

УДК 620.179.14

## ЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ГРУППЫ СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛЕ ПО СИГНАЛУ НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Загидулин Ринат Васикович<sup>1</sup>,  
doctech.zagr@post.com

Бакиев Арслан Тагирович<sup>1</sup>,  
bakievars@gmail.com

Бакиев Тагир Ахметович<sup>1</sup>,  
tagirbak@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность** исследования связана с повышением безопасности эксплуатации стальных газопроводов, содержащих стресс-коррозионные трещины и коррозионные повреждения металла, выявляемых при технической диагностике средствами вихретоковой дефектоскопии.

**Цель:** разработка математического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле стального газопровода по сигналу накладного вихретокового преобразователя.

**Объекты:** группы стресс-коррозионных трещин, имеющие разные геометрические параметры, расположенные в металле с разными интервалами. Изменение геометрических параметров группы стресс-коррозионных трещин и интервалов между ними приводит к трансформации формы сигналов накладных вихретоковых преобразователей при неразрушающем контроле стального газопровода вихретоковыми дефектоскопами.

**Методы:** математическое моделирование сигналов накладных вихретоковых преобразователей над группой стресс-коррозионных трещин в металле; экспериментальные исследования по определению эмпирических зависимостей для информативных параметров сигнала накладного вихретокового преобразователя (амплитуда, полуширина сигнала) от интервала между дефектами сплошности на искусственных моделях стресс-коррозионных трещин; эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин по измеренным сигналам накладных вихретоковых преобразователей.

**Результаты.** Приведены основы эмпирического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле по сигналу абсолютного накладного вихретокового преобразователя; на основе математической модели сигнала накладного вихретокового преобразователя установлены параметры (амплитуда и полуширины сигнала над группой трещин), содержащие консолидированную информацию о количестве дефектов сплошности в группе стресс-коррозионных трещин и интервале между ними; экспериментально получены эмпирические зависимости сигналов накладного вихретокового преобразователя на искусственных моделях стресс-коррозионных трещин в стальных образцах; показана применимость эмпирического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле при использовании в качестве признаков классификации дефектов сплошности коэффициентов вейвлетного преобразования сигнала накладного вихретокового преобразователя разных типов (абсолютных и дифференциальных).

### Ключевые слова:

стальной газопровод, группа стресс-коррозионных трещин, дефект сплошности, распознавание группы стресс-коррозионных трещин, накладной вихретоковый преобразователь, математическая модель сигнала накладного вихретокового преобразователя, амплитуда сигнала, полуширина сигнала, вейвлетное преобразование сигнала накладного вихретокового преобразователя.

### Введение

Стресс-коррозионные трещины и коррозионные повреждения в металле и сварных соединениях стальных газопроводов создают реальную угрозу для их безопасной эксплуатации, поэтому для их обнаружения применяются самые современные методы технической диагностики и средства неразрушающего контроля промышленного оборудования [1, 2].

Практика технической диагностики магистральных газопроводов, содержащих стресс-коррозионные трещины и коррозионные повреждения металла, показала, что для их неразрушающего контроля наиболее эффективны технические средства вихретоковой дефектоскопии (как ручные, так и автоматизированные) [3–5].

Особенностью технических средств вихретоковой дефектоскопии является их высокая чувствительность

к поверхностным дефектам сплошности, имеющим малые геометрические размеры (глубина, ширина, протяженность), к которым относятся стресс-коррозионные трещины стального газопровода, отстройка от множества мешающих факторов (в том числе случайных помех) и высокая производительность контроля [5–9].

Еще одной отличительной особенностью вихретокового метода контроля металлов является однозначная зависимость амплитуды сигнала вихретокового преобразователя (ВП) от глубины трещины и весьма слабая зависимость от ее ширины, что повышает достоверность амплитудного анализа измеренного сигнала над дефектами сплошности в металле [5, 9, 10].

Для надежной оценки опасности стресс-коррозионных трещин в металле, выявленных в результате неразрушающего контроля стальных газо-

проводов средствами вихретоковой дефектоскопии, требуются количественные данные о параметрах дефектов сплошности. По этим результатам устанавливаются виды, объемы и сроки ремонтных работ, необходимых для восстановления работоспособного состояния дефектного участка стального газопровода [2].

Как правило, стресс-коррозионные трещины располагаются на поверхности стального газопровода локальными группами, в которых дефекты сплошности расположены с некоторым интервалом, при этом на поверхности поврежденного металла площадью  $1 \text{ см}^2$  может находиться до двух десятков стресс-коррозионных трещин [11, 12].

Определение параметров дефектов сплошности, образующих группы стресс-коррозионных трещин в стальном газопроводе, по измеренным сигналам накладных ВТП, относится к математическим задачам распознавания образов [13]. Под распознаванием группы стресс-коррозионных трещин в металле подразумевается количественная оценка следующих параметров: количество дефектов сплошности в группе трещин  $n$ ; величина среднего интервала между дефектами  $\Delta$ ; глубина дефектов сплошности в группе трещин  $h$  (при постоянстве  $h$ )/глубина наибольшего дефекта (при разных глубинах трещин); координаты расположения группы трещин в металле  $x_k$ .

Для распознавания группы стресс-коррозионных трещин используются информативные параметры, содержащиеся в измеренном сигнале накладного ВТП:  $U_m$  – максимум сигнала  $U(x)$ , при отсутствии пространственного разрешения группы трещин/ $U_{mk}$  – локальные максимумы сигнала  $U(x)$ , при пространственном разрешении группы трещин;  $x_k$  – координаты локальных максимумов в сигнале;  $z$  – полуширина сигнала абсолютного накладного ВТП  $U(x)$ /половина расстояния между экстремумами сигнала дифференциального накладного ВТП  $U_1(x)$ . Исследования показали, что этой априорной информации достаточно для удовлетворительного распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле.

#### Основы эмпирического метода распознавания группы трещин в металле по сигналу абсолютного накладного вихретокового преобразователя

Для решения задачи распознавания дефектов сплошности в металле по измеренным сигналам ВТП применяются их цифровые и математические модели, в которых могут быть заложены параметры дефектов сплошности [14–16].

Рассмотрим эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле с использованием логических предписаний для применяемых информативных признаков и воспользуемся математической моделью сигнала абсолютного накладного ВТП над группой трещин (рис. 1) [15, 16]:

$$U(x) = \sum_{j=-N}^N J_j \frac{z}{(x+j\Delta_j)^2+z^2}, \quad (1)$$

где  $J_j$  и  $z$  – параметры математической модели сигнала абсолютного накладного ВТП над отдельной трещиной;  $\Delta_j$  – интервалы между дефектами сплошности в группе трещин;  $x$  – координата точки измерения

сигнала ВТП на поверхности металла, индекс  $j=0, \pm 1, \dots, \pm N$ .

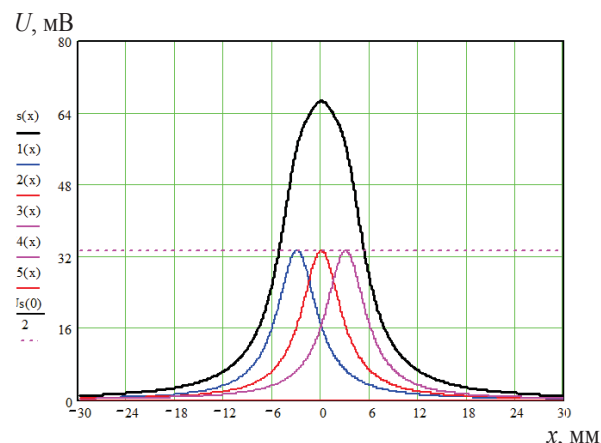


Рис. 1. Модель сигнала абсолютного накладного вихретокового преобразователя над группой из трех трещин при отсутствии пространственного разрешения дефектов

Fig. 1. Model of the signal of the absolute surface eddy-current sensor over a set of three joints with their non-resolution in space

При  $j=0$  из формулы (1) следует выражение для сигнала абсолютного накладного ВТП над отдельной трещиной:

$$U(x) = J_0 \frac{z}{x^2+z^2}. \quad (2)$$

В случае пространственного неразрешения группы трещин (они не разделены для восприятия – этот случай наиболее интересен для технической диагностики стальных газопроводов) отсутствует априорная информация о глубинах дефектов сплошности и соотношениях между ними.

Поэтому допустим, что группа стресс-коррозионных трещин в металле имеет постоянную (усредненную) глубину. Тогда в математической модели сигнала накладного ВТП (1) следует допустить постоянство параметра  $J$ :

$$J_j = J_0 = \text{const}(j = 0, \pm 1, \dots, \pm N).$$

Рассуждая аналогичным образом, допускаем постоянство интервалов между дефектами сплошности в группе стресс-коррозионных трещин:

$$\Delta_j = \Delta = \text{const}(j = 0, \pm 1, \dots, \pm N).$$

С учетом этого сигнал абсолютного накладного ВТП (1) примет вид:

$$U(x) = J_0 \sum_{j=-N}^N \frac{z}{(x+j\Delta)^2+z^2}. \quad (3)$$

В точке  $x=0$  сигнал абсолютного накладного ВТП (3) имеет максимум:

$$U_m = J_0 \sum_{j=-N}^N \frac{z}{(j\Delta)^2+z^2} = \frac{J_0}{z} \left[ 1 + \sum_{j=-N}^N \frac{1}{1 + \left(\frac{j\Delta}{z}\right)^2} \right], \quad (4)$$

где штрих при сумме второго слагаемого означает исключение из суммы ряда члена с индексом  $j=0$ .

Из формулы (4) видно, что параметр  $J_0$  для математической модели сигнала отдельного дефекта сплошности (2) в группе стресс-коррозионных трещин можно определить по измеренной величине максимума сигнала накладного ВТП  $U_m$ , если известно количество дефектов сплошности в группе трещин  $n=2N+1$  и величина интервала между ними  $\Delta$ :

$$J_0 = \frac{zU_m}{1 + \sum_{j=-N}^N \frac{1}{1 + \left(\frac{j\Delta}{z}\right)^2}}. \quad (5)$$

Далее по значению параметра  $J_0$  (5) можно определить (восстановить) максимум сигнала накладного ВТП над отдельным дефектом сплошности по формуле:

$$U_m^0 = J_0/z, \quad (6)$$

который однозначно связан с глубиной дефекта.

Существует информативный параметр в сигнале накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин, который связан с интервалом между дефектами сплошности. Он следует из формулы (4) и определяется в виде отношения максимумов сигналов накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин (4) и над отдельной трещиной (6):

$$K(\Delta) = U_m/U_m^0 = 1 + \sum_{j=-N}^N \frac{1}{1 + \left(\frac{j\Delta}{z}\right)^2}. \quad (7)$$

На рис. 2 показана зависимость параметра  $K$  от количества дефектов сплошности в группе стресс-коррозионных трещин и интервала между ними, полученная по формуле (7).

Видно, что при уменьшении интервала между дефектами сплошности ( $\Delta \leq 2$  мм) существенно возрастает влияние на параметр  $K$  количества дефектов сплошности  $n$ .

Из формулы (7) следует:

- отношение  $K$  является монотонной и однозначной функцией от интервала  $\Delta$  между дефектами сплошности. При увеличении  $\Delta$  величина  $K$  уменьшается и стремится к пределу  $\lim_{\Delta \rightarrow \infty} K(\Delta) = 1$ ;
- при сближении группы стресс-коррозионных трещин (уменьшении интервала  $\Delta$ ) величина  $K$  возрастает и стремится к пределу:

$$\lim_{\Delta \rightarrow \infty} K(\Delta) = \sum_{j=-N}^N 1 = 2N + 1 = n.$$

Здесь следует заметить, что максимум сигнала накладного ВТП практически не зависит от ширины трещины, поэтому при объединении группы трещин в одну (при  $\Delta=0$ ), но с большей шириной, максимум сигнала ВТП должен равняться  $U_m \approx U_m^0$  и должен существовать предел  $\lim_{\Delta \rightarrow \infty} K(\Delta) = 1$ .

Данное обстоятельство является одним из недостатков математической модели сигнала абсолютного накладного ВТП (1), которое свидетельствует о качественном характере этой модели.

Однако следует заметить, что выражение (7) верно отражает тенденцию изменения параметра  $K(\Delta)$  в определенных границах изменения интервала между

стресс-коррозионными трещинами (за исключением случая  $\Delta \approx 0$ ).

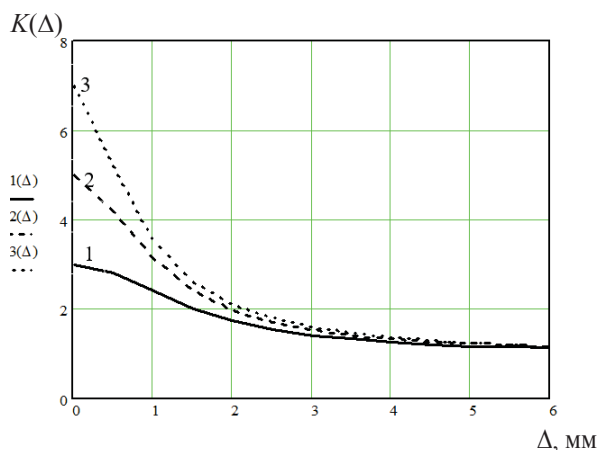


Рис. 2. Зависимость параметра  $K(7)$  от количества дефектов сплошности в группе трещин и интервала между ними (1 –  $n=3$ , 2 –  $n=5$ , 3 –  $n=7$ )

Fig. 2. Dependence of the parameter  $K(7)$  on the number of continuity defects in a group of cracks and the interval between them (1 –  $n=3$ , 2 –  $n=5$ , 3 –  $n=7$ )

Известна формула для расчета полуширины сигнала  $z$  абсолютного накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин [15, 16]:

$$z = z_1 + \Delta(n - 1)/2, \quad (8)$$

где  $z_1$  – полуширина сигнала накладного ВТП над отдельной трещиной в металле (экспериментально полученное значение  $z_1 \approx 3$  мм);  $\Delta(n - 1)$  – ширина области расположения группы стресс-коррозионных трещин на поверхности металла.

Отсюда получаем уравнение для определения количества дефектов сплошности в группе стресс-коррозионных трещин и интервала между ними:

$$\Delta(n - 1) = 2(z - z_1) = f_1(z). \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что при наличии группы стресс-коррозионных трещин в металле ( $n \geq 2$ ) всегда должно выполняться условие  $z - z_1 > 0$ . Уравнению (9) удовлетворяют бесчисленное множество пар значений ( $n, \Delta$ ), при этом интервал между трещинами определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{2(z - z_1)}{n - 1}. \quad (10)$$

Следует учесть, что область реальных значений интервала  $\Delta$  для группы стресс-коррозионных трещин в стальном газопроводе является ограниченной и удовлетворяет эмпирическому условию [11, 12]:

$$\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}, \quad (11)$$

где  $\Delta_{\min} \approx (0,7 \dots 1)$  мм – нижняя граница статистической выборки стресс-коррозионных трещин;  $\Delta_{\max} = D$  – диаметр сердечника накладного ВТП.

При выполнении условия (11) отсутствует пространственное разрешение группы стресс-коррозионных трещин в стальном газопроводе по сигналу накладного ВТП (дефекты сплошности не разделены для восприятия).

В случае пространственного разрешении группы трещин в металле (при условии  $\Delta > D$  дефекты сплошности разделены для восприятия) отпадает необходимость в решении уравнения (9), так как значения параметров  $\Delta$  и  $n$  однозначно определяются по количеству и координатам месторасположения локальных максимумов в измеренном сигнале накладного ВТП.

Следует заметить, что относительно количества дефектов сплошности  $n$  в группе стресс-коррозионных трещин нет никакой априорной информации, поэтому ее можно приближенно оценить лишь методом перебора, подставляя его значения в формулу (10), с последующей проверкой выполнения условия (11) для расчетной величины  $\Delta$ .

В результате этих операций формируется некоторое множество из взаимосвязанных пар значений  $(n_i, \Delta_i)$ , где  $i=1, 2, \dots, L$ . Очевидно, что определенные таким образом значения параметров  $(n, \Delta)$  имеют равные вероятности для данного состояния группы стресс-коррозионных трещин в металле.

Далее полученные пары значений  $(n_i, \Delta_i)$  подставляются в формулу (7) для определения соответствующих величин параметра  $K$ :

$$K(\Delta_i) = \sum_{j=-N_i}^{N_i} \frac{1}{1 + (\frac{j\Delta_i}{z})^2} = f_2(\Delta),$$

где  $N_i = (n_i - 1)/2$ ,  $(i=1, 2, \dots, L)$ .

На основе полученных значений  $K(\Delta)$  (7) и по максимуму измеренного сигнала накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин  $U_m$  можно восстановить максимумы сигналов накладного ВТП над отдельными дефектами сплошности, которым соответствуют значения  $(n, \Delta)$ :

$$U_{mi}^0 = U_m / K(\Delta_i), (i = 1, 2, \dots, L). (12)$$

Из формулы (12) видно, что расчетные значения максимума сигнала накладного ВТП  $U_m^0$  зависят от величины интервала между дефектами сплошности, при этом с увеличением интервала  $\Delta$  в заданном диапазоне значений происходит непрерывное возрастание значений  $U_m^0$ .

Определенные таким образом расчетные значения  $U_{mi}^0$  (12) являются равновероятными, поэтому за восстановленное значение максимума сигнала накладного ВТП над отдельным дефектом сплошности следует взять среднее арифметическое для множества этих значений:

$$\overline{U_m^0} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L U_{mi}^0,$$

которое будет иметь наименьшее расхождение относительно истинного значения  $U_m^0$ .

На основе эмпирической зависимости максимума сигнала накладного ВТП от глубины отдельной трещины, имеющей вид:

$$U_m^0(h) = c_1 h + c_2 h^2 = f_3(h),$$

( $c_1 \gg c_2$  – постоянные множители), по восстановленному значению  $\overline{U_m^0}$  оценивается глубина отдельного дефекта сплошности из группы стресс-коррозионных трещин.

Предварительно можно оценить погрешность восстановленного значения максимума сигнала наклад-

ного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин в металле.

Допустим, что группа из  $n=3$  стресс-коррозионных трещин, которые расположены с одинаковым интервалом  $\Delta=1$  мм, (1) имеет одинаковую глубину (параметр  $J=100$ ). На основе формул (8)–(11) получаем следующее множество взаимосвязанных пар ( $n=3, \Delta=1$  мм), ( $n=4, \Delta=0,67$  мм), удовлетворяющих условию (11).

Вычисляя по формуле (12) максимумы сигналов накладного ВТП над отдельными дефектами сплошности, которым соответствуют расчетные значения  $(n, \Delta)$ , определив их среднее арифметическое  $\overline{U_m^0}$ , устанавливаем, что оно меньше истинного значения  $U_m^0$  не более чем на 15 %.

Если же рассмотреть эту же группу трещин, расположенных с интервалом  $\Delta=3$  мм, то из формул (8)–(11) получаем множество взаимосвязанных пар ( $n=3, \Delta=3$  мм), ( $n=4, \Delta=2$  мм), ( $n=5, \Delta=1,5$  мм). Восстановленное по расчетным значениям  $(n, \Delta)$  среднее арифметическое максимума сигнала накладного ВТП  $\overline{U_m^0}$  (12) меньше истинного значения  $U_m^0$  не более чем на 30 %.

Рассмотренный эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин применим также для информативных признаков дефектов сплошности, имеющих однополярный характер, полученных преобразованием измеренных сигналов накладных (абсолютного, дифференциального) ВТП, таких как распределения коэффициентов вейвлетного преобразования сигналов по параметру сдвига.

#### Распознавание группы трещин по сигналам накладного вихретокового преобразователя (абсолютного/дифференциального) в специальных стандартных стальных образцах

Эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле по измеренным сигналам накладного ВТП был апробирован на специальных стандартных образцах с искусственными моделями стресс-коррозионных трещин (ССО-01, ССО-1, ССО-2, ССО-3), изготовленных в плоскопараллельных пластинах из конструкционной стали марки 09Г2С методом фрезерования (рис. 3).

В ССО-01 дефекты сплошности в группе из  $n=3$  стресс-коррозионных трещин имеют одинаковую глубину  $h=1$  мм, при этом интервалы между дефектами  $\Delta$  меняются от 1 до 5 мм. Группа стресс-коррозионных трещин с интервалом  $\Delta=2$  мм имеет разные глубины: центральная трещина – глубину  $h=1,5$  мм, боковые трещины – глубину  $h=1$  мм.

В ССО-1 дефекты сплошности в группе из трех стресс-коррозионных трещин имеют одинаковую глубину  $h=1$  мм, в ССО-2 – одинаковую глубину  $h=3$  мм, в ССО-3 дефекты сплошности в группе из трех стресс-коррозионных трещин имеют разные глубины: центральная трещина имеет глубину  $h=2$  мм, две соседние трещины – глубину  $h=1$  мм.

Измерения на стальных образцах осуществлялись с помощью вихретокового дефектоскопа ВД-12НФП с абсолютными накладными ВТП, имеющими разные

диаметры сердечника  $D$  ( $D=1,8$  мм,  $D=3,5$  мм), а также вихретокового сканера-дефектоскопа РСД-16 с дифференциальными накладными ВТП параметрического типа ( $D=3$  мм).

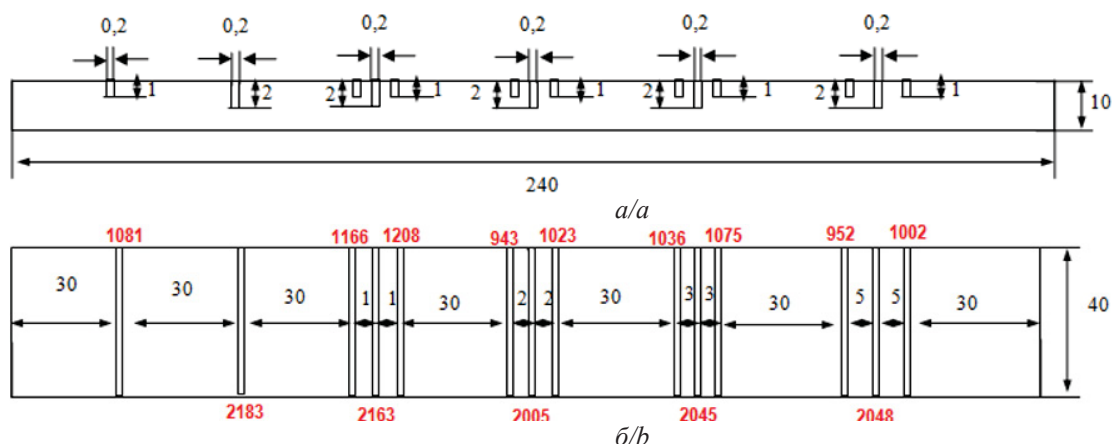


Рис. 3. Схема специального стандартного образца № 3 с группой трещин с заданными параметрами (а) (цветными цифрами (б) указаны действительные значения глубины трещин, в мкм)

Fig. 3. Scheme of a special standard sample no. 3 with a group of cracks with specified parameters (a) (colored numbers (b) indicate the actual values of the depth of cracks  $\times 10^{-3}$ )

Для накладных ВТП предварительно были получены эмпирические зависимости, которые применяются в методе распознавания группы стресс-коррозионных трещин. Например, для абсолютного накладного ВТП с диаметром  $D=1,8$  мм они имеют следующий вид:

$$\Delta(n-1) = f_1(z) = \frac{-0,7864 + \sqrt{0,7864^2 + 0,064(z-2,7109)}}{0,032},$$

$$K(\Delta) = f_2(\Delta) = 2,2198 - 0,5624\Delta + 0,0615\Delta^2,$$

$$U_m^0(h) = f_3(h) = 1075,385h - 124,378h^2. \quad (13)$$

Следует заметить, что функциональная зависимость  $f_2(\Delta)$  была получена при количестве дефектов в группе стресс-коррозионных трещин  $n=3$ . Вследствие этого для обеспечения приемлемого уровня погрешности в расчетном значении параметра  $K$  (рис. 2) перебор значений количества стресс-коррозионных трещин  $n$  в формулах (9), (10) осуществлялся в интервале  $2 \leq n \leq 4$ .

При распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала накладного ВТП для них также предварительно были получены эмпирические зависимости, аналогичные (13).

Дискретное вейвлетное преобразование измеренных сигналов накладных ВТП над дефектами сплошности осуществлялись по формулам из [17–19]:

- для сигнала абсолютного накладного ВТП в дискретном виде  $U_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ):

$$WU(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{j=1}^N U_j \left[ \frac{z_1}{\left(\frac{j-b}{a}\right)^2 + z_1^2} - \frac{z_2}{\left(\frac{j-b}{a}\right)^2 + z_2^2} \right]; \quad (14)$$

- для сигнала дифференциального накладного ВТП в дискретном виде  $U1_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ):

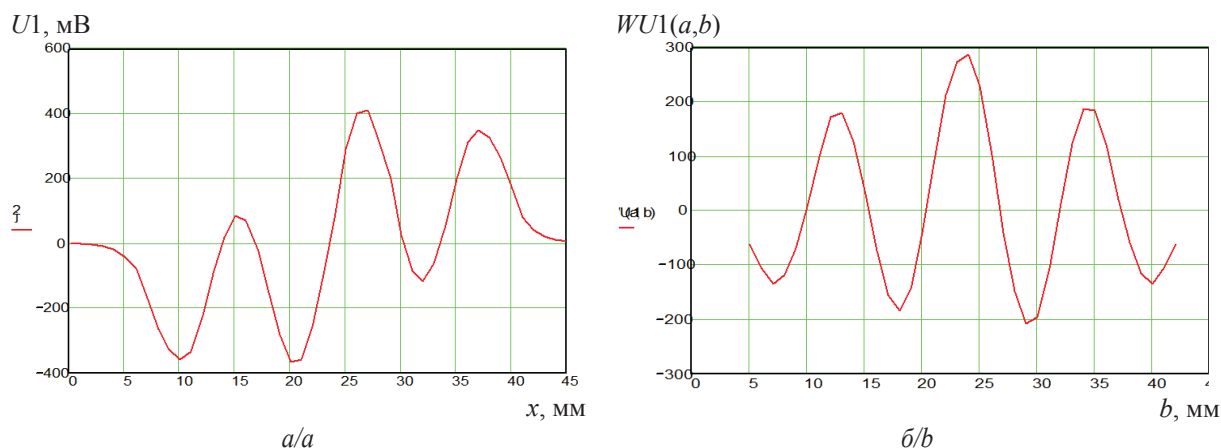
$$WU1(a, b) = \frac{1}{a\sqrt{a}} \sum_{j=1}^N U1_j \left[ \frac{j-b}{\left(\frac{j-b}{a}\right)^2 + z_1^2} - \frac{j-b}{\left(\frac{j-b}{a}\right)^2 + z_2^2} \right], \quad (15)$$

где  $a$  – масштабирующий параметр;  $b$  – параметр сдвига;  $z_1, z_2$  – параметры вейвлетной функции.

На рис. 4 показан измеренный сигнал дифференциального накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин в ССО-3 и зависимость коэффициентов вейвлетного преобразования данного сигнала ВТП от параметра сдвига.

Результаты распознавания группы стресс-коррозионных трещин в ССО-01, ССО-1 по измеренным сигналам абсолютного и дифференциального накладного ВТП и коэффициентам их вейвлетного преобразования приведены в табл. 1–3.

В столбце 1 табл. 1–3 приводится действительная глубина  $h$  (в мм) отдельных дефектов сплошности и группы трещин в металле, там же указаны интервалы  $\Delta$  между трещинами (в мм); в столбце 2 – амплитуда измеренного сигнала накладного ВТП  $U_m$  (в мВ), или размах (разница между экстремумами) коэффициентов вейвлетного преобразования  $WU_m$  сигнала накладного ВТП (14), (15); в столбце 3 – полуширина измеренного сигнала накладного ВТП над трещинами  $z$  (в мм); в столбце 4 – расчетная величина ширины группы трещин на поверхности металла (в мм); в столбце 5 – пара значений  $(n, \Delta)$ , полученных на основе решения уравнений (9)–(11); в столбце 6 – средняя оценка глубины группы трещин в металле  $h^*$  (в мм), установленная по восстановленному значению  $U_m^0$ ; в столбце 7 – относительная погрешность оценки глубины группы трещин в металле  $\delta h^*$  (в %).



**Рис. 4.** Сигнал дифференциального накладного вихретокового преобразователя над группой трещин в специальном стандартном образце № 3 (а) и зависимость коэффициентов вейвлетного преобразования от параметра сдвига (б)  $D=3,5$  мм,  $\Delta=5$  мм,  $a=1$ ,  $z_1=0,12$ ,  $z_2=1$

**Fig. 4.** Signal of the absolute surface eddy-current sensor over a group of cracks in the special standard sample no. 3 (a) and the dependence of the wavelet transform coefficients of the signal on the shift parameter (b)  $D=3,5$  mm,  $\Delta=5$  mm,  $a=1$ ,  $z_1=0,12$ ,  $z_2=1$

**Таблица 1.** Распознавание группы трещин в специальном стандартном образце № 1 по сигналу абсолютного накладного вихретокового преобразователя ( $D=1,8$  мм)

**Table 1.** Signal parameters of absolute surface eddy-current sensor ( $D=1,8$  mm) over a group of cracks in special standard sample no. 1

| Глубина трещины $h$ , мм<br>Crack depth $h$ , mm | Амплитуда сигнала ВТП $U_m$ , мВ<br>ECS signal amplitude $U_m$ , mV | Полуширина $z$ , мм<br>Half-width $z$ , mm | $\Delta(n-1)$ , мм/мм | Кол-во трещин $n$<br>Number of cracks $n$<br>интервал $\Delta$ , мм<br>interval $\Delta$ , mm | Глубина трещины (ср.) $h^*$ , мм<br>Depth (avg.) $h^*$ , mm | Погрешность<br>Error $\delta h^*$ , % |
|--|---|--|-----------------------|---|---|---------------------------------------|
| 1,091  | 1038 (1)  | 2,5  | –                     | –   | –   | –                                     |
| 1,874  | 1510 (1,46)   | 3,1  | –                     | –   | –   | –                                     |
| {1,04,1,18, 1,09}<br>$\Delta=1$ мм/мм            | 2274<br>(2,19)  | 3,8  | 1,35                  | $n=2 \Delta=1,35$<br>$n=3 \Delta=0,67$  | 1,48  | +25                                   |
| {1,09,1,09, 1,09}<br>$\Delta=2$ мм/мм            | 1768<br>(1,7)   | 6,0  | 3,88                  | $n=3 \Delta=1,94$<br>$n=4 \Delta=1,29$  | 1,32  | +21                                   |
| {1,0,1,02, 1,02}<br>$\Delta=3$ мм/мм             | 1253<br>(1,21)  | 8,5  | 6,5                   | $n=3 \Delta=3,3$<br>$n=4 \Delta=2,2$  | 1,17  | +15                                   |
| {1,09,1,11, 1,12}<br>$\Delta=5$ мм/мм            | 1125<br>(1,08)  | 12,4                                       | 10,2                  | $n=3 \Delta=5,1$<br>$n=4 \Delta=3,4$  | 1,24  | +11                                   |

Исследования показали, что относительная погрешность глубины дефектов сплошности в стальных образцах, установленных при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по амплитуде сигнала абсолютного накладного ВТП, в среднем не превышает  $\pm 25\%$  (табл. 1).

Эти данные хорошо согласуются с расчетными оценками, полученными на основе математической модели сигнала абсолютного накладного ВТП над группой стресс-коррозионных трещин в металле (1).

**Таблица 2.** Распознавание группы трещин в специальном стандартном образце № 1 по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала абсолютного накладного вихретокового преобразователя ( $D=1,8$  мм)

**Table 2.** Signal parameters by the wavelet transform coefficients of absolute surface eddy-current sensor ( $D=1,8$  mm) over a group of cracks in special standard sample no. 1

| Глубина трещины $h$ , мм<br>Depth $h$ , mm | Амплитуда (размах) $WU_m$ , мВ<br>Amplitude (excursion) $WU_m$ , mV | Полуширина $z$ , мм<br>Half-width $z$ , mm | $\Delta(n-1)$ , мм/мм | Кол-во трещин $n$<br>Number of cracks $n$<br>интервал $\Delta$ , мм<br>interval $\Delta$ , mm | Глубина трещины (ср.) $h^*$ , мм<br>Depth (avg.) $h^*$ , mm | Погрешность<br>Error $\delta h^*$ , % |
|--|---|--|-----------------------|---|---|---------------------------------------|
| 1,091                                      | 6584<br>(1)   | 2,4  | –                     | –   | –   | –                                     |
| 1,874                                      | 9405  | 2,93                                       | –                     | –   | –   | –                                     |
| {1,04,1,18, 1,09}<br>$\Delta=1$ мм/мм      | 13911<br>(2,11)   | 3,7  | 1,17                  | $n=2 \Delta=1,17$<br>$n=3 \Delta=0,58$  | 1,41  | +19,5                                 |
| {1,09,1,09, 1,09}<br>$\Delta=2$ мм/мм      | 10523<br>(1,6)  | 5,95                                       | 3,57                  | $n=3 \Delta=1,79$<br>$n=4 \Delta=1,19$  | 1,21  | +10,6                                 |
| {1,0,1,02, 1,02}<br>$\Delta=3$ мм/мм       | 7551<br>(1,15)  | 8,4  | 6,11                  | $n=3 \Delta=3,05$<br>$n=4 \Delta=2,04$  | 1,1   | +7,8                                  |
| {1,09,1,11, 1,12}<br>$\Delta=5$ мм/мм      | 7006<br>(1,06)  | 12,3                                       | 9,97                  | $n=3 \Delta=4,98$<br>$n=4 \Delta=3,32$  | 1,18  | +5                                    |

**Таблица 3.** Распознавание группы трещин в специальном стандартном образце № 01 по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала дифференциального накладного вихретокового преобразователя ( $D=3$  мм)

**Table 3.** Signal parameters by the wavelet transform coefficients of absolute surface eddy-current sensor ( $D=3$  mm) over a group of cracks in special standard sample no. 01

| Глубина трещины $h$ , мм<br>Depth $h$ , mm | Амплитуда (размах) $W1U_m$ , мВ<br>Amplitude (excursion) $W1U_m$ , mV | Полуширина $z$ , мм<br>Half-width $z$ , mm | $\Delta(n-1)$ , мм/мм | Кол-во трещин $n$<br>Number of cracks $n$<br>интервал $\Delta$ , мм<br>interval $\Delta$ , mm | Глубина трещины (ср.) $h^*$ , мм<br>Depth (avg.) $h^*$ , mm | Погрешность Error $\delta h^*$ , % |
|--|---|--|-----------------------|---|---|------------------------------------|
| 1,245                                      | 371<br>(1,0)  | 2,7  | –                     | –   | –   | –                                  |
| 2,156                                      | 607   | 2,83                                       | –                     | –   | –   | –                                  |
| {1,13;1,16, 1,03}<br>$\Delta=1$ мм/мм      | 1227.5<br>(3,3)   | 3,6  | 1,24                  | $n=2 \Delta=1,24$<br>$n=3 \Delta=0,62$  | 1,18  | +1,7                               |
| {1,01;1,46, 1,08}<br>$\Delta=2$ мм/мм      | 972.5<br>(2,62)   | 6  | 3,86                  | $n=3 \Delta=1,93$<br>$n=4 \Delta=1,28$  | 1,24  | -15                                |
| {1,09;1,09, 1,11}<br>$\Delta=3$ мм/мм      | 436.6<br>(1,18)   | 8,8  | 6,53                  | $n=3 \Delta=3,26$<br>$n=4 \Delta=2,18$  | 0,91  | -18                                |
| {1,15;1,14, 1,13}<br>$\Delta=5$ мм/мм      | 340<br>(0,92)   | 12,8                                       | 9,87                  | $n=3 \Delta=4,94$<br>$n=4 \Delta=3,29$  | 1,1   | -4,8                               |

Относительная погрешность оценки глубины дефектов сплошности снижается при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала абсолютного и дифференциального накладного ВТП, при этом более точными являются оценки глубины группы стресс-коррозионных трещин в металле, установленных для преобразованных сигналов дифференциального накладного ВТП (табл. 2, 3).

Это обстоятельство можно объяснить тем, что в восстановленном сигнале накладного ВТП над дефектом сплошности (11) присутствует методическая (в значениях параметра  $K$ ) и инструментальная (в измеренных значениях амплитуды сигнала накладного ВТП  $U_m$ ) погрешности.

Применение дифференциальной схемы измерения сигнала накладного ВТП, а также последующее вейвлетное преобразование измеренного сигнала ВТП приводит к снижению величины инструментальной погрешности за счет уменьшения уровня случайных шумов и помех. Методическая погрешность при этом практически остается неизменной, поэтому уточнение оценок глубины группы трещин в табл. 2–3 обусловлено, прежде всего, снижением инструментальной погрешности.

В результате исследований было установлено, что:

- относительная погрешность оценок глубины дефектов сплошности в стальных образцах, установленных при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала абсолютного накладного ВТП, в среднем не превышает  $\pm 20\%$  (табл. 2);
- относительная погрешность оценок глубины дефектов сплошности, установленных при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала дифференциального накладного ВТП, не превышает  $18\%$  (табл. 3).

Результаты апробирования эмпирического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин показывают, что погрешности оценки глубины дефектов сплошности имеют приемлемые значения и существенно меньше величин погрешностей, полу-

ченных при однопараметровом методе оценки глубин стресс-коррозионных трещин (по амплитуде или фазе сигнала накладного ВТП), которые составляют  $50...100\%$  и более.

На рис. 5 показана блок-схема алгоритма описанного эмпирического метода распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле по измеренному сигналу абсолютного накладного ВТП.

В данном алгоритме по измеренной величине полуширины сигнала накладного ВТП определяется ширина области распределения группы стресс-коррозионных трещин. Методом перебора из формулы (9) определяется количество дефектов  $n$  в группе стресс-коррозионных трещин и интервал между трещинами  $\Delta$ , которые удовлетворяют условию  $D \geq \Delta$  (11).

По этим значениям по формуле (7) рассчитывается величина отношения  $K$ , которая позволяет определить амплитуду сигнала абсолютного накладного ВТП над отдельной стресс-коррозионной трещиной.

На основе предварительно полученной градуировочной зависимости для сигнала накладного ВТП оценивается глубина дефектов в группе стресс-коррозионных трещин (при постоянстве глубины  $h$ )/глубина наибольшего дефекта (при разных глубинах  $h$  трещин).

Данный алгоритм, реализованный в соответствующем программном модуле вихретокового дефектоскопа [20], показал свою работоспособность и удовлетворительные результаты при распознавании группы стресс-коррозионных трещин в стальных образцах, вырезанных из реального стального газопровода.

#### Заключение

В измеренном сигнале накладного вихретокового преобразователя над группой стресс-коррозионных трещин в стальном газопроводе содержится информация, достаточная для решения задачи их распознавания в случае отсутствия пространственного разрешения дефектов сплошности.

На основе математической модели сигнала накладного преобразователя над группой стресс-коррозионных трещин установлено, что можно при-





дефекта сплошности в группе стресс-коррозионных трещин в случае отсутствия их пространственного разрешения.

Этот эмпирический метод применим также при распознавании группы стресс-коррозионных трещин по коэффициентам вейвлетного преобразования сигнала накладного вихретокового преобразователя раз-

ных типов (абсолютных/дифференциальных), при котором достигается некоторое уточнение оценки глубины дефекта сплошности в металле.

*Исследование проводится при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 474ГУЦЭС8-Д3/62153 от 05 октября 2020 г.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миторхин М.Ю., Велиулин И.И., Касьянов А.Н. Анализ средств и технологий технического диагностирования и отбраковки труб при проведении капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром» // Территория нефтегаз. – 2010. – № 12. – С. 57–60.
2. Алимов С.В., Арабей А.Б., Ряховских И.В. Концепция диагностирования и ремонта магистральных газопроводов в регионах с высокой предрасположенностью к стресс-коррозии // Газовая промышленность. Спецвыпуск. – 2015. – Т. 724. – С. 10–15.
3. Автоматизированный вихретоковый сканер-дефектоскоп АСД «Вихрь-1» / А.В. Коннов, А.М. Кузнецов, В.А. Новиков, Т.Р. Загидулин // 20 Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: тезисы докладов. – М.: ИД «Спектр», 2014. – С. 64–67.
4. Коннов В.В., Коннов Вл.Вл., Кузнецов А.М. Результаты опытной эксплуатации автоматизированного сканера-дефектоскопа АСД «Вихрь» при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 2. – С. 32–37.
5. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. – М.: ИД «Спектр», 2011. – 224 с.
6. Garcia-Martin J., Gomez-Gil J, Vazquez-Sanchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing // Sensors. – 2011. – V. 11. – P. 2525–2565.
7. Yang H.C., Tai C.C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate // Measurement Science and Technology. – 2002. – V. 13. – P. 1259–1265.
8. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel / V.M.A. Silva, C.G. Camerini, J.M. Pardal, J.C.G. de Blás, G.R. Pereira // Journal of Materials Research and Technology. – 2018. – V. 7. – P. 395–401.
9. Yuting L., Fangji G., Zhengjun W., Junbi L., Wenqiang L. Novel method for sizing metallic bottom crack depth using multi-frequency alternating current potential drop technique // Measurement Science Review. – 2015. – V. 15. – P. 268–273.
10. Hu S.W., Hu X., Lu J. Study on eddy current principle-based nondestructive testing method for broken wire of PCCP // Water Resources & Hydropower Engineering. – 2016. – V. 47. – № 2. – P. 101–114.
11. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The statistic analyze of stress-corrosion cracks on the main gas pipeline section // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference «EarthScience». – 2020. – V. 459. – P. 042009.
12. The study of eddy current sensors signals over a group of cracks in metal / R.V. Zagidulin, T.R. Zagidulin, T.A. Bakiev, A.T. Bakiev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 666. – P. 042068.
13. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1989. – 232 с.
14. Characterization of surface cracks using eddy current NDT simulation by 3D-FEM and inversion by neural network / B. Helifa, M. Féliachi, I.K. Lefkaier, F. Boubenider, A. Zaoui, N. Lagraa // ACES. – 2016. – V. 31. – P. 187–194.
15. Загидулин Р.В., Бакиев А.Т. Моделирование сигнала вихретокового преобразователя над стресс-коррозионными трещинами магистрального газопровода // Современные проблемы физики: межвузовский сборник научных статей, посвященный 100-летию открытия Уфимского Физического института. – Уфа: БашГУ, 2019. – С. 99–102.
16. Models of signals of eddy-current transducers above defects of the continuity of metal / R. V. Zagidulin, T.R. Zagidulin, T.A. Bakiev, A.T. Bakiev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 666. – P. 042066.
17. Бадамшин Р.А., Загидулин Т.Р., Коннов А.В. Некоторые вопросы оптимизации параметров вейвлетного преобразования сигналов преобразователей электромагнитного поля // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17. – № 54. – С. 122–127.
18. Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wafelets. Communications on Pure and Applied Mathematics // Ingrid Daubechies. – 1988. – V. 41. – P. 909–996.
19. Grman J., Ravas R. Application of Wavelet transformation in eddy current testing of steam generator tubes // IEEE Instrumentation and Measurement. – 2001. – V. 1. – P. 392–396.
20. Распознавание группы стресс-коррозионных трещин в металле по сигналу накладного абсолютного вихретокового преобразователя: пат. Рос. Федерация, № 2021668280, заявл. 20.10.2021; опубл. 12.11.2021. Бюл № 11. – 1 с.

*Поступила 19.04.2022 г.*

*Прошла рецензирование 13.10.2022 г.*

#### Информация об авторах

**Загидулин Р.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры гидрогазодинамики трубопроводных систем и гидромашин, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Бакиев А.Т.**, аспирант, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

**Бакиев Т.А.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой гидрогазодинамики трубопроводных систем и гидромашин, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 620.179.14

## EMPIRICAL METHOD FOR RECOGNIZING A GROUP OF STRESS-CORROSION CRACKS IN METAL BY THE SIGNAL OF EDDY-CURRENT SENSOR

Rinat V. Zagidulin<sup>1</sup>,  
doctech.zagr@post.com

Arslan T. Bakiev<sup>1</sup>,  
bakievars@gmail.com

Tagir A. Bakiev<sup>1</sup>,  
tagirbak@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**The relevance** of the research is related to improving the safety of operation of steel gas pipelines containing stress-corrosion cracks and corrosion damage to metal detected during technical diagnostics by eddy-current non-destructive testing.

**The main aim** of the research is to develop a mathematical method for recognizing a group of stress-corrosion cracks in the metal of a steel gas pipeline by the signal of a surface eddy-current sensor.

**Objects:** groups of stress-corrosion cracks with different geometric parameters located in the metal at different intervals. Changing the geometric parameters of a group of stress-corrosion cracks and the intervals between them leads to the transformation of the signal shape of surface eddy-current sensors during non-destructive testing of a steel gas pipeline with eddy-current flaw detectors.

**Methods:** mathematical modeling of signals of surface eddy-current sensors over a group of stress-corrosion cracks in metal; experimental studies to determine empirical dependencies for informative parameters of the signal of a surface eddy-current sensor (amplitude, signal half-width) on the interval between continuity defects on artificial models of stress-corrosion cracks; empirical method for recognizing a group of stress-corrosion cracks from measured signals of surface eddy-current sensors.

**Results.** The paper introduces the basics of an empirical method for recognizing a group of stress-corrosion cracks in metal by the signal of an absolute surface eddy-current sensor. Based on a mathematical model of the signal of a surface eddy-current sensor the authors established the parameters (amplitude and half-widths of the signal over a group of cracks) containing consolidated information on the number of continuity defects in a group of stress-corrosion cracks and the interval between them. The empirical dependences of the signals of a surface eddy-current sensor were experimentally obtained on artificial models of stress-corrosion cracks in steel samples. The applicability of the empirical method of recognizing a group of stress-corrosion cracks in metal when using the coefficients of the wavelet transformation of the signal of surface eddy-current sensor of different types (absolute and differential) as signs of the classification of continuity defects is shown.

### Key words:

steel gas pipeline, group of cracks in a metal, metal continuity defect, recognition of a group of stress-corrosion cracks, surface eddy-current sensor, mathematical model of a signal of a surface eddy-current sensor, signal amplitude, signal half-width, wavelet transform of signal.

This study was carried out with the support of the Fund for the Promotion of Innovations under the agreement No. 474GUTSES8-D3 / 62153 dated October 05, 2020.

### REFERENCES

- Mitorkhin M.Yu., Veliyulin I.I., Kasyanov A.N. Analiz sredstv i tekhnologiy tekhnicheskogo diagnostirovaniya i otrabotki trub pri provedenii kapitalnogo remonta lineinoy chasti magistralnykh gazoprovodov Gazprom [Analysis of means and technologies of technical diagnostics and rejection of pipes during the overhaul of the linear part of the main gas pipelines of Gazprom]. *Territory of Neftegaz*, 2010, no. 12, pp. 57–60.
- Alimov S.V., Arabey A.B., Ryakhovskikh I.V. Kontseptsiya diagnostirovaniya i remonta magistralnykh gazoprovodov v regionakh s vysokoy predraspolzhenostyu k stress-korrozii [The concept of diagnostics and repair of main gas pipelines in regions with a high predisposition to stress corrosion]. *Gas Industry*, 2015, Special Issue, vol. 724, pp. 10–15.
- Konnov A.V., Kuznetsov A.M., Novikov V.A., Zagidulin T.R. Avtomatizirovanny skaner-defektoskop ASD «Vikhr» [Automated eddy current scanner-flaw detector ASD «Vortex-1»]. *20 vseroissiysskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya po nerazrushayushchemu kontrolyu i tekhnicheskoy diagnostike. Tezisy dokladov* [20th All-Russian Scientific and Technical Conference on Non-destructive testing and technical diagnostics: abstracts of reports]. Moscow, March 3–6, 2014. Moscow, Spectrum Publ. House, 2014. pp. 64–67.
- Konnov V.V., Konnov V.I., Kuznetsov A.M. The results of the pilot operation of the automated scanner-flaw detector ASD «VIKHR» during overhaul of the linear part of main gas pipelines. *Control. Diagnostics*, 2015, no. 2, pp. 32–37. In Rus.
- Fedosenko Yu.K., Shkatov P.N., Efimov A.G. *Vikhretokovyy kontrol* [Eddy current control]. Moscow, Spectrum Publ. house, 2011. 224 p.
- Garcia-Martin J., Gomez-Gil J., Vazquez-Sanchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors (Basel)*, 2011, vol. 11, pp. 2525–2565.
- Yang H.C., Tai C.C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate. *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, pp. 1259–1265.
- Silva V.M.A., Camerini C.G., Pardal J.M., De Blás J.C.G., Pereira G.R. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, vol. 7, pp. 395–401.
- Yuting L., Fangji G., Zhengjun W., Junbi L., Wenqiang L. Novel method for sizing metallic bottom crack depth using multi-frequency alternating current potential drop technique. *Measurement Science Review*, 2015, vol. 15, pp. 268–273.
- Hu S.W., Hu X., Lu J. Study on eddy current principle-based non-destructive testing method for broken wire of PCCP. *Water Resources & Hydropower Engineering*, 2016, vol. 47, pp. 101–114.

11. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The statistic analyze of stress-corrosion cracks on the main gas pipeline section. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 459, p. 042009.
12. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R., Bakiev T.A., Bakiev A.T. The Study of Eddy Current Sensors Signals over a Group of Cracks in Metal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 666, p. 042068.
13. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 232 p.
14. Helifa B., Féliachi M., Lefkaier I.K., Boubenider F., Zaoui A., Lagraa N. Characterization of surface cracks using eddy current NDT simulation by 3D-FEM and inversion by neural network. *ACES*, 2016, vol. 31, pp. 187–194.
15. Zagidulin R.V., Bakiev A.T. Modelirovanie signala vikhretokovogo preobrazovatelya nad stress-korroziionnymi treshchinami magistralnogo gazoprovoda [Modeling of the eddy current converter signal over stress-corrosion cracks of the main gas pipeline]. *Sovremennye problemy fiziki. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh statey, posvyashchenny 100-letiyu otkrytiya Ufimskogo Fizicheskogo instituta* [Modern problems of physics. Interuniversity collection of scientific articles dedicated to the 100th anniversary of the opening of the Ufa Institute of Physics]. Ufa, BashGU Publ., 2019. pp. 99–102.
16. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R., Bakiev T.A., Bakiev A.T. Models of signals of eddy-current transducers above defects of the continuity of metal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 666, p. 042066.
17. Badamshin R.A., Zagidulin T.R., Konnov A.V. Nekotorye voprosy optimizatsii parametrov veyvletnogo preobrazovaniya signalov preobrazovatelyey elektromagnitnogo polya [Some issues of optimization of parameters of wavelet transformation of signals of electromagnetic field converters]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 17, no. 1, pp. 122–127.
18. Ingrid Daubechies orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1988, vol. 41, pp. 909–996.
19. Grman J., Ravas R. Application of Wavelet transformation in eddy current testing of steam generator tubes. *IEEE Instrumentation and Measurement*, 2001, vol. 1, pp. 392–396.
20. Bakiev A.T., Zagidulin R.V., Bakiev T.A. *Raspoznavanie gruppy stress-korroziionnykh treshchin v metalle po signalu nakladnogo absolyutnogo vikhretokovogo preobrazovatelya* [Recognition of a group of stress-corrosion cracks in metal by the signal of a surface absolute eddy current sensor]. Patent RF, no. 2021668280, 2021.

*Received: 19 April 2022.  
Reviewed: 13 October 2022.*

#### Information about the authors

**Rinat V. Zagidulin**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Arslan T. Bakiev**, postgraduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

**Tagir A. Bakiev**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.