

А. В. ВОРОБЕЙ

А. С. КИРИЕНКО

А. О. ЖУПИНА

А. Н. МИХАЧЁВ

ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ» - управляющая компания холдинга» (Минск, Беларусь)

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ВНУТРЕННИХ ОТЛОЖЕНИЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ РАДИОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аннотация. Отложения на внутренней поверхности теплообменных труб ухудшают эксплуатационные характеристики тепловых агрегатов. Контроль величины отложений – трудоёмкая задача, требующая демонтажа сомнительных участков для прямых измерений. Цель работы: анализ чувствительности и точности контроля толщины внутренних отложений радиографическим методом. Разработана математическая модель, с помощью которой установлены влияния диаметра и толщины стенки трубопровода, энергии ионизирующего излучения на точность измерений толщины отложений радиографическим методом. Получены первичные экспериментальные данные, согласующиеся с теоретическим анализом.

Ключевые слова: тангенциальный радиографический контроль, цифровая радиография, ионизирующее излучение (ИИ), профильное сечение трубы, уровень серого.

Радиографический контроль – метод, который позволяет не только контролировать сварные соединения и основной металл на сплошность, но и измерять остаточную толщину стенки трубопроводов и толщину отложений [1]. Метод можно применять без вывода трубопровода из эксплуатации и без снятия тепловой изоляции, если она присутствует. Метод предполагает профильное просвечивание стенки трубы (рис. 1) поэтому называется тангенциальным радиографическим контролем (RT-T). Контроль выполняют с помощью цифровой радиографии, что значительно расширяет динамический диапазон. На рисунке 1 представлена схема измерения толщины отложений радиографическим методом с указанием влияющих параметров.

Моделирование измерений

Измерение толщины стенки трубопроводов радиографическим методом основано на зависимости просвечиваемой толщины от диаметра и толщины стенки трубы. Законы изменения просвечиваемой толщины различаются в разных просвечиваемых частях трубопровода. Выделяются три области с одинаковым характером изменения просвечиваемой толщины: 1, 2 и 3 (рис. 1). Область 1 – прямая засветка детектора без прохождения ионизирующего излучения через контролируемый объект. Область 2 – ИИ по касательной проходит через стенку трубопровода. В этой области просвечиваемая толщина изменяется от нуля (на границе областей 1 и 2) до максимального значения (на границе областей 2 и 3). Область 3 – ИИ дважды проходит через стенку

трубопровода, просвечиваемая толщина уменьшается до значения соответствующее двум номинальным толщинам трубопровода. Различные законы изменения просвечиваемой толщины, в соответствующих областях, приводят к различному изменению интенсивности ИИ, которое регистрируется детектором. Информационным параметром изменения интенсивности поля, а следовательно, и просвечиваемой толщины, является уровень серого цифрового радиографического снимка. Идентификация областей, выполняемая по анализу изменения уровня серого на цифровом снимке, позволяет измерить толщину стенки трубопровода. В работе [2] отмечено влияние диаметра трубопровода D , толщины стенки трубопровода S , энергии ИИ и расстояния f на точность измерений толщины стенки трубопровода тангенциальным радиографическим методом.

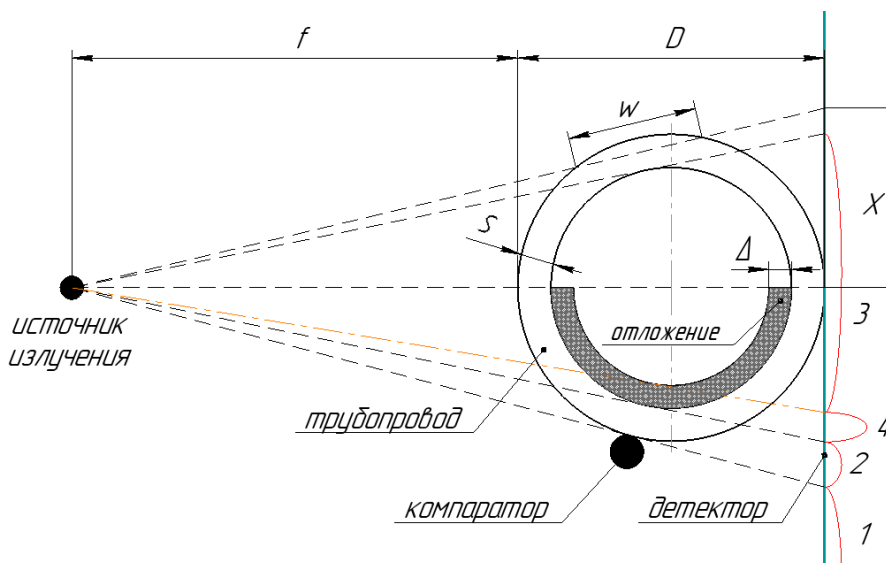


Рис. 1. Схема тангенциального радиографического контроля толщины стенки и отложений трубопровода: D , S – диаметр и толщина трубопровода соответственно; f – расстояние от источника излучения до трубопровода; Δ – толщина отложений; w – просвечиваемая толщина при координате смещения X

Наличие отложений внутри трубопровода приводит к изменению интенсивности прошедшего ИИ, что наблюдается по уровню серого цифрового снимка. Характер изменения интенсивности поля, вызываемого отложением, определяется внутренним диаметром трубы и толщиной отложений. Отложение можно рассматривать как «труба в трубе». В результате выделяется дополнительная область проекций – профильное сечение отложения 4 (рис.1). Идентификация границ областей 2 и 4 по уровню серого позволяет провести измерения толщины стенки трубы и толщины отложения соответственно. Существенные различия линейных коэффициентов затухания ИИ для материала трубы и отложений могут влиять на чувствительность метода.

При моделировании получена функциональная зависимость просвечиваемой толщины стенки трубы w_m и просвечиваемой толщины отложений w_d от влияющих параметров контроля. Функциональные зависимости выражаются через смещение x , отмечаемое на цифровом

радиографическом снимке, поскольку анализ изменения уровня серого проводится по этой координате:

$$w_m = f(D, s, f, x),$$

$$w_d = g(D, s, f, \Delta, x).$$

Далее проводился расчет уровня серого, исходя из особенностей цифровой радиографии: уровень серого GV цифрового радиографического снимка прямо пропорционален дозе ИИ [3]. Полученные зависимости нормализованы к максимальному значению уровня серого, наблюдаемого в области 1 – прямой засветки детектора:

$$GV = k \cdot I_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot w_m} \cdot e^{-\mu_d \cdot w_d},$$

где k – коэффициент пропорциональности; I_0 – интенсивность падающего ИИ; μ_m и μ_d – соответственно линейные коэффициенты ослабления ИИ металлом трубы и отложениями.

Анализ полученных зависимостей

На рисунке 2 показаны рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперёк оси трубопровода $\varnothing 57 \times 4,0$ мм: без отложений (кривая 1) и при наличии отложений толщиной 4,0 мм (кривая 2). Отмечены различные характерные области просвечивания (1, 2, 3 и 4), согласно рисунку 1.

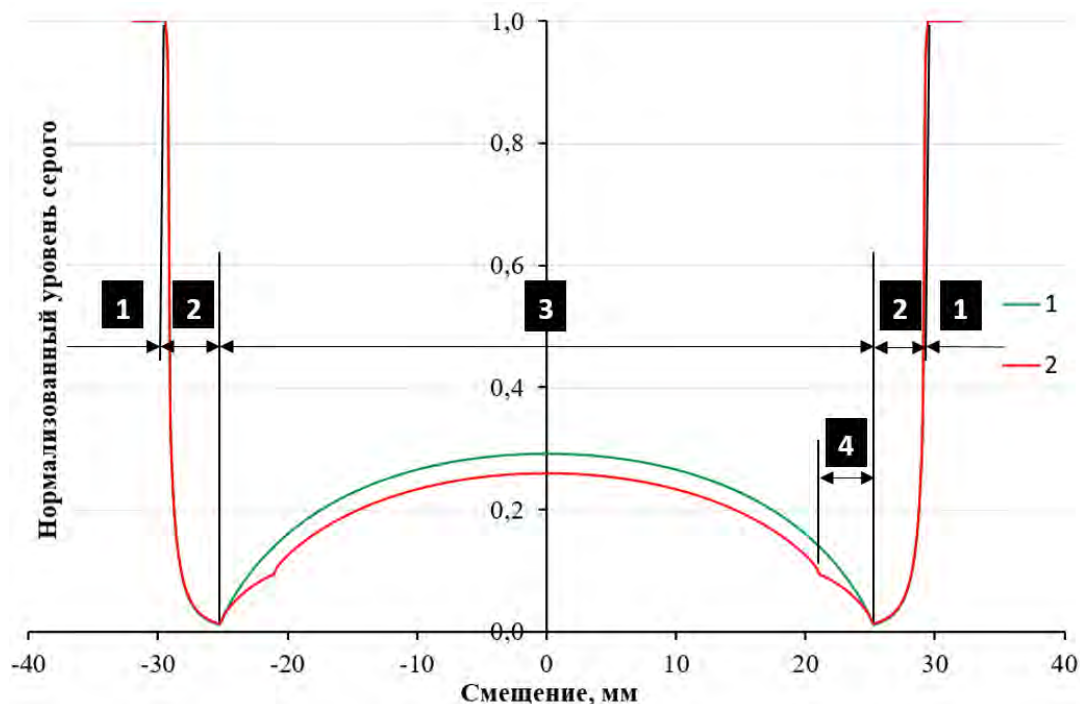


Рис. 2. Рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубы $\varnothing 57 \times 4,0$ мм при отсутствии отложений (кривая 1) и при наличии отложений толщиной 4,0 мм (кривая 2).

Согласно рисунку 2 внутренние отложения изменяют распределение уровня серого поперёк оси трубы. А в направлении, соответствующем максимальной просвечиваемой толщине отложений (то есть в профильном

сечении), они максимально ослабляют интенсивность ИИ, что вызывает локальный минимум уровня серого (рис.2). Этот локальный минимум позволяет идентифицировать границы областей 4 и 3, т.е. измерить толщину отложений. Чем больше глубина локального провала уровня серого из-за отложений, тем точнее определяется граница области и тем точнее выполняется измерение. На рисунке 3 представлены рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубопровода $\varnothing 57 \times 4,0$ мм при различной толщине отложений (кривые 1-5). Кривые приведены в области локальных минимумов уровня серого, что соответствует границам стенки трубы и отложений в профильном сечении.

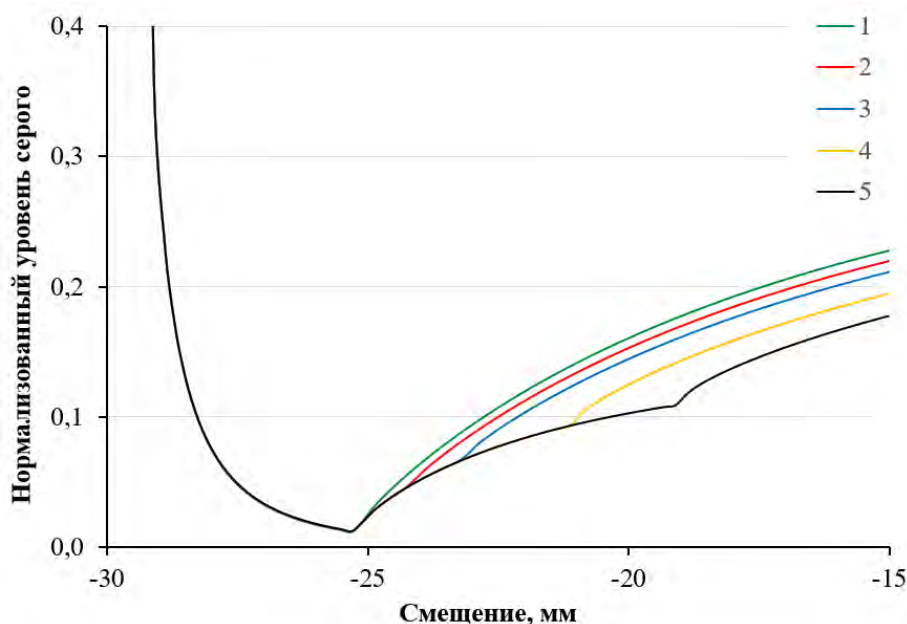


Рис.3. Рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубы $\varnothing 57 \times 4,0$ мм при различной толщине отложений: отложения отсутствуют (1); толщина отложений 1,0 мм (2), 2,0 мм (3), 4,0 мм (4), 6,0 мм (5).

Согласно рисунку 3, при прочих равных условиях увеличение толщины отложений вызывает более глубокий локальный провал уровня серого, что повышает точность его оценки. Небольшие отложения могут не обнаруживаться, поскольку вызываемый ими локальный минимум оказывается сравним с уровнем шумов. Диаметр и толщина трубопровода влияют на выявляемость и точность измерения толщины отложений. Характер этого влияния аналогичен влиянию на точность измерения толщины стенки трубопровода и определяется вызываемой ими кривизной наружной и внутренней поверхностей трубы, а также возможностью компенсировать уменьшение интенсивности ИИ при увеличении просвечиваемой толщины [2]. При увеличении диаметра трубопровода при неизменной толщине стенки трубы и отложений глубина локального минимума уровня серого уменьшается, что ухудшает выявляемость и точность измерений отложений. Однако при компенсации уменьшения интенсивности ИИ, вызванного увеличением просвечиваемой толщины металла, влияние увеличения диаметра на

выявляемость и измерение отложений практически сводится к нулю. Компенсация ограничена условиями недопустимости перенасыщения уровня серого цифрового снимка [1], что проявляется в области прямой засветки (область 1 на рис.1).

Увеличении толщины трубопровода при неизменном диаметре и величине отложений также приводит к ухудшению выявляемости и точности измерений отложений. Компенсация уменьшения интенсивности ИИ, вызванного увеличением просвечиваемой толщины, может повышать чувствительность контроля и точности измерений, но и здесь она ограничена техническими возможностями применяемой цифровой детекторной системы и условиями контроля.

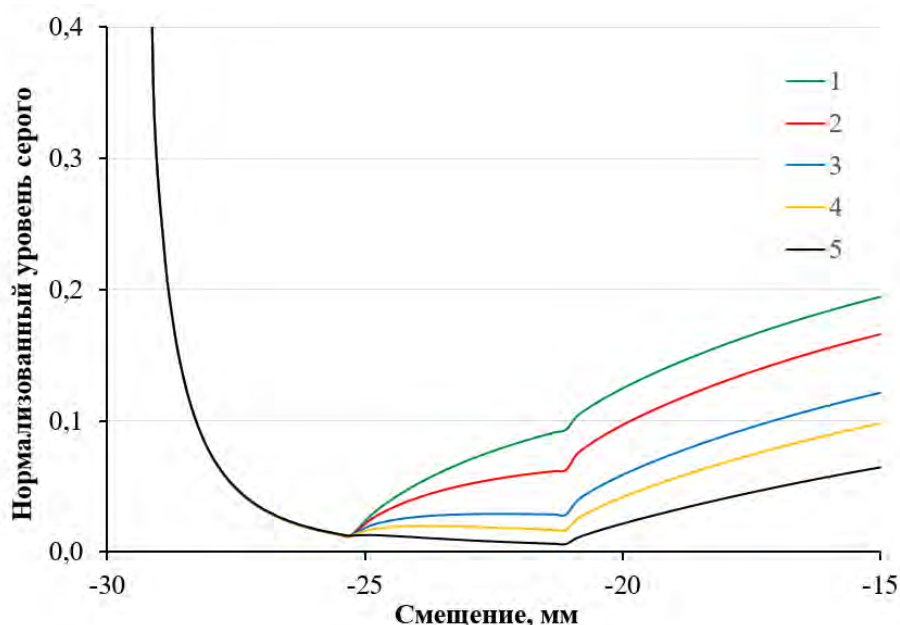


Рис.4. Рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубы $\varnothing 57 \times 4,0$ мм при толщине отложений 4,0 мм: коэффициент линейного ослабления отложениями 0,015 мм⁻¹ (1), 0,03 мм⁻¹ (2), 0,06 мм⁻¹ (3), 0,08 мм⁻¹ (4), 0,12 мм⁻¹ (5).

На рисунке 4 представлены рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубопровода $\varnothing 57 \times 4,0$ мм при различном коэффициенте линейного ослабления ИИ материалом отложений при толщине последних 4,0 мм. Линейный коэффициент ослабления изменялся от 0,015 мм⁻¹ (кривая 1), до 0,12 мм⁻¹ (кривая 5). Линейный коэффициент ослабления металла оставался постоянным – 0,1539 мм⁻¹.

Коэффициент линейного ослабления ИИ определяется составом отложений и энергией ионизирующего излучения. При изменении энергии – меняется линейный коэффициент ослабления ИИ для металла и отложений. Зависимости, приведенные на рисунке 4, рассчитаны при постоянном линейном коэффициенте ослабления металла и при варьирующем коэффициенте ослабления отложений. Согласно рисунку 4, чем сильнее отложения ослабляют ИИ, тем хуже они выявляются и измеряются. Так как хуже идентифицируется граница областей 2 и 4 (рис.1). Чем ближе коэффициенты ослабления отложения и металла, тем менее различимы изменения уровня серого областей

2 и 4. При равенстве коэффициентов эти области можно рассматривать как одну – сплошной металл: граница областей 2 и 4 не идентифицируется.

Практические исследования

На рисунке 5 представлены результаты измерений толщины отложений в тепловых трубах котла Ø57×4,0.

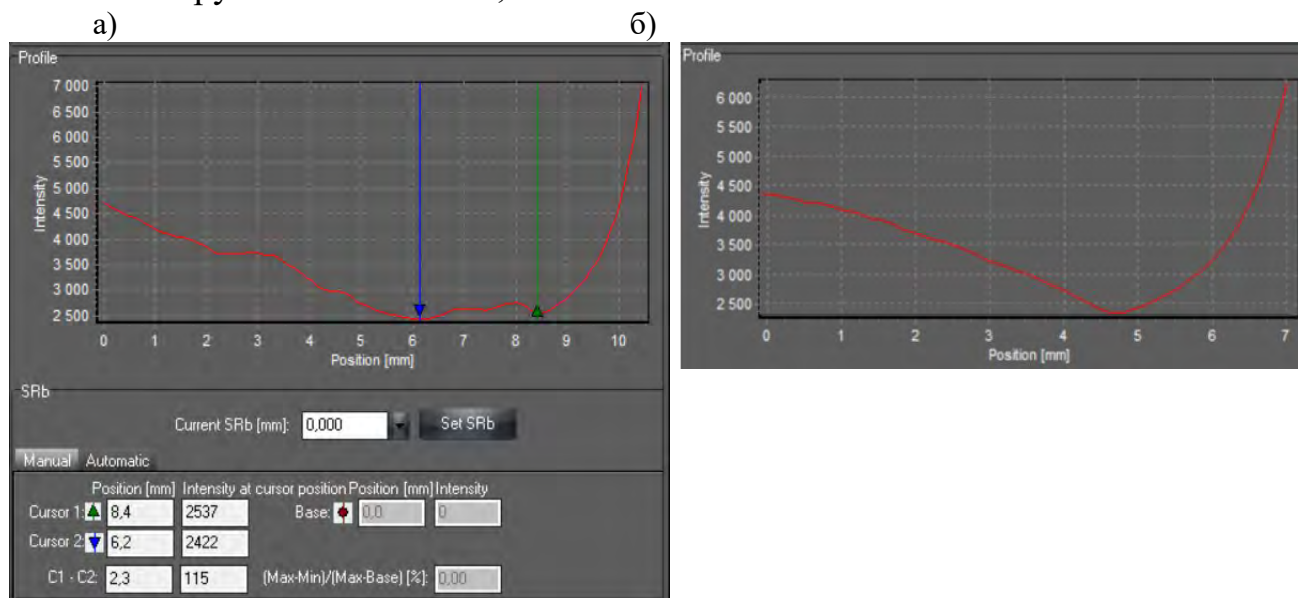


Рис.5. Практические результаты измерения толщины отложений в трубе Ø57×4,0 при наличии отложений (а), изменение уровня серого в профильном сечении трубы при отсутствии отложений (б).

На рисунке 5б показано изменение уровня серого поперек оси трубы при отсутствии внутренних отложений. На рисунке 5а выполнено измерение толщины отложений в профильном сечении. Результат измерений – 2,3 мм.

Список литературы

- [1] ISO 20769-1:2018 Non-destructive testing – Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays – Part 1: Tangential radiographic inspection.
- [2] Воробей А.В., Жупина А.О., Михачёв А.О. Моделирование измерения толщины стенки трубопроводов радиографическим методом для анализа влияния параметров контроля на точность измерений // Тез. докл. «Неразрушающий контроль 21 века: синергия технологий и разума». Москва, 2026. С. 193-197.
- [3] ГОСТ ISO 17636-2-2017 Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 2. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов.

Контакты:

vorobey@belgazstroy.by (Воробей Алексей Васильевич);
kirienko@belgazstroy.by (Кириенко Александр Сергеевич);
zhupina@belgazstroy.by (Жупина Артём Олегович);
mihachev@belgazstroy.by (Михачёв Артём Олегович).