

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ, АНАЛИЗА

УДК 620.179.15

Капустин В.И., Рябов А.Н., Козин Ю.Н., Шведов Л.И., Максимова Т.Н.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАММА-ДЕФЕКТΟΣКОПОВ С ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ СЕЛЕН-75 ДЛЯ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АЭС ТОЛЩИНОЙ ДО 40 мм ПО СТАЛИ

При радиографическом контроле сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС имеется ограничение по применению радионуклидного источника Селен-75 до 20 мм по стали в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-017-89.

1. Состояние вопроса и актуальность проблемы

Целью настоящей статьи работы является техническое обоснование и экспериментальное подтверждение применения гамма-дефектоскопов с источником Селен-75 для контроля сварных соединений толщиной до 40 мм по стали.

В рамках настоящей работы было проведено анкетирование атомных станций по применению источника Селен-75 при радиографическом контроле оборудования и трубопроводов АЭУ, в результате чего установлено следующее:

- гамма-дефектоскопы с источником Селен-75 используются для контроля на двух АЭС;
- атомные станции, не имеющие гамма-дефектоскопы с источником Селен-75, хотели бы приобрести его и использовать при контроле сварных соединений толщиной до 40 мм по стали.

Согласно анкетным данным необходимость практического внедрения гамма-дефектоскопов с источником Селен-75 вызвана тем, что значительная часть оборудования АЭС, которая подлежит радиографическому контролю, имеет радиационную толщину до 40 мм, в частности камера сетевой воды, подогреватель высокого давления, пароперегреватель, сепаратор-сборник и т.д. Однако в настоящее время практическое применение источника Селен-75 для контроля сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС радиационной толщиной до 40 мм ограничено требованиями п. 6.1 ПНАЭ Г-7-017-89 [1], регламентируемой использованием конкретных типов источников излучения и радиографических пленок. Из анализа данных, приведенных в работе [1], следует, что радионуклидный источник излучения Селен-75 допущен к использованию при радиографическом контроле сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС радиационной толщиной 5–20 мм на радиографические пленки типа РТ-4М, РТ-4Ш и РТ-5.

Одним из аспектов, способствующих к широкому внедрению радионуклидного источника Селен-75 и расширению диапазона контролируемых толщин до

30 мм, являются требования ГОСТ 20426-82 [2].

Из анализа данных работы [2] следует, что радионуклидный источник Селен-75 можно использовать при контроле объектов радиационной толщиной от 5,0 до 30,0 мм по стали.

Таким образом, ГОСТ 20426-82 [2] регламентирует возможность проведения контроля сплавов на основе железа радиационной толщиной до 30 мм, а ПНАЭ Г-7-017-89 [1] – до 20 мм, а для практической оценки возможности расширения диапазона контролируемых толщин возможно установить после проведения исследовательских и экспериментальных работ.

2. Теоретическое обоснование расширения диапазона контролируемых толщин от 5 до 40 мм по стали с использованием радионуклидного источника Селен-75 с помощью оценки радиационных контрастов

Для оценки расширения диапазона контролируемых толщин от 5 до 40 мм по стали с использованием радионуклидного источника Селен-75 следует проанализировать формирование оптического контраста с последующим расчетом порогового контраста выявления изображений дефектов на радиографическом снимке [3].

Пусть на плоское изделие толщиной d , имеющее дефект в виде воздушной плоскости с размером в направлении просвечивания Δd , падает широкий пучок гамма-излучения с мощностью дозы P_0 . Мощность дозы P , воздействующей на радиографическую пленку, будет определяться суммарной мощностью дозы прямого и рассеянного излучения.

Мощностью дозы прямого излучения после прохождения слоя вещества толщиной X см определяется выражением

$$P_{\text{п}} = P_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления излучения, см^{-1} .

Таким образом, для мощности дозы под дефектным и бездефектным участком – $P_{\text{д}}$ и P можно записать:

$$P_{\text{д}} = P_{\text{п.д}} + P_{\text{р.д}} = P_0 e^{-\mu(d - \Delta d)} + P_{\text{р.д}}; \quad (2)$$

$$P = P_{\text{п}} + P_{\text{р}} = P_0 e^{-\mu d} + P_{\text{р}} = B \times P_0 e^{-\mu d}, \quad (3)$$

где $P_{\text{р.д}}$ и $P_{\text{р}}$ – мощность дозы рассеянного излучения, воздействующего на пленку соответственно под дефектным и бездефектным участками изделия; B – до-

зовый фактор накопления излучения.

Относительное изменение мощности дозы воздействующего на радиографическую пленку излучения, вызванное наличием дефекта в изделии, т.е. радиационный контраст дефекта может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{P} &= \frac{P_d - P}{P} = \frac{(P_{п.д} + P_{р.д}) - (P_{п.} + P_{р.})}{P} = \\ &= \frac{P_{п.д} - P_{п.}}{P} + \frac{P_{р.д} - P_{р.}}{P} = \\ &= \frac{P_0 e^{\mu d} \times (e^{\mu \Delta d} - 1)}{B \times P_0 e^{\mu d}} + \frac{P_{р.д} - P_{р.}}{P} = \\ &= \frac{e^{\mu \Delta d} - 1}{B} + \frac{\Delta P_r}{P}. \end{aligned} \quad (4)$$

При принятом в настоящее время в радиационной дефектоскопии допущении, что изображение дефекта на преобразователе создается лишь прямым излучением, а рассеянное только вуалирует получаемое изображение, т.е. $P_{р.д} = P_{р.}$, выражение радиационного контраста имеет вид

$$\Delta P/P = (e^{\mu \Delta d} - 1)/B. \quad (5)$$

Следует отметить, что вкладом рассеянного излучения в формирование изображений, т.е. вторым членом выражения (4), не всегда можно пренебрегать, поскольку, например, при просвечивании больших толщин металла для близкого к радиографической пленки расположения дефектов этот вклад может быть сравним с вкладом прямого излучения и даже превышать его.

При условии $\mu \Delta d \ll 1$, что обычно соблюдается в практике радиационной дефектоскопии, $e^{\mu \Delta d}$ можно разложить в ряд и ограничиться двумя первыми членами разложения: $e^{\mu \Delta d} \approx 1 + \mu \Delta d$, тогда выражение (5) запишется следующим образом:

$$\Delta P/P = \mu \Delta d/B. \quad (6)$$

Радиационный контраст преобразуется на радиографической пленке в контраст изображения дефекта ΔD , т.е. в разность оптических плотностей изображения дефектного D_d и бездефектного D участков контролируемого изделия:

$$\Delta D = D_d - D. \quad (7)$$

Чтобы связать радиационный контраст $\Delta P/P$ с контрастом изображения дефекта на радиографическом снимке, воспользуемся уравнением характеристической кривой:

$$D = \gamma_D \cdot \lg Pt + k, \quad (8)$$

где $(\gamma_D = dD/d(\lg Pt))$ – контрастность пленки при оптической плотности D ; Pt – экспозиционная доза воздействующего на пленку излучения; $k = \text{const}$, зависящая от оптической плотности вуали.

Вызванное наличием дефекта относительно небольшое изменение мощности экспозиционной дозы вызывает соответствующее изменение оптической плотности снимка под дефектным участком изделия. Принимая, что изображение дефекта формируется неизменяющим свою энергию (относительно энергии излучения под дефектным участком) прямым излучением, и учитывая, что это изображение образуется в течение всего времени t просвечивания (т.е. $t = \text{const}$), из выражений (6) и (8) следует

$$\Delta D = 0,43 \gamma_D \times \Delta P/P = 0,43 \gamma_D \times \mu \Delta d / B. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует выражение для лучевого размера дефекта в виде небольшой воздушной полости

$$\Delta d = 2,3 \times (\Delta D/\gamma_D) \times (B/\mu) = K_p \times (B/\mu). \quad (10)$$

Здесь следует отметить, что определяемая через параметры радиографической пленки величина $K_p = 2,3 \times (\Delta D/\gamma_D)$ – пленочный радиационный контраст в общем случае будет отличаться от радиационного контраста $\Delta P/P$, понимаемого как вызванное наличием дефекта в изделии относительное приращение действующей на пленку экспозиционной дозы излучения, поскольку плотность почернения пленки зависит не только от мощности действующей на нее экспозиционной дозы, но и от спектрального состава излучения, который под дефектным и бездефектным местами контролируемого изделия может быть различным.

Поскольку на практике имеют дело с конечными величинами ΔD и Δd , то под γ_D в выражениях (9) и (10) следует понимать среднюю контрастность радиографической пленки в диапазоне оптических плотностей изображений дефекта и близкорасположенного бездефектного участка контролируемого изделия (диапазоне оптических плотностей дефект-фон).

Если дефект заполнен не воздухом, для которого линейный коэффициент ослабления $\mu_d \cong 0$, а веществом с $\mu_d \neq 0$ (например, шлаком), то в уравнении (2) вместо $P_0 e^{-\mu(d-\Delta d)}$ необходимо использовать $P_0 e^{-\mu(d-\Delta d)} \times P_0 e^{-\mu_d \Delta d}$, тогда выражение для оценки размера дефекта примет вид

$$\begin{aligned} \Delta d &= 2,3 \times (\Delta D/\gamma_D) \times [(B/(\mu - \mu_d))] = \\ &= K_p \times B/(\mu - \mu_d). \end{aligned} \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) получены без учета влияния общей нерезкости, снижающей контраст изображений дефектов малых поперечных размеров, и при упрощающих допущениях: рассеянное излучение не участвует в формировании изображений, лучевые размеры дефектов относительно малы ($\mu \Delta d \ll 1$), спектральный состав излучения, воздействующего на радиографическую пленку, под дефектным и бездефектными местами изделия одинаков.

Для оценки контраста оптического изображения ΔD выражения (10) и (11) следует представить в следующем виде:

$$\Delta D = \frac{\gamma \mu \Delta d}{2,3 B}; \quad (12)$$

$$\Delta D = \frac{\gamma(\mu - \mu_d) \Delta d}{2,3 B}. \quad (13)$$

Величина оптического контраста ΔD при расшифровке изображений дефектов на снимке должна отвечать следующему требованию:

$$\Delta D \geq \Delta D_{\text{пор}}, \quad (14)$$

где $\Delta D_{\text{пор}}$ – минимальный оптический контраст изображения на радиографическом снимке, видимый человеческим глазом, составляющий 0,006 Б при освещенности экрана негатоскопа 100 кд/м².

Таким образом, для оценки контраста радиографического изображения необходимо использовать систему уравнений (12), (13) и (14), которая позволит оценить предельную величину оптического контраста радиографического изображения дефекта, выявленного на снимке.

3. Расчет оптического контраста радиографического изображения в диапазоне контролируемых толщин от 5 до 40 мм по стали с использованием радионуклидных источников Селен-75 и Иридий-192

Для расчета оптического радиографического контраста ΔD целесообразно проанализировать основные технологические параметры радиографического контроля с использованием радионуклидных источников Селен-75 и Иридий-192.

Из анализа данных работы [3] следует, что спектр излучения радионуклидного источника Селен-75 изменяется от 66 до 401 кэВ, имеет две явно выраженные спектральные линии: 130 и 280 кэВ на уровне 60% от максимальной интенсивности излучения. Таким образом, для расчета оптического радиографического контраста следует принять энергию излучения источника Селен-75 (в первом приближении) равной 280–300 кэВ.

Спектр излучения Иридия-192 по данным работы [3] изменяется от 206 до 612 кэВ и имеет две наиболее значимые спектральные линии на уровне 80% от максимального значения с энергиями излучения спектральных линий порядка 312 кэВ и со спектральной линией с энергией порядка 480 кэВ. Для расчета оптического контраста радиографического изображения дефектов целесообразно принять спектральную линию порядка 500 кэВ в качестве базовой, поскольку вклад рассеянного излучения в формирование изображения этой линии излучения составляет порядка 80–90 от интенсивности первичного излучения.

Расчет оптического контраста радиографического изображения дефектов типа пор проводился по формуле (12), для дефектов типа шлаковых включений – по (13).

Для шлаковых включений величина линейного коэффициента ослабления μ , см⁻¹, на 1,4 больше, чем

для дефектов типа пор [3].

При расчете оптических контрастов радиографического изображения дефектов типа пор, размер которых выбран равным чувствительности контроля по ПНАЭ Г-7-010-89 [4], было сделано следующее допущение:

1) в качестве регистратора излучения – радиографическая пленка с коэффициентом контрастности $\gamma = 4,5$, в качестве источника излучения – Иридий-192, диапазон контролируемых толщин – от 5 до 20 мм по стали;

2) в качестве регистратора излучения – радиографическая пленка с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,0$, в качестве источника излучения – Селен-75, диапазон контролируемых толщин – от 5 до 40 мм по стали.

Аналогично был проведен расчет величины оптического контраста радиографического изображения величины Δd , равным допустимым наибольшим размером одиночного включения при использовании радионуклидных источников Селен-75 и Иридий-192, радиографических пленок с коэффициентами контрастности γ , равными 4,0; 4,5; 5,0; 5,4 в диапазоне контролируемых толщин от 5 до 40 мм по стали.

Таким образом, приведенные данные расчета оптического контраста радиографического изображения дефектов при использовании радионуклидного источника Селен-75 позволили установить следующее:

– оптический контраст радиографического изображения дефектов при использовании радиографических пленок с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,0$ и $\gamma = 5,4$ для радионуклидных источников Селен-75 и Иридий-192 имеет явно выраженное максимальное значение, при этом наблюдается его рост при радиационной толщине 20 мм, а затем идет плавное понижение;

– оптический контраст радиографического изображения дефектов при использовании радионуклидных источников Селен-75 выше в 2 раза, чем при использовании источника Иридий-192;

– оптический контраст радиографического изображения дефектов имеет максимальное значение при использовании источника Селен-75 в диапазоне контролируемых толщин от 5 до 20 мм по стали с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,4$, а в диапазоне контролируемых толщин от 20 до 40 мм по стали с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,0$.

– в диапазоне контролируемых толщин от 5 до 20 мм по стали следует использовать радиографическую пленку с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,4$; радиационной чувствительностью $S_{0,85 + d_0} = 3,0 \text{ P}^{-1}$ типа «Структурикс» Д4;

– в диапазоне контролируемых толщин от 20 до 40 мм по стали следует использовать радиографическую пленку с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,0$; радиационной чувствительностью $S_{0,85 + d_0} = 10,0 \text{ P}^{-1}$ типа «Структурикс» Д7.

Картина принципиально изменяется при оценке оптических контрастов изображений, равных удвоенной чувствительности радиографического контроля при коэффициентах контрастности $\gamma = 4,5$ и $\gamma = 5,4$ (рис. 1, 2).

Из анализа расчётных данных (см. рис. 1, 2) оптических контрастов радиографических изображений дефектов, сенситометрических и структурометриче-

ских свойств радиографических пленок [5], технических параметров радионуклидных источников Селен-75 [6-8] следует:

– радионуклидные источники Селен-75 позволяют выявлять дефекты размером от 0,1 до 0,5 мм различной конфигурации в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-010-89 [4] для трех категорий сварных соединений, следовательно, радионуклидный источник Селен-75 может использоваться при радиографическом контроле оборудования и трубопроводов АЭС в диапазоне контролируемых толщин от 5 до 40 мм по стали;

– для радиографического контроля оборудования и трубопроводов АЭС в диапазоне толщин от 5 до 40 мм по стали целесообразно применять гамма-дефектоскоп Гаммамат-SE4P с радионуклидным источником Селен-75, с размером фокусного пятна 3,0×3,0 мм;

– радиографические пленки целесообразно выбирать в зависимости от радиационной толщины при использовании в качестве источников излучения Селен-75:

свыше 5 до 20 вкл. – STRUCTURIX Д4, Д5;

INDUSTREX MX125;

свыше 20 до 40 вкл. – STRUCTURIX Д5, Д7; INDUSTREX MX125, Т 200.

4. Экспериментальное подтверждение возможности радиографического контроля с использованием радионуклидного источника Селен-75 в диапазоне контролируемых толщин от 5 до 40 мм по стали

Целью испытаний являлось определение возможности применения радионуклидного источника Селен-75 для радиографического контроля основного металла и сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС в диапазоне радиационных толщин от 20 до 40 мм.

Производственные испытания проводились в лабораторном помещении Калининской атомной станции ФГУП концерн «Росэнергоатом» филиал «Калининская атомная станция» специалистами ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» совместно со специалистами ОДМ ПУ НМК филиала «Калининская атомная станция» ФГУП концерн «Росэнергоатом».

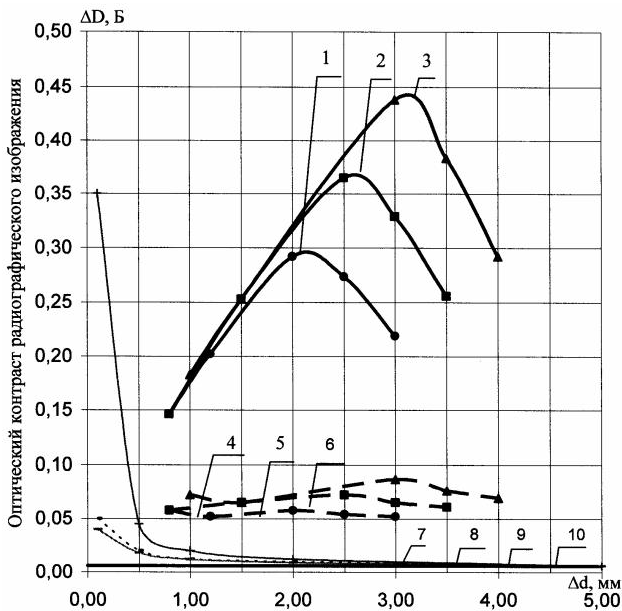


Рис. 1. Зависимость оптического контраста

радиографического изображения от размера допустимого наибольшего размера одиночного включения несплошности, равной чувствительности радиографического контроля: 1, 2, 3 – Селен-75 при использовании радиографической пленки с коэффициентом контрастности $\gamma = 4,5$; чувствительность контроля Δd для I, II, III категорий по ПНАЭГ 7-010-89 для величины допустимого наибольшего размера одиночного включения; 4, 5, 6 – Иридий-192 при использовании радиографической пленки с коэффициентом контрастности $\gamma = 4,0$; чувствительность контроля Δd для I, II, III категорий по ПНАЭГ 7-010-89 для величины допустимого наибольшего размера одиночного включения; 7 – контраст изображения для цилиндрических отверстий диаметром \varnothing ; 8 – контраст изображения для проволочного эталона диаметром \varnothing и длиной $\ell \geq 10$ мм по ГОСТ 7512-82; 9 – контраст изображения для прямоугольной канавки шириной b и длиной $\ell \geq 10$ мм; 10 – пороговый контраст изображения дефекта различаемого человеческим глазом при освещенности экрана 100 Кд/м² на радиографическом снимке

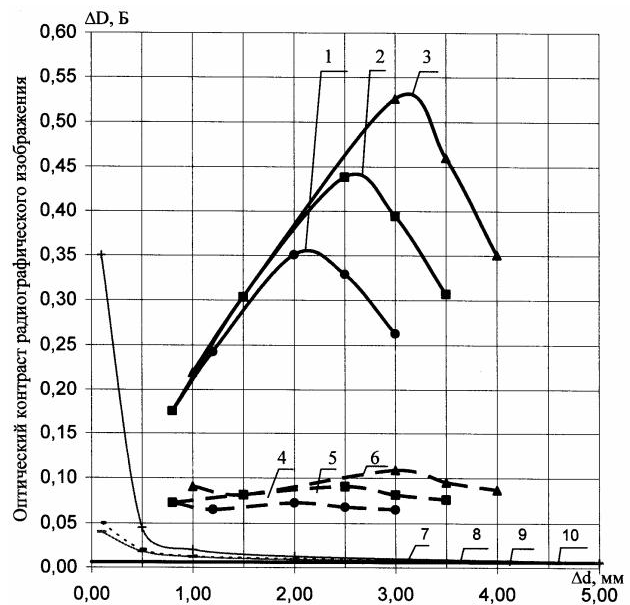


Рис. 2. Зависимость оптического контраста

радиографического изображения от размера допустимого наибольшего размера одиночного включения несплошности, равной чувствительности радиографического контроля: 1, 2, 3 – Селен-75 при использовании радиографической пленки с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,4$; чувствительность контроля Δd для I, II, III категорий по ПНАЭГ 7-010-89 для величины допустимого наибольшего размера одиночного включения; 4, 5, 6 – Иридий-192 при использовании радиографической пленки с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,0$; чувствительность контроля Δd для I, II, III категорий по ПНАЭГ 7-010-89 для величины допустимого наибольшего размера одиночного включения; 7 – контраст изображения для цилиндрических отверстий диаметром \varnothing ; 8 – контраст изображения для проволочного эталона диаметром \varnothing и длиной $\ell \geq 10$ мм по ГОСТ 7512-82; 9 – контраст изображения для прямоугольной канавки шириной b и длиной $\ell \geq 10$ мм; 10 – пороговый контраст изображения дефекта, различаемого человеческим глазом при освещенности экрана 100 Кд/м² на радиографическом снимке

В качестве объекта контроля использовались стандартные образцы ТОК-20 и ТОК-40 и сварные соединения из низколегированной стали 09Г2С с толщиной основного металла 24, 30, 36 и 40 мм.

В качестве источника излучения использовался гамма-дефектоскоп: РИД-Се 4/Р № 122, заряженный радиоактивным источником Селен-75 типа СР 17.412 активностью на день испытаний 7,73 гр.экв. Ра и размером активной части 3,0×3,0 мм.

Для расшифровки снимков использовался негатоскоп НС 85×400-5003 со встроенным денситометром ДУ 5003.

Для проявления снимков применялись:

– проявочная машина фирмы KODAK INDUSTREX модель М35;

– проявитель G128;

– фиксаж G328.

В качестве регистратора применялась:

– радиографическая пленка типа «Структурикс» Д7 (васукас);

– усиливающие экраны свинцовые толщиной 0,09 мм.

Радиографический контроль выполнялся в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-017-89 и Методических рекомендаций МР-06-2006.

Результаты испытаний приведены в **таблице**.

Проведенные испытания показали работоспособность технологии радиографического контроля оборудования и трубопроводов АЭС с использованием в качестве ИИИ радиоактивного источника Селен-75 в диапазоне контролируемых толщин от 20 до 40 мм по стали, в результате которых было установлено следующее:

- Чувствительность радиографического контроля, полученная при просвечивании объектов, соответствует требованиям ПНАЭ Г-7-010-89 для категории I сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС с толщиной основного металла 20–40 мм.

Результаты радиографического контроля образцов при проведении испытаний технологии радиографического контроля с использованием радиоактивного источника Селен-75

Тип образца	Радиационная толщина, мм	Чувствительность радиографического контроля, мм		Оптическая плотность снимков, Б	Время экспозиции	Примечание
		требуемая по ПНАЭ Г-7-010-89	полученная при испытаниях			
1. ТОК-20	20	0,3	0,32	3,02	8	Соотв.
2. ТОК-40	40	0,5	0,5	2,23	20	Соотв.
3. Сварной образец:						
с проточкой	25	0,4	0,4	2,9		
25×31сп	28	0,4	0,4	2,67	11	Соотв.
28×31бп	31	0,5	0,4	2,32		
4. Сварной образец	40	0,5	0,5	2,10	20	Соотв.
5. Сварной образец:						
– основной металл	38	0,5	0,4	2,38	20	Соотв.
– сварной шов	42	0,6	0,62	2,10	20	
6. Стальная пластина	23	0,4	0,32	2,75	9	Соотв.

Примечание. Фокусное расстояние составляло 550 мм.

- Оптическая плотность радиографических снимков в диапазоне толщин 20–40 мм соответствует требованиям ПНАЭ Г-7-017-89.

- Неравномерность распределения оптической плотности по рабочему полю снимков не превышает 1,0 Б, что соответствует требованиям ПНАЭ Г-7-017-89.

Выводы

1. Из анализа расчетных данных оптических контрастов радиографического изображения дефектов следует:

- оптический контраст радиографического изображения дефектов при использовании радиографических пленок с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,0$ и $\gamma = 5,4$ для радиоактивных источников Селен-75 и Иридий-192 имеет явно выраженное максимальное значение, при этом наблюдается его рост при радиационной толщине 20 мм, а затем идет плавное понижение;

- оптический контраст радиографического изображения дефектов при использовании радиоактивных источников Селен-75 выше в 2 раза, чем при использовании источника Иридий-192;

- оптический контраст радиографического изображения дефектов имеет максимальное значение при использовании источника Селен-75 в диапазоне контролируемых толщин от 5 до 20 мм по стали с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,4$, а в диапазоне контролируемых толщин от 20 до 40 мм по стали с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,0$.

2. Оценка оптических контрастов радиографических изображений дефектов по теоретической модели формирования радиационных изображений показала принципиальную возможность расширения диапазона контролируемых толщин до 40 мм по стали с использованием радиоактивного источника Селен-75.

3. Анализ существующих в настоящее время гамма-дефектоскопов с радиоактивными источниками Селен-75 по техническим параметрам и с учетом специфики контроля оборудования и трубопроводов АЭС позволил выбрать в качестве базовой модели гамма-дефектоскоп типа РИД-Се4Р активностью до 100 Ки.

4. Теоретическая оценка оптических контрастов радиографических изображений дефектов при использовании радиоактивного источника Селен-75 позволила определить основные параметры контроля:

- тип гамма-дефектоскопа: РИД-Се4Р;

- размер фокусного пятна: 3,0×3,0 мм;

- активность источника излучения: 100 Ки;

- тип радиографической пленки: «Структурикс» Д7 или ее аналог.

5. Данные расчета оптического контраста радиографического изображения дефектов при использовании радиоактивного источника Селен-75 позволили установить следующее:

- в диапазоне контролируемых толщин от 5 до 20 мм по стали следует использовать радиографическую пленку

ку с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,4$; радиационной чувствительностью $S_{0,85 + \Delta\sigma} = 3,0 \text{ P}^{-1}$ типа «Структурикс» Д4;

– в диапазоне контролируемых толщин от 20 до 40 мм по стали следует использовать радиографическую пленку с коэффициентом контрастности $\gamma = 5,0$; радиационной чувствительностью $S_{0,85 + \Delta\sigma} = 10,0 \text{ P}^{-1}$ типа «Структурикс» Д7.

Авторы настоящей работы благодарят Злобина Н.Н. – представителя ООО «Подольский машиностроительный завод», специалистов Калининской АЭС Иванова А.В., Зеленина А.В. за участие в обсуждении результатов контроля, а также предоставление своего оборудования для проведения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. ПНАЭ Г-7-017-89 Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов) сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭС.
2. ГОСТ 20426-82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные, область применения.
3. Румянцев С.В., Штань А.С. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. М.: Энергоиздат, 1982.
4. ПНАЭ Г-7-010-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля.
5. BS EN 584-1:1995. Неразрушающий контроль – промышленная радиографическая пленка. Ч. 1: Классификация систем пленок для промышленной радиографии.
6. ТУ 95.2536-94. Источники гамма-излучения закрытые на основе радионуклида Селен-75 типа СР. Технические условия.
7. ГОСТ Р 50629-93. Радиоактивное вещество особого вида. Общие технические требования и методы испытаний.
8. НП-053-04. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. М., 2004.

List of literature

1. PNAE G-7-017-89 The unified methods of the basic material management (semiproducs) of the welded connections and facings in the APP equipment and pipelines.
2. State Standard 20426-82. Nondestructive control. The radiation methods of the defectoscopy, area of application.
3. Rumyantsev S.V., Shtan A.S. The reference book about the radiation methods of the nondestructive control. M.: Energyizdat, 1982.
4. PNAE G-7-010-89. Equipment and pipelines of the nuclear electric power installations. Welded connections and facings. Management rules.
5. BS EN 584-1:1995. Nondestructive control-industrial radiographic film. Part 1: The classification of the film systems for industrial radiography.
6. TU 95.2536-94. The source of gamma radiation closed due to the radioactive nuclide Selen-75 of SR type. Technical conditions.
7. State Standard 50629-93. Radioactive substance of the special type. The general technical requirements and testing methods.
8. NP-053-04. Safety regulations in transporting the radioactive substances. M., 2004.