

## ТАНГЕНЦИАЛЬНАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ РАДИОГРАФИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИИ ТОЧЕЧНОЙ КОРРОЗИИ ВНЕШНЕЙ СТЕНКИ ИЗОЛИРОВАННЫХ СТАЛЬНЫХ ТРУБ

© 2020 г. Еко Прасетью<sup>1,\*</sup>, Генри Париаман<sup>1,2</sup>, Салистиджон<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>ООО Генерация электроэнергии Ява Бали, Сурабая, 60231 Индонезия

<sup>2</sup>Высшая школа технического университета — Национальная электроэнергетическая компания, Джакарта, 11750 Индонезия

<sup>3</sup>Технологический институт Калимантана, Баликпапан, 76127 Индонезия

<sup>4</sup>Технологический институт Сепулх-Нопембера, Сурабая, 60111 Индонезия

\*E-mail: eko.prasetyo@ptpjb.com

Поступила в редакцию 27.12.2018; после доработки 15.02.2019

Принята к публикации 20.12.2019

Точечная коррозия является опасной проблемой в системах трубопроводов электростанций, нефтехимических предприятий и других химических производств. Мониторинг глубины коррозионной язвы с использованием методов неразрушающего контроля (НК), таких как метод тангенциальной радиографии (МТР), предлагает оптимальное решение. МТР может применяться без снятия изоляции трубопровода, когда трубопроводная система находится в режиме эксплуатации. В этом исследовании мы установили возможность применения МТР с использованием источника рентгеновского излучения для обнаружения внешней точечной коррозии на изолированных трубах из углеродистой стали диаметром менее 50 мм (то есть трубах малого диаметра). Измерения оптической плотности пленки с использованием денситометра и люксметра показали схожие значения, но результаты измерения люксметром были менее точными. На основании результатов было получено линейное уравнение для определения диаметра точечной коррозии. Высокое рабочее напряжение приводило к высокому контрасту пленки, высокой резкости пленки и низкому рассеянию, однако низкое рабочее напряжение приводило к высокому контрасту пленки, низкой резкости пленки и большому рассеянию. На основании наших результатов рабочее напряжение 260 кВ является наиболее подходящим для эффективного анализа.

**Ключевые слова:** метод тангенциальной радиографии, рентгеновские лучи, геометрия точечной коррозии, оптическая плотность пленки, кратность увеличения.

DOI: 10.31857/S0130308220030057

Системы трубопроводов, используемые для транспортировки жидкостей и газов на электростанциях, нефтехимических и химических заводах, подвергаются значительному воздействию коррозионных процессов. Одной из самых разрушительных форм коррозии является точечная коррозия, при которой образуются углубления на металлических поверхностях труб. Контроль глубины коррозионной язвы необходим для предотвращения утечки в трубопроводной системе, особенно во время эксплуатации. Однако измерение глубины, как периодическая инспекционная процедура, является сложным процессом, поскольку глубина язвы на внешней стенке трубы может изменяться с течением времени. Методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковой контроль, контроль проникающими веществами и магнитопорошковый контроль, используются для обнаружения дефектов в производимых деталях и компонентах, однако сначала они требуют снятия изоляции и отключения системы трубопроводов. Другой альтернативный метод неразрушающего контроля, метод тангенциальной радиографии, предлагает решение этой проблемы, поскольку контроль может проводиться без снятия изоляции трубопровода, что позволяет контролировать систему трубопроводов во время эксплуатации. В этой работе проверена возможность применения МТР с использованием источника рентгеновского излучения, который обладает возможностью настройки режима контроля (то есть интенсивности и времени экспозиции) и оказывает меньшее воздействие на организм человека, чем источники  $\gamma$ -излучения. Мы сосредоточились на сравнении измерений оптической плотности пленки с использованием денситометра и люксметра. Увеличение диаметра изображения язвы использовалось для получения уравнения для труб малого диаметра (то есть диаметром менее 50 мм). Рабочее напряжение варьировалось (200, 230 и 260 кВ), чтобы генерировать соответствующие энергии рентгеновского излучения для измерения различной глубины язв (20, 40 и 60 % соответственно) образца ступенчатой стальной трубы. Измерения оптической плотности пленки с использованием денситометра и люксметра показали аналогичные результаты, однако результат измерения оптической плотности пленки с использованием денситометра был более точным. При этом считалось, что при оптических плотностях пленки выше 3,5 все края изображения образца в

тангенциальном направлении излучения засвечивались. Степени увеличения (1,0123, 1,0254 и 1,0379) варьировались в зависимости от расстояния от средней точки рентгеновской мишени (30, 60 или 90 мм соответственно). Используя результаты, было получено линейное уравнение с тремя переменными для определения фактического диаметра точечной коррозии:  $0,000385436a + 0,038350128b + 0,000467083c = d$ , где реальный диаметр = диаметр на пленке /  $d$ . Высокое рабочее напряжение приводило к низкому контрасту пленки, высокой резкости пленки и низкому рассеянию. Низкое рабочее напряжение приводило к высокому контрасту пленки, низкой резкости пленки и большому рассеянию. Исходя из наших результатов, для эффективного анализа наиболее подходит рабочее напряжение величиной 260 кВ.

## ВВЕДЕНИЕ

На трубопроводные системы и трубопроводы, используемые для транспортировки жидкостей и газов на электростанциях, нефтехимических и химических заводах, значительное влияние оказывают коррозионные процессы [1—3]. Коррозия происходит на одной или на обеих сторонах стенок трубы и приводит к потере толщины стенки. Точечная коррозия является одной из самых разрушительных и незаметных форм коррозии, потому что это локализованное воздействие, которое образует узкие и глубокие отверстия в металле. Измерение глубины осложняется тем, что на стенках трубы имеется статистический разброс глубины при одинаковых условиях.

Методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковой контроль, контроль проникающими веществами и магнитопорошковый контроль, используются для обнаружения дефектов в производимых деталях и компонентах. Ультразвуковые и вихревые методы НК не могут быть использованы для изолированных трубопроводов, как и внутритрубный инспекционный снаряд, который разработан для использования при периодическом контроле коррозии вдоль длинных прямых трубопроводов, но их нельзя использовать для систем трубопроводов с переменным диаметром и слишком большим количеством изгибов. В большинстве случаев необходимо удалять изоляционные материалы и клей, связывающий трубу с изоляцией, что является дорогостоящим и требует длительного времени вывода трубы из эксплуатации [1, 4—6, 7].

Среди методов неразрушающего контроля рентгенография имеет такое преимущество, что исчезает необходимость дорогостоящего удаления изоляции труб. Более того, его можно проводить в условиях высоких температур [4—6]. Недавно были проведены исследования в области цифровой радиографии, томографии и некоторых методов автоматической радиографии для оценки коррозии в процессе эксплуатации [2]. Кроме того, была разработана технология контроля в режиме эксплуатации. С помощью радиографии без пленочного экрана можно обнаружить дефекты, когда источник постоянного рентгеновского излучения управляется через монитор компьютера. С помощью экрана монитора можно обработать данные, чтобы определить состояние утонения стенки трубы. Однако из-за высокого уровня сложности методики это дорогая процедура, и на сегодняшний день такая система принадлежит только одной конкретной инспекционной компании [8].

При НК труб могут быть реализованы два метода радиографии: метод тангенциальной радиографии и метод контроля через две стенки (МДС). При МТР излучение проходит через толщину боковой стенки трубы и отображает область, расположенную ниже тангенциального положения. Этот подход обеспечивает некоторые преимущества по сравнению с другими распространенными методами для определения толщины изоляции и толщины трубы и для обнаружения внутренней и внешней коррозии [2, 5, 6, 9]. Многочисленные исследования показали, что МТР, использующий источники  $\gamma$ -излучения, может быть успешно применен для измерения глубины точечной коррозии и остаточной толщины стенки изолированных и неизолированных стальных труб большого диаметра ( $> 50$  мм) [1—7]. Кроме того, источники рентгеновского излучения также применялись к стальным трубам диаметром более 50 мм [5—7, 10]. Тем не менее, остаются ограниченные данные о возможности МТР с использованием источников рентгеновского излучения для изолированных труб малого диаметра (то есть  $< 50$  мм).

В данной работе установлена возможность применения МТР с источником рентгеновского излучения для обнаружения внешней точечной коррозии на изолированных трубах из углеродистой стали диаметром менее 50 мм. Расчеты времени экспозиции сравнивались с эталонными диаграммами источника рентгеновского излучения. Проведено сравнение оптической плотности пленки с использованием денситометра и люксметра. На основании результатов выведено уравнение для определения фактического диаметра коррозионной язвы для данной степени увеличения.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ

Труба из углеродистой стали была обработана на токарных станках с ЧПУ для формирования образца ступенчатой стальной трубы. Параметры трубы приведены в табл. 1, а поперечное сечение образца показано на рис. 1.

Таблица 1

Параметры образца

| Образец ступенчатой стальной трубы |                      |                       | Внутренний диаметр = 25,5 мм |         |         |                          |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|---------|---------|--------------------------|
| Шаг                                | Ширина шага $t$ , мм | Диаметр отверстия, мм | Глубина отверстия            |         |         | Внешний диаметр шага, мм |
|                                    |                      |                       | 0,2 $t$                      | 0,4 $t$ | 0,6 $t$ |                          |
| A                                  | 11                   | 11                    | 2,2                          | 4,4     | 6,6     | 47,5                     |
| B                                  | 10                   | 10                    | 2,0                          | 4,0     | 6,0     | 45,5                     |
| C                                  | 9                    | 9                     | 1,8                          | 3,6     | 5,4     | 43,5                     |
| D                                  | 8                    | 8                     | 1,6                          | 3,2     | 4,8     | 41,5                     |
| E                                  | 7                    | 7                     | 1,4                          | 2,8     | 4,2     | 39,5                     |
| F                                  | 6                    | 6                     | 1,2                          | 2,4     | 3,6     | 37,5                     |
| G                                  | 5                    | 5                     | 1,0                          | 2,0     | 3,0     | 35,5                     |

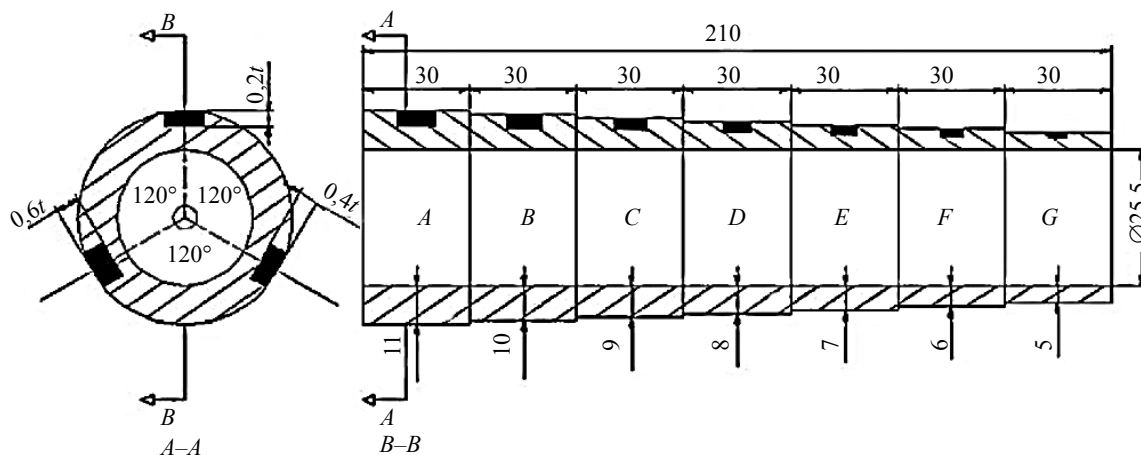


Рис. 1. Поперечное сечение образца.

Время экспозиции на основе эталонной диаграммы экспозиции для источника рентгеновского излучения может быть установлено путем определения абсциссы (толщина стали, мм) и ординаты (значение экспозиции, мА·мин). Определить время экспозиции сложно, потому что в логарифмическом масштабе нам придется оценивать величину экспозиции, если она не укладывается в точную линию. Расчет времени экспозиции в минутах проводили следующим образом [11]:

$$E_t = \left( \frac{SFD_{\text{actual}}}{SFD_{\text{ref.chart}}} \right)^2 \cdot \frac{E}{I}, \quad (1)$$

где  $E_t$  — время экспозиции, мин;  $SFD_{\text{actual}}$  — расстояние от источника до пленки (РИП), мм;  $SFD_{\text{ref.chart}}$  — РИП из эталонной диаграммы экспозиции, мм;  $E$  — величина экспозиции, мА·мин,  $I$  — анодный ток, мА.

В МТР фактическая толщина стенки трубы находится по касательной продольного сечения. Схема измерения толщины стенки трубы показана на рис. 2.

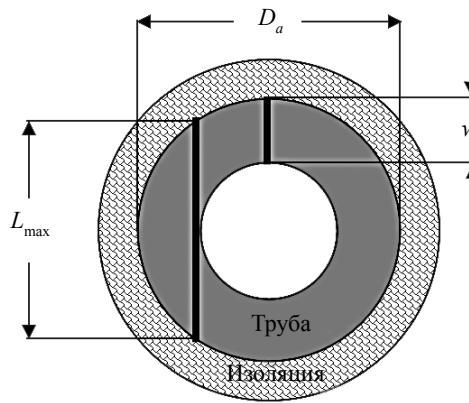


Рис. 2. Схема измерения толщины стенки трубы.

Максимальная толщина касательной стенки трубы была рассчитана как [9]:

$$L_{\max} = 2w \cdot \sqrt{\frac{D_a}{w} - 1}, \quad (2)$$

где  $L_{\max}$  — максимальная толщина касательной стенки трубы, мм;  $w$  — толщина стенки трубы, мм;  $D_a$  — внешний диаметр трубы, мм.

Ряд методик радиографии обычно используются для труб, в том числе метод фронтального просвечивания через две стенки с получением изображения стенки, прилегающей к пленке (ДСОИ) и метод фронтального просвечивания через две стенки с получением изображения стенок трубы, находящихся на пути рентгеновского излучения (ДСДИ), как показано на рис. 3 [5]. ДСОИ в основном подходит для труб диаметром более 85 мм. Между тем, ДСДИ может быть применен для труб меньшего размера (то есть диаметром до 85 мм). Оба метода используются в дефектоскопии сварных соединений труб. В некоторых случаях для определения точечной коррозии пришлось применять ДСОИ, поместив источник рентгеновского излучения в подходящее месторасположение.

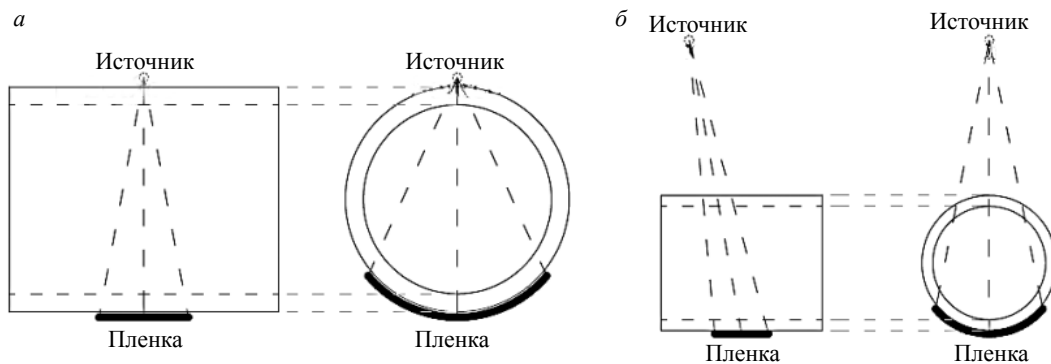


Рис. 3. Схема метода фронтального просвечивания через две стенки с получением изображения стенки, прилегающей к пленке (ДСОИ) (а) и схема метода фронтального просвечивания через две стенки с получением изображения стенок трубы, находящихся на пути рентгеновского излучения (ДСДИ) (б).

Для контроля точечной коррозии и непосредственного измерения толщины стенки МТР является наиболее подходящим доступным методом. Возможные схемы контроля МТР показаны на рис. 4 [1]. В данной работе выбрано положение 2. Направление излучения было тангенциальным к стенке трубы, а само излучения коллимировано и параллельно исследуемой области, чтобы предотвратить обратное рассеяние и сфокусировать луч [4].

Чтобы достигнуть низкую геометрическую нерезкость ( $U_g$ ), необходимы следующие условия: малый источник излучения, большое расстояние от источника до объекта (РИО) и небольшое РИП

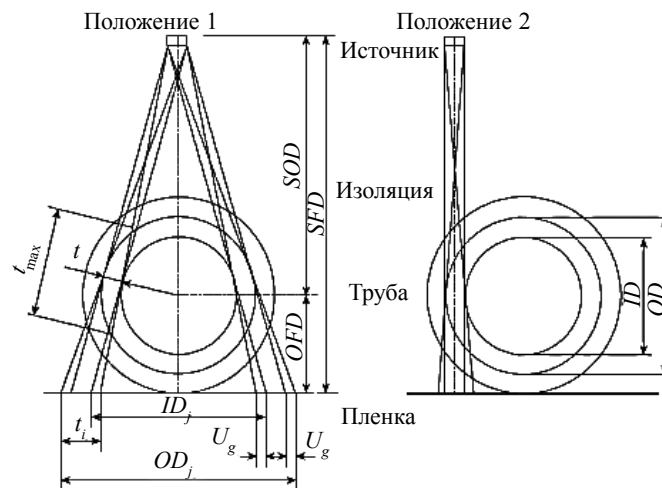


Рис. 4. Возможная схема контроля методом тангенциальной радиографии.

[12]. Поскольку  $U_g$  является рассчитываемой величиной резкости изображения, которая сильно влияет на внешний вид радиографического изображения, необходимо определить его величину,  $U_g$  можно рассчитать из подобия треугольников следующим образом [13]:

$$U_g = F \frac{d}{D_0}, \quad (3)$$

где  $U_g$  — геометрическая нерезкость (полутень), мм;  $F$  — размер источника излучения, мм;  $d$  — расстояние от объекта до пленки (РОП), мм;  $D_0$  — РИП, мм.

Денситометр ( $D$ ) или люксметр ( $D_{lux}$ ) можно использовать для измерения оптической плотности пленки. Для  $D_{lux}$  значение может быть получено путем измерения интенсивности света пленки, находящейся на негатоскопе или любом другом приборе для просмотра пленок,  $D_{lux}$  можно рассчитать следующим образом [5, 13]:

$$D = \log \frac{I_0}{I_t}, \quad (4)$$

где  $D$  — оптическая плотность радиографической пленки, или  $D_{lux}$ ;  $I_0$  — интенсивность испускаемого от негатоскопа светового потока, лк;  $I_t$  — интенсивность прошедшего света, который достигает глаза оператора, лк.

### ПРОЦЕДУРА КОНТРОЛЯ

Экспериментальная установка включала образец ступенчатой стальной трубы (см. табл. 1, рис. 1). Кроме того, искусственные отверстия были сформированы на внешней стенке образца ступенчатой стальной трубы с использованием трехосевых станков с ЧПУ. Три искусственных отверстия на каждом шаге по окружности расположены под углом  $120^\circ$  друг от друга. Глубина искусственных отверстий составляла 20, 40 и 60 % от толщины трубы на данном шаге; диаметры были такими же, как толщина трубы на данном шаге. Измерения толщин стенок, толщин ступеней и глубины искусственных ям подтверждены измерением с использованием штангенциркуля с точностью до 0,05 мм. Образец ступенчатой стальной трубы был покрыт слоем полистирола 8 мм и тонким слоем алюминиевой фольги.

Помимо глубины отверстий (20, 40 и 60 %) контролировалось рабочее напряжение (200, 230 и 260 кВ). Особенности схем МТР показаны в табл. 2.

В работе использовался источник рентгеновского излучения с размером фокусного пятна  $2,5 \times 2,5$  мм. РИО составляла 568,25 мм, а РОП — 31,75 мм (шаг  $D$  для стальной ступенчатой трубы с толщиной материала  $L_{max}$  32,74 мм); для такого РИО значение  $U_g$  на основе уравнения (3) было 0,20 мм. Это значение  $U_g$  приемлемо в соответствии с критериями оценки Раздела V ASME. Табл. 3 показывает ограничения на геометрической нерезкости в Разделе V ASME [14].

Таблица 2

Варьируемые параметры для каждой схемы МТР\*

| Глубина отверстия, % | Рабочее напряжение, кВ |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|----------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                      | 200                    |                   |                   | 230               |                   |                   | 260               |                   |                   |
| 20                   | FCS1 <sub>A</sub>      | FCS1 <sub>B</sub> | FCS1 <sub>C</sub> | FCS2 <sub>A</sub> | FCS2 <sub>B</sub> | FCS2 <sub>C</sub> | FCS3 <sub>A</sub> | FCS3 <sub>B</sub> | FCS3 <sub>C</sub> |
| 40                   | FCS4 <sub>A</sub>      | FCS4 <sub>B</sub> | FCS4 <sub>C</sub> | FCS5 <sub>A</sub> | FCS5 <sub>B</sub> | FCS5 <sub>C</sub> | FCS6 <sub>A</sub> | FCS6 <sub>B</sub> | FCS6 <sub>C</sub> |
| 60                   | FCS7 <sub>A</sub>      | FCS7 <sub>B</sub> | FCS7 <sub>C</sub> | FCS8 <sub>A</sub> | FCS8 <sub>B</sub> | FCS8 <sub>C</sub> | FCS9 <sub>A</sub> | FCS9 <sub>B</sub> | FCS9 <sub>C</sub> |

\*Буквы связаны с секциями ступенчатой стальной трубы, как показано на рис. 5.

Таблица 3

Ограничения на геометрическую нерезкость ( $U_g$ ) в Разделе V ASME

| Толщина материала $L_{max}$ , мм | Геометрическая нерезкость, макс $U_g$ , мм |
|----------------------------------|--------------------------------------------|
| < 50                             | 0,51                                       |
| 50—75                            | 0,76                                       |
| 75—100                           | 1,02                                       |
| > 100                            | 1,78                                       |

Следовательно, величина  $U_g$  для шага  $D$  была приемлемой ( $0,20 \text{ мм} < 0,51 \text{ мм}$ ). В этой работе только область шага  $D$  использовалась для оценки, поскольку эта область была перпендикулярна источнику рентгеновского излучения; это упростило расчет и измерение РИП, РОП и РИО. Экспериментальная установка для контроля образца ступенчатой стальной трубы показана на рис. 5.

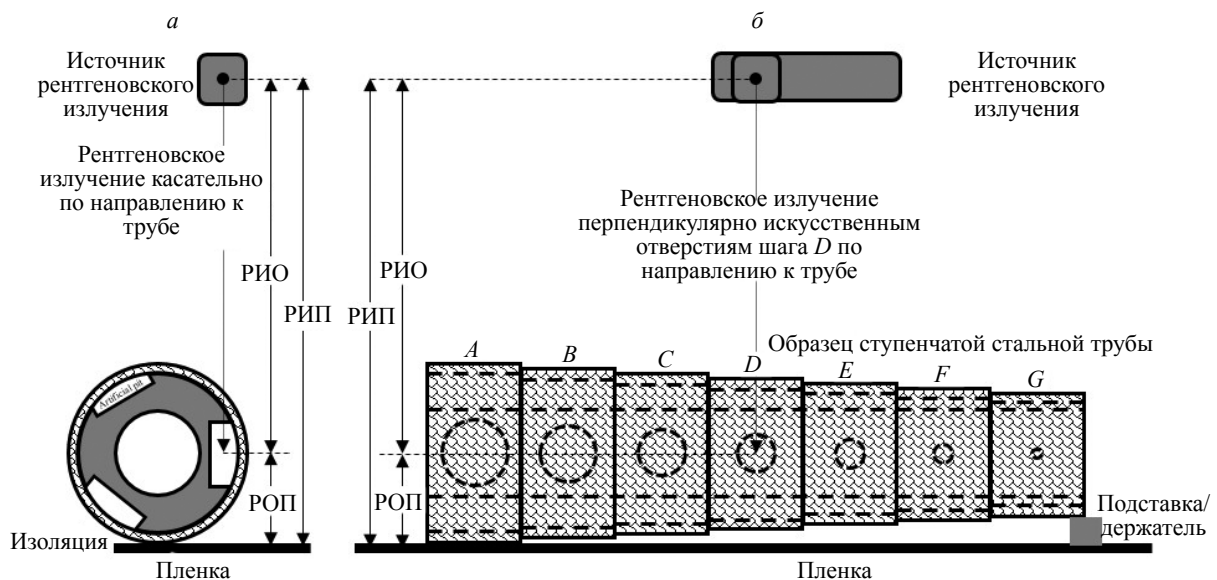


Рис. 5. Экспериментальная установка для контроля образца ступенчатой стальной трубы: вид слева (а) и фронтальный вид (б).

Контроль проводили с использованием среднечувствительной пленки AGFA Structurix D7 размером  $10,2 \times 25,4 \text{ мм}$  и свинцового экрана с обеих сторон пленки. Химическими агентами для обработки пленки были AGFA Structurix G 128 в качестве проявителя и AGFA Structurix G 328 в качестве закрепителя. Для расшифровки пленки использовалось оборудование, такое как денситометр, люксметр, негатоскоп и штангенциркуль.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Время экспозиции ( $E$ ) для шага  $D$  на основе уравнения (1) было рассчитано и составило 56, 31 и 20 с для рабочих напряжений 200, 230 и 260 кВ соответственно. Максимальная толщина стенки трубы в тангенциальном направлении пучка ( $L_{\max}$ ) была рассчитана по формуле (2) для каждого шага в образце (табл. 4).

Таблица 4

Максимальная толщина стенки трубы в тангенциальном направлении пучка ( $L_{\max}$ ) для каждого шага образца ступенчатой стальной трубы

| Шаг      | Максимальная толщина стенки трубы в тангенциальном направлении пучка $L_{\max}$ , мм |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>A</i> | 40,08                                                                                |
| <i>B</i> | 37,68                                                                                |
| <i>C</i> | 35,24                                                                                |
| <i>D</i> | 32,74                                                                                |
| <i>E</i> | 30,17                                                                                |
| <i>F</i> | 27,50                                                                                |
| <i>G</i> | 24,70                                                                                |

Измерения оптической плотности пленки сравнивались с допустимыми нормами раздела V ASME. Согласно этому стандарту, оптическая плотность пленки в интересующей области (шаг  $D$ ) должна составлять 1,8—4,0 для одной пленки [14].

Изоляция на ступенчатом образце стальной трубы оказала незначительное влияние на оптическую плотность и черноту пленки, и в результате изоляционный материал не был замечен на пленке (рис. 6). Это может указывать на плотность полистирола ( $\pm 1 \text{ г / см}^3$ ), который является таким же, как у воды, или указывать на большую оптическую плотность пленки, которая получается при большем значении интенсивности рентгеновского излучения, чем изоляционный материал способен поглотить.

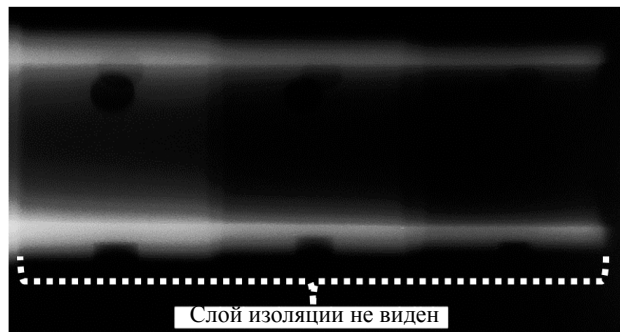


Рис. 6. Пленка изолированной ступенчатой стальной трубы, на которой слой изоляции не виден.

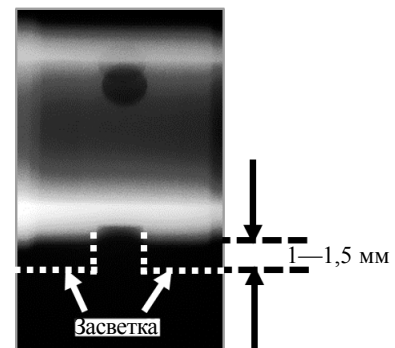


Рис. 7. Засветка края шага образца ступенчатой стальной трубы.

$L_{\max}$  измеряется вдоль касательной к трубе (см. рис. 4), и выбор источника и параметров МТР важны [3]. Более тонкие области (из-за засветки или коррозии) создают более темное изображение и наоборот. При этом размер засвеченного участка пленки составлял 1—1,5 мм, что было измерено штангенциркулем. Особенности засветки на ступенчатой кромке образца ступенчатой стальной трубы показаны на рис. 7.

Сравнение оптической плотности, измеренной с помощью денситометра ( $D$ ) и люксметра ( $D_{\text{lux}}$ ), показано на рис. 8.

$D_{\text{lux}}$  был получен с использованием уравнения (4), а оптическая плотность пленки как функция рабочего напряжения показана на рис. 8.  $D_{\text{lux}}$ , как правило, был выше, чем  $D$  для всех рабочих напряжений, так как площадь детектора на люксметре была больше, чем на денситометре, это

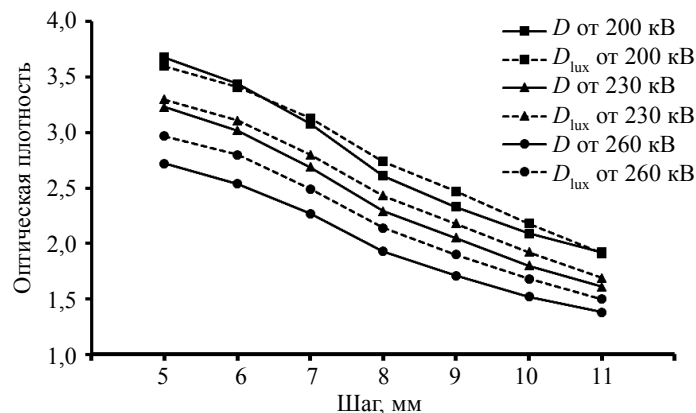


Рис. 8. Измерения оптической плотности пленки при использовании денситометра ( $D$ ), люксметра ( $D_{lux}$ ) как функция толщины шага трубы и напряжения.

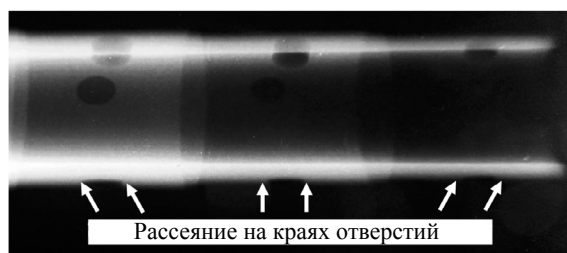


Рис. 9. Рассеяние на краях отверстий.

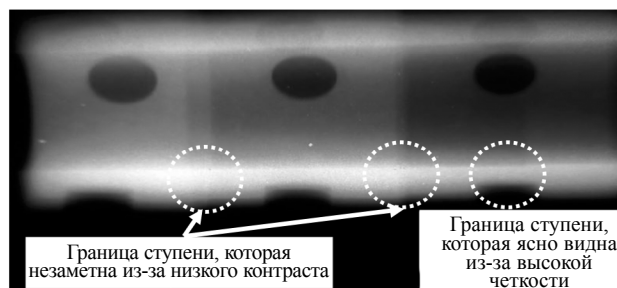


Рис. 10. Низкая контрастность и высокая четкость изображения в течение эксперимента РИП9.

означает, что он измерял интенсивность света снаружи от открытой области, и это снижало его точность по сравнению с  $D$ . Мы наблюдали пересечение между  $D$  и  $D_{lux}$  при 200 кВ, учитывая рассеяние/полутень в образце, что привело к ошибке при измерении оптической плотности.

Рассеяние происходило по краям шагов  $E$ ,  $F$  и  $G$  вследствие относительно небольшой тангенциальной толщины (7, 6 и 5 мм соответственно). Наиболее затруднительными измерения были при диаметре отверстия 20 % и при рабочем напряжении 200 кВ, поскольку рабочее напряжение приводило к рассеянию и уменьшению резкости изображения. Рассеяние по краям отверстий  $E$ ,  $F$  и  $G$  показано на рис. 9. Низкая контрастность и высокая четкость FCS9, для которой получен наилучший снимок, показаны на рис. 10.

Геометрические размеры точечной коррозии, в частности диаметр отверстий, увеличиваются при их расположении нестрого под средней точкой источника [2], следовательно, РИО от средней точки источника влияет на степень увеличения ( $M$ ) диаметра отверстия (рис. 11).

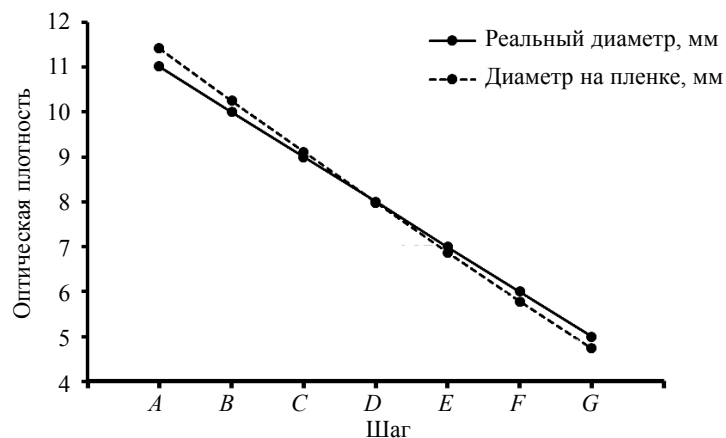


Рис. 11. Реальный диаметр отверстия и диаметр на пленке (изображения отверстия) как функция оптической плотности толщины шага трубы.



Таблица 5

 $M$  (μM) для всех глубин

| Номер<br>п/п | Шаг | Реальный диаметр, мм | М диаметра отверстия |       |       | μМ     |
|--------------|-----|----------------------|----------------------|-------|-------|--------|
|              |     |                      | Глубина отверстия, % |       |       |        |
|              |     |                      | 20                   | 40    | 60    |        |
| 1            | A   | 11                   | 1,035                | 1,037 | 1,041 | 1,0379 |
| 2            | B   | 10                   | 1,023                | 1,027 | 1,026 | 1,0254 |
| 3            | C   | 9                    | 1,011                | 1,014 | 1,012 | 1,0123 |
| 4            | D   | 8                    | 1,000                | 1,000 | 1,000 | 1,0000 |

Как показано на рис. 11, существует пересечение зависимостей между реальным диаметром и диаметром на пленке. Для шагов *A*, *B* и *C* диаметры были увеличены, но они уменьшились для шагов *E*, *F* и *G*, на которых произошло значительное рассеяние и вокруг отверстия образовалась полутень на пленке. Наиболее близкое совпадение было для шага *D* (то есть под средней точкой источника рентгеновского излучения), где диаметр отверстия на пленке составлял 7,99 мм, а реальный диаметр отверстия — 8 мм. Эти результаты показывают, что значение  $M$  (мкM) схемы МТР отражает относительное положение средней точки рентгеновского излучения (табл. 5).

Используя величину  $M$ , получено линейное уравнение с 4-мя переменными для определения реального диаметра отверстия:

$$d = (-0,00039a) + (0,03835b) + (0,00047c), \quad (5)$$

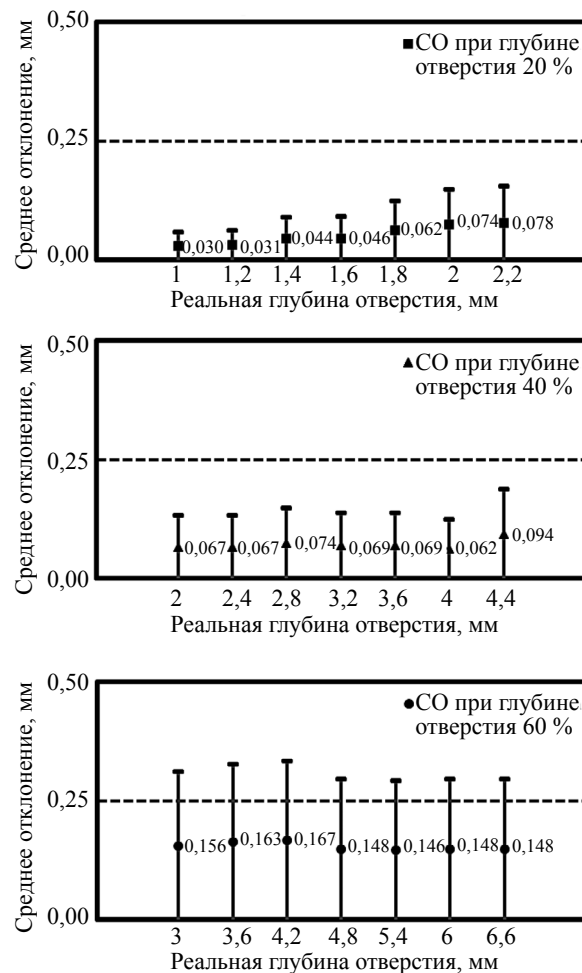


Рис. 12. Средние отклонения (CO) от фактической глубины отверстий в каждом эксперименте.

$$\text{реальный диаметр} = \frac{\text{диаметр на пленке}}{d}, \quad (6)$$

где  $a$  — РИО, мм;  $b$  — РОП, мм;  $c$  — расположение отверстия относительно средней точки источника рентгеновского излучения, мм;  $d$  — степень увеличения ( $M$ ).

Значения среднего отклонения от фактической глубины отверстий для глубин 20 и 40 % были одинаковыми и не достигли 0,25 мм; СО для глубины 20 % составлял  $\pm 0,029$ — $0,078$  мм, а для глубины 40 %:  $\pm 0,062$ — $0,093$  мм (см. рис. 12). Сами значения СО было немного выше для глубины отверстия 40 %, чем для глубины 20 % из-за контрастности и четкости пленки. Четкость пленки наблюдается при рассеянии при низкой интенсивности рентгеновского излучения. А СО для глубины 60 % составляло более  $\pm 0,25$  мм, и распределение данных показало более высокие значения СО.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптические плотности пленки, измеренные денситометром и люксметром, были одинаковыми, однако измерение с использованием люксметра, как правило, было менее точным при использовании образца ступенчатой стальной трубы. Результаты показывают, что все боковые края изображения образца непригодны для анализа (то есть плотность пленки выше 3,5). Степень увеличения варьировалась (1,0123, 1,0254 и 1,0379) как функция расстояния до средней точки рентгеновского излучения (30, 60 и 90 мм соответственно). Кроме того, было установлено, что РИП важен при расчете минимального значения  $U_g$ . Время экспозиции должно быть рассчитано для достижения плотности пленки от 1,8 до 4 для рентгенограмм, полученных с использованием источника рентгеновского излучения так, как указано в разделе V стандарта ASME. Результаты показывают, что высокое рабочее напряжение обеспечивает высокое разрешение пленки, но низкий контраст с незначительным рассеянием; противоположная ситуация имеет место для низкого рабочего напряжения. Измерения были наиболее затруднительными для диаметров отверстий 20 % и рабочего напряжения 200 кВ, так как низкое рабочее напряжение приводило к рассеянию и отсутствию резкости изображения. С уменьшением контраста становится трудно определить границу для каждой толщины шага из-за различий в их толщинах и оптических плотностях пленки. Поскольку четкость пленки противоположна контрасту пленки, относительно высокое рабочее напряжение создает пленку высокой четкости с низким рассеянием и четкими границами. На основании нашего анализа мы определили, что рабочее напряжение 260 кВ является наиболее подходящим, так как оно обеспечивает самое высокое разрешение пленки и относительно низкое рассеяние.

Авторы выражают благодарность кафедре материаловедения и металлургического машиностроения Технологического института Сепулх-Нопембера и PT Spektra Megah Semesta за предоставление лабораторного оборудования. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harara W. Pit-Depth Measurement on Large Diameter Pipes by Tangential Radiography Using a Co-60 Gamma-Ray Source // Russian Journal of Nondestructive Testing. Damascus. Syria. 2004. V. 40. No. 11. P. 782—788.
2. Edalati K., Rastkhah N., Kermani A., Seiedi M., Movafeghi A. The Use of Radiography for Thickness Measurement and Corrosion Monitoring in Pipes // International Journal of Pressure and Piping. Tehran. Iran. 2006. No. 83. P. 736—741.
3. Balasko M., Svab E., Kuba A., Kiss Z., Rodek L., Nagy A. Pipe Corrosion and Deposit Study using Neutron- and Gamma- Radiation Sources // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. Budapest. Hungary. 2005. No. 542. P. 302—308.
4. Boateng A., Danso K.A., Dagadu C.P.K. Non-Destructive Evaluation of Corrosion on Insulated Pipe using Tangential Radiographic Technique // International Journal of Scientific and Technology Research. University of Ghana-Legon. 2013. V. 2. Iss. 6. P. 7—13.
5. Zirnhelt J., Einav I., Infanzon S. Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits / An IAEA Co-ordinated Research Project. Proceedings of 3<sup>rd</sup> Pan American Conferences on Non Destructive Testing (PANNDT). Associacao Brasileira de Ensaio Nao Destrutivos (ABENDI). Rio de Janeiro. Brazil. 2003.
6. Zscherpel U., Ewert U., Infanzon S., Rastkhan N., Vaidya P.R., Ekinici S. Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits in Pipelines / Results of an IAEA Coordinated Research Programme. Proceedings of 9th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT). Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGfZP). Berlin. Germany. 2006. V. 11. No. 11. P. 1—14.

7. *Hamzah A.R., Amir S.M.M., Sayuti S., Rejab S.* Wall Thickness Measurement of Large Diameter Pipes by Radiography / 8 and 12 Inches. 12<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on NDT (A-PCNDT). Auckland. New Zealand. 2006.
  8. *Soedardjo.* Measurement of Insulated Pipe Thickness with Tangential Radiography Techniques Using Iridium 192, *Risalah Pertemuan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Teknologi Isotop dan Radiasi / Pusat Pengembangan Teknologi Keselamatan Nuklir, BATAN. Serpong. Indonesia. 2000. P. 229—235.*
  9. *Hamzah A.R., Amir S.M.M.* Revisited the Mathematical Derivation Wall Thickness Measurement of Pipe for Radiography / International Symposium on Digital Industrial Radiology (DIR) and Computed Tomography (CT). Lyon. France. 2007.
  10. *Rakvin M., Markucic D., Hizman B.* Evaluation of Pipe Wall Thickness Based on Contrast Measurement using Computed Radiography (CR) / 24<sup>th</sup> DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, *Procedia Engineering. Zagreb. Croatia. 2013. No. 69. P. 1216—1224.*
  11. *Rasiawan, Wahyudi M.T.* Making of X-ray Radiography Exposure Chart for Aluminum / *Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS-ITS). Surabaya. Indonesia.*
  12. *Hendroprasetyo W.* Radiographic Testing General, Training Handout / Radiography Testing Level II, NDE Center ITS. Surabaya. Indonesia. 2009.
  13. *Moore P.O., Bossi R.H., Iddings F.A., Wheeler G.C.* Nondestructive Testing Handbook / Radiographic Testing, American Society for Nondestructive Testing, Inc. Ohio. USA. 2002. V. 4. 3<sup>rd</sup> Edition.
  14. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Nondestructive Examination / American Society of Mechanical Engineers. New York. USA. 2010. Section V. Article 2.
-