

4. *Говоров А.В., Пушкарь Д.Ю., Васильев А.О.* Кривоабляция предстательной железы // Методические рекомендации. 2015. № 20.
5. *Жердев А.А., Шакуров А.В., Пушкарев А.В., Бурков И.А., Антонов Е.А., Васильев А.О., Белозеров А.Г.* Исследование характеристик криозондов при различных режимах работы // Медицинская техника. 2016. № 5. С. 41-44.
6. *Бурков И.А., Пушкарев А.В., Цыганов Д.И., Шакуров А.В.* Исследование температурного распределения на рабочей поверхности малоинвазивного криозонда // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 9. С. 23-25.
7. *Пушкарев А.В.* Теоретическое и экспериментальное исследование теплообмена при многозондовом низкотемпературном воздействии на биоткани / Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.03. – М., 2017. 178 с.
8. *Rabin Y., Stahovich T.F.* Cryoheater as a means of cryosurgery control // Phys. Med. Biol. 2002. № 48. PP. 619-632.
9. *Котова Т.Г., Коченов В.И., Цыбусов С.Н., Мадаев Д.Ю., Гурин А.В.* Расчет эффективности времени замораживания при криохирургии рака легкого на основе моделирования по методу Годунова // Современные технологии в медицине (СТМ). 2016. Т. 8. № 1. С. 48-54.
10. *Белозеров А.Г., Березовский Ю.М., Королев И.А., Пушкарев А.В.* Дифференциальная сканирующая калориметрия в исследованиях теплофизических характеристик биологических тканей в широком диапазоне температур // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12 (54). Ч. 3. С. 14-20.

*Анатолий Анатольевич Жердев,*  
 д-р техн. наук, профессор,  
 руководитель НУК «Энергомашиностроение»  
 МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
*Дмитрий Игоревич Цыганов,*  
 д-р техн. наук, профессор,  
 кафедра «Холодильная, криогенная техника.  
 Системы кондиционирования и жизнеобеспечения»,  
 МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
 зав. кафедрой медицинской техники,  
 ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава РФ,  
*Алексей Валерьевич Шакуров,*  
 канд. техн. наук, зав. отделом 3.1,  
*Александр Васильевич Пушкарев,*  
 инженер 1-й категории отдела 3.1,  
*Иван Александрович Бурков,*  
 инженер 2-й категории отдела 3.1,  
 НИИ «Энергомашиностроение»  
 МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
*Александр Олегович Васильев,*  
 канд. мед. наук, ассистент,  
 кафедра урологии,  
 Московский государственный  
 медико-стоматологический  
 университет им. А.И. Евдокимова,  
*Александр Олегович Сухих,*  
 лаборант отдела 3.1,  
 НИИ «Энергомашиностроение»  
 МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
 г. Москва,  
 e-mail: ivanburkov1991@mail.ru

*М.Л. Таубин, А.А. Ясколко, Д.А. Чесноков*

## Оценка температуры фокусного пятна анодов мощных рентгеновских трубок

### Аннотация

Представлены результаты расчетов температурных полей вращающихся анодов мощных рентгеновских трубок, приведен обзор свойств основных анодных материалов.

### Введение

Современным рентгеновским трубкам медицинского назначения, предназначенным для таких аппаратов, как ангиографы и компьютерные томографы, присущи выходные мощности, нередко превышающие 100 кВт. Подавляющая часть этой энергии выделяется на аноде, разогревая его до высоких температур, поэтому допустимые нагрузки трубок во многом определяются соотношением рабочих температур анода с предельными температурами, которые способны выдержать материалы, входящие в его состав. Определение рабочих температур вращающегося анода экспериментальными методами является крайне сложной, а в некоторых случаях практически невозможной задачей, поскольку неоднородности температурного поля анода составляют тысячи градусов Цельсия, а скорости нагрева могут достигать десятков тысяч градусов в секунду. В таких условиях основным инструментом оценки рабочих температур анода и, как следствие, его работоспособности на этапе разработки является расчетное моделирование.

Современные вращающиеся аноды мощных рентгеновских трубок выполняют, как правило, биметаллическими, с основой из молибдена различных марок и покрытием из вольфрама или сплава вольфрам-рений с концентрацией рения в диа-

пазоне от 5 до 10 %. Молибденовая основа обеспечивает конструктивную прочность, а вольфрам-рениевое покрытие, благодаря повышенным прочности и пластичности («рениевый эффект»), достаточно большому атомному номеру вольфрама ( $Z = 74$ ) и высокой температуре плавления, позволяет получать интенсивное рентгеновское излучение при достаточно малых размерах фокусного пятна. Для использования в трубках, в которых требуется высокая теплоемкость анодов, что характерно для трубок компьютерных томографов, ангиографов и других сканирующих аппаратов, к молибдену с обратной фокусной дорожке стороны припаивают графитовый аккумулятор. В некоторых случаях аноды выполняют без молибденовой основы, формируя вольфрамовое покрытие непосредственно на графите [1]. Такие аноды, при более высоких значениях теплоемкости и степени черноты, существенно легче, однако существует проблема взаимодействия графита и вольфрама. Эта проблема решается формированием диффузионного барьера между вольфрамом и графитом.

### Анализ температур фокусного пятна

Первым критерием, ограничивающим допустимую нагрузку трубки, является максимальная температура фокусной дорожки, соответствующая точкам на аноде в момент прохо-

дения ими действительного фокуса. Как известно, эта температура превышает среднее значение температуры фокусной дорожки  $T_{cp}$  на величину

$$T_v = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{P \cdot (1-K) \cdot G}{S_f} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}} \cdot \sqrt{\frac{f}{2 \cdot \pi \cdot R_f \cdot \nu}}, \quad (1)$$

где  $P$  – входная мощность анода;  $S_f$  – площадь действительного фокуса;  $K$  – коэффициент вторичных электронов;  $G$  – коэффициент, учитывающий глубину проникновения электронов в материал фокусной дорожки;  $\lambda$  – теплопроводность материала фокусной дорожки;  $\rho$  – плотность материала фокусной дорожки;  $c_p$  – удельная теплоемкость материала фокусной дорожки;  $f$  – ширина действительного фокуса (в общем случае совпадает с номинальным размером фокусного пятна);  $R_f$  – средний радиус фокусной дорожки;  $\nu$  – частота вращения анода [2], [3].

Площадь действительного фокуса в уравнении (1) определяется номинальным размером фокусного пятна, численно равным  $f$ , и углом анода  $\alpha$  по формуле

$$S_f = \frac{f^2}{\sin(\alpha)}. \quad (2)$$

Коэффициент вторичных электронов  $K$  для анодов с фокусной дорожкой из вольфрама по данным [2] составляет 0,3, т. е. только 70 % энергии электронного пучка расходуется на разогрев анода в зоне фокусной дорожки. Коэффициент  $G$  в формуле (1) учитывает глубину пробега электронов в материале фокусной дорожки, поскольку выделение тепла при бомбардировке электронами происходит не на поверхности фокусной дорожки, а в некотором объеме. Зависимость коэффициента  $G$  от безразмерной величины  $\gamma$  представлена на рис. 1. Величина  $\gamma$  определяется по формуле

$$\gamma = 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{R_f}{f} \cdot \nu \cdot U_a^3}, \quad (3)$$

где  $U_a$  – анодное напряжение, кВ;  $\nu$  – частота вращения анода, Гц;  $f$  – ширина действительного фокуса, мм;  $R_f$  – средний радиус фокусной дорожки, мм.

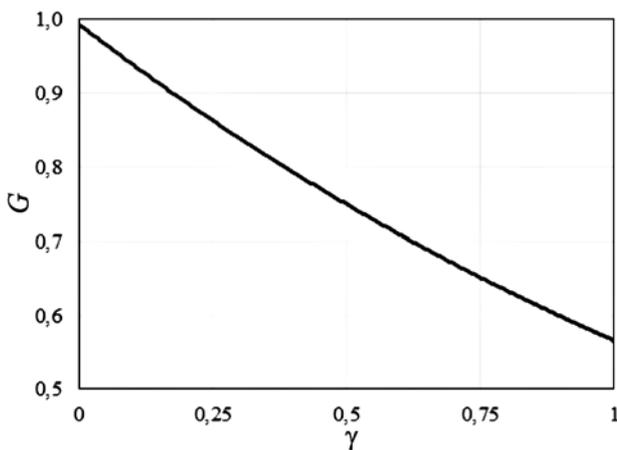


Рис. 1. Значение коэффициента  $G$  для вольфрамового анода [2]

Как следует из уравнения (1), на величину  $T_v$  существенно влияют теплоемкость и теплопроводность материала фокусной дорожки. Из литературных данных о теплоемкости вольфрама [4], [5] и их сравнения с данными для сплава W-Re [6] следует, что легирование рением в диапазоне концентраций до 10 % слабо влияет на величину удельной теплоемкости вольфрама (рис. 2).

Для расчетов удобно использовать линейную аппроксимацию зависимости удельной теплоемкости от температуры

$$C_p = 0,0213T + 130,8, \quad (4)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, °С.

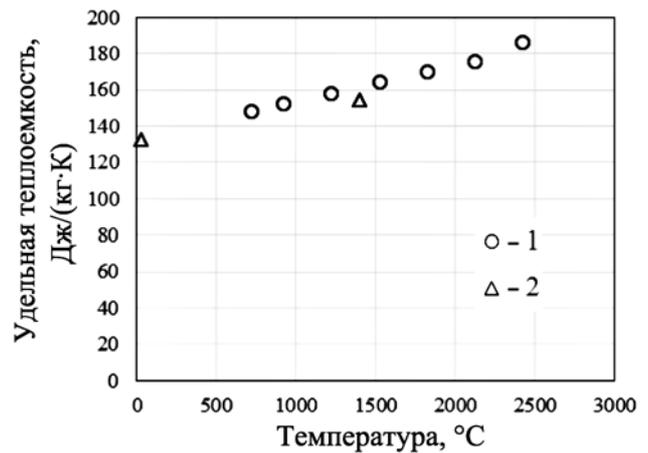


Рис. 2. Удельная теплоемкость: 1 – чистый вольфрам [4]; 2 – сплав W-10%Re [6]

В отличие от теплоемкости, теплопроводность является структурно-чувствительной характеристикой материала, и ее значение существенно зависит от технологии изготовления анодов. В работах [1] и [7] отмечено существенное влияние содержания рения на коэффициент теплопроводности сплава W-Re, полученного методом порошковой металлургии (рис. 3, данные 1, 2, 3). При этом в работе [1] приведены данные для сплава W-6%Re, полученного по газовой (CVD) технологии, коэффициент теплопроводности которого при комнатной температуре превышает коэффициент теплопроводности чистого порошкового вольфрама и составляет 170 Вт/(м·К).

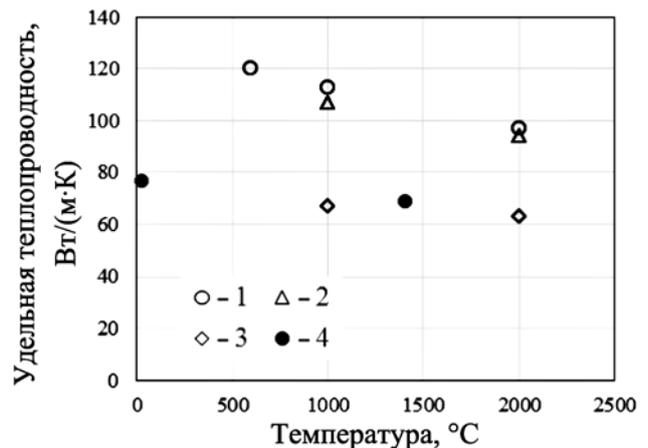


Рис. 3. Коэффициент теплопроводности: 1 – чистый вольфрам [8]; 2 – сплав W-3%Re [7]; 3 – сплав W-26%Re [7]; 4 – сплав W-10%Re [6]

В рассматриваемой работе использованы данные для сплава W-10%Re, полученного методом порошковой металлургии [6], в соответствии с которыми линейная аппроксимация зависимости коэффициента теплопроводности от температуры имеет вид

$$\lambda = -0,006T + 77, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – удельная теплопроводность, Вт/(м·К);  $T$  – температура, °С.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости температуры  $T_v$  от диаметра анода для различных значений выходной мощности.

По одной температуре  $T_v$  достаточно сложно судить о работоспособности анода, поскольку максимальная температура фокусной дорожки определяется суммой  $T_v$  и  $T_{cp}$ , однако из рис. 4 видно, что при входных мощностях на уровне 100 кВт и диаметрах анода менее 120 мм  $T_v$  превысит критическое значение 2800 °С. Это свидетельствует о том, что даже при минимальной средней температуре анода в зоне фокусного пятна будет интенсивно проходить процесс испарения материала.

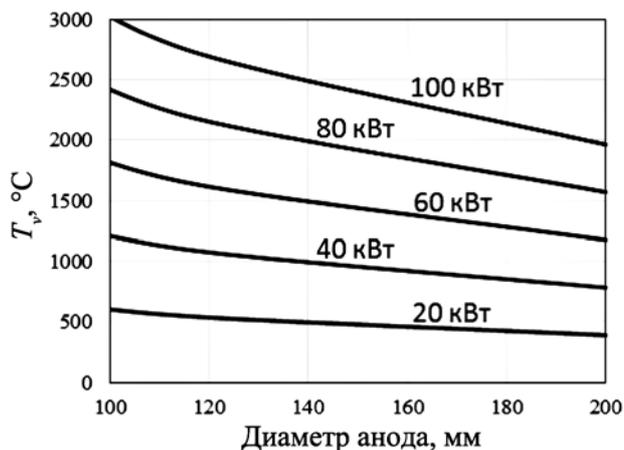


Рис. 4. Зависимость  $T_v$  от диаметра анода: угол анода –  $7^\circ$ ; номинальный размер фокусного пятна – 1,0; скорость вращения – 9000 об/мин

На рис. 5 представлены расчетные зависимости  $T_v$  от коэффициента теплопроводности материала фокусной дорожки для анода диаметром 120 мм (угол анода –  $7^\circ$ ; номинальный размер фокусного пятна – 1,0; скорость вращения – 9000 об/мин; входная мощность – 80 кВт). Точками на графике отмечены теплопроводности материалов фокусной дорожки, взятые из различных источников.

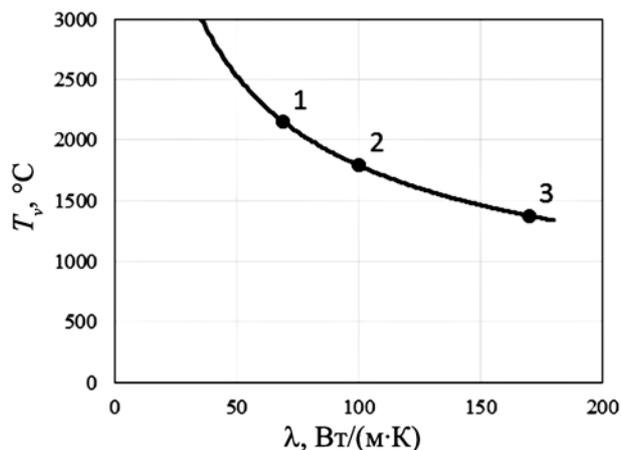


Рис. 5. Зависимость  $T_v$  от теплопроводности материала фокусной дорожки: 1 – сплав W-10%Re (порошковая металлургия) [6]; 2 – чистый вольфрам (порошковая металлургия) [7]; 3 – W-6%Re (CVD) [1]

Полученная закономерность свидетельствует о ключевой роли теплопроводности материала фокусной дорожки в оценке максимальной температуры. Из рис. 5 видно, что увеличение теплопроводности на величину около 100 Вт/(м·К), что, по мнению авторов [1], характерно при переходе от порошковой технологии формирования фокусной дорожки к CVD технологии, снижает температуру  $T_v$  более чем на  $750^\circ\text{C}$ . Однако приведенные оценки являются больше качественными, чем количественными, поскольку, как отмечалось ранее, теплопроводность является структурно-чувствительной характеристикой и ее значение необходимо измерять на образцах, полученных по «штатной» технологии производства анодов, а рис. 5 наглядно иллюстрирует, насколько неточность определения теплопроводности влияет на оценку максимальной температуры анода.

## Заключение

Проведенный на основании расчетов авторов анализ показал, что минимально возможный диаметр анода при входных мощностях на уровне 100 кВт не должен быть менее 120 мм. В этом случае температура  $T_v$  не превысит критического значения  $2800^\circ\text{C}$ , характерного для интенсивного испарения материала фокусной дорожки.

Литературные данные показывают, что величина теплопроводности материала очень сильно зависит от технологии его получения. Так, вольфрам, полученный осаждением из газовой фазы, имеет теплопроводность существенно выше по сравнению с вольфрамом, полученным при помощи классической порошковой металлургией. Показано, что использование в качестве материала фокусной дорожки вольфрама, осажденного из газовой фазы, позволяет уменьшить температуру фокусной дорожки более чем на  $750^\circ\text{C}$ .

### Список литературы:

1. Huot G., Fellman V., Poirel V. 18th Plansee Seminar / Chemical Vapor Deposition of Tungsten Coatings on X-ray Rotating Light Anodes Made of Carbon-Based Materials. 2013.
2. Денискин Ю.Д., Чижунова Ю.А. Медицинские рентгеновские трубки и излучатели. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 209 с.
3. Krestel E. Imaging Systems for Medical Diagnostics: Fundamentals and Technical Solutions. – 1st ed. Siemens, 1990.
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968. 484 с.
5. Таубин М.Л., Ясколко А.А., Платонов В.Ф. Разработка метода исследования комплекса теплофизических свойств вольфрама в интервале температур до  $2300^\circ\text{C}$  // Цветные металлы. 2007. № 11. С. 29-31.
6. Plankensteiner A., Rödhammer P. Finite Element Analysis of X-Ray Targets / 15th International Plansee Seminar, Reutte, Austria. 2001. PP. 9-22.
7. Wong C.P.C. IEEE 14th Symp. on Fusion Eng. / ARIES-III Divertor Engineering Design, San Diego. 1991.
8. Эсне В. Технология электровакуумных материалов. Т. 1 / Пер. с нем. – М.: ГЭИ, 1962. 631 с.

Михаил Львович Таубин,  
д-р техн. наук, профессор,  
гл. научный сотрудник,  
ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»,  
г. Подольск, Московская обл.,  
НИЯУ МИФИ,  
г. Москва,  
Антон Андреевич Ясколко,  
канд. техн. наук, директор,  
ООО «Термионика»,  
Дмитрий Андреевич Чесноков,  
начальник лаборатории,  
ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»,  
г. Подольск, Московская обл.,  
e-mail: chesnokov@sialuch.ru