

2. Обработка ЭКС и выявление ФП должны осуществляться на втором уровне системы – смартфоне пациента. ДЗП, характеризующие ФП, а также частота и продолжительность эпизодов должны передаваться на третий уровень системы – СЛУ только при выявлении эпизодов патологии. Наряду с сигналом тревоги лечащий врач должен получать значения ДЗП, информацию об их динамике, гистограмму распределения «частота – продолжительность» эпизодов ФП.

3. Экспериментальная апробация разработанной системы показала возможность использования предложенных методов и алгоритмов обработки, анализа и тревожной сигнализации для задач удаленного непрерывного on-line мониторинга состояния пациентов с нарушениями сердечного ритма и информирования врача об эпизодах ФП пациента с целью оказания необходимой медицинской помощи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-07-00599 «Модели, методы и система интеллектуального телемедицинского мониторинга состояния здоровья человека и прогнозирования обострения заболеваний».

Список литературы:

1. Юлдашев З.М., Пустозеров Е.А., Анисимов А.А. Многоуровневая интеллектуальная система удаленного мониторинга состояния здоровья людей с хроническими заболеваниями // Биотехносфера. 2016. № 5 (47). С. 2-8.

2. Pan J., Tompkins W.J. A real-time QRS detection algorithm // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1985. Vol. 32. PP. 230-236.
3. Zhang Q., Manriquez A.I., Medigue C., Papelier Y., Sorine M. An algorithm for robust and efficient location of T-wave ends in electrocardiograms // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2006. Vol. 53. № 12. PP. 2544-2552.
4. Langley P., Bernardo D., Allen J., Bowers E., Smith F.E., Vecchiotti S., Murray A. Can paroxysmal atrial fibrillation be predicted? // Computers in Cardiology. 2001. Vol. 28. PP. 121-124.

*Чонг Туен Нгуен,
аспирант,*

*Зафар Мухамедович Юлдашев,
д-р техн. наук, профессор,*

*Елена Владимировна Садыкова,
канд. техн. наук, доцент,*

*кафедра биотехнических систем,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»*

им. В.И. Ульянова (Ленина),

г. С.-Петербург,

e-mail: yuld@mail.ru

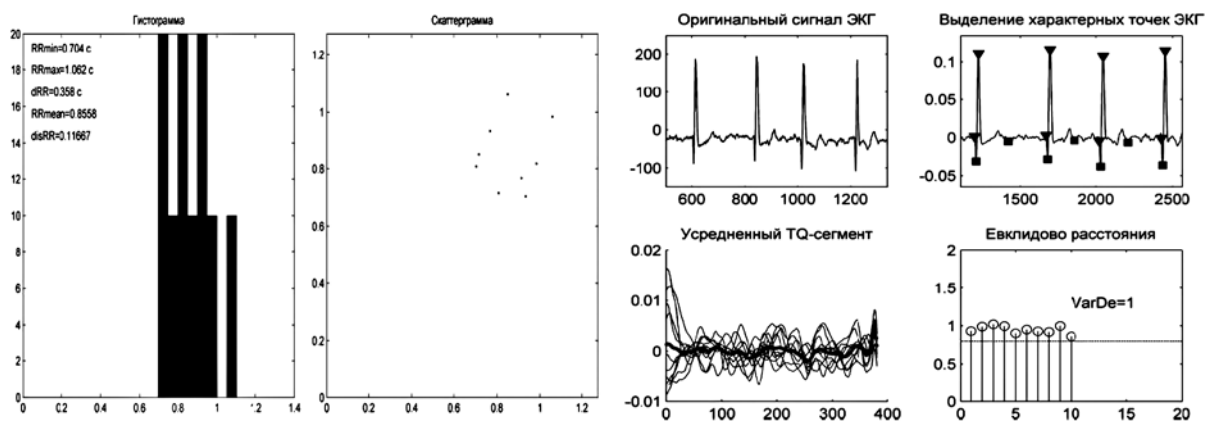


Рис. 4. ВСП и изменчивость TQ-сегментов при ФП

В.А. Рябый, В.П. Савинов, В.Г. Якунин, Ю.А. Пирогов, И.А. Родин

Высокоресурсный плазматрон для применения в медицине

Аннотация

Рассматриваемая работа посвящена изучению свойств плазматрона нового типа с высоким ресурсом работы и сверхчистой плазменной струей методами эмиссионной спектроскопии, тепловидения и химического барботирования. Представлены результаты измерений концентрации химических радикалов NO и NO₂, а также распределения температуры газа вблизи струи плазмы, характеризующие возможности применения данного плазматрона в медицине.

Введение

До конца прошлого века существовали большие проблемы в лечении ран различного происхождения: послеоперационных ран в общей хирургии, онкологии, травматологии и др. К этому времени было установлено, что универсальным регулятором разнообразных биологических и физиологических процессов является оксид азота (NO), который продуцируется в организмах живых существ, включая человека [1]. В случае медленно заживающих ран продуцирование NO снижается и необходим дополнительный подвод NO. Новое медицинское направление (NO-терапия) потребовало создания генераторов

NO. Эффективным методом генерации NO является его синтез с использованием газоразрядной плазмы и атмосферного воздуха [2], [3]. Применялся диэлектрический барьерный разряд для исследования роли химически активных радикалов, теплоты и УФ-излучения в организации бактерицидных процессов [4], [5]. Для аналогичных целей использовался источник плазмы с создаваемой ВЧ-полем плазменной струей, состоявший из керамического сопла с игольчатым электродом под ВЧ-потенциалом на оси и заземленным кольцевым электродом на выходе сопла [6]. Разработаны электрохирургические плазменные аппараты с возбуждением ВЧ-тлеющего разряда в объеме электролита вокруг металлического электрода

и использованием в качестве модели взаимодействия с биологической тканью физиологического раствора [7]. В работах [2], [8] описан дуговой генератор плазмы «ПЛАЗОН», созданный в МГТУ им. Н.Э. Баумана на основе импульсного разряда в газоразрядной камере, являющейся элементом колебательно-контурного контура, успешно применявшийся в многоплановой NO-терапии в клиниках. Следует отметить, что в литературе содержится информация в основном о внутренних параметрах плазмы источника, а не о характеристиках среды, представляющей собой функциональную зону плазматрона.

Цель настоящего исследования состояла в изучении работы нового электродугового высокоресурсного плазматрона постоянного тока. Медицинский аспект постановки задачи заключался в изучении состава плазменной струи плазматрона, измерении плотности химических радикалов NO и NO₂ в области струи и пространственного распределения температуры газа T_g в функциональной области плазматрона.

Постановка эксперимента

Традиционные плазматроны имеют следующие недостатки: 1) существенно ограниченный технический ресурс работы вследствие высокой скорости распыления анода; 2) загрязнение струи плазмы частицами материала анода, который обычно выполняется из меди.

В рассматриваемой работе изучался электродуговой плазматрон постоянного тока, подробно описанный в работе [9], главной отличительной особенностью которого является резко пониженная (до пяти порядков величины) скорость эрозии анода и, следовательно, увеличенный технический ресурс и

высокая степень чистоты генерируемой плазмы. Его конструкция представлена на рис. 1.

Основными конструктивными узлами данного плазматрона являются водоохлаждаемые стержневой катод и сопловой анод. Рабочим элементом катода является стержень из вольфрама, легированного двумя процентами двуокислов тория, лантана или церия. Охлаждение катода локализовано в корпусной заделке так, что в процессе работы обращенный к аноду торец катодного стержня разогревается до температуры ~ 3000 °С, обеспечивающей свободную термоэмиссию электронов из распределенного катодного пятна.

Для защиты катода от окисления в зазор между катодом и анодом подается инертный газ (обычно аргон), в атмосфере которого возбуждается дуговой разряд. Таким образом, защитный по отношению к катоду инертный газ является плазмообразующим газом данного плазматрона. Конструкция анода, выполненного из меди, обеспечивает распределенный характер анодной привязки дуги за счет подачи в газовый канал анода так называемого технологического газа, роль которого могут выполнять кислород, воздух, фреоны и прочие технологические газы микроэлектроники. Данный газ поступает в круговую щель, двигаясь к оси плазматрона в радиальном направлении. В зоне его смешения с защитным газом катода возникает вихревая зона, в которой и образуется фиксирующая длину дуги распределенная анодная привязка, которая окружает с внешней стороны сопловой канал анода 2 (рис. 1). Данная особенность приводит к резкому уменьшению плотности тока на аноде и, следовательно, к снижению скорости его эрозии. В результате скорость эрозии меди анода уменьшается, а техни-

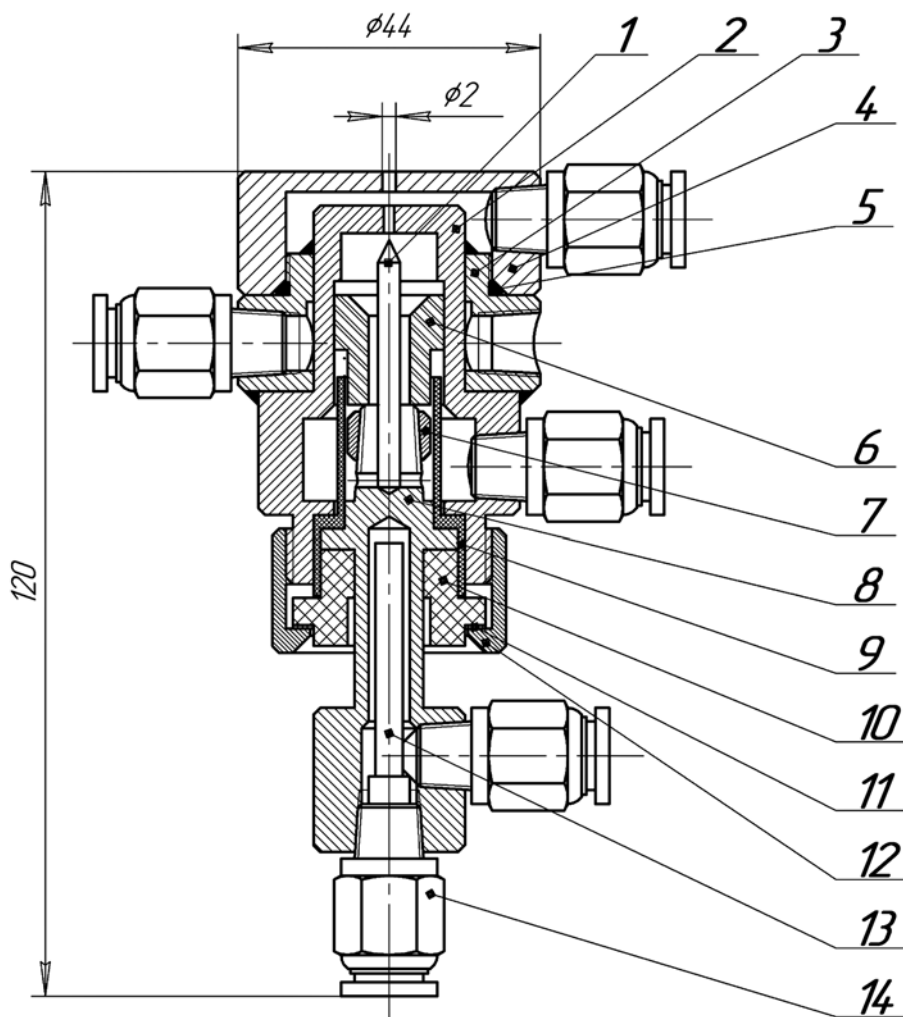


Рис. 1. Конструкция высокоресурсного электродугового плазматрона: 1 – катод; 2 – анод; 3 – кольцо охлаждения; 4 – выходная форсунка; 5 – прокладка резиновая; 6 – изолятор высокотемпературный; 7 – гайка цанги; 8 – корпус катода; 9 – изолятор (фторопласт-4); 10 – изолятор (полиэтилен); 11 – кольцо нажимное; 12 – гайка накидная; 13 – трубка медная; 14 – штуцер

ческий ресурс изделия увеличивается на 4...5 порядков величины по сравнению с традиционными плазматронами. Столь же существенно снижается содержание частиц меди в плазменной струе.

Первоочередной задачей рассматриваемой работы являлось создание эффективного плазменного набора химически активных радикалов и оптических излучений, способных решать конкретные задачи медицины. Большое внимание уде-

лялось производству активного радикала NO. Ключевым моментом этих исследований было экспериментальное определение состава плазмы и характера ее излучения на выходе плазматрона и их изменения в процессе прохождения плазменной струи в прианодной области. Имеющиеся в литературе данные о характеристиках генерируемой плазматроном плазмы, как правило, получены расчетным путем в приближении термодинамически равновесной плазмы [2].

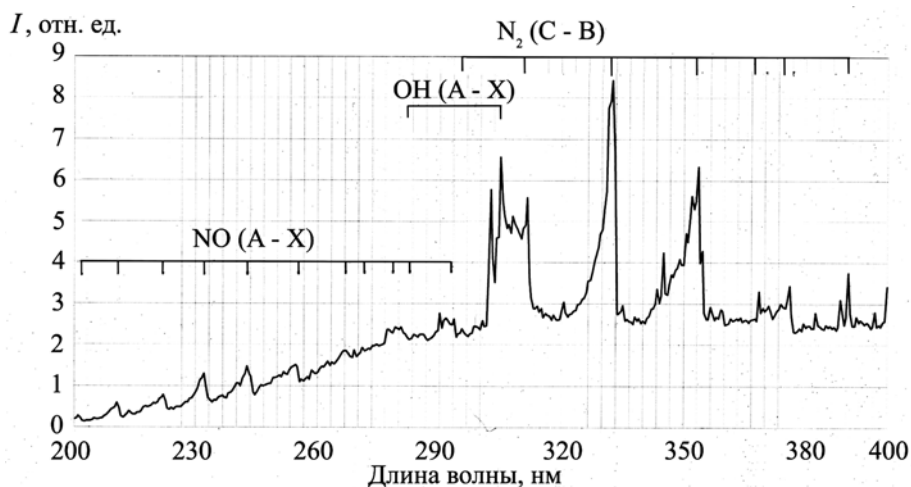


Рис. 2. Спектр излучения плазмы в УФ-диапазоне (200...400 нм) на срезе сопла плазматрона. Плазмообразующий газ – воздух

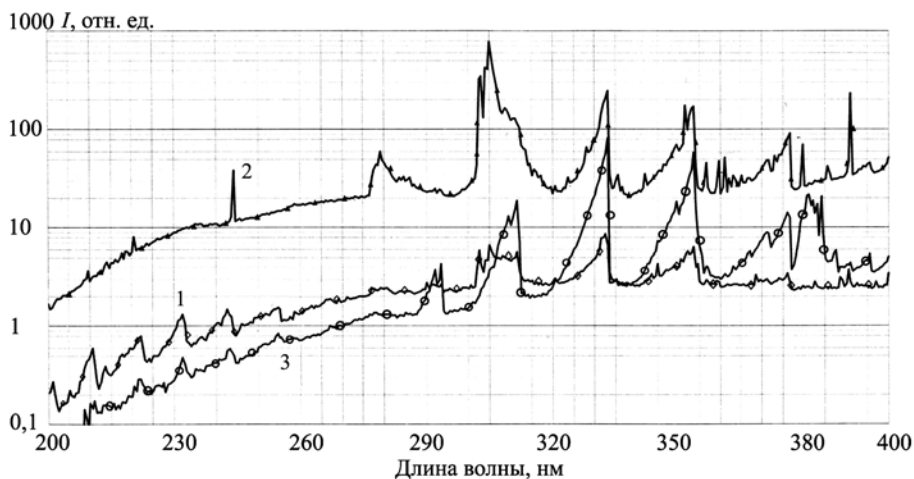


Рис. 3. Спектр излучения плазмы на срезе сопла плазматрона в УФ-диапазоне (200...400 нм). Плазмообразующие газы: 1 – воздух; 2 – Ar; 3 – N₂

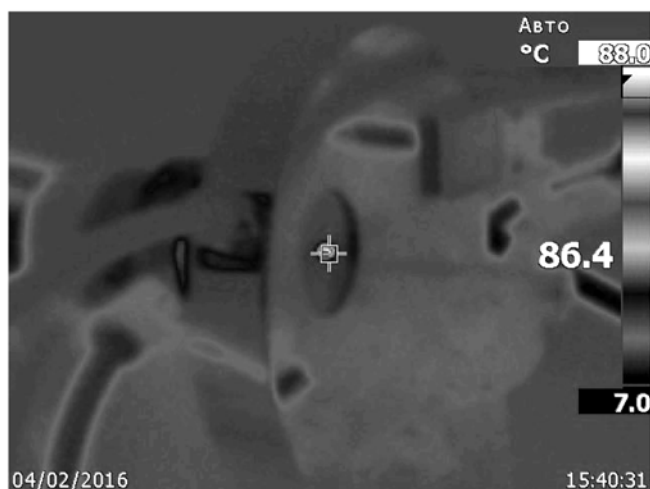


Рис. 4. Картина свечения, полученная с помощью тепловизора «Fluke TI-9» при измерении температуры газа T_g на расстоянии $d = 5$ мм от среза сопла плазматрона ($T_g = 86,4$ °C в точке «+»)

Концентрации химических радикалов NO и NO₂, генерируемых дуговым плазматроном постоянного тока: плазмообразующий газ – аргон, объемный расход аргона – 2 л/мин, ток дугового разряда – 50 А

Газ-разбавитель (расход 10 л/мин)	Место отбора газа (50 мм от среза сопла)	Концентрация NO, ppm	Концентрация NO ₂ , ppm
Воздух	Периферия струи	128	200
N ₂	Периферия струи	13	184
Ar	Периферия струи	96	152
Воздух	Ось струи	1888	136

Диапазон плотностей NO и NO₂ может быть существенно расширен варьированием операционными режимами работы плазматрона (родом и расходом рабочего газа, величиной разрядного тока, конструкцией устройства).

Заключение

В связи с быстрым развитием плазменной медицины актуальна проблема создания источников плазмы, содержащей в себе набор разнообразных факторов, производящих эффективное целенаправленное синергетическое воздействие на биомедицинские объекты. Перспективность представленного в статье плазматрона подтверждают уже полученные на данном этапе результаты: зафиксированные на выходе плазматрона активные радикалы NO, NO₂, OH с управляемой плотностью, УФ-излучение, приемлемое пространственное распределение температуры газа T_g, возможность определения реальной конфигурации функциональной зоны струи плазмы, аномально высокий рабочий ресурс плазматрона и др. Для дальнейшего улучшения работы плазматрона как медицинского аппарата необходимо провести исследования по оптимизации его режимов в отношении генерации радикалов NO, OH, УФ-излучения, физических процессов на выходе плазматрона. Данный плазматрон может использоваться в целях: 1) стерилизации медицинских инструментов, живой ткани тела человека с ранами; 2) нанесения защитных органических пленок при обработке ран; 3) нанесения упрочняющих алмазоподобных пленок на поверхности хирургических инструментов; 4) очищения и стерилизации воды озонном; 5) обдува пациентов струей плазмы в процессе лечения кожных заболеваний и болезней сосудов.

Список литературы:

1. Ignarro L.J. Nitrid oxide: Biology and pathology. – London: Academic Press, 2009, 2nd ed.
2. Vasilets V., Shekhter A., Guller A., Pekshev A. Air plasma-generated nitric oxide in treatment of skin scars and articular musculoskeletal disorders: Preliminary review of observations // Clinical Plasma Medicine. 2015. № 3. PP. 32-39.
3. Wertheimer M., Coulombe S. Plasma Medicine // La Physique au Canada. 2012. Vol. 68. № 4. PP. 189-192.
4. Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W. Dielectric barrier discharges – principle and applications // J. Physique IV. 1997. № 4. PP. 47-66.
5. Laroussi M., Leipold F. Evaluation of the roles of reactive species, heat and UV-radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure // Intern. Journ. of Mass Spectrometry. 2004. № 233. PP. 81-86.
6. Brandenburg R., Lange H., Woedtke T., Stieber M., Kindel E., Ehlbeck J., Weltmann K.-D. Antimicrobial Effects of UV and VUV Radiation of Non Thermal Plasma Jets // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2009. Vol. 37. № 6. PP. 877-883.

Важнейшее значение для различных применений имеет распределение температуры газа T_g и плотности химически активных радикалов в функциональной зоне. Для получения этой информации использовались следующие диагностические методы: эмиссионная спектроскопия, тепловизор и химический барботер.

Результаты диагностики

Для определения качественного состава плазмы с помощью монохроматора МДР-12 регистрировались оптические спектры в интервале длин волн λ = 200...700 нм. На рис. 2, 3 представлены спектры излучения плазмы в УФ-диапазоне (200...400 нм) на срезе сопла плазматрона для различных видов плазмы с графическим указанием длин волн кантов полос молекулярных спектров N₂, NO и OH.

Характер пространственного распределения температуры газа T_g на периферии плазменной струи для различных режимов работы плазматрона был получен с помощью тепловизора типа «Fluke TI-9». Пример пространственной картины свечения с указанием крестообразной меткой точечного значения температуры газа T_g на периферии плазменной струи представлен на рис. 4.

Очевидно, что полученные прибором «Fluke TI-9» цветные изображения свечения, воспроизводящие пространственную картину распределения температуры газа T_g вблизи среза сопла плазматрона, существенно информативнее черно-белых, представленных на рис. 4. Указанное различие обусловлено техническими возможностями данной публикации.

Проведены измерения концентрации химических радикалов с помощью химической методики барботера [10]. Ее суть заключается в том, что из периферийной газовой области, окружающей плазменную струю, отбирается в барботер некоторое количество газа, содержащего химические радикалы. Отобранный газ растворяется в потоке воды в виде пузырей, позволяющих анализировать его состав.

Рассмотрим полученные экспериментальные результаты. Спектроскопические исследования показали, что в УФ-части спектра на выходе плазматрона зафиксированы химически активные радикалы NO, NO₂ и OH. Как было установлено, добавки к плазмообразующему газу (Ar с расходом 2 л/мин) «технологических» газов-примесей (воздух или N₂ с расходом 10 л/мин) существенно влияли на плотность NO. При этом добавка воздуха максимально влияла на увеличение содержания NO. Результаты наших спектроскопических исследований на выходе струи плазматрона близки к данным работы [6]. Кроме того, анализ результатов упомянутой работы позволил установить эффект, не отмеченный авторами работы [6]: на расстоянии d = 5 мм, как видно из спектров, плотность радикала NO выше, чем на срезе сопла плазматрона. Более того, на расстоянии d = 5 мм от среза сопла интенсивность континуума УФ-излучения в интервале длин волн 230 нм < λ < 300 нм существенно выше, чем на самом срезе. Последнее может объяснить существенный рост интенсивности излучения NO на расстоянии d = 5 мм в данном интервале длин волн. Анализ полученных спектров УФ-излучения показывает присутствие в плазменной струе нужного активного радикала NO (рис. 2). При этом, судя по виду спектров, из трех использованных «технологических» газов (Ar, N₂ и воздух) последний обеспечивает наибольший выход окиси азота NO (рис. 3).

С помощью тепловизора получены данные о температуре газа T_g в плазменной струе и ее окрестностях. Характерные значения T_g составляли: в центре струи на срезе сопла – 85 °С, на оси струи на расстоянии d = 5 мм от среза – 80 °С, d = 10 мм – 49 °С, d = 50 мм – 20 °С; перпендикулярно струе (d = 5 мм) на расстояниях: r = 5 мм – 49,5 °С, r = 10 мм – 32 °С, r = 15 мм – 26 °С, r = 20 мм – 20 °С.

Характерные значения плотности радикалов NO и NO₂ внутри плазменной струи и в ее периферийных граничных областях, измеренные с помощью метода химического барботера, представлены в табл. 1. Они показывают значительную зависимость концентраций NO и NO₂ в струе плазмы и в ее окрестностях от рода газа-разбавителя.

7. Белов С.В., Данилейко Ю.К., Нефедов С.М., Осико В.В., Самон В.А., Бабуриш Н.В., Сидоров В.А. Высоочастотные электрохирургические аппараты с режимом генерации низкотемпературной плазмы // Медицинская техника. 2010. № 1 (259). С. 1-6.
8. Шарапов Н.А., Чуканов В.И., Дистанов Р.Р., Козлов Н.П., Пекшеев А.В., Хоменко В.А., Вагапов А.Б., Дусалиева Р.Р. Исследование воздушного плазмохимического реактора для нового медицинского аппарата // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 10. С. 1-10.
9. Пискунов А.Ф., Рябый В.А., Свотина В.В., Ли Х.-Дж., Плаксин В.Ю. Высокоресурсный электродуговой плазмотрон постоянного тока // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 98-107.
10. Химическая энциклопедия. Т. 1. – М.: Советская энциклопедия, 1988. С. 240.

Валентин Анатольевич Рябый,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
вед. научный сотрудник,
НИИ ПМЭ МАИ,
Владимир Павлович Савинов,
д-р физ.-мат. наук, доцент,
Валерий Георгиевич Якунин,
канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,
Юрий Андреевич Пирогов,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
физический ф-т, МГУ им. М.В. Ломоносова,
Игорь Александрович Родин,
канд. хим. наук, ст. научный сотрудник,
химический ф-т, МГУ им. М.В. Ломоносова,
г. Москва,
e-mail: savinov1983@yahoo.com

А.С. Лелюхин

Определение качественных параметров рентгеновских пучков по абсорбционным кривым

Аннотация

Предложена методика определения качественных параметров рентгеновских пучков по абсорбционным кривым, регистрируемым линейным многоканальным детектором. Приведены решения прямой задачи формирования абсорбционных кривых по заданным спектральным распределениям и обратной задачи восстановления спектра излучения по регистрируемым абсорбционным кривым.

Спектральный состав излучения, генерируемого диагностическими рентгеновскими источниками, определяет информативность регистрируемых изображений и дозовые нагрузки. Несоответствие радиационных параметров пучков условиям возбуждения излучения может приводить к необоснованному облучению. Контроль радиационных параметров является неотъемлемой частью диагностического процесса, регламентируемой нормативными документами, требующими наличия сертифицированных средств и методик измерения. Однако в отечественной практике контроля, как правило, используются зарубежные приборы [1]. Разработка новых методик измерения может способствовать созданию современных средств контроля на основе детекторов рентгеновского излучения российского производства.

Первый слой половинного ослабления (СПО₁) и коэффициент однородности h используют для качественной характеристики излучения, генерируемого рентгеновским источником при заданном анодном напряжении. Процедура определения качественных характеристик рентгеновского излучения предполагает проведение многократных измерений с применением фильтров из высококачественного алюминия, фактическая толщина которых должна быть известна с погрешностью не более 10 мкм [2]. В результате серии измерений устанавливают зависимость воздушной кермы за фильтрами от их толщины и по полученной кривой ослабления находят толщину фильтров, ослабляющих излучение в два ($d_{1/2}$) и в четыре ($d_{1/4}$) раза. Первое значение задает первый слой половинного ослабления СПО₁ = $d_{1/2}$, второе значение используется для вычисления второго слоя половинного ослабления СПО₂ = $d_{1/4}$ – СПО₁ и коэффициента однородности $h = \text{СПО}_1 / \text{СПО}_2$.

Очевидно, что на практике предпочтительнее было бы определять качественные параметры излучения за одну экспозицию.

Кривую ослабления рентгеновского излучения алюминиевыми фильтрами в зависимости от их толщины можно описать уравнением вида

$$f(d) = \frac{\int_0^{E_{fr}} \mu_e(E) \alpha(E) E \exp[-\mu_{Al}(E) \cdot \rho_{Al} \cdot d] dE}{\int_0^{E_{fr}} \mu_e(E) \alpha(E) E dE},$$

где E_{fr} – граничная энергия в спектре излучения, кэВ; E – энергия квантов, кэВ; $\mu_e(E)$ – массовый коэффициент передачи энергии фотонного излучения в воздухе, см²/г; $\mu_{Al}(E)$ – массовый коэффициент ослабления алюминия, см²/г; d – толщина алюминиевого фильтра, см; $\alpha(E)$ – функция, определяющая спектральное распределение квантов излучения в пучке при заданных напряжении генерирования U_a (кВ), суммарной фильтрации в алюминиевом эквиваленте d_Σ (см) и угле наклона анода ϕ .

Решения уравнений $f(d) = 1/2$ и $f(d) = 1/4$ определяют толщины фильтров $d_{1/2}$ и $d_{1/4}$. Однако для расчета кривой ослабления необходимо знать исходное спектральное распределение по числу квантов рентгеновского излучения от энергии – $\alpha(E)$.

Ранее предлагалось восстанавливать спектр излучения рентгеновской трубки по абсорбционной кривой, регистрируемой линейным многоканальным детектором [3]. Задача регистрации абсорбционных кривых решается путем размещения линейного детектора вдоль рентгеновского пучка таким образом, что каждый предыдущий канал детектирования является ослабляющим фильтром для последующего.

Проанализируем процесс формирования абсорбционной кривой. Предположим, что пучок рентгеновского излучения возбуждается на аноде рентгеновской трубки в виде множества квантов, обладающих энергией, не большей E_{fr} , распределение квантов в зависимости от энергии описывается формулой Крамерса, а ослабление излучения при распространении в среде подчиняется экспоненциальному закону. Излучатель генерирует в направлении линейного детектора квазипараллельный рентгеновский пучок в виде множества