волока марки ВР5 имеет присадку рения, что повышает ее пластичность в отожженном состоянии и допускает холодную навивку спиралей эмиттеров.

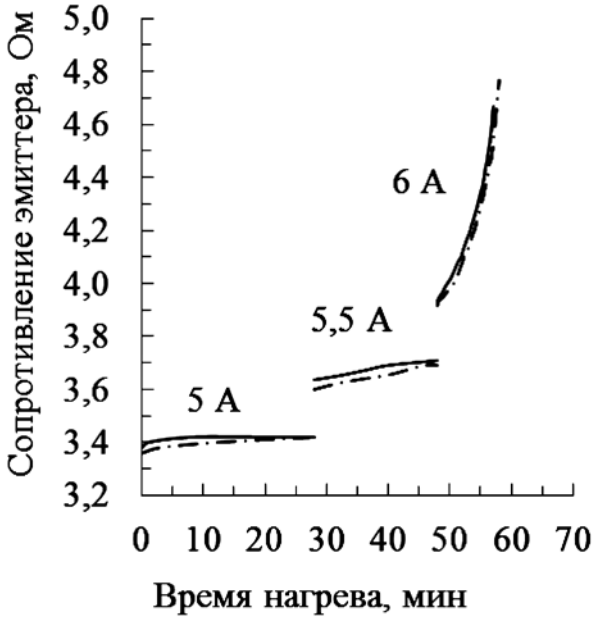

Рис. 4. Зависимость электрического сопротивления от суммарного времени нагрева для эмиттеров, изготовленных из вольфрамовой проволоки марок ВА и ВР5 диаметром 300 мкм при различных значениях тока накала

Из представленного графика видно, что построенные зависимости обладают схожим характером.

В результате выполненной работы была определена методика оценки ресурса прямонакальных вольфрамовых эмиттеров рентгеновских трубок, а также установлена граница их работоспособности, соответствующая изменению электрического сопротивления на 20 % от первоначального значения. Установлено, что вольфрамовая нить марки ВР5 с присадкой рения не дает существенного увеличения ресурса эмиттера, что, в силу стоимостных характеристик, делает ее применение в качестве материала эмиттера рентгеновской трубки нецелесообразным.

Список литературы:

1. *Андреева Р.Т., Ипатова С.И., Розинова Н.С., Соколова М.И., Теймер А.Д.* Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов. Справочное пособие / Под общей ред. Р.А. Нилендера. – М., 1973. 336 с.
2. *Шикова Т.Г.* Технология и оборудование производства изделий электронной техники. Уч. пособие для практических занятий и самостоятельной работы студентов. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2003. 68 с.
3. *Башенко В.В.* Электронно-лучевые установки. – Л., 1972. 168 с.

Дмитрий Игоревич Карюгин,
инженер,
Василий Николаевич Столяров,
инженер,
Иван Николаевич Столяров,
инженер,
ЗАО «РЕНТГЕНПРОМ»,
г. Москва,
e-mail: mailbox.08@mail.ru

М.А. Карягин

Состояние и перспективы развития методов и средств неинвазивного измерения напряжения на рентгеновских трубках

Аннотация

Статья посвящена обсуждению проблемы измерения анодного напряжения на рентгенодиагностических аппаратах радиационными методами. Проанализировано состояние отечественного парка неинвазивных киловольтметров, зарегистрированных в Государственном реестре средств измерений. Рассмотрены работы российских исследователей, занимавшихся проблемой неинвазивного измерения анодного напряжения. Выявлены ограничения и недостатки известных методов измерения.

Требования СанПин 2.6.1. 1192-03 [1] предписывают контролировать ряд параметров рентгенодиагностических аппаратов, одним из которых является напряжение на рентгеновской трубке. В условиях лечебно-профилактических учреждений измерение анодного напряжения контактным методом практически невозможно вследствие труднодоступности высоковольтных цепей аппарата и сложности подключения измерительного оборудования, поэтому для контроля анодного напряжения используются радиационные киловольтметры. Требования к радиационным измерителям анодного напряжения представлены в стандарте МЭК 61676 [2]. Контроль радиационных параметров РДА осуществляют организации, имеющие лицензии на этот вид деятельности. Необходимым условием лицензирования измерительных лабораторий является наличие специализированного оборудования, допущенного к использованию в РФ. Однако номенклатура средств измерений радиационных параметров, внесенных в Государственный реестр средств измерений РФ (далее – Госреестр), ограничена и не полностью отвечает современным требованиям.

В феврале 2013 года в Госреестр занесены универсальные дозиметры для контроля параметров рентгеновских аппаратов производства «RTI Electroniks AB» (Швеция), такие как «RTI Piranha» и «RTI Cobia Smart R/F». Приборы серии «RTI Piranha» осуществляют измерения всего спектра параметров, представленных в *табл. 1*. Результаты отображаются на ПЭВМ с помощью программного обеспечения Ocean, позволяющего одновременно наблюдать за всеми результатами измерений и легко экспортировать их в Exel. Связь дозиметра с ПЭВМ организуется либо с помощью Bluetooth, либо посредством USB-кабеля [3].

«RTI Cobia Smart R/F» – простой прибор для контро-

ля основных электрических и радиационных параметров медицинских рентгеновских аппаратов. Все измерения производятся с помощью одного устройства и отображаются на широкоэкранном цветном дисплее. Детектор встроен в корпус прибора. Основные характеристики «RTI Cobia Smart R/F» приведены в *табл. 1*.

Прибор «Nomex» (номер в Госреестре № 14958-95) производства «PTW-Freiburg» (Германия) является универсальным высокоточным дозиметром, погрешность измерения дозы составляет 1,5 %, погрешность измерения анодного напряжения – 0,75 % или 0,5 кВ [4]. Схемотехнической особенностью построения прибора является размещение в едином корпусе электроники и детекторной матрицы. Подключение выполняется через USB напрямую к ноутбуку или к ПК. Прибор может быть использован для контроля параметров аппаратов для рентгенографии, рентгеноскопии, стоматологии, компьютерной томографии и маммографии. Параметры, измеряемые «Nomex», приведены в *табл. 1*. Прибор соответствует всем требованиям стандарта [2], но срок действия регистрационного свидетельства истек 01.05.2007 г.

Комплект «DIAset UNIVERSAL X-ray QC» производства «PTW-Freiburg» (Германия) зарегистрирован в Госреестре СИ РФ под № 34724-09. Данный комплект представлен дозиметром «DIADOS E» и измерительным прибором «DIAVOLT UNIVERSAL», контролирующим параметры рентгеновского излучения (*табл. 1*). Приборы «DIAVOLT UNIVERSAL» имеют разъем для подключения осциллографа и через интерфейс RS-232 могут подключаться к компьютеру. Протокол обмена данными поддерживается специализированным программным обеспечением DiaControl [4]. Устройство обеспечивает контроль пульсаций и формы кривой анодного напряжения.

Одними из наиболее часто применяемых приборов в организациях, осуществляющих радиационный контроль параметров медицинской техники в РФ, являются неинвазивный рентгеновский тестер «Unfors Xi» (номер в Госреестре № 35046-07) или прибор «Unfors Mult-O-Meter» (№ 35047-07 в Госреестре). Прибор «Unfors Xi» обеспечивает измерение среднепикового анодного напряжения в диапазоне от 22 до 160 кВ с погрешностью 3 % (*табл. 1*) [5]. Однако «Unfors Xi» не отвечает всем требованиям к оборудованию для контроля эксплуатационных параметров, предъявляемым нормативными документами [2], так как с его помощью невозможно определить значение практического пикового напряжения. Срок действия свидетельства о внесении в Государственный реестр средств измерений РФ истек 1 июля 2012 г. и продлен не будет.

В Госреестр (№ 22584-02) занесен только один прибор отечественного производства – УКРЭХ, разработанный и выпускаемый НПЦ медицинской радиологии совместно с ЗАО «АМИКО». УКРЭХ изготавливается в трех вариантах: портативный – первый вариант, с возможностью подключения к КПК – второй вариант и с подключением к ПК – третий [6]. Данный прибор позволяет измерять величины анодного напряжения, такие как: эффективное пиковое напряжение kVp_{ef} (первый вариант), среднепиковое напряжение kVp и практическое пиковое напряжение PPV (второй и третий варианты), а также ряд других величин, указанных в *табл. 1*.

Однако есть ряд ограничений при работе с рентгентестером УКРЭХ. Так, например, в [7] экспериментально показано, что при введении дополнительной фильтрации излучения показания киловольтметра растут при неизменном значении «уставки» анодного напряжения.

Таблица 1

Основные характеристики неинвазивных приборов контроля радиационных параметров рентгеновских аппаратов

Параметр \ Прибор		RTI Piranha R/F&M 657	RTI Cobia Smart R/F	Nomex	DIAVOLT UNIVERSAL	Unfors Xi	УКРЭХ (1, 2, 3)
Анодное напряжение	Значение	*kVp*	*kVp*	*kVpmax*, *kVpmean*, *PPV*	*kVpmax*, *kVpmean*, *PPV*	*kVpmax*, *kVpmean*	*kVpmean*, *kVpef*, *PPV*
	Диапазон, кВ	35...155 (18...49)	38...155	50...150	22...150	22...160	40...125
	Погрешность, %	± 1,5 (±0,7 кВ)	± 2	±0,75	± 2,5	± 3	± 5
Воздушная керма	Диапазон, Гр	15 10^{-9}...1000	400 10^{-9}...1000	3 10^{-9}...0,005	50 10^{-6}...50	10 10^{-9}...9999	10^{-4}...0,3
	Погрешность, %	± 5	± 5	±1,5	± 4,0	± 10	± 20
Мощность воздушной кермы	Диапазон, Гр/с	15 10^{-6}...450	400 10^{-6}...100	50 10^{-6}...5	50 10^{-3}...50	10 10^{-6}...1000	6...200, Р/мин
	Погрешность, %	± 5	± 5	± 5	± 0,5	± 10	± 20
Время экспозиции	Диапазон, с	10^{-4}...2000	0 мс...2000 с	–	3 10^{-4}...999	10^{-3}...999,9	10^{-2}...10
	Погрешность, % (мс)	± 1	± 1 (±0,33)	–	± (0,3)	±3	±5
Количество импульсов	Диапазон	1...65535	1...9999	–	–	1...9999	–
	Погрешность, импульс	± 1	± 1	–	–	–	–
СПО (HVL)	Диапазон, мм Al	1,00...14,0	1,2...14,0	–	–	1,0...14,0	–
	Погрешность	± 0,2 мм Al	± 10 % или 0,2 мм Al	–	–	–	–
Полная фильтрация	Диапазон, мм Al	1,5...38	–	До 40	–	–	–
	Погрешность	± 0,3 мм Al	–	–	–	–	–
Номер по Госреестру СИ РФ		52569-13	52568-13	14958-95	34724-09	35046-07	22584-02
Срок действия свидетельства об утверждении типа СИ		31.01.2018 г.	31.01.2018 г.	01.05.2007 г.	01.09.2014 г.	01.07.2012 г.	01.11.2012 г.

Кроме того, результаты измерений оказываются чувствительными к фокусному расстоянию. В [8] отмечается, что оптимальным для измерения анодного напряжения является расстояние 1 м, и измерения рекомендуется осуществлять в тех же условиях. При малых анодных токах трубки необходимо уменьшать фокусное расстояние, а при больших токах – увеличивать. На практике значение анодного тока, как правило, неизвестно и на современных РДА и палатных аппаратах варьируется в очень широких пределах. Это положение усложняет процесс измерений, так как для разных «уставок» напряжения приходится подбирать оптимальное фокусное расстояние, что может оказаться невыполнимым, например, при контроле компьютерных томографов. Тем не менее отечественная разработка нашла широкое применение в практике контроля параметров рентгеновских диагностических аппаратов, прежде всего благодаря относительной простоте устройства и его сравнительно низкой рыночной стоимости. К сожалению, срок действия свидетельства о внесении в Государственный реестр средств измерений РФ на УКРЭХ истек 01.11.2012 г.

Таким образом, по состоянию на февраль 2013 года только три прибора для неизвазивного измерения анодного напряжения включены в актуальный перечень средств измерений РФ.

Следует отметить, что на протяжении ряда последних лет в РФ ведутся исследования по поиску новых неинвазивных методов измерения [9]-[15] и разработке приборов для радиационного контроля [6], [8], [10], [11].

Сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского и испытательного института медицинской техники (ВНИИИМТ) решались задачи развития методов комплексного контроля радиационных и электрических характеристик рентгеновских диагностических аппаратов. Так, в работе Т.В. Даниленко [9] рассматривался радиационный двухдетекторный метод измерения анодного напряжения и отдельных сопутствующих параметров РДА. Отличительной особенностью предложенного метода измерений являлось определение высокого напряжения по отношению зарядов двух детекторов, генерируемых ими при одновременном облучении рентгеновским излучением, ослабленным фильтрами разной толщины. Автором была сделана попытка оценки и учета влияния на результаты измерений таких факторов, как неоднородность пучка излучения, собственная фильтрация излучения рентгеновской трубки, чистота материала фильтра, форма анодного тока и тока накала трубки. Для снижения погрешности измерений принимался во внимание «ход с жесткостью» эффективности регистрации использованных детекторов.

Экспериментально было установлено, что наибольшую неопределенность в результаты измерений вносит неоднородность химического состава используемых фильтров. Для построения калибровочной характеристики системы использовалась аппроксимация квадратичной функцией, что обеспечило погрешность измерения анодного напряжения на уровне 2 %.

В работе Ю.В. Ларчикова [10], в отличие от предыдущей, упор был сделан на создание высокоточной поверочной установки для поверки средств контроля анодного напряжения рентгеновских диагностических аппаратов. За основу был взят рентгеноспектральный метод измерения высокого напряжения, суть которого сводится к решению задачи восстановления спектра тормозного излучения и сопоставления граничной энергии в спектре пиковым значениям напряжения на аноде рентгеновской трубки. Сложность разработки методов определения границы спектра тормозного излучения обусловливается характером восстанавливаемых спектров, имеющих большую неоднородность по диапазону и экспоненциально затухающих при приближении к граничной энергии. Последнее приводит к неоднозначности в определении границы спектра, обусловленной конечной чувствительностью измерительной установки. Тем не менее достоинством рентгеноспектрального метода измерения можно считать то, что он является абсолютным, поскольку энергетическая шкала калибруется независимо от меры электрического напряжения, по монолиниям в спектрах излучения радиоизотопных источников.

На основе описанного метода был разработан рентгеноспектральный измеритель высоких напряжений рентгеновских диагностических аппаратов, обеспечивающий измерение анодных напряжений в диапазоне от 40 до 125 кВ с основной относительной погрешностью менее 0,1 %. Однако по экономическим соображениям область использования данного прибора ограничена задачами поверки радиационных рентгеновских тестеров с более высокой погрешностью измерений.

Двухдетекторный метод радиационного измерения анодного напряжения реализован в УКРЭХ. Но в данной разработке для регистрации рентгеновского излучения за спектросмещающими фильтрами используются уже три канала детектирования [11]. Введение дополнительного канала детектирования позволило разбить весь диапазон измерений на поддиапазоны, в каждом из которых работает своя пара детекторов; выбор диапазона осуществляется в автоматическом режиме. В результате удалось повысить точность измерений. Однако, как было указано выше, в данном приборе точность измерений напряжения сильно зависит от дополнительной фильтрации, расстояния от фокуса трубки и анодного тока.

Попытка учета суммарной фильтрации при радиационных измерениях анодного напряжения была предпринята в работе М.Г. Петрушанского [12]. Автором был предложен метод спектрального преобразования, суть которого сводится к измерению коэффициентов пропускания тормозного излучения заданными рентгенооптической схемой фильтрами, отличающимися по толщине на величину известного добавочного спектросмещающего фильтра толщиной d_p, и последующему решению системы уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} K_1 = g(d_\Sigma, U_a); \\ K_2 = g((d_\Sigma + d_p), U_a), \end{cases} \quad (1)$$

где K_1 – экспериментально измеренный коэффициент пропускания собственным фильтром толщиной d_Σ при анодном напряжении U_a; K_2 – экспериментально измеренный коэффициент пропускания собственным и спектросмещающим фильтрами при анодном напряжении U_a. В результате решения системы (1) определяют две неизвестные величины – анодное напряжение U_a и величина суммарной фильтрации d_Σ.

С помощью метода спектрального преобразования можно измерять величину суммарной фильтрации и анодного напряжения РДА с достаточно большой точ-

ностью. Но практически оценить достоверность измеряемых значений суммарной фильтрации трудно по причине отсутствия калибровочных приборов, измеряющих этот параметр.

Альтернативная схема измерений может быть основана на регистрации кривых абсорбции рентгеновского излучения в веществе линейных дискретных полупроводниковых детекторов. Поскольку характер затухания излучения в заданной среде полностью определяется его спектральным составом, анализ формы абсорбционных кривых позволяет находить критерии, однозначно связанные с условиями возбуждения излучения.

Суть предложенного авторами [13] способа формирования абсорбционных кривых заключается в том, что группа микродетекторов, расположенных на одной прямой, образует многоэлементный рентгеновский фильтр, в котором каждый предыдущий микродетектор является фильтром для последующего. При воздействии на детектор рентгеновского излучения в объеме детектора создается распределение квантов, отвечающее спектральному составу падающего излучения. Электрические сигналы, возникающие на выходе каждого микродетектора, обусловливают дискретное представление абсорбционной кривой. Было показано [14], что практическое пиковое напряжение определяется градиентом затухания абсорбционной кривой на ее начальном участке.

Анализ форм абсорбционных кривых приводит к обратной задаче восстановления спектральных распределений по известному отклику детектора и последующему расчету контрастно эквивалентного напряжения [15].

В данном случае точность результатов измерения во многом зависит от того, как расположена линейка детекторов по отношению к рентгеновскому пучку. Линейка детекторов должна размещаться строго вдоль рентгеновского луча. При несоблюдении этого условия часть детекторов окажется в прямом пучке, что приведет к изменению абсорбционной кривой и ошибкам при восстановлении спектра излучения и оценке градиента затухания.

Из рассмотренных отечественных разработок измерения параметров РДА только УКРЭХ зарегистрирован в Госреестре как прибор для поверки РДА, но срок действия сертификата об утверждении типа средств измерений истек. Некоторые методы не имеют приборной реализации. Анализ неинвазивных методов измерения свидетельствует о развитии данной области в РФ и о наличии условий для создания нового прибора для контроля параметров РДА.

Список литературы:

1. 2.6.1.1192-03. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. – М.: ФЦГСЭН, 2003. 76 с.
2. ГОСТ Р МЭК 61676-2006 Медицинское электрическое оборудование. Дозиметрические приборы, используемые для неинвазивного измерения напряжения на рентгеновской трубке в диагностической радиологии. – М.: Стандартинформ, 2007. 24 с.
3. Официальный сайт компании «RTI Electronics AB» / http://www.rti.se/.
4. Официальный сайт компании «PTW-Freiburg» / http://www.ptw.de/.
5. Официальный сайт компании «Unfors Instrument AB» / http://www.unfors.com/.
6. *Бердяков Г.И., Блинов Н.Н.* Типовой ряд радиационных киловольтметров // Медицинская техника. 2005. № 5. С. 19-21.
7. *Карягин М.А., Петрушанский М.Г., Шилкин Н.Г.* Определение суммарной фильтрации рентгеновского аппарата с помощью радиационного киловольтметра / Материалы V Троицкой конференции «Медицинская физика и инновации в медицине» (ТКМФ-5), 4-8 июня 2012 г., г. Троицк Московской области, 2012. Сб. материалов. Том 1. С. 373-374.
8. *Бердяков Г.И., Ларчиков Ю.В., Ртищева Г.М., Шенгелия Н.А.* Применение многофункционального рентгентестера УКРЭХ в рентгенодиагностических кабинетах // Радиология – практика. 2007. № 2. С. 57-58.
9. *Даниленко Т.В.* Метод комплексного контроля радиационных и электрических характеристик РДА и его приборная реализация / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 1990. 21 с.
10. *Ларчиков Ю.В.* Развитие рентгеноспектрального метода измерения высокого напряжения для РДА и его приборная реализация / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 1995. 19 с.
11. *Бердяков Г.И.* Устройство контроля радиационных и электрических характеристик рентгеновских аппаратов УКРЭХ // Медицинская техника. 2002. № 5. С. 18-21.
12. *Петрушанский М.Г.* Разработка метода спектрального преобразования и программно-аппаратных средств для измерения параметров излучателей рентгенодиагностической аппаратуры / Дис. на соискание степени канд. техн. наук. – М., 2006. 129 с.
13. *Муслимов Д.А., Лелюхин А.С.* Способ измерения практического пикового напряжения / Патент РФ на изобретение № 2462006 от 20.09.2012.
14. *Муслимов Д.А., Лелюхин А.С.* Определение практического пикового напряжения по скорости затухания тормозного излучения в полупроводниковом детекторе // Медицинская техника. 2012. № 1. С. 18-22.
15. *Муслимов Д.А., Лелюхин А.С., Гамалей К.А.* Определение практического пикового напряжения по восстановленным спектральным распределениям тормозного излучения // Медицинская техника. 2011. № 5. С. 34-39.

Максим Александрович Карягин,
преподаватель,
Оренбургский государственный университет,
г. Оренбург,
e-mail: maxtherion@yandex.ru