

Как гарантировать достоверность и качество цифрового архива рентгеновских снимков кольцевых сварных соединений магистрального трубопровода?

Радиационный неразрушающий контроль кольцевого сварного соединения магистрального трубопровода – один из важнейших элементов безопасной эксплуатации трубопровода. Интенсивное развитие в последние годы цифровых технологий в радиационном неразрушающем контроле создало предпосылки для создания цифрового архива результатов контроля, что в свою очередь позволит обеспечить хранение и удобный доступ к архиву в течение всего срока службы магистрального трубопровода (МТ).

Введенные в апреле 2011 года изменения в действующие в АК Транснефть РД-19.100.00-КТН-001-10 «Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов» установили обязательность создания цифровой архивной копии всех контролируемых сварных соединений. Этот, безусловно, прогрессивный шаг, к сожалению, не подкреплен никакими нормативными актами – на сегодняшний день в России нет ни одного стандарта в области цифровой промышленной радиографии. Вот почему вопрос о том, как гарантировать соответствие цифровой копии оригиналу, требует очень внимательного к себе отношения.

За рубежом результатом длительных детальных исследований процесса оцифровки рентгеновских пленок стало создание в 2005 году Международных стандартов ISO 14096 – 1 и ISO 14096 – 2. Эти стандарты ввели в практику цифровой радиографии два очень важных и удобных инструмента – классификацию систем оцифровки и референсную рентгенограмму для экспрессного контроля параметров оцифровщиков. Стандарт выделяет три ключевые характеристики: контрастную чувствительность по плотности в рабочем диапазоне плотностей, рабочий диапазон плотностей и соответствующее ему число градаций серого, пространственное разрешение. Как следствие результатов детальных многочисленных исследований по влиянию вышеперечисленных характеристик на формирование оцифрованного изображения, стандарт вводит три класса оцифровывающих устройств и только соответствие высшему классу **DS** по стандарту ISO 14096 – 2 допускает использование оцифровывающего устройства для целей цифрового архивирования с возможностью **уничтожения** оригинала.

В этой статье мы проанализируем, какими параметрами должен обладать дигитайзер рентгеновских пленок в применении к оцифровке рентгеновских снимков кольцевых швов магистральных газопроводов и каким требованиям должен соответствовать программно аппаратный комплекс в целом для архивирования этих изображений.

Начнем с анализа параметров сканера. В идеале дигитайзер должен быть цифровым координатно-чувствительным денситометром. Задача создать устройство, которое работает одновременно с хорошей точностью, высокой производительностью и в большом диапазоне оптических плотностей, достаточно сложная.

Рассмотрим основные физические параметры, определяющие процесс оцифровки, и перейдем от них к тем характеристикам, которые используются в существующем международном стандарте.

Оптическая плотность (D) — мера ослабления света прозрачными объектами (такими, как фотоплёнка). Определяется как десятичный логарифм отношения потока излучения, падающего на объект, к потоку излучения, прошедшего через него:

$$D = \lg \frac{\Phi_{in}}{\Phi_{out}}$$

Где Φ_{in} — поток света, создаваемый источником. Для одного сканирования эта величина не меняется. Поток света, прошедший через фотопленку, имеет величину $\Phi_{out} = \Phi_{in} 10^{-D}$

Именно этот поток Φ_{out} регистрируется сенсором сканера. Погрешность измерения оптической плотности выражается через погрешность определения потока следующим образом:

$$\Delta D = \left(\lg \frac{\Phi_{in}}{\Phi_{out}} \right)' \cdot \Delta \Phi_{out} = \frac{\Delta \Phi_{out}}{\ln 10 \cdot \Phi_{out}}$$

Если требуется измерять оптическую плотность с минимальной абсолютной погрешностью ΔD , то погрешность измерения потока, прошедшего через фотопленку, при заданной оптической плотности D не должна превышать значение:

$$\Delta \Phi_{out} = \Delta D \ln 10 \Phi_{out} = \Delta D \ln 10 \Phi_{in} 10^{-D}$$

Под **погрешностью** понимается **среднеквадратичная погрешность**. Оценка среднеквадратичной погрешности для серии из N измерений величины D осуществляется по формуле:

$$\Delta D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N D_i^2 - \bar{D}^2}{N-1}},$$

где \bar{D} — оценка среднего значения величины D производится по формуле:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N}$$

При этом предполагается, что измерения проводятся на участке пленки с постоянной оптической плотностью, а флуктуации оптической плотности на этом участке много меньше, чем ΔD .

Учитывая то, что минимальная абсолютная погрешность измерения потока должна достигаться при максимальной оптической плотности, получим формулу для динамического диапазона:

$$RANGE = \frac{\Phi_{out_max}}{\Delta\Phi_{out_min}} = \frac{10^{D_{max} - D_{min}}}{\Delta D \ln 10}$$

Погрешность определения оптической плотности, естественно, зависит от апертуры денситометра. Чем больше апертура, тем больше площадь, по которой происходит усреднение оптической плотности, тем меньше погрешность. Погрешность определения оптической плотности обратно пропорциональна квадратному корню из площади апертуры денситометра.

$$\Delta D \propto \frac{1}{\sqrt{S}}$$

У сканеров роль апертуры играет **линейный** размер пикселя P .

Соответственно, $S = P^2$ и $\Delta D \propto \frac{1}{P}$.

Для сравнения сканеров с разным размером пикселя в международном стандарте вводится понятие **контрастной чувствительности по плотности** (далее просто **контрастная чувствительность**) ΔD_{cs} (*Density contrast sensitivity*). Эта величина сопоставляет погрешность сканера погрешности денситометра с апертурой диаметром 100 микрон.

$$\Delta D_{cs} = \frac{2 \cdot \Delta D \cdot P}{88.6}, \text{ где } P \text{ – линейный размер пикселя в микронах.}$$

Чем меньше размер пикселя, тем большая абсолютная погрешность измерения оптической плотности допускается. Например, если устройство соответствует классу **DS**, то величина ΔD_{cs} не должна превышать 0,02 Б, а диапазон оптических плотностей должен быть от 0,5Б до 4,5Б.

При сканировании с разрешением в 300 dpi, что соответствует размеру пикселя 84,7 микрон, абсолютная погрешность ΔD , соответственно, не должна превышать **0,0104 Б**. Следовательно, динамический диапазон сканера должен быть не менее:

$$RANGE = 417591 \text{ Или } 112 \text{ дБ!!!}$$

Это довольно сложная задача с точки зрения физики, электроники и программного обеспечения – необходимо с одинаковой точностью измерять величину световых потоков, отличающуюся в **10000** раз. Для кодирования числа 417591 требуется аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с количеством градаций серого не менее 2^{20} , или для регистрации сигнала нужно использовать логарифмический усилитель

перед АЦП. Несмотря на сложность задачи, такие сканеры разработаны и производятся, хотя и стоят достаточно дорого.

Промежуточным, компромиссным вариантом являются сканеры с переключаемым диапазоном оптических плотностей. Если сканер имеет линейный выход, то 16-ти разрядный АЦП (максимально достижимый динамический диапазон в этом случае составляет $2^{16}-1=65535$) при погрешности измерения оптической плотности 0,0104Б (что соответствует классу DS при разрешении 300 dpi) обеспечивает максимальный диапазон оптических плотностей $D_{\max}-D_{\min}$ всего **3,196 Б**. В известных нам моделях сканеров не используются АЦП с разрядностью выше 16-ти. Поэтому все дигитайзеры без логарифмического усилителя, которые заявляются как соответствующие классу DS, имеют несколько переключаемых диапазонов оптической плотности для покрытия всего диапазона от 0,5Б до 4,5Б. Например, некоторые сканеры работают в диапазонах 0.5Б-3.5Б и 1.5Б-4.5Б. При использовании таких сканеров надо заранее точно знать, какой диапазон оптических плотностей имеется на пленке, что создает определенные неудобства.

Если же используется логарифмический усилитель, то для обеспечения погрешности в измерении оптической плотности 0,0104Б в диапазоне от 0Б до 4,5Б достаточно 10-ти разрядного АЦП, хотя для соответствия классу DS АЦП должен быть 12-ти разрядным.

Наибольшую трудность представляет оцифровка пленок с большой плотностью. Сканер для работы с пленками, имеющими оптическую плотность выше 2.5Б, должен обладать одновременно и мощным источником света, и малошумящим сенсором и очень хорошей защищенностью от внешнего освещения. Погрешность определения оптической плотности дигитайзером, естественно, увеличивается с ростом оптической плотности. Для уменьшения погрешности сканера в области больших плотностей производители обычно используют многократное измерение с последующим усреднением для подавления статистического шума. Это напрямую приводит к увеличению времени сканирования. Увеличение времени сканирования в N раз приводит к уменьшению погрешности в \sqrt{N} раз. Это связано с тем, что если погрешность измеряемой величины Φ равна $\Delta\Phi$, то погрешность среднего

из N последовательных измерений величины Φ ($\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi_i$) равна $\frac{\Delta\Phi}{\sqrt{N}}$

В связи с этим сканеры имеют несколько режимов сканирования. Чем больше плотность сканируемых пленок, тем более длительный процесс сканирования необходим для достижения требуемых параметров.

Хорошая контрастная чувствительность сканера не означает, что абсолютная погрешность измерения оптической плотности будет одинаковой на разных участках снимка. Сканер, в зависимости от конструкции, может оцифровывать одну и ту же оптическую плотность в разных, достаточно удаленных друг от друга участках снимка, по-разному в зависимости от места расположения участка или от того, какие участки и с какими оптическими плотностями окружают измеряемый участок снимка. Все без исключения сканеры дают в той или иной мере артефакты при

наличии участков, сильно различающихся по оптической плотности (более чем на 2.5 Б) на одной линии сканирования. Особенно сильные артефакты дают сканеры, использующие линейку сенсоров и цилиндрическую линзу, единую для всех сенсоров. Свет от участков с низкой оптической плотностью распространяется по оптической системе и влияет на участки с высокой плотностью.

Пространственное разрешение (SR) – это количество пар линий на миллиметр, распознаваемое сканером. Пространственное разрешение сканера обычно

соотносится с размером пикселя и близко к значению: $SR \approx \frac{1}{2 \cdot P}$.

Физически у любого сканера всегда есть линия сканирования и направление протяжки. Поэтому пространственное разрешение у сканера по вертикали и горизонтали может не совпадать. Увеличение пространственного разрешения в N раз (или, что равносильно, уменьшение размера пикселя в N раз) приводит к увеличению размера получаемого файла в N² раз. Относительно времени сканирования дело обстоит сложнее. Если сканер является специализированным устройством для оцифровки рентгеновских пленок, то при сканировании с разным пространственным разрешением он должен сохранять контрастную чувствительность, поэтому при одинаковой контрастной чувствительности время сканирования не зависит от разрешения.

Итак, к главным параметрам сканера рентгеновских пленок относятся:

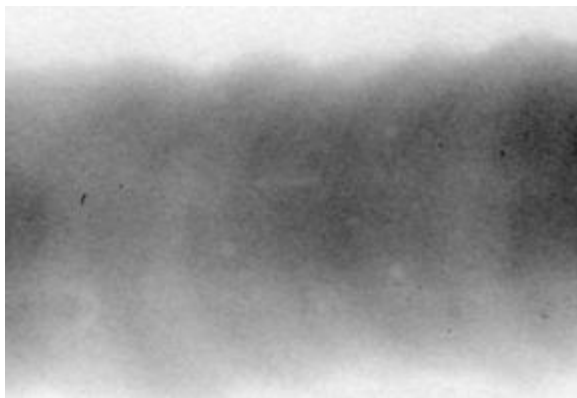
1. **Пространственное разрешение** – определяет минимальный размер контрастного объекта, который можно увидеть на цифровом изображении
2. **Рабочий диапазон оптических плотностей** – определяет минимальную и максимальную оптическую плотность на снимке, которая оцифровывается с заданной контрастной чувствительностью
3. **Контрастная чувствительность** – определяет видимость перепадов оптической плотности на снимке, фактически определяет корректность передачи деталей изображения. Обычно все детали снимка, такие как дефекты, элементы конструкции и прочее имеют четкие границы.
4. **Разрядность АЦП** – определяет градацию измерения оптической плотности в доступном динамическом диапазоне. Оптимальный выбор данной характеристика, как было показано выше, полностью определяется типом усилителя (логарифмического или линейного), рабочим диапазоном оптических плотностей и контрастной чувствительностью.
5. **Погрешность определения оптической плотности по всей площади сканирования.** Данный параметр важен, если сканер используется как цифровой денситометр.
6. **Скорость сканирования.** Очень важный параметр. Определяет производительность сканера.
7. **Артефакты.** Возможны при резких перепадах оптических плотностей. В некоторых случаях могут серьезно исказить исходный снимок.

Эти параметры взаимосвязаны. Улучшение любого из этих параметров ведет к ухудшению других. Часто это ухудшение катастрофическое. Для создания цифрового архива требуется разумный баланс этих параметров. При этом совокупность этих параметров должна гарантировать, с одной стороны - отсутствие потери важной информации, с другой стороны - разумную производительность.

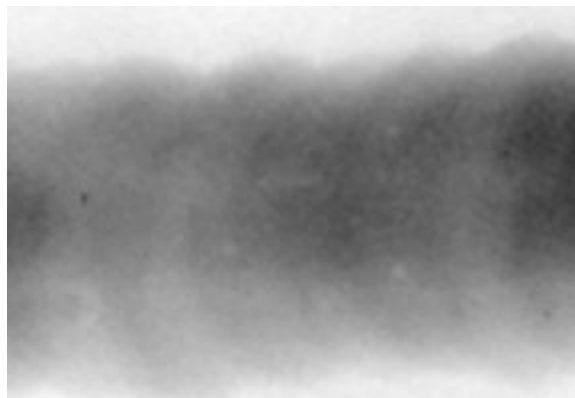
Международный стандарт ISO 14096 подробно описывает набор параметров, которым должен удовлетворять оцифровщик каждого класса, но, к сожалению, этот стандарт не действует на территории РФ. Для того, чтобы определить, какие параметры сканера нужны для оцифровки пленок при НК в интересующем нас случае, будем опираться на опыт и здравый смысл, существующие отечественные стандарты и сравнивать результаты нашего анализа с международным стандартом.

Пространственное разрешение определяет размер высоко контрастных объектов, которые можно различить на снимке и оценить по размерам. Как уже было сказано, для дигитайзеров пространственное разрешение близко соотносится с размером пикселя. Для определения требуемого пространственного разрешения можно воспользоваться пунктом 6.7 ГОСТ 7512-82, который гласит, что при документальном оформлении результатов расшифровки снимков определенные по снимкам размеры следует округлить до ближайших значений из ряда 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм или ближайших целых значений в миллиметрах, если определенный по снимку размер превышает 3,0 мм. Пространственное разрешение логично выбирать из соображения точности определения размеров минимально допустимого дефекта. Например, если размер минимально допустимого дефекта составляет 0,5 мм, а шаг округления - 0,1 мм, следовательно, размер пикселя сканера не может быть больше половины шага округления, то есть больше 50 микрон. Если необходимо не только определить размеры дефекта, но и правильно его классифицировать, например, отличить шлак от поры, на оцифрованном снимке должно содержаться достаточно информации. Считается, что 5 пикселей по одной координате на минимально допустимый дефект вполне достаточно.

Высокое пространственное разрешение



Низкое пространственное разрешение

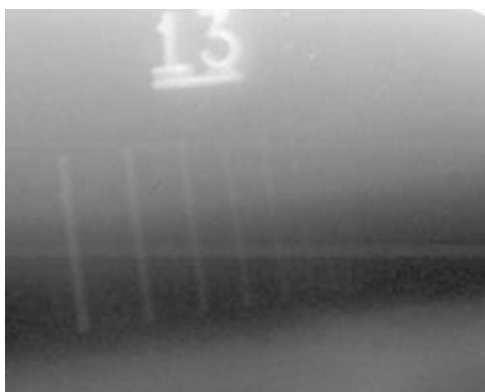


В международном стандарте **ISO 14096** разрешение ставится в соответствие напряжению на рентгеновской трубке или типу источника. Для класса **DS** эта таблица выглядит так:

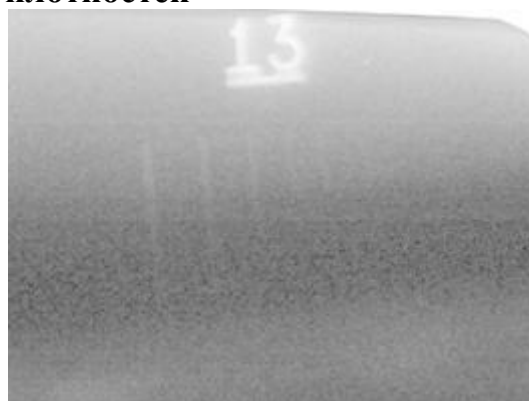
Энергия, кэВ	Размер пикселя (мкм)
≤ 100	15
>100 до 200	30
>200 до 450, Se-75, Yb-169	60
Ir-192	100
Co-60, > 1 МэВ	200

Рабочий диапазон оптических плотностей определяет интервал оптических плотностей, внутри которого оцифровка корректна. Неправильно выбранный диапазон оптических плотностей приводит к исчезновению элементов изображения, которые выходят за рамки этого диапазона.

Правильный диапазон.
Виден весь эталон



Неправильный диапазон. Эталон виден только в области малых оптических плотностей

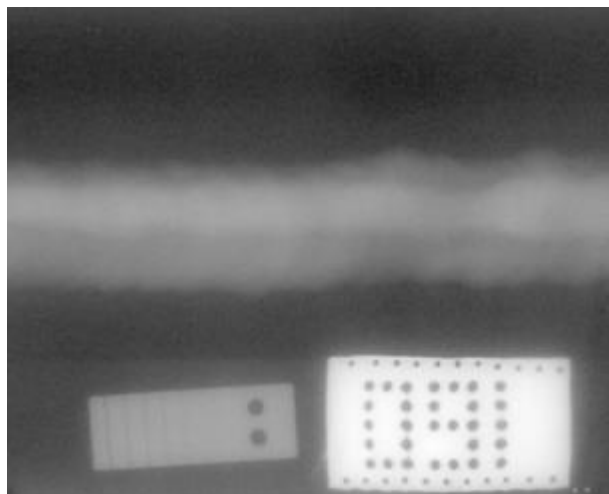


Здесь важно отметить, что если на отсканированном изображении четко виден эталон, это не значит, что на других участках снимка, где плотность отличается от плотности в районе эталона чувствительности, информация не потерялась.

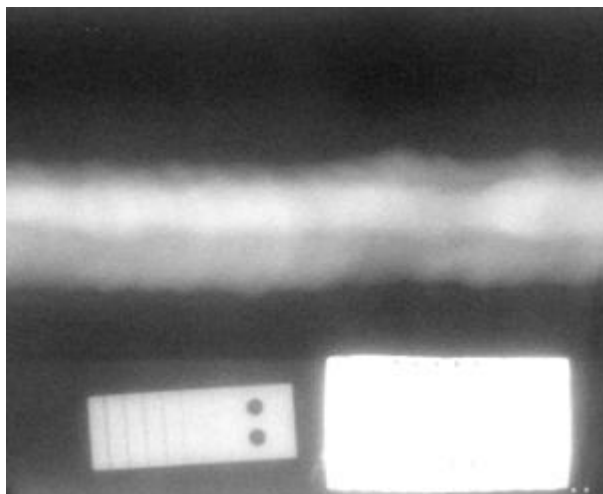
По ГОСТ 7512-82 оптическая плотность шва, эталона и околошовной зоны не должна быть меньше 1,5. Оптическая плотность меток и мерного пояса может быть существенно меньше. Рабочий диапазон оптических плотностей должен гарантированно перекрывать диапазон оптических плотностей на сканируемых пленках.

Есть существенная разница между нижней границей рабочего диапазона и верхней. Малые оптические плотности обычно полностью обрезаются, а большие оптические плотности тонут в шумах.

D_{min}=0.5



D_{min}=1.5

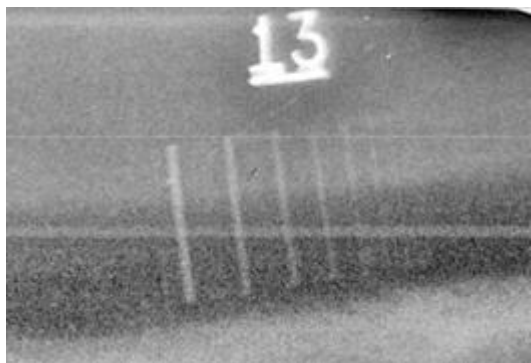


Какой реальный разброс оптических плотностей может быть на одном снимке на шве и околошовной зоне? Например, при панорамном просвечивании разброс оптической плотности определяется неравномерностью диаграммы направленности самого рентгеновского аппарата, невозможностью установить фокус рентгеновской трубки точно по центру трубы, наличием рассеяния от поверхности земли. В результате, разные части снимка имеют разную оптическую плотность на участках с одинаковой радиационной толщиной. К тому же, для полуавтоматической и ручной сварки характерна большая неоднородность усиления шва, что вынуждает задавать экспозицию, ориентируясь на максимально возможное усиление. Характерный разброс оптических плотностей при панорамном просвечивании на одном снимке составляет 1,5 Б – 2,0Б, то есть минимальный рабочий диапазон плотностей должен быть от 1,5Б до 3,5Б. Для серии снимков разумно добавить к диапазону еще 0,5 -1 Б. Для хорошей видимости меток, мерного пояса и деталей снимка, позволяющих осуществить координатную привязку снимка к объекту, сканер должен адекватно передавать оптические плотности ниже 1,5Б. Из этих соображений получаем, что сканер для рентгенографических изображений кольцевого сварного соединения должен иметь диапазон оптических плотностей не менее, чем от 1.0Б до 4,0Б.

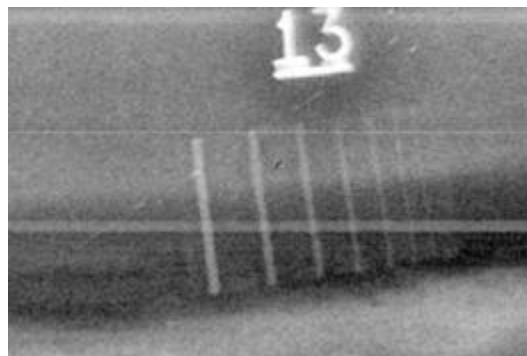
Для сравнения, ГОСТ 8.559-93 «Государственная поверочная схема для средств измерений оптической плотности материалов в проходящем свете» предъявляет требования к диапазону оптических плотностей для микроденситометров от 0,1Б до 4,1Б. Класс **DS** требует перекрывать диапазон плотностей от 0,5Б до 4,5Б.

Контрастная чувствительность определяет видимость локальных перепадов оптической плотности. Плохая контрастная чувствительность приводит к появлению дополнительной зернистости на цифровом изображении, которой изначально не было на пленке. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению видимости, размытию границ объектов или, вообще, к исчезновению элементов изображения, характеризующихся низкой контрастностью.

Низкая контрастная чувствительность



Высокая контрастная чувствительность



Для примера использована одна и та же пленка, отсканированная в разных режимах, что демонстрирует тот факт, что дополнительный шум вносится именно при сканировании.

Определить то, какая должна быть контрастная чувствительность сканера можно из разных соображений. Первым соображением является контрастная чувствительность глаза. ГОСТ 7512-82 предъявляет требование к негатоскопу: «Следует использовать негатоскопы с регулируемой яркостью и размерами освещенного поля. Максимальная яркость освещенного поля должна составлять не менее 10^{D+2} кд/м², где D - оптическая плотность снимка». Отсюда следует что яркость просматриваемого глазом участка снимка должна не меньше 100 кд/м².

Это довольно жесткое требование, которое в реальной жизни при яркости негатоскопов, доступных на открытом рынке, для пленок с плотностью более 3Б-3,5Б практически не достижимо. Западные стандарты для плотных пленок выдвигают более реалистичные требования. Например, стандарт EN 25580 разрешает просматривать участки с плотностью выше 2.5Б с яркостью не менее 10кд/м², что позволяет на тех же негатоскопах просматривать пленки с плотностью до 3,5Б-4,5Б.

Контрастная **чувствительность глаза** зависит от **яркости фона**. Под контрастной чувствительностью глаза понимают способность отличать достаточно большие участки с разной яркостью. Чем ярче фон, конечно, до определенных пределов, тем меньшие перепады оптической плотности видит глаз. В нашем случае под фоном следует понимать среднюю яркость рассматриваемого участка снимка. При яркости фона равной 100 кд/м² контрастная чувствительность составляет величину $\Delta D = 0.01Б$, при 30 кд/м² - $\Delta D = 0.017$ и при 10 кд/м² - $\Delta D = 0.02Б$. Поэтому при постоянной яркости негатоскопа контрастная чувствительность глаза ухудшается с ростом оптической плотности и становится $\Delta D = 0.02$ на наиболее плотных участках снимка.

Следующим важным фактором является контрастность характерных объектов на изображении. Перепад плотности на слабоконтрастных шлаках составляет около 0,05Б-0,04Б. Для обеспечения видимости этих объектов, контрастная чувствительность должна в два раза превышать перепад яркости на этих объектах. Еще одним важным фактором является зерновой шум самой пленки, который обуславливается как неоднородностью пленки, так и квантовым шумом. Естественно, здесь многое зависит от класса пленки. Для любой пленки квантовый

шум уменьшается с ростом оптической плотности пленки, при этом зерновой шум не меняется. При плотностях больше 2,0Б флуктуации плотности определяется в основном зерновым шумом и для разных типов пленки составляют:

Класс пленки по ISO 11699	δD
C1	0.018
C2	0.020
C3	0.023
C4	0.028
C5	0.032
C6	0.039

Чтобы не вносить дополнительных искажений при сканировании, контрастная чувствительность сканера должна быть в 2 раза выше контрастной чувствительности исходной пленки.

И последнее, заявленная погрешность денситометров, которые можно купить на открытом рынке, также составляет 0,01-0,05Б. ГОСТ 8.559-93 «**Государственная поверочная схема для средств измерений оптической плотности материалов в проходящем свете**» предъявляет требования к погрешности микроденситометров в зависимости от плотности почернения пленки:

Диапазон значений оптической плотности материалов, Б	Δ денситометров для измерений диффузной оптической плотностей, Б
0,03÷1,00	0,03
1,00÷2,00	0,05
2,00÷4,00	0,07

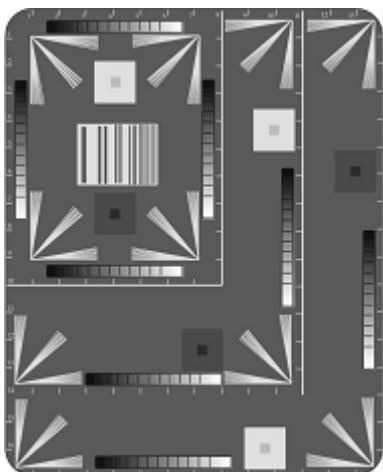
В международном стандарте **ISO 14096** для класса **DS** принята контрастная чувствительность сканера 0,02Б, что позволяет сохранить информацию в большинстве случаев и для большинства используемых пленок, неплохо соотносится с чувствительностью глаза, собственным шумом пленки и существующими стандартами на погрешность денситометров.

Скорость сканирования должна быть разумной. Так как скорость сканирования **катастрофически** зависит от качества и параметров сканирования, то в данном случае под скоростью сканирования следует понимать не максимально возможную скорость сканирования для данного сканера, а скорость сканирования в режиме, обеспечивающем требуемое качество сканирования.

За разумную скорость сканирования можно принять скорость проявки пленки, т.е. исходить из требования скорости сканирования порядка 1 минуты на 1 погонный метр рулонной пленки. Такая скорость сканирования позволит оцифровывать стандартный 90 – метровый рулон за 1.5 часа.

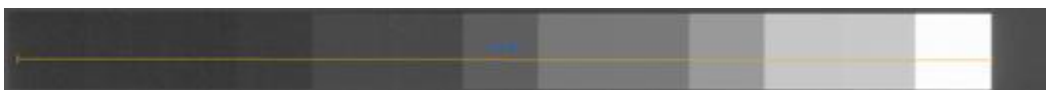
В любом случае производительность сканера легко посчитать и соотнести ее с запросами потребителя по оцифровке требуемого количества пленки. Производительность можно увеличивать либо выбором более производительной (а значит и более дорогой) модели сканера, увеличением количества рабочих смен, либо увеличением количества сканеров.

Международный стандарт ISO 14096 подробно описывает процедуру оценки параметров сканера. Нет смысла это повторять, так как достаточно прочитать стандарт. Остановимся на некоторых важных моментах. Оценку качества дигитайзера можно проводить на рабочем месте. Для этого не нужно обладать особой квалификацией. В качестве инструмента оценки качества дигитайзера выступает специальная пленка, называемая **референсной рентгенограммой**, и программное обеспечение, в которое встроены довольно простые функции, позволяющие по отсканированной референсной рентгенограмме рассчитать или оценить все параметры сканера: пространственное разрешение по всем направлениям, корректность измерения расстояний, контрастную чувствительность по плотности, рабочий диапазон оптических толщин, наличие артефактов.



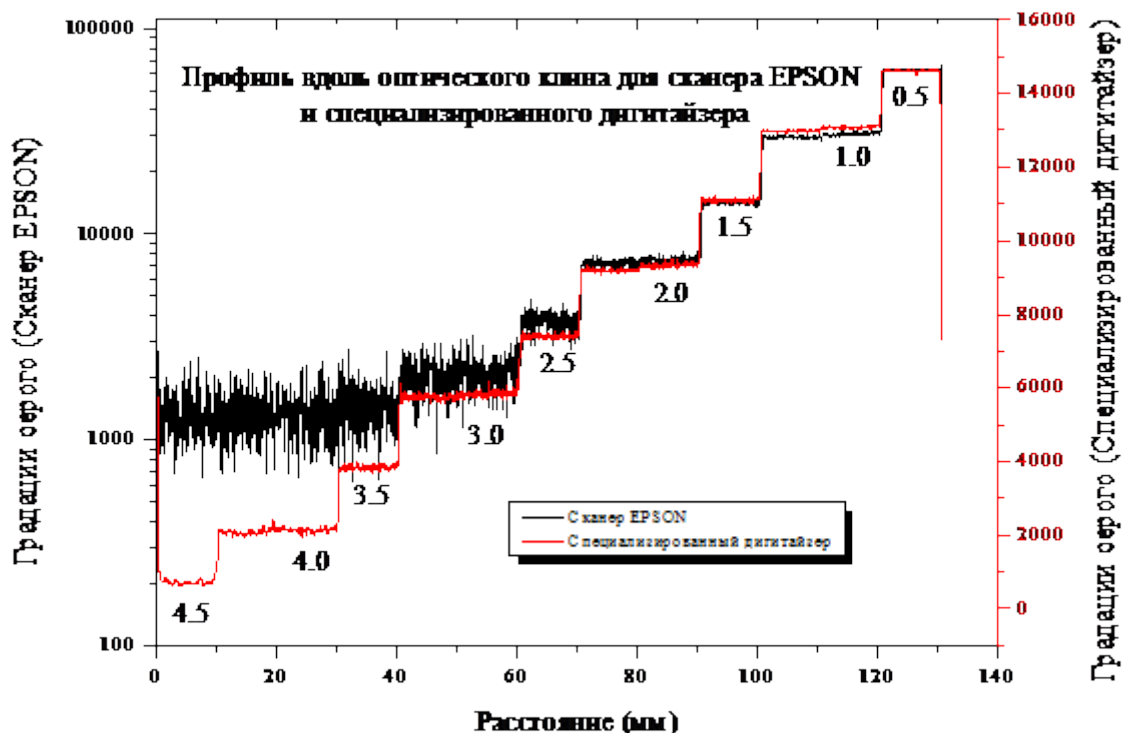
На референсной рентгенограмме расположены 8 оптических клиньев с шагом 0,5Б в диапазоне от 0,5Б до 4,5Б и 5 оптических клиньев с шагом 0,02 Б. Клинья расположены на разных участках диаграммы, они имеют горизонтальную и вертикальную ориентацию, находятся в окружении участков с разной оптической плотностью, и собственный разброс оптических плотностей на каждой ступеньке клина не превышает 0,003Б. По этим клиньям можно определить контрастную чувствительность сканера и погрешность в измерении плотности. Для сравнения приведем результат сканирования клина на специализированном дигитайзере FS50B и планшетном сканере EPSON Expression 10000XL, который по необъяснимым причинам до сих пор применяется многими пользователями.

На графике представлен профиль градаций серого цифрового изображения вдоль оси клина.



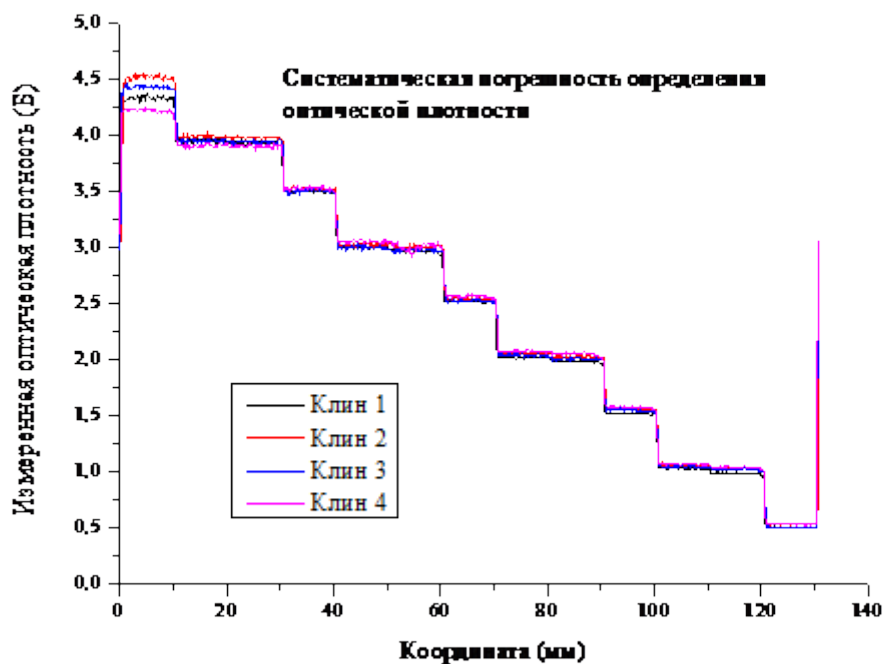
Сканер EPSON – черная линия, дигитайзер FS50B – красная линия.

Диапазон оптических плотностей на клине от 0,5Б до 4,5Б.



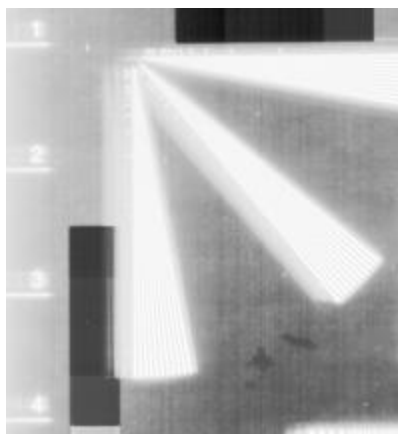
Для сканера EPSON шумовая дорожка, которая визуально характеризует контрастную чувствительность, становится недопустимо большой, начиная с плотности 2,0Б. Именно на этой ступеньке контрастная чувствительность становится больше 0,02 единиц оптической плотности, требуемых для соответствия стандарту ISO 14096. Это означает, что все участки изображения с плотностью выше 2,0 будут оцифровываться некорректно, и информация будет теряться или искажаться. На данном графике умышленно приведены «сырые» данные без пересчета на плотность, так как для сканера EPSON данный пересчет для плотностей выше 2,5 не имеет смысла.

В некоторых случаях наряду с получением собственно изображения сканер удобно использовать как денситометр. Для определения погрешности определения оптической плотности надо учитывать не только контрастную чувствительность сканера, характеризующую разброс в определении оптической плотности на небольшой площади снимка, но и возможную систематическую погрешность, возникающую из-за различной чувствительности сканера в различных зонах сканирования. Такое различие может возникать особенно для участков с большой плотностью из-за влияния внешней освещенности, соседних мест на снимке с малой плотностью, различной чувствительности сенсоров, которая не была скомпенсирована.

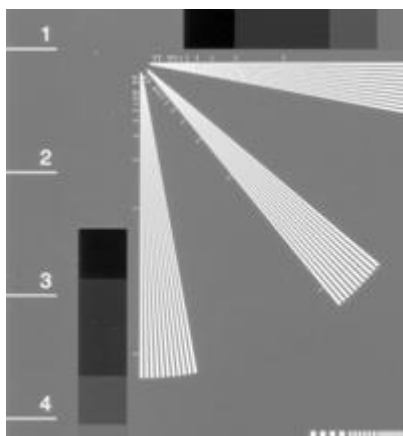


На рисунке показан профиль четырех клиньев на референсной рентгенограмме, полученный на оцифровщике FS50B. В области высоких плотностей видно отличие в определении оптической плотности, сильно превышающее шумовую дорожку. В областях с оптической плотностью меньше 4,0Б у специализированных дигитайзеров такой проблемы как правило нет. У обычных планшетных сканеров типа Epson Expression 10000XL недопустимые погрешности измерения оптической плотности возникают при плотностях более 2,0Б.

Благодаря большим перепадам оптической плотности на референсной рентгенограмме хорошо проявляются артефакты сканера. Для примера приведем участок референсной рентгенограммы с артефактами в виде переотражений и тяжелой вдоль линии сканирования. Такие артефакты характерны для систем с цилиндрической линзой и линейкой сенсоров. Насколько артефакты критичны для снимков зависит в основном от наличия больших перепадов плотности по линии сканирования. Перепады могут возникать, например, при расположении свинцовых меток вблизи окошечной зоны.



Тот же участок референсной рентгенограммы, отснятый на дигитайзере FS50B с лазерным считыванием, подобных артефактов не содержит.



Соответствие дигитайзера классу **DS** будет гарантировать корректность сканирования. Но если стоит задача создания цифрового архива, то выбором сканера проблема не ограничивается. То, как информация представляется на экране, обрабатывается и хранится в значительной мере зависит от программного обеспечения. Одной из важных составляющих программного обеспечения является формат файла. В результате сканирования получаются большие объемы информации.

Если хранить файл в несжатом виде, то, например, объем информации при размере пикселя 50 микрон (такое разрешение предусматривает класс DS для пленок, просвеченных при энергии выше 200 кэВ) будет 80000 байт на квадратный сантиметр пленки (пиксель изображения кодируется 2 байтами). Если для просвечивания сварного соединения трубы диаметром 1420 мм используется рулонная пленка шириной 100 мм, то размер несжатого изображения будет равен 108 мегабайт или 9 гигабайт на километр трубопровода. Рекомендуется хранить изображения в **несжатом** изначальном виде.

Иногда, тем не менее, потребители пытаются оптимизировать размер архива. Это может быть связано с большим размером архива или стремлением уменьшить размер файлов при пересылке.

В этом случае возникает вопрос о сжатии изображений. Сжатие изображений с приемлемым качеством довольно сложная задача. Существуют два вида алгоритмов сжатия:

1. Без потери качества. В этом случае после цикла компрессии-декомпрессии, полученные данные полностью соответствуют исходным данным. Такие алгоритмы дают возможность сжимать данные не более чем в полтора-два раза. Эффективность сжатия определяется характером изображения и алгоритмом сжатия. При этом для разных классов изображений наиболее эффективными оказываются разные алгоритмы сжатия.
2. С потерей качества. После цикла компрессии-декомпрессии полученные данные отличаются от исходных данных. Характер и величина этого отличия

зависит непосредственно от алгоритма сжатия, класса изображения и степени сжатия. Степень сжатия может достигать до 10 раз, при этом разница между оригинальным изображением и восстановленным не будет превосходить величину характерного шума на изображении. Далеко не все алгоритмы с потерей качества годятся для сжатия рентгеновских изображений из-за характерных артефактов, динамического диапазона и частотных характеристик.

Мировым лидером в разработке алгоритмов сжатия изображений является совместная рабочая группа (комитет) «Joint Photographic Experts Group» (JPEG – Объединённая группа экспертов по фотографии), образованная международными организациями ISO, Международной электротехнической комиссией и ITU-T (подразделением Международного союза электросвязи) с целью разработки эффективных цифровых форматов сжатия для фотографических и подобных им изображений.

Под маркой JPEG разработано множество алгоритмов для сжатия изображений, как с потерей качества, так и без, в том числе наиболее распространенный алгоритм для сжатия цифровых фотографий.

В Европе и США проведены исследования и получен ответ на вопрос, при помощи каких алгоритмов и с какими параметрами следует сжимать рентгеновские изображения, чтобы гарантировать оптимальные параметры сжатия.

Второй важной характеристикой файла является его **документированность**. Поставщик программного обеспечения, использующий закрытый недokumentированный формат файла, ставит потребителя в зависимость от себя. Поставщики программно-аппаратных комплексов могут приходить на рынок и уходить с него и, с уходом разработчика программного обеспечения, может быть поставлена под угрозу целостность архива.

На наш взгляд, оптимальным форматом файла является формат DICONDE, разработанный в Европе и США для неразрушающего контроля и включенный в стандарт ASTM E 2339 – 04 «Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive

Evaluation (DICONDE)». Этот формат, кроме массы преимуществ, связанных с универсализацией хранения и обмена информацией, использует форматы сжатия JPEG с потерей качества и без потерь, применимые для рентгеновских изображений и позволяющие контролировать качество снимка при создании архива. Формат DICONDE с 16-ти битным алгоритмом сжатия JPEG-2000 обеспечивает сжатие рентгеновского изображения в 10 раз, при этом гарантируется, что алгоритм сжатия не будет вносить дополнительный шум или артефакты в изображение. То, в каком формате хранится информация, является ключевым моментом, особенно если целью оцифровки является обеспечение доступа к информации в будущем, а не формальный отчет о создании цифрового архива.

Использование алгоритмов сжатия, непредназначенных для компрессии рентгеновских изображений, таких как, например, обычный 8-ми битный JPEG, неизбежно приведет к потере важной информации и, как следствие, к искажению изображения. Аргументация, что видимость эталона после цикла компрессии-декомпрессии не ухудшается – недостаточна и неприемлема. Видимость эталона на оцифрованном снимке не гарантирует сохранение информации на участках снимка с большей и меньшей плотностью. Обычный JPEG файл, который открывается любым редактором, имеет разрешение только 8 бит на точку, что обеспечивает динамический диапазон, равный 255 или 48 дБ. Этого достаточно для обычных фотографий, но абсолютно недостаточно для рентгеновских изображений, как было рассмотрено выше. Неправильный выбор формата сжатия может уничтожить все преимущества качественного сканера.

Для обеспечения доступа к информации существуют базы данных. И здесь база данных рентгеновских изображений ничем не отличается от любой другой. Программное обеспечение должно обеспечивать хранение, систематизацию, поиск, пересылку рентгеновских изображений, выдачу отчетов, и эти задачи просто и понятно решаются, в том числе, на основе существующих баз данных.

Рассмотрев все основные факторы, влияющие на создание цифровой копии, можем сформулировать требования к программно-аппаратному комплексу для целей архивирования рентгенографических снимков кольцевого сварного соединения магистрального трубопровода.

Логично разделить требования к сканеру и программному обеспечению, так как часто бывает, что один и тот же сканер включен в разные аппаратно-программные комплексы или одно и тоже программное обеспечение может получать изображения с разных сканирующих устройств.

Требования к сканеру:

1. Пространственное разрешение не хуже 50 мкм или 500 dpi.
2. Диапазон оптических плотностей 0,5Б – 4,0Б. Для определенного круга задач возможно сужение диапазона: например, ограничение сверху 3,5Б для крупнозернистой пленки с использованием флуоресцентного экрана или ограничение снизу 1,5Б для случая, когда детали снимка ниже 1,5Б не существенны. Но пользователь должен четко осознавать причины и последствия этих ограничений.
3. Контрастная чувствительность по плотности не хуже 0,02Б во всем диапазоне оптических плотностей.
4. Если сканер используется для определения абсолютной плотности, то есть в качестве денситометра, погрешность определения оптической плотности должна быть не хуже 0.05 при эффективном размере пикселя 100 микрон.
5. Количество градаций серого в диапазоне оптических плотностей не менее 10^{12} , для устройств с логарифмическим выходом, и 10^{16} - для устройств с линейным

выходом. Еще раз хочется подчеркнуть, что данный параметр не является отдельной, независимой характеристикой прибора. Требования к оптимальному количеству градаций серого вытекают из диапазона оптических плотностей, вида усилителя и контрастной чувствительности.

6. Скорость сканирования при обеспечении всех качественных параметров – не ниже 1м в минуту. Во всяком случае скорость сканирования должна соотноситься с требуемой производительностью оцифровки.

Требования к программному обеспечению

1. Использование полностью документированного формата файла, гарантирующего возможность чтения информации программным обеспечением разных производителей. Можно рекомендовать формат DICONDE.

2. Формат хранения изображения не менее 16 бит на пиксель. Данные обязательно должны храниться в необработанном виде.

3. Использование только документированных 16-ти битных алгоритмов сжатия, применимых для хранения рентгеновских изображений, например, JPEG-2000, JPEG-LS, JPEGLossless и т.п., гарантирующих сохранность всей необходимой информации.

4. Хранение вместе с изображением всей сопутствующей информации в известном формате.

5. Возможность контроля несанкционированного доступа к данным и несанкционированного изменения данных.

6. Создание базы данных на основе форматов известных производителей, например, SQL-Server, Oracle, MS-Access, Paradox и так далее.

7. Программное обеспечение должно содержать набор инструментов, позволяющих оценить качество сканера и контролировать параметры сканера в процессе эксплуатации, например, по референсной рентгенограмме.