

*Галина Н.М., Духина Н.Г., Литвинюк И.Ю.,  
Соколов А.М., Турутин Ю.А.  
АО «НПП «Исток» им. Шокина»*

## **Анализ и стабилизация работы ленты ионизатора цезиевой АЛТ**

*В рамках ряда ОКР, проведенных в последние годы, проводился анализ причин брака и отказов серийно выпускаемых АО «НПП «Исток» им. Шокина» атомно-лучевых трубок (АЛТ). Наиболее сложным узлом АЛТ является индикаторный узел, и основное количество отказов связано с ним. Дестабилизация сигнала ионного тока может происходить в результате поверхностной ионизации атомов цезия на ленте ионизатора, изменения ее геометрических размеров, состояния поверхности и состава материала, температуры и других параметров. Были проведены исследования изменения свойств ленты ионизатора в процессе ее работы, даны рекомендации по их стабилизации. Полученные результаты могут быть полезны для стабилизации работы АЛТ.*

**Ключевые слова:** атомно-лучевая трубка, лента ионизатора.

Характеристики цезиевого атомно-лучевого стандарта частоты (АЛСЧ) в составе БСУ космического аппарата системы ГЛОНАСС в значительной степени определяют точность и надежность навигационно-временного обеспечения, предоставляемого системой потребителю. Основным элементом АЛСЧ, определяющим его точностные и надежностные характеристики, является атомно-лучевая трубка (АЛТ).

В результате поверхностной ионизации атомов цезия на ленте ионизатора и последующего усиления тока должен быть получен стабильный сигнал ионного тока. Суточная нестабильность выходного сигнала квантовых стандартов частоты не должна превышать  $1 \cdot 10^{-13}$ . Анализ работы серийно выпускаемых АЛТ показал, что ионизационная эффективность ионизатора падает, а стабилизация тока накала, предусмотренная в системе, не обеспечивает стабильность параметров ленты ионизатора.

Высказывались предположения о том, что на стабильность ионного тока в АЛТ влияет дрейф управляющих напряжений в ионной пушке, вызванный постепенным накоплением цезия на поверхности ее электродов [1]. Можно оценить изменение управляющих потенциалов на электродах, например из очищенного молибдена, имеющего работу выхода 4,2 эВ. Несмотря на стабильную подачу атомов цезия (работа выхода 1,6 эВ), в случае их адсорбции на поверхности электрода будет происходить изменение управляющего потенциала, которое может составить:

$\Delta U = \varphi_{Mo} - \varphi_{Mo-Cs} = 2,6 \text{ В}$ , что важно, так как даже небольшие изменения контактной разности потенциалов сравнимы с напряжениями, которые подаются на фокусирующие электроды ионной пушки от внешнего источника. На время «сидения» цезия на ленте ионизатора влияет температура ленты ионизатора, при снижении температуры цезий накапливается на ней. Возможной причиной нестабильности ионного тока может быть и изменение работы выхода самой ленты ионизатора. При пропускании через металлическую ленту ионизатора тока при высоких температурах может происходить изменение ее геометрии, сопротивления. Все это может привести к изменению степени

ионизации пучка атомов цезия, к нестабильности в работе АЛТ. Работа выхода ленты ионизатора зависит от состояния ее поверхности, состава, атомно-кристаллической структуры ее материала, она может меняться от процессов, происходящих на поверхности ленты ионизатора в высоком вакууме: диффузии, миграции, перестройки поверхности и от условий работы. Выяснение причин изменения работы выхода ленты ионизатора требует изучения как поверхностных, так и объемных свойств материала, рассмотрения технологии изготовления ленты ионизатора и условий ее работы в приборе. Причем, стабильность тока положительных ионов цезия зависит не только от абсолютных значений параметров ленты ионизатора, но и от равномерности данных параметров по длине ее рабочей части.

Нами были продолжены работы, начатые ранее, по отработке технологии изготовления лент ионизатора [1].

Лента ионизатора в АЛТ представляет собой танталовую ленту шириной 1,1 мм, толщиной 30 мкм, закрепленную с одной стороны на пружину, с другой стороны на жесткую мельхиоровую пластину. Основные технологические операции изготовления ионизатора: изготовление ленты ионизатора, приварка ленты ионизатора к выводам металлокерамической ножки и ее обезгаживание во время откачки и стабилизации параметров прибора. Раньше изготовление ленты ионизатора производилось двухсторонней резкой шлифованным калиброванным ножом, после доводки инструмента шероховатость среза составляла порядка 2,5 мкм. Однако, ленты не обладали необходимой плоскостностью (рис. 1а), изготовление лент ионизатора на установке «Каравелла», использующей для резки лазерный луч, позволило получать ленты ионизатора требуемой плоскостности.

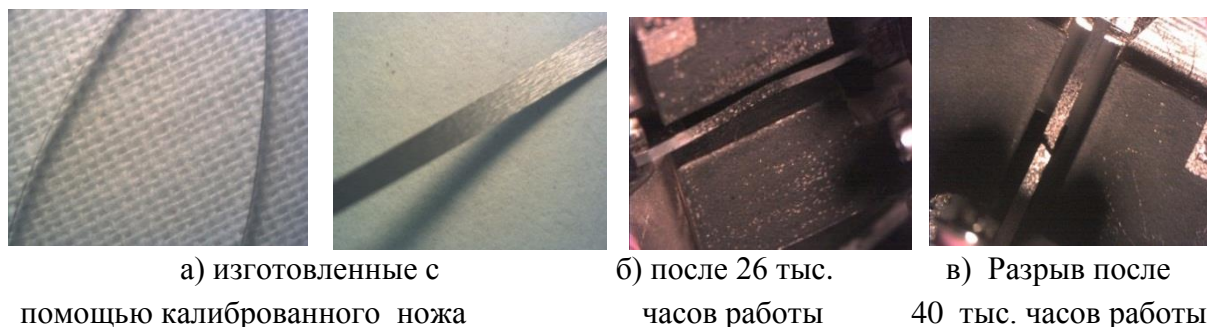
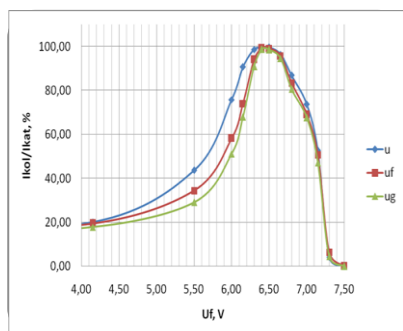
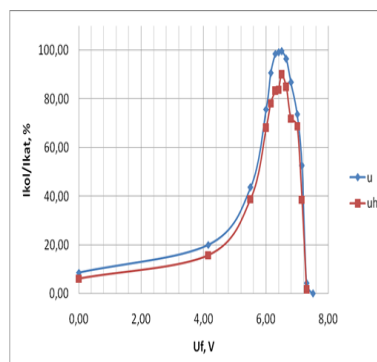


Рис.1. Ленты ионизатора.

Ленты ионизатора должны иметь не только первоначальную плоскостность, но и обладать достаточной формоустойчивостью во время работы. На рис. 1б, 1в показаны ленты ионизатора из приборов, вышедших из строя после 26 и 40 тыс. часов работы. В первом случае (рис. 1б) произошло коробление ленты ионизатора в поперечном направлении и ее изгиб, в центральной части ленты (в области высоких температур) произошло наиболее сильное изменение структуры материала. Во втором случае (рис. 1в) процесс рекристаллизации и укрупнения зерен привел к разрушению материала по границам зерен. Замеры плоскостности лент, имеющих малый срок службы (200 часов), показали, что в отдельных случаях наклон рабочей поверхности лент ионизатора относительно держателя составляет около  $2^\circ$ , а поворот по ширине может быть более  $6^\circ$ . Был выполнен расчет ионно-оптической системы, позволяющий оценить влияние изменений геометрии лент ионизатора на выходные параметры АЛТ. Расчет показал, что разворот ленты ионизатора в поперечном направлении приводит к сужению кривой токопрохождения на коллектор (при развороте на 0.2 мм кривая уже процентов на 30 по уровню 80% от максимума), наклон ленты также портит токопрохождение (рис. 2).



а) u - обычная система ,  
uf – повернутая по узкой стороне  
(разница между концами 0.16, ug - 0.2).



б) u - обычная система,  
uh - повернутая по длинной стороне (uh - 5.7°).

Рис.2. График токопрохождения на коллектор.

Деформация ленты нежелательна, так как это приводит к перехвату части потока на края прямоугольного отверстия вытягивающей анодной диафрагмы, возможно оседание и накопление цезия на ней. Ширина области прохождения пучка уменьшилась, снижая устойчивость выходного сигнала АЛТ к дестабилизирующему воздействию контактной разницы потенциала. Механические свойства тантала зависят от содержания примесей, режимов его обработки и условий работы. Проведенные испытания ленты ионизатора на механическую прочность (на число перегибов, выдерживаемых до разрушения) при разных температурных и временных интервалах показали, что при длительности отжига 10 минут наиболее оптимальной температурой отжига в вакууме  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  мм. рт. ст. является температура  $1200^{\circ}\text{C}$ . Дальнейшее увеличение температуры и длительности отжига, ухудшение вакуума снижают пластичность тантала (рис. 3). Для увеличения формоустойчивости лента ионизатора была изготовлена с бортиками размером 0,15 мм, которые выполняют роль ребра жесткости (рис. 4), была проработана конструкция ее крепления.

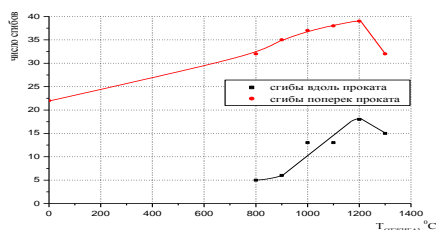


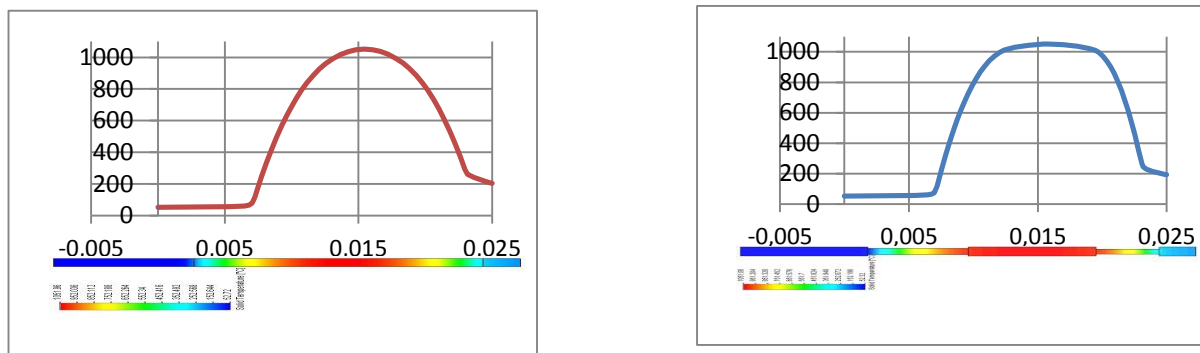
Рис.3. Число перегибов до разрушения в зависимости от температуры отжига.



Рис.4. Лента ионизатора с ребрами жесткости.

Лента ионизатора работает при токе накала, соответствующему ее рабочей температуре, равной  $1000^{\circ}\text{C}$ . Перепад температуры по длине ленты ионизатора (17 мм) составляет до  $180^{\circ}$ , а по центральной части (5 мм) до  $30^{\circ}$ . В связи с тем, что рабочая зона смещена относительно центра ленты, перепад температуры по рабочей зоне увеличивается вдвое. Причем, из-за значительной разницы толщины крепежных деталей, к которым крепятся концы ленты ионизатора, градиент температуры в разные стороны от центра ленты отличается. Неравномерность температуры по ленте обуславливает разброс работы выхода на отдельных участках поверхности ленты ионизатора, что неизбежно связано с эмиссионной неоднородностью ленты [1]. Получено, что меньшего перепада температуры в рабочей зоне можно достичь, снизив разницу в толщине крепежных деталей, или используя ленту переменной ширины. При использовании таких

конструктивных решений перепад температуры по рабочей зоне может быть снижен до  $10^{\circ}$  (рис 5).



Лента ионизатора одинаковой ширины

Лента ионизатора переменной ширины

Рис.5. Распределение температуры по ленте ионизатора.

Начальное распределение температуры по ленте ионизатора от ленты к ленте имеет хорошую воспроизводимость, однако, у лент из разных партий материала бывают выбросы до  $80^{\circ}$  (рис. 6). Это можно объяснить тем, что ленты из поликристаллического тантала могут отличаться по примесным элементам, кристаллическим дефектам, состоянию поверхности. Поэтому, для получения точной начальной температуры ленты ионизатора требуется персональное пирометрирование лент.

Температура рекристаллизации тантала  $1100-1200^{\circ}\text{C}$ . Если лента ионизатора подвергается длительному прогреву, то рекристаллизация и изменение прочности тантала может происходить и при меньших температурах. В диодах с плохим вакуумом быстрее происходил рост сопротивления лент, это объясняется тем, что более быстро начинает идти процесс рекристаллизации материала.

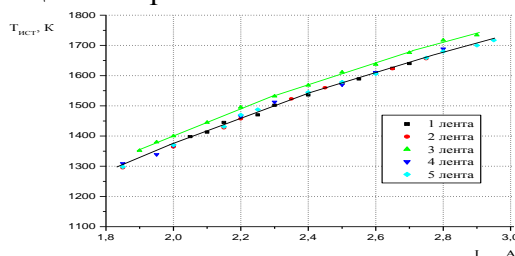


Рис. 6. Данные пирометрирования лент ионизатора.

Порог рекристаллизации при продолжительности отжига 10-30 минут может наступить для тантала, уже при  $1000^{\circ}\text{C}$ , то есть, лента ионизатора работает в АЛТ на грани температуры рекристаллизации. Учитывая вышеизложенное, для замедления процесса рекристаллизации и повышения надежности работы ленты ионизатора было предложено проводить отжиг в вакууме не хуже  $10^{-7}$  мм.рт.ст., подачей на ленту ионизатора тока накала, соответствующего рабочей температуре ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) в течение 10 минут.

Резкое изменение работы выхода у лент ионизатора наблюдается в первые 500 часов работы, затем идет постепенная стабилизация. Как показали испытания ленты ионизатора, в эти часы наблюдается наибольшее изменение ее температуры (до  $80^{\circ}$ ).

Учитывая вышеизложенное, была проведена корректировка технологии изготовления ленты ионизатора, а именно:

- внесен контроль геометрических размеров при посадке ленты в управляющий электрод (соосности, погружения относительно управляющего электрода),
- внесено пирометрирование каждой ленты ионизатора с целью определения рабочего тока накала, соответствующего рабочей температуре, равной  $1000^{\circ}\text{C}$ ,

- введен прогон ленты ионизатора при рабочем токе накала в течение 500 часов,
- внесен повторный контроль геометрии лент после прогона.

Только после этого ножка монтируется в АЛТ.

Контроль лент с бортиками после автономного технологического прогона в течение 500 ч подтверждает стабильность геометрии лент. Результаты длительной эксплуатации приведены на рис. 7 – для ленты с бортиками (наземные испытания АЛТ на безотказность), и, для сравнения, на рис. 8 – данные по работе АЛТ с плоскими лентами на КА Глонасс-М. По ординатам на графиках отложена интенсивность атомного пучка на выходе АЛТ, для орбитальной эксплуатации – в форме телеметрического параметра; в обоих случаях поддерживается паспортный режим индикатора атомного пучка.

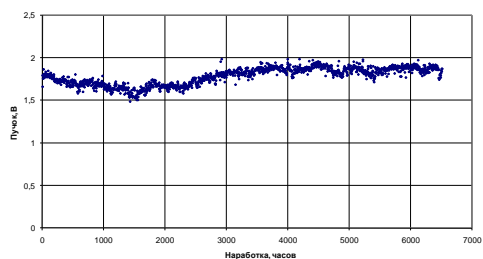


Рис. 7. Наземные испытания АЛТ, лента эксплуатации ионизатора с бортиками.

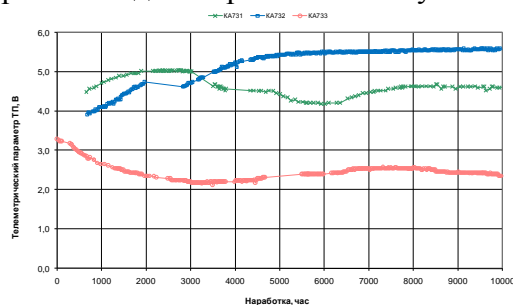


Рис.8. Данные орбитальной КА Глонасс-М, АЛТ с плоской лентой ионизатора.

Лучшая стабильность пучка в случае ленты с бортиками очевидна, при этом имеющаяся вариация пучка связана с изменением вакуумных потенциалов электродов.

#### Библиографический список:

1. Об одной возможной причине нестабильности сигнала Атомно – лучевой трубки в системе «Глонасс – М» / А.В. Бокуменко, А.А. Борисов, Н.М. Галина, И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина, Б.Ч. Дюбуа, И.Ю. Литвинюк, А.Г. Михальченков, Е.Н. Покровский, М.П. Темирязева, Ю.А.Турутин //Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника – 2011. – Вып.1 (508). – С.25.