

УДК 621.3.032.213

## МЕТАЛЛОПОРИСТЫЙ КАТОД ВАКУУМНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА МАГНЕТРОННОГО ТИПА С ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ И МГНОВЕННОЙ ГОТОВНОСТЬЮ

Тищенко О.Д., Зоркин А.Я., Родионов И.В., Белова И.В., Тищенко А.А., Семенов С.В.

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов,*

*e-mail: olga.gorbunova2003@yandex.ru*

В настоящее время в вакуумных электронных приборах магнетронного типа с мгновенной готовностью и импульсной мощностью от 40–60 Вт применяют автоэмиссионные комбинированные металлопористые катоды, которые обеспечивают практически мгновенную готовность прибора за счет автоэлектронной эмиссии с холодных автоэмиссионных катодов. Рабочая поверхность таких катодов выполняется в виде чередующихся вторично-эмиссионных и автоэмиссионных шайб. В качестве вторично-эмиссионного эмиттера применяется импрегнированный алюминатный металлопористый катод, представляющий собой шайбы из пористого вольфрама, пропитанного алюминатом бария и кальция ( $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), а в качестве автоэмиссионного эмиттера – шайбы из танталовой фольги толщиной 4 мкм с автоэмиссионной кромкой толщиной 1 мкм, сформированной ультразвуковой обработкой. Проведен анализ при помощи растровой электронной микроскопии микроструктуры лезвий танталовых шайб автоэмиссионного комбинированного металлопористого катода после работы прибора в номинальном режиме. Установлено, что причиной нестабильной работы и малого срока службы приборов магнетронного типа с данным катодом является разрушение кромок танталовых шайб. Возможными причинами расслоения кромок могут являться и термические напряжения, и образование канавок за счет ионного распыления при ионной фокусировке в центре кромки. Разработана конструкция катода малоомощного прибора магнетронного типа, обеспечивающая мгновенную готовность и стабильную работу прибора в течение 5000 часов. На наружной поверхности танталовых шайб выполнены автоэмиссионные кромки с радиусом закругления 0,1–0,2 мкм. Разработанные автоэмиссионные комбинированные металлопористые катоды в экспериментальных макетах, показывающие в диодном режиме анодный ток более 400 мА при анодном напряжении 300 В, при дальнейшей постановке их в прибор позволяют повысить выход годных приборов до 80%.

**Ключевые слова:** катод, эмиттер, шайба, тантал, эмиссия

## DISPENSER CATHODE VACUUM ELECTRONIC DEVICE OF THE MAGNETRON TYPE WITH HIGH DURABILITY AND INSTANT READINESS

Tishchenko O.D., Zorkin A.Ya., Rodionov I.V., Belova I.V., Tishchenko A.A., Semenov S.V.

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, e-mail: olga.gorbunova2003@yandex.ru*

In modern times, in the vacuum electronic devices of the magnetron type with instant readiness and pulse power 40-60W used autoemission cathodes. These cathodes provide instant readiness of the device due to the autoemission cold autoemission cathodes. The working surface of such cathodes is performed in a alternating secondary emission washer and autoemission washer. As the secondary emission of the emitter is applied aluminate impregnated cathode, which is a washer made of porous tungsten impregnated with barium aluminate and calcium ( $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ). As a field emission emitter used washers from tantalum foil with a thickness of 4 μm with a field emission edge thickness of 1 μm formed by ultrasonic treatment. The analysis using scanning electron microscopy of the microstructure of the blades tantalum washers combined autoemission cathode after operation of the device in the nominal mode. It is established that the cause of instability and the small life of the devices of the magnetron type with the given cathode is the destruction of the edges of the tantalum washers. Possible causes delamination of the edges can be the thermal stress and the formation of grooves due to ion sputtering in ion focusing in the center of the edge. The design of cathode for low-power device of the magnetron type, providing instant readiness and stable operation for 5000 hours. Developed by combined autoemission cathodes in the model showing in the diode mode anode current more than 400 mA when the anode voltage is 300V, with further putting them into the device allow to increase the yield of devices to 80%.

**Keywords:** cathode, emitter, collar, tantalum, emission

Современная техника сверхвысоких частот характеризуется большим разнообразием типов генераторов и усилителей, среди которых особое место занимают вакуумные электронные приборы магнетронного типа (ВЭП М-типа). ВЭП М-типа импульсного или непрерывного действия благодаря ряду достоинств (высокому коэффициенту полезного действия, компактности, надёжности, стабильности, высокой мощности генерируемых колебаний и т.д.)

нашли широкое применение в радиолокационных и навигационных системах, в аппаратуре слежения и радиопротиводействия, в сельском хозяйстве, медицине и в устройствах оборонно-промышленного комплекса. В настоящее время в России и за рубежом выпускаются различные типы ВЭП М-типа импульсного действия, отличающиеся друг от друга частотой генерируемых колебаний, выходной мощностью и временем готовности.

Работоспособность и стабильность эксплуатационных параметров ВЭП М-типа в значительной степени зависят от физических свойств катодов. Это связано с тем, что эмитирующая поверхность катодов, находясь непосредственно в области взаимодействия электронных потоков и высокочастотных электромагнитных полей, подвергается интенсивной бомбардировке потоками электронов и ионов. Такое воздействие приводит к изменению физико-химических, геометрических, эмиссионных и других свойств катодов, влияющих на эксплуатационные параметры приборов. При конструировании ВЭП М-типа чрезвычайно важно из множества существующих вариантов катодов сделать правильный выбор конструкции и технологии их изготовления, которые в полной мере обеспечили бы достижение требуемых эксплуатационных параметров приборов. Поэтому в производстве современных ВЭП М-типа особое внимание уделяется созданию высокоэффективных и надежных катодов, отличающихся высокой стабильностью эмиссионных свойств в условиях интенсивной электронной бомбардировки и ряда других внешних факторов [1–3]. Металлопористые катоды (МПК) применяют в различных ВЭП, в частности в большинстве ламп бегущей волны или обратной волны современных усилителей для радиолокации, наземной и космической связи, телевидения, сотовой связи [4].

В современное время МПК применяют и в ВЭП М-типа с мгновенной готовностью и импульсной мощностью от 40–60 Вт. Для реализации мгновенной готовности и включения с первого импульса ВЭП М-типа усилителя прямой волны малой мощности используется автоэмиссионный комбинированный МПК, который обеспечивает практически мгновенную готовность прибора за счет автоэлектронной эмиссии с холодных автоэмиссионных катодов. Рабочая поверхность катода выполнена в виде чередующихся вторично-эмиссионных и автоэмиссионных шайб (рис. 1). В качестве вторично-эмиссионного эмиттера применяется импрегнированный алюминатный МПК, представляющий собой шайбы из пористого вольфрама, пропитанного алюминатом бария и кальция ( $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), а в качестве автоэмиссионного эмиттера – шайбы из танталовой фольги толщиной 4 мкм с автоэмиссионной кромкой толщиной 1 мкм, сформированной ультразвуковой обработкой [5]. Недостатками такого катода являются малая долговечность (не превышает 1000 часов) и нестабильность автоэлек-

тронной эмиссии, представляющая собой большие флуктуации тока, значительные низкочастотные шумы, внезапное прекращение эмиссии вследствие пробоя и оплавления [6]. Устойчивая работа с долговечностью порядка 1000 часов достигнута при изготовлении автоэмиссионных эмиттеров из гексаборида лантана.

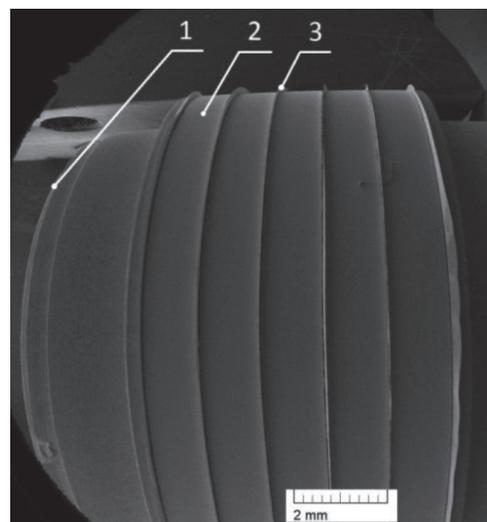


Рис. 1. Автоэмиссионный комбинированный МПК: 1 – kern катода, 2 – вторично-эмиссионный эмиттер, 3 – автоэмиссионный эмиттер

Такая малая долговечность не достаточна для современных ВЭП М-типа, для которых необходима долговечность до 5000 часов. Для решения проблемы создания таких катодов необходимо решить две задачи:

1. Провести анализ причин малой долговечности автоэмиссионных танталовых шайб катодов, исследовав состояние их кромок после работы прибора в номинальном режиме.

2. Разработать конструкцию автоэмиссионного комбинированного МПК для маломощного ВЭП М-типа с мгновенной готовностью с первого импульса.

При помощи растрового электронного микроскопа «TESCAN MIRA 3 LMN» была проведена растровая электронная микроскопия кромок автоэмиссионных танталовых шайб автоэмиссионного комбинированного МПК после его работы в маломощном импульсном ВЭП М-типа С-диапазона в номинальном режиме (рис. 2).

Рис. 2, б, г, показывает, что имеются расслоения кромок и выступы шириной менее 1 мкм по краям кромок. Возможными причинами расслоения кромок могут являться и термические напряжения, и образование канавок за счет ионного распыления при ионной фокусировке в центре кромки. Воз-

можной причиной образования выступов шириной менее 1 мкм (исходная танталовая фольга, полученная прокаткой, имеет вытянутые зерна размером несколько микрометров), по краям кромок может быть несогласованное магнетронное распыление в парах материала катода. Рис. 2, а, в показывает, что на кромках имеются локальные зоны их оплавления. Температура плавления тантала 2996 °С [7], но в работающем приборе средняя температура поверхности катода не достигает более 1100 °С, а локальные температуры – более 1800 °С, что недостаточно для плавления чистого тантала. Поэтому наличие локального оплавления кромок может быть только при наличии на поверхности оксидов тантала, вероятнее всего  $Ta_2O_5$  с температурой плавления 1785–1872 °С в зависимости от его модификации [7]. И так, возможной причиной нестабильной работы и малых сроков службы данных приборов с данным катодом является то, что в начале их рабо-

ты происходит расслоение кромок на лезвия шириной 0,1–0,5 мкм, которое создает автоэлектронную эмиссию в начале каждого импульса и обеспечивает тем самым мгновенную готовность прибора. Однако эти лезвия могут быть не устойчивы к интенсивной электронной и ионной бомбардировке и микроразрядам, которые могут привести к оплавлению этих лезвий, что снижает автоэлектронную эмиссию, ухудшает стабильность работы прибора и приводит к пропуску импульсов.

Для предотвращения процессов расслоения и оплавления кромок возможно формирование кромок меньшего размера. Работа таких кромок может быть более стабильной из-за наличия эффекта их самозаострения, что делает их особенно устойчивыми к воздействию микроразрядов [6]. Уменьшение размера кромок также дополнительно повышает эффективную площадь вторично-эмиссионного эмиттера.

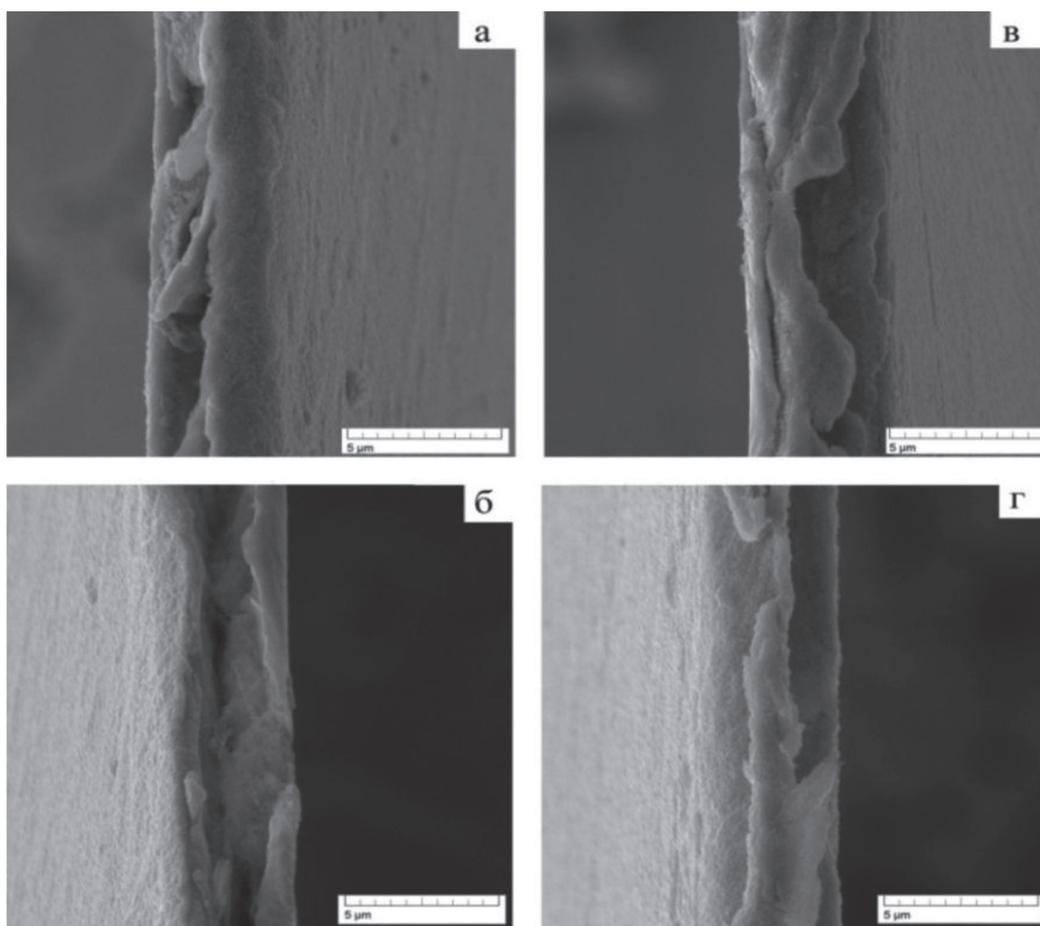


Рис. 2. Растровая электронная микроскопия кромок автоэмиссионных танталовых шайб: а, в – оплавление острия, б, г – расслоение острия

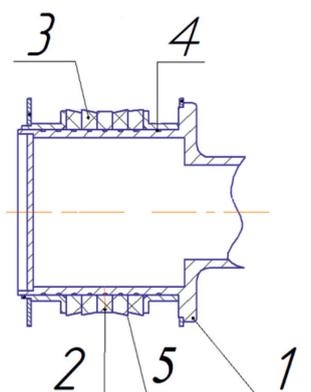


Рис. 3. Автоэмиссионный комбинированный МПК с долговечностью в ВЭП М-типа до 5000 часов: 1 – kern катода, 2, 3 – вторично-эмиссионные втулки, 4 – канавки с молибденокобальтовым припоем, 5 – автоэмиссионные кромки

Конструкция автоэмиссионного комбинированного МПК для маломощного ВЭП М-типа с мгновенной готовностью с первого импульса долговечностью до 5000 часов представлена на рис. 3.

На керне катода 1 из тугоплавкого металла имеются канавки 4, в которых размещен молибдено-кобальтовый припой. На наружной поверхности керна закреплены вторично-эмиссионные втулки 2 и 3, изготовленные из вольфрамовой губки и пропитанные алюминатом бария и кальция ( $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ). На наружной поверхности втулок выполнены автоэмиссионные кромки 5 с радиусом закругления 0,1–0,2 мкм. Вольфрамовую губку катода изготавливают из вольфрамового порошка ВЧДК. При изготовлении вольфрамовых губок в качестве связующего используют высокоочищенный парафин. Для пропитки спеченных вольфрамовых губок применя-

ют бескислородную медь в виде стружки или отходов. После меднения вольфрамовой губки из него вытачивают втулку требуемой формы, затем вытравливают и испаряют медь. Пропитка губки активным веществом ( $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) осуществляется в потоке сухого водорода (с точкой росы 223 К) при температуре 2000–2100 К. Затем вольфрамовую губку нагревают в водородной печи. Активное вещество расплавляется и заполняет поры губки. Вольфрамовая губка нормально пропитывается, если с противоположной стороны губки появляется избыток активного вещества, который затем удаляют. Закрепление пропитанной вольфрамовой губки на керне катода осуществляют пайкой молибдено-кобальтовым припоем.

Для исследования разработанных катодов были проведены испытания в диодном режиме пяти экспериментальных макетов приборов (один с базовой конструкцией по рис. 1 и четыре с различными вариантами конструкций по рис. 3), результаты испытаний которых представлены на рис. 4.

Разработанные автоэмиссионные комбинированные МПК (по рис. 3) в экспериментальных макетах, показывающие в диодном режиме анодный ток более 400 мА при анодном напряжении 300 В, при дальнейшей постановке их в прибор позволяют повысить выход годных приборов до 80%.

Для дальнейшего исследования разработанных катодов были проведены динамические испытания маломощного ВЭП М-типа с мгновенной готовностью с первого импульса с автоэмиссионными комбинированными МПК по рис. 1 и 3 при постоянной мощности входного сигнала, равной 60 Вт в полосе частот С-диапазона по трем точкам F1, F2, F3, результаты испытаний которых представлены на рис. 5 и 6.

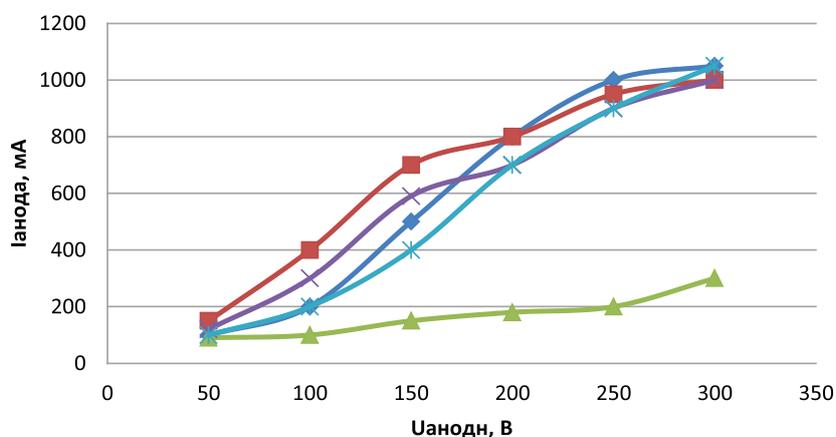


Рис. 4. Вольтамперные характеристики экспериментальных макетов с разными вариантами катодов

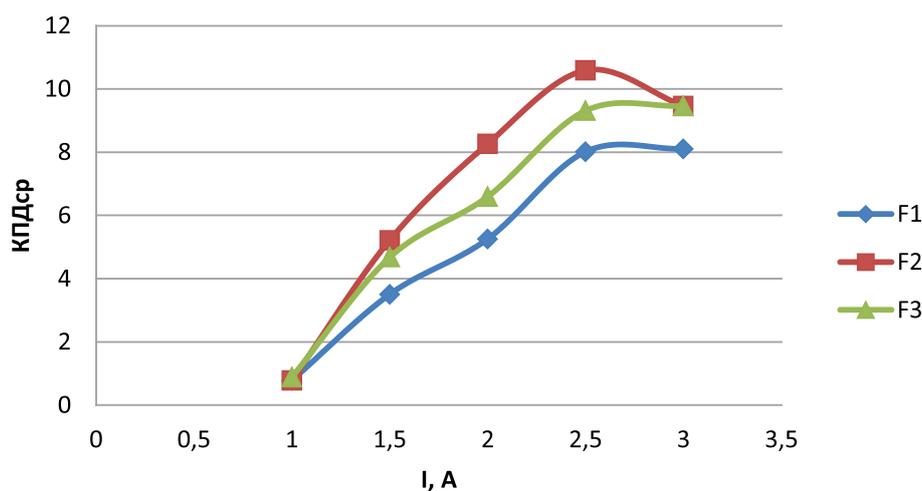


Рис. 5. Зависимость среднего коэффициента полезного действия от тока анода по результатам динамических испытаний ВЭП М-типа с базовой конструкцией катода (по рис. 1) на частотах F1, F2, F3

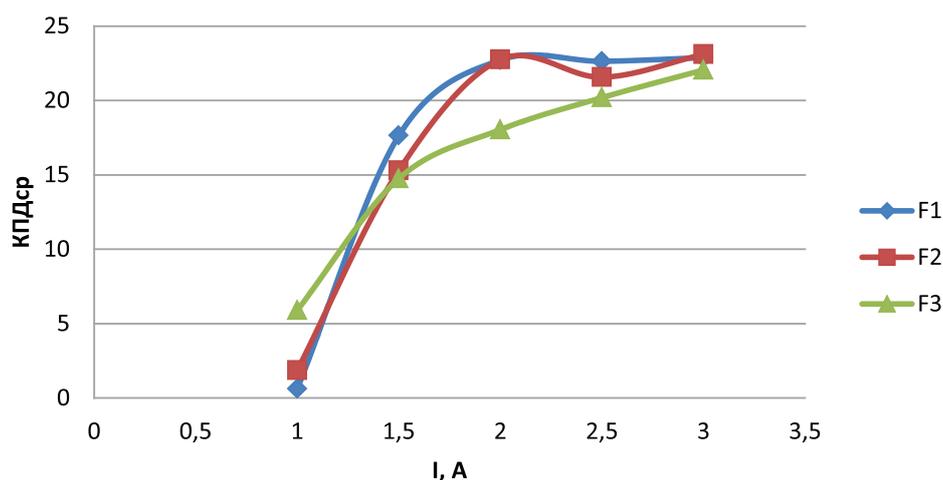


Рис. 6. Зависимость среднего коэффициента полезного действия от тока анода по результатам динамических испытаний ВЭП М-типа с разработанной конструкцией катода (по рис. 3) на частотах F1, F2, F3

При проведении динамических испытаний приборов установлено, что применение катодов с конструкцией по рис. 3 значительно снижает ток утечки. По результатам динамических испытаний коэффициент полезного действия прибора с катодом базовой конструкции по рис. 1 не превышает 11 % (рис. 5), а коэффициент полезного действия прибора с катодами конструкций по рис. 3 увеличился до 23 % (рис. 6).

В результате проведенных исследований установлено, что причиной нестабильной работы и малого срока службы

маломощного ВЭП М-типа с мгновенной готовностью с первого импульса с автоэмиссионными комбинированными МПК является разрушение автоэмиссионных кромок танталовых шайб. Поэтому была разработана конструкция автоэмиссионного комбинированного МПК с уменьшенным радиусом закругления автоэмиссионных кромок до 0,1–0,2 мкм, которая обеспечивает мгновенную готовность и стабильную работу прибора в течение 5000 часов и повышает выход годных приборов до 80 %.

**Список литературы**

1. Ли И.П., Калушин С.В., Комиссарчик С.В. Стратегия развития катодной техники в современных условиях на примере ОАО «Плутон» // *Материалы XXI научно-технической конференции по вакуумной науке и технике.* – 2014. – С. 209–214.
2. Ли И.П., Леденцова Н.Е., Поляков В.С., Силаев А.Д. и др. Некоторые особенности конструирования катодных узлов для магнетронов импульсного действия с повышенной надежностью и сроком службы // *Наукоемкие технологии.* – 2014. – Т. 15, № 11. – С. 32–38.
3. Патент РФ № 2380784. Магнетрон с безнакальным запуском / Ли И.П., Дюбуа Б.Ч., Каширина Н.В., Комиссарчик С.В., Лифанов Н.Д., Зыбин М.Н. Оpubл. 27.01.2010.
4. Коношин А.В., Сахаджи Г.В. Лазерные технологии в производстве микрокомпонентов // *РИТМ.* – 2011. – № 3(61). – С. 40–42.
5. Тищенко А.А., Тищенко О.Д., Зоркин А.Я. Формирование кромок автоэмиссионных шайб комбинированного катода маломощного усилителя прямой волны М-типа // *Вопросы электротехнологии.* – 2016. – № 3(12). – С. 17–21.
6. Елинсон М.И. Ненакаливаемые катоды / М.И. Елинсон, Г.А. Кудинцева и др. – М.: «Сов. Радио», 1974. – 336 с.
7. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: «Энергоатомиздат», 1991. – 1232 с.