

УДК 531.7

## ВИДЕОИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ СБОРКИ КАТОДНОГО УЗЛА РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ

<sup>1</sup>Митрофанов С.С., <sup>1</sup>Миннигазимов Р.И., <sup>1</sup>Поваров К.С.,

<sup>2</sup>Иванов А.Н., <sup>3</sup>Терентьев Н.Ю.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»,

Санкт-Петербург, e-mail: od@itmo.ru, od@mail.ifmo.ru;

<sup>2</sup>Филиал АО «Корпорация Комета – НПЦ ОЭКН», Санкт-Петербург, e-mail: ian2310@rambler.ru;

<sup>3</sup>АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, e-mail: torrel@mail.ru

В работе отмечается широкое применение рентгеновских трубок в современных областях науки, медицины, системах безопасности и техники. Указывается, что параметры и качество изготовления трубки определяют во многом характеристики прибора в целом. Показано, что качество трубки определяется точностью сборки катодного узла, при этом объективных и производительных средств контроля не выявлено. Поэтому разработка автоматизированных средств измерительного контроля сборки катодного узла трубки – задача актуальная. Рассмотрена конструкция разработанного прибора для измерения положения спирали катода рентгеновской трубки относительно фокусирующего электрода и анода. Прибор содержит основание, видеокамеру, механизмы фокусировки и фиксации трубки, приспособление для метрологической калибровки. Управление прибором осуществляется компьютером по специальной программе. Дается методика настройки и работы на приборе. Приведены результаты измерения положения спирали и паза фокусирующего электрода катодного узла относительно центра коварового кольца трубки нескольких партий трубок. Их обработка и анализ средствами математической статистики показали устойчивость технологического процесса сборки катодных узлов различных типоразмеров трубок. Показана высокая эффективность применения прибора контроля, даны рекомендации по улучшению технологического процесса сборки трубок.

**Ключевые слова:** рентгеновская трубка, спираль, калибровка, измерение положения, разработка конструкции

## VIDEO MEASURING DEVICE FOR MONITORING THE ASSEMBLY OF THE CATHODE UNIT OF THE X-RAY TUBE

<sup>1</sup>Mitrofanov S.S., <sup>1</sup>Minnigazimov R.I., <sup>1</sup>Povarov K.S., <sup>2</sup>Ivanov A.N., <sup>3</sup>Terentev N.Yu.

<sup>1</sup>National Research University ITMO, Saint Petersburg, e-mail: od@itmo.ru, od@mail.ifmo.ru;

<sup>2</sup>Branch of AO «Corporation Comet – SPC UECN», Saint Petersburg, e-mail: ian2310@rambler.ru;

<sup>3</sup>AO «LOMO», Saint Petersburg, e-mail: torrel@mail.ru

The paper notes the widespread use of X-ray tubes in modern fields of science, medicine, security systems and technology. It is pointed out that the parameters and quality of the tube manufacture largely determine the characteristics of the device as a whole. It is shown that the quality of the tube is determined by the accuracy of the assembly of the cathode assembly, while no objective and efficient means of control have been identified. Therefore, the development of automated means for measuring control of the tube cathode assembly is an urgent task. The design of the developed device for measuring the position of the X-ray tube cathode spiral relative to the focusing electrode and the anode is considered. The device contains a base, a video system, mechanisms for focusing and fixing a tube, a device for metrological calibration. The device is controlled by a computer using a special program. A methodology for setting up and working on the device is given. The results of measuring the position of the spiral and the slot of the focusing electrode of the cathode assembly relative to the center of the kovar ring of the tube of several batches of tubes are presented. Their processing and analysis by means of mathematical statistics showed the stability of the technological process of assembling cathode assemblies of various standard sizes of tubes. The high efficiency of the control device is shown, and recommendations are given for improving the technological process of tube assembly.

**Keywords:** X-ray tube, spiral, calibration, position measurement, design development

Рентгеновская аппаратура всё шире используется в современном мире в различных областях науки и техники и занимает одно из ведущих мест в ряду средств, применяемых для изучения строения вещества, неразрушающего контроля качества изделий, радиационной технологии, исследования быстротекущих процессов, обеспечения вопросов безопасности и решения других научных и технических задач [1, 2]. Функциональные возможности и технический уровень этих устройств в зна-

чительной мере определяются параметрами используемых в них источников рентгеновского излучения – рентгеновских трубок.

Конструктивное исполнение трубок различно, но постоянно растут требования к качеству создаваемого ими излучения, к параметрам рентгеновской аппаратуры и расширению сферы применения рентгеновского излучения [3].

При изготовлении рентгеновских трубок необходимо контролировать взаимное положение катода, фокусирующего электрода

и анода. Если эти детали плохо центрированы относительно друг друга, то возникает погрешность размера фокусного пятна [4], и в результате падает разрешающая способность рентгенографической установки. Используемые сейчас для определения взаимного положения указанных деталей визуальные приспособления имеют низкую точность и требуют участия опытного оператора. Поэтому необходима разработка измерительного устройства, позволяющего уменьшить влияние ошибок оператора на результат измерений, погрешность измерений, увеличить скорость проведения измерений, автоматизировать процесс измерения, обработку и выдачу результатов.

#### *Объект исследования*

Для решения поставленной задачи на факультете прикладной оптики Университета ИТМО был разработан и изготовлен прибор для измерения положения спирали и паза узла катода рентгеновской трубки, удовлетворяющий указанным требованиям, который представлен на рис. 1.

Прибор [5] состоит из массивной плиты 1, которая удерживается тремя опорами 2. В верхней части плиты установлен пузырьковый уровень 3, позволяющий горизонтировать прибор при работе. На плите монтируются все основные узлы прибора. Это верхняя плата 4, служащая для крепления посредством винтов механизма фокусировки 6 видеокамеры 10, механизма фиксации 11 баллона трубки. В состав прибора входят три различных механизма фиксации, так как прибор предназначен для контроля трубок различных типоразмеров. Установка нужного механизма производится винтами 12.

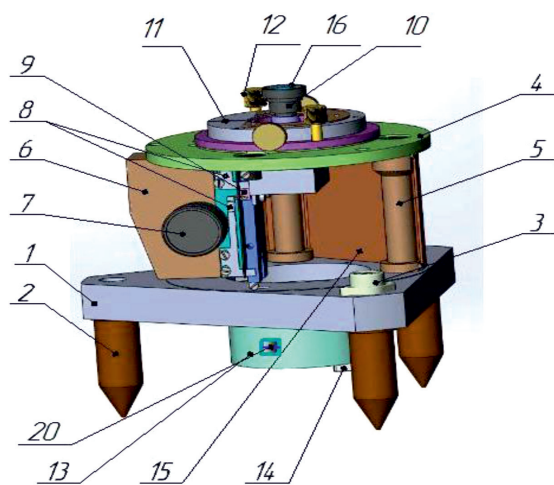


Рис. 1. Прибор контроля катодного узла рентгеновской трубки

Наведение на резкое изображение спирали и паза осуществляется при вращении маховичков 7. Для облегчения этой операции предусмотрены вспомогательные метки 8 и индекс 9, а также подсветка спирали при помощи осветителя 17, который активируется тумблером 20 и размещается на верхней оправе объектива видеокамеры 10. Осветитель содержит шесть светодиодов, обеспечивающих хороший контраст и равномерную засветку.

Прибор сопрягается с управляющим персональным компьютером (ПК) (на рис. 1 не показан) при помощи USB-кабеля, подключаемого к разьему 14, который крепится на нижнем стакане 13.

Для предохранения от внешних засветок и пыли по периметру прибор закрыт съемными кожухами 15.

#### *Методика применения прибора*

Прибор функционирует в полуавтоматическом режиме под управлением ПК по специально созданной программе. Перед началом работы устанавливается необходимый механизм фиксации трубки и проводится калибровка видеокамеры (рис. 2, а). Только после этого приступают к проведению измерений.

Процесс калибровки начинается с установки на прибор промежуточной калибровочной втулки, расстояние между торцами которой соответствует расстоянию от плоскости установки контролируемой трубки до её спирали. На втулку закрепляется калибровочное приспособление (рис. 2, а) и выбирается в программе управления режим «Калибровка» путем установки галочки в соответствующем окне программы (рис. 3). Выбор осуществляется кликанием мышью ПК. В этом режиме программой ПК формируется на экране монитора цифровая марка, представляющая из себя фигуру в виде прямоугольника с диагоналями, центр которых задает номинальный центр коварового кольца трубки. Само приспособление состоит из цилиндрической втулки, с одной стороны в которую вставлена аттестованная линейная шкала с ценой деления 0,1 мм, а с другой закреплен осветитель. При установке приспособления получается, что плоскость делений шкалы совпадает с верхней плоскостью промежуточной калибровочной втулки, т.е. положение шкалы и положение спирали при контроле будут совпадать.

В дальнейшем перемещением видеокамеры добиваются резкого изображения шкалы на экране монитора ПК.

Задача калибровки заключается в приведении перекрестия видеокамеры в центр

калибровочной шкалы и установлении соответствия между шагом шкалы и шагом ее изображения на приемнике видеокамеры. Для этого растягиванием вертикальных границ прямоугольника мышью устанавливают горизонтальный размер, равный заданному, в разделе «Калибровка», «Размер, мм». На рис. 3 размер прямоугольника равен 9 мм. Он же указан в окне «Размер, мм». Перекрестие приводится в центр поля зрения (прямоугольник) простым перемещением с помощью мыши ПК.

После калибровки визирная ось видеокамеры ориентирована перпендикулярно к базовой поверхности устройства фиксации баллона трубки (коваровое кольцо) и проходит через его центр. Также устранена погрешность «рена» видеокамеры.

После калибровки установка готова к работе. Приспособление для калибровки демонтируется, на приборе закрепляется

контролируемая трубка (рис. 2, б). Убирается галочка «Калибровка» и прибор автоматически переходит в режим измерения. Вид на экране дисплея, который будет наблюдаться в этом режиме, содержит изображение спирали катода и паза фокусирующего электрода (рис. 4). В дальнейшем необходимо выбрать один из режимов измерения, либо паза, либо спирали. Если в программе выбирается режим измерения паза путем активации поля «Выделение паза», на экране монитора появляется фигура с двумя пересекающимися диагоналями. Оператор устанавливает вертикальные и горизонтальные линии этой фигуры по краям паза. Положение горизонтальной линии дает размер  $X$ , а вертикальной – размер  $Г$ , которые являются величинами смещения. Аналогичные операции выполняются при измерении положения для спирали при активации режима «Выделение спирали».



а)



б)

Рис. 2. Вид прибора в процессе калибровки (а) и в процессе измерения (б)

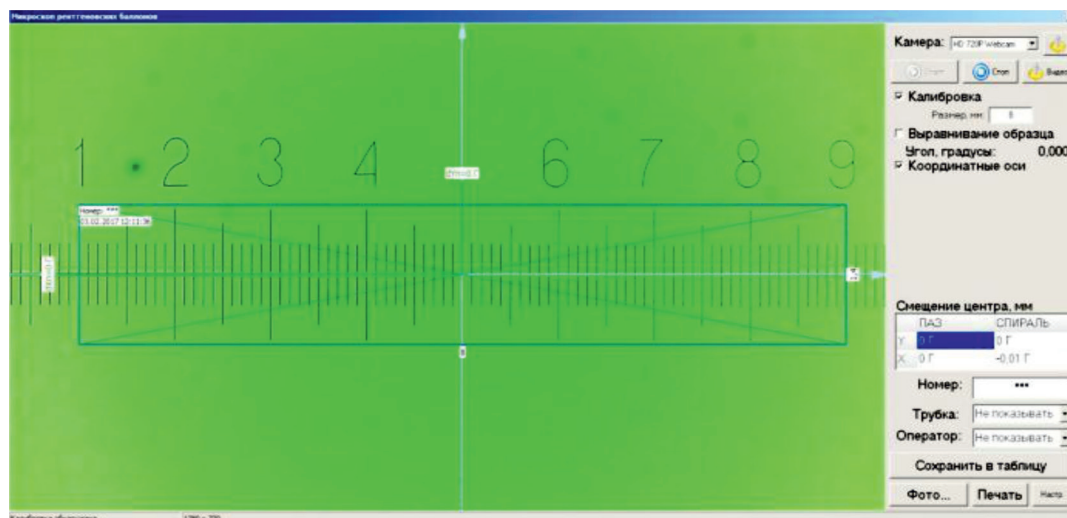


Рис. 3. Вид дисплея программы в режиме «Калибровка»



Эти величины  $X$  и  $Y$  можно видеть в окне «Смещение центра, мм». При этом величина смещения маркируется буквами  $\Gamma$  (годен) или  $B$  (брак) после их сравнения с допуском, как показано на рис. 4. При этом величины с буквой  $B$  выделяются красным цветом. Величина допуска указывается в программе ПК заранее для выбранного типоразмера трубки. Контролируемые параметры, номер трубки, фамилия оператора протоколируются в файле при выборе режима «Сохранить в таблицу».

### Результаты исследования и их обсуждение

Для апробации разработанного прибора на нем были исследованы две группы трубок, по 52 и 58 штук соответственно. Процесс измерения в группах немного отличался. В первой группе измерения выполнялись однократно, а во второй группе – двукратно (исходное измерение и при развороте трубки на  $\pi$ ). Для второй группы ставилась за-

дача выявления других дефектов катодного узла: неровности краев паза, наличие заусенцев, неравномерность шага витков спирали, разный наклон витков к оси, наклон спирали в горизонтальной плоскости.

Полученные результаты измерений, сохраненные в файле, обрабатывались стандартными средствами математической статистики программы MS Excel.

В каждой группе были исключены результаты измерений с большими величинами смещений спирали (грубые промахи), которые явились последствиями небрежной сборки или повреждений при транспортировке. После были вычислены параметры рассеяния величин смещений спирали и паза по осям  $X$  и  $Y$  и смещения спирали относительно паза, а именно среднее арифметическое значение  $\Delta y$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  и предельные отклонения  $\Delta y_{\min}^{\text{пр}}$ ,  $\Delta y_{\max}^{\text{пр}}$ , при доверительной вероятности 99,7%. Результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

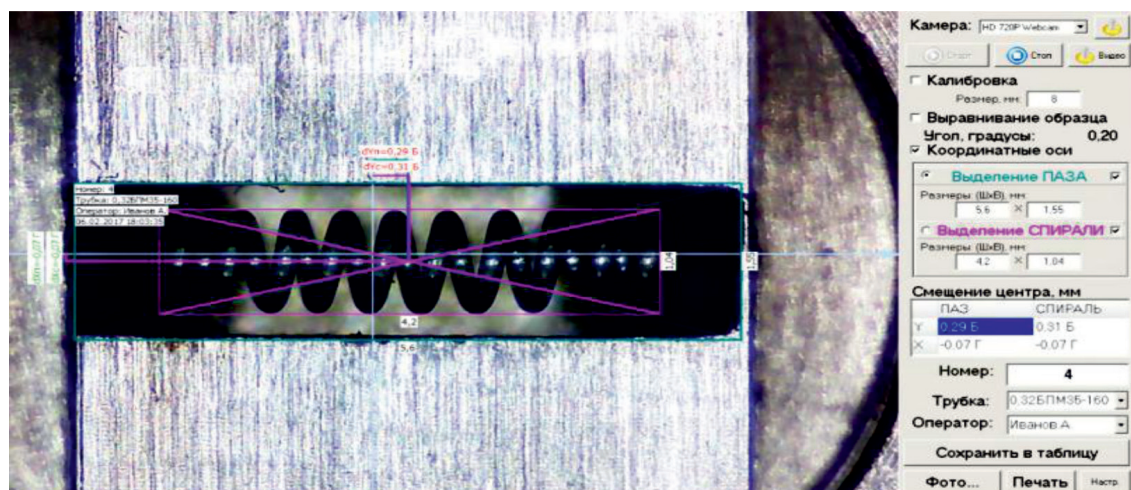


Рис. 4. Вид дисплея при режиме измерения

Таблица 1

Результаты исследования положения спирали и паза

Параметр распределения	Группа трубок 1				Группа трубок 2			
	Смещение спирали		Смещение паза		Смещение спирали		Смещение паза	
	Ось $X$ , мкм	Ось $Y$ , мкм	Ось $X$ , мкм	Ось $Y$ , мкм	Ось $X$ , мкм	Ось $Y$ , мкм	Ось $X$ , мкм	Ось $Y$ , мкм
$\Delta y$ , мм	-29	42	-35	35	62	-84	46	-80
$\sigma$ , мм	297	267	259	281	248	208	250	206
$\Delta y_{\min}^{\text{пр}}$ , мм	-92	759	-812	808	682	-708	0,704	-698
$\Delta y_{\max}^{\text{пр}}$ , мм	0,862	0,843	0,742	0,878	0,806	0,54	0,796	0,538

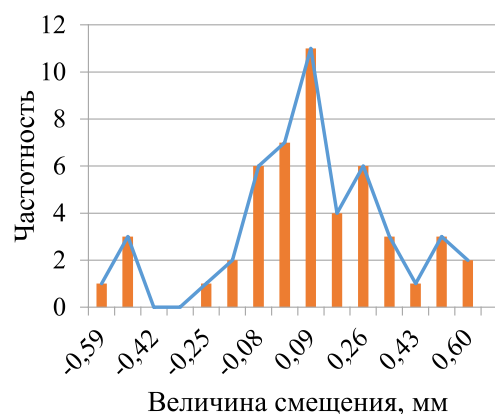
Таблица 2

Результаты исследования смещения спирали относительно паза

	Группа трубок 1		Группа трубок 2	
	Ось $X$ , мкм	Ось $Y$ , мкм	Ось $X$ , мкм	Ось $Y$ , мкм
$\Delta y$ , мм	-18	5	-16	3
$\sigma$ , мм	76	27	76	32
$\Delta y_{\min}^{\text{пр}}$ , мм	-246	76	-244	93
$\Delta y_{\max}^{\text{пр}}$ , мм	21	86	212	99

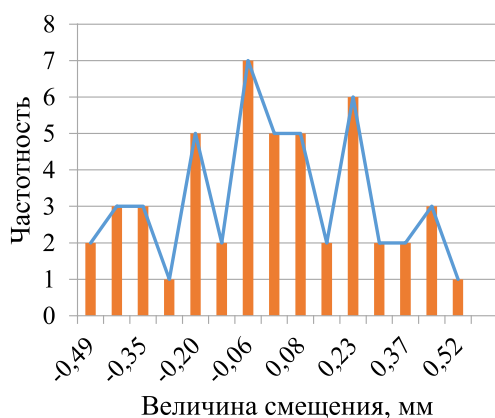


а)



б)

Рис. 5. Полигоны рассеяния для спирали: а – ось  $X$ , б – ось  $Y$



а)



б)

Рис. 6. Полигоны рассеяния для паза: а – ось  $X$ , б – ось  $Y$

На рис. 5 и 6 представлены полигоны рассеяния величины смещений спирали в горизонтальном (ось  $X$ ) и вертикальном направлении (ось  $Y$ ) для трубок первой группы. Характер полигонов рассеяния у второй группы трубок аналогичен, поэтому не приводится.

Внешний вид полигонов на рис. 5 и 6 позволяет заключить, что рассеяния величин по оси  $Y$  (рис. 5, а; 6, а) достаточно хорошо согласуются с законом рассеяния Гаусса с параметрами, указанными в табл. 1, тогда как для величин по оси  $X$  (рис. 5, а; 6, а) это выполняется хуже. Подобное может гово-

речь о проблемах фиксации спирали и паза в вертикальной плоскости.

Из [6] известно, что тенденция к закону Гаусса свидетельствует об устойчивости технологического процесса и стабильности производства в целом.

Другими результатами исследования было то, что в большинстве трубок обнаружены дефекты спирали, такие как разные углы наклона витков спирали, различие длин спиралей, разброс величин диаметров витков. Эти дефекты практически невозможно обнаружить с помощью визуальных средств контроля, тем не менее они также влияют на качество работы трубки.

Допустимая предельная величина смещения спирали и паза относительно центра коварового кольца баллона трубки для исследованных элементов трубки составляет  $\pm 0,2$  мм. В двух партиях этому параметру удовлетворяли только около 64% трубок. В основном это превышение касалось смещения спирали. Однако следует заметить, что смещение спирали возможно уменьшить последующей коррекцией её положения при повторном регулировании.

При исследовании смещения спирали относительно паза выявлено, что все трубки находились в пределах допуска. Это свидетельствует о том, что сами детали катода изготавливают точно, а основные погрешности, которые влияют на качество катодного узла, происходят на конечном этапе сборки узла и установки его в баллон трубки.

## Заключение

В работе рассмотрен прибор для контроля качества сборки катодного узла рентгеновских трубок. Прибор позволяет в полуавтоматическом режиме измерять смещение спирали катода, паза фокусирующего электрода относительно центра коварового кольца (определяющего положения анода) рентгеновской трубки, проводить оперативный статистический анализ результатов контроля.

Проведенные с помощью прибора измерения партии трубок показали, что возможно оперативно и объективно обнаруживать брак сборки катодного узла, давать рекомендации по улучшению технологического процесса изготовления рентгеновских трубок.

## Список литературы

1. Иванов С.А., Шукин Г.А. Рентгеновские трубки технического назначения. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1989. 200 с.
2. Потрахов Н.Н. Диагностические возможности микрофокусной рентгенографии // Медицинская техника. 2014. № 5. С. 8–12.
3. Подымский А.А., Потрахов Н.Н. Микрофокусные рентгеновские трубки нового поколения // Контроль. Диагностика. 2017. № 4. С. 4–8.
4. Мазуров А.И., Потрахов Н.Н. Возможности и ограничения микрофокусной рентгенографии в медицине // Биотехносфера. 2010. № 4. С. 20–23.
5. Митрофанов С.С. Оптические измерительные приборы и устройства: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 34 с.
6. Латышев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб.: Изд. «Лань», 2015. 560 с.