ТАНГЕНЦИАЛЬНАЯ РАДИОГРАФИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ КОРРОЗИИ И ЭРОЗИИ ТРУБ: ПРОБЛЕМАТИКА, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И НОРМАТИВНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Краткий обзор для промышленной дефектоскопии

ИСМАГИЛОВ
Марсель Мунирович
Главный научный сотрудник
ООО «Новотекс системс», Москва

ХАЙРУЛЛИН
Артур Айдарович
Главный научный сотрудник
ООО «Новотекс системс», Москва

КОСТАНЯНЦ
Вячеслав Альбертович
Технический специалист
ООО «Новотекс системс», Москва

Тангенциальная радиография — один из немногих методов неразрушающего контроля, который позволяет видеть потери металла в трубах и сосудах без полного демонтажа теплоизоляции. Для нефтегазовых, нефтехимических и энергетических объектов это особенно важно при контроле коррозии под изоляцией (CUI), наружной и внутренней эрозии, а также локальных зон отложений. Практическая ценность метода заключается в том, что он дает не только факт наличия повреждения, но и изображение профиля стенки в касательной зоне, что помогает уточнять остаточную толщину и планировать ремонт. Кратко рассмотрены проблематика и значение метода, его историческое развитие от профильной радиографии 1970-х гг. до современной цифровой практики, области применения на объектах крупных операторов, а также нормативная траектория от EN 16407 к серии ISO 20769–1 и ISO 20769–2.

Проблематика и практическая важность

Коррозия и эрозия трубопроводов остаются важными причинами снижения надежности промышленных активов. Обзор AMPP/NACE оценивает глобальные прямые издержки, связанные с коррозией, примерно в 2,5 трлн дол. США, т.е. около 3,4% мирового ВВП [2]. При этом в нефтегазе экономический ущерб усиливается за счет простоев, риска утечек, аварийности и вторичных потерь производства. Обзор по Conversational User Interface (CUI) подчеркивает, что именно для изолированных трубопроводов и аппаратов задача прямой визуализации дефекта особенно трудна: металл деградирует скрыто, а вскрытие изоляции дорого, трудоемко и само по себе может ухудшить состояние покрытия и оболочки [1].

Тангенциальная радиография решает эту задачу адресно. Излучение направляется так, чтобы луч проходил касательно к стенке трубы; на изображении формируется читаемый контур наружной и внутренней поверхностей в зоне касания. Это делает метод полезным там, где нужно быстро подтвердить наличие потери металла, различить внутренний и наружный характер стеночного утонения либо уточнить остаточную толщину в конкретной зоне риска. Метод выигрывает тогда, когда вскрытие изоляции нежелательно, но нужна визуальная картина участка. По сравнению с полным снятием изоляции он существенно снижает объем сопутствующих работ, особенно на эстакадах, на горячих линиях и во время коротких остановочных кампаний [5, 6].

При этом метод не является универсальной заменой ультразвуку и внутритрубной диагностике. Его сильная сторона – локальная, хорошо обоснованная проверка участков с подозрением на потерю металла. К ограничениям относятся требования радиационной безопасности, необходимость квалифицированного выбора геометрии и чувствительность к форме дефекта: например, мелкая внешняя коррозия и сложный рельеф поверхности могут затруднить корректное измерение [1, 5, 8]. Поэтому в современной практике тангенциальную радиографию следует рассматривать как элемент комплексной программы целостности оборудования, а не как «самодостаточную» технологию для всех сценариев.

Историческая справка: от профильной радиографии к цифровой норме

Истоки метода уходят в классическую профильную радиографию. Уже в 1972 г. в журнале Non-Destructive Testing (No. 5, Is. 4) была опубликована статья W. C. Callister “Profile radiography by gamma rays”, где метод описывался как инструмент для контроля трубопроводов, трубных систем и химических установок с возможностью выявления коррозии, эрозии и отложений [3]. Именно эта логика – визуализация профиля стенки и скрытого уменьшения толщины – сформировала дальнейшее развитие.

В 1990-е гг. отраслевой опыт стал смещаться от «ремесленного» применения к более воспроизводимым процедурам. Публикации Inspectioneering показывали, как за счет правильной геометрии съемки, калибровочных элементов и единых процедур повышается точность измерения остаточной толщины на радиограммах [4]. Следующий важный шаг был сделан на международном уровне: IAEA в 2005 г. выпустило TECDOC-1445, посвященный разработке протоколов радиографической оценки коррозии и отложений в трубах [5]. Тем самым тангенциальная радиография закрепилась как практический прием.

Цифровая эпоха придала методу новый импульс. Переход от пленки к компьютерной цифровой радиографии (КР) и цифровым детекторным матрицам (ЦР) упростил архивацию, обработку изображений, прослеживаемость результатов и экспертную оценку. Работа 2006 г. [6] показала, что тангенциальная радиография и радиография методом просвечивания через две стенки с двойным изображением позволяют уверенно выявлять потери толщины и отличать внутреннюю коррозию от наружной без снятия изоляции [6]. Позднее нормативная база была формализована в европейской серии EN 16407–1/-2:2014, а затем перенесена на международный уровень как ISO 20769–1/-2:2018 [7–9]. По данным каталога ISO, обе части были пересмотрены и подтверждены в 2024 г. как действующие, а в 2026 г. находятся на стадии пересмотра в виде проектов DIS Edition 2 [10, 11].

Где метод применяют и почему им интересуются крупные нефтегазовые операторы

Наибольший практический смысл тангенциальная радиография имеет на объектах с большой протяженностью изолированных труб и высокой стоимостью доступа к металлу: на нефтеперерабатывающих и газоперерабатывающих заводах, нефтехимических комплексах, СПГ-площадках, терминалах и технологических трубопроводах резервуарных парков. В этих условиях заказчика интересует конкретный результат: нужно ли вскрывать участок, менять линию или снижать нагрузку. Тангенциальная радиография особенно полезна, когда требуется быстро локализовать зону максимального утонения, проверить гипотезу по CUI после термографии или PEC, подтвердить эрозию и коррозию на отводах и в местах турбулентности, а также оценить участки, где ультразвук затруднен из-за горячей поверхности, кожуха или сложного доступа [1, 5, 8].

В открытом доступе не всегда публикуются корпоративные процедуры и детальные программы неразрушающего контроля (НК), поэтому о практическом использовании чаще судят по косвенным, но показательным источникам: отраслевым обзорам, публикациям научно-технических подразделений, сайтам подрядчиков НК и внедрению технологий контроля коррозии. Так, участие Woodside Energy и специалистов Saudi Aramco в обзорной литературе по контролю коррозии показывает, что для крупных организаций тема скрытой коррозии находится в центре внимания [1]. Допол-

нительно Saudi Aramco публично сообщала о внедрении специализированных решений по контролю коррозии на действующем СПГ-объекте, что подтверждает высокий приоритет проблемы коррозии под изоляцией [13].

Прямые упоминания тангенциальной профильной радиографии в публичном поле обычно встречаются у подрядчиков инспекционных работ. Например, A-Star Testing указывает профильную радиографию для CUI-проектов на объектах Shell Eastern Petroleum (Bukom Terminal) и ExxonMobil [12]. Такого рода ссылки не стоит трактовать как доказательство, что метод является основным методом всей кампании, однако они вполне пригодны как практические референсы: видно, что крупные операторы и их подрядчики используют радиографические методы там, где нужно быстро и без масштабного вскрытия изоляции принять решение о состоянии трубопровода (см. таблицу).

Кому технология была бы особенно интересна

Прежде всего технология интересна владельцам и эксплуатантам крупных промышленных активов: нефтеперерабатывающим и газоперерабатывающим заводам, нефтехимии, СПГ-комплексам, терминалам и операторам трубопроводной инфраструктуры. Для них это способ сократить объем вскрытия изоляции и повысить адресность ремонтных решений. Во-вторых, технология представляет прямой интерес для служб механической целостности, коррозионных инженеров и руководителей инспекций: тангенциальная радиография помогает связать данные риска с конкретным визуализированным дефектом. В-третьих, это рабочий инструмент для центров НК и подрядчиков, которые выполняют проверку в процессе эксплуатации на действующих установках и должны выдавать быстрое, понятное заказчику заключение. Наконец, технология интересна разработчикам цифровой радиографии и систем автоматизированной интерпретации изображений, поскольку именно цифровой формат открывает путь к сопоставлению исторических снимков, полуавтоматическому размерению и включению данных радиографии в общую цифровую модель актива.

Нормативная перспектива

> ***Примечание.*** *В ряде русскоязычных материалов встречается обозначение ISO 20679 или ГОСТ ИСО 20679. По открытым каталожным данным, ISO – корректное обозначение действующей и пересматриваемой серии – ISO 20769–1 и ISO 20769–2 [8–11].*

Для редакторской правки это ключевой момент. Серия ISO 20769 посвящена радиографическому контролю коррозии и отложений в трубах рентгеновскими и гамма-лучами. Часть 1 описывает именно тангенциальную радиографию; часть 2 – радиографию методом просвечивания через две стенки с двойным изображением, включая DWSI и DWDI [8, 9]. Иными словами, если в статье нужно упомянуть готовящийся ГОСТ ИСО, то логично и технически корректно связывать его именно с серией 20769, а не с 20679. Это не мелкая типографическая правка, а устранение ошибки в обозначении базового международного документа.

Публичные ориентиры интереса крупных операторов к тематике CUI и радиографического контроля

Оператор / сегмент	Почему метод релевантен	Публичный ориентир
Saudi Aramco	Большой парк горячих и изолированных трубопроводов, где CUI и потери металла прямо влияют на надежность НПЗ, СПГ- и трубопроводных активов	Публикации и проекты по CUI-мониторингу показывают высокий приоритет темы [1, 13]
Woodside Energy	СПГ- и офшорная инфраструктура делает особенно ценными методы, позволяющие уменьшать объем вскрытия изоляции и работать по приоритетным зонам риска	Участие компании в обзорной литературе по CUI [1]
Shell Eastern Petroleum, Bukom	Нефтепереработка и терминальные объекты содержат большой объем изолированных линий малого и среднего диаметра, где тангенциальная/профильная радиография применима как локальный метод уточнения	Подрядчики инспекции публично указывают профильную радиографию на объекте Bukom [12]
ExxonMobil	Для крупных НПЗ и нефтехимических площадок метод интересен как инструмент для подтверждения остаточной толщины без тотального снятия изоляции	Публичные трек-рекорды подрядчиков содержат упоминание работ по профильной радиографии [12]

По данным каталога ISO, издания 2018 г. по обеим частям остаются актуальными, в 2024 г. был проведен их анализ, и ожидается замена на DIS-версии 2026 г. [10, 11]. Поэтому корректная формулировка для статьи может звучать так: в международной системе уже действует серия ISO 20769–1/-2, а обе части находятся в стадии пересмотра; при гармонизации российской нормативной базы именно эта серия должна рассматриваться как основной источник требований к тангенциальной и двухстеночной радиографии при контроле коррозии и эрозии труб. Такая редакция одновременно решает две задачи: показывает читателю, что метод описан в международном стандарте, и не делает неподтвержденного заявления о якобы уже выпущенном национальном ГОСТе.

Для практиков наличие гармонизированного ГОСТ ИСО было бы важно по трем причинам. Во-первых, унифицировалась бы терминология: тангенциальная радиография, радиография методом просвечивания через две стенки с двойным изображением, DWSI/DWDI и требования к цифровой радиографии. Во-вторых, стало бы проще формализовать процедуры выбора источника, геометрии съемки, чувствительности и размерной калибровки. В-третьих, у заказчиков и подрядчиков появился бы единый язык для приемки результатов, квалификации персонала и составления отчетов. Именно поэтому ссылка на серию ISO 20769 – это не просто «красивая международная отсылка», а признак зрелой и воспроизводимой методики.

Заключение

Тангенциальная радиография занимает важное место в контроле коррозии и эрозии трубопроводов, там, где нужно получить доказательное изображение утонения стенки без вскрытия изоляции. Исторически метод вырос из профильной радиографии, затем получил международную методическую и нормативную опору, а в цифровую эпоху стал значительно удобнее для документирования и повторной экспертной оценки. Для крупных нефтегазовых операторов его ценность определяется не абстрактной новизной, а вполне прикладными эффектами: меньшим объемом вскрытия, лучшей адресностью ремонта и более обоснованным управлением риском.

Библиографический список

1. **Cao Q., Pojtanabuntoeng T., Esmaily M., et al.** A review of corrosion under insulation: a critical issue in the oil and gas industry // Metals. 2022. Vol. 12, No. 4. Article 561. DOI: 10.3390/met12040561
2. **NACE International** / AMPP. IMPACT study: International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies. 2016. Официальный портал проекта IMPACT.
3. **Callister W. C.** Profile radiography by gamma rays // Non-Destructive Testing. 1972. Vol. 5, No. 4. P. 214–219. DOI: 10.1016/0029-1021(72)90083-7
4. **Reynolds J.** Piping Inspection Thickness and Corrosion Monitoring With Profile Radiography // Inspectioneering Journal. 1997. September/October.
5. **International Atomic** Energy Agency. Development of Protocols for Corrosion and Deposits Evaluation in Pipes by Radiography. IAEA-TECDOC-1445. Vienna, 2005.
6. **Edalati K., Rastkhah N., Kermani A., et al.** The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2006. Vol. 83, No. 10. P. 736–741. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2006.07.010
7. **EN 16407–1:2014.** Non-destructive testing – Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays – Part 1: Tangential radiographic inspection. Brussels: CEN, 2014. 8 p
8. **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. Brussels: CEN, 2018. 37 p.
9. **ISO 20769–2:2018.** Non-destructive testing – Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays – Part 2: Double wall radiographic inspection. Geneva, 2018. 11 p.
10. **ISO/DIS 20769–1.** Non-destructive testing – Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays – Part 1: Tangential radiographic inspection. Draft International Standard, 2026. 35 p.
11. **ISO/DIS 20769–2.** Non-destructive testing – Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays – Part 2: Double wall radiographic inspection. Draft International Standard, 2026. 30 p.
12. **A-Star Testing** & Inspection. In-Service Inspection: CUI, Open Vision and Profile Radiography. Публичная страница с примерами работ на объектах Shell Eastern Petroleum (Bukom Terminal) и ExxonMobil. (Дата обращения: 24.03.2026).
13. **Oil & Gas Middle East.** Aramco implements leading corrosion monitoring technology at Ju'aymah NGL Fractionation Plant. 2024.