



ДЕКОПОВ
Андрей Семенович
ведущий научный
сотрудник (ОАО НИИ
технической физики
и автоматизации)
e-mail: dekopov@vniitfa.ru

Оптимизация метода радиографического контроля ответственных сварных соединений патрубков Ду-250, Ду-300 корпусов ядерных реакторов

А.С. Декопов

Метод радиографического контроля тел вращения с малым проходным сечением по участкам системой встречно-пересекающихся фронтальных пучков излучения из внутренней полости оптимизирован к геометрии контроля относительно регламента геометрической нерезкости. Он адаптирован к эффекту генерации обратно-рассеянного излучения фрагментами конструкции сварного стыка в зоне детектирования и формализован в аналитические выражения, позволяющие прогнозировать и выбирать параметры контроля в зависимости от условий контроля и мощности экспозиционной дозы радиационного фона, создаваемого обратно-рассеянным излучением, и наведенной радиацией.

Этот способ реализован в дискретно-поворотной радиационной головке, обеспечивающей одновременный выпуск и перекрытие трех встречно-пересекающихся фронтальных пучков излучения.

Ключевые слова: радиографический контроль, тела вращения, фронтальные встречно-пересекающиеся пучки излучения.

Optimization of method for radiographic examination of critical welded joints of pipes Tu-250, Tu-300 of nuclear reactors buildings

A.S. Dekopov

The method for radiographic examination of solids of revolution with a small bore system in parts by back-to-front intersecting beams of radiation from the inner cavity is optimized to the geometry of examination according to the rules of geometric blur. It is adapted to the effect of generation of back-scattered light by fragments of the welded joints structure in the area of detection and formalized into the analytical expressions permitting to predict and select the examination parameters depending on examination conditions and exposure rate of background radiation produced by back-scattered and induced radiation.

This method is implemented in the discrete-swivel radiation head, providing a simultaneous release and overlap of three back-to-front intersecting radiation beams.

Keywords: radiography, solids of revolution, back-to-front intersecting radiation beams.

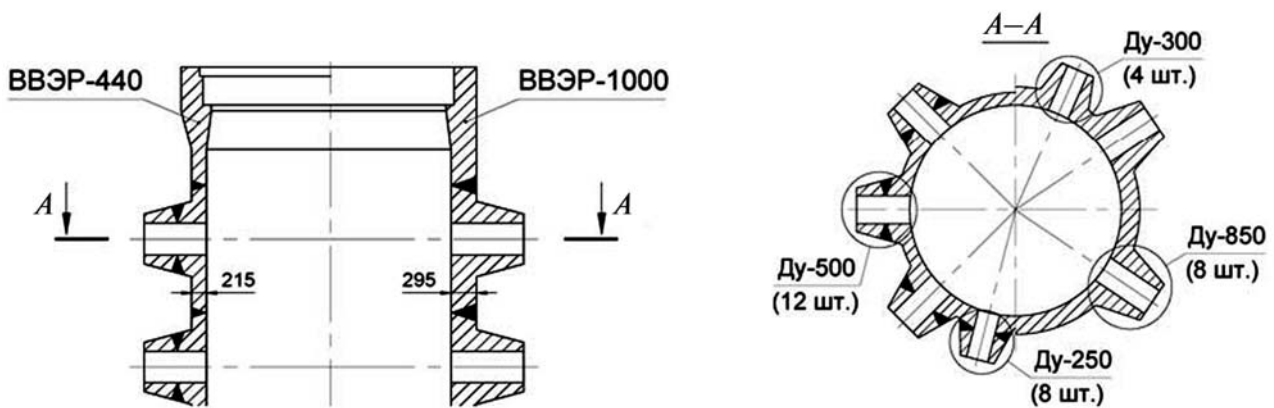


Рис. 1. Патрубковая зона корпусов ЯР ВВЭР-440 и ВВЭР-1000

Высокие мощности ядерных энергетических установок определяют необходимость соответствующих прочностей сварных соединений первого контура АЭС и, в частности, сварных стыков патрубков корпусов ядерных реакторов (ЯР) (рис. 1) за счет значительных толщин используемых материалов при относительно малых проходных сечениях.

В свою очередь технология дефектоскопии реальных изделий нормативно регламентирована правилами контроля по параметру геометрической нерезкости, что является причиной ограничений при контроле сварных соединений полых тел вращения панорамным методом на малых фокусных расстояниях. Практика дефектоскопии для этих случаев предписывает контроль изделий фронтальным пучком излучения по участкам через одну либо через две стенки. При этом следует отметить, что производительность контроля полых тел вращения малого диаметра по участкам с использованием фронтального пучка излучения также может быть существенно ограничена нормативными требованиями изменения плотности почернения между центром и краем снимка.

Методика выбора и оценка параметров радиографического контроля панорамным и фронтальным способом рассмотрены в работах [1–3], причем существующий метод контроля изделий фронтальным пучком излучения по участкам в настоящее время преимущественно решает задачи поочередного просвечивания объекта контроля по участкам с использованием одного излучателя и одного детектора.

В условиях планово-предупредительных ремонтов (ППР) АЭС задачи контроля существенно осложнены наличием высоких уровней радиационного фона осадочных продуктов коррозии на стенках трубопроводов и собственным излучением основного оборудования, активированного нейтронными потоками.

В работах [2, 4] показано, что при уровне радиационного фона до 500 мкР/с с энергией излучения до 1,5 МэВ, проведение радиографического контроля сварных соединений узлов ЯР возможно. Однако, в этом случае необходимо применять источники излучения существенно большей активности, чем при радиографии в обычных условиях, что влечет за собой увеличение размеров активной части источника излучения, ухудшение геометрии контроля и, соответственно, чувствительности метода контроля.

Изменение относительной чувствительности в условиях радиационного фона согласно работе [2] по сравнению с чувствительностью в его отсутствии графически отображено на рис. 2. На рисунке видно, что с ростом фактора $P_{\text{ф}}/P_{\text{и}}$ (шум/сигнал), где $P_{\text{ф}}$ и $P_{\text{и}}$ — мощности экспозиционной дозы радиационного фона и рабочего источника излучения соответственно, чувствительность ухудшается в линейной зависимости. При $P_{\text{ф}}/P_{\text{и}} = 1$ чувствительность ухудшается в 2 раза по отношению к соответствующему значению чувствительности в отсутствии фона.

Последующий рост фактора шум/сигнал в классической радиографии (с применением в качестве детекторов рентгеновской пленки) требует проведения специальных мероприятий

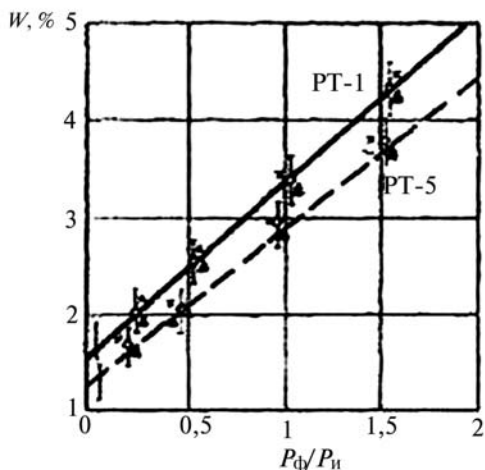


Рис. 2. Чувствительность радиографического метода контроля в условиях радиационного фона для высококонтрастных и высокочувствительных пленок РТ-5 и РТ-1

для получения необходимых значений чувствительности, например, фотохимического ослабления полученных снимков, либо их репродуцирования на высококонтрастные фотоматериалы. В случае применения специализированных регистрирующих и считывающих устройств возможна компьютерная обработка результатов контроля и определения дефектов в «зоне интереса» в иных диапазонах фактора $P_{\phi}/P_{и}$. Однако, использование подобных аппаратных комплексов в условиях монтажа и ремонта АЭС существенно ограничено их мобильностью и нормативно-технологическими требованиями их применения.

Таким образом, при проведении контроля в условиях радиационного фона толстостенных патрубков корпусов ЯР с малыми проходными сечениями основной проблемой радиографического метода контроля является приведение значений геометрической нерезкости в соответствие с требованиями правил контроля. Данная проблема может быть решена одним из трех известных способов:

- 1) уменьшением размера активной части источника;
- 2) увеличением удельной активности источника;
- 3) увеличением фокусного расстояния.

Уменьшение размеров активной части источника автоматически ведет к снижению его интегральной активности и в этой связи приво-

дит к росту фактора шум/сигнал, что, в свою очередь, ведет к ухудшению чувствительности.

Увеличение удельной активности источника является наиболее перспективным для процесса контроля, но лимитировано существующей номенклатурой источников излучения и отсутствием нового ряда стандартных источников с высокой удельной активностью.

Предпочтительным методом улучшения геометрии контроля в условиях радиационного фона является увеличение фокусного расстояния, а для максимального повышения производительности контроля — увеличение количества фронтальных пучков излучения в целях обеспечения многопозиционного контроля. В этой связи был разработан способ просвечивания полых тел вращения нечетным количеством встречно-пересекающихся фронтальных пучков излучения из нескольких позиций (рис. 3), который предварительно был аналитически исследован [1] и при количественной оценке подтвердил достаточную стабильность основных радиографических параметров и согласованность с нормативными требованиями правил контроля [5]. Аналитические оценки в указанной работе приведены применительно к контролю сварных соединений патрубков Ду-250 и Ду-300, корпусов ЯР ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, а предложенные аналитические зависимости в аналогичных случаях прогнозирования и оценки основных параметров контроля могут быть рекомендованы в качестве оценочных критериев.

Предложенный способ обеспечивает получение требуемой чувствительности контроля,

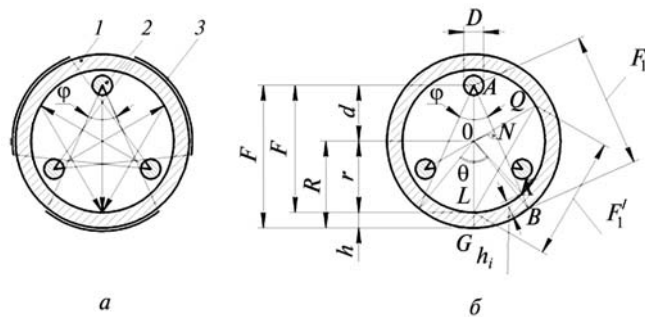


Рис. 3. Схема контроля полых тел вращения системой пучков излучения:

a — схема формирования обратно-рассеянного излучения; *б* — геометрия просвечивания;

1 — сварной стык объекта контроля;

2 — коллиматоры пучков излучения; 3 — детектор

повышение производительности метода контроля, а также снижение лучевых нагрузок на персонал и состоит в просвечивании объекта контроля системой встречно-пересекающихся фронтальных пучков излучения, создаваемых нечетным числом источников излучения, равномерно распределенных по окружности, концентричной сварному стыку объекта контроля. После завершения первого цикла просвечивания систему излучателей дискретно поворачивают в очередную позицию относительно оси вращения объекта контроля на угол θ (рис. 3, б), соответствующий контролируемому участку, установленной из соображений обеспечения оптимальной (предельно-допустимой) чувствительности.

Количество дискретных положений контроля m при этом определяют из соотношения

$$m = \frac{2\pi}{n\theta}, \quad (1)$$

где n — нечетное число источников излучения.

В связи с тем, что взаимодействие направленного пучка ионизирующего излучения с элементом объекта контроля неизбежно формирует негативно сказывающийся на чувствительности метода поток обратно-рассеянного излучения, установим аналитическую зависимость для прогнозирования ожидаемой чувствительности метода контроля в условиях генерации нескольких потоков фона обратно-рассеянного излучения согласно приведенной схеме (рис. 3, а).

В общем виде мощности экспозиционной дозы (МЭД) фона обратно-рассеянного излучения $P_{об.р.}$, генерируемого одним источником излучения, определяется зависимостью [5]:

$$P_{об.р.} = P_o \frac{a_d C \cos \psi}{F'^2 F_1'^2} \text{ [A /кг]} \text{ на расстоянии } 1 \text{ м}, \quad (2)$$

где P_o — МЭД источника излучения, А/ кг на расстоянии 1 м; a_d — дифференциальное дозовое альbedo; C — площадь рассеивания, мм²; ψ — угол падения излучения; F' и F_1' — расстояния согласно рис. 2, б, мм.

Площадь рассеивания определяется углом θ и выражается зависимостью

$$C = rb\theta, \quad (3)$$

где b — ширина контролируемой зоны, мм; r — размер согласно рис. 3, б.

Для упрощения математического аппарата принимаем $\psi = 0$ и одновременно устанавливаем, что МЭД фона обратно-рассеянного излучения $P_{об.р.}$ ослабляется материалом контролируемого изделия в K раз:

$$K = \frac{e^{m(R-r)}}{B}, \quad (4)$$

где δ — радиационная толщина упрощенно принимается в виде выражения $\delta = (R - r)^*$; R и r — размеры согласно рис. 3, б; m — линейный коэффициент ослабления излучения, см⁻¹; B — фактор накопления.

Выражая F' и F_1' через геометрические параметры изделия, запишем окончательное выражение МЭД фона обратно-рассеянного излучения от $(n - 1)$ источников излучения:

$$P_{об.р.} = (n - 1)P_o \frac{a_d B e^{-m(R-r)} b \theta}{4(r + d)^2 r \sin^2 \frac{\pi}{n}} \text{ [A /кг]}, \quad (5)$$

где d — смещение источников излучения относительно оси согласно рис. 3, б.

Согласно работе [4] чувствительность в условиях радиационного фона W_ϕ по сравнению с чувствительностью W в его отсутствии определяется выражением

$$W_\phi = W \left[\frac{\left(1 + \frac{K_\phi P_\phi}{K_n P_o B} \right)}{\left(1 - \frac{K_\phi P_\phi S}{2 K_n P_o B (S_{\max} - S)} \right)} \right], \quad (6)$$

где P_ϕ — мощность экспозиционной дозы (МЭД) излучения фона; K_ϕ и K_n — постоянные чувствительности радиографической пленки к энергии фона и рабочего источника соответственно; S — фактическая оптическая плот-

* Согласно рис. 3, б радиационная толщина δ изменяется в пределах контролируемого участка. Аналитические исследования [1] подтверждают возможность использования в расчетах $\delta = (R - r)$ вследствие ее незначительных изменений (~5...7%) в пределах полуапертуры угла коллимации ($\phi/2$).

ность почернения пленки; S_{\max} — максимальная оптическая плотность почернения применяемой радиографической пленки.

Принимая $K_{\phi} = K_i$ и учитывая выражение (4), на основании зависимости (6) запишем принципиальное аналитическое выражение чувствительности метода контроля в условиях фона обратно-рассеянного излучения ($W_{об. п}$) применительно к нашему случаю

$$W_{об. п} = W \left[\frac{\left(1 + \frac{P_{об. п} e^{m(R-r)}}{P_o B} \right)}{\left(1 - \frac{P_{об. п} e^{m(R-r)} S}{2P_o B(S_{\max} - S)} \right)} \right]. \quad (7)$$

С учетом зависимости (5) выражение (7) может быть трансформировано применительно к случаю определения чувствительности для условий фона обратно-рассеянного излучения, генерируемого $(n - 1)$ источниками излучения при взаимодействии направленных пучков излучения с фрагментами конструкции сварного стыка в зоне детектирования:

$$W_{об. п} = W \left[\frac{\left(1 + \frac{(n-1) a_d b \theta}{4(r+d)^2 r \sin^2(\pi/n)} \right)}{\left(1 - \frac{(n-1) a_d b \theta S}{8(r+d)^2 r \sin^2(\pi/n)(S_{\max} - S)} \right)} \right]. \quad (8)$$

В связи с тем, что $W_{об. п}$ не должна быть хуже значений чувствительности, требуемой правилами контроля $W_{п.к}$, условие $W_{об. п} \leq W_{п.к}$ будет задавать значение угла θ , определяющего размер просвечиваемого участка (рис. 3, б):

$$\theta_1 \leq \frac{4(r+d)^2 r \sin^2(\pi/n)(W_{п.к} - W)}{(n-1) a_d b [W + 0,5W_{п.к} S(S_{\max} - S)^{-1}]} \quad (9)$$

Чувствительность в отсутствии фона определяется известными [3] выражениями:

$$W = 0,5W_o \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4U}{W_o}} \right) [\text{мм}]; \quad (10)$$

$$W = 0,5W_o \left(1 + \sqrt{1 + \frac{400U}{W_o(R-r)}} \right) [\%], \quad (11)$$

где U — общая нерезкость изображения; W_o — чувствительность без учета влияния нерезкости

изображения, которая в свою очередь для проволочных эталонов описана известными [4] выражениями:

$$W_o = \frac{2,3S_{\min} B}{\mu} [\text{мм}], \quad (12)$$

или

$$W_o = \frac{2,3S_{\min} B}{\mu h_i} [\%], \quad (13)$$

где $h_i = \delta_i$ — значение радиационной толщины объекта контроля, для нашего случая было условно принято в виде разницы величин $(R - r)$ согласно рис. 3, б.

При этом нормативно-лимитированная компонента общей нерезкости (U) изображения — геометрическая нерезкость U_r определяется из соотношения [6]:

$$U_r = \frac{d_a(R-r)}{F - (R-r)}, \quad (14)$$

где d_a — размер активной части источника излучения.

Значение угла θ также зависит от угла коллимации пучка излучения ϕ , величина которого ограничена расположенными в сопредельных зонах коллиматорами. Угол θ применительно к этому случаю связан с углом коллимации ϕ следующим соотношением:

$$\theta_2 = 2\arccos \left[\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sqrt{1 - \frac{d^2}{R^2} \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} - \frac{d}{R} \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \right]. \quad (15)$$

Максимальное значение угла коллимации ϕ зависит от геометрических параметров изделия, количества коллиматоров n , их диаметра D и может быть описано зависимостью

$$\phi = \frac{\pi}{n} - 2\arcsin \frac{D}{4d \sin(\pi/n)}. \quad (16)$$

Таким образом, значение угла θ следует выбирать минимальным из двух, определяемых выражениями (9) и (15),

$$\theta = \min[\theta_1, \theta_2]. \quad (17)$$

В этом случае количество участков контроля, приведенное к одному фронтальному излучателю, составит

$$n = \frac{2\pi}{\theta}. \quad (18)$$

Предложенный способ контроля реализован в унифицированном аппаратном комплексе автоматизированного гамма-дефектоскопа РИД-187/213 (рис. 4) применительно к контролю сварных соединений толстостенных патрубков корпусов ЯР ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 в том числе с малым проходным сечением. За счет оптимизации параметров геометрии контроля в соответствии с нормативными ограничениями правил контроля указанный унифицированный комплекс обеспечил высокопроизводительный автоматизированный контроль качества сварных соединений патрубков большого сечения (Ду-500; Ду-850) панорамным и малого сечения (Ду-250; Ду-300) фронтальными способами.

По основным характеристикам унифицированный гамма-дефектоскоп РИД-187/213 аналогичен установкам «Дятел» и «Дятел-2,» и дополнительно оснащен съемной дискретно-поворотной радиационной головкой (рис. 5).

Параметры и результаты контроля патрубков Ду-250 и Ду-300 с использованием унифициро-

ванного гамма-дефектоскопа РИД-187/213 приведены в табл. 1.

Производительность фронтального способа просвечивания полых тел вращения малого диаметра по участкам методом встречно-пересекающихся пучков излучения может быть существенно ограничена регламентом ПК1514—72 [5] в отношении искажения размеров изображения дефектов, а также изменения плотности почернения между центром и краем снимка согласно схеме просвечивания (см. рис. 3).

В этой связи представленный способ контроля [8] подвергается анализу с определением области возможного применения, установлением граничных условий в виде аналитических выражений и аналитической проверкой применительно к конкретным изделиям.

Разность оптических плотностей почернения снимка между точками *С* и *В* (см. рис. 3, б) определяется известным выражением [6]:

$$\Delta S = \gamma \lg(Pt) - \gamma \lg(P_1t) = \gamma \lg \frac{P}{P_1}, \quad (19)$$

где *P* и *P*₁ — МЭД в точках *С* и *В* соответственно, [А /кг] на расстоянии 1 м; *γ* — коэффициент контрастности пленки; *t* — время экспозиции, с.

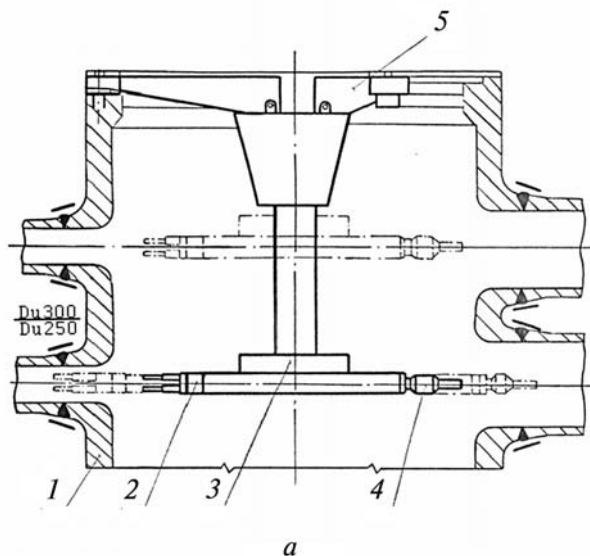


Рис. 4. Автоматизированный гамма-дефектоскоп РИД-187/213:

a — схема размещения гамма-дефектоскопа на корпусе ЯР; *б* — РИД-187/213 на монтажном стапеле;
 1 — корпус ЯР; 2 — дискретно-поворотная радиационная головка ($3\chi^{192} \text{Ir}$); 3 — штатив телескопический;
 4 — панорамная радиационная головка Co-60 ; 5 — опоры штатива

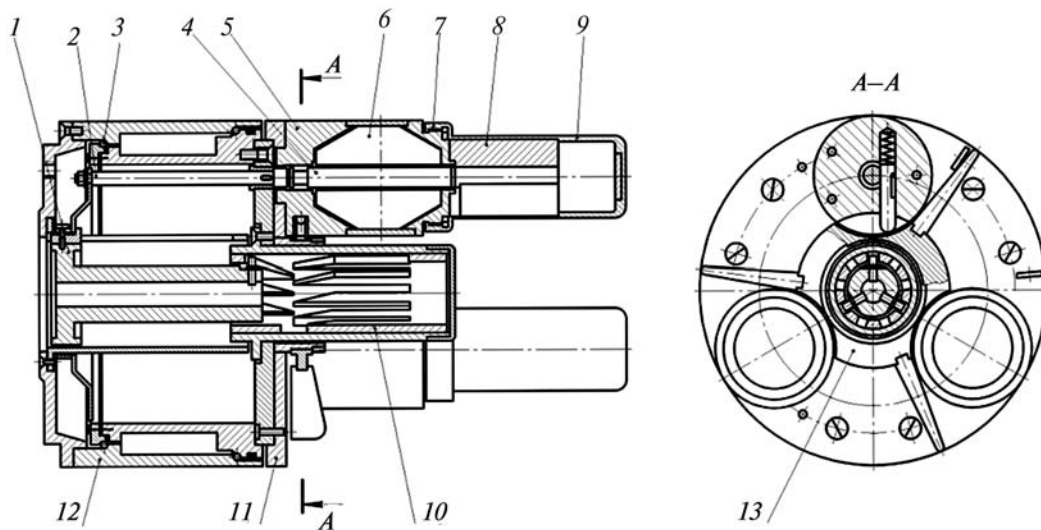


Рис. 5. Конструктивное исполнение дискретно-поворотной радиационной головки:

1 — толкатель; 2 — шток держателя источника излучения; 3 — подшипник; 4 — держатель источника излучения; 5 — корпус радиационной головки; 6 — блоки биологической защиты радиационной головки; 7, 9 — элементы корпусов коллиматоров; 8 — коллиматоры фронтальных пучков излучения; 10 — кулачковое устройство дискретного поворота радиационной головки; 11, 12 — элементы корпуса поворотной планшайбы; 13 — замковое устройство

Таблица 1

Параметры и результаты контроля патрубков Ду-250 и Ду-300

Параметр контроля	Патрубок Ду-250		Патрубок Ду-300
	Радиационная толщина h , мм	18,0	56,0
Фокусное расстояние F , мм	228,0	266,0	267,0
МЭД интегрального фона излучения с учетом альбедо P_{ϕ} , А/кг (Р/с) на 1 м	$1,3 \cdot 10^{-7}$ ($5 \cdot 10^{-4}$)	$1,3 \cdot 10^{-7}$ ($5 \cdot 10^{-4}$)	$1,2 \cdot 10^{-8}$ ($4,7 \cdot 10^{-5}$)
МЭД излучателей P_0 для условий фона номинальная, А/кг (Р/с) на 1 м	$3,9 \cdot 10^{-7}$ ($1,5 \cdot 10^{-3}$)	$3,9 \cdot 10^{-7}$ ($1,5 \cdot 10^{-3}$)	$3,9 \cdot 10^{-7}$ ($1,5 \cdot 10^{-3}$)
Размеры активной части излучателя (^{192}Ir), мм	1,5·1,5	1,5·1,5	1,5·1,5
Общая нерезкость U , мм	0,2571	0,5527	0,3950
Геометрическая нерезкость U_g , мм	0,1285	0,4	0,2565
Чувствительность в отсутствии фона, мм:			
расчетная	0,22	0,52	0,43
фактическая	0,2	0,5	0,4
Чувствительность в условиях фона, мм:			
расчетная	0,38	0,77	0,6
фактическая	0,32	0,8	0,63
Угол коллимации пучка излучения φ	4	40	40
Количество участков контроля n	9	9	9
Количество позиций контроля m :			
расчетное	~2,36	~2,4	~2,52
фактическое	3	3	3

Примечание. В условиях Нововоронежская АЭС указанной аппаратурой был произведен контроль, при котором отдельные радиографические снимки толстостенных сварных соединений аустенитного класса имели характерные неравномерности оптических плотностей в виде полос вдоль оси сварного шва. Указанные эффекты объясняются произвольным перераспределением легирующих добавок молибдена и ниобия, а также образованием транскристаллитной структуры металла, что не является причиной отбраковки снимков [7].

Согласно [9] МЭД гамма-излучения, прошедшего барьер толщиной δ , расположенный на расстоянии F от источников, определяется соотношением

$$P_{\pi} = \frac{P_0 e^{\mu \delta} B}{F^2}. \quad (20)$$

При этом разность оптических плотностей почернения может быть рассчитана по формуле

$$\Delta S = \gamma \lg \frac{F_1^2 e^{\mu \delta_1} B}{F^2 e^{\mu \delta} B_1} \quad (21)$$

где F , F_1 , δ , δ_1 — размеры, мм, согласно рис. 3, б.

В связи с незначительной разницей радиационных толщин барьера (δ и δ_1) между центром и краем снимка принимаем $B = B_1$, следовательно выражение (21) трансформируется и может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta S = \gamma \lg \frac{F_1^2}{F^2 e^{(\mu \delta_1 - \delta)}}. \quad (22)$$

Анализ выражения (22) предполагает необходимость аналитической оценки по каждому из имеющихся геометрических параметров, вследствие того, что F_1 и δ_1 оказывают степенное влияние на изменение оптической плотности радиографического снимка.

Из треугольника AOB (см. рис. 3, б), используя теорему косинусов, запишем F_1 в функции угла θ , определяющего размер участка, контролируемого одним источником за одну экспозицию:

$$F_1 = R^2 + (F - R)^2 - 2R(F - R)\cos(\pi - \theta / 2)]^{0,5}. \quad (23)$$

Толщину барьера δ_1 можно определить из треугольников AOK и AOB (см. рис. 3, б) с помощью геометрических построений, при которых из точки O на линию AB опускается перпендикуляр ON ,

$$ON = (F - R)\sin(\varphi / 2). \quad (24)$$

Решая треугольники ONK и ONB относительно катетов NK и NB , получаем выражения:

$$NB = \{R^2 - [(F - R)\sin(\varphi / 2)]^2\}^{0,5}; \quad (25)$$

$$NB = \{r^2 - [(F - R)\sin(\varphi / 2)]^2\}^{0,5}. \quad (26)$$

Разница между выражениями (25) и (26) определяет искомую величину δ_1 :

$$\delta_1 = \{R^2 - [(F - R)\sin(\varphi / 2)]^{2,0,5} - r^2 - -[(F - R)\sin(\varphi / 2)]^2\}^{0,5}. \quad (27)$$

Из рисунка 3, б согласно теореме синусов следует

$$\sin(\varphi / 2) = \frac{R}{F_1} \sin(\pi - \theta / 2). \quad (28)$$

Отсюда выражение (27) с учетом зависимости (28), а также соотношения $r = (R - \delta)$ согласно рис. 3, может быть преобразовано к следующему виду:

$$\delta_1 = \left\{ R^2 - \left[(F - R) \frac{R}{F_1} \sin(\pi - \theta / 2) \right]^2 \right\}^{0,5} - - \left\{ (R - \delta)^2 - \left[(F - R) \frac{R}{F_1} \sin(\pi - \theta / 2) \right]^2 \right\}^{0,5}. \quad (29)$$

Правильность приведенных рассуждений и выводов может быть подтверждена тем, что приравнявая $\theta / 2 = 0$ и обратив тем самым длину контролируемого участка также в ноль, получим для этого условия следующие значения выражений (22), (23) и (29) соответственно: $\Delta S = 0$; $F_1 = F$ и $\delta_1 = \delta$.

Таким образом, полученные аналитические выражения (22), (23) и (29) позволяют расчетным путем определить значения разности плотностей почернения применительно к реальным условиям радиографического метода контроля и могут быть рекомендованы в качестве граничных условий, определяющих область применения данного метода контроля.

В таблице 2–3 приведен количественный прогноз влияния геометрии контроля на основные радиографические параметры применительно к методу просвечивания по участкам фронтальными встречно-пересекающимися пучками излучения ответственных сварных стыков патрубков Ду-250 и Ду-300 соответственно.

Таблица 2

Изменения основных радиографических параметров при контроле сварных стыков патрубков Ду-250×56 системой фронтальных встречно-пересекающихся пучков излучения

Патрубок корпуса ЯР Ду = 250, $\delta_0 = 56$	$0,5\varphi_i$, град	δ_i , мм	F_i , мм	ΔS_i	$U_{ги}$, мм	U_i , мм	W_i , мм
Характеристики:							
Внешний диаметр стыка 362 мм	0	56,0	266,0	0	0,4	0,5527	0,520
	2	56,01	265,9	-0,0013	0,4001	0,5529	0,520
	4	56,04	265,8	-0,0046	0,4007	0,5534	0,520
Фокусное расстояние $F_0 = 266$ мм	6	56,09	265,5	-0,0092	0,4017	0,5543	0,521
	8	56,17	265,2	-0,0105	0,4031	0,5556	0,522
Радиус внутренний $r = 125$ мм	10	56,27	264,7	-0,0164	0,4049	0,5573	0,524
	12	56,39	264,1	-0,0236	0,4071	0,5593	0,525

Таблица 3

Изменения основных радиографических параметров при контроле сварных стыков патрубков Ду-250×18 системой фронтальных встречно-пересекающихся пучков излучения

Патрубок корпуса ЯР Ду = 250, $\delta_0 = 18$	$0,5\varphi_i$, град	δ_i , мм	F_i , мм	ΔS_i	$U_{ги}$, мм	U_i , мм	W_i , мм
Характеристики:							
Внешний диаметр стыка 286 мм	0	18,00	228,0	0	0,1285	0,2571	0,220
	2	18,00	227,9	0,0002	0,1286	0,2571	0,220
	4	18,01	227,8	0,0009	0,1288	0,2573	0,220
Фокусное расстояние $F_0 = 228$ мм	6	18,03	227,5	0,0021	0,1291	0,2575	0,220
	8	18,07	227,2	0,0038	0,1296	0,2578	0,221
Радиус внутренний $r = 125$ мм	10	18,11	226,7	0,0060	0,1302	0,2582	0,221
	12	18,15	226,1	0,0086	0,1309	0,2588	0,221
Радиационная толщина $H_0 = \delta_0 = 18$ мм	14	18,21	225,5	0,0118	0,1318	0,2594	0,222
	16	18,28	224,7	0,0154	0,1328	0,2601	0,222
Смещение источника относительно оси патрубка (эксцентриситет) $a = 85$ мм	18	18,35	223,8	0,0196	0,1340	0,2609	0,223
	20	18,44	222,9	0,0243	0,1351	0,2617	0,223
	22	18,53	221,8	0,0295	0,1367	0,2628	0,224
	24	18,63	220,7	0,0352	0,1385	0,2641	0,225
	26	18,74	219,4	0,0415	0,1401	0,2652	0,226
	28	18,86	218,0	0,0484	0,1420	0,2666	0,227
	30	18,98	216,6	0,0559	0,1441	0,2681	0,228

Таблица 4

Изменения основных радиографических параметров при контроле сварных стыков патрубков Ду-300×39 системой фронтальных встречно-пересекающихся пучков излучения

Патрубок корпуса ЯР Ду = 300, δ _о = 39	0,5φ _i , град	δ _i , мм	F _i , мм	ΔS _i	U _{гi} , мм	U _i , мм	W _i , мм
Характеристики:							
Внешний диаметр стыка 364 мм	0	39,0	267,0	0	0,2565	0,3950	0,4300
	2	39,00	266,94	−0,000	0,2566	0,3950	0,4301
	4	39,02	266,79	−0,000	0,2569	0,3953	0,4301
Фокусное расстояние F _о = 267 мм	6	39,05	266,53	−0,000	0,2572	0,3956	0,4310
	8	39,09	266,17	−0,001	0,2582	0,3964	0,4311
Радиус внутренний r = 143 мм	10	39,15	265,70	−0,001	0,2592	0,3972	0,4315
	12	39,21	265,14	−0,002	0,2603	0,3981	0,4326
Радиационная толщина h _о = δ _о = 39 мм	14	39,29	264,47	−0,003	0,2617	0,3993	0,4337
	16	39,38	263,70	−0,004	0,2633	0,4006	0,4349
смещение источника относительно оси патрубка (эксцентриситет) a = 85 мм	18	39,48	262,83	−0,005	0,2651	0,4022	0,4362
	20	39,59	261,87	−0,005	0,2671	0,4025	0,4370
	22	39,71	260,81	−0,006	0,2694	0,4058	0,4389
	24	39,84	259,65	−0,007	0,2719	0,4079	0,4404
	26	39,99	258,39	−0,008	0,2746	0,4102	0,4420
	28	40,14	257,04	−0,009	0,2776	0,4126	0,4439
	30	40,30	255,61	−0,009	0,2808	0,4153	0,4467

Аналитические выражения расчетных параметров, приведенных в табл. 2–4 даны ниже [10]:

$$\delta_1 = R^2 - [(F - R) \sin(\varphi / 2)]^{2,5} - r^2 - [(F - R) \sin(\varphi / 2)]^{2,5},$$

$$\delta_1 = \left\{ R^2 - \left[(F - R) \frac{R}{F_1} \sin(\pi - \theta / 2) \right]^2 \right\}^{0,5} - \left\{ (R - \delta)^2 - \left[(F - R) \frac{R}{F_1} \sin(\pi - \theta / 2) \right]^2 \right\}^{0,5};$$

$$F_i = [R^2 + (F - R)^2 - 2R(F - R) \cos(\pi - \theta / 2)]^{0,5};$$

$$\Delta S = y \lg \frac{F_1^2}{F^2 e^{(\mu \delta_i - \delta)}};$$

$$U_{гi} = \frac{\Phi \delta_i}{F_i - \delta_i};$$

$$U_i = U_{гi} + \frac{U_B^{2i}}{2U_{гi}} \left[1 - \exp\left(\frac{2U_{гi}}{U_B^i} \right) \right],$$

где U_и = 0,17·1,15^и;

$$W_i = \frac{0,5 \cdot 2,92 \Delta S_{\min}}{\gamma \mu \delta_i} \left\{ 1 + \left[1 + \frac{400U_i}{\delta_i} \right]^{0,5} \right\}.$$

Табулированные значения радиационной толщины (h_i = δ_i), фокусного расстояния (F), разности оптических плотностей (ΔS_i), геометрической нерезкости (U_г) и чувствительности

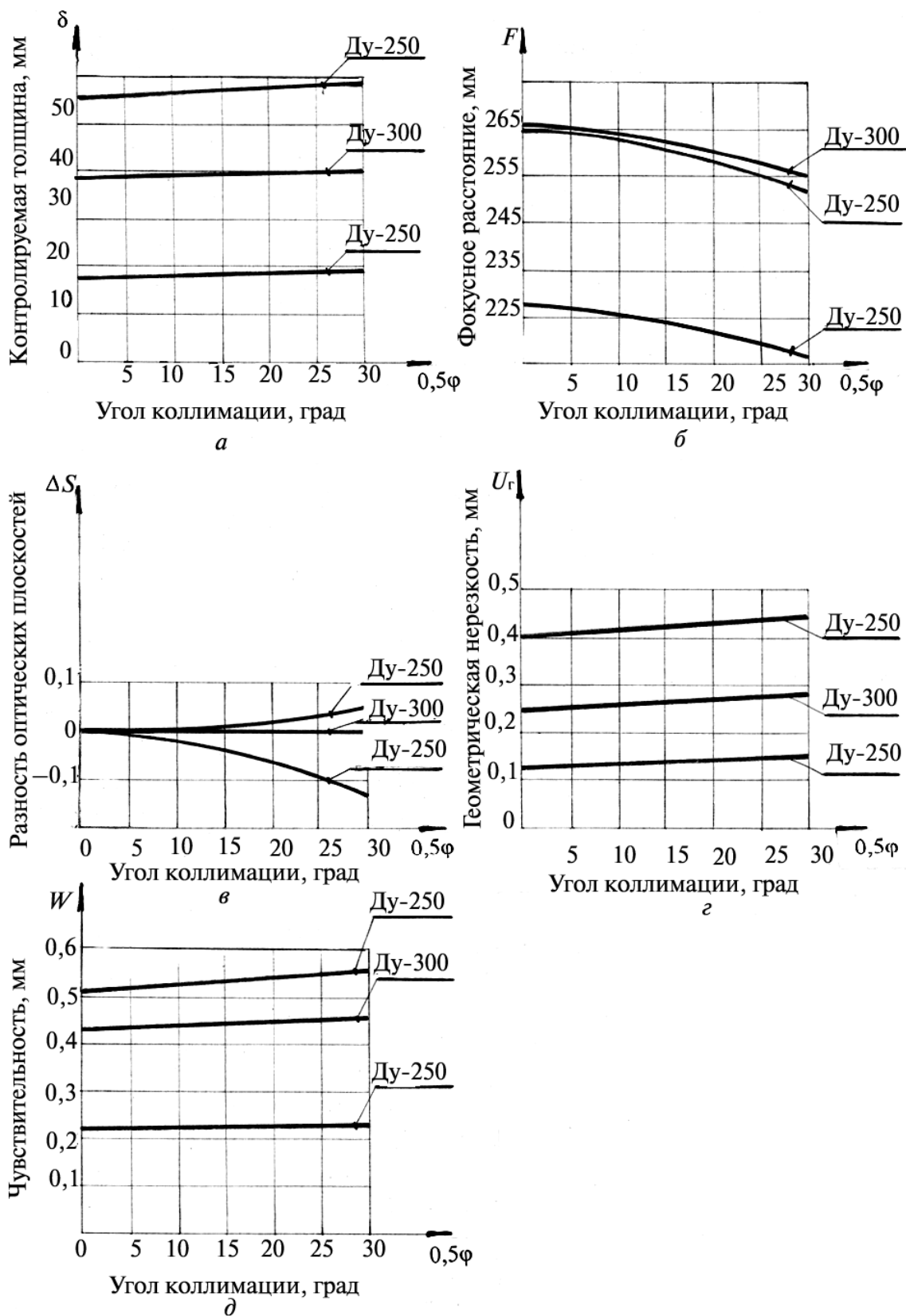


Рис. 6. Изменение основных радиографических параметров в зависимости от полуапертуры угла коллимации (0,5φ):
 а — δ; б — F; в — ΔS; г — U_г; д — W

метода (W_i) в зависимости от полуапертуры угла коллимации $0,5\varphi_i$ представлены на рис. 6.

Выводы

1. Способ радиографического контроля полых тел вращения с малым проходным сечением по участкам системой встречно-пересекающихся фронтальных пучков излучения из внутренней полости в условиях нормативных ограничений правил контроля и эффекта генерации обратно-рассеянного излучения фрагментами конструкции сварного стыка в зоне детектирования возможен.

2. Способ формализован в аналитические выражения и зависимости, обеспечивающие возможность прогнозирования и выбор параметров контроля в зависимости от условий контроля и мощности экспозиционной дозы радиационного фона, создаваемого обратно-рассеянным излучением, и наведенной радиацией.

3. С использованием представленных аналитических зависимостей количественно подтверждена достаточная стабильность основных радиографических параметров исследуемого способа и его согласованность с нормативными требованиями ПК1514—72, в связи с чем предложенный способ может быть рекомендован в качестве оптимального применительно к контролю сварных соединений патрубков Ду-250, Ду-300, а приведенные аналитические выражения, могут быть рекомендованы к использованию в аналогичных случаях при про-

гнозировании и оценке основных параметров контроля.

Литература

1. *Декопов А.С.* К вопросу подтверждения оптимальности основных параметров контроля при просвечивании полых тел вращения методом встречно-пересекающихся пучков излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техническая физика и автоматизация. 2007. Вып. 62. С. 199—205.
2. *Декопов А.С., Майоров А.Н., Фирстов В.Г.* Некоторые особенности изотопной радиографии сварных соединений ядерных реакторов в условиях радиационного фона // В кн. УП Международной конференции по неразрушающим испытаниям. Варшава, июнь, 1973. G-10. С. 1—8.
3. *Декопов А.С., Майоров А.Н., Валуев О.В., Мурашов А.И.* Контроль сварных соединений в «ус» в условиях радиационного фона с использованием гамма-дефектоскопической установки «Дрозд» // Изотопы в СССР. 1974. № 38. С. 37—42.
4. *Майоров А.Н., Мамиконян С.В., Косарев Л.И., Фирстов В.Г.* Радиоизотопная дефектоскопия (методы и аппаратура). М.: Атомиздат, 1976. 208 с.
5. Правила контроля сварных соединений и наплавки узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок ПК1514—72. М.: Металлургия, 1975. 72 с.
6. *Румянцев С.В.* Радиационная дефектоскопия. М.: Атомиздат, 1974.
7. Особенности расшифровки рентгенограмм аустенитных швов / А.А. Долгий, А.С. Волков и др. // Сварочное производство, 1970. № 3. С. 21—26.
8. А.с. № 713249. Способ и устройство для радиоизотопной дефектоскопии полых тел вращения / *Декопов А.С., Майоров А.Н.* и др., 1979.
9. *Кимель Л.Р., Машкович В.П.* Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М.: Атомиздат, 1972. 312 с.
10. *Булатов Б.П., Андрушин Н.Ф.* Альbedo гамма-излучения. М.: Атомиздат, 1968, 240 с.

Статья поступила в редакцию 26.04.2012