Россия 117997 Москва, ул. Наметкина, 16, ГСП-7

⁴Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО «НИИ Транснефть»), Россия 117186 Москва, Севастопольский проспект, 47а
E-mail: *aleshin@bmstu.ru; **kryskonv@bmstu.ru; ***andrei.k.166@mail.ru;
****S.Skrynnikov@adm.gazprom.ru; *****mogilnerLY@niitnn.transneft.ru

Поступила в редакцию 02.03.2021; после доработки 19.03.2021

Принята к публикации 19.03.2021

Представлены результаты исследования выявляемости поверхностных объемных дефектов ультразвуковым методом неразрушающего контроля. Рассмотрена возможность применения для этих целей поверхностных волн Релея, возбуждаемых электромагнитно-акустическим преобразователем (ЭМАП). В качестве искусственных дефектов для имитации данных дефектов в образцах из низкоуглеродистой стали использовались несквозные вертикальные сверления различного диаметра и глубины. По результатам измерений построены зависимости амплитуды принимаемых сигналов от параметров сверлений. При статистической обработке результатов учтено отношение сигнал/шум при возбуждении волны Релея с помощью ЭМАП на бездефектных участках образцов. Для построения кривых вероятности выявления дефектов (PoD) определены оптимальные модели распределения амплитуд сигналов. В условиях проведенных экспериментов по построенным PoD-кривым сделаны выводы о минимальных размерах поверхностных объемных дефектов, выявляемых с вероятностью 90 % с учетом доверительного интервала 95 %, и о возможности выполнения настройки параметров ультразвукового контроля по сигналам, отраженным от вертикальных сверлений.

Ключевые слова: поверхностные дефекты, коррозия, ультразвуковой контроль, вертикальные сверления, электромагнитно-акустический преобразователь, вероятность выявления дефектов.

DOI: 10.31857/S0130308221050031

ВВЕДЕНИЕ

В перечень основных развивающихся дефектов металла на объектах машиностроения, энергетики, в трубопроводном транспорте входят поверхностные коррозионные повреждения, возникающие под воздействием продукта или внешней среды (по ГОСТ 5272—68* с изм. 1, 2. Коррозия металлов. Термины). Такие дефекты могут составлять более 50 % от общего числа выявляемых дефектов металлоконструкций [1—4].

Среди локальных дефектов коррозионного происхождения выделяют плоскостные (например, стресс-коррозионные трещины) и объемные (сквозные и несквозные свищи, местная коррозия (язвы) и т.д. [5]). Для выявления таких дефектов и обеспечения эксплуатационной надежности оборудования, находящегося в эксплуатации длительные промежутки времени, в настоящее время актуальны вопросы обследования, диагностирования, мониторинга технического состояния, в том числе — с применением методов ультразвуковой дефектоскопии.

Ультразвуковые волны рассеиваются на объемных дефектах в значительно более широком диапазоне углов по сравнению с рассеянием на аналогичных по апертуре плоскостных мишенях. Соответственно, амплитуда сигнала от объемного дефекта, принимаемого в каждом данном направлении, чаще всего существенно меньше той, которая принималась бы в этом же направлении от плоскостного дефекта при его оптимальной ориентации. Поэтому чувствительность к объемным дефектам при ультразвуковом контроле обычно ниже, чем к плоскостным. В настоящей статье рассмотрим некоторые возможности повышения выявляемости и точности измерения размеров локальных объемных дефектов коррозионного происхождения.

В качестве модели объемного дефекта, выходящего на поверхность, используем вертикальное сверление конечной глубины и отметим, что для выявления таких дефектов можно использовать волну Релея [6]. Например, в работах [7—9] исследовали взаимодействие релеевских волн с плоскостными несовершенствами поверхности типа «щель», «полуцилиндрическая выемка», «клин». Были получены зависимости коэффициента отражения ультразвука от размеров дефекта. Однако для практического применения полученных решений ранее существовали существенные ограничения. Дело в том, что если волну Релея возбуждать пьезопреобразователем, то для обеспечения акустического контакта поверхность металла необходимо смачивать жидкостью. При сканировании эта жидкость неизбежно окружает контактную поверхность преобразователя со всех сторон, в том числе она присутствует между передней гранью преобразователя и выявляемым дефектом. Толщина такого слоя жидкости — переменная и неравномерная. В этих условиях ультразвук, не достигнув дефекта, частично проникает в жидкость, рассеивается на ее неоднородностях, и в результате на преобразователь приходят множественные шумы, которые могут полностью экранировать сигнал от дефекта. Это иллюстрируется на рис. 1.

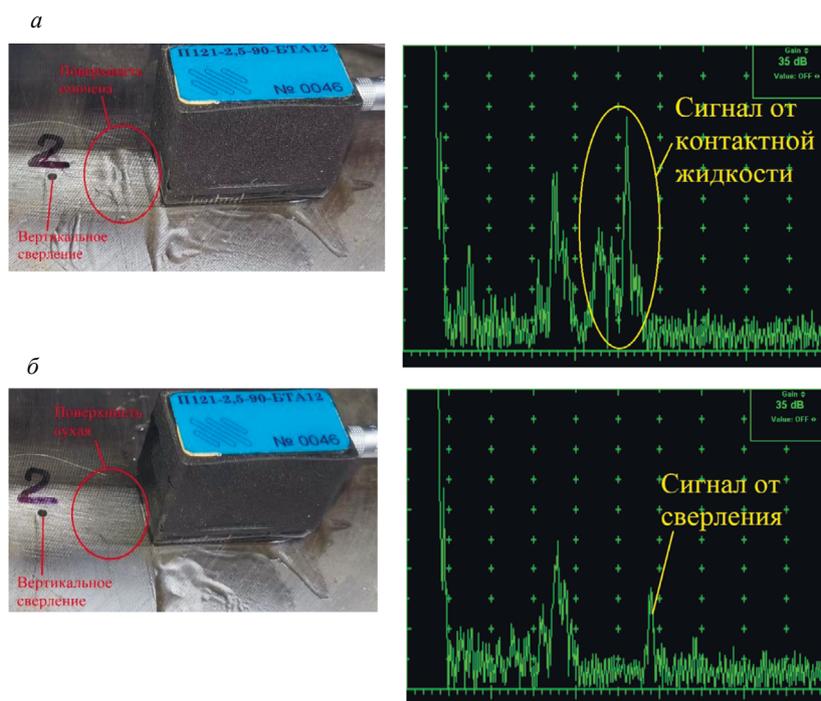


Рис. 1. Выявление поверхностного дефекта пьезопреобразователем, возбуждающим волну Релея: *а* — поверхность перед ПЭП смочена: на А-скане шумы экранируют сигнал от дефекта; *б* — поверхность перед ПЭП сухая: на А-скане индицируется сигнал от дефекта.

Известно, что от создающего шумы неоднородного слоя контактирующей жидкости можно избавиться, если для возбуждения ультразвука вместо пьезопреобразователей использовать электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП). Например, применительно к толщиномерии, такой опыт описан в работах [10, 11]. Известен также опыт использования ЭМАП для наклонного ввода в металл объемных волн [12] и волн Релея [13, 14].

Для иллюстрации преимуществ возбуждения релеевских волн с помощью ЭМАП на рис. 2 показан А-скан при выявлении того же вертикального сверления, что и на рис. 1. Теперь от одного дефекта отражается один сигнал, который не экранируется шумами от реверберации ультразвука в контактирующей жидкости. Поэтому представляет интерес использовать релеевские волны, возбуждаемые ЭМАП, для выявления выходящих на поверхность металла объемных дефектов. Но этот вариант ультразвукового контроля требует дополнительных исследований, т.к. в литературных данных не удалось обнаружить достоверную информацию о зависимости параметров принимаемого сигнала от диаметра и глубины проникновения в металл локального объемного дефекта коррозийного происхождения.

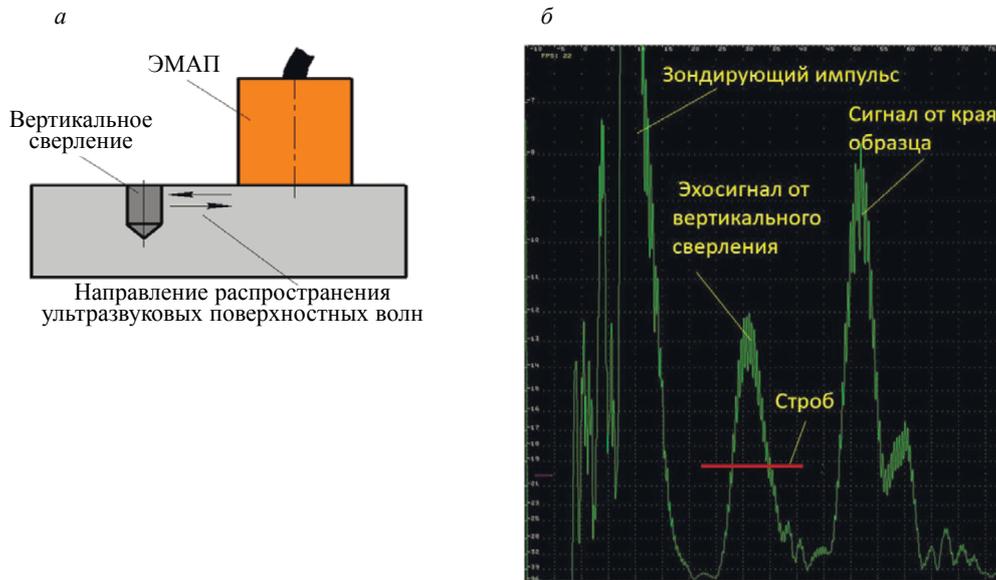


Рис. 2. Выявление вертикального сверления при использовании ЭМАП:
 а — схема измерений с использованием ЭМАП; б — А-скан с сигналом от вертикального сверления.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЭМАП применяется в оборудовании ряда производителей в России и за рубежом. Например, известны дефектоскопы типа *temate® PowerBox* (Испания—США) [15], *DIO-1000* (Чехия) [16], *Sonaflex* (Россия—Германия) [17], толщиномеры типа *A-1270* (Россия) [18] и другие устройства.

На рис. 3 показан внешний вид установки, использованной в нашем исследовании. Применялся конфигурируемый блок 1 дефектоскопической электроники *Sonaflex*, поверхностные волны генерировались ЭМАП 2, оснащенный меандровой катушкой. Установка позволяла излучать рэлеевские волны на центральной частоте 1 МГц. Преобразователь устанавливался в держатель 3 с возможностью вращения по поверхности образца 5 для выбора оптимального направления ввода волны Релея. Устройство позиционирования 4 позволяло смещать ЭМАП по трем осям и обеспечивать постоянный зазор между ЭМАП и испытательным образцом. На дисплее компьютера 6 отображались А-сканы сигналов, отраженных от сверлений 7. Материал образцов — низкоуглеродистая сталь. Поверхности образцов были отшлифованы до чистоты, не хуже *Rz 20* согласно ГОСТ 2789—73 (Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики (с Изменениями № 1, 2)).

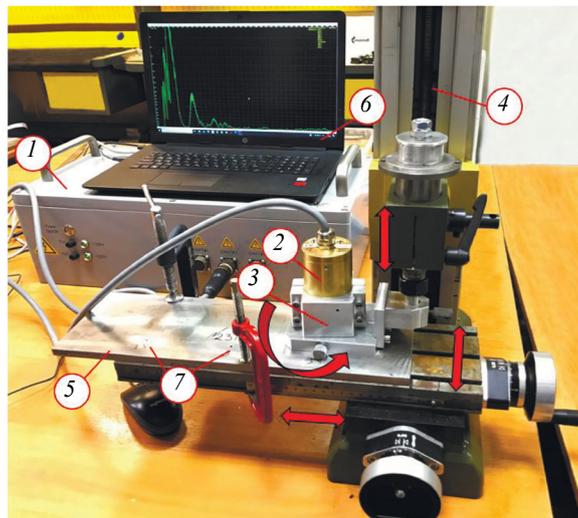


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования выявляемости поверхностных объемных дефектов ЭМАП на волну Релея.

Рассмотрим две группы образцов. Первая предназначалась для построения зависимости амплитуды ультразвукового эхосигнала от диаметра вертикального сверления. Использовались 12 сверлений глубиной 5 мм и диаметром 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 7; 8,5 и 10 мм. Образцы второй группы — для построения зависимости амплитуды сигнала от глубины сверления. В них были выполнены 14 сверлений диаметром 3 мм и глубиной 0,25; 0,4; 0,5; 0,75; 1; 1,2 мм и далее от 1,5 до 5 мм с шагом 0,5 мм.

Схема излучения—приема волны Релея с помощью ЭМАП показана на рис. 2а. С целью исключения влияния затухания на результаты измерений расстояние от передней грани ЭМАП до сверления вдоль поверхности образца выбирали постоянным, причем оно было минимальным настолько, чтобы отраженный от сверления сигнал уверенно разрешался на А-скане от зондирующего импульса (см. рис. 2б). С учетом изменения диаметра мишеней разница между временем прихода эхосигналов от различных вертикальных сверлений не превышала 1 мкс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для учета влияния акустических шумов на результаты измерений предварительно было исследовано распределение амплитуд этих шумов в зоне приема сигнала от сверления. С этой целью ЭМАП предварительно устанавливался на бездефектные участки образцов и в застробированной зоне предполагаемой регистрации сигналов от сверлений было выполнено 50 измерений уровня акустических шумов из металла. Согласно [19, 20], при ультразвуковом контроле эхометодом амплитуда шумов в зоне контроля чаще всего распределена по одному из следующих законов: нормальному, логарифмическому нормальному (логнормальному), Вейбулла или экспоненциальному. Для оценки параметров распределений амплитуды шумов по выборке проведенных измерений, использован метод максимального правдоподобия. Для определения наилучшего распределения применялись информационные критерии: АICс по Акаике согласно формуле (1) из [21], ВIC по байесовскому критерию согласно формуле (2) из [21] и по критерию Колмогорова—Смирнова согласно [22]. Расчетные формулы для первых из перечисленных критериев имеют следующий вид:

$$AICc = 2k - 2\ln(L) + 2k \frac{k+1}{n-k-1}; \quad (1)$$

$$BIC = -2\ln(L) + k\ln(n), \quad (2)$$

где L — максимальное значение функции правдоподобия выборки с известным числом параметров; k — число параметров модели; n — объем выборки.

Расчеты выполнялись на языке программирования Python 3, оценка параметров распределений и вычисление критериев производилось с помощью библиотеки Reliability [22].

Что касается критерия Колмогорова—Смирнова, то он предназначен для проверки простых гипотез о принадлежности анализируемой выборки некоторому полностью известному закону распределения и в данном случае использовался качественно, без выполнения количественных оценок.

Полученные значения указанных критериев представлены в табл. 1.

Таблица 1

К определению распределения амплитуды шумов в зоне контроля волнами Релея

Распределение	AICc	BIC	Критерий Колмогорова—Смирнова
Нормальное	57,23	60,8	Принимается
Логнормальное	59,19	64,41	Принимается
Вейбулла	71,11	74,67	Отвергается
Экспоненциальное	473,22	475,05	Отвергается

Согласно [21], чем меньше значение критериев АICс и ВIC, тем лучше распределение подходит к выборке. Из табл. 1 видно, что наиболее подходящее распределение — нормальное. Оцененные

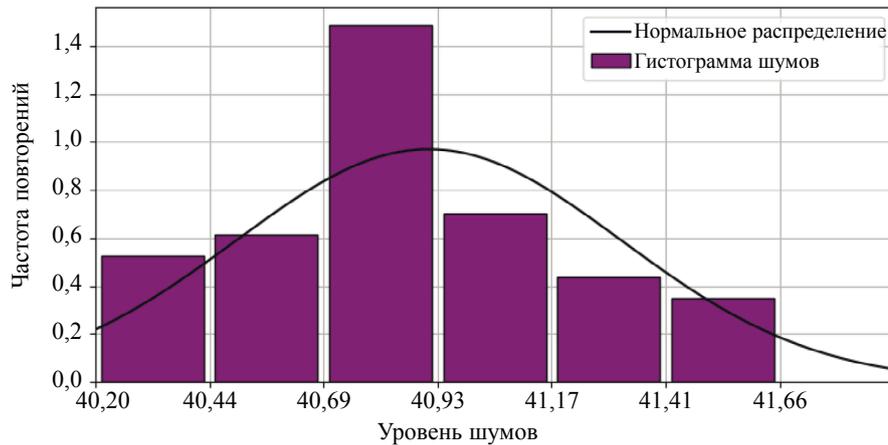


Рис. 4. Распределение амплитуды шумов в зоне контроля волнами Релея.

по выборке параметры амплитуд шумов для этого распределения составили: среднее значение $\mu = 40,91$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,41$. Гистограмма амплитуд шумов и плотность нормального распределения с оцененными параметрами μ и σ представлена на рис. 4.

За уровень шумов был принят 95 % квантиль нормального распределения, который равен $-41,6$ дБ. При этом вероятность ложного срабатывания не превышает 5 %.

Далее с учетом полученного результата можно было перейти к оценке параметров сигналов, отраженных от вертикальных сверлений. Зависимость отношения амплитуды эхосигнала, отраженного от вертикального сверления, к уровню шумов при изменении диаметра сверления показана на рис. 5. Здесь и далее на графиках под «полезным сигналом» понимается амплитуда сигнала от сверления.

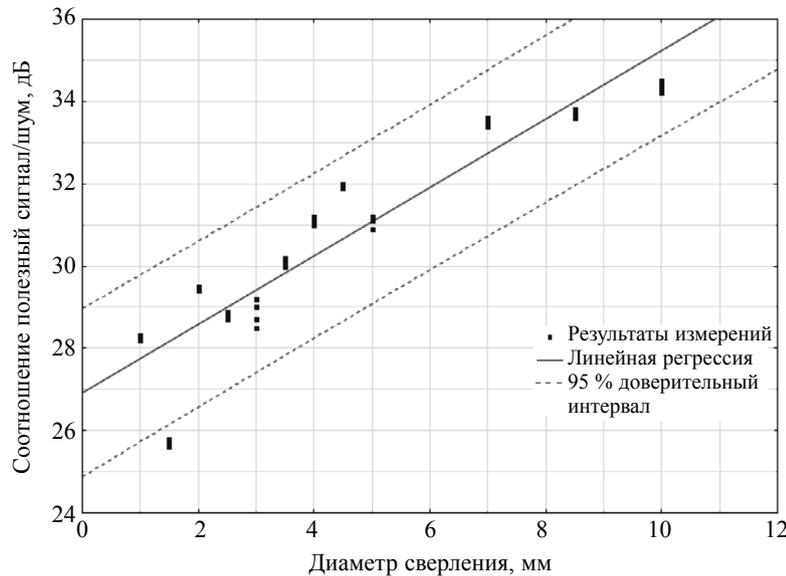


Рис. 5. Зависимость отношения полезного сигнала к уровню шумов от диаметра вертикального сверления.

Отметим, что при рассеянии упругой волны на бесконечном цилиндре амплитуда отраженного сигнала при росте диаметра сверления b , вообще говоря, должна расти пропорционально $b^{3/2}$. Однако из рис. 5 видно, что в рассматриваемом диапазоне диаметров эту зависимость можно считать линейной. Действительно, рассчитанный коэффициент корреляции r^2 составил в данном случае 0,84, что соответствует сильной линейной зависимости между отношением полезный сигнал/

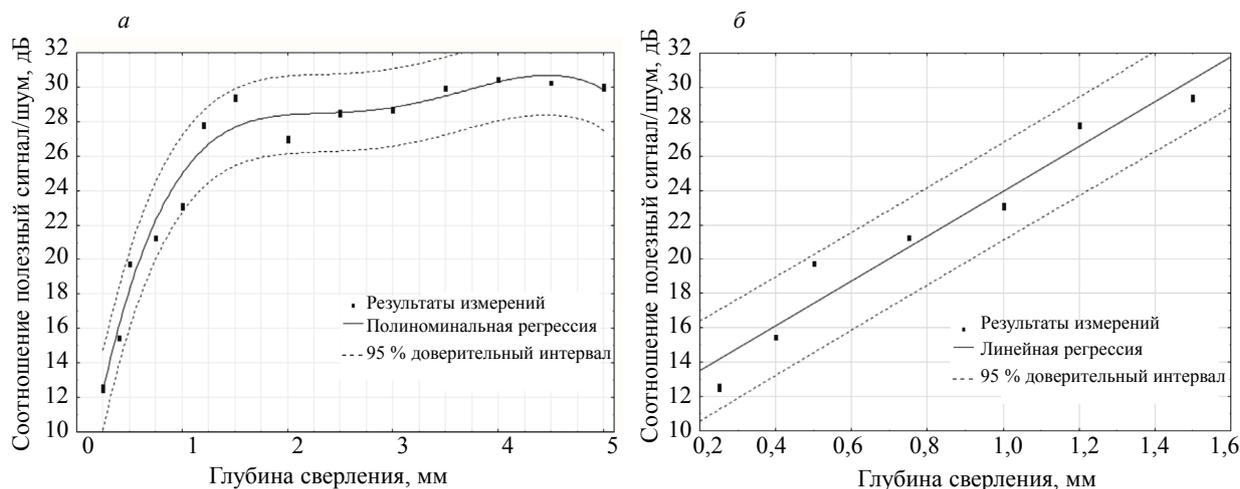


Рис. 6. Зависимость отношения полезного сигнала к уровню шумов от глубины вертикального сверления: *a* — полный диапазон глубин; *б* — диапазон глубин до 1,5 мм.

шум и диаметром сверления. Так сказались влияние на эту зависимость поверхности материала и ограниченной глубины проникновения волны Релея в объем.

Зависимость отношения полезный сигнал/шум при изменении глубины сверления показана на рис. 6.

Из рис. 6а видно, что зависимость отношения полезный сигнал/шум от глубины вертикального сверления линейная, если глубина сверления не превышает ориентировочно 1,5 мм, что соответствует половине длины волны Релея на частоте 1 МГц. При дальнейшем увеличении глубины сверления амплитуда сигнала выходит в насыщение, поскольку глубина проникновения релеевской волны в металл обычно ограничена длиной волны. На рис. 6б представлена линейная зависимость отношения полезный сигнал/шум от глубины вертикального сверления для значений глубин, меньших 1,5 мм. Рассчитанный коэффициент корреляции r^2 составляет 0,94, что соответствует сильной линейной зависимости.

Для приведенных зависимостей амплитуд сигналов, отраженных от рассматриваемых имитаторов дефектов, можно построить кривые вероятности выявления дефектов, основываясь на линейных моделях — кривые PoD (Probability of Detection) [23]. Для этого, с учетом данных табл. 1 и графиков на рис. 5 и 6б, необходимо было выбрать наиболее подходящую из четырех моделей: \hat{a} vs. $\log(a)$, \hat{a} vs. $\log(\hat{a})$, $\log(\hat{a})$ vs. a или $\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$. Согласно [24], для выбора модели линейной регрессии можно воспользоваться критериями Акаике (AIC) и Байеса (BIC), которые для данного случая вычисляются по формулам:

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k, \quad (3)$$

$$BIC = n \cdot \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k \cdot \ln(n), \quad (4)$$

где $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ — сумма квадратов ошибок; k — число параметров модели; n — объем выборки.

Рассчитанные значения критериев AIC и BIC для зависимостей амплитуды сигналов от диаметра и глубины сверлений для различных PoD-моделей приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Для обоих зависимостей наименьшие значения критериев AIC и BIC имеет модель « $\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$ », следовательно, именно ее целесообразно использовать для построения кривых вероятности выявления рассматриваемых дефектов (на примере вертикальных сверлений). Эти кривые рассчитаны с использованием программного обеспечения mh1823 согласно [25], разработанного на основании [23], и приведены на рис. 7а и б для вероятности выявления дефектов в зависимости от диаметра и от глубины соответственно.

Таблица 2

Определение наиболее подходящей модели для зависимости амплитуды сигнала от диаметра вертикального сверления

Модель PoD	AIC	BIC
\hat{a} vs. a	3,0	9,28
\hat{a} vs. $\log(a)$	4,13	10,41
$\log(\hat{a})$ vs. a	-395,73	-389,44
$\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$	-400,28	-394,00

Таблица 3

Определение наиболее подходящей модели для зависимости амплитуды сигнала от глубины вертикального сверления

Модель PoD	AIC	BIC
\hat{a} vs. a	26,17	30,84
\hat{a} vs. $\log(a)$	15,67	20,34
$\log(\hat{a})$ vs. a	-160,84	-156,17
$\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$	-200,51	-195,84

В качестве уровня принятия решений использовано значение отношения полезный сигнал/шум, при котором вероятность ложного срабатывания не превышает 1 %. Это отношение составило 25 дБ — для расчетов по диаметру сверления и 12 дБ — для расчетов по глубине сверления согласно рис. 5 и 6 соответственно.

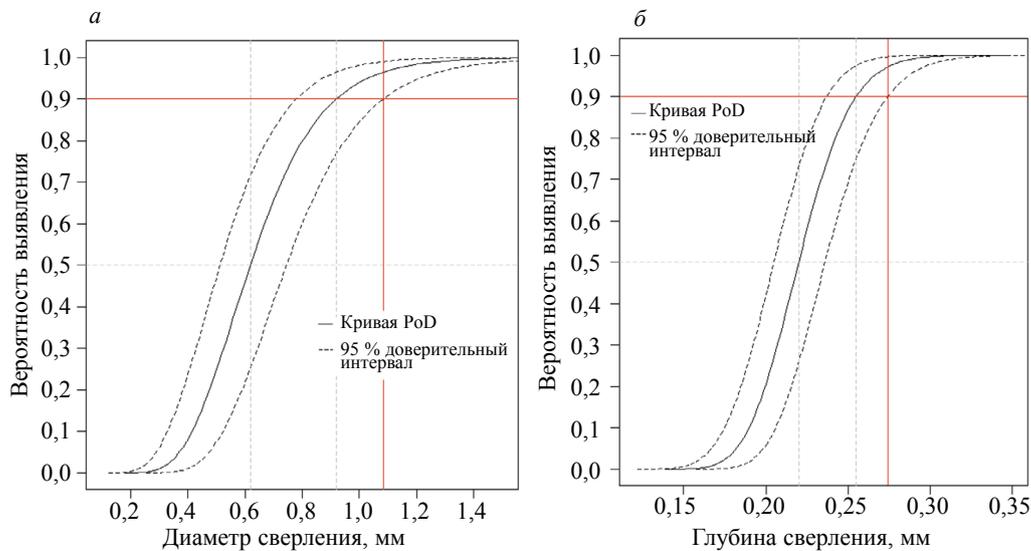


Рис. 7. Кривые вероятности выявления вертикального сверления в зависимости от диаметра (а) и глубины (б).

Из рис. 7 видно, что с вероятностью 90 % с учетом доверительного интервала 95 % размеры минимального вертикального сверления, имитирующего выходящий на поверхность локальный объемный дефект коррозионного происхождения, который выявляется ЭМАП, излучающим рэлеевские волны на частоте 1 МГц, равны: диаметр 1,1 мм и/или глубина 0,25 мм.

Имея в виду, что в данном случае скорость рэлеевской волны в стали составляет ориентировочно $3,0 \cdot 10^3$ м/с, то длина этой волны составляет $\lambda \approx 3$ мм. Тогда в условиях проведенного эксперимента получим, что с вероятностью не менее 90 % рэлеевская волна, излучаемая электромагнитно-акустическим преобразователем, позволяет уверенно выявлять выходящие на поверхность локальные объемные дефекты диаметром ориентировочно $0,3\lambda$ и/или глубиной $0,08\lambda$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью ЭМАП, излучающего рэлеевские волны, выполнено экспериментальное исследование выявляемости вертикальных цилиндрических сверлений, имитирующих выходящие на поверхность локальные объемные дефекты коррозионного происхождения. Измерения проведены на специально подготовленных образцах из низкоуглеродистой стали со сверлениями с переменной глубиной и диаметрами при чистоте поверхности образцов не хуже, чем Rz 20.

По выборке из 50 измерений уровня шумов на бездефектных участках образцов установлено, что в условиях эксперимента амплитуда шумов распределена по нормальному закону, и определен уровень шумов, при котором вероятность ложного срабатывания не превышает 5 %. С учетом этого уровня получены зависимости амплитуды эхосигнала, отраженного от пересечения вертикальных сверлений с поверхностью образца, от диаметра и глубины сверления. Установлено, что между амплитудой принятого сигнала и диаметром сверления имеет место сильная линейная зависимость с коэффициентом корреляции $r^2 = 0,84$, а между этой амплитудой и глубиной сверления сильная линейная зависимость присутствует только при ее представлении в логарифмической шкале.

По информационным критериям Акаике (AIC) и Байеса (BIC) определены оптимальные амплитудные модели для построения кривых вероятности (PoD) при выявлении рассматриваемых искусственных дефектов. Для обеих зависимостей такой моделью является $\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$. Из рассчитанных кривых вероятности выявления дефектов сделан вывод о том, что в условиях проведенных измерений с вероятностью 90 % с учетом доверительного интервала 95 % минимальный локальный рэлеевский дефект коррозионного происхождения, который выявляется ЭМАП, излучающий рэлеевские волны, имеет ориентировочно диаметр 0,3 λ и/или глубину 0,08 λ . Например, на частоте 1 МГц это соответствует сверлениям диаметром 1,1 мм и/или глубиной 0,25 мм.

Приведенные результаты показывают, что электромагнитно-акустические преобразователи, создающие волну Релея, можно использовать для выявления объемных дефектов коррозионного происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдова Д.Г. Дефекты технологических трубопроводов: типология, оценка влияния на эксплуатацию // Промбезопасность-Приуралье. 2012. № 8. С. 24—28.
2. Ерехинский Б.А., Маслаков С.В., Шустов Н.И., Митрофанов А.В., Барышев С.Н., Заряев М.Ю., Кравцов А.В., Егоров С.В. Растрескивание металла задвижек фонтанной арматуры газодобывающих скважин северных месторождений // Территория Нефтегаз. 2014. № 2. С. 31—36.
3. Сафина И.С., Каузова П.А., Гуцин Д.А. Оценка технического состояния резервуаров вертикальных стальных // ТехНадзор. 2016. № 3 (112). С. 39—42.
4. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. С-Петербург: Изд-во Свен, 2007. 296 с.
5. Калининченко Н.П., Васильева М.А. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла / Учебно-методическое пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. С. 55.
6. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 288 с.
7. Викторов И.А. О влиянии несовершенств поверхности на распространение рэлеевских волн // Докл. АН СССР. 1958. Т. 119. № 3. С. 463—465.
8. Дымкин Г.Я., Максимов А.В. Исследование отражения рэлеевских волн от подповерхностных дефектов // Дефектоскопия. 1988. № 3. С. 93—94.
9. Лохов В.П. Исследование дифракции волн Релея на ребре трещины // Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 39—47.
10. Разыграев Н.П., Разыграев А.Н., Пономарев С.Н., Безлюдько Г.Я., Миховски М., Мирчев Й. Исследование технологии ультразвукового контроля толщины ЭМА методом // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 60—80.
11. Могильнер Л.Ю., Временко А.И., Скуридин Н.Н., Придеин О.А. Применение электромагнитно-акустических толщиномеров при диагностировании металлоконструкций и механо-технологического оборудования // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 3. С. 315—325.
12. Луценко Г.Г. К вопросу о наклонном излучении объемных сдвиговых волн электромагнитно-акустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2001. № 10. С. 36—47.
13. Алешин Н.П., Крысько Н.В., Щипаков Н.А., Могильнер Л.Ю. Оптимизация параметров механизированного ультразвукового контроля протяженных сварных швов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 3. С. 574—585.
14. Алешин Н.П., Сыркин М.М., Григорьев М.В., Козлов Д.М. Автоматизированный сканер-дефектоскоп «Автокон-ЭМА-МГГУ» // Сварка и диагностика. 2009. № 4. С. 28—31.

15. Thickness Measurement with EMAT — ternate@ PowerBox H. Innerspec Technologies Inc. [Электронный ресурс] Presentation // YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=jfseQEJgupM> (дата обращения 28.12.2018).
16. STARMANS electronics s.r.o. [Электронный ресурс] <http://starmansndt.ru/defektoskopi/dio-IOOO-ra.html> (дата обращения 28.12.2018).
17. Компания Nordinkraft [Электронный ресурс] <https://nordinkraft.de/sonaflex-ru> (дата обращения 26.01.2021).
18. Акустические контрольные системы: презентация «АКС-групп», [электронный ресурс] http://www.acsys.ru/upload/iblock/9bd/acsys-promo-booklet_web_curves.pdf (дата обращения 26.12.2018).
19. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества. М.: Металлургия, 1978. 80 с.
20. Wright Michael. Developing Qualified NDT Procedures & The Technical Justification Process. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2016. 424 p.
21. Gourieroux C., Monfor A. Statistics and Econometric Models. V. 2. Testing, Confidence Regions, Model Selection and Asymptotic Theory. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995. 526 p.
22. [Электронный ресурс] <https://reliability.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения 26.01.2021).
23. [Электронный ресурс] [https://www.statisticalengineering.com/mh1823/MIL-HDBK-1823A\(2009\).pdf](https://www.statisticalengineering.com/mh1823/MIL-HDBK-1823A(2009).pdf) (дата обращения 26.01.2021).
24. Gordon Rachel A. Applied statistics for the social and health sciences. New York. USA: Routledge, 2012. 742 p.
25. [Электронный ресурс] <http://statisticalengineering.com/mh1823/> (дата обращения 26.01.2021).