

## Источники излучения для рентгеновской микроскопии на отпаянных трубках

Грязнов А.Ю., Мухин В.М., Потрахов Е.Н., Потрахов Н.Н.  
(ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед»)

Одним из первых практических применений рентгеновского излучения явилось просвечивание различных объектов с целью изучения их внутреннего строения. Уже первые исследования в этой области позволили предложить два основных способа получения рентгеновских изображений: контактный способ съемки [1] и способ съемки с прямым (геометрическим) увеличением изображения [2].

При реализации контактного способа съемки объект исследования располагается на достаточно большом расстоянии от источника излучения и вплотную (в непосредственном контакте) к приемнику рентгеновского изображения (рис. 1). Размеры получаемого изображения практически равны истинным размерам объекта. На рисунке хорошо видно, что в этом случае величина фокусного пятна источника излучения практически не влияют на резкость изображения. Фокусное расстояние зависит от размеров фокусного пятна источника излучения и выбирается, исходя из требований к резкости получаемых изображений с учетом конкретных размеров фокусного пятна и толщины объекта [3].

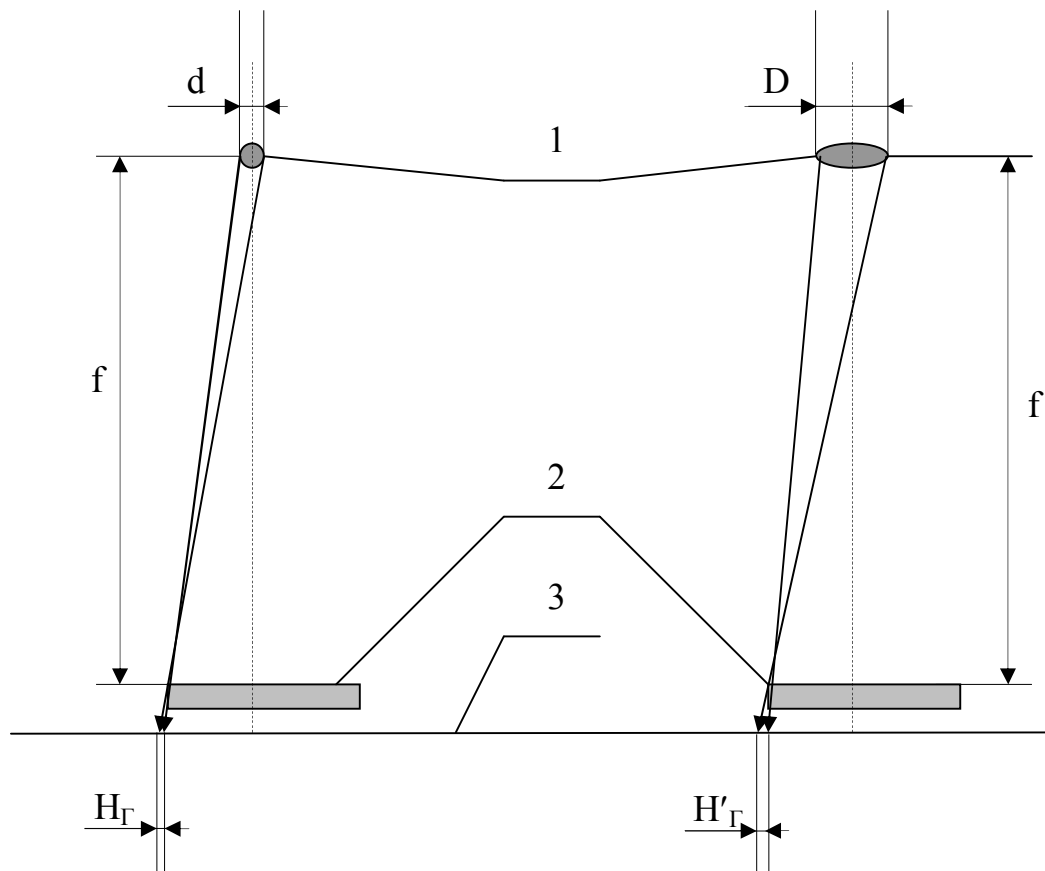


Рис. 1. Схема контактного способа съемки:

1 – фокусное пятно источника излучения, 2 – объект съемки, 3 – плоскость изображения,  
 $f$  – фокусное расстояние,  $d$  и  $D$  – диаметр фокусного пятна,  $H_{\Gamma}$  – геометрическая нерезкость  
изображения,  $H_{\Gamma} \approx H'_{\Gamma}$ .

При реализации способа съемки с увеличением изображения объект исследования располагается на определенном расстоянии как от фокусного пятна источника излучения, так и от приемника рентгеновского изображения (рис. 2).

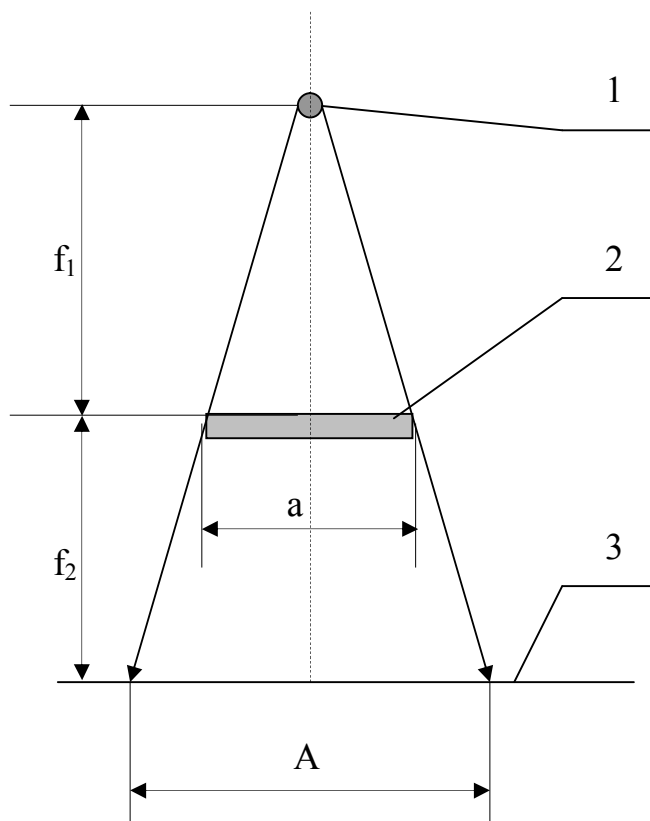


Рис. 2. Схема способа съемки с геометрическим увеличением изображения:  
 1 – фокусное пятно источника излучения, 2 – объект съемки, 3 – плоскость изображения,  
 $f_1$  – фокусное расстояние,  $f_2$  – расстояние от объекта до плоскости изображения,  $a$  – размер объекта,  
 $A$  – размер изображения объекта.

Соотношение указанных расстояний определяет коэффициент увеличения изображения  $K$ .

$$K = \frac{A}{a} = \frac{f_1 + f_2}{f_1}. \quad (1)$$

Решающее влияние на резкость изображения даже при небольшом коэффициенте увеличения (3-5 раз) оказывает размер фокусного пятна (рис. 3).

Как известно [4], одним из основных применений рентгеновского излучения в настоящее время в технологических целях является контроль производства современных электронных изделий, включая, например, оценку качества монтажа на печатных платах BGA- или Flip-Chip компонентов. Поскольку характерные размеры большинства компонентов не превышают нескольких миллиметров, а отдельных деталей – десятых и даже сотых долей миллиметра, контактный способ съемки практически непригоден для исследования структуры указанных объектов. Более подходящим для этих целей является способ с увеличением изображения. В этом случае для уверенного распознавания отдельных элементов структуры

печатных плат минимальный размер фокусного пятна источника излучения должен составлять от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров.

Такой источник рентгеновского излучения, в соответствии с ГОСТ 22091.9-86 определяется как микрофокусный источник излучения.

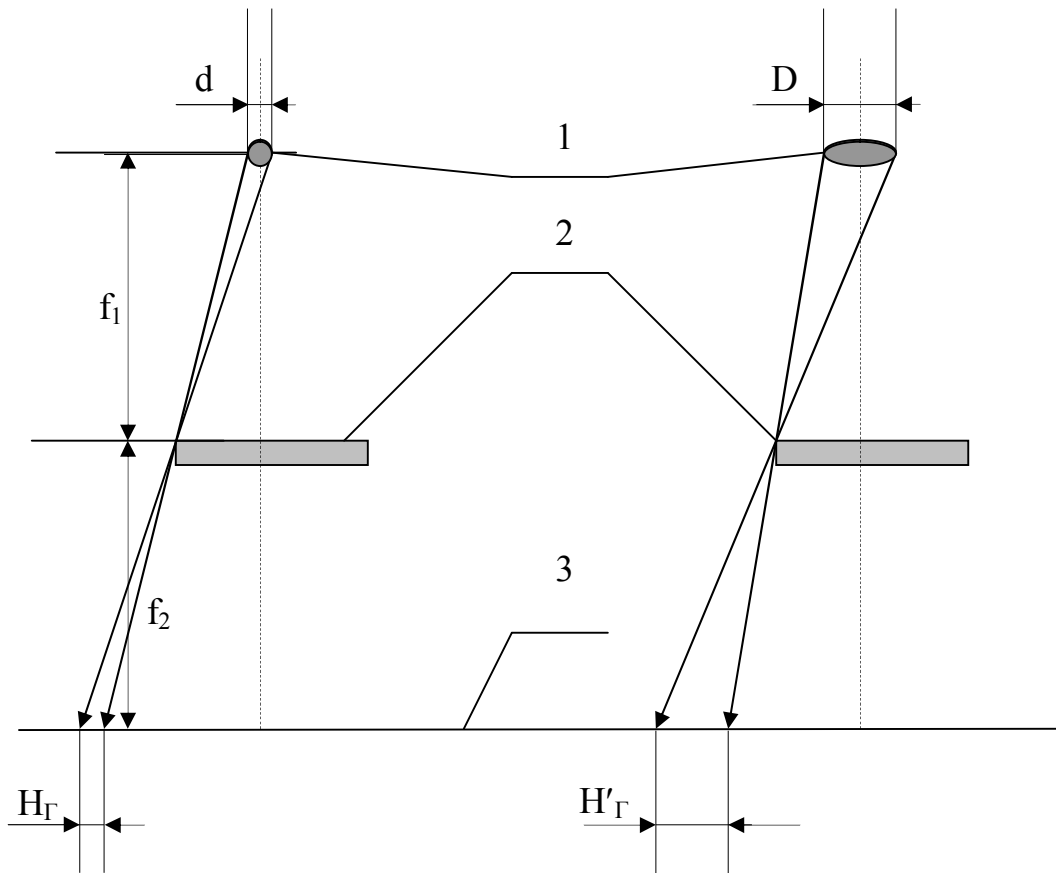


Рис. 3. Влияние размеров фокусного пятна на резкость рентгеновского изображения:  
1 – фокусное пятно источника излучения, 2 – объект съемки, 3 – плоскость изображения  
 $f_1$  – фокусное расстояние,  $f_2$  – расстояние от объекта до плоскости изображения,  $d$  и  $D$  – диаметр фокусного пятна,  $H_{\Gamma}$  – геометрическая нерезкость изображения,  $H_{\Gamma} < H'_{\Gamma}$ .

Толчком к развитию способа рентгеновской съемки с увеличением изображения послужили успехи в области создания электронных микроскопов [5]. Технические решения, апробированные в процессе их разработки, были положены в основу конструкции разборных рентгеновских трубок с постоянной откачкой (в переводной литературе используется термин «трубка открытого типа»). В 1982 году немецкому инженеру А. Рейнгольду удалось создать простой и надежный стационарный микрофокусный рентгеновский аппарат на базе разборной рентгеновской трубки. Запатентованная им конструкция оказалась настолько удачной, что вплоть до настоящего времени служит своего рода стандартом для большинства производителей микрофокусного рентгеновского оборудования [4].

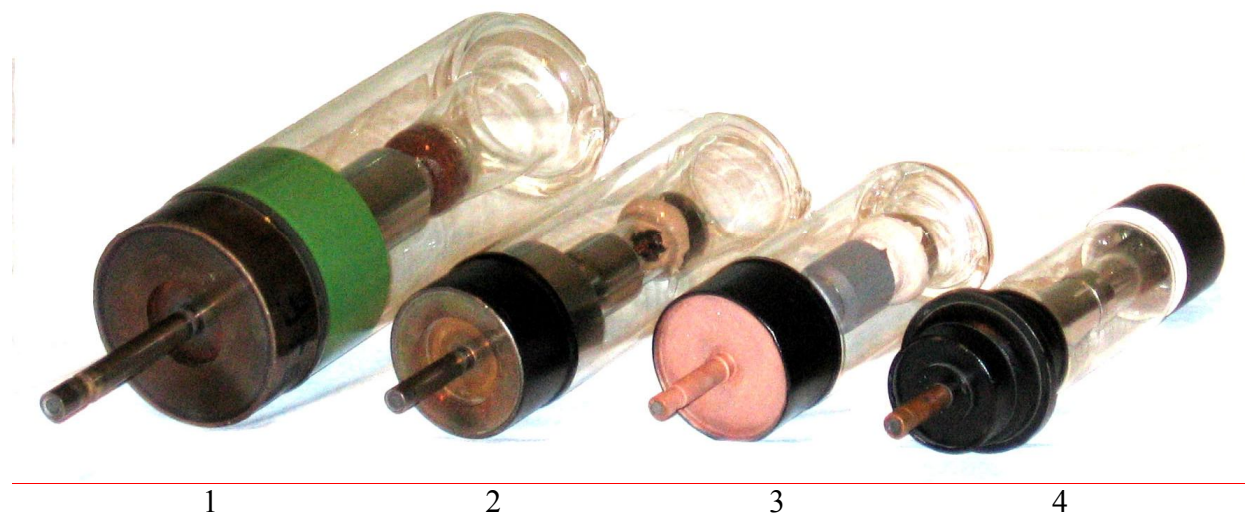
В отечественной рентгентехнике микрофокусные источники излучения появились в 50-х годах прошлого века [6]. Основными требованиями, предъявляемыми к их конструкции, были малое фокусное пятно и малое фокусное расстояние. Выполнение этих условий

позволяло в соответствии со схемой съемки способом с прямым увеличением поместить объект контроля вблизи фокусного пятна для получения резких изображений объекта с большим коэффициентом увеличения  $K$ .

Однако практические образцы таких источников излучения имели большие габариты и массу, были сложны в эксплуатации. Более удобными в обращении и простыми по конструкции явились источники излучения на базе отпаянных микрофокусных рентгеновских трубок с вынесенным анодом [7]. Первым отечественным электровакуумным прибором такого типа стала рентгеновская трубка БС1 на напряжение 50 кВ производства ОКБ РП ЛОЭП «Светлана» (Ленинград). Конструкцию этой трубки, на десятилетия определившей основное направление развития микрофокусных источников рентгеновского излучения в нашей стране, можно считать классической.

Трубка имеет анодную трубу диаметром 8 и длиной 35 мм, в торце которой размещается мишень прострельного типа. На анодной трубе расположен постоянный кольцевой магнит для фокусировки электронного пучка, предварительно сформированного трехэлектродной пушкой. Мощность 2,5 Вт при диаметре фокусного пятна около 40 мкм обеспечивает интенсивность рентгеновского излучения, достаточную для целого ряда как технологических, так и медицинских исследований [8]. Отмеченные особенности конструкции трубки БС1 характерны для всех приборов серии БС, разработанных в последующие годы, например, БС6 на напряжение 100 кВ и БС15 – на 150 кВ (рис. 4).

На базе указанных трубок создана серия малогабаритных микрофокусных источников рентгеновского излучения серии РИ на максимальное напряжение 50÷150 кВ. Источники излучения серии РИ построены по моноблочной схеме, в отличие от источников излучения на трубках с постоянной откачкой, которые, как известно, строятся по кабельной схеме [9]. В кабельной схеме высокое напряжение подается к рентгеновской трубке от генераторного устройства по высоковольтному кабелю. Соответственно, источник излучения кабельного типа содержит три функционально отдельных высоковольтных узла. Каждый из этих узлов – генераторное устройство, кабель и излучатель с трубкой включает в себя специальные конструктивные элементы и разъемы, обеспечивающие высоковольтную изоляцию межблочных соединений.

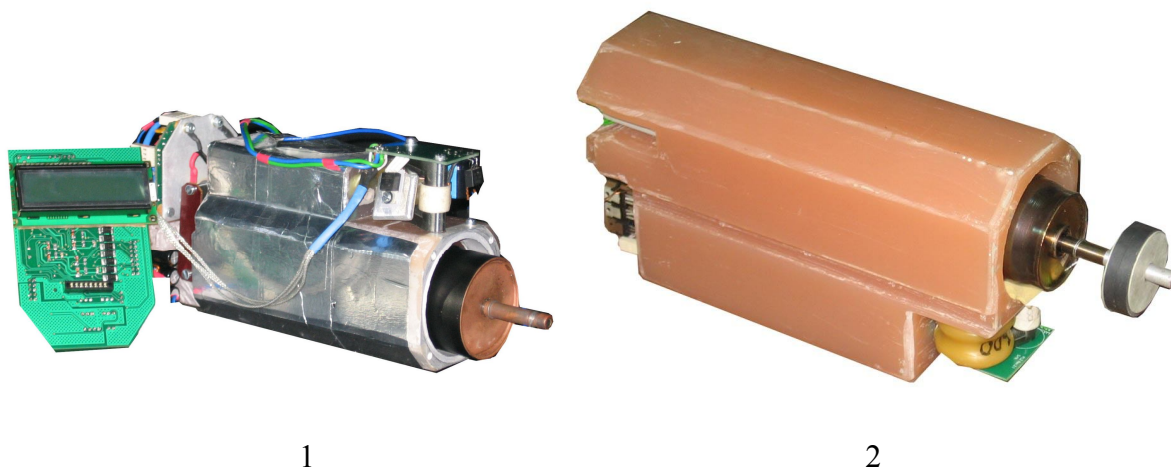


*Рис. 4. Микрофокусные рентгеновские трубки серии БС:  
1 – БС6, 2 – БС15, 3 – БС11, 4 – БС1.*

Одна из основных особенностей источников излучения серии РИ заключается в том, что генераторное устройство вместе с рентгеновской трубкой размещается внутри единого корпуса моноблока. При этом количество высоковольтной изоляции существенно уменьшается, а необходимость в высоковольтных разъемах исчезает принципиально. В целом конструкция упрощается, значительно снижаются общие габариты и вес.

Однако независимо от того, какая схема построения используется, основной вклад в массогабаритные характеристики источника рентгеновского излучения вносит высоковольтная изоляция и конструктивно-технологические решения по ее обеспечению. В большинстве современных микрофокусных источников излучения используется трансформаторное масло. «Масляная» конструкция обладает существенным недостатком: необходимостью компенсации увеличения объема маслonaполненного корпуса источника излучения, вследствие теплового расширения масла в процессе работы, а также – принятия дополнительных мер по обеспечению надежной герметичности корпуса.

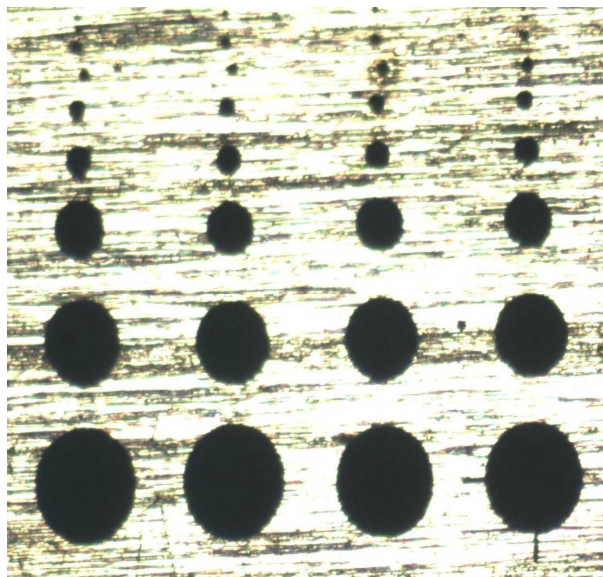
Возможным путем устранения этого недостатка является использование изолирующих материалов на основе эпоксидных компаундов. В этом случае, так называемая, твердотельная изоляция выполняет роль поддерживающих и фиксирующих конструктивных элементов генераторного устройства источника излучения.



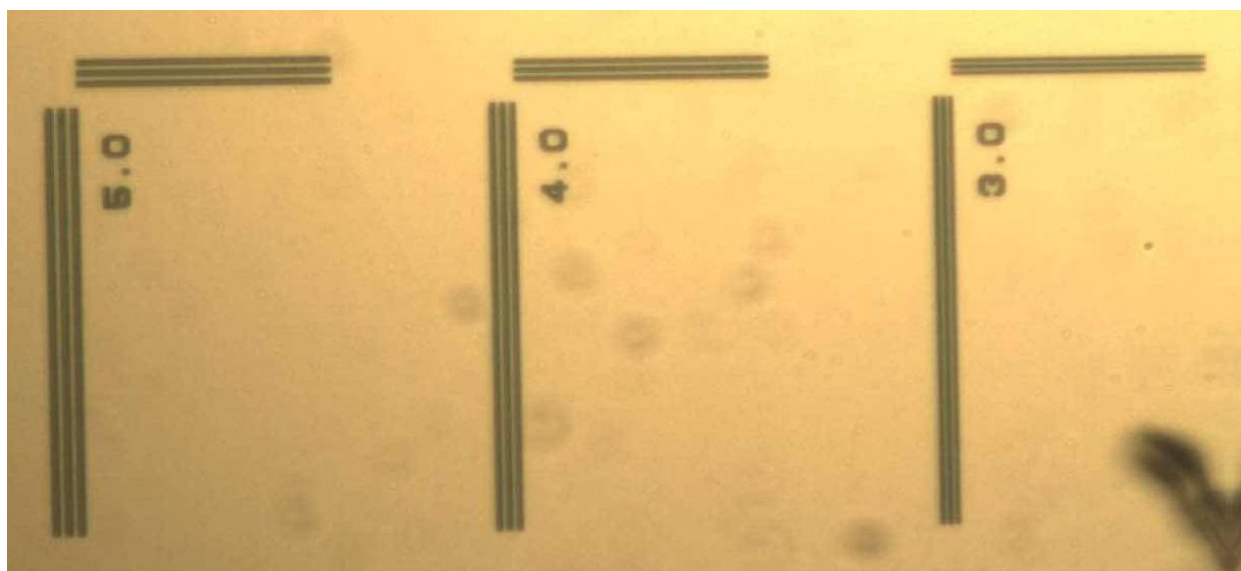
*Рис. 5. Внешний вид моноблоков (без корпуса):  
1 – РИ-50, 2 – РИ-150.*

На рисунке 5 представлен внешний вид некоторых моноблоков микрофокусных источников рентгеновского излучения серии РИ. Электрическая схема каждого из моноблоков содержит многокаскадный емкостной умножитель, высоковольтный и накальный трансформаторы, источники накального, анодного и сеточного напряжений, плату питания и управления. Элементы схемы и конструкции генераторного устройства залиты эпоксидным компаундом с кварцевым наполнителем. Для выбора и установки режимов работы рентгеновской трубки, а также их индикации используется специализированное микропроцессорное устройство.

Основное назначение источников излучения серии РИ – получение рентгеновских изображений структуры различных объектов микронного диапазона размеров с увеличением до нескольких сот раз. Для оценки просвечивающих возможностей наиболее высоковольтного из серии - источника излучения РИ-150 с рентгеновской трубкой БС15 были проведены специальные исследования. Эксперименты проводились в лаборатории рентгенотелевизионных систем УНЛ РТС СПбГЭТУ (ЛЭТИ). В качестве эталонов для определения минимальных размеров распознаваемой детали объекта использовались «дырчатый» и штриховой тесты. «Дырчатый» тест изготовлен из вольфрамовой фольги толщиной 20 мкм. Размеры отверстий, выполненных на технологической лазерной установке «КВАНТ-15», и расстояния между ними контролировались с помощью оптического микроскопа ММН-2 и цветной видеокамеры VEC-335. Диаметр максимального отверстия – 200 мкм, минимального – 10 мкм (рис. 6).



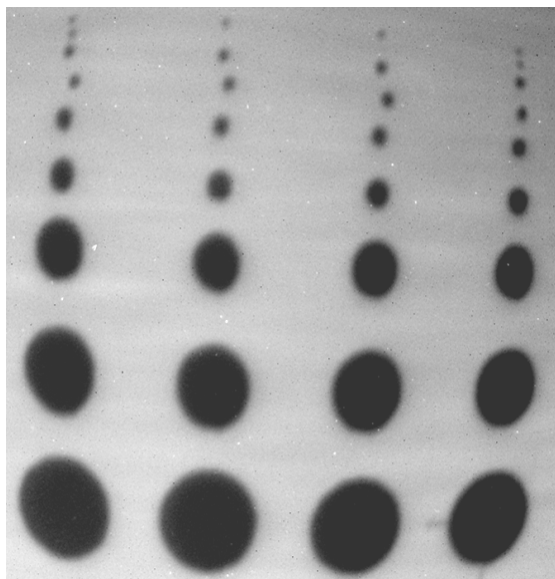
*Рис. 6. «Дырчатый» тест. Увеличенное оптическое изображение.*



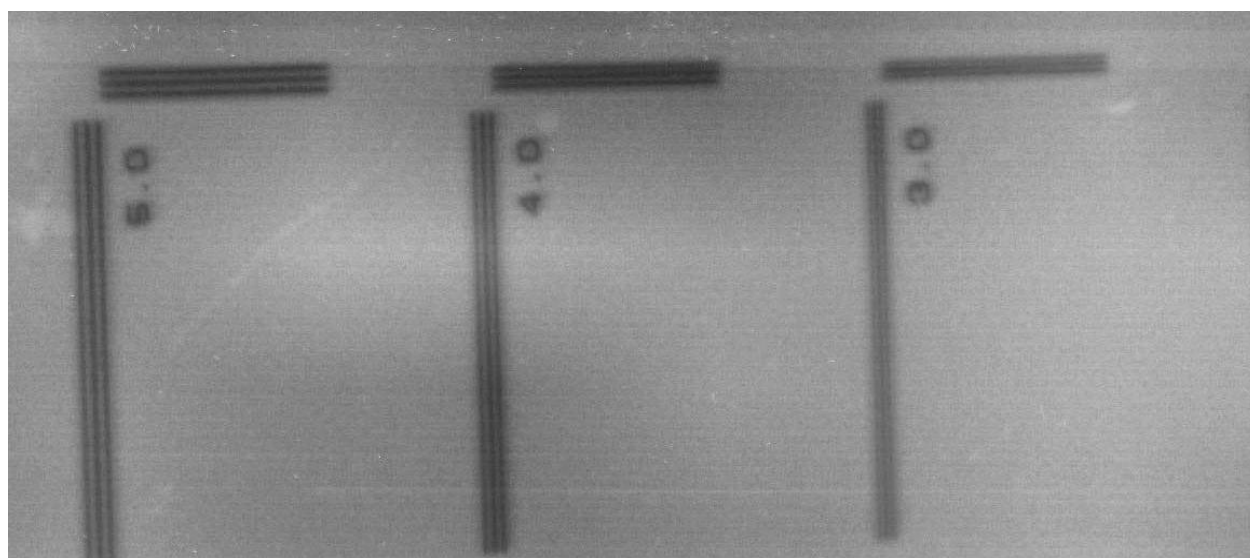
*Рис. 7. Штриховой тест. Увеличенное оптическое изображение.*

Штриховой тест (производства фирмы «Fein Focus») представляет собой несколько групп параллельных линий, выполненных напылением молибдена (толщина слоя 2 мкм) на лавсановую. Увеличенное изображение фрагмента теста представлено на рисунке 7. Цифры (от 2 до 15) рядом с отдельными группами линий означают ширину каждой линии и зазора между ними в микрометрах.

Рентгеновская съемка тестов производилась с увеличением около 100 раз. Регистрация рентгеновских изображений осуществлялась двумя способами. В первом случае использовалась рентгенотелевизионная система визуализации на основе флуоресцентного экрана, оптического объектива и ПЗС-камеры, во втором – система визуализации на основе экрана с фотостимулированным люминофором (ФСЛ).



*Рис. 8. Визуализированное рентгеновское изображение «дырчатого» теста.*



*Рис. 9. Визуализированное рентгеновское изображение штрихового теста.*

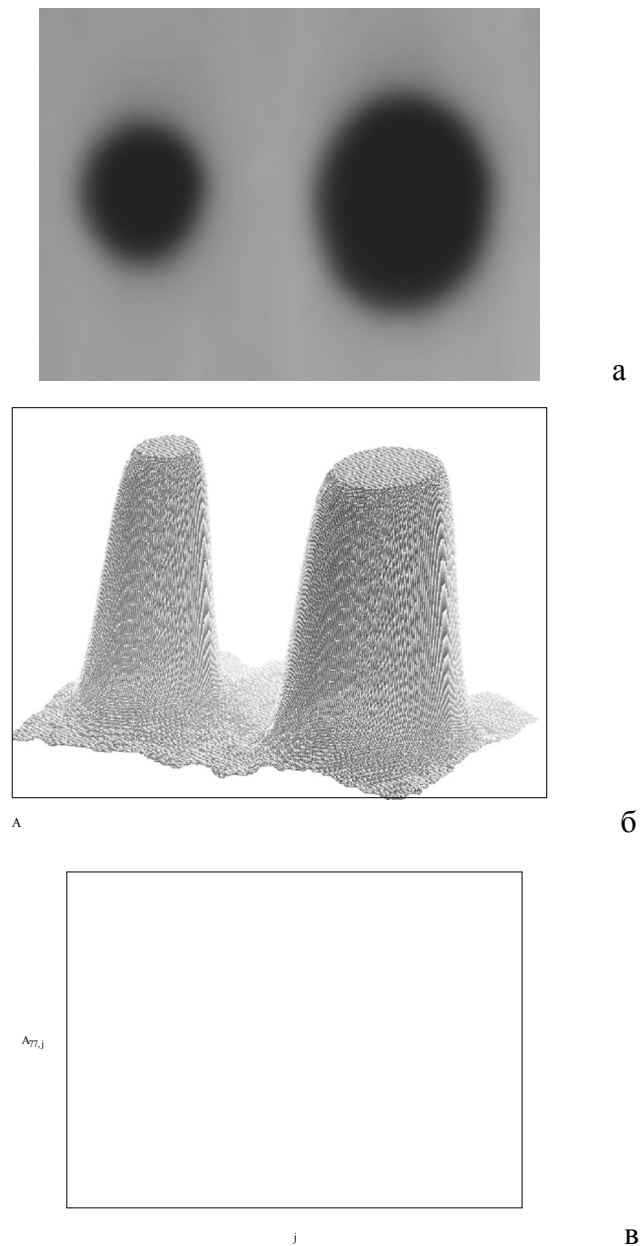
На рисунке 8 представлено изображение «дырчатого» теста в режиме съемки 70 кВ, 50 мкА; регистрация на систему визуализации «экран-оптика-ПЗС». На рисунке 9 – изображение штрихового теста в режиме съемки 30 кВ, 20 мкА; регистрация на систему визуализации «экран с ФСЛ».

В первом случае уверенно распознаются 10-микронные отверстия, во втором – 4-микронные штрихи. Следует отметить, что при съемке не использовались специальные алгоритмы стабилизации напряжения, тока и радиационного выхода источника излучения, а сами изображения не подвергались никакой математической обработке: «обрезчиванию», контрастированию и т.д.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что минимальный размер распознаваемого объекта, исследуемого с помощью источника рентгеновского излучения РИ-150, составляет несколько микрон.



Непосредственная оценка размеров фокусного пятна этого источника осуществлялась путем анализа функции распределения интенсивности излучения в рентгеновском изображении по диаметру отверстия для «дырчатого» теста (рис. 10) и по ширине линий для штрихового теста.



*Рис. 10. Распределение интенсивности излучения в рентгеновском изображении отверстия  $\varnothing 50$  и  $100$  мкм,:*

*а – визуализированное рентгеновское изображение отверстий,*

*б – трехмерное распределение интенсивности излучения,*

*в – двумерное распределение интенсивности излучения*

С этой целью проводилось дифференцирование функции распределения интенсивности (ФРИ) и с помощью выражения (2) определялся размер пятна.

$$d_{\text{эфф}} = \frac{D_{\text{эфф}}}{K}. \quad (2)$$

Особенности методики измерений поясняются с помощью рисунков 11 и 12. В расчетах принято, что распределение электронов в фокусном пятне по диаметру электронного пучка и квантов по диаметру фокусного пятна описывается кривой Гаусса.

Следует отметить, что вследствие проявления в мишени разных процессов взаимодействия ускоренных электронов и квантов рентгеновского излучения с веществом, размеры области возбуждения излучения (диаметр фокусного пятна) больше диаметра первичного пучка электронов [10]. Размеры этой области определяются, в первую очередь, рассеянием электронного пучка в мишени. Величина рассеяния зависит от ускоряющего напряжения и материала мишени.

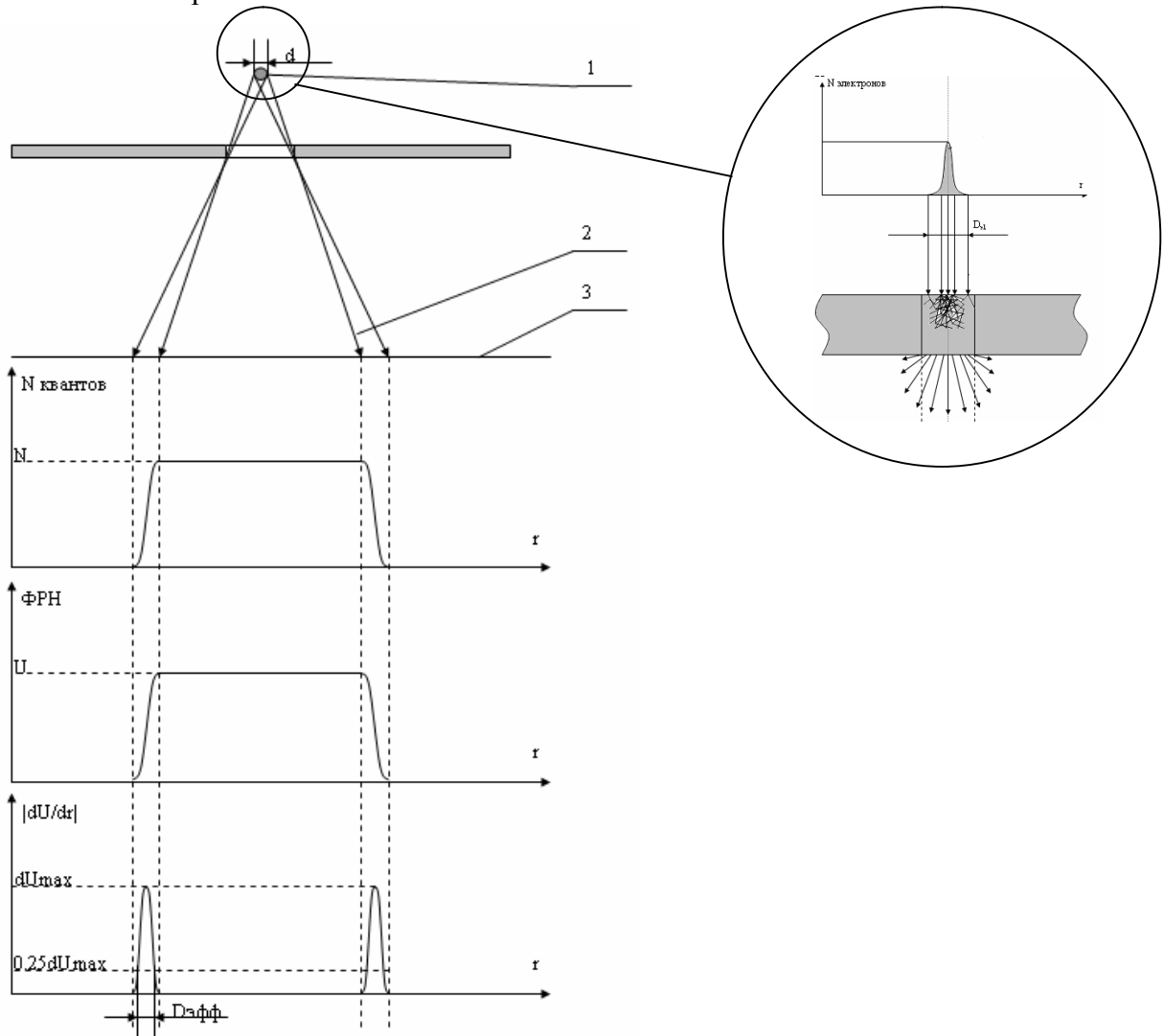


Рис. 11. К выводу размеров фокусного пятна:

1 – фокусное пятно, на врезке представлен процесс его формирования, 2 – поток рентгеновского излучения, 3 – плоскость приемника изображения.

Для уменьшения погрешности в определении размеров фокусного пятна, обусловленной электронами, вклад которых в общую интенсивность рентгеновского излучения минимален, используется понятие «эффективного фокусного пятна»  $\Gamma_{эфф}$ . Величина  $\Gamma_{эфф}$  в соответствии с ГОСТ 22091.9-86 определяется на уровне 0.5 от максимума производной ФРИ (рис. 11).

Результаты оценки составляют около 10 мкм для 30 кВ и около 25 мкм для 75 кВ.

Полученные результаты позволяют утверждать, что целый ряд задач современной рентгеновской микроскопии, решаемых в настоящее время с помощью стационарных микрофокусных источников излучения, может быть с успехом решен с помощью более простых, удобных и дешевых источников излучения на отпаянных трубках.

#### Литература

1. *Röntgen W.C.* Röntgenbild eines Jagdgewehrs. Sitzungsber. d. preuss Akad. d. Wiss. Mai 1897.
2. *Coerens P.* Einführung in die Metallographie. 3 Aufl. 344 S. Halle. W. Knapp, 1922.
3. *Быстров Ю.А., Иванов С.А.* Ускорительная техника и рентгеновские приборы: учебник для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1983.
4. Пионеры рентгенодефектоскопии – FEINFOCUS // Контроль. Диагностика, 2005. №8.
5. *Хокс П.* Электронная оптика и электронная микроскопия. – М.: Мир, 1974.
6. *Иванов С.А., Иоффе Ю.К., Кириенко С.В. и др.* Малогабаритные источники рентгеновского излучения // Обзоры по электронной технике. Сер. 4, 1987. Вып. 4.
7. *Иоффе Ю.К.* Портативные микрофокусные рентгеновские излучатели и аппараты // Электронная техника. Сер. 4. Электровакuumные и газоразрядные приборы, 1987. Вып. 2.
8. *Боровский А.И., Щукин Г.А.* Рентгеновские трубки и малогабаритные микрофокусные рентгеновские излучатели для медицины, промышленности и научных исследований // Электронная промышленность, 1991. №5.
9. *Потрахов Н.Н.* Моноблочный источник излучения на основе разборной рентгеновской трубки / Вакуумная техника и технология, 2006. Т.16, № 2, стр. 169-176.
10. *Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н.,* Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982, 632 с.