

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-10-35-42>

## УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ (ОБЗОР)

© **Николай Николаевич Потрахов<sup>1</sup>, Виктор Борисович Бессонов<sup>1</sup>, Анатолий Владимирович Ободовский<sup>1\*</sup>, Артем Юрьевич Грязнов<sup>1</sup>, Владимир Валерьевич Клонов<sup>1</sup>, Анатолий Иванович Мазуров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина); Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова 5; \*e-mail: [obodovsky@yandex.ru](mailto:obodovsky@yandex.ru)

<sup>2</sup> НИПК «Электрон»; Россия, 198188, Санкт-Петербург, Волхонское ш., квартал 2, д. 4Б.

*Статья поступила 7 февраля 2019 г. Поступила после доработки 18 июля 2019 г.  
Принята к публикации 24 июля 2019 г.*

Представлен обзор конструктивных элементов (отдельных компонентов, печатных плат и др.) рентгеновских систем для контроля изделий электронной техники. Приведены основные принципы построения подобных систем и типовой состав оборудования для обеспечения минимально необходимой функциональности. Среди основных технических характеристик выделена разрешающая способность, зависящая от размеров пикселя, толщины слоя сцинтиллятора детектора рентгеновского излучения и размеров эффективного фокусного пятна рентгеновской трубки. Проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков разборных (открытого типа) и отпаянных (закрытого типа) рентгеновских трубок — одного из основных узлов подобных систем. Представлены структурная схема разборной рентгеновской трубки, характеристики отечественных и зарубежных разработок. Отмечены основные недостатки систем на основе разборных трубок: большие габариты и масса, относительная сложность конструкции, наличие вакуум-плотных разборных соединений, необходимость откачной системы с высоким вакуумом и высоковольтной тренировки узлов трубки после их замены. Приведены конструкции отпаянной микрофокусной рентгеновской трубки БС и источника излучения на ее основе (параметры отдельных конструктивных элементов: диаметр и длина металлокерамического баллона — 75 и 315, диаметр и длина медной анодной трубки — 10 и 100 мм). Вольфрамовая мишень нанесена на бериллиевую подложку (выходное окно рентгеновской трубки) толщиной 0,2 мм, минимальное фокусное расстояние при рентгеновской съемке — 0,5 мм. При сравнении характеристик разборной рентгеновской трубки с постоянной откачкой и рентгеновской трубки, отпаянной от вакуумного поста, сделан вывод об успешности использования последней в современных системах рентгеновского контроля.

**Ключевые слова:** рентгеновские системы; рентгеновская трубка с постоянной откачкой; отпаянная рентгеновская трубка; неразрушающий контроль, инспекция.

## DESIGN OF X-RAY UNITS FOR INSPECTION APPLICATIONS (REVIEW)

© **Nikolay N. Potrakhov<sup>1</sup>, Victor B. Bessonov<sup>1</sup>, Anatoliy V. Obodovskiy<sup>1\*</sup>, Artem Yu. Gryaznov<sup>1</sup>, Vladimir V. Klonov<sup>1</sup>, Anatoliy I. Mazurov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> St. Petersburg Electrotechnical University ETU “LETI”; ul. Professora Popova 5, St. Petersburg, 197376, Russia; \*e-mail: [obodovsky@yandex.ru](mailto:obodovsky@yandex.ru)

<sup>2</sup> NIPK “Elektron”; Volhonskoe shosse, kvartal 2, d. 4B, St. Petersburg, 198188, Russia.

*Received February 7, 2019. Revised July 18, 2019. Accepted July 24, 2019.*

A review of the structural elements (individual components, printed circuit boards, etc.) of X-ray systems intended for inspection of electronic products is presented. The basic principles of constructing such systems and typical composition of the equipment capable of providing the minimum necessary functionality are considered. Among the main technical characteristics an emphasis is made on the resolution power, which depends on the pixel size and thickness of the scintillator layer of the X-ray detector, as well as on the size of the effective focal spot of the X-ray tube. Comparative analysis of the advantages and shortcomings of clastic (open type) and sealed (closed type) X-ray tubes — one of the main nodes of such systems — is carried out. A structural diagram of a clastic X-ray tube is presented along with the characteristics of domestic and foreign developments. The main disadvantages of the systems based on clastic tubes are considered. Large dimensions, large weight, relative complexity of the construction, presence of the vacuum-tight collapsible connections, the necessity of using a pumping system providing high vacuum, the necessity of high-voltage training of the tube assemblies after their replacement, and high cost are noted separately. The design of sealed off BS microfocus X-ray tube and radiation sources on their base which

can be used in the development of domestic X-ray systems are briefly described. The diameter and length of the metal-glass cylinder tube are 75 and 315 mm, and the diameter and length of the copper anode tube 10 and 100 mm, respectively. A tungsten target is deposited on a beryllium substrate (X-ray tube exit window) with a thickness of 0.2 mm. The minimum focal length during x-ray photography is 0.5 mm. A comparative analysis of the characteristics of a clastic (collapsible) X-ray tube with continuous pumping and an X-ray tube sealed from an exhaust cart revealed the possibility of successful use of sealed tubes in modern X-ray systems used for inspection applications.

**Keywords:** X-ray systems; open X-ray tube; closed X-ray tube; non-destructive testing; inspection.

## Введение

В отличие от проблемы выбора технологических установок для рентгеновского контроля вопросы их конструирования практически не обсуждаются в технической литературе.

В настоящее время в состав таких устройств в общем случае входят источник излучения (на основе разборной рентгеновской трубки с постоянной откачкой) и цифровой приемник изображения (на основе плоскочувствительного детектора рентгеновского излучения), которые располагаются в специальной камере, обеспечивающей полную защиту от неиспользуемого рентгеновского излучения в ходе рентгенографических исследований. Современные установки с возможностью томографии позволяют получать трехмерные рентгеновские изображения объектов контроля (ОК) с разрешением в единицы микрон.

Совершенствование электронной компонентной базы в части повышения степени интеграции и уменьшения размеров микросхем, а также пассивных RLC-компонентов привело к созданию новых технологий их монтажа (например, микро-BGA на печатных платах) [1–3]. Для обеспечения контроля технологических операций при изготовлении электронных компонентов и качества монтажа печатных плат непосредственно в условиях производства были разработаны специализированные рентгеновские установки [4, 5].

При контроле печатных плат рентгеновское изображение обычно получают двумя способами: контактным и проекционным [6]. Для соблюдения соответствующих рентгенооптических (геометрических) условий рентгеновской съемки камера снабжается автоматизированными механизмами, позволяющими перемещать рентгеновскую трубку, детектор рентгеновского излучения и контролируемый объект относительно друг друга по заданной траектории и в необходимых пределах. Важную роль при обеспечении заявляемых функциональных возможностей установки выполняет специализированное программное обеспечение для компьютерной обработки получаемых изображений [7–9].

Цель работы — обзор методик и технических средств получения рентгеновских изображений ОК.

## Разрешающая способность

Одна из основных характеристик рентгеновской установки — пространственная разрешающая способность, которая при прочих равных условиях зависит от размеров пикселя приемника рентгеновского излучения и фокусного пятна рентгеновской трубки. Размер пикселя определяется исключительно технологией производства приемника и не зависит от физико-технических условий проведения рентгенографии (напряжения и тока рентгеновской трубки, фокусного расстояния, поля облучения и др.), размер фокусного пятна — диаметром пучка электронов на ее мишени и в общем случае — напряжением на ней. Величина напряжения на рентгеновской трубке, в свою очередь, устанавливается исходя из плотности и толщины объекта рентгенографического контроля.

Как известно, длина пробега электрона в материале мишени рентгеновской трубки связана с его энергией  $E$  [10], которая определяется формулой

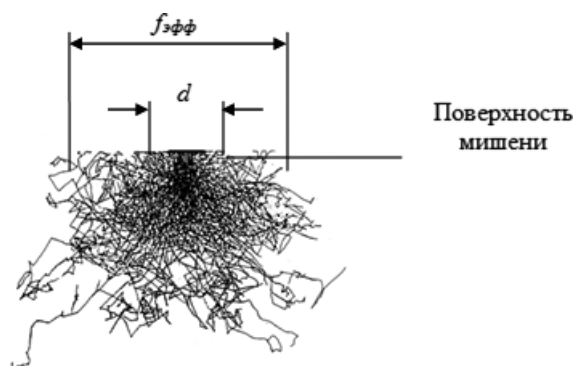
$$E = eU, \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $U$  — напряжение на рентгеновской трубке.

Траектории электронов при торможении в мишени моделируют с помощью метода Монте-Карло (один из наиболее распространенных программных пакетов — Casino Monte Carlo [11]). На рис. 1 представлены результаты расчета траекторий ускоренных электронов при торможении в вольфрамовой мишени.

Принято считать, что рентгеновское излучение генерируется в некотором активном слое мишени [12], толщина которого определяется длиной пробега (диапазоном рассеивания)  $l$  ускоренных электронов в материале мишени. На рис. 2 приведена зависимость диапазона рассеивания  $l$  ускоренных электронов в вольфрамовой мишени от напряжения на рентгеновской трубке и, соответственно, эффективного диаметра фокусного пятна  $f_{\text{эфф}}$  [13].

Видно, что даже при диаметре пучка электронов, стремящемся к нулю, фокусное пятно будет



**Рис. 1.** Траектории ускоренных электронов при торможении в вольфрамовой мишени:  $f_{эфф}$  — эффективный диаметр фокусного пятна;  $d$  — диаметр пучка электронов

**Fig. 1.** Trajectories of accelerated electrons upon their retardation in a tungsten target:  $f_{эфф}$  — effective diameter of the focal spot;  $d$  — diameter of the electron beam

иметь конечные размеры и тем большие, чем больше напряжение на рентгеновской трубке.

В установках для рентгеновского контроля, как правило, используют рентгеновские трубки с прострельной мишенью [10]. В этом случае в целях «использования» всех ускоренных электронов для получения максимальной интенсивности генерируемого рентгеновского излучения толщину мишени  $t$  выбирают с учетом длины пробега электронов при максимальном рабочем напряжении  $U_{max}$ :

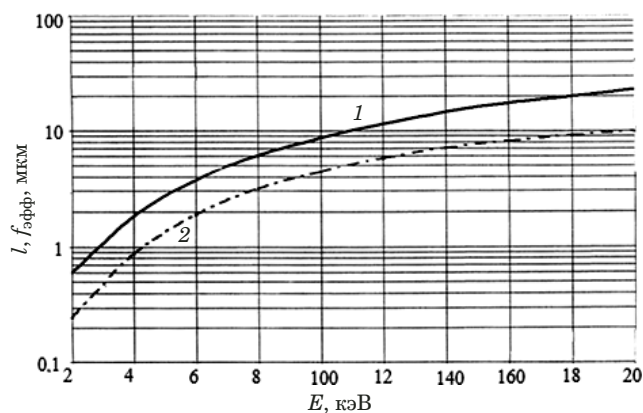
$$t \geq l(U_{max}). \quad (2)$$

Соответственно, уменьшение толщины прострельной мишени (для уменьшения размеров фокусного пятна) приводит к существенному падению интенсивности генерируемого рентгеновского излучения.

### Мощность на аноде рентгеновской трубки

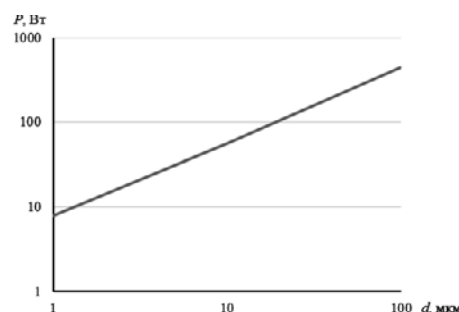
Другой фактор, определяющий размеры фокусного пятна, — ограничение мощности, подводимой электронным пучком к мишени анода рентгеновской трубки. Отметим, что только незначительная часть подводимой мощности расходуется на генерирование рентгеновского излучения. На практике можно считать, что вся она идет на нагрев анодного узла [14]. Превышение допустимого значения подводимой мощности на единицу площади поверхности мишени, бомбардируемой электронным пучком, приводит к резкому сокращению срока ее службы.

Зависимость величины мощности  $P$  от диаметра поперечного сечения пучка электронов  $d$  для конструкций анодных узлов микрофокусных рентгеновских трубок приведена на рис. 3 [15].



**Рис. 2.** Зависимость диапазона рассеивания  $l$  (1) ускоренных электронов в вольфрамовой мишени и эффективного диаметра фокусного пятна  $f_{эфф}$  (2) от энергии электронов в рентгеновской трубке

**Fig. 2.** Dependence of the range of electron scattering  $l$  in a tungsten target (1) and the effective diameter of the focal spot  $f_{эфф}$  (2) on the electron energy in the X-ray tube



**Рис. 3.** Зависимость величины мощности  $P$ , подводимой к прострельной вольфрамовой мишени, от диаметра пучка электронов  $d$

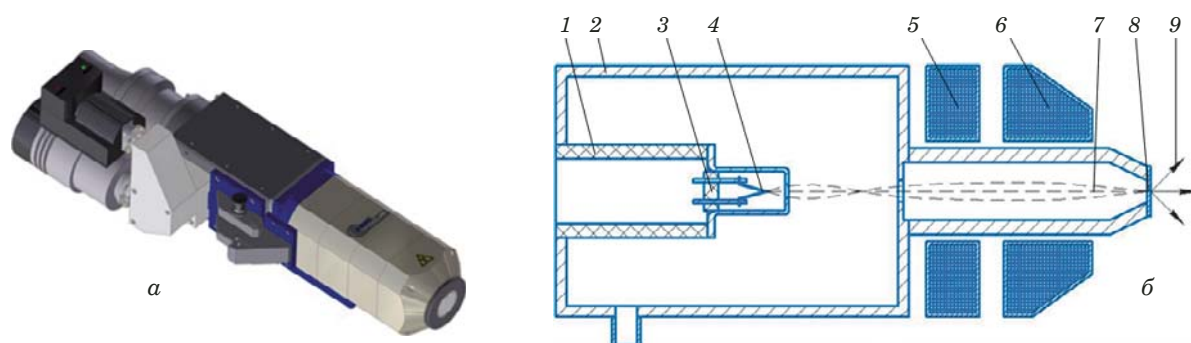
**Fig. 3.** Dependence of the power  $P$  supplied to the tungsten through-target on the electron beam diameter  $d$

Приближенная универсальная оценка удельной тепловой нагрузки на мишень основывается на том, что анодный узел, содержащий тонкопленочную вольфрамовую мишень прострельного типа, нанесенную на бериллиевую подложку, в условиях естественного конвективного теплообмена с окружающей средой выдерживает удельную тепловую нагрузку  $p$  величиной 1 Вт/мкм<sup>2</sup>.

В зависимости от диаметра фокусного пятна удельная тепловая нагрузка на мишень меняется. Так, при увеличении диаметра с 0,4 до 20 мкм  $p$  уменьшается с 6,4 до 0,1 Вт/мкм<sup>2</sup>. Ориентировочный срок службы мишени при этом составляет несколько сот часов. Критерий выхода мишени из строя — эрозия (подплавление, отслаивание, растрескивание, распыление и др.) поверхности в точке приложения тепловой нагрузки [16].

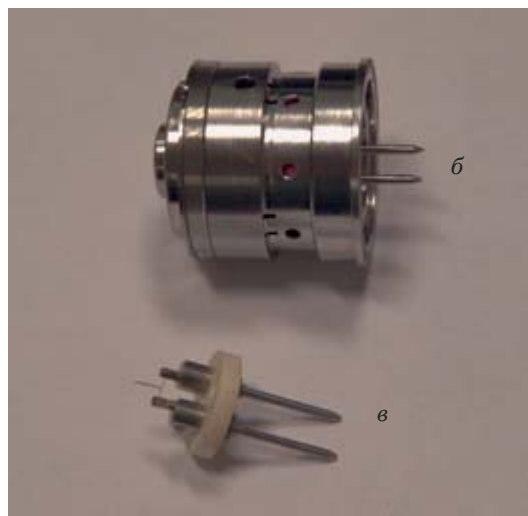
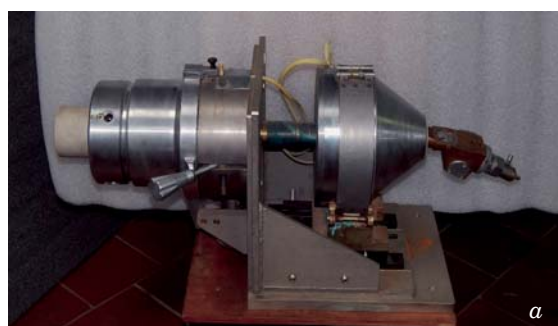
Таким образом, такой параметр, как размер фокусного пятна, без дополнительных указаний





**Рис. 4.** Разборная микрофокусная рентгеновская трубка с вынесенным анодом прострельного типа (а) и ее конструкция (б): 1 — высоковольтный изолятор; 2 — корпус трубки; 3 — катодно-сеточный узел; 4 — V-образный катод; 5 — отклоняющая электромагнитная система; 6 — фокусирующая электромагнитная система; 7 — пучок ускоренных электронов; 8 — узел мишени; 9 — поток рентгеновского излучения

**Fig. 4.** Microfocus clastic through-target X-ray tube with a remote anode (a) and design (b): 1 — high-voltage insulator; 2 — tube body; 3 — cathode-grid node; 4 — V-shaped cathode; 5 — deflecting electromagnetic system; 6 — focusing electromagnetic system; 7 — beam of accelerated electrons; 8 — target node; 9 — X-ray flux



**Рис. 5.** Разборная рентгеновская трубка с постоянной откачкой с электромагнитной фокусирующей системой (а), катодный узел (б) и катод (в)

**Fig. 5.** Clastic X-ray tube under continuous pumping with an electromagnetic focusing system (a), cathode assembly (b) and cathode (c)

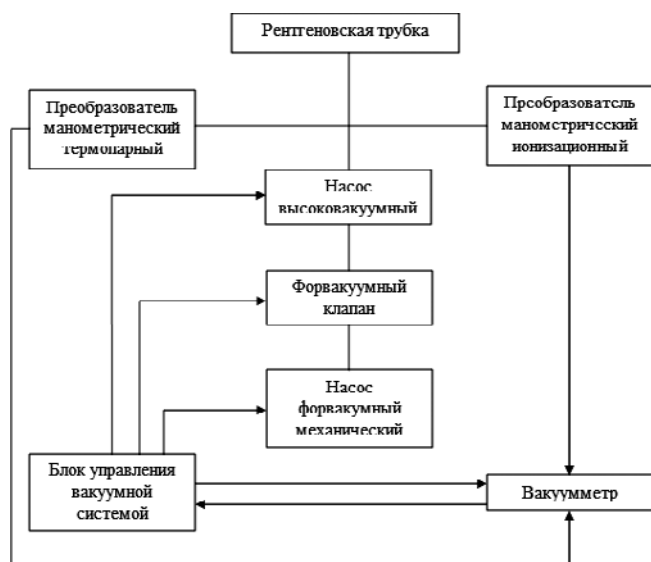
на режим работы рентгеновской трубки, при котором проводились измерения, может быть использован для оценки функциональных возможностей установки весьма условно. Важнее оценить чувствительность устройства, для чего необ-

ходимо знать минимальные размеры отдельной детали, обнаруживаемой на изображении специального тест-объекта при определенном соотношении сигнал — шум (ГОСТ ISO 17636-2:2013). Для решения этой задачи используют различные эталоны (проволочные, канавочные и др.), изготовленные с соответствующим выбором размеров деталей (ГОСТ 75. 12 – 82).

### Конструкция рентгеновской трубки

Ведущие производители выпускают установки в большинстве своем исключительно на основе микрофокусных рентгеновских трубок с постоянной откачкой («открытая» трубка). Типовая конструкция такой трубки представлена на рис. 4. Ее достоинство — возможность неоднократной замены катода и мишени анода [4]. Это позволяет эксплуатировать трубку на предельных нагрузках — эмиссионной на катод и тепловой на мишень, однако обуславливает ряд недостатков по сравнению с отпаянными от вакуумирующей (откачной) системы трубками («закрытая» трубка): 1) большие габариты, масса и сложность конструкции, связанные с использованием металлокерамического узла изолятора, рассчитанного на полное рабочее напряжение трубки; 2) вакуумно-плотные механические разборные соединения металлического баллона; 3) специализированная откачная система; 4) необходимость высоковольтной тренировки трубки после замены отдельных узлов, что накладывает дополнительные требования на генераторное устройство источника питания трубки, и последующей юстировки ее электронно-оптической системы (ЭОС).

Величина давления в баллоне электровакуумного прибора определяется типом используемого эмиттера электронов. Для рентгеновских



**Рис. 6.** Структурная схема откачной системы разборной рентгеновской трубки

**Fig. 6.** Block diagram of the vacuum-pumping system of a clastic X-ray tube

трубок с прямонакальным вольфрамовым катодом величина давления в откачной системе перед отпайкой трубки в общем случае составляет  $(1 - 2) \cdot 10^{-7}$  мм рт.ст.

Разборная рентгеновская трубка с постоянной откачкой показана на рис. 5, структурная схема откачной системы — на рис. 6.

Аналогично реализуется традиционный для вакуумной техники двухступенчатый (последовательно двумя отдельными насосами) способ откачки. В современных установках в качестве второй ступени в откачных системах используют турбомолекулярный насос, способный откачать объем трубки до рабочего вакуума при помощи «литрового» форвакуумного насоса за время от нескольких до десятков минут.

Однако более простыми по конструкции и удобными в эксплуатации оказались отпаянные трехэлектродные металlostеклянные трубки серии БС с вынесенной на длинном полове аноде из вакуумного баллона тонкопленочной прострельной мишенью [16].

В последнее время серийно выпускается рентгеновская трубка БС-16 (III) (рис. 7). По своим основным параметрам и характеристикам она приближена к разборным трубкам с постоянной откачкой (максимальное напряжение — 150 кВ, максимальный ток — 100 мкА, диаметр фокусного пятна, измеренный методом сеток (ГОСТ 22091.9–86), при напряжении 150 кВ — 5 мкм) [17].

Диаметр и длина металlostеклянного баллона и медного анода БС-16 (III) составляют 75 и 315, 10 и 100 мм соответственно. Вольфрамовая



**Рис. 7.** Рентгеновская трубка БС-16 (III)

**Fig. 7.** A BS-16 (III) X-ray tube

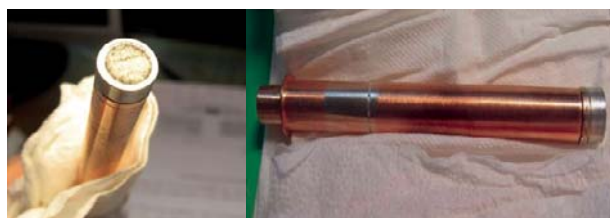
мишень нанесена на бериллиевую подложку (выходное окно рентгеновской трубки) толщиной 0,2 мм. Минимальное фокусное расстояние при проведении рентгеновской съемки — 0,5 мм. В качестве материала выходного окна можно использовать искусственный алмаз, для чего сконструирован анодный узел на основе пластины из искусственного алмаза площадью  $10 \times 10$  и толщиной 0,2 мм (рис. 8).

Для обеспечения заданных диаметра и положения электронного пучка на мишени трубки БС-16 (III) предусмотрены внутренняя электростатическая (на основе трехэлектродной ЭОС) и внешняя магнитная (на основе постоянного кольцевого магнита) фокусирующие системы. Гарантированный срок службы трубки в номинальном режиме работы составляет 300 ч (практически он может быть существенно больше). Основная причина выхода изделия из строя — обрыв (перегорание) катода вследствие утоньшения и охрупчивания нити накала из-за испарения вольфрама с ее поверхности.

### Моноблок рентгеновского излучения

На основе трубки БС-16 (III) разработан источник рентгеновского излучения (ИРИ) моноблочного типа РАП150М-0,15Н.3 (рис. 9) [18], в котором реализована схема высоковольтного питания рентгеновской трубки с заземленным анодом. Ускоряющее напряжение отрицательной полярности подается на катодно-сеточный узел от генераторного устройства ИРИ. В состав генераторного устройства, помимо высоковольтного источника ускоряющего напряжения, входят источники питания, накала катода и управляющего (сеточного) напряжения. В ИРИ применены современные схмотехнические решения: непосредственное выпрямление сетевого напряжения, частотное преобразование выпрямленного напряжения, частотно-импульсный режим работы преобразователя (модуляция выпрямленного напряжения) и многокаскадное умножение модулированного напряжения.

В конструкции моноблока используется комбинированная масляно-твердотельная изоляция. Все элементы электрической схемы высоковольт-



**Рис. 8.** Анодный узел с выходным окном из искусственного алмаза

**Fig. 8.** Anode node with an artificial diamond exit window

ного источника напряжения залиты эпоксидным компаундом, зазор между стенками баллона трубки и высоковольтного гнезда моноблока заполнен трансформаторным маслом [18].

Управление режимами работы рентгеновской трубки (напряжением, токами накала и анода, временем экспозиции, положением фокусного пятна на мишени) осуществляют с помощью микропроцессорного устройства.

Мощность, потребляемая РАП150М-0,15Н.3, в номинальном режиме работы не превышает 200 Вт. Габариты моноблока — 110 × 220 × 360 мм, масса — 8 кг.

Усредненные значения отдельных параметров, важных для сравнения конструкций ИРИ на основе разборной с постоянной откачкой и отпаянной рентгеновских трубок, приведены в таблице.

Видно, что основные параметры обеих конструкций ИРИ (напряжение, мощность на мишени анода рентгеновской трубки, диаметр фокусного пятна) близки. Вместе с тем по габаритам, массе



**Рис. 9.** Моноблок РАП150М-0,15Н.3

**Fig. 9.** An X-ray machine RAP150M-0.15N.3

и суммарной потребляемой мощности ИРИ на основе отпаянной трубки существенно превосходят ИРИ на основе разборной трубки с постоянной откачкой.

Отметим, что замена отпаянной трубки в моноблоке ИРИ технологически проще и занимает принципиально меньше времени по сравнению с заменой узлов в разборной трубке, поскольку в этом случае отсутствует необходимость в последующих юстировках ЭОС, высоковольтной тренировки и других операциях.

## Заключение

Использование рентгеновских аппаратов на основе отпаянных трубок технически и экономически оправдано в системах микрофокусной рентгеновской томографии, микроскопии, проекционной рентгенографии и других областях неразрушающего контроля.

Микрофокусная рентгеновская трубка БС-16 (III) и рентгеновский аппарат на ее осно-

Параметры ИРИ на основе разборной и отпаянной рентгеновских трубок

X-ray source parameters for clastic (collapsible) and sealed X-ray tubes

| Параметр                                                     | Разборная трубка<br>с постоянной откачкой | Отпаянная трубка              |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|
| Минимальный срок службы мишени, катода или трубки в целом, ч | 300 (возможна замена)                     | 300                           |
| Габариты трубки, мм                                          | 640 × 234 × 310                           | 315 × 75 × 75                 |
| Масса трубки, кг                                             | 30                                        | 0,5                           |
| Тип внешней фокусирующей системы                             | Электромагнитная                          | На основе постоянного магнита |
| Мощность, потребляемая фокусирующей системой, Вт             | До 500                                    | 0                             |
| Габариты фокусирующей системы, мм                            | 167 × 215 × 215                           | 40 × 50 × 50                  |
| Масса фокусирующей системы, кг                               | 5                                         | 0,1                           |
| Габариты откачной системы, мм                                | 300 × 300 × 320                           | 0                             |
| Масса откачной системы, кг                                   | 15                                        | 0                             |
| Мощность, потребляемая откачной системой, Вт                 | 400                                       | 0                             |
| Тип высоковольтного источника питания                        | Кабельный                                 | Моноблочный                   |
| Мощность, потребляемая высоковольтным источником питания, Вт | 320                                       | 200                           |
| Габариты высоковольтного источника питания, мм               | 559 × 483 × 178                           | 110 × 220 × 285               |
| Масса высоковольтного источника питания, кг                  | 7,5                                       | 7,5                           |



ве сопоставимы с приборами, использующими разборные трубки с постоянной откачкой практически по всем основным техническим параметрам, а в отдельных случаях превосходят их. Нарботанная практика эксплуатации РАП150М-0,15Н.3, в том числе в составе микрофокусного рентгеновского компьютерного томографа МРКТ-01 [19], показывает, что он по своим техническим данным также не уступает самым современным конструкциям ИРИ на основе разборных рентгеновских трубок с постоянной откачкой [20].

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта по теме «Создание портативной установки для микрофокусной рентгенографии в целях оперативного контроля микроструктуры, физико-химических свойств и определения остаточного ресурса авиационных деталей и узлов из полимерных композиционных материалов» (проект № 15-19-00259).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пирогова Е. В. Проектирование и технология печатных плат: учеб. для вузов. — М.: Форум, 2005. — 560 с.
2. Баканов Г. Ф., Соколов С. С., Суходольский В. Ю. Основы конструирования технологии радиоэлектронных средств. — М.: Akademia, 2007. — 363 с.
3. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: учеб. для вузов. — СПб.: Лань, 2008. — 400 с.
4. Шмаков М. Выбор системы рентгеновского контроля. Взгляд технолога / Технологии в электронной промышленности. 2006. № 4. С. 33 – 40.
5. Гаранин А. Критерии выбора установки рентгеновского контроля: необходимо и достаточно / Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2012. № 6. С. 170 – 177.
6. Артемьев Б. В., Буклей А. А. Радиационный контроль: учеб. пособие / Под. общ. ред. В. В. Клюева. — М.: Спектр, 2013. — 192 с.
7. Грязнов А. Ю., Жамова К. К., Бессонов В. Б., Лившиц А. О., Кунашик Е. С. Методика получения псевдоцветных рентгеновских изображений в двухэнергетичной рентгенографии / Биотехносфера. 2014. № 3(33). С. 17 – 20.
8. Staroverov N. E., Kholopova E. D., Gryaznov A. Yu., Zhamova K. K. Development of digital processing method of microfocus X-ray images / Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 808. N 1. P. 34 – 38.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2018612318. Программа управления динамическим детектором рентгеновского излучения / Ободовский А. В., Бессонов В. Б., Ларионов И. А., Клонов В. В. Заявка № 2017663475 от 25.12.2017. Регистрация 15.02.2018.
10. Иванов С. А., Щукин Г. А. Рентгеновские трубки технического назначения. — Л.: Энергоатомиздат, 1989. — 200 с.
11. Heinrich K., Newbury D., Yakowitz H. (eds.). Use of Monte Carlo calculations in electron probe microanalysis and scanning electron microscopy: proceedings of a workshop held at the National Bureau of Standards. — Gaithersburg, Maryland, 1975. — 164 p.
12. Иванов С. А., Чигак Ф. Ф. Рентгеновские трубки с мишенями «прострельного» типа и характеристики их излучения / Приборы для исследования физических свойств материала. — Киев: Наукова думка, 1974. С. 61 – 65.
13. Drouin D., Couture A., Joly D. CASINO V2.42 — A Fast and Easy-to-use Modeling Tool for Scanning Electron Microscopy and Microanalysis Users / Scanning. 2007. Vol. 29. P. 92 – 101.
14. Быстров Ю. А., Иванов С. А. Рентгеновская техника и ускорительные приборы: учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 1983. — 288 с.
15. Подымский А. А. Мощные рентгеновские трубки для проекционной рентгенографии: дис. ... канд. тех. наук. — М., 2016. — 140 с.
16. Иванов С. А., Иоффе Ю. К., Кириенко С. В. и др. Малогабаритные источники рентгеновского излучения / Обзоры по электронной технике. Сер. 4. 1987. Вып. 4.
17. Подымский А. А., Потрахов Н. Н. Микрофокусные рентгеновские трубки нового поколения / Контроль. Диагностика. 2017. № 4. С. 4 – 8.
18. Пат. 2278440 РФ, МПК H01J35/02, H05G1/02, A61B6/03. Моноблок источника рентгеновского излучения. / Потрахов Н. Н., Мухин В. М.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) (RU). — № 200511181309/09; заявл. 20.04.05; опубл. 20.06.05. Бюл. № 17.
19. Бессонов В. Б., Ободовский А. В., Клонов В. В., Кострин Д. К. Микрофокусная компьютерная томография — новый метод исследования микроминиатюрных объектов / Евразийский союз ученых. 2014. № 5-3(5). С. 12 – 15.
20. Hamamatsu — X-ray source. <http://www.hamamatsu.com> (дата обращения 20.12.2018).

### REFERENCES

1. Pirogova E. V. PCB Design and Technology. — Moscow: Forum, 2005. — 560 p. [in Russian].
2. Bakanov G. F., Sokolov S. S., Sukhodolskiy V. Yu. Basics of designing radio electronic technology. — Moscow: Akademia, 2007. — 363 p. [in Russian].
3. Koledov L. A. Technology and design of microcircuits, microprocessors and microassemblies. — St. Petersburg: Lan', 2008. — 400 p. [in Russian].
4. Shmakov M. The choice of x-ray control system. Technologist's view / Tekhnol. Elektron. Promyshl. 2006. N 4. P. 33 – 40 [in Russian].
5. Garanin A. Criteria for choosing an X-ray unit: necessary and sufficient / Elektron. Nauka. Tekhnol. Biznes. 2012. N 6. P. 170 – 177 [in Russian].
6. Artemyev B. V., Bukley A. A. Radiation monitoring: study guide. — Moscow: Spektr, 2013. — 192 p. [in Russian].
7. Gryaznov A. Yu., Zhamova K. K., Bessonov V. B., Livshits A. O., Kunashik E. S. Methods of obtaining pseudo-color X-ray images in dual-energy X-ray / Biotechnosfera. 2014. N 3(33). P. 17 – 20 [in Russian].
8. Staroverov N. E., Kholopova E. D., Gryaznov A. Yu., Zhamova K. K. Development of digital processing method of microfocus X-ray images / Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 808. N 1. P. 34 – 38.
9. Computer program state registration certificate N 2018612318. The program control dynamic X-ray detector / Obodovskiy A. V., Bessonov V. B., Larionov I. A., Klonov V. V. 25.12.17 [in Russian].
10. Ivanov S. A., Shchukin G. A. X-ray tubes for technical purposes. — Leningrad: Energoatomizdat, 1989. — 200 p. [in Russian].
11. Heinrich K., Newbury D., Yakowitz H. (eds.). Use of Monte Carlo calculations in electron probe microanalysis and scanning electron microscopy: proceedings of a workshop held at the National Bureau of Standards. — Gaithersburg, Maryland, 1975. — 164 p.
12. Ivanov S. A., Chigak F. F. X-ray tubes with targets of a "shooting through" type and characteristics of their radiation / Instruments for studying the physical properties of a material. — Kiev: Naukova dumka, 1974. P. 61 – 65 [in Russian].

13. **Drouin D., Couture A., Joly D.** CASINO V2.42 — A Fast and Easy-to-use Modeling Tool for Scanning Electron Microscopy and Microanalysis Users / Scanning. 2007. Vol. 29. P. 92 – 101.
14. **Bystrov Yu. A., Ivanov S. A.** X-ray technology and accelerator devices. — Moscow: Vysshaya shkola, 1983. — 288 p. [in Russian].
15. **Podymsky A. A.** Powerful X-ray tubes for X-ray projection: Candidate's Thesis. — Moscow, 2016. — 140 p. [in Russian].
16. **Ivanov S. A., Ioffe Yu. K., Kirienko S. V.** Compact X-ray Sources / Obzory Elektron. Tekhn. Ser. 4. 1987. Issue 4 [in Russian].
17. **Podymskiy A. A., Potrakhov N. N.** New generation microfocus X-ray tubes / Kontrol. Diagnostika. 2017. N 4. P. 4 – 8 [in Russian].
18. Pat. 2278440 RF, MPK H01J35/02, H05G1/02, A61B6/03. X-ray source monoblock / Potrakhov N. N., Mukhin V. M.; applicant and owner St. Petersburg State Electro-Tech. Univ. "LETI" (RU). — N 200511181309/09; appl. 20.04.05; publ. 20.06.05. Byull. N 17 [in Russian].
19. **Bessonov V. B., Obodovskiy A. V., Klonov V. V., Kostin D. K.** Microfocal computed tomography — a new method for the study of microminiature objects / Evraz. Soyuz Uch. 2014. N 5 – 3 (5). P. 12 – 15 [in Russian].
20. Hamamatsu — X-ray source. <http://www.hamamatsu.com> (accessed 20. 12. 2018).