

---

УДК 621.455.4:539.3

## **Исследование температурного деформирования электродов ионно-оптической системы на основе континуальной термомеханической расчетной модели**

**Федоров В.А., Обухов В.А., Могулкин А.И.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*  
*riame@sokol.ru*

### **Аннотация**

Наиболее нагруженным в конструкции ионных двигателей (ИД) является узел ионно-оптической системы (ИОС). Электроды ИОС выполнены в виде тонкостенных сферических перфорированных оболочек. Основная нагрузка на них вызвана неравномерным нагревом по радиусу, вызывающим появление внутренних напряжений и упругих деформаций.

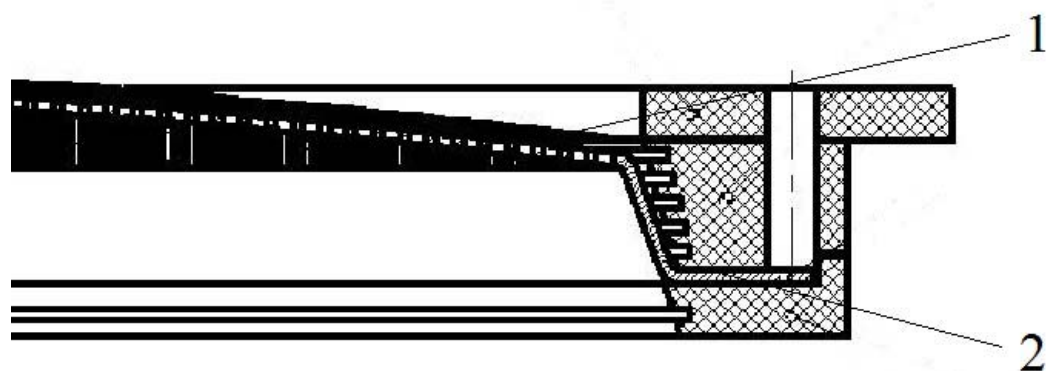
При разработке конструкции ИОС необходимо учитывать выбор материалов и форму электродов, а также характер их закрепления. Эти факторы влияют на величину деформации электродов, которая не должна превышать жестких пределов заданных конструкцией ИОС. В современных ИД в узле ионно-оптической системы используются новые прогрессивные конструкционные металлические материалы, такие как: сплавы титана с ниобием, отожженный молибден высокой чистоты. Наметилась тенденция использования электродов из углерод - углеродных композитных материалов (УУКМ). Также используются в узле ИОС одновременно электроды, выполненные из разных материалов. Из описанного выше вытекает

необходимость создания термомеханической модели узла ИОС, которая позволит конструктору произвести предварительную оценку, расчет напряжений и упругих деформация электродов, изготовленных из различных конструкционных материалов. Рассматриваемая в статье модель основана на теории тонкостенных оболочек.

**Ключевые слова:** ионный двигатель, ионно-оптическая система, перфорация, прогиб, конструктивная ортотропия, температурная нагрузка, температурная деформация, термомеханическая модель.

### **Математическая модель**

В современных ИД узел ИОС выполняется с профилируемыми густо перфорированными электродами в виде сегментов сферы. Такая форма обеспечивает устойчивость к тепловым воздействиям и определяет направление деформаций. Схематично конструкция ИОС изображена на рисунке 1. Узел ИОС содержит не менее двух перфорированных электродов: эмиссионный (ЭЭ) и ускоряющий (УЭ). Также используются ИОС с большим количеством электродов. Толщина ЭЭ составляет (0,3 – 0,5) мм, а ускоряющего – (1,0 – 2,5) мм. Отверстия в электродах расположены соосно. При этом диаметр отверстий в ЭЭ существенно превышает диаметр отверстий в УЭ.



1- эмиссионный электрод; 2 –ускоряющий электрод.

Рисунок 1 Ионно-оптическая система.

Электроды изготавливаются из различных материалов с учетом одновременного выбора направления осей отверстий. В данном случае рассматриваются два варианта направления осей отверстий: по нормали к поверхности профилированной части электродов и вдоль вертикальной оси электродов.

Континуальная термомеханическая модель [1, 2] хорошо зарекомендовала себя при математическом описании параметров жесткости перфорированных электродов ИОС, основанная на представлении эмиссионных, ускоряющих, а также замедляющих электродов в виде конструктивно-ортотропных пологих тонкостенных сферических панелей [3].

В качестве основного фактора нагружения в общем случае рассмотрен неравномерный нагрев электродов по радиусу и толщине. Вследствие этого коэффициенты заполнения электродов материалами, являющиеся в рассматриваемой модели одновременно коэффициентами конструктивной

ортотропии, непосредственно учитывались в исходных уравнениях термоупругости [4].

Соотношения между геометрическими размерами круглых отверстий перфорации, регулярно расположенных по треугольной схеме, и коэффициентами заполнения электродов материалами вычислялись по специальному алгоритму, который давал возможность одновременно корректно учитывать не только апробированное активное силовое нагружение электродов, но и тепловое воздействие на ИОС в целом. Результатом принятия такой термомеханической модели электродов стала диаграмма зависимости коэффициентов конструктивной ортотропии от отношения диаметра отверстий перфорации к расстоянию между ними [5, 6].

Для непосредственного расчета деформированного состояния сферических электродов при их неравномерном нагреве по радиусу использовался математический аппарат матричных краевых интегральных и интегро-дифференциальных уравнений, представляемых в удобной безразмерной форме записи [7, 8]. Решение этих уравнений, полученных в геометрически нелинейной постановке задачи об изгибе пологой сферической густо перфорированной панели, может быть эффективно построено на итерационных методах расчета в сочетании с процессом пошагового температурного нагружения рассматриваемых электродов.

Описанный выше алгоритм решения полученных интегральных уравнений целесообразно применять на стадии моделирования и на ответственных этапах поверочных расчетов на прочность и жесткость. Предварительные вычисления по

упрощенному алгоритму эффективнее выполнять при проведении исследовательских многовариантных поисковых расчетов.

Таковым является первое приближение итерационного процесса решения соответствующих интегральных уравнений не в численном, а в аналитическом виде. Получаемое при этом разрешающее нелинейное алгебраическое уравнение третьей степени относительно безразмерного дополнительного прогиба на внутреннем контуре электрода или в его центральной точке достаточно эффективно решается с помощью математического пакета прикладных программ типа MathCAD.

Проводились многовариантные исследования процесса деформирования электродов на базе моделей высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) с диаметром ионизатора 160 и 450 мм. В соответствии с описанным выше новым упрощенным алгоритмом расчета дополнительных прогибов пологих сферических панелей рассматривались эмиссионные электроды изготавливаемые из: обычного молибденового сплава ВМ-2, нового титан-ниобиевого сплава ТВ-36, а также из углерод-углеродного композитного материала УУКМ. В качестве ускоряющего электрода рассматривался молибденовый сплав ВМ-2 и углекомпозит УУКМ.

Для повышения эффективности и комплексности проводимых вычислений разрешающее алгебраическое кубическое уравнение представлялось в следующем безразмерном виде:

$$\xi^3(\rho_a) + 3 \cdot g(\rho_a) \cdot \xi^2(\rho_a) + \left[ 2 \cdot g^2(\rho_a) - \frac{\lambda_3 - \lambda_{3,kp}}{k_o} \right] \xi(\rho_a) - \lambda_3 \cdot \frac{g(\rho_a)}{k_o} = 0,$$

где  $\rho_a$  – безразмерный радиус внутреннего контура;

$k_o = 12 \cdot (1 - \mu^2 \cdot k_r \cdot k_\varphi)$  – вспомогательный безразмерный параметр;

$\lambda_3 = k_o \cdot \alpha \cdot \Delta T_r \cdot \frac{b^2}{h^2}$  - безразмерный параметр нагружения;

$$\rho = \frac{r}{b}; \quad \xi = \frac{w}{h}; \quad \vartheta = \frac{w_o}{h};$$

$w$  – дополнительный прогиб электрода, мм;

$w_0$  – начальный (технологический) прогиб электрода, мм;

$u$  – радиальное перемещение сферической панели, мм;

$k_r$  – коэффициент конструктивной ортотропии в цилиндрическом сечении;

$k_\varphi$  – коэффициент конструктивной ортотропии в меридиональном сечении;

$h$  – толщина сферической панели, мм;

$b$  – радиус внешнего контура сферической панели, мм;

$\rho$  – безразмерный текущий радиус сферической панели;

$\xi$  – безразмерный дополнительный прогиб;

$\vartheta$  – безразмерный начальный (технологический) прогиб;

$\lambda_{3,kr}$  – критическое значение безразмерного параметра нагружения  $\lambda_3$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплового линейного расширения,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль упругости материала электрода, МПа;

$\Delta T_r$  – перепад температуры по радиусу электрода,  $^\circ\text{C}$ .

Температурные поля электродов записываются следующим образом:

$$T(\rho) = T(1) + \Delta T_r \cdot f_{T0}(\rho).$$

В качестве основного закона изменения перепада температуры по радиусу электрода была выбрана простая квадратичная зависимость вида

$$f_{T0} = 1 - \rho^2.$$

Полученные интегральные уравнения в безразмерной форме записи позволили ввести несколько дополнительных критериев подобия, которые составляют комплексы безразмерных параметров геометрии, жесткости, нагружения, граничных условий и т. д., с помощью которых осуществляется переход к расчету конкретного электрода ИОС.

Введение в рассмотрение внутреннего контура электродов, образованного центральным отверстием перфорации, обусловлено постоянной необходимостью раскрытия неопределенностей в особой сингулярной точке на оси сферического сегмента путем учета центрального отверстия как второго контура электрода. В тех случаях, когда эта особая точка в явном виде не проявляется в каких-то задачах, там можно обходиться и без рассмотрения такого условного внутреннего контура.

Для любого способа закрепления электрода в составе ИОС при проведении всего комплекса расчетов на устойчивость и изгиб в линейной и нелинейной постановках необходимо вычислять критические значения перепада температуры по радиусу электрода. Это позволит определить, в какой области действия нагрузок находится сферический электрод, т. к. при решении алгебраического уравнения третьей степени с помощью MathCAD необходимо прогнозировать начальные значения искомой переменной. Задание такого начального значения требует априорной информации о примерной локализации корня решаемого алгебраического уравнения.

При расчетах величин безразмерного дополнительного прогиба на внутреннем контуре электрода  $\xi(\rho_a)$  или в его геометрическом центре  $\xi(0)$  упрощается подбор этих начальных значений за счет небольших локальных отличий в используемых исходных данных. В таблицах 1 – 7 представлены результаты вычислений дополнительных прогибов электродов  $\Delta w(0)$ . По рассмотренным вариантам исходных данных, выполнялись расчеты нелинейного деформирования эмиссионных и ускоряющих электродов в центральной точке ( $\rho_a = 0$ ).

Для корректного сравнения полученных результатов все рассматриваемые электроды, свободно закрепленные на внешнем контуре в отношении радиальных перемещений и угловых поворотов, неравномерно нагревались по радиусу с распределением температуры по закону параболы.

При этом непосредственно в расчетах варьировались:

- материалы электродов (молибден ВМ-2, а также углерод-углеродный композитный материал УУКМ использовались в эмиссионных и ускоряющих электродах; сплав титана с ниобием марки ТВ-36 применялся в эмиссионных электродах);
- радиусы внешних контуров в эмиссионных и ускоряющих электродах;
- температура на внешнем контуре электродов в сочетании с перепадом температуры по радиусу;
- заданные для последующего анализа 3 варианта значений толщин электродов;



- геометрические размеры диаметра отверстий решетки и расстояний между ними;

- величины коэффициентов заполнения электродов материалом;
- модуль упругости применяемых материалов;
- коэффициент теплового линейного расширения материалов;
- коэффициент Пуассона;
- критические значения безразмерного параметра нагрузки  $\lambda_{3,кр}$ .

Для удобства идентификации и анализа полученных результатов расчета искомых дополнительных прогибов  $\Delta w(0)$ , реализующихся в полюсах сферических сегментов, были введены индивидуальные номера для каждого из электродов в сочетании с учетом порядкового номера в итоговых таблицах.

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчета дополнительных прогибов эмиссионных сферических электродов (450 мм) из молибденового сплава ВМ-2

при  $b = 247$  мм;  $d_0 = 4,0$  мм;  $S_0 = 5,0$  мм;  $d_0/S_0 = 0,8$ ;  $k_r = 0,3$ ;  $E = 32,5 \cdot 10^4$  МПа;

$$\alpha = 5,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C, \quad \mu = 0,3$$

Номер электрода	h, мм	T(1) °C	$\Delta T_r$ °C	$\lambda_{3,кр}$	$w_0(0)$ , мм	$\Delta w(0)$ мм
1	0,3	330	50	35,5	5,0	1,529
2	0,3	270	40	35,5	5,0	1,253
3	0,3	330	50	35,5	10,0	0,848
4	0,3	270	40	35,5	10,0	0,683
5	0,3	330	50	35,5	15,0	0,578
6	0,3	270	40	35,5	15,0	0,464
7	0,3	330	50	35,5	20,0	0,437
8	0,3	270	40	35,5	20,0	0,351
9	0,3	330	50	35,5	25,0	0,351
10	0,3	270	40	35,5	25,0	0,281
11	0,3	330	50	35,5	30,0	0,293

12	0,3	270	40	35,5	30,0	0,235
13	0,4	330	50	35,5	5,0	1,525
14	0,4	270	40	35,5	5,0	1,250
15	0,4	330	50	35,5	10,0	0,847
16	0,4	270	40	35,5	10,0	0,683
17	0,4	330	50	35,5	15,0	0,578
18	0,4	270	40	35,5	15,0	0,464
19	0,4	330	50	35,5	20,0	0,437
20	0,4	270	40	35,5	20,0	0,351
21	0,4	330	50	35,5	25,0	0,351
22	0,4	270	40	35,5	25,0	0,281
23	0,4	330	50	35,5	30,0	0,293
24	0,4	270	40	35,5	30,0	0,235
25	0,5	330	50	35,5	5,0	1,521
26	0,5	270	40	35,5	5,0	1,246
27	0,5	330	50	35,5	10,0	0,846
28	0,5	270	40	35,5	10,0	0,682
29	0,5	330	50	35,5	15,0	0,578
30	0,5	270	40	35,5	15,0	0,464
31	0,5	330	50	35,5	20,0	0,437
32	0,5	270	40	35,5	20,0	0,350
33	0,5	330	50	35,5	25,0	0,351
34	0,5	270	40	35,5	25,0	0,281
35	0,5	330	50	35,5	30,0	0,293
36	0,5	270	40	35,5	30,0	0,235

Таблица 2 – Исходные данные и результаты расчета дополнительных прогибов эмиссионных сферических электродов (450 мм) из углекомполита УУКМ

при  $b = 247$  мм;  $d_o = 4,0$  мм;  $S_o = 5,0$  мм;  $d_o/S_o = 0,8$ ;  $k_r = 0,3$ ;  $E = 2,7 \cdot 10^4$  МПа;

$$\alpha = 0,37 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C, \mu = 0,1$$

Номер электрода	h, мм	T(1) °C	$\Delta T_r$ °C	$\lambda_{3,кр}$	$w_0(0)$ , мм	$\Delta w(0)$ мм
37	0,3	330	50	35,2	5,0	0,1111
38	0,3	330	50	35,2	10,0	0,0562
39	0,3	330	50	35,2	15,0	0,0376
40	0,3	330	50	35,2	20,0	0,0282
41	0,3	330	50	35,2	25,0	0,0226
42	0,3	330	50	35,2	30,0	0,0188
43	0,4	330	50	35,2	5,0	0,1106
44	0,4	330	50	35,2	10,0	0,0561
45	0,4	330	50	35,2	15,0	0,0375
46	0,4	330	50	35,2	20,0	0,0282
47	0,4	330	50	35,2	25,0	0,0226
48	0,4	330	50	35,2	30,0	0,0188

49	0,5	330	50	35,2	5,0	0,1106
50	0,5	330	50	35,2	10,0	0,0561
51	0,5	330	50	35,2	15,0	0,0375
52	0,5	330	50	35,2	20,0	0,0282
53	0,5	330	50	35,2	25,0	0,0226
54	0,5	330	50	35,2	30,0	0,0188

Таблица 3 – Исходные данные и результаты расчета дополнительных прогибов ускоряющих сферических электродов (450 мм) из углекомпозита УУКМ

при  $b = 247$  мм;  $d_0 = 1,3$  мм;  $S_0 = 2,55$  мм;  $d_0/S_0 = 0,51$ ;  $k_r = 0,65$ ;  $E = 2,7 \cdot 10^4$  МПа

$$\alpha = 0,37 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C, \mu = 0,1$$

Номер электрода	h, мм	T(1) °C	$\Delta T_r$ °C	$\lambda_{3,кр}$	$w_0(0)$ , мм	$\Delta w(0)$ мм
55	2,5	272	45	35,2	5,0	0,0718
56	2,5	272	45	35,2	10,0	0,0450
57	2,5	272	45	35,2	15,0	0,0315
58	2,5	272	45	35,2	20,0	0,0240
59	2,5	272	45	35,2	25,0	0,0194
60	2,5	272	45	35,2	30,0	0,0162

Таблица 4 – Исходные данные и результаты расчета дополнительных прогибов эмиссионных сферических электродов (160 мм) из

молибденового сплава ВМ-2

при  $b = 80$  мм;  $d_0 = 2,3$  мм;  $S_0 = 2,9$  мм;  $d_0/S_0 = 0,793$ ;  $k_r = 0,31$ ;

$E_{BM} = 32,5 \cdot 10^4$  МПа;  $\alpha_{BM} = 5,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$ ;  $\mu = 0,3$ ;

$$E_{BM} = 32,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \alpha_{BM} = 5,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C, \mu = 0,3$$

Номер электрода	h, мм	T(1) °C	$\Delta T_r$ °C	$\lambda_{3,кр}$	$w_0(0)$ , мм	$\Delta w(0)$ мм
61	0,3	330	40	35,20	5,00	0,14560
62	0,3	330	40	35,20	7,50	0,09813
63	0,3	330	40	35,20	9,50	0,07773
64	0,3	330	40	35,20	12,50	0,05920
65	0,3	330	40	35,20	15,00	0,04940
66	0,5	330	40	35,20	5,00	0,14430
67	0,5	330	40	35,20	7,50	0,09770
68	0,5	330	40	35,20	9,50	0,07750

69	0,5	330	40	35,20	12,50	0,05910
70	0,5	330	40	35,20	15,00	0,04933

Таблица 5 – Исходные данные и результаты расчета дополнительных прогибов эмиссионных сферических электродов (160 мм) из сплава титана с ниобием (марки ТВ-36)

при  $b = 80$  мм;  $d_0 = 2,3$  мм;  $S_0 = 2,9$  мм;  $d_0/S_0 = 0,793$ ;  $k_r = 0,31$ ;

$$E_{TB} = 9,8 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \alpha_{TB} = 0,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}, \mu_{TB} = 0,32$$

Номер электрода	h, мм	T(1) °C	$\Delta T_r$ °C	$\lambda_{3,кр}$	$w_0(0)$ , мм	$\Delta w(0)$ мм
71	0,3	330	40	35,20	5,00	0,01272
72	0,3	330	40	35,20	7,50	0,00851
73	0,3	330	40	35,20	9,50	0,00673
74	0,3	330	40	35,20	12,50	0,00512
75	0,3	330	40	35,20	15,00	0,00426
76	0,5	330	40	35,20	5,00	0,01260
77	0,5	330	40	35,20	7,50	0,00847
78	0,5	330	40	35,20	9,50	0,00671
79	0,5	330	40	35,20	12,50	0,00511
80	0,5	330	40	35,20	15,00	0,00426

Таблица 6 – Исходные данные и результаты расчета дополнительных прогибов эмиссионных сферических электродов (160 мм) из углекомпозиата УУКМ

при  $b = 80$  мм;  $d_0 = 2,3$  мм;  $S_0 = 2,9$  мм;  $d_0/S_0 = 0,793$ ;  $k_r = 0,31$ ;  $E = 2,7 \cdot 10^4$  МПа;

$$\alpha = 0,37 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}, \mu = 0,1$$

Номер электрода	h, мм	T(1) °C	$\Delta T_r$ °C	$\lambda_{3,кр}$	$w_0(0)$ , мм	$\Delta w(0)$ мм
81	0,3	330	40	35,2	5,00	0,009411
82	0,3	330	40	35,2	7,50	0,006297
83	0,3	330	40	35,2	9,50	0,004977
84	0,3	330	40	35,2	12,50	0,003786
85	0,3	330	40	35,2	15,00	0,003156
86	0,5	330	40	35,2	5,00	0,025870
87	0,5	330	40	35,2	7,50	0,017400
88	0,5	330	40	35,2	9,50	0,013780
89	0,5	330	40	35,2	12,50	0,010500

90	0,5	330	40	35,2	15,00	0,008750
----	-----	-----	----	------	-------	----------

Таблица 7 – Исходные данные и результаты расчета дополнительных прогибов ускоряющих сферических электродов (160 мм) из сплава молибдена ВМ-2

при  $b = 80$  мм;  $d_o = 1,6$  мм;  $S_o = 2,9$  мм;  $d_o/S_o = 0,55$ ;  $k_r = 0,60$ ;

$$E_{BM} = 32,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \alpha_{BM} = 5,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}, \mu_{BM} = 0,30$$

Номер электрода	h, мм	T(1) °C	$\Delta T_r$ °C	$\lambda_{3,кр}$	$w_o(0)$ , мм	$\Delta w(0)$ мм
91	2,0	300	40	37,0	5,00	0,11780
92	2,0	300	40	37,0	7,50	0,08860
93	2,0	300	40	37,0	9,50	0,07278
94	2,0	300	40	37,0	12,50	0,05696
95	2,0	300	40	37,0	15,00	0,04806

Представленные результаты подтвердили эффективность предложенной методики для проведения упрощенных расчетов дополнительного прогиба сферических элементов электродов. Это позволит производить математически обоснованное прогнозирование изменения межэлектродных зазоров в ИОС.

Полученные результаты расчета дополнительных прогибов электродов из молибдена и сплава на основе титана и ниобия, подтвердили возможность изготовления ионно-оптических систем с использованием этих сплавов в качестве материала для эмиссионных электродов, которые отвечают требованию к толщине стенки оболочки от 0,3 мм до 0,5 мм. Основные факторы влияющие на такие электроды:

- температурные поля, изменяющиеся в радиальном направлении с перепадом температур в десятки градусов между центром электродов и внешним контуром;

- начальные технологические прогибы электродов в центральной точке сферического сегмента  $w_o(0)$ ;
  - коэффициенты температурного линейного расширения материала;
  - коэффициенты конструктивной ортотропии электродов  $k_r$  и  $k_\varphi$ ,
- зависящие от соотношения диаметров отверстий перфорации и расстояния между ними.

Для обеспечения минимального изменения зазоров между электродами ИОС в составе работающего ионного двигателя возникла необходимость минимизации допусков. В проекте по созданию высокочастотных ионных двигателей с диаметром ионизатора 160 и 450 мм рассмотрен допуск на межэлектродный зазор не более 0,2-0,4мм.

Отдельно рассмотрен вопрос использования как в эмиссионных, так и в ускоряющих электродах углерод-углеродного композитного материала, обозначаемого как УУКМ. В таблицах приведены расчетные значения дополнительных прогибов  $\Delta w(0)$  эмиссионных электродов и утолщенных до 2,5 мм ускоряющих электродов. Малые значения этих прогибов объясняются прежде всего малой величиной коэффициента температурного линейного расширения у данного материала.

Решение о форме и ресурсе ИОС, применяемых в них материалах, технологии изготовления и эксплуатации необходимо делать на основе учета всего комплекса проблем по созданию ВЧИД.

## Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать вывод об эффективности и простоте одновременного использования термомеханической модели электродов ИОС и новой упрощенной аналитической методики для расчета дополнительных прогибов профилируемых электродов.

Были численно определены дополнительные прогибы электродов, выполненных из разных материалов и имеющих различный начальный прогиб при тепловом нагружении с радиальным градиентом температуры 5 град/см.

Получены следующие результаты:

1. Для ЭЭ толщиной  $h = 0,3 \dots 0,5$  мм из **молибденового сплава ВМ-2** при начальном прогибе 5...15 мм ожидаемый дополнительный прогиб составляет 0,15...0,05 мм при  $h = 0,3$  мм и 0,4...0,14 мм при  $h = 0,5$  мм. На основании этого рекомендованные параметры молибденового ЭЭ при рабочем межэлектродном зазоре – 0,8 мм: толщина – 0,3 мм, начальный прогиб – 15 мм.

2. Для ЭЭ из **титан-ниобиевого сплава инварного класса ТВ-36** при начальном прогибе 5...15 мм ожидаемый дополнительный прогиб составляет 0,013...0,005 мм при  $h = 0,3$  мм и 0,035...0,012 мм при  $h = 0,5$  мм. На основании этого рекомендованные параметры молибденового ЭЭ при рабочем межэлектродном зазоре – 0,8 мм: толщина – 0,3 мм, начальный прогиб – 5 мм.

3. Для ЭЭ из **углеродного композита УУКМ** при начальном прогибе 5...15 мм ожидаемый дополнительный прогиб составляет 0,009...0,004 мм при  $h = 0,3$  мм и 0,026...0,009 мм при  $h = 0,5$  мм. На основании этого рекомендованные

параметры ЭЭ из УУКМ при рабочем межэлектродном зазоре – 0,8 мм: толщина – 0,3...0,5 мм, начальный прогиб – 5 мм.

4. Для УЭ из **молибденового сплава ВМ-2** толщиной 2 мм при начальном прогибе 5...15 мм ожидаемый дополнительный прогиб составляет 0,119...0,057 мм при  $h = 0,3$  мм и 0,035...0,012 мм при  $h = 0,5$  мм. На основании этого рекомендованные параметры УЭ из титанового сплава ВМ-2: толщина – 2,0 мм, начальный прогиб – 5 мм.

5. Для УЭ из углеродного композита УУКМ толщиной 2 мм при начальном прогибе 5...15 мм ожидаемый дополнительный прогиб составляет 0,007...0,003 мм. На основании этого рекомендованные параметры УЭ из УУКМ: толщина – 2,0 мм, начальный прогиб – 5 мм.

Разработанная ранее термомеханическая модель узла ИОС была применена для расчета отличающихся по диаметру и толщине электродов, изготовленных из разных конструкционных материалов.

### **Благодарность**

Работа выполнена при поддержке Гранта Правительства Российской Федерации № 11.G34.31.0022 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования; при государственной поддержке комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств, выполняемых с участием высших учебных



заведений по Договору № 02.G25.31.0072; при поддержке Гранта Президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ РФ НШ-895.2014.8.

### **Библиографический список**

1. Mogulkin A., Fedorov V., Obukhov V. Investigation of Temperature Deformation of the IES Electrodes Based on the Continuum Thermo-Mechanical Calculation Model // 5th RGCEP, 2014.

2. Федоров В.А., Обухов В.А., Могулкин А.И. Термомеханическая расчетная модель узла ионно-оптической системы // Авиация и космонавтика, 2013, с.407-409.

3. Гуров А.Ф., Федоров В.А. Исследование устойчивости и изгиба электродов ионно-оптических систем // Труды третьей межвузовской конференции по исследованию и проектированию ЭРДУ средней мощности. – Харьков, ХАИ, 1975.

4. Биргер И.А. Круглые пластинки и оболочки вращения. – М.: Оборонгиз, 1961. – 368

5. Григолюк Э.И., Фильштинский Л.А. Перфорированные пластины и оболочки. – М.: Наука, 1970. – 556 с.

6. Федоров В.А. Исследование температурного выпучивания и изгиба густо перфорированных пластин круговой формы с учетом геометрической нелинейности // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев, Будівельник, 1980, Вып. 36, С. 24-27.

7. Биргер И.А. Некоторые математические методы решения инженерных задач. – М.: Оборонгиз, 1956. – 150 с.

8. Федоров В.А. Термоустойчивость упруго заземленных кольцевых пластин переменной жесткости // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 1976, № 4. – С. 127-132.