

УЧЁТ СКРЫТЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОФОКУСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ АППАРАТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Авакян А.К. (Продис.НДТ)

Цель данной работы – продемонстрировать особенности российских и импортных микрофокусных рентгеновских аппаратов, не прописанные явно в документации производителя, но оказывающие существенное влияние на характеристики системы визуализации. В работе представлены следующие экспериментальные наблюдения:

- зависимость размера фокусного пятна (ФП) от напряжения и тока трубки;
- нестандартная форма профиля интенсивности излучения ФП;
- различие эффективного размера ФП в поле визуализации для трубок с массивным анодом с известным углом наклона;
- дрейф (перемещение) действительного ФП по поверхности мишени в зависимости от параметров напряжения и тока трубки, а также в течение непрерывной экспозиции.

Перечисленные особенности прямо или косвенно оказывают влияние на пространственное и контрастное разрешение системы визуализации. Следовательно, их учёт и контроль позволят разработчику подтвердить применимость конкретной модели источника для решения поставленных технических задач, а также определить диапазон параметров работы источника в составе системы, в котором гарантированно достигаются необходимые характеристики визуализации.

Исследования выполнены в рамках проектов разработки систем инспекции печатных плат и микротомографии. Проекция регистрировалась на проскопанельный детектор ПРОДИС.Марк 1215СС с размером пикселя 49,5 мкм. В таблице 1 представлены исследованные рентгеновские аппараты [1-3].

Таблица 1. Исследованные рентгеновские аппараты с перечнем заявленных в документации производителя основных технических характеристик [1-3].

	РАП-100 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Россия)	РАП-150 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Россия)	XRБ011 (Spellman, США)	L9181-02 (Hamamatsu, Япония)
Рентгеновская трубка	БС-6	БС-16	Oxford Instruments 1000 Glass	Не указана
Тип анода	Прострельный вынесенный	Прострельный вынесенный	Массивный статический, угол наклона 20°	Не указан
Размер ФП, мкм	40 (*)	50 (**)	до 31,5	от 5 до 40 (***)
Напряжение трубки, кВ	от 50 до 100	от 50 до до 150	от 35 до 80	от 40 до 130
Мощность, Вт	до 10	до 10	до 50	до 39
Фокусировка	Постоянное магнитное поле	Постоянное магнитное поле	Не указана	Не указана

(*) в режиме 100 кВ, 20 мкА

(**) в режиме 125 кВ, 100 мкА

(***) в зависимости от мощности

Размер эффективного ФП измерялся по ширине градиента проекции штрихового свинцового тест-объекта пространственного разрешения (ТПР). В соответствии с ограничением методики, по одной проекции возможно измерить размер ФП только в одном направлении. На рисунке 1 показаны результаты измерения для аппаратов РАП-100, РАП-150 и Spellman XRB011 в зависимости от установленных параметров излучения.

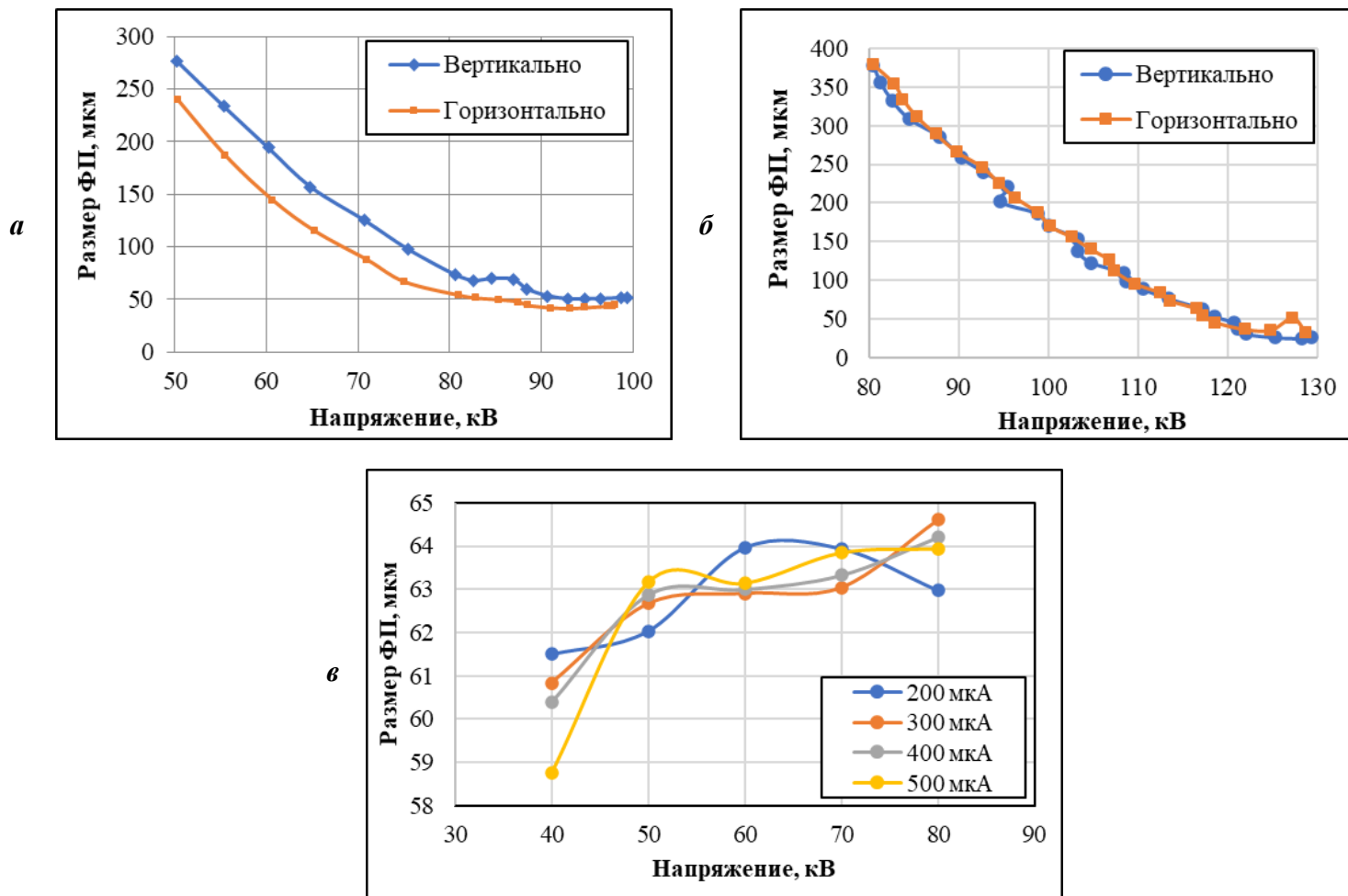


Рис. 1. Размер ФП аппаратов *а* – РАП-100, *б* – РАП-150 и *в* – Spellman XRB011 в зависимости от параметров напряжения и тока трубки.

В существующих стандартах измерения ФП либо не предусмотрена интерпретация измеренного размера в виде пространственного распределения интенсивности по поверхности мишени трубки, либо это распределение считается двумерным гауссовым. На практике информация о форме профиля необходима для аналитического расчета МТФ (Modulation transfer function) системы, а предположение о гауссовом распределении не является универсально верным для любого рентгеновского источника. Доступным методом приблизительной оценки формы профиля ФП является математический расчет производной сигнала проекции от границы высоконтрастного объекта. На рисунке 2 показана оценка профиля интенсивности излучения ФП на аппарате Spellman XRB011 в режиме 80 кВ, 500 мкА, геометрическое увеличение – 16,8 раз, частота штрихов ТПР – 0,6 пар линий на мм. В горизонтальном направлении профиль имеет необычную форму с ярко выраженным пиком шириной порядка 50 мкм в центральной части и отходящими от него в обе стороны «плато» с амплитудой 15 % от пиковой интенсивности. Общая ширина с учетом плато достигает

300 мкм. В вертикальном направлении профиль близок к гауссиану. Закономерность сохраняется во всем диапазоне параметров трубки. Наличие «плато» существенно ухудшает пространственное разрешение вдоль одного из направлений, при этом об этом отсутствует информация в документации, а заявленный номинальный размер не превышает 32 мкм.

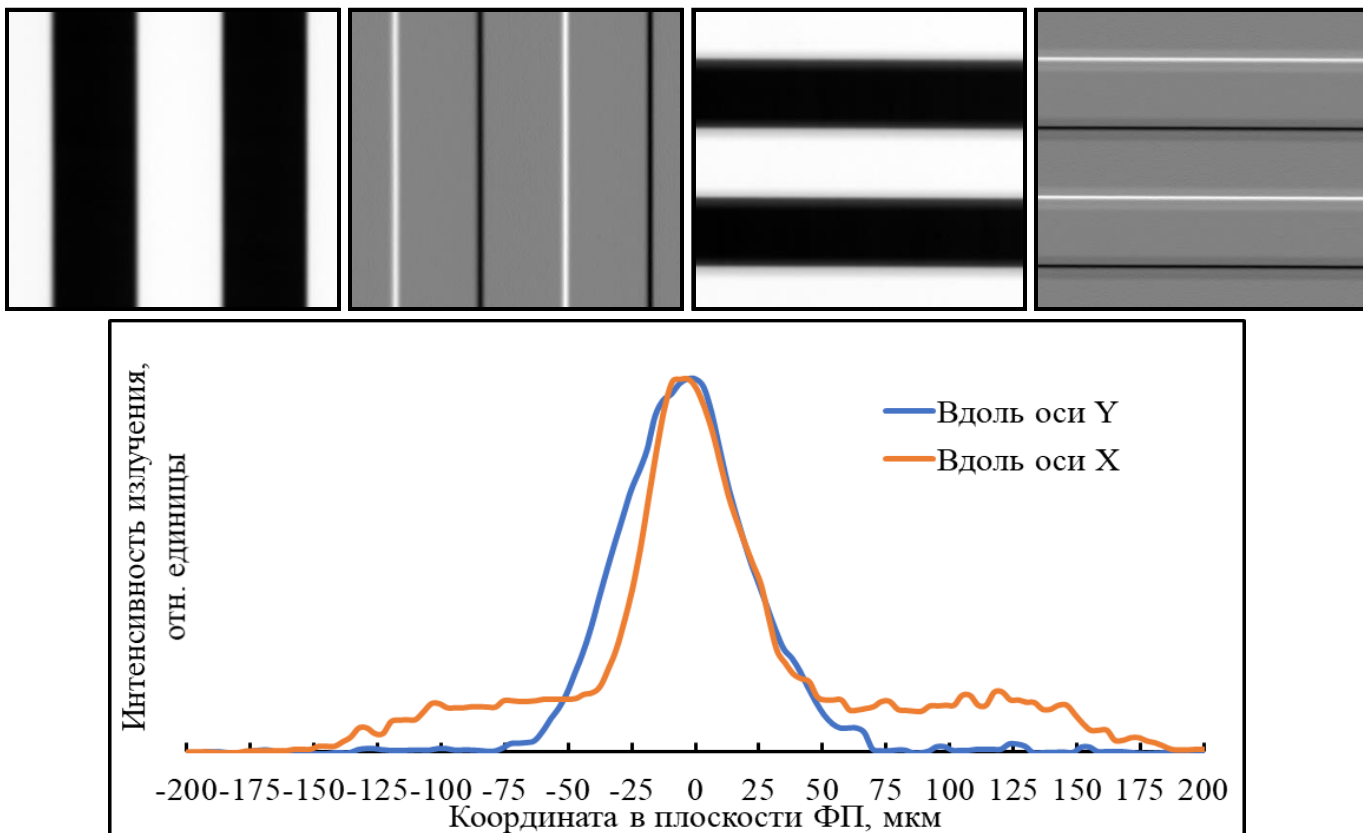


Рис. 2. Аппарат Spellman XRB011. Проекция ТПР и их производные в двух направлениях (сверху) и оценка профиля интенсивности излучения ФП по анализу производных (снизу).

Для рентгеновских трубок с массивным анодом, имеющим угол наклона, по законам геометрической оптики размер эффективного фокусного пятна зависит от направления визуализации [4]. Вследствие этого, пространственное разрешение системы неравномерно в зависимости от положения и угловой ориентации объекта в пучке излучения. С точки зрения автора, отсутствие в документации информации о типе анода, а также об угле съемки при измерении номинального размера ФП, может приводить к некорректной интерпретации реальных эксплуатационных характеристик источника.

На рисунке 3 показаны проекции ФП аппарата Spellman XRB011 в режиме 80 кВ, 400 мкА через отверстие диаметром 50 мкм в вольфрамовой пластине толщиной 100 мкм. Данный фантом не является точечным при номинальном размере действительного ФП 32 мкм, однако проекции качественно характеризуют изменение размера и угловой ориентации эффективного ФП. Коэффициент увеличения – $17 \pm 0,5$ раз. Изображение в центре соответствует позиции фантома на перпендикуляре к плоскости детектора через номинальное положение ФП источника.

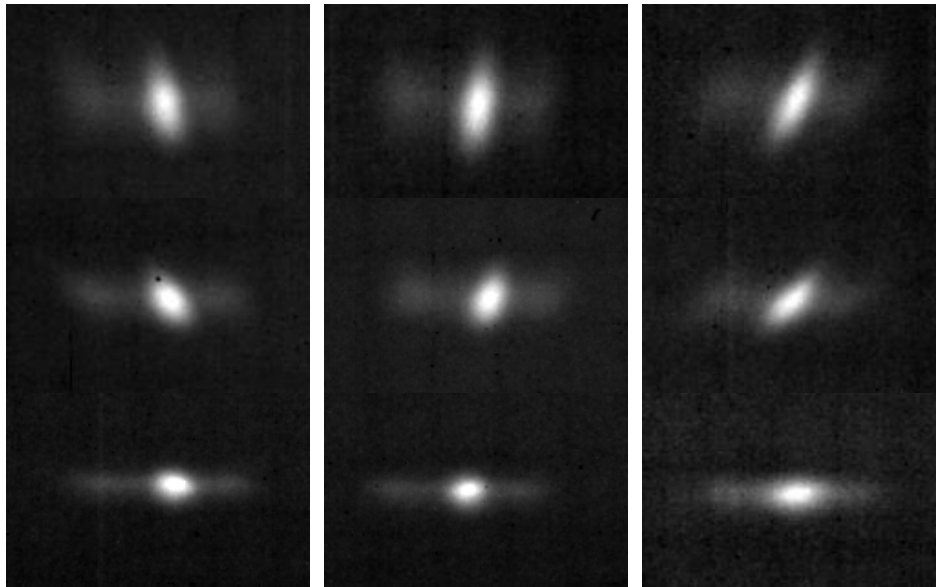


Рис. 3. Проекция ФП аппарата Spellman XRB011 через отверстие диаметром 50 мкм в зависимости от положения в поле визуализации. Изображения сверху вниз соответствуют направлению от катодной стороны к анодной стороне.

На рисунке 4 показана проекция ТПР (частота штрихов – 0,8 и 0,9 пар линий на мм, коэффициент увеличения – $45 \pm 0,5$ раз) на аппарате Hamamatsu L9181-02 в режиме 130 кВ, 100 мкА и зависимость размера эффективного ФП от положения проекции. На основании эксперимента сделан вывод о наличии угла наклона анода трубки данного аппарата.

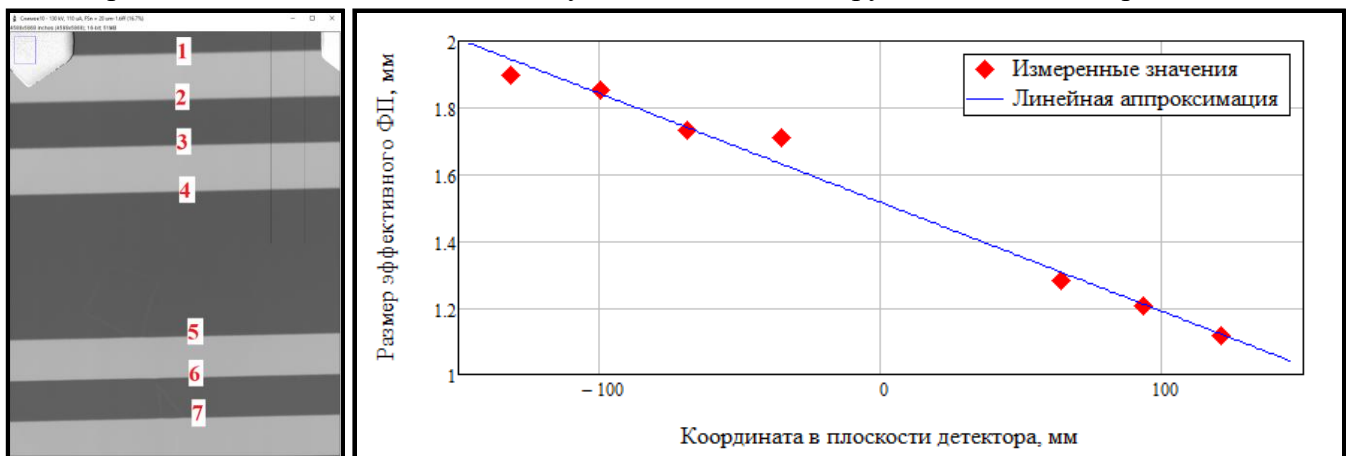


Рис. 4. Зависимость размера эффективного ФП аппарата Hamamatsu L9181-02 от направления визуализации (без пересчета с учетом коэффициента увеличения).

Общим для четырёх рассматриваемых рентгеновских аппаратов является эффект дрейфа действительного ФП, проявляющийся визуально в виде смещения на изображении проекции зафиксированного в пространстве объекта при переключении режимов тока и напряжения источника, либо с течением времени в ходе непрерывной экспозиции. Дрейф от режима аппарата предположительно объясняется свойствами системы фокусировки пучка, временной дрейф – эффектом нагрева и последующей деформации катодного узла. Доступное оборудование позволило экспериментально измерить значения относительного дрейфа, то есть смещения относительно положения, условно принятого за нулевое. На рисунке 5 слева показаны траектории дрейфа во времени (возле точек данных отмечено время в секундах с момента начала экспозиции) на трех режимах аппарата Spellman XRB011,

измерения представлены в плоскости детектора, коэффициент геометрического увеличения при съемке $-17 \pm 0,5$ раз. На рисунке 5 справа показан дрейф ФП аппарата РАП-150 по двум направлениям в зависимости от напряжения трубки (при фиксированном токе 50 мкА), измерения относительно положения ФП при напряжении 80 кВ.

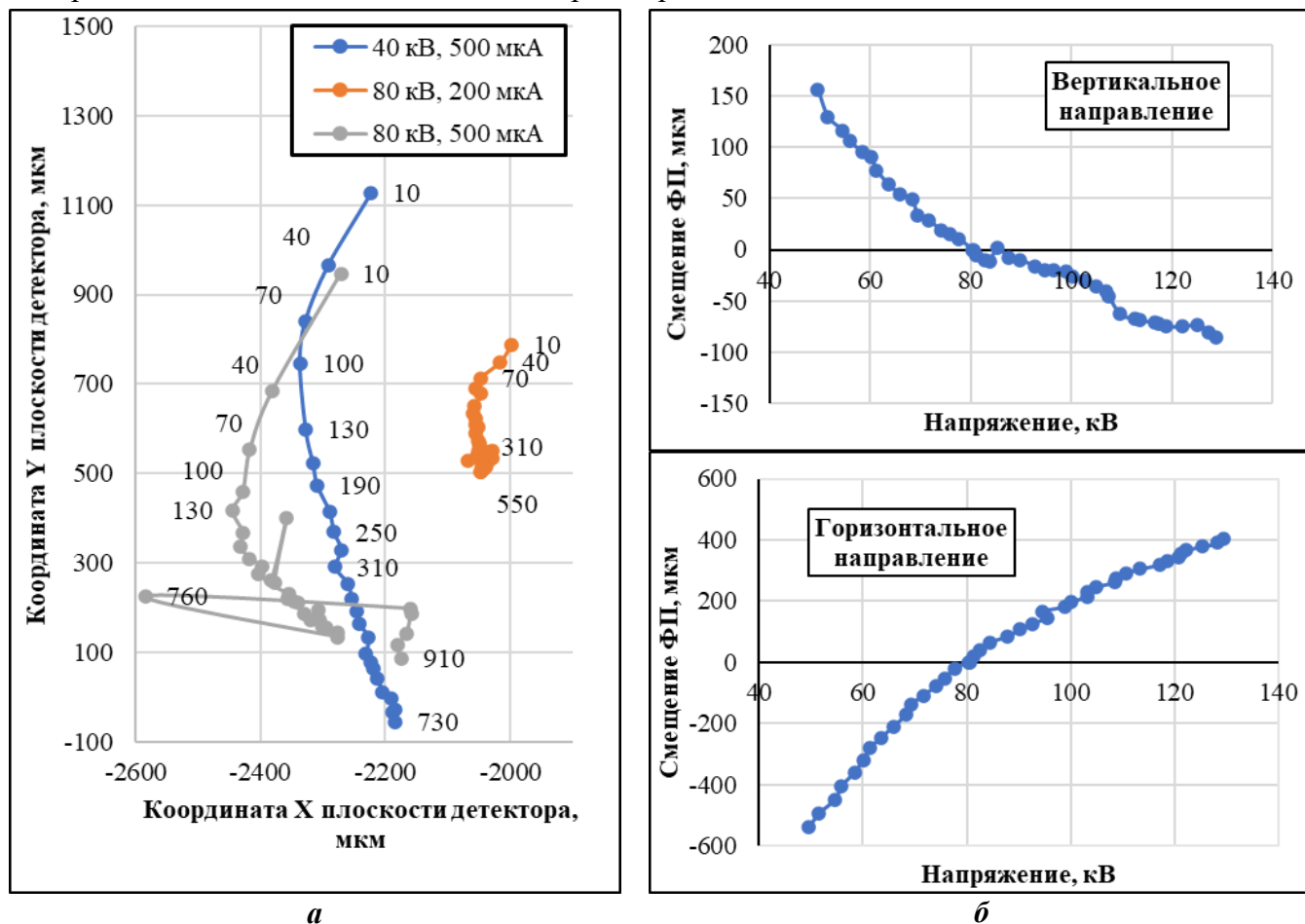


Рис. 5. Дрейф ФП. *а* – Spellman XRB011 на трех режимах напряжения и тока трубки, возле точек данных указано время в секундах с момента начала экспозиции. *б* – РАП-150 в двух направлениях в зависимости от напряжения трубки при токе 50 мкА

Представленные в работе особенности микрофокусных рентгеновских источников оказывают существенное влияние на пространственное разрешение системы визуализации. Их учёт и контроль позволят разработчику определить диапазон параметров работы источника в составе системы, в котором гарантированно достигаются необходимые для конечного пользователя характеристики визуализации.

Литература.

1. Подымский А. А. Мощные рентгеновские трубки для проекционной рентгенографии // ЛЭТИ. СПб. 2016.
2. Сайт производителя. URL: <https://www.spellmanhv.com/ru/high-voltage-power-supplies/XRB011> Дата обращения: 09.11.2020.
3. Сайт производителя. URL: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/L9181-02/index.html>. Дата обращения: 09.11.2020.
4. Buzug T. M. Computed tomography // Springer Handbook of Medical Technology. Springer. Berlin, Heidelberg. 2011.

5. Buzug T. M. Computed tomography // Springer Handbook of Medical Technology. Springer. Berlin, Heidelberg. 2011.