

УДК 778.33

СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ



А.Ф. Бархатов
инженер 1-й категории отдела математического моделирования ОАО «Гипротрубопровод», г. Москва, аспирант Томского политехнического университета, г. Томск
BarkhatovAF@gtp.transneft.ru

Ключевые слова: сварной шов, мобильная система цифровой радиографии, производительность контроля.

Определены технические достоинства и недостатки основных радиографических методов контроля качества монтажных сварных швов магистральных нефтепроводов. Оценены перспективы развития методов цифровой радиографии с различными видами детекторов как альтернативы пленочным технологиям и «фосфорным» запоминающим пластинам.

В трубопроводном транспорте (ТТ) нефти и нефтепродуктов для контроля качества монтажных сварных швов (СШ) при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте магистральных нефтепроводов (МН) применяют целую совокупность взаимно дополняющих друг друга методов неразрушающего контроля (НК): визуальный и измерительный контроль (ВИК), радиографический контроль (РК) и ультразвуковой контроль (УК). Основными физическими методами контроля качества монтажных СШ МН являются ВИК, РК и УК [1].

Контроль качества СШ МН разделяют на технологический и приемосдаточный. При технологическом контроле осуществляется оперативный контроль над сварочным процессом в режиме реального времени с помощью ВИК и УК. Приемосдаточный

контроль СШ МН проводят после окончательной термообработки сварного соединения, если таковая предусмотрена технологическим процессом [2]. При приемосдаточном контроле применяется ВИК, УК и РК.

Современные автоматизированные ультразвуковые комплексы (АУК) позволяют контролировать до 90 стыков труб Ø1220 мм в смену.

Применяемые на сегодняшний день в ТТ методы РК с использованием пленочной технологии и «фосфорных» пластин не обеспечивают столь же высокие темпы НК СШ, как АУК. Так, существующие технологии РК не обеспечивают оперативной связи со сварщиком, на расшифровку результатов затрачивается много времени. Из-за большого количества расходных материалов (пленка, проявитель, фиксаж), трудоемкости при расшифровке

результатов РК метод РК является одной из самых затратных статей расходов при строительстве линейной части МН (от 2 до 4 % от сметной стоимости СМР МН ОАО «АК «Транснефть»).

В практике РК СШ МН на сегодняшний день существуют две схемы просвечивания СШ: панорамная (рис. 1) и фронтальная (рис. 2).

При панорамной схеме для просвечивания используют самоходные внутритрубные кроулеры, которые устанавливают внутрь МН и перемещают от стыка к стыку, доставляя смонтированный на его базе рентгеновский аппарат и производя экспозицию. При такой схеме просвечивания СШ обеспечивается более высокая производительность РК по сравнению с фронтальной схемой просвечивания. Однако при использовании кроулеров предъявляются высокие требования к внутренней поверхности МН (отсутствие препятствий, посторонних предметов, воды или наледи и т.д.). Кроулеры применяются для контроля участков МН ограниченной длины из-за ограниченной емкости

Рис. 1

Схема панорамного просвечивания изнутри трубы за одну установку источника излучения [1]

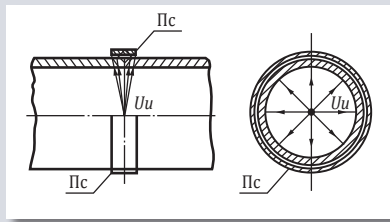


Рис. 2

Схема фронтального просвечивания через две стенки [1]

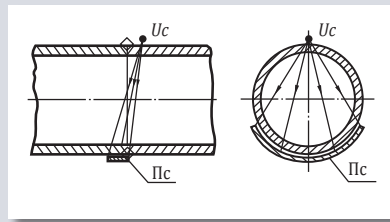
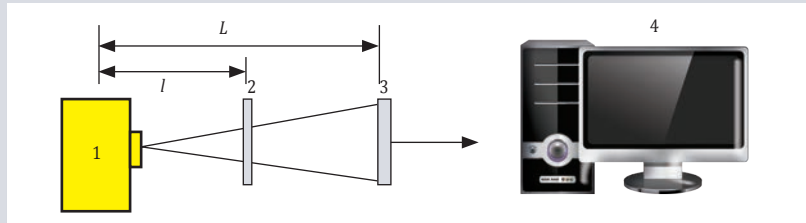


Рис. 3

Схема контроля сварных соединений методом цифровой радиографии с использованием детекторов: 1 – источник излучения; 2 – объект контроля; 3 – детектор; 4 – система визуализации



аккумуляторных батарей и невозможности их передвижения на участках трубопровода, проложенных под углом к горизонту, превышающим 20–30°.

Фронтальная схема просвечивания СШ применяется для тех стыков, доступ изнутри трубы к которым невозможен (СШ, выполняемые при ликвидации технологических разрывов МН). Данная схема просвечивания через две стенки МН выполняется за три и более установки источника ионизирующего излучения (ИИ), что увеличивает время проведения контроля и требований к контролю такого рода сварных соединений.

В российском нефтепроводном транспорте в качестве детекторов при РК применяют рентгеновскую пленку или «фосфорные» запоминающие пластины. Следует отметить, что РК с использованием многоразовых «фосфорных» запоминающих пластин относится к методам цифровой радиографии (ЦР) [1]. Это связано с тем, что пластины после каждой экспозиции оцифровываются.

К недостаткам РК при использовании радиографической пленки можно отнести:

- необходимость наличия помещений с неактивным светом

для проведения операций по фотохимической обработке пленки и операций по зарядке кассет;

- необходимость хранения пленки в твердой копии в специальных помещениях;

- высокую стоимость РК на пленку: в соответствии с [3], [4] 80 % затрат на РК связаны с рабочим временем персонала и расходными материалами (пленка, проявитель, фиксаж);

- необходимость утилизации химических реактивов;

- малую оперативность контроля (продолжительное время между проведением контроля и получением его результатов).

Недостатки «фосфорных» запоминающих пластин:

- высокие требования к условиям эксплуатации «фосфорных» пластин (зарядку кассеты в пластину необходимо проводить в хлопчатобумажных перчатках, разрядка кассеты и сканирование пластины должны проводиться в затемненном помещении [1]);

- необходимость оцифровки «фосфорных» пластин после каждой экспозиции;

- высокая стоимость «фосфорных» запоминающих пластин и оборудования для их оцифровки;

- в полевых условиях из-за высокой чувствительности к механическим повреждениям пластин

тины, как правило, не вырабатывают заявленный ресурс, что существенно увеличивает стоимостные показатели контроля.

Путем решения проблемы повышения производительности НК СШ МН является применение методов ЦР с использованием различных типов детекторов, которые в режиме реального времени позволяют проводить контроль СШ. В последнее время в некоторых отраслях, например медицинской, аэрокосмической, автомобильной и т.д., методы ЦР находят все большее применение. Эта тенденция связана с тем, что ЦР с использованием различных типов детекторов имеет ряд преимуществ (производительность, снижение затрат на расходные материалы, широкий динамический диапазон и т.д.) перед пленочными технологиями и «фосфорными» запоминающими пластинами. Применение методов ЦР в нефтепроводном транспорте сдерживается отсутствием подготовленного персонала и соответствующих комплексов для контроля качества СШ МН. Также отсутствует нормативная база, которая предъявляет требования к оборудованию и результатам радиационного контроля СШ с применением цифровых носителей. Так, например, некорректно оценивать качество получаемых цифровых радиографических изображений СШ только на соответствие требованиям ГОСТ 7512 (оптическая плотность самого светлого участка; разность оптических плотностей между значением на эталоне чувствительности и значением, получаемым в месте его установки, на основном металле, геометрическая нерезкость и т.п.).

Система (программно-аппаратный комплекс) ЦР позволяет преобразовывать рентгеновское излучение в изображение СШ на экране монитора в режиме реального времени, что существенно повышает производительность и оперативность РК. Принцип действия основан на преобразовании ИИ, прошедшего через контролируемый СШ детектором ИИ, последующей цифровой обработке и отображении на экране монитора СШ МН (рис. 3). В качестве источника ИИ при ЦР

могут применяться радиоактивные изотопы, рентгеновские аппараты постоянного потенциала, частотно-импульсные моноблочные аппараты, детектором же может выступать линейка фотодиодов, совмещенная с линейкой сцинтилляторов, ПЗС-камера или более совершенные плоскопанельные детекторы.

Следует отметить, что основные технические характеристики программно-аппаратных комплексов ЦР определяет детектор:

- размер рабочего поля;
- контрастная чувствительность (определяет видимость локальных перепадов оптической плотности);
- пространственное разрешение (способность давать раздельные изображения двух близких друг к другу линий);
- чувствительность (способность выявлять минимально возможные дефекты);
- динамический диапазон (диапазон интенсивностей между самой темной и самой светлой точкой изображения).

Аналогичные технические характеристики можно выделить для систем с пленочной технологией.

Наиболее известными мировыми производителями детекторов для ЦР являются Siemens, Kramer, Institute of Nondestructive Testing, Hamamatsu, GE, Vidisco.

Рекомендуемый рабочий диапазон температур большинства детекторов лежит в пределах от -20 до $+30$ °С, но имеются и исключения. Так, в частности, плоскопанельный селеновый детектор работоспособен в диапазоне от 5 до 30 °С [5], что, соответственно, исключает возможность его применения при НК СШ МН.

Сравнительный анализ различных детекторов ионизирующего излучения представлен в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что при использовании ЦР с различными детекторами динамический диапазон изображения относительно пленочной технологии увеличивается на два порядка. Однако пространственное разрешение пленки в несколько раз выше.

Использование ПЗС-камер с монокристаллами в качестве

Табл. 1
Характеристики преобразователей излучения для систем пленочной и цифровой радиографии, применяемых для контроля стальных изделий толщиной до 40 мм [5, 6]

Параметр	Пленка	«Фосфорные» запорминающие пластины	Монокристаллы и ПЗС-камеры; (CCD)	Люминесцентные экраны и фотодиодные матрицы	Линейка фотодиодов, совмещенная с линейкой сцинтилляторов
Класс чувствительности, %	I	I	II	I	II
Пространственное разрешение, пар линий/мм	15	15	3	5	3
Динамический диапазон, bit	5	14	12	14	12
Расходные материалы	Требуется	Требуется	Не требуется	Не требуется	Не требуется

детекторов для комплексов ЦР нецелесообразно в связи с большими габаритами ПЗС-камер, сложностью эксплуатации в трасовых условиях и достаточно высокой ценой.

Люминесцентные экраны с фотодиодными матрицами представляют собой конструкцию в виде панелей. В качестве первичного преобразователя используется экран из оксисульфида гадолиния толщиной 0,2 мм, который находится в оптическом контакте с фотодиодной матрицей. Соответственно, диапазон оптимального использования подобных систем, определяемый эффективностью поглощения излучения люминесцентным преобразователем, составляет 20–150 кэВ. Данные приборы являются весьма эффективными при использовании в контроле качества изделий микроэлектроники, в системах досмотра, а также применяются в томографических системах для объемной реконструкции внутренней структуры контролируемых объектов [6]. Следует отметить, что, несмотря на все свои достоинства, матричные детекторы остаются еще достаточно дорогими [5].

Перспективными с точки зрения соотношения технических характеристик и цены для РК СШ МН являются системы цифровой радиографии на основе линейных детекторов. В данных приборах элементом преобразования излучения является фотодиодная линейка, совмещенная с линейкой сцинтилляторов. Двумерная рентгенограмма формируется за счет

перемещения линейки или объекта контроля в поле рентгеновского излучения. Обработка изображения обеспечивается по алгоритмам, основанным на принципах цифровой и аналоговой фильтрации и анализа полученных результатов с целью повышения достоверности таких параметров, как протяженность, конфигурация, объем дефекта. Наиболее эффективно использование для регистрации рентгеновского излучения линейки детекторов, состоящих из сцинтиллятора CsI(Tl) в комплекте с фотодиодом, совпадающим по максимальной чувствительности со световым потоком, испускаемым сцинтиллятором. Этот выбор определяется прежде всего высокой эффективностью регистрации рентгеновского излучения, которая обусловлена большим атомным номером, высокой плотностью и максимальной конверсионной эффективностью данных люминесцентных материалов [6].

В мировой практике ЦР СШ МН оборудование изготавливается для РК для двух схем просвечивания, как и при РК на пленку. Детекторы для двух схем просвечивания располагаются на бандажах или перемещаются самостоятельно, например с помощью магнитных колес. При фронтальной схеме подвижная часть бандажа с детектором и ИИ перемещаются синхронно или с определенной цикличностью (рис. 4), при панорамной схеме кроулер остается неподвижным, а перемещается подвижная часть бандажа с детектором (рис. 5)

Рис. 4

Схема цифровой радиогрaфии для фронтальной схемы просвечивания:
1 – источник ионизирующего излучения;
2 – детектор; 3 – бандаж; 4 – трубопровод

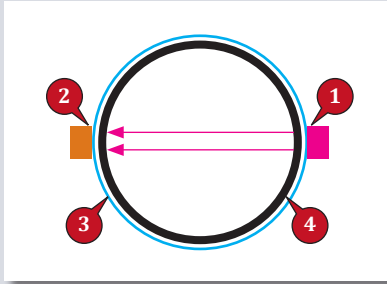


Рис. 5

Схема цифровой радиогрaфии для панорамной схемы просвечивания для варианта перемещения подвижной части бандажа с детектором при неподвижном источнике ионизирующего излучения: 1 – источник ионизирующего излучения

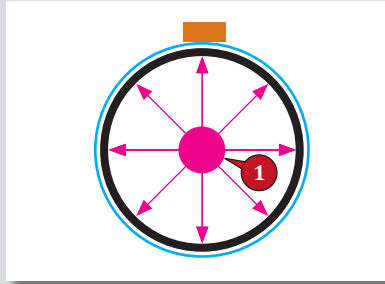


Рис. 6

Схема цифровой радиогрaфии для панорамной схемы просвечивания для варианта перемещения детектора при неподвижном источнике ионизирующего излучения

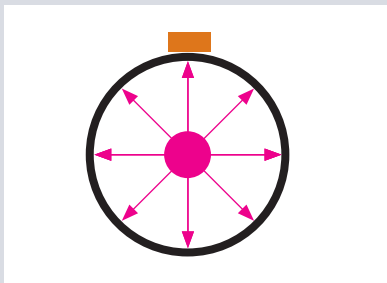
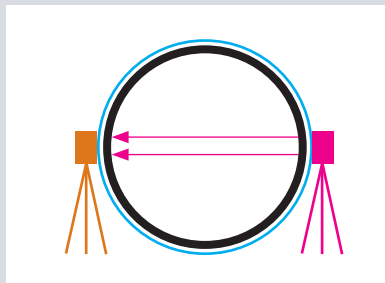


Рис. 7

Схема цифровой радиогрaфии для фронтальной схемы просвечивания для варианта перемещения детектора и ИИ дефектоскопистом вручную



или детектор перемещается самостоятельно (рис. 6).

Так, при фронтальной схеме ЦР СШ МН с использованием плоскопанельных детекторов на основе аморфного кремния возможно за короткое время получить сразу цифровой радиографический снимок на экране компьютера. СШ МН просвечивается за несколько экспозиций, при этом детектор и ИИ перемещаются дефектоскопистом (рис. 7) и изображение программно «сшивается» из нескольких экспозиций в один развернутый СШ. Недостатки системы:

- малый размер активной области плоскопанельных детекторов при экспонировании кольцевых СШ, что увеличивает количество экспозиций до 12...24 при DN >1000 мм;

- высокая стоимость.

Применение плоскопанельных детекторов для фронтальной

схемы просвечивания при ручном перемещении ИИ и детектора из-за выполнения большого количества экспозиций и высокой стоимости оборудования нецелесообразно.

Другой подход заключается в том, что плоскопанельный детектор (либо другой детектор) вращается синхронно с ИИ и сканирование по фронтальной схеме осуществляется в режиме реального времени с формированием непрерывной рентгенограммы. Подобные системы представлены на рынках США и Канады [7–11]. Достаточно широко представлены самоходные кроулеры с различными типами детекторов в ЦР СШ МН, когда ИИ остается неподвижным, а вращается детектор. Заявленные производителем основные технические характеристики подобных систем следующие:

- класс чувствительности I–II;

- пространственное разрешение 3–5 пар линий/мм;
- рабочий диапазон температур от –20 до +30 °С.

Производительность данных комплексов сопоставима с АУК. Однако стоимость в 2–4 раза превышает стоимость систем на основе кроулеров с использованием пленок или запоминающих пластин. Учитывая тот факт, что при применении подобных систем полностью исключаются затраты на расходные материалы (пленка, проявитель, фиксаж, «фосфорные» пластины), комплексы ЦР окупаются достаточно быстро. При этом ЦР позволяет повысить производительность РК за счет исключения обработки полученных радиографических снимков.

Следует отметить, что методы ЦР СШ МН позволяют обеспечить минимальную стоимость контроля одного сварного шва при сравнении с традиционными методами РК на пленку и цифровой радиогрaфией на «фосфорные» пластины.

Перспективным представляется контроль, осуществляемый комплексами ЦР по фронтальной схеме просвечивания, что обеспечивает возможность применения данных комплексов как при строительстве, так и при реконструкции и капитальном ремонте МН, где невозможно обеспечить извлечение кроулера из МН. После завершения сканирования СШ комплекс может автоматически перемещаться к следующему СШ.

В настоящее время в Томском политехническом университете разработана мобильная система ЦР (рис. 8) для НК СШ МН, которая позволяет осуществлять непрерывное сканирование по окружности и формировать рентгенограмму длиной до 4 м. Ширина зоны контроля детектора 20 см, пространственное разрешение 3–4 пар линий/мм. Снимки соответствуют II классу чувствительности [6]. Также ведутся разработки программно-аппаратного комплекса цифровой радиогрaфии с фронтальной схемой просвечивания по I классу чувствительности [12], где в качестве детекторов будут использоваться плоские панели.

Сравнительный анализ технических характеристик зарубежных и существующих российских систем ЦР представлен в табл. 2. Из табл. 2 следует, что большинство производителей иностранных систем ЦР изготавливают оборудование для двух схем просвечивания (фронтальная и панорамная) по I классу чувствительности. То есть одним из обязательных условий соответствия российских систем ЦР лучшим зарубежным аналогам является получение снимков по I классу чувствительности с возможностью использования систем ЦР для двух схем просвечивания, при этом цена российских комплексов должна быть ниже. Общим для всех систем ЦР является выполнение требований норм радиационной безопасности [13] о не превышении эффективных доз облучения обслуживающего персонала. Так, в соответствии с [13] эффективная доза облучения в год не должна превышать 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год.

Выводы

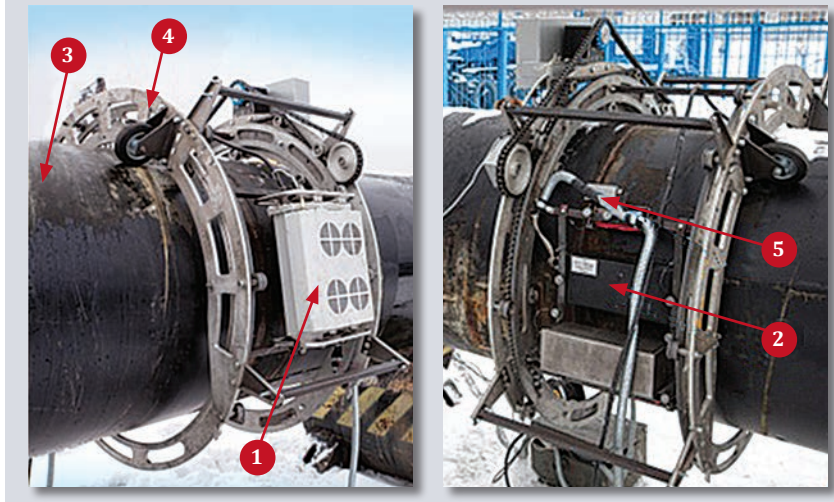
В нефтепроводном транспорте методы цифровой радиографии при помощи детекторов могут обеспечить минимальную стоимость контроля одного шва по сравнению с традиционными методами РК на пленку и ЦР на «фосфорные» пластины за счет исключения расходных материалов при РК (пленка, проявитель, фиксаж, «фосфорные» пластины) и увеличения производительности. Цифровая радиография позволяет получить снимки по I–II классам чувствительности, что удовлетворяет требованиям НТД РФ. Внедрение ЦР позволит снизить затраты на расходные материалы и увеличить производительность РК СШ МН за счет возможности проводить контроль в режиме реального времени. Для широкого внедрения в практику эксплуатации ТТ методов цифровой радиографии необходимо разработать соответствующую нормативную документацию.

Табл. 2
Сравнительный анализ программно-аппаратных комплексов цифровой радиографии трубопроводов

Параметр	Applus RTD RayScan [9]	GW4 [10]	ShawCor [11]	Мобильная система цифровой радиографии ТПУ на основе линейки фотодиодов [6]
Схема просвечивания	Панорамная, фронтальная	Панорамная	Панорамная, фронтальная	Фронтальная
Класс чувствительности	I	II	I	II
Пространственное разрешение, пар линий/мм	-	5	-	4
Динамический диапазон, bit	16	12	16	14
Напряжение на аноде, кВ	300	320	300	300

Рис. 8

Система цифровой радиографии для контроля качества сварных швов трубопроводов с фронтальной схемой просвечивания на трубопроводе $\varnothing 1020$ мм: 1 – источник рентгеновского излучения; 2 – блок рентгеночувствительной линейки; 3 – трубопровод; 4 – механизм позиционирования; 5 – дефектоотметчик [6]



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- РД 19.100.00-КТН-001-10. Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов.
- ПНАЭ Г-7-030-91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов, атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть II. Контроль сварных соединений и наплавки.
- ГЭСН 81-02-25-2001. Государственные элементные сметные нормы на строительные работы. Сборник № 25. Магистральные и промышленные трубопроводы.
- ФЕР 2001-25. Федеральные единичные расценки на строительные работы. Сборник 25. Магистральные трубопроводы газонефтепродуктов.
- Майров А. А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле // Сфера Нефтегаз. С. 26–37.
- Мобильная система цифровой радиографии для неразрушающего контроля трубопроводов большого диаметра / А. И. Буллер [и др.] // Контроль. Диагностика. 2012. № 13. С. 185–189.
- Prospect of Varian.
- Метод и аппарат для автоматизированного цифрового радиографического контроля трубопроводов (патент США 7656997 Нет, G01N 23/02, 2 февраля 2010).
- Applus+ RTD. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.applusrtd.com/en/> (дата обращения: 14.09.13).
- Экология и неразрушающий контроль. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ekolinknk.ru/site/47> (дата обращения: 14.09.2013).
- Prospect of ShawCor.
- ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод.
- НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности.