

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.384.6

### ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ЭФФЕКТИВНЫЙ РАЗМЕР ФОКУСА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО КОМПАКТНОГО БЕТАТРОНА SEA-2 С ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ 2.5 МэВ

©2026 г. М. М. Рычков<sup>а</sup>, В. В. Каплин<sup>а</sup>, В. А. Смолянский<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

*Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30*

*\* e-mail: vsmol@tpu.ru*

Поступила в редакцию 10.07. 2025 г.

После доработки 28.10.2025 г.

Принята к публикации 17.11.2025 г.

Представлены экспериментальные результаты по определению пространственного разрешения и контрастной чувствительности радиографии с использованием тормозного излучения усовершенствованного компактного бетатрона SEA-2 с максимальной энергией тормозного излучения 2.5 МэВ. Измерения проведены с использованием рентгеновской пленки AGFA NDT D4 PbVacuPac и индикатора качества изображений Duplex IQI (model EN 462-5). Результаты, полученные при коэффициентах увеличения  $K = 2.3, 3.3$  изображений индикатора Duplex IQI, показывают разрешения 0.16 и 0.2 мм пар тонких проволок индикатора. Оценен эффективный горизонтальный размер фокуса излучения (около 0.3 мм), а также вертикальный размер фокуса излучения (около 2 мм), который перпендикулярен плоскости орбиты электронов.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Компактные бетатроны с максимальной энергией тормозного излучения до нескольких мегаэлектронвольт эффективно используются для неразрушающего радиографического и томографического контроля крупногабаритных изделий. Их компактность позволяет использовать их для радиографического контроля качества материалов и изделий в нестационарных условиях: например, при строительстве нефте- и газопроводов и мостовых конструкций, на стапелях, при монтаже литых и сварных

изделий, энергетических установок [1]. В настоящее время для этой цели используются также высокоэнергетические рентгеновские трубки, но энергия их излучения гораздо ниже, чем в случае бетатронов.

В работе [2] были представлены экспериментальные результаты по оценке разрешающей способности радиографии с использованием тормозного излучения усовершенствованного компактного переносного бетатрона SEA-7 (Small-Sized Electron Accelerator) с энергией излучения до 7 МэВ. Было показано превышение его характеристик над характеристиками предыдущей версии бетатрона МИБ-7.5 (малогабаритный импульсный бетатрон) с энергией излучения до 7.5 МэВ [1].

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по оценке достижимых характеристик радиографии с использованием тормозного излучения усовершенствованного компактного переносного бетатрона SEA-2 с энергией излучения до 2.5 МэВ. Мощность излучения SEA-2 выше мощности излучения предыдущей версии бетатрона МИБ-2.5Д с энергией излучения также до 2.5 МэВ. Кроме этого, блок питания и управления SEA-2 совершеннее и его масса примерно вдвое меньше, чем у его предшественника МИБ-2.5Д. Потеря массы делает этот прибор мобильнее и легче в эксплуатации.

Полученные результаты по разрешающей способности радиографии с усовершенствованным SEA-2 позволили также оценить горизонтальный и вертикальный размеры эффективного фокуса тормозного излучения бетатрона. Приведены изображения краев стальной сборки и микрозазоров между ее составными частями. Проведена оценка радиографической чувствительности при использовании тормозного излучения усовершенствованного бетатрона SEA-2.

Эксперименты проведены с использованием рентгеновской пленки AGFA NDT D4 Pb VacuPac и индикатора качества изображений Duplex IQI (model EN 462-5 [3]) для оценки разрешения и чувствительности радиографии с SEA-2, а также для оценки размера фокуса излучения бетатрона. Отметим, что для измерения размера фокуса жесткого тормозного излучения бетатронов не существует принятой процедуры. Методы измерения размера фокуса источника излучения, приведенные в европейском стандарте EN 12543, применимы для рентгеновских трубок с напряжением до 500 кВ. Российский стандарт ГОСТ 22091.9–86 применим только для трубок низкой и средней мощности.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Фотография, демонстрирующая расположение бетатрона 1 со снятой крышкой (вид сверху), исследуемого образца 2 и кассеты с рентгеновской пленкой 3, представлена на

рис. 1а. Белые стрелки показывают угловой размер конуса излучения, которое выходит между стойками магнита бетатрона.

**Рис. 1.а** – Фотография, показывающая расположение бетатрона SEA-2 ...; **б** – схема эксперимента.

Схема эксперимента показана на рис. 1б. Специальная система увеличения радиуса орбиты электронов после их ускорения в камере 1 усовершенствованного бетатрона SEA-2 обеспечивала сброс циркулирующего электронного пучка на молибденовую мишень 2 толщиной 0.6 мм, установленную на инжекторе электронов. Генерируемое излучение с энергией фотонов до 2.5 МэВ выходило через стенку камеры бетатрона, проходило через медный фильтр 3 толщиной 2 мм, стальные стенки дозиметра 4 толщиной 0.25 мм, прибор Duplex IQI 5, установленный на расстоянии 20 см от мишени, и попадало на рентгеновскую пленку 6, установленную на расстоянии 24, 46 или 66 см от мишени. Стандартизованный эталон качества изображений Duplex IQI [3] является индикатором нерезкости радиографических изображений и используется как эталон для измерения пространственного разрешения радиографических изображений объектов с близко расположенными малыми элементами, а также для оценки размера фокуса источника излучения [4]. Прибор состоит из 13 пар параллельных платиновых и вольфрамовых проволок внутри пластиковой пластины. Проволоки в парах расположены с промежутками между ними, которые равны диаметрам проволок каждой пары. Величина пространственного разрешения радиографии и размер фокуса излучения определяются по паре с наименьшим диаметром проволок, изображения которых не сливаются, т. е. не образуют единое изображение.

Полученные с геометрическим увеличением  $K = 1.2, 2.3, 3.3$  рентгенографические изображения обрабатывались с помощью сканера для их анализа и получения денситограмм негативных изображений.

### 3. УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО БЕТАТРОНА SEA-2

На рис. 2а приведена фотография углового распределение тормозного излучения, генерированного во внутренней молибденовой мишени бетатрона SEA-2 толщиной 0.6 мм. Фотография получена на расстоянии 15 см от мишени. Денситограмма изображения пучка излучения, демонстрирующая распределение плотности почернения вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр пятна почернения, приведена на рис. 2б.

**Рис. 2.** **а** – Фотография углового распределение тормозного излучения, генерированного во внутренней молибденовой мишени бетатрона SEA-2 толщиной 0.6 мм; **б** – денситограмма, демонстрирующая распределение плотности почернения

На рис. 3а приведено увеличенное ( $K = 1.2$ ) изображение эталона Duplex IQI (1), демонстрирующее расположение эталона на пучке излучения. Эталон расположен на сборке 2 из четырех стальных параллелепипедов размерами  $10 \times 10 \times 50$  мм<sup>3</sup> и промежутками между ними шириной 10 мкм. При этом проволоки перпендикулярны плоскости орбиты электронного пучка бетатрона. Видно также изображение стальной пластины 3 толщиной 0.4 мм с правым острым краем и косой верхней частью. Экспозиция оптимальна для изображения эталона, но недостаточна для получения изображения сборки с зазорами между ее четырьмя частями. Денситограмма 1 на рис. 3б показывает, что центр пучка излучения расположен на середине эталона, так что проволоки эталона с 6-й по 9-ю лежат в районе максимальной интенсивности излучения. Денситограмма 2 изображений пары проволок эталона с 10-й по 12-ю показывает, что разрешаются проволоки 10-й и 11-й пар диаметрами 0.1 и 0.08 мм; 12-я и 13-я пары проволок диаметрами 0.065 и 0.05 мм не разрешаются за счет так называемой геометрической нерезкости изображений проволок, которая определяется размытием изображений из-за наложения изображений проволок, которые образованы различными участками протяженного источника излучения с образованием полутени  $\Delta a_1$  изображений краев шириной  $\Delta a_1 = F_G (K-1)$ , которая определяется горизонтальным размером источника излучения  $F_G$  и увеличением  $K$  изображения. Важным фактором для размытия изображения является высокая собственная внутренняя нерезкость  $\Delta a_F$  рентгеновской пленки при жестком излучении, определяемая размером гранул проявленного чувствительного слоя пленки. Собственная нерезкость изображений на пленках определяется ее микроструктурой и взаимодействием фотонов первичного и вторичного излучений с пленкой. Известно, что собственная нерезкость пленок с металлическими экранами может составлять 0.2–0.4 мм при энергии излучения около 1 МэВ. При небольших коэффициентах увеличения изображений собственная нерезкость пленки может доминировать.

**Рис. 3.** а – Радиографический снимок эталона Duplex IQI 1 ...; б – денситограмма изображений пар проволок эталона с 1-й по 13-ю

#### 4. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ПАР ПРОВОЛОК DUPLEX IQI ПРИ КОЭФФИЦИЕНТАХ УВЕЛИЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ $K = 2.3, 3.3$

На рис. 4а приведено увеличенное ( $K = 2.3$ ) изображение части эталона Duplex IQI пар проволок с 7-й по 12-ю, а на рис. 4б – денситограмма (1–4), демонстрирующая разрешения пар проволок с 9-й по 12-ю. Денситограмма измерена вдоль горизонтальной линии  $L$  (рис. 4а), которая перпендикулярна изображениям этих пар. На измененном

регулированием “яркость–контраст” участке изображения сборки видно изображение (стрелка) зазора между ее частями.

**Рис. 4. а** – Увеличенное ( $K = 2.3$ ) изображение части эталона Duplex IQI пар проволок с 7-й по 12-ю;

Согласно стандарту ISO 17636-2 [5], пространственное разрешение метода радиографии в данной геометрии определяется по денситограмме изображения той пары проволок эталона, глубина модуляции яркости изображения (отношение глубины впадины к пикам на денситограмме) которой не менее  $R = 20\%$ . Разрешается 11-я пара проволок с диаметрами 0.08 мм. Поэтому можно считать, что величина горизонтального пространственного разрешения при этом увеличении изображения близка к величине расстояния 0.16 мм между осями проволок этой пары.

На рис. 5а приведены увеличенное ( $K = 3.3$ ) изображение части эталона Duplex IQI пар проволок с 6-й по 11-ю, а на рис. 5б – денситограмма (1–3) изображений пар с 8-й по 10-ю, которая была измерена вдоль линии  $L$ , перпендикулярной изображениям пар проволок. Участок снимка с изображениями пар с 8-й по 11-ю выделен регулировкой “яркость–контраст”. На затемненном участке изображения сборки видно изображение (стрелка) зазора между ее частями. Из денситограммы (1, 2) следует, что надежно разрешаются 8-я и 9-я пары проволок с диаметрами  $D = 0.16, 0.13$  мм соответственно, а изображения проволок 10-й пары с  $D = 0.1$  мм 3 разрешаются, но перекрыты сильнее. Для 9-й и 10-й пар проволок (2, 3) глубина модуляции яркости изображения составляет около  $R = 32\%, 20\%$ . Поэтому можно считать, что величина горизонтального пространственного разрешения при этом увеличении изображения близка к величине расстояния 0.2 мм между осями проволок 10-й пары.

**Рис. 5. а** – Увеличенное ( $K = 3.3$ ) изображение части стандарта Duplex IQI пар проволок с 6-й по 11-ю ...; **б** – денситограмма, демонстрирующая разрешения пар

## 5. ОЦЕНКА РАЗМЕРА ЭФФЕКТИВНОГО ФОКУСА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЕТАТРОНА SEA-2

Методы измерения фокуса тормозного излучения бетатронов при использовании дырочных и щелевых коллиматоров и проволочного эталона Duplex IQI уже исследовались в работах [6–8]. В этой работе полученные денситограммы изображений эталона нерезкости Duplex IQI были использованы для оценки горизонтального  $F_G$  и вертикального  $F_V$  размеров эффективного фокуса излучения. Эталон Duplex IQI выполнен по стандарту EN\_462-5 и состоит из 13 пар платиновых и вольфрамовых проволок с различными диаметрами  $D$  и промежутками между проволоками пары, равными их диаметрам. Метод оценки основан на соотношении между базовым пространственным

разрешением  $SR_b$  и размером  $F$  фокусного пятна. Для этого используется уравнение (5) из работы [4]:

$$F = (K/(K - 1)) (U_i^3 - (2SR_b/K)^3)^{1/3},$$

где  $U_i$  – максимальная нерезкость изображения, определяемая по изображению эталона, а  $SR_b$  – базовое пространственное разрешение. Уравнение используется для оценки размера фокуса источника после установления величины  $SR_b$  и максимальной нерезкости изображения  $U_i$  в эксперименте для пары с  $K$  не менее 20%. Для оценки размера фокуса источника по приведенной выше формуле использовались параметры  $SR_b = D$  и  $U_i = 2D$  той пары проволок эталона Duplex IQI, изображения проволок которой почти сливаются в единое целое. Отметим, что при увеличении коэффициента  $K$  величина  $F$  определяется простой формулой  $F \approx 2KD/(K - 1)$ . Но также заметим, что для жесткого излучения бетатронов нет стандартизованных методов измерения фокуса источника излучения. Описанные методы в европейском стандарте EN 12543 применимы для рентгеновских трубок с напряжением до 500 кВ. Российский стандарт ГОСТ 22091.9–86 подходит только для рентгеновских трубок с низкой и средней энергиями излучения. Изготовители эталона Duplex IQI также указывали, что он применим до энергии фотонов излучения 400 кэВ. При энергии излучения в мегаэлектронвольтовом диапазоне результаты могут быть не совсем удовлетворительными.

На денситограммах, приведенных выше, были выделены пары проволок, параметры которых можно использовать для оценки горизонтального размера эффективного фокуса тормозного излучения бетатрона SEA-2. При увеличении изображения  $K = 2.3$  (рис. 4а) разрешается 11-я пара проволок с диаметрами 0.08 мм (рис. 4б). Для этой пары эффективный горизонтальный размер  $F_G$  фокуса излучения составляет около  $F_G \approx 0.275$  мм. При большем увеличении ( $K = 3.3$ ) изображения эталона (рис. 5а) разрешается не 11-я, а 10-я пара проволок с диаметрами 0.1 мм (рис. 5б). Поэтому оценка эффективного горизонтального размера фокуса излучения дает величину около  $F_G \approx 0.284$  мм. Это согласуется с оценкой, полученной с изображением эталона при увеличении  $K = 2.3$ .

Для оценки вертикального размера  $F_V$  фокуса тормозного излучения бетатрона SEA-2 эталон Duplex IQI располагался так, что пары проволок со 2-й по 4-ю располагались в центре конуса излучения и были параллельны плоскости орбиты электронов. На рис. 6а приведена часть изображения эталона Duplex IQI, полученного с увеличением  $K = 2.35$ , а на рис. 6б – денситограмма, показывающая вертикальное изменение яркости изображений пар проволок с 1-й по 3-ю. Видно, что разрешаются 1-я и 2-я пары проволок (1, 2). Модуляции яркости изображений 1-й и 2-й пар проволок с

диаметрами 0.8 и 0.63 мм составляют около  $R = 40\%$ ,  $10\%$ . Оценка выше вертикального размера фокуса тормозного излучения бетатрона SEA-2 по приведенной формуле дает величины около  $F_V = 2.7, 2.14$  мм.

**Рис 6. а** – Часть увеличенного ( $K = 2.3$ ) изображения эталона Duplex IQI; **б** – денситограмма, показывающая вертикальное изменение яркости изображений пар проволок с 1-й по 3-ю  $I-3$ .

## 6. КОНТРАСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РАДИОГРАФИИ С SEA-2

Для оценки чувствительности увеличивающей радиографии с бетатроном SEA-2 была использована стальная пластина, которая служила поглотителем мягкой части тормозного излучения, что увеличивало вклад тормозного излучения более жесткой части спектра в формирование изображения объекта. Этим также была смоделирована ситуация, когда очень тонкий объект и составной объект большой толщины находятся перед толстой стальной преградой. При этом стальной составной объект был основным объектом радиографии, а наличие микрообъекта не предполагалось. В эксперименте эталон Duplex также использовался в качестве индикатора качества пучка излучения при получении изображения составного объекта, когда экспозиционная доза была достаточной для толстого объекта исследования, но избыточной для микрообъекта. Установление видимого изображения тонких проволочек эталона Duplex IQI позволяет оценить чувствительность обнаружения микрообъекта в этом сложном случае радиографии как отношение толщины тонкого объекта к толщине стальной преграды.

На рис. 7 приведены части увеличенных ( $K = 2.3$ ) изображений эталона Duplex IQI, полученных с использованием стальных пластин толщиной  $T_p = 15, 35$  мм, установленных между эталоном и рентгеновской пленкой на расстоянии 20 см от нее. Экспозиция была достаточной для визуализации деталей составного объекта, но избыточной для пар проволок стандарта с диаметрами в микронной области. Поэтому участок представленного изображения был оптимизирован регулировкой “яркость–контраст”. Как результат, на рис. 7а видны изображения пар проволок с 9-й по 13-ю.

**Рис 7.** Части увеличенных ( $K = 2.3$ ) изображений эталона Duplex IQI, полученных с использованием стальных пластин толщиной  $T_p = 15, 35$  мм,

Диаметры проволок 12-й и 13-й пар ( $I, 2$ ) составляют  $D_{Pt} = 0.063, 0.05$  мм. Толщина пластин платины  $t_{Pt} = 0.063, 0.05$  мм соответствуют примерно толщине пластин стали  $t_{Fe} = 0.19, 0.15$  мм при энергии излучения около 1 МэВ. Поэтому контрастная чувствительность  $S$  визуализации микрообъектов в радиографии бетатроном SEA-2 по этим парам в условиях, когда при радиографии толстых составных объектов наличие микрообъекта не предполагалось, составляет около  $S = t_{Fe}/T_p = 1.3\%, 1.0 \%$ .

На рис. 7б видны изображения пар проволок с 8-й по 10-ю. Диаметры проволок 9-й и 10-й пар (1, 2) составляют  $D_{P1} = 0.13, 0.1$  мм. Это соответствует примерно толщине пластины стали  $t_{Fe} = 0.39, 0.3$  мм при энергии излучения около 1 МэВ. Поэтому контрастная чувствительность  $S$  визуализации микрообъектов в радиографии с бетатроном SEA-2 по этим парам в условиях, когда при радиографии толстых составных объектов наличие микрообъекта не предполагалось, составляет около  $S = 1.1\%, 0.86\%$ .

## 7. НЕРЕЗКОСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЙ КРАЕВ СТАЛЬНОЙ СБОРКИ И МИКРОАЗОРОВ МЕЖДУ ЕЕ ЧАСТЯМИ

На рис. 8а приведены часть увеличенного ( $K = 1.2$ ) изображения эталона Duplex IQI и сборки из четырех стальных блоков, на рис 8б – денситограммы изображений краев сборки, а на рис. 8в – зазоры между блоками шириной 10 мкм. Денситограммы были измерены вдоль линий  $L_1, L_2$  и  $L_3$  соответственно. В отличие от снимка на рис. 3, здесь экспозиция была достаточной для радиографии сборки, но избыточной для эталона Duplex IQI. На изображении сборки видны три промежутка 1–3 между деталями сборки шириной 10 мкм.

**Рис. 8.** Часть увеличенного ( $K = 1.2$ ) изображения эталона Duplex IQI и сборки из четырех стальных блоков (а), денситограммы изображений краев сборки (б) и зазоров

Денситограммы изображений краев сборки, приведенные на рис. 8б, показывают горизонтальные размытия  $\Delta S_G$  изображений левого (1) и правого (2) краев около  $\Delta S_G = 0.5, 1.3$  мм соответственно. Эти величины отличаются от величины геометрической нерезкости  $\Delta a_1 = F_G (K-1)$  изображений краев, которая определяется горизонтальным размером источника излучения  $F_G$  и увеличением  $K$  изображения. Если мы возьмем  $F_G \approx 0.27$  мм, как было определено выше, то получим  $\Delta a_1 \approx 0.054$  мм, что гораздо меньше приведенных выше экспериментальных значений  $\Delta S_G$ . Но в случае края пластины нерезкость изображения края определяется не только геометрической нерезкостью  $\Delta a_1$ , но и так называемой в радиографии дополнительной геометрической нерезкостью  $\Delta a_2$ . В случае геометрической нерезкости размытие изображения определяется наложением изображений края, которые образованы различными участками протяженного источника излучения с образованием полутени шириной  $\Delta a_1$ . Величина дополнительной геометрической нерезкости краевого изображения  $\Delta a_2 = K t_p \theta_p$  определяется коэффициентом увеличения изображения, длиной  $t_p$  краевой поверхности вдоль пучка излучения и ее углом  $\theta_p$  наклона относительно направления излучения. Величина дополнительной геометрической нерезкости  $\Delta a_2$  равняется увеличенному в  $K$  раз размеру проекции  $t_p \theta_p$  краевой поверхности. Здесь размытие изображения края, т. е. изменение плотности почернения в изображении края, определяется изменением толщины



материала, поглощающего излучение, так как край в данном случае имеет клинообразную форму. Геометрические нерезкости  $\Delta a_1$  и  $\Delta a_2$  дополняют друг друга, но в данном случае нерезкость краев сборки определяется в основном дополнительной геометрической нерезкостью. Различие в величинах нерезкости изображений левого и правого краев сборки определяется различными углами наклона краевых поверхностей относительно направления излучения, которое образует их изображение. Ясно, что угол ориентации поверхности левого края относительно излучения примерно в 2 раза меньше угла ориентации поверхности правого края. Это проиллюстрировано на врезке на рис. 8б.

Денситограмма изображений левого, среднего и правого зазоров (1–3), представленная на рис. 8в, также демонстрирует различную ширину минимумов яркости их изображений. Это также определяется различными углами наклона зазоров относительно излучения, которое определяет их изображения. Отметим необычную “двойную” форму изображения правого зазора 3, ширина которого составляет около 1.1 мм. Следует отметить линейность отображения денситограммой на участках  $L = 1–1.5$  мм (1) и  $L = 1–2.3$  мм (2) линейного изменения радиационных толщин краев сборки. Это исследовалось в работах [9, 10], в них было показано, что существует соотношение между максимальной радиационной толщиной объекта и необходимой энергией излучения источника для обеспечения прямо пропорциональной зависимости яркости изображения на радиографическом снимке от радиационной толщины различных участков объекта. Это даст дополнительную практически значимую информацию о форме различных деталей или дефектов составного объекта.

На рис. 9а приведены часть увеличенного ( $K = 2.3$ ) изображения эталона Duplex IQI и сборки из четырех стальных блоков, на рис. 9б – денситограммы (1, 2) двух зазоров между блоками сборки шириной 10 мкм, а на рис. 9в – денситограмма изображения края сборки. Денситограммы были измерены вдоль линий  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  на рис. 9а соответственно. На выделенной области изображения сборки, измененной регулировкой “яркость–контраст”, ясно видно изображение правого (1) из трех зазоров между деталями сборки. Денситограмма изображения этого зазора демонстрирует пик почернения с шириной на половине высоты около 0.75 мм. Изображение левого зазора 2 (рис. 9а) между деталями сборки очень слабо выраженное. Денситограмма (2) его изображения (рис. 9б) демонстрирует слабый двойной пик почернения с шириной на половине высоты около 1 мм.

**Рис. 9. а** – Часть увеличенного ( $K = 2.3$ ) изображения эталона Duplex IQI и сборки из четырех стальных блоков...; **б** – денситограммы (1, 2) двух зазоров между блоками; **в** – денситограмма изображения края сборки.

Отметим, что в случае  $K = 2.3$  геометрическая нерезкость  $\Delta a_1$  изображения эталона Duplex IQI и сборки из четырех стальных блоков составляет величину около  $\Delta a_1 = F_G(K - 1) = 0.35$  мм, что примерно в 7 раз больше величины при  $K = 1.2$ . Это проявляется в более плавном изменении яркости изображении края сборки на участках денситограммы (рис. 9в)  $L = 0.5\text{--}1.0$  мм и  $L = 2.0\text{--}3.0$  мм, чем в случае  $K = 1.2$  на подобных участках денситограммы (2) на рис. 8б. Здесь линейность денситограммы наблюдается в указанных интервалах  $L$ .

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в данной работе результаты экспериментов показали величины пространственного разрешения пар тонких проволок индикатора качества изображений Duplex IQI при радиографии тормозным излучением усовершенствованного компактного бетатрона SEA-2 при различных коэффициентах увеличения изображений. На основании этих результатов проведена оценка горизонтального и вертикального размеров эффективного фокуса источника излучения. Показаны нерезкости изображений краев стальной сборки и микрозазоров между ее частями при различных коэффициентах увеличения изображения сборки и различных ее положениях относительно направления излучения. Продемонстрирована контрастная чувствительность радиографии на основе излучения бетатрона SEA-2 при различных коэффициентах увеличения изображений.

Следует отметить, что измерения носят оценочный характер, так как для жесткого излучения бетатронов нет стандартизованных методов таких измерений, а эталон Duplex IQI применим до энергии фотонов излучения 400 кэВ. При использовании эталона для излучения с энергией в мегаэлектронвольтовом диапазоне результаты могут быть не совсем удовлетворительными. Важным фактором при этом является значительная собственная нерезкость рентгеновской пленки при жестком излучении, определяемая размером гранул проявленного чувствительного слоя пленки, который превышает границу микронной области в 100 мкм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://sis-tss.ru/2010-06-23-20-39-42/1550-2010-06-19-14-30-32.html>
2. Рычков М.М., Каплин В.В., Смолянский В.А. // ПТЭ. 2024. № 1. С. 107. <https://doi.org/10.31857/S0032816224010158>
3. Website of the IE-NTD Ltd: [www.ie-ndt.co.uk/imagequalityindex.html](http://www.ie-ndt.co.uk/imagequalityindex.html)

4. *Bavendiek K., Ewert U., Riedo A., Heike U., Zscherpel U.* // 18th World Conf. Nondestruct. Testing. 2012. Durban, South Africa. P. 16  
[http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/346\\_wcndtfinal00346.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/346_wcndtfinal00346.pdf).
5. ISO 17636-2 Non-destructive testing of welds. Radiographic testing: Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors. Moscow, Standardinform. 2018. P. 53.
6. *Сорокин В.Б., Маликов Е.Л.* // ПТЭ. № 3. 2021 С. 138.  
<https://doi.org/10.31857/S0032816221020221>  
*[Sorokin V.B., Malikov E.L. // ИЕТ. 2021. V. 64. № 3. P. 483.*  
<https://doi.org/10.1134/S0020441221020184>]
7. *Сорокин В.Б., Луценко А.С., Генцельман В.Г.* // ПТЭ. 2018. № 2. С. 38.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816218020088>  
*[Sorokin V.B., Lutsenko A.S., Gentselman V.G. // ИЕТ. 2018. V. 61. № 2. P. 192.*  
<https://doi.org/10.1134/S0020441218020082>]
8. *Sukharnikov K.V., Rychkov M.M., Gentselman V.G.* // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 671. P. 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/671/1/012058>
9. *Рычков М.М., Каплин В.В., Смолянский В.А.* // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50. № 21. С. 7.  
<https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.21.58950.19914>
10. *Рычков М.М., Каплин В.В., Смолянский В.А.* // Поверхность. 2022. № 9. С. 93.  
<https://doi.org/10.31857/S1028096022090175>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** **а** – Фотография, показывающая расположение бетатрона SEA-2 *1*, исследуемого образца *2* и кассеты *3* с рентгеновской пленкой (вид сверху) в конусе излучения (белые стрелки); **б** – схема эксперимента: *1* – камера бетатрона, *2* – молибденовая мишень на инжекторе электронов, *3* – медный фильтр, *4* – дозиметр излучения, *5* – индикатор Duplex IQI на сборке из четырех стальных блоков в гониометре, *6* – рентгеновская пленка в держателе.
- Рис. 2.** **а** – Фотография углового распределение тормозного излучения, генерированного во внутренней молибденовой мишени бетатрона SEA-2 толщиной 0.6 мм; **б** – денситограмма, демонстрирующая распределение плотности почернения на снимке вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр пучка тормозного излучения.
- Рис. 3.** **а** – Радиографический снимок эталона Duplex IQI, демонстрирующий расположение эталона *1*, стальной сборки *2* и стальной пластины *3* на пучке излучения; **б** – денситограмма изображений пар проволок эталона с 1-й по 13-ю, измеренная вдоль горизонтальной линии *L* (*1*), и денситограмма изображений пар проволок с 10-й по 12-ю (*2*).
- Рис. 4.** **а** – Увеличенное ( $K = 2.3$ ) изображение части эталона Duplex IQI пар проволок с 7-й по 12-ю; **б** – денситограмма (*1–4*), демонстрирующая разрешения пар проволок с 9-й по 12-ю. Денситограмма измерена вдоль горизонтальной линии *L*, которая перпендикулярна изображениям этих пар.
- Рис. 5.** **а** – Увеличенное ( $K = 3.3$ ) изображение части стандарта Duplex IQI пар проволок с 6-й по 11-ю, установленного горизонтально в пучке тормозного излучения на сборке из четырех стальных параллелепипедов; **б** – денситограмма (*1–3*), демонстрирующая разрешения пар проволок с 8-й по 11-ю. Денситограмма измерена вдоль горизонтальной линии, которая перпендикулярна изображениям этих пар.
- Рис. 6.** **а** – Часть увеличенного ( $K = 2.3$ ) изображения эталона Duplex IQI; **б** – денситограмма (*1–3*), показывающая вертикальное изменение яркости изображений пар проволок с 1-й по 3-ю.
- Рис. 7.** Части увеличенных ( $K = 2.3$ ) изображений эталона Duplex IQI, полученных с использованием стальных пластин с толщиной  $T_p = 15$  мм (**а**) и 35 мм (**б**), установленных между эталоном и рентгеновской пленкой на расстоянии 20 см от нее.

**Рис. 8.** Часть увеличенного ( $K = 1.2$ ) изображения эталона Duplex IQI и сборки из четырех стальных блоков (**а**), денситограммы изображений краев сборки (**б**) и зазоров между блоками (**в**). Денситограммы были измерены вдоль линий  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  соответственно.

**Рис. 9.** **а** – Часть увеличенного ( $K = 2.3$ ) изображения эталона Duplex IQI и сборки из четырех стальных блоков: 1, 2 – изображения двух зазоров между блоками сборки; **б** – денситограммы (1, 2) двух зазоров между блоками; **в** – денситограмма изображения края сборки. Денситограммы были измерены вдоль линий  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  на рис. 9а соответственно.

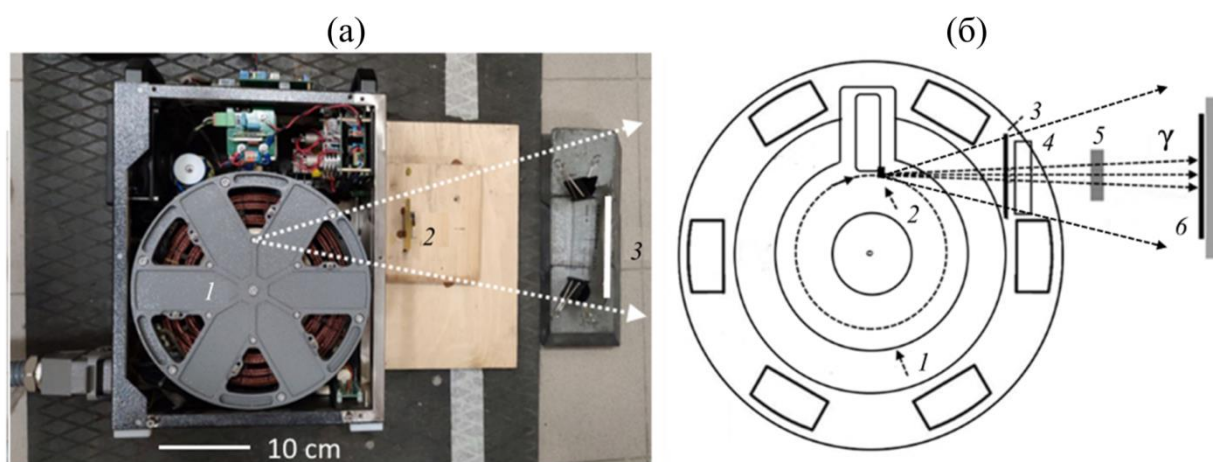


Рис. 1

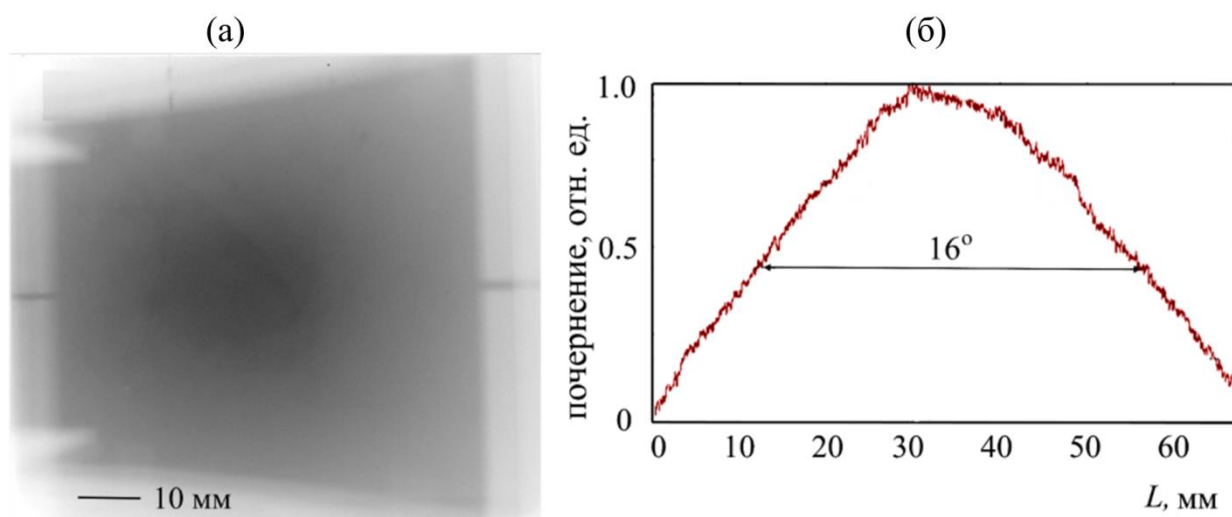


Рис. 2

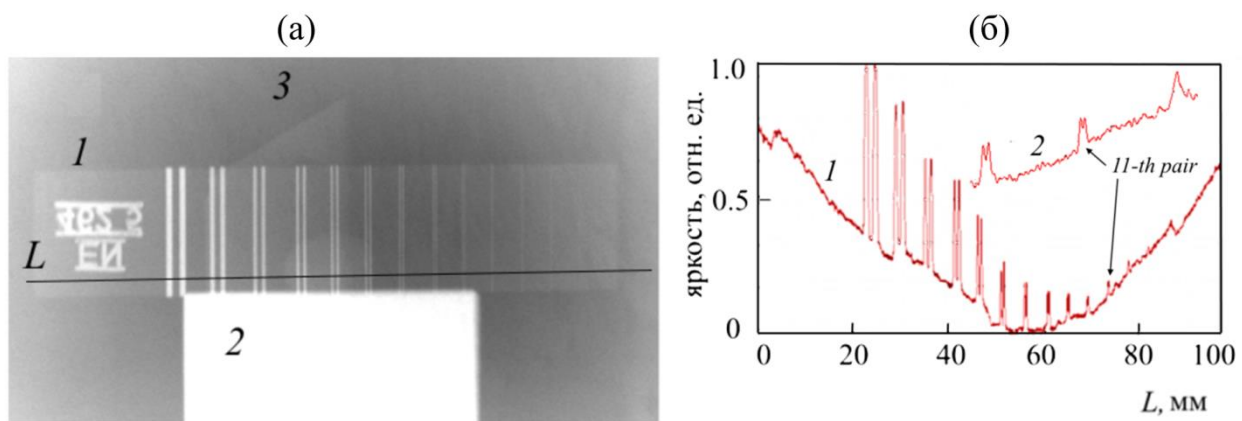
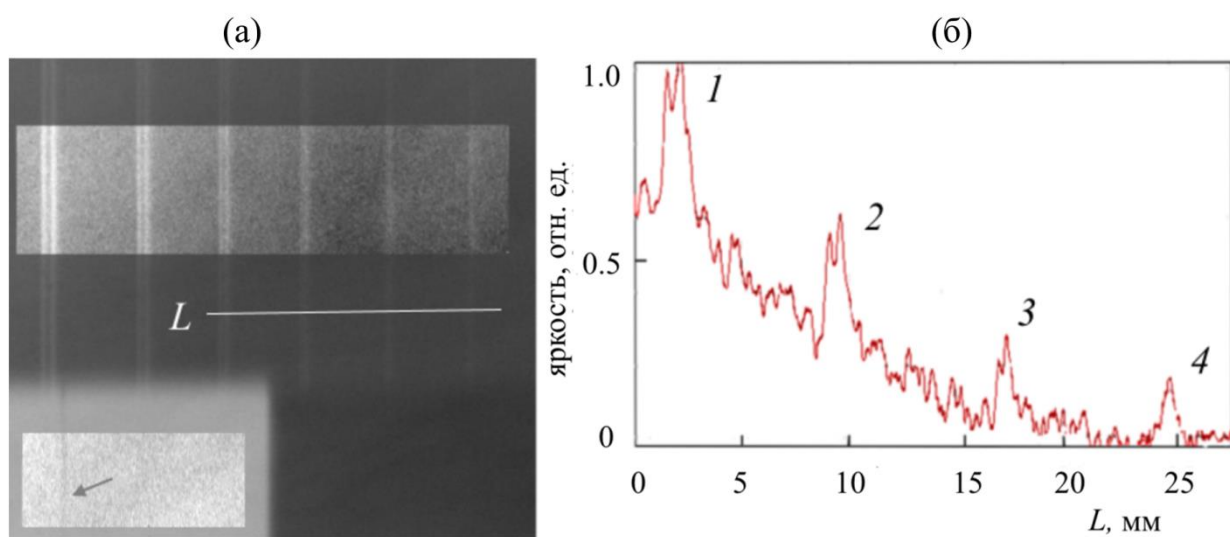


Рис. 3





**Рис. 4**

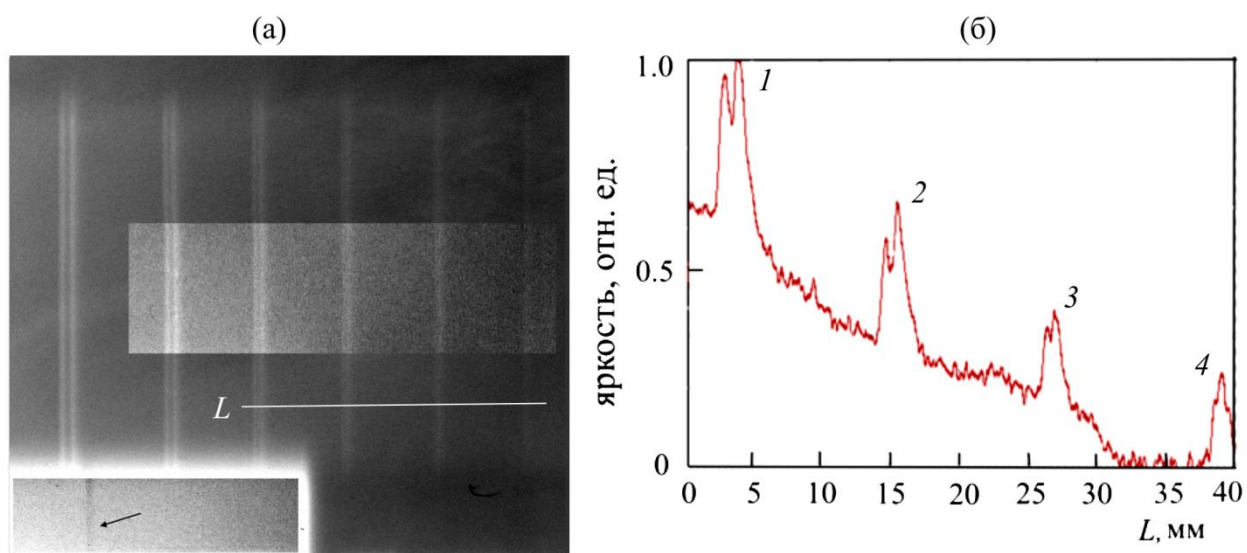


Рис. 5

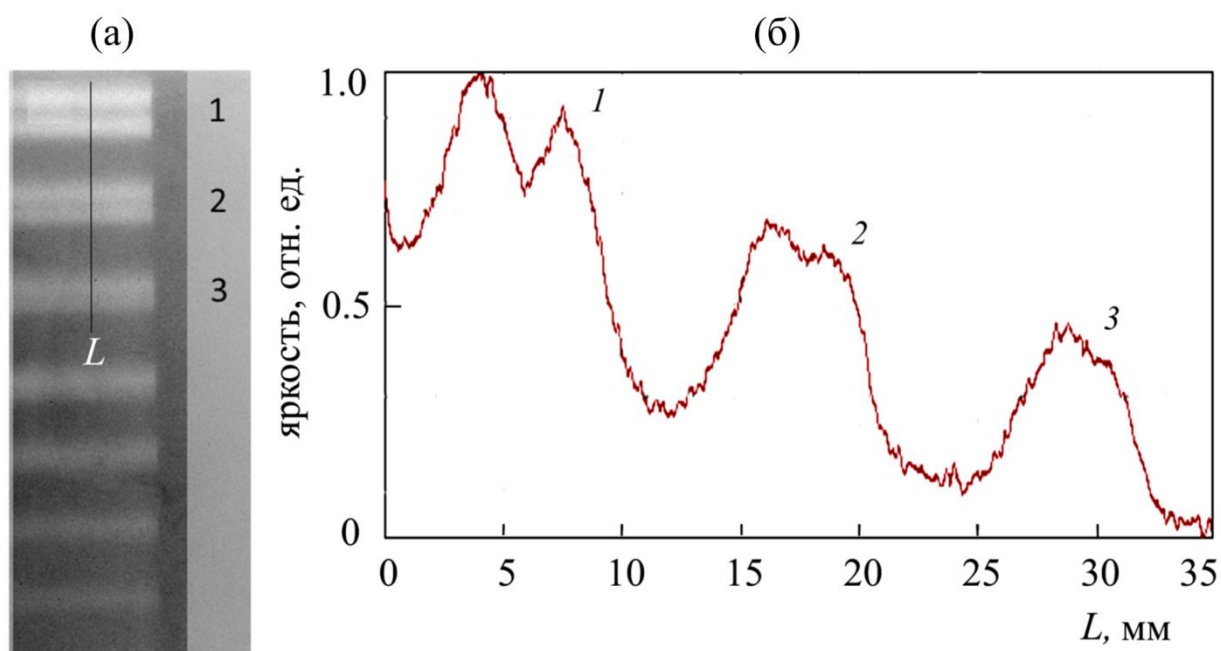
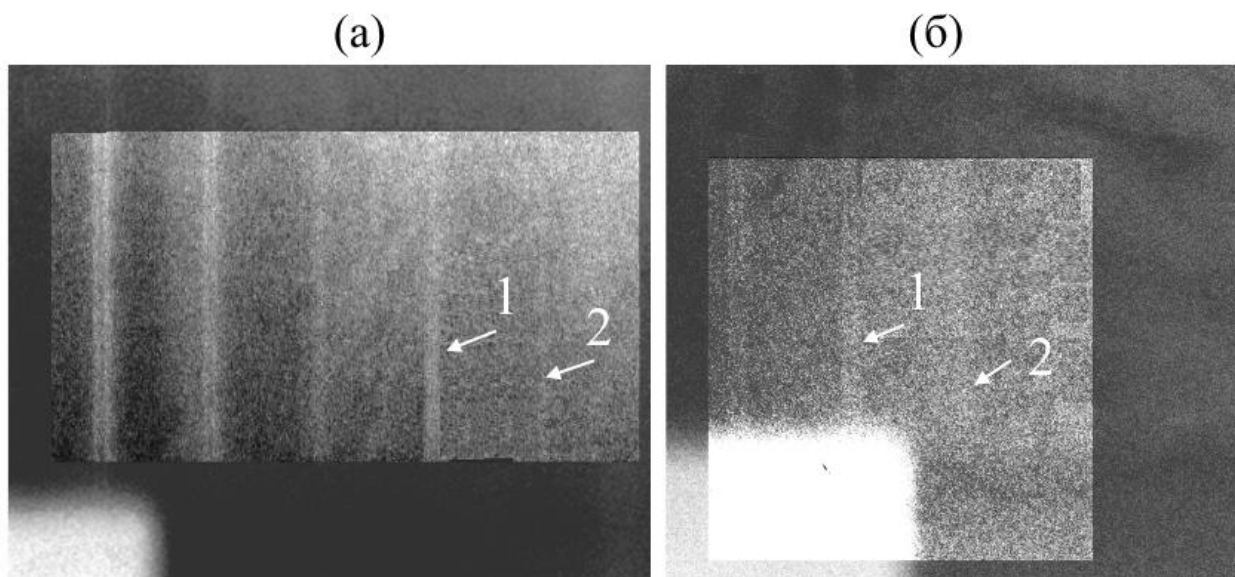
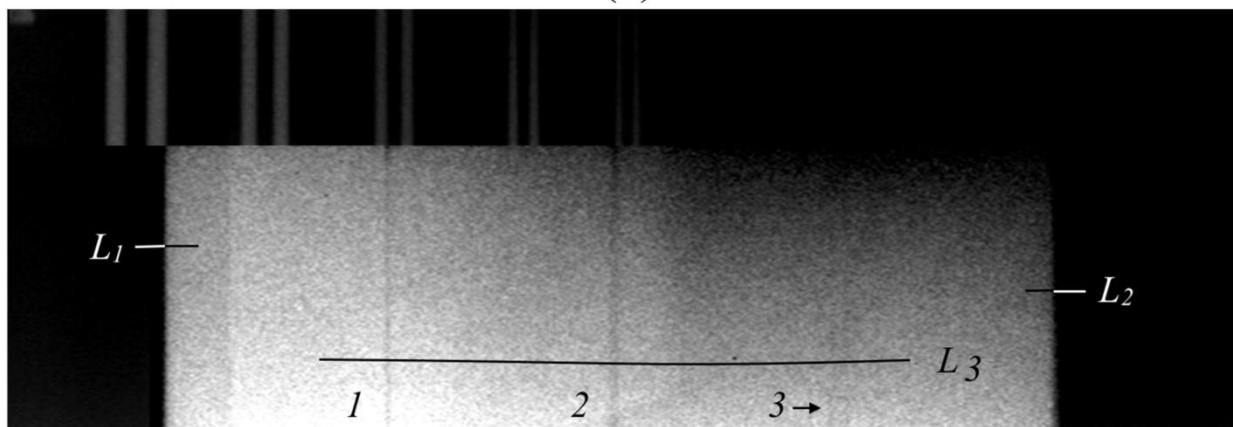


Рис. 6

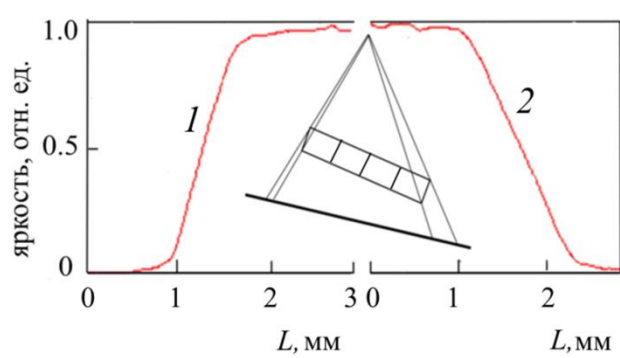


**Рис. 7**

(a)



(б)



(в)

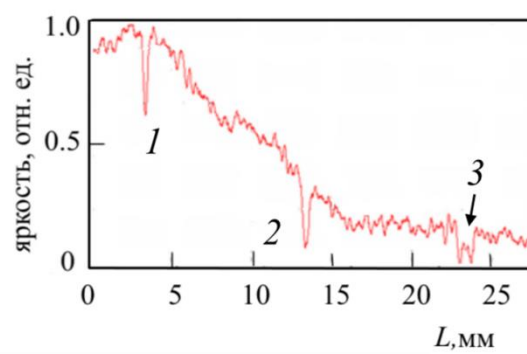


Рис. 8

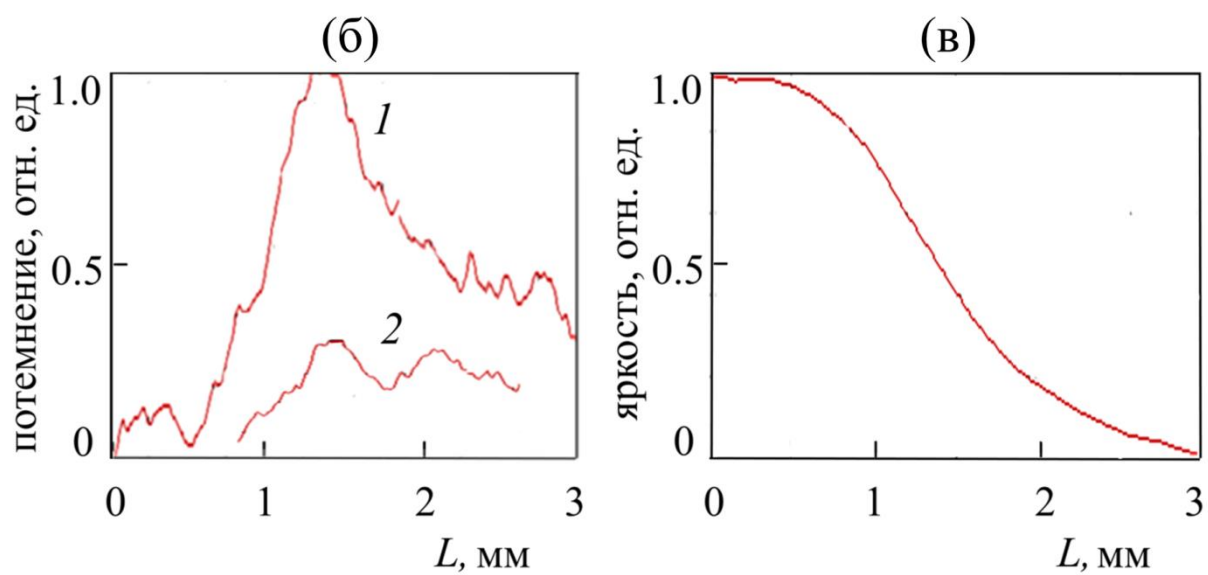
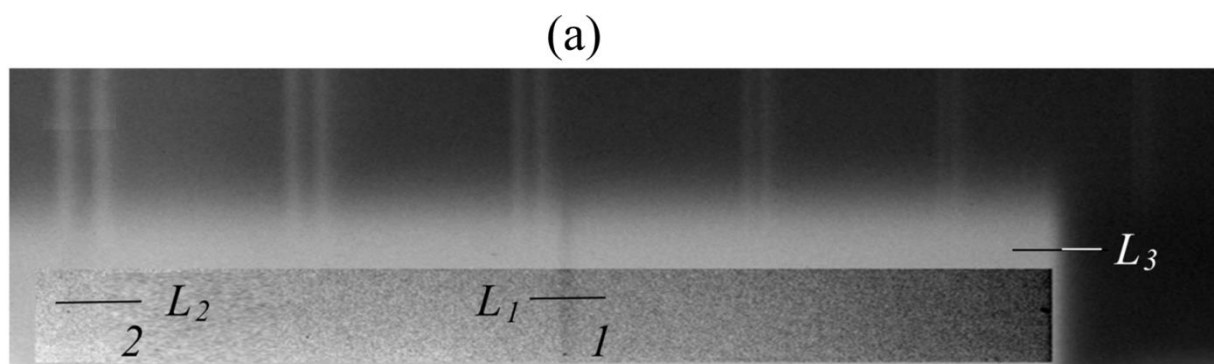


Рис. 9