

УДК 533.9, 536.37, 621.455.4

Тепловая модель связки двигателей электроракетной двигательной установки

Балашов В.В.*, Могулкин А.И., Хартов С.А., Шлыгин А.В.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: riame@sokol.ru*

Аннотация

Представлены результаты теплового расчета двигательного модуля, выполненного в виде связки высокочастотных ионных двигателей повышенной мощности (35 кВт), расположенных вокруг приборного отсека. Расчеты выполнены с использованием программного пакета ANSYS.

Ключевые слова: высокочастотный ионный двигатель, двигательный модуль, тепловой расчет, поле температур.

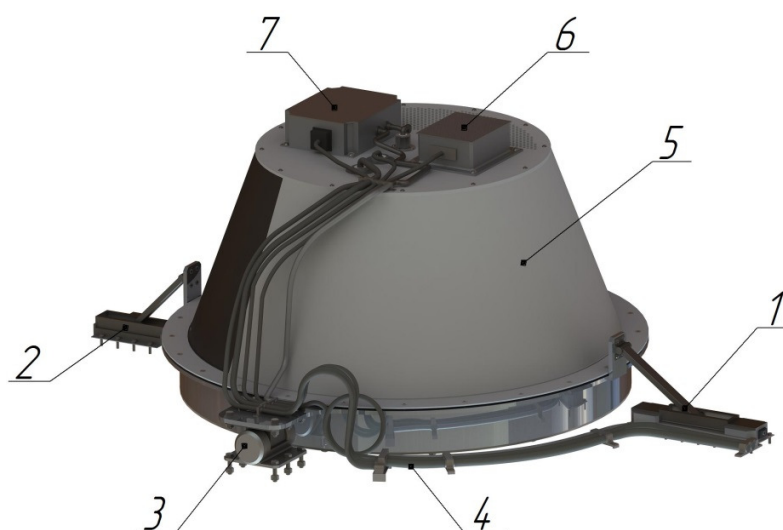
Введение

Расширение применения электроракетных двигателей (ЭРД) для решения задач исследования дальнего и ближнего космоса и для выведения космических аппаратов (КА) повышенной массы на геостационарные орбиты потребовало разработки ионных двигателей повышенной мощности (до 35 кВт) [1]. Рассматриваемый вариант

компоновки электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) КА, состоит из нескольких двигательных блоков, размещенных вокруг приборного отсека. ЭРДУ представляет собой сложную многоуровневую конструкцию, включающую в себя восемь высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) мощностью 35 кВт, катоды-нейтрализаторы, системы электропитания, блоки газораспределения, элементы крепления и поворотные механизмы. Поскольку ранее ВЧИД такой мощности не разрабатывались, представляет интерес проведение оценки теплового состояния элементов двигателя. Для поддержания определенного теплового режима бортовой аппаратуры необходимо корректировать радиационные тепловые потоки от двигателей на элементы, расположенные в приборном отсеке. В работе представлены результаты расчета температурных полей в элементах ВЧИД и ЭРДУ на их базе для стационарного случая.

1. Конструктивная схема двигательного блока и двигательного модуля

Двигательный модуль (ДМ) ЭРДУ состоит из восьми двигательных блоков (ДБ) на основе мощного ВЧИД [2] (рисунок 1). Двигательные блоки устанавливаются на поворотных устройствах, оснащенных электромеханическими приводами для управления вектором тяги ДБ. Поворотные механизмы блока позволяют производить отклонение двигателя в двух плоскостях.

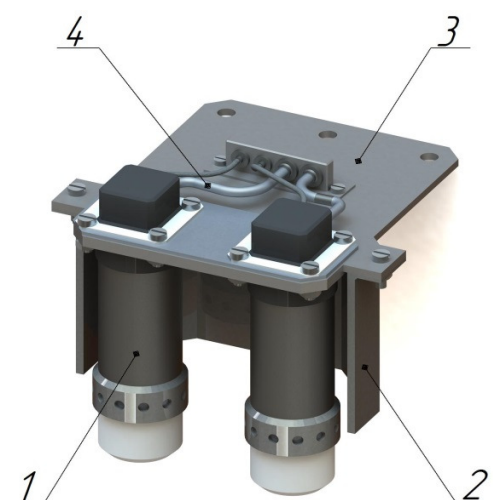


1,2 – механизмы поворота двигателя; 3 – опорные шарниры;
4 – кабели и трубопроводы; 5 – кожух двигателя; 6 – выходной каскад
высокочастотного генератора (ВЧГ); 7 - блок газораспределителя.

Рисунок 1– Двигательный блок

Двигатель зафиксирован на четырёх точках по диаметру– на двух шарнирах и двух приводах. Непосредственно на крышке кожуха двигателя установлен выходной каскад высокочастотного генератора (ВЧГ) и блок газораспределителя с ресивером и клапанами низкого давления.

В ДМ для нейтрализации ионной струи применяются блоки катодов-нейтрализаторов (КН) по 2 катода в каждом (рисунок 2).



1 – катод-нейтрализатор; 2 – отражающий экран;

3 – силовые элементы конструкции; 4 – кабели и трубопроводы

Рисунок 2 – Блок катодов-нейтрализаторов

Схема компоновки ДМ приведена на рисунке 3. ДМ содержит восемь ВЧИД и восемь блоков КН. Оборудование, необходимое для функционирования ЭРДУ и обеспечивающее подачу и контроль потребления электроэнергии от бортовой системы электроснабжения и подачу рабочего тела в двигатель, размещено в приборном отсеке, выполненном по концентричной схеме в виде восьми секций на двух уровнях. В каждой секции расположен один полный набор оборудования для функционирования одного двигательного блока и блока катодов-нейтрализаторов.



Рисунок 3 – Двигательный модуль

2.Тепловая модель двигательного блока ВЧИД

При проведении расчетов рассматривался стационарный случай. Тепловой расчет выполнен для конструкции ВЧИД с двухсеточной ионно-оптической системой (ИОС) и замедляющим электродом, выполненным в виде кольца. Расчет проводился с целью определения, порядка величин температур основных узлов двигательного блока.

Экспертные оценки показывают, что тепловыми потоками, возникающими в результате поглощения части мощности высокочастотного электромагнитного поля в материале стенок газоразрядной камеры (ГРК) из-за диэлектрических потерь и рекомбинационным излучением из плазмы можно пренебречь. При этих условиях

тепловые потоки на стенки ГРК, эмиссионный (ЭЭ) и ускоряющий электроды (УЭ) оцениваются следующим образом.

Тепловой поток, выносимый ионной и электронной компонентами плазмы на поверхности элементов ДБ можно представить, без учёта нейтральной компоненты плазмы, в виде [3]:

$$W_s = W_e + W_i = j_{ib} (2T_e + \Delta U + \varphi_i) \quad (1) \text{ где: } W_{ei} = j_{ib} 2T_e -$$

тепловой поток приносимый электронами;

$W_i = j_{ib} (\Delta U + \varphi_i)$ – тепловой поток от ионов;

j_{ib} – плотность ионного тока на стенки ГРК;

T_e – электронная температура в плазме, выраженная в вольтах;

ΔU – пристеночное падение потенциала плазмы;

$\varphi_i = 12\text{В}$ – потенциал ионизации атомов ионов Хе, выделяющийся при электрон-ионной рекомбинации;

Потенциал ΔU определяется из равенства электронного и ионного тока на стенку ГРК, в приближении максвелловского распределения по скоростям электронов в плазме с учетом использования ксенона в качестве рабочего тела, получаем, что $\Delta U = 7T_e$. Подставляя все численные значения в (1), при значении $T_e = 5\text{эВ}$ получаем, что:

$$W_s = 57 j_{ib}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (2)$$

В отличие от условия равенства электронного и ионного тока на стенки ГРК, тепловой баланс ЭЭ определяется потоком электронов на него, который с учетом тока ионов через отверстия в ИОС I_{Π} , составляет [3] $I_e = I_{ib} + I_{\Pi}$. Это приводит к меньшему падению потенциала плазмы у поверхности ЭЭ, по сравнению со стенками ГРК. Оценки показывают, что $\Delta U = 5,75T_e$. С учетом этого плотность теплового потока на поверхность ЭЭ равна:

$$W_{ЭЭ} = 50,25 j_{ib}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (3)$$

Плотность ионного тока j_{ib} на поверхность ЭЭ, определяется по величине расчетного значения ионного тока пучка I_{Π} , выпадающего на поверхность плазмы на входе в отверстия ИОС, так называемого «плазменного мениска» с учетом его кривизны [3]:

$$j_{ib} = \frac{I_{\Pi}}{\sigma_{FЭЭ} S_0 \beta_F}, \quad (4)$$

где S_0 – площадь сечения, в котором расположено отверстие в ЭЭ;

$\sigma_{FЭЭ}$ – прозрачность ЭЭ;

β_F – коэффициент, учитывающий превышение площади собирающей поверхности плазменного мениска по сравнению с площадью отверстия в ЭЭ.

Опираясь на данные по ионному току для отработанного ВЧИД типа RIT-22 [4], из (3) получаем, что при прозрачности $\sigma_{FЭЭ} = 0,57$ и значении $\beta_F = 1,65$ плотность ионного

тока: $j_{ib} = 70 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$. Итак, можно получить тепловые потоки для ЭЭ и стенок

$$\text{ГРК: } W_s = 4000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; W_{\text{ЭЭ}} = 3500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Поток ионов на поверхность УЭ ИОС возникает за счет ускорения медленных ионов, образовавшихся в результате резонансной перезарядки ионов пучка на нейтральных атомах, истекающих из ГРК в зону нейтрализации пучка в сторону отрицательно заряженного УЭ. Максимальная энергия ионов перезарядки, выпадающих на УЭ, определяется его потенциалом, в рассматриваемом случае $\Delta U = 250\text{В}$ [5]. Величина тока перезаряженных ионов оценивается разными авторами примерно в 1% от основного ионного потока, т.е. $I_{\text{пер}} \cong 0,01 I_{\text{п}}$. Тогда получаем оценку мощности, приносимой на УЭ: $W_{\text{УЭ}} = I_{\text{пер}} \Delta U \approx 18,75\text{Вт}$.

Прозрачность УЭ ниже, чем ЭЭ ($\sigma_{\text{УЭ}} \approx 0,4$), поэтому плотность потока мощности на него можно оценить как: $W_{\text{УЭ}} = 200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

Бомбардировка ионами перезарядки УЭ вызывает эрозию его материала в результате катодного распыления. При энергии ионов 250 эВ, коэффициент распыления материала УЭ – графита – примерно равен $S_{\text{Хе}} \rightarrow \text{с}(E_0 = 250\text{В}) = 0,03$ атом/ион [6]. С учетом этого распыленные атомы графита уносят незначительную долю энергии. Средняя энергия распыленных атомов по общепринятой теории катодного распыления Зигмунда имеет значение порядка: $E_{\text{спит}} = 0,5 \epsilon_{\text{св}}$, где энергия связи поверхностных атомов графита $\epsilon_{\text{св}} \approx 6-8$ эВ. Часть падающей мощности ионного потока

тратится на радиационные нарушения в поверхностных слоях, излучение, но основная часть переходит в тепло. Приемлемой оценкой коэффициента тепловой аккомодации энергии ионов Xe^+ при их бомбардировке графитовой поверхности УЭ является значение $\alpha_{\text{Xe} \rightarrow \text{C}} = 0,9$. С учетом этого значения окончательная оценка плотности теплового потока со стороны перезаряженных ионов Xe^+ на поверхность графита

$$\text{УЭ } W_{\text{УЭ}} = 180 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Достаточно мощное выделение тепла происходит на стенках высокочастотного медного индуктора из-за его омического сопротивления $W = I^2 R$. Для простоты расчёта, можно учитывать, только, тепловые потоки, выделяющиеся в поверхностном слое проводника («скин-слое»), толщина которого рассчитывается по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{2\pi\omega_0\sigma}} \cong 0,1\text{мм}^2, \quad (5)$$

где ω_0 – частота переменного тока в индукторе, равная 750 Гц;

σ – величина магнитной проницаемости.

С учётом того, что удельное сопротивление меди $\rho = 1,7 * 10^{-8} \text{ Ом * м}$, можно

получить при токе индуктора $I = 3\text{А}$: $W_{\text{индуктора}} = 4500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Эксплуатация ЭРДУ происходит в вакууме, поэтому тепло между элементами двигательного модуля передаётся и сбрасывается в окружающую среду, при отсутствии контакта преимущественно за счёт излучения. Так как излучение считается по следующей формуле:

$$Q = S\varepsilon\sigma T^4, \quad (6)$$

где S – площадь излучаемой поверхности;

ε – степень ее черноты;

σ – постоянная Стефана-Больцмана.

В расчёте учитывается температура окружающей среды $t \cong 0C^0$.

В построении тепловой модели двигательного модуля используется упрощённая геометрическая модель (рисунок 4). Для уменьшения времени выполнения расчёта и увеличения качества построения сетки конечно-разностных элементов, используемой в расчёте температурного поля, был удалён ряд геометрических элементов, оказывающих очень малое влияние на температурное поле двигательного блока.

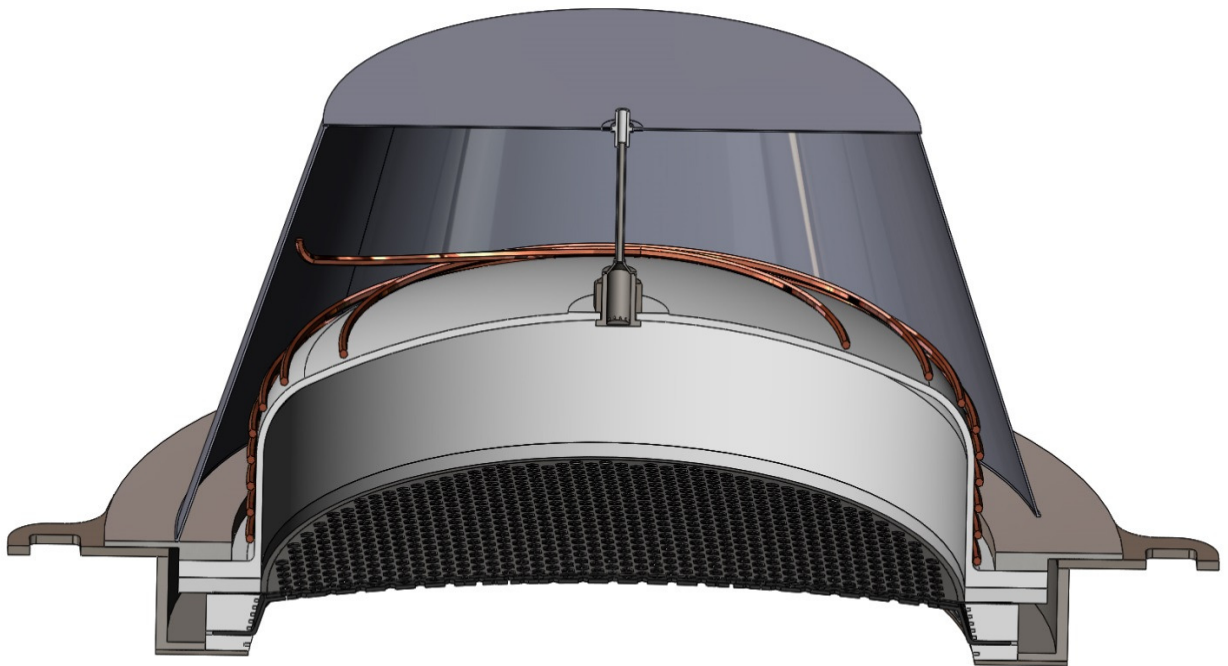


Рисунок 4 – Упрощенная геометрии ДБ

Перфорация электродов была сделана с меньшей частотой и с увеличением размеров отверстий для сохранения геометрической прозрачности равной 59,5% для эмиссионного и 46,5% для ускоряющего электрода соответственно. Форма отверстий была изменена с круглой на восьмигранную. Была упрощена геометрия канала патрубков газов вода. Форма сечения индуктора была изменена с круглой на восьмигранную с удалением внутренней полости. Из расчётной схемы были удалены узлы крепления индуктора, токоподводы и изоляторы экранирующего кожуха.

Для построения конечно-элементной модели и выполнения расчётов использован программный комплекс Workbench. Построение расчетной сетки было выполнено с использованием метода дискретных элементов (panel method), часто применяемого в технических задачах. Точность метода определяется числом и формой элементов деления N , что лимитируется мощностью применяемых вычислительных ресурсов. Немаловажную роль на качество получаемого результата оказывают форма элементов и их расположение относительно друг друга. Поэтому элементы сетки по возможности строились ровными, кубической формы и симметрично расположенными относительно друг друга. Так как в исследуемой геометрии присутствует большое количество тел круглой формы, то сетка была построена с помощью функции «sweep method», поделив тела на несколько частей условным разрезом. Для корректировки количества элементов на различных рёбрах, использовалась функция «number of division». Для создания многослойных сеток на тонкостенных элементах применялся метод «inflation».

Для каждого элемента решается обычное уравнение теплового баланса с учетом приходящей тепловой мощности из плазмы газового разряда, лучистого и теплопроводного теплового обмена между всеми элементами разбиения рабочих поверхностей. Объем счета примерно пропорционален N^2 .

Некоторые элементы конструкции даже после упрощения имеют сложную геометрию, к которой неприменимы специальные методы построения сеток. Поэтому для них была сгенерирована обычная тетраэдрическая сетка. Так как данный расчёт является оценочным, в данном исследовании не используются дополнительные возможности для увеличения детализации сетки.

2. Результаты расчёта теплового состояния ДБ

Рассчитанные температурные поля ДБ приведены на рисунке 5. Распределение имеет, как и ожидалось, примерную цилиндрическую симметрию. Максимальные температуры порядка 305°C достигаются на верхней части ГРК и в центральном пятне эмиссионного электрода - около 290°C .

Одна из самых важных проблем, которую необходимо учитывать при проектировании двигательного блока на базе ВЧИД, это перегрев элементов приборного отсека от излучения испускаемого двигателем. Для решения этой проблемы, две секции кожуха, находящиеся в непосредственной близости от приборного отсека ДМ были выполнены из материала с высоким коэффициентом отражения и низким коэффициентом поглощения (рисунки 6 и 7).

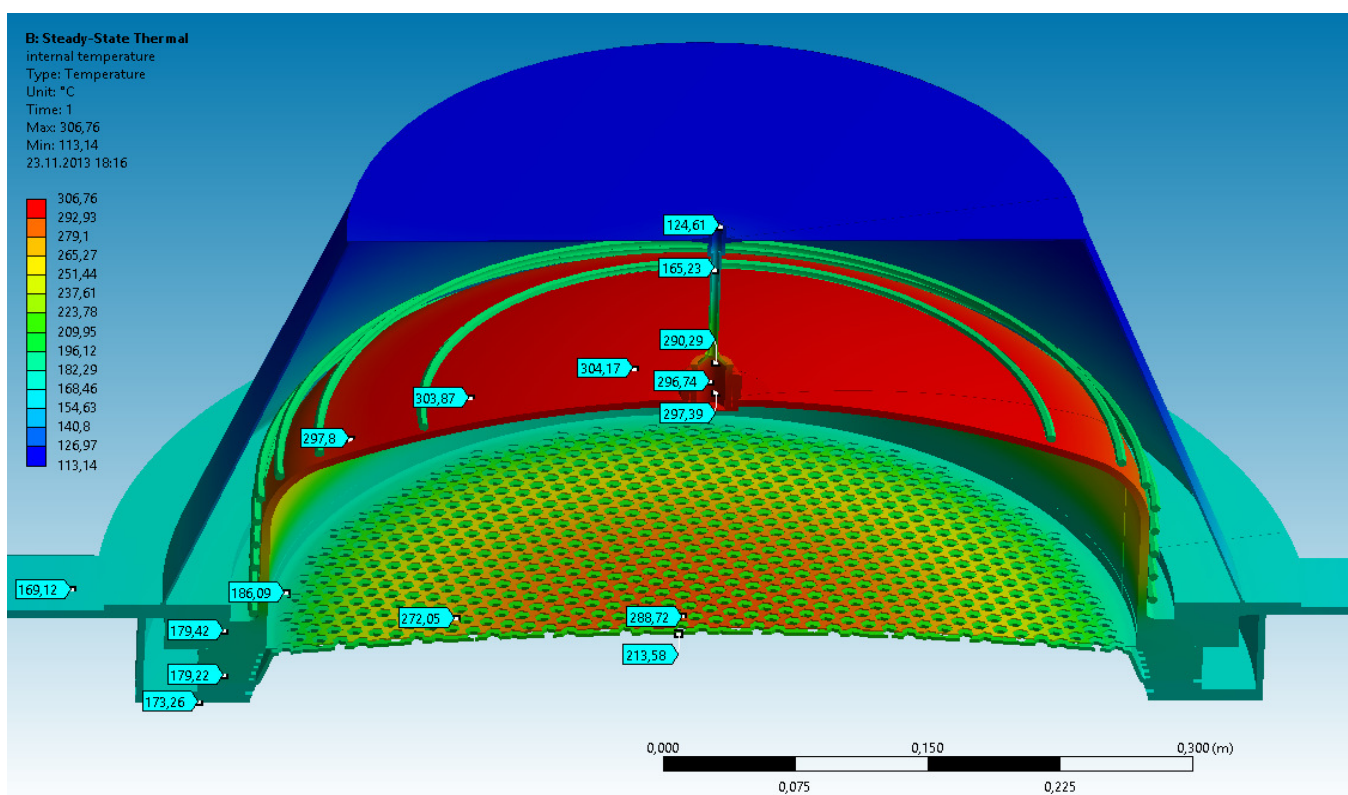


Рисунок5 – Общие температурные поля двигательного блока

Один из важнейших факторов, которые необходимо учитывать при проектировании двигательного блока на базе ВЧИД - перегрев элементов приборного отсека от теплового излучения двигателя. Для решения этой проблемы две секции кожуха двигателя, находящиеся в непосредственной близости от приборного отсека ДМ, были выполнены с покрытием, имеющим высокий коэффициент отражения и низкий коэффициент поглощения (рисунки б и 7).

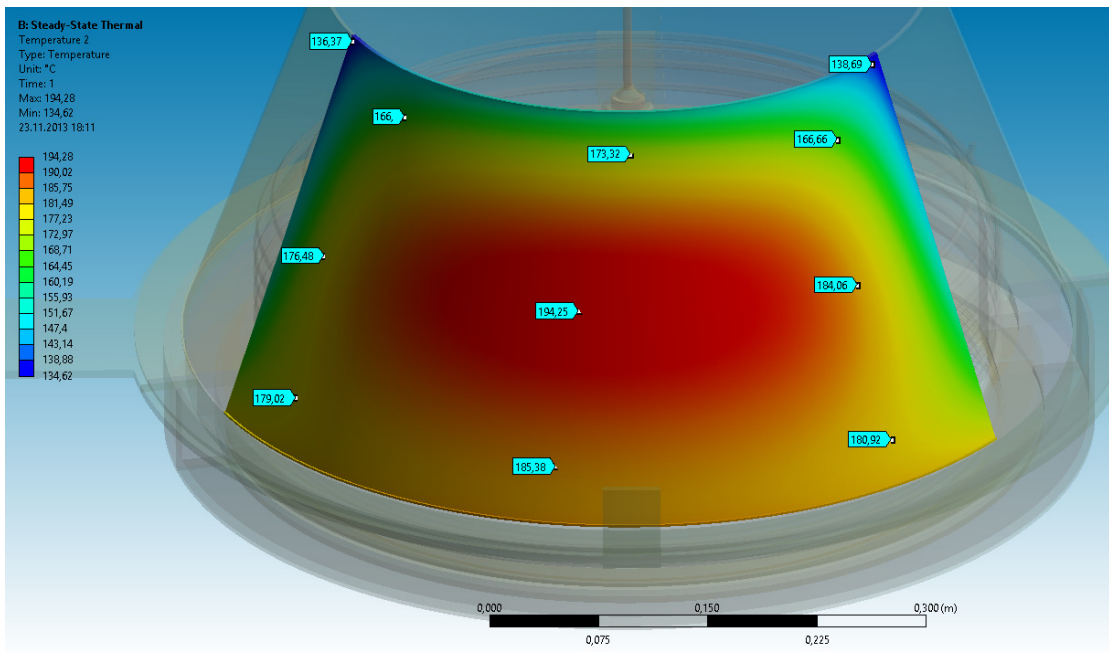


Рисунок 6 – Температурное поле секции кожуха без специального покрытия

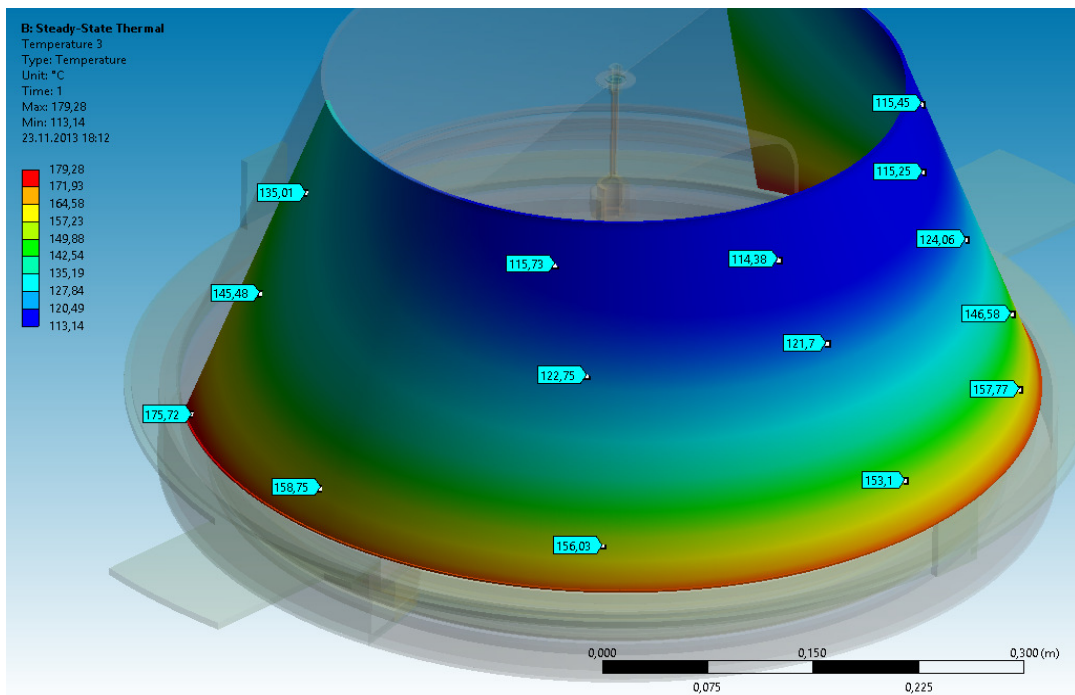


Рисунок 7– Температурное поле стенки с пониженным коэффициентом поглощения и повышенным коэффициентом отражения

Проведенные расчеты показывали, что такое конструкторское решение позволяет снизить на 80°C температуру стенки двигателя, а также понизить температуру крышки корпусного фланца, что значительно снижает риск перегрева оборудования связки ДБ.

Крышка экранирующего кожуха (рисунок 8) нагревается в основном от излучения ГРК и от контакта с экранами двигателя, поэтому одна половина крышки нагрета со средней температурой 140°C , а вторая - с меньшей температурой, равной 115°C . Так как вторая половина крышки имеет наиболее низкую температуру, она предпочтительна для установки на неё каскада высокочастотного генератора и блока низкого давления подачи рабочего тела.

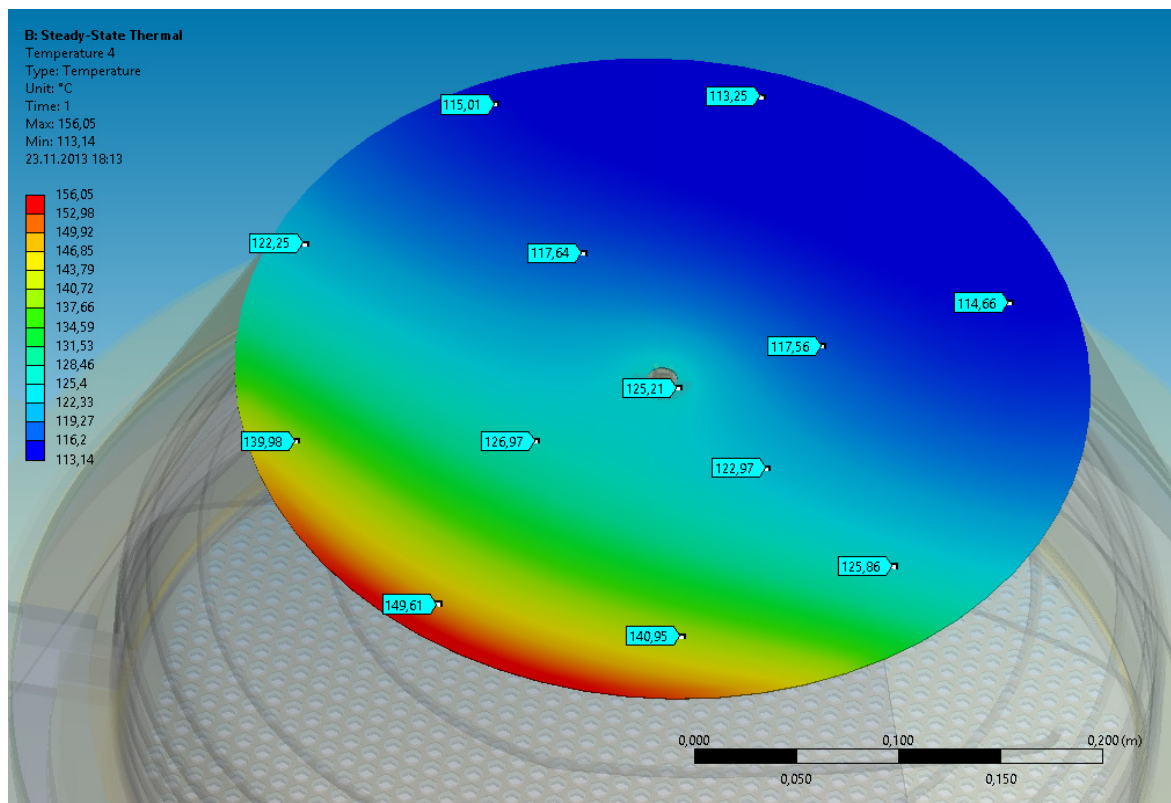


Рисунок8- Температурное поле крышки кожуха

Рассчитанные температурные поля электродов ИОС изображены на рисунках 9 и 10. Максимальные температуры имеет эмиссионный электрод порядка 285°C , которые достигаются в его центре и снижаются к периферии до 185°C . Наименее нагреты (до $\approx 170^{\circ}\text{C}$) силовые элементы и промежуточные изоляторы ИОС. Температура УЭ в центре равна 215°C и понижается до 175°C по краям. В расчете важно было определить изменение температуры электродов по радиусу, поскольку деформация ЭЭ и УЭ за счет теплового расширения приводит к изменению межэлектродного зазора, изменение которого может привести к ухудшению эффективности ИОС или к электрическому пробую.

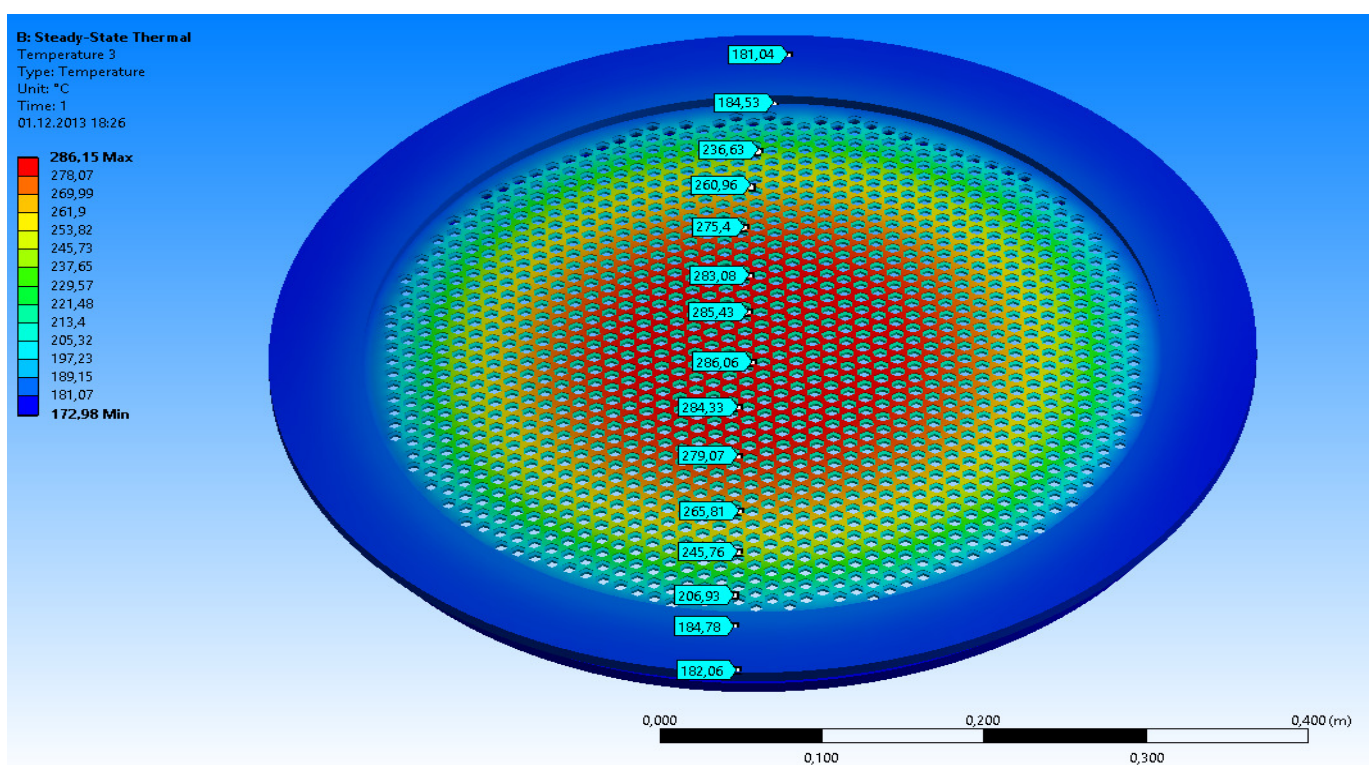


Рисунок 9 – Температурное поле ИОС, вид со стороны эмиссионного электрода

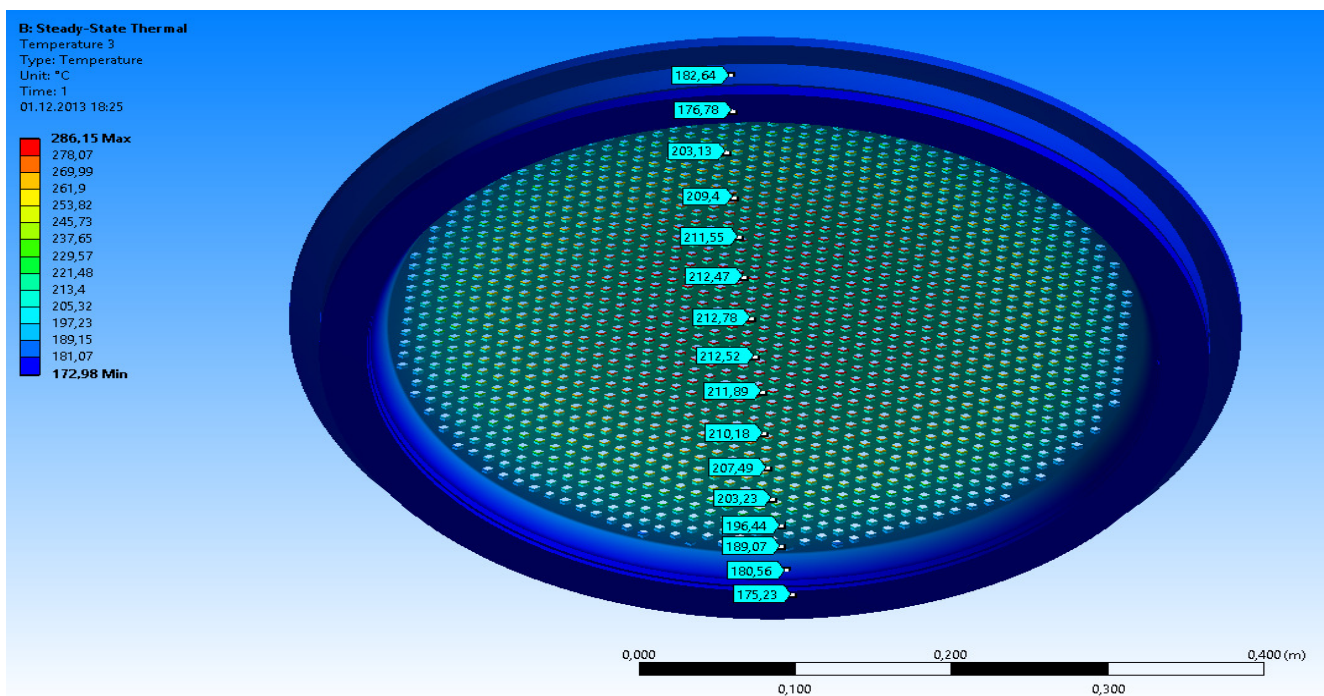


Рисунок 10 – Температурное поле ИОС, вид со стороны ускоряющего электрода

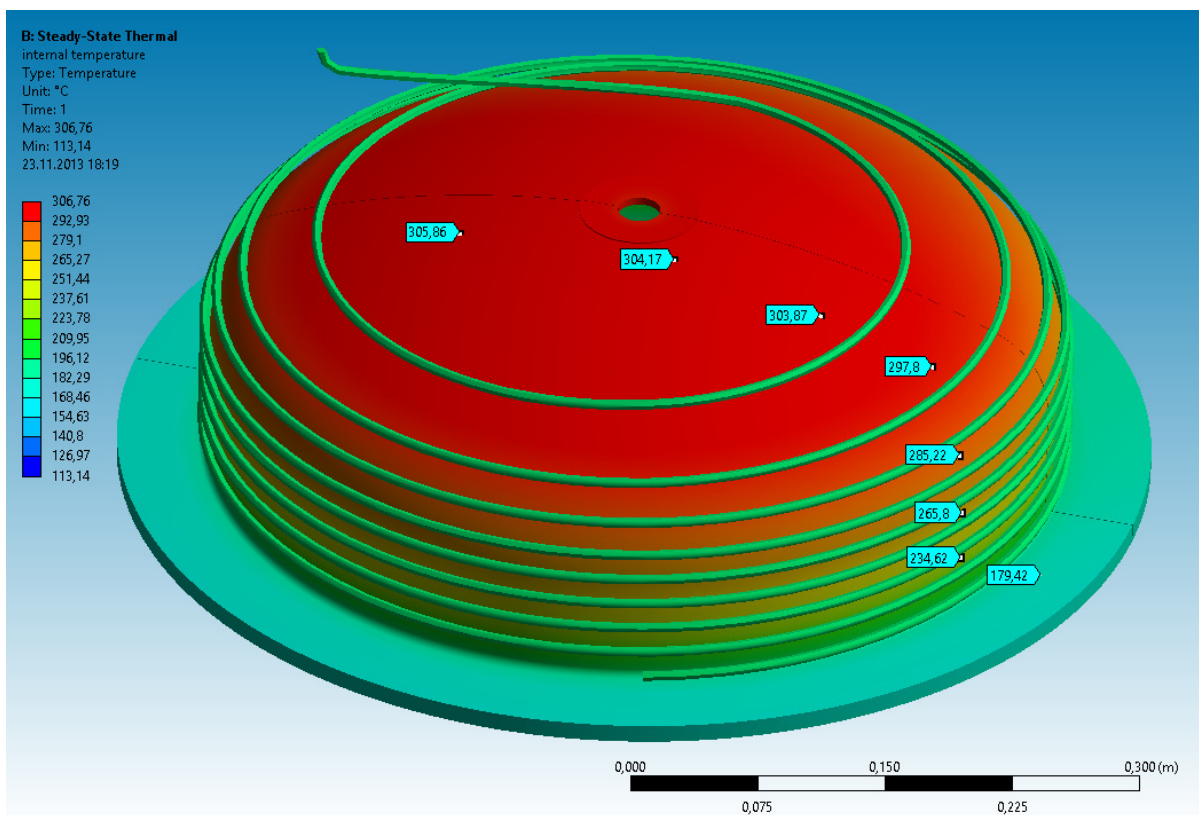


Рисунок 11 – Температурное поле ГРК

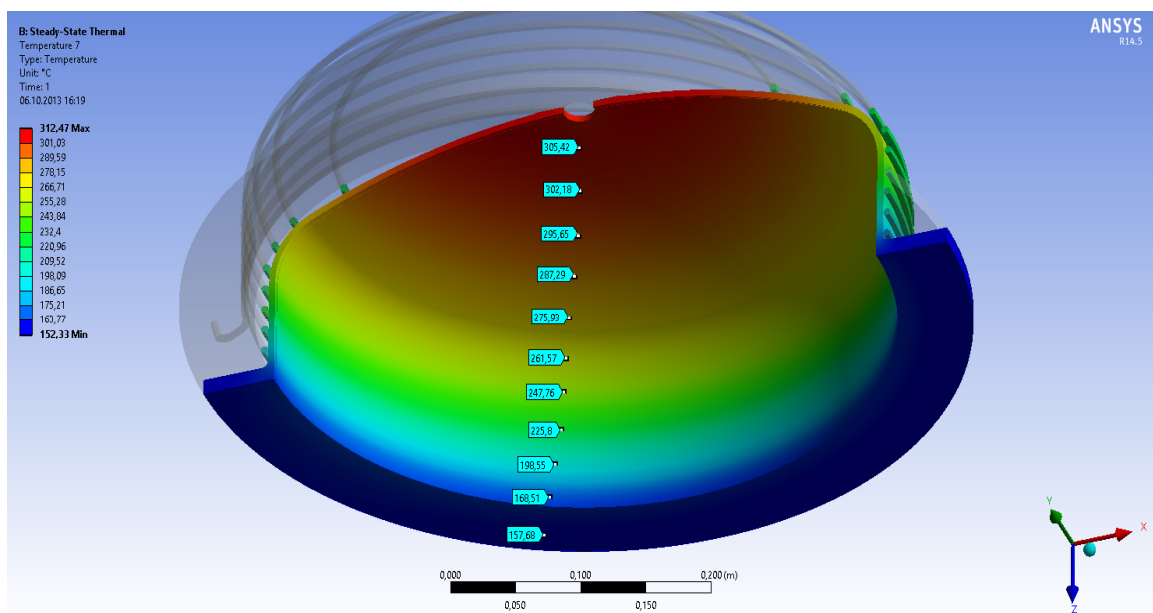


Рисунок 12 – Температурное поле ГРК в разрезе

Разрядная камера (рисунок 11и 12) имеет самую высокую температуру в двигателе. Из-за большой площади излучения с поверхности ГРК ощутимо нагреваются экранирующий кожух, крышка и индуктор. На рис 6.23 и 6.24 показано, что самая высокая температура ГРК получается на месте установки газов вода(305⁰С), а самая низкая (158⁰С)- со стороны установки ИОС. Температура витков индуктора составляет 200-220⁰С.

3. Тепловая модель двигательного модуля

В данном разделе представлены результаты расчёта термомеханической модели ДМ. Этот расчёт является оценочным и имеет целью получения характера распределения температур в элементах конструкции ДМ. Для снижения времени расчёта и повышения качества построения сетки конечно-разностных элементов

геометрия ДМ была значительно упрощена (рисунок 13). Было удалено большое количество геометрических элементов конструкции, оказывающих пренебрежимо малое влияние на конечный результат; удалены все кабели и трубопроводы; значительно упрощена конструкция катода-нейтрализатора с сохранением только основных излучающих элементов; использовались данные по тепловому состоянию ДБ, полученные в предыдущем расчёте. Данные упрощения позволили в 2 раза сократить количество рассчитываемых элементов, в 8 раз количество необходимых конечно-разностных элементов и значительно сократить время расчёта.

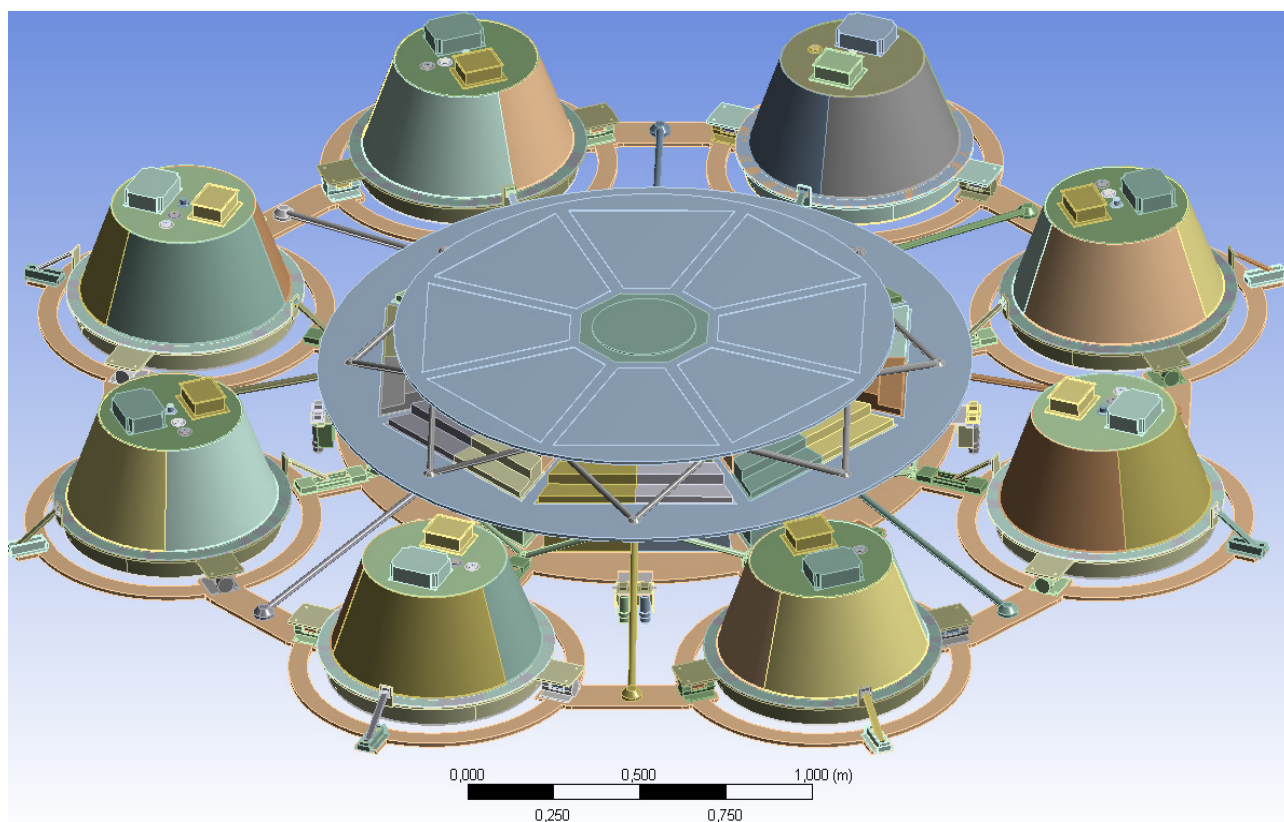


Рисунок 13– Общий вид расчётной геометрии

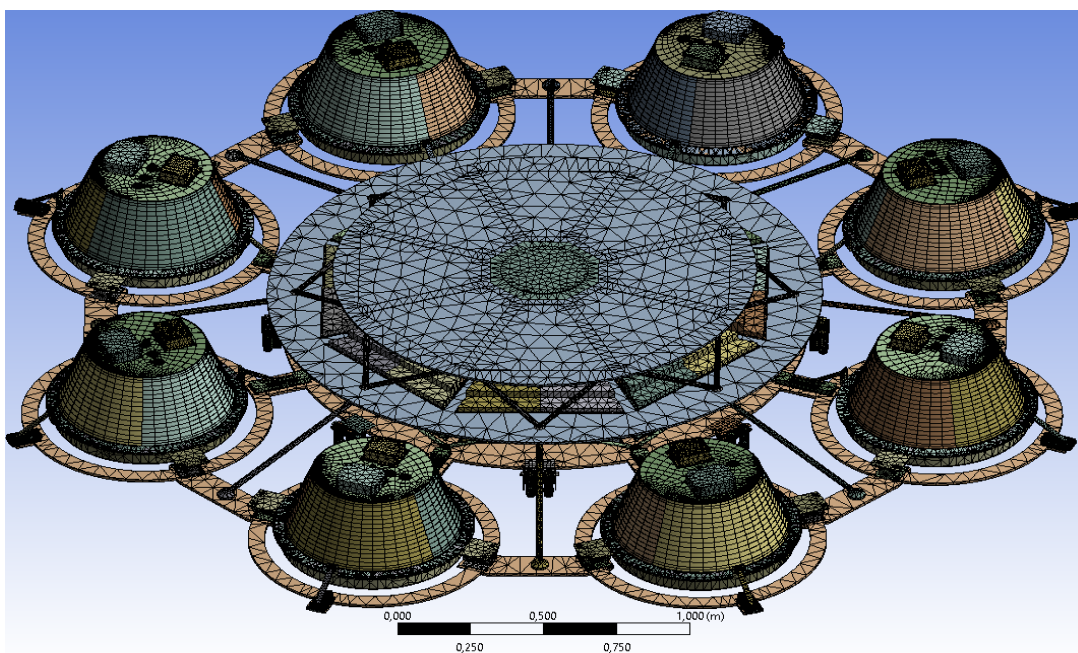


Рисунок 14–Общий вид сгенерированной сетки ДМ

Также как и для ДБ, для ДМ было проведено разбиение геометрии на большое количество дискретных элементов (рисунок 14) и решено уравнение теплового баланса для каждого элемента. Элементы сетки по возможности создавались равными по объёму и симметричными в пределах одного геометрического элемента. Из-за сложности данной конструкции элементы сетки преимущественно имеют тетраэдрическую форму.

4. Результаты теплового расчёта двигательного модуля

Целью расчета является получение температурного поля в приборном отсеке и в силовой конструкции связки ДБ от излучения, создаваемого двигателями и катодами-нейтрализаторами. В качестве граничных условий статической тепловой задачи

использовались рассчитанные ранее температурные поля ДБ, а так же температурное поле катодов-нейтрализаторов. Разогрев высокочастотных генераторов, блоков газораспределителей, систем питания и управления, механизмов поворота двигателей не учитывался.

Основной сброс тепла приборного отсека в конструкции связки ДБ осуществляется с помощью опорных фланцев, имеющих специальное покрытие с повышенным коэффициентом поглощения и излучения. Самой нагретой областью ДМ являются блоки катодов-нейтрализаторов, температура которых в самой горячей зоне достигает 310°C . Самой холодной точкой является центральная часть приборного отсека, где температура $\sim 40^{\circ}\text{C}$ (рисунок 15 и 16).

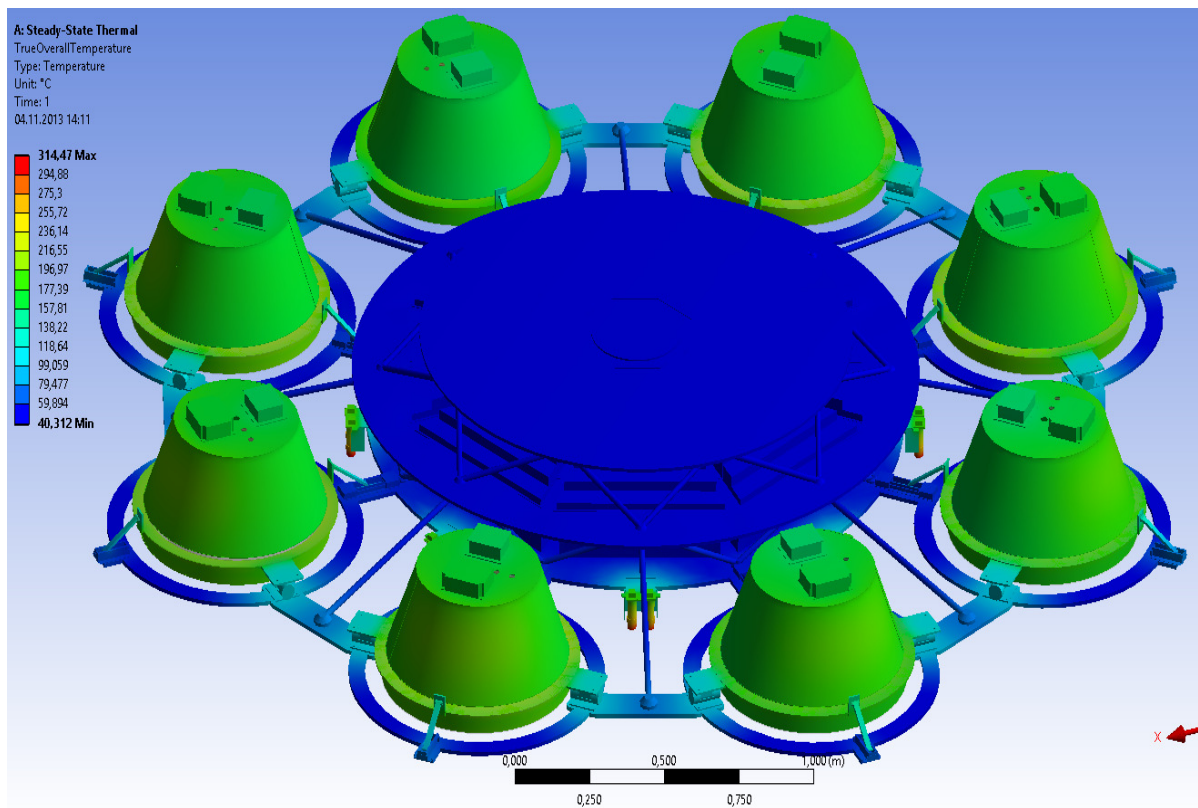


Рисунок 15– Общее поле температур ДМ

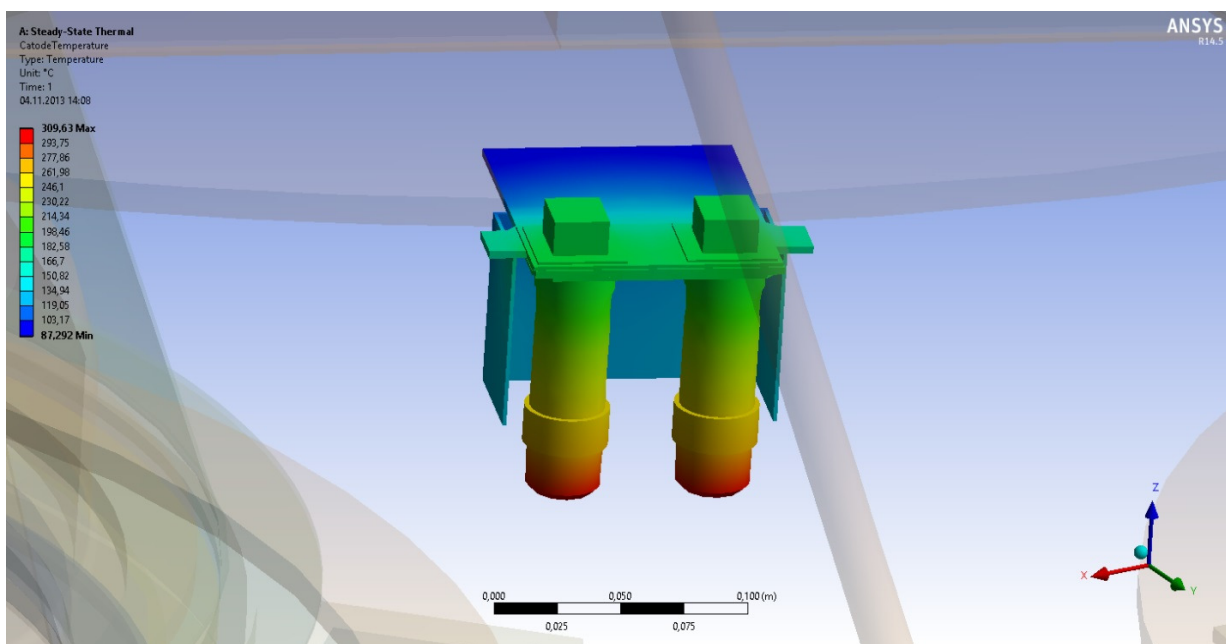


Рисунок 16– Температура блока катодов-нейтрализаторов

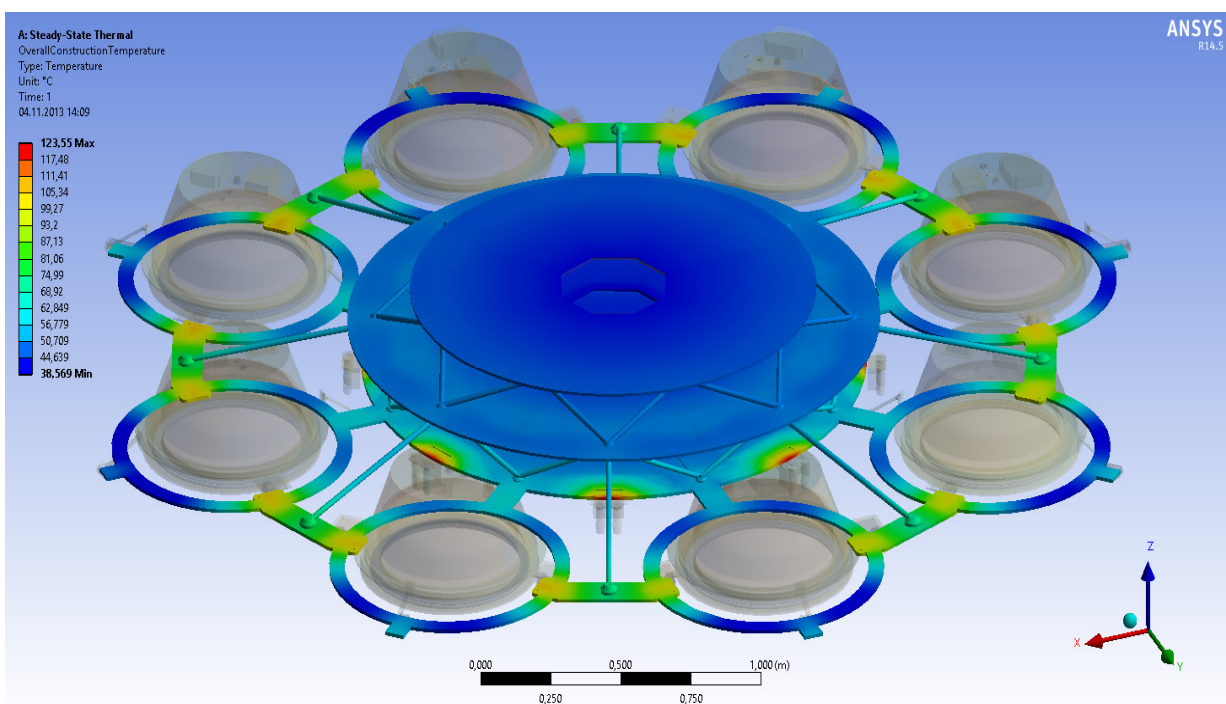


Рисунок 17– Температура силовой конструкции связки ДБ

Наиболее нагреваемые элементы силового корпуса ДМ – места установки опорных шарниров и механизмы поворота двигателей, а также области для установки

блоков катодов-нейтрализаторов. Данные области имеют температуру 105-125°C (рисунок 17). Наименее нагретыми оказываются элементы, расположенные в центре и на периферии между опорными шарнирами и вспомогательными механизмами поворота - их температура около 38 °С.

Основной тепловой поток, падающий на модули приборного отсека, расположенного в центре конструкции, в среднем равен $3000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Для его снижения внешние стенки модулей выполнены с высоким отражающим коэффициентом. Данное решение позволило существенно снизить нагрев рассчитываемых блоков. Основной тепловой поток, сбрасываемый с конструкции равен 1900 Вт для фланца, обращенного к ионному пучку и 1650 Вт для фланца, обращенного к КА.

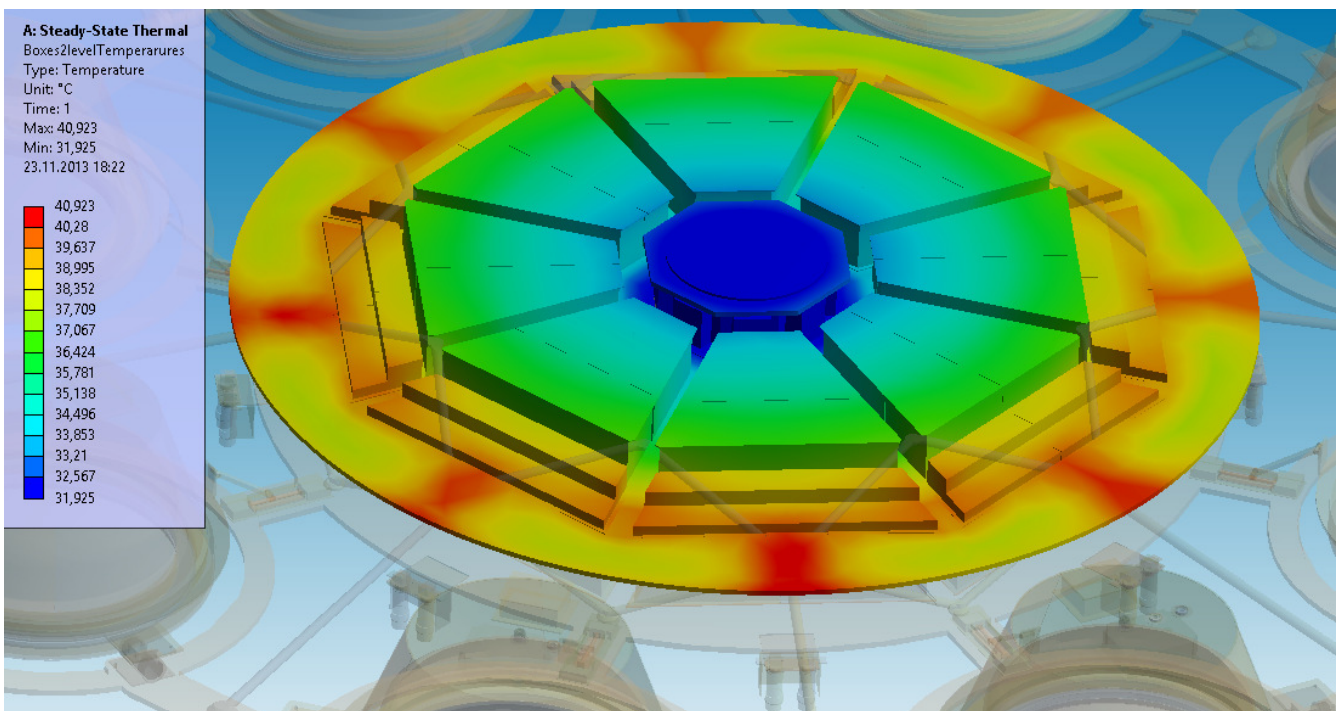


Рисунок 18- Температурное поле приборного отсека обращенного к КА

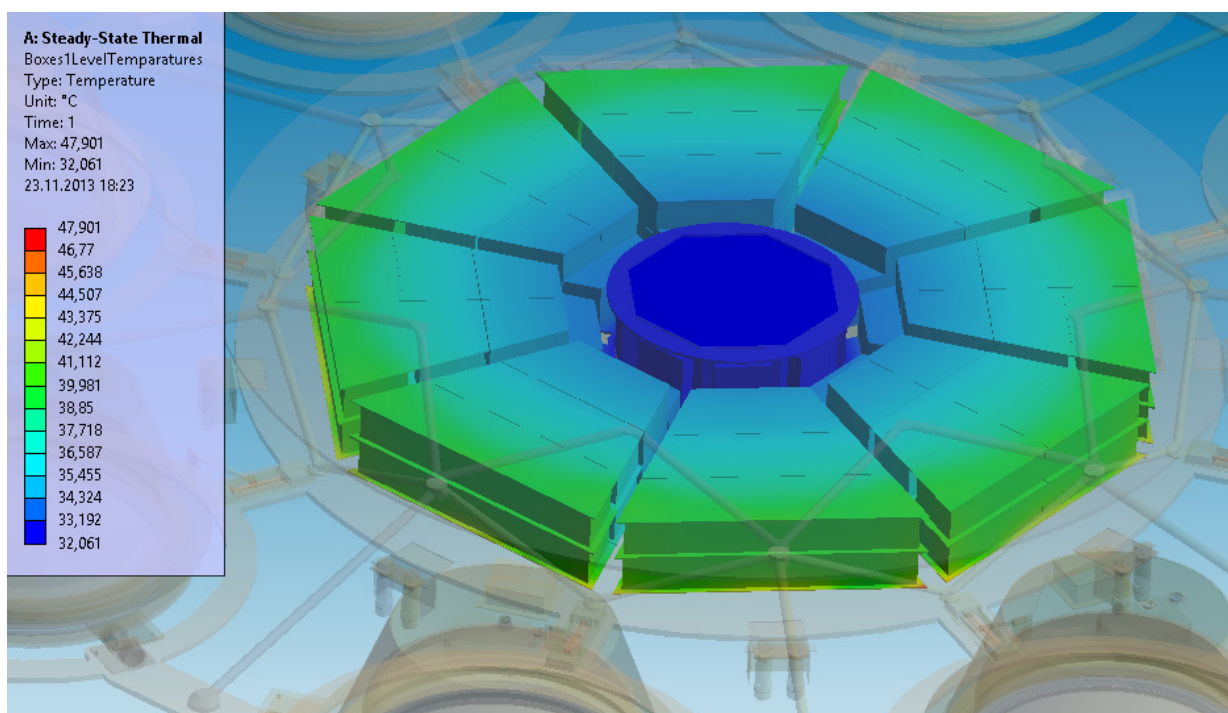


Рисунок 19- Температурное поле приборного отсека, обращённого к ионному пучку

По результатам расчёта (рисунок 18,19) самой высокой температурой обладают системы, расположенные на опорном фланце, обращённом к ионному пучку (около 45°C), а наименьшей температурой (около 32°C) - центральные блоки газораспределителя и системы питания и управления. На уровне обращённом к КА, температура оборудования равны 40°C и 32°C для периферии и центра.

Выводы

В результате выполнения данной работы была разработана тепловая модель ДМ на базе двигателя ВЧИД, которая позволила провести тепловой анализ технических мероприятий по снижению температуры в различных частях конструкции до допустимых пределов.

Решения, применённые в компоновке и конструкции ДМ, позволили значительно снизить тепловые потоки от двигателей на модули приборного отсека, что дало возможность эксплуатировать рассматриваемые системы в нормальном режиме без применения дополнительных мер защиты от перегрева, увеличивающих массу и габариты ДМ, в виде кожухов или тепловых трубок.

Работа выполнена при поддержке Гранта Правительства Российской Федерации № 11.G34.31.0022 «Исследования и разработка космических высокоимпульсных высокочастотных плазмодинамических электроракетных ионных двигателей» 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. и Гранта Президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-895.2014.8.

Библиографический список:

1. Леб Х.В., Могулкин А.И., Обухов В.А., Петухов В.Г., Попов Г.А. Анализ многоцветного лунного транспортного корабля, использующего ядерную энергетическую установку, Электронный журнал «Труды МАИ», выпуск №70.

2. Х.В. Лёб, Г.А. Попов, В.А. Обухов, Д. Фейли, Ш. Коллингвуд, А.И. Могулкин. Крупногабаритные высокочастотные ионные двигатели, Электронный журнал «Труды МАИ», выпуск №60
3. Goebel D.M., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. – New Jersey: Willey, 2008, ISBN: 978-0-470-42927-3.
4. Ion Propulsion Systems. Radio frequency ion propulsion systems for orbit rising, station keeping and deep space missions. – электронный ресурс: <http://cs.astrium.eads.net/sp/spacecraft-propulsion/ion-propulsion/index.html>
5. Loeb H.W., Feili D., Popov G.A., Obukhov V.A., Balashov V.V., Mogulkin A.I., Murashko V.M., Nesterenko A.N., Khartov S.A. Design of high-power high-specific impulse RF-ion thruster. IEPC-2011-290 // Proc. of 32nd International Electric Propulsion Conference, 11-16 Sept. 2011, Wiesbaden, Germany.
6. Проблемы прикладной физики. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел / под ред. Р. Бериша; пер. с англ. под ред. В.А. Молчанова. - М.: Мир, 1984.