ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 56515— 2015

АППАРАТЫ КОСМИЧЕСКИЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ И СИСТЕМЫ БОРТОВЫЕ СЛУЖЕБНЫЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Общие требования по защищенности и стойкости к воздействию электрофизических факторов космического пространства и статического электричества

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2016

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 321 «Ракетно-космическая техника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 июля 2015 г. № 886-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, 2016

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Обозначения и сокращения 2
5 Основные положения 3
6 Перечень электрофизических воздействий, оказываемых на бортовые системы и элементы автоматических космических аппаратов 3
7 Характеристики воздействующих факторов 4
8 Требования по защищенности и стойкости к воздействиям электрофизических факторов космического пространства и статического электричества 7
Приложение А (рекомендуемое) Порядок расчета распределения концентрации частиц в струе электроракетного двигателя 8
Приложение Б (справочное) Примеры расчета распределений концентрации частиц в струях двигателей типа СПД-70 и СПД-100 10

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

АППАРАТЫ КОСМИЧЕСКИЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ И СИСТЕМЫ БОРТОВЫЕ СЛУЖЕБНЫЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Общие требования по защищенности и стойкости к воздействию электрофизических факторов космического пространства и статического электричества

Automatic spacecrafts and onboard support spacecraft systems. General requirements for protection and resistance to electrophysical space factors and static electricity

Дата введения — 2016—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на автоматические космические аппараты, служебные бортовые системы и аппаратуру космических аппаратов и устанавливает общие требования по защищенности и стойкости к воздействию электрофизических факторов космического пространства и статического электричества с учетом работы бортовых электрореактивных двигательных установок стационарного режима работы на этапе орбитального полета.

Данный стандарт предназначен для разработчиков и изготовителей автоматических космических аппаратов и бортовых систем и содержит общие требования по защищенности и стойкости к воздействию электрофизических факторов космического пространства и статического электричества.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 18707—81 Перемычки для обеспечения защиты изделий ракетной и ракетно-космической техники от статического электричества. Технические условия

ГОСТ 18714—81 Провода заземления для обеспечения защиты изделий ракетной и ракетно-космической техники от статического электричества. Технические условия

ГОСТ 19005—81 Средства обеспечения защиты изделий ракетной, ракетно-космической техники от статического электричества. Общие требования к металлизации и заземлению

ГОСТ 24375—80 Радиосвязь. Термины и определения

ГОСТ 25645.103—84 Условия физические космического пространства. Термины и определения

ГОСТ 25645.113—84 Ионосфера Земли. Термины и определения

ГОСТ 30804.4.2—2013 (IEC 61000-4-2:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

Издание официальное

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 25645.103, ГОСТ 25645.113, ГОСТ 24375, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **электрофизические факторы космического пространства:** Факторы, вступающие с космическим аппаратом, его бортовыми системами и поверхностью в электрофизическое взаимодействие.

3.2 **собственная внешняя атмосфера;** СВА: Газовая среда, возникающая вокруг космического аппарата в результате процессов дегазации материалов внешних покрытий, испарения конденсата с внешних поверхностей, газоотделения из негерметичных отсеков, а также в результате работы бортовых систем и агрегатов, сопровождающихся выделением газов и паров.

3.3 **газоплазменное окружение;** ГПО: Плазменные образования, возникающие вблизи и вокруг космического аппарата при работе бортовых двигательных установок и при ионизации СВА.

3.4 **защищенность:** Свойство космического аппарата (его бортовых систем и аппаратуры) исключать влияние возможных помеховых и повреждающих эффектов на безаварийное функционирование во время и после воздействия электрофизических факторов космического пространства, а также при развитии электростатических разрядов на внешней поверхности и во внутренних объемах.

3.5 **стойкость:** Способность космического аппарата длительное время сохранять и проявлять свои функции, не поддаваясь разрушению или изменениям под воздействием электрофизических факторов космического пространства, а также при развитии электростатических разрядов на внешней поверхности космического аппарата и в его внутренних объемах.

3.6 **электростатический пробой:** Нарушение изоляционных свойств диэлектрика, приводящее к внезапному высвобождению заряда и повреждению диэлектрика.

3.7 **электростатический разряд;** ЭСР: Внезапное высвобождение заряда как результат электростатического пробоя.

4 Обозначения и сокращения

4.1 В настоящем стандарте применяют следующие сокращения:

АКА — автоматический космический аппарат;
ГПО — газоплазменное окружение;
ИПЭ — изделия полупроводниковой электроники;
КА — космический аппарат;
КВНО — координатно-временное и навигационное обеспечение;
НИП — наземный измерительный пункт;
СБ — солнечная батарея;
СВА — собственная внешняя атмосфера;
СОТР — система обеспечения теплового режима;
СЭП — система электропитания;
ТЗ — техническое задание;
ТТЗ — тактико-техническое задание;
ЭРД — электроракетный двигатель;
ЭРИ — электрорадиоизделие;
ЭСР — электрический статический разряд;
ЭФКП — электрофизические факторы космического пространства.

4.2 В настоящем стандарте приняты следующие обозначения:

α — степень ионизации;
γ — показатель адиабаты;
ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;
a_0 — характерный размер струи в начальном сечении;
a'_0 — расходимость струи в начальном сечении;
d — толщина слоя Дебая;
e — заряд электрона;
E — напряженность электрического поля;
E_I — энергия однозарядных ионов;
E_{II} — энергия двухзарядных ионов;
f — плотность потока ионов;
F — суммарный поток ионов на заданную поверхность;

k — постоянная Больцмана;
m, $\dot{m}$ — масса, массовый расход;
m_i — масса иона;
M — *число Маха;*
n — концентрация частиц;
n_0 — плотность ионов в начальном сечении реактивной струи;
N — число частиц;
N — поток ионов в двигателе;
r_0 — расстояние до выходного сечения двигателя;
S — площадь выходного сечения двигателя;
T — температура;
T_e — температура электронов;
T_{e0} — температура электронов в начальном сечении;
u — продольная компонента скорости;
u_0 — скорость потока на выходе из ускорителя;
u_c — скорость потока на оси ускорителя;
U — разность потенциалов;
U_p — напряжение разряда;
U_{iI} — потенциал однократной ионизации рабочего вещества двигателя;
U_{iII} — потенциал двукратной ионизации рабочего вещества двигателя;
v — поперечная компонента скорости;
V — полная скорость потока, $V = V(x, y, z)$; $V^2 = u^2 + v^2$;
x, y, z — координаты декартовой системы координат;
x, r — координаты цилиндрической системы координат.

5 Основные положения

Космические аппараты подвергаются воздействию ЭФКП. К таким факторам относятся ГПО АКА, электрические поля в ГПО и потоки заряженных частиц, поступающие на поверхность АКА из ГПО, при работе бортовых источников плазмы. Общее негативное воздействие факторов усиливается с увеличением срока активного существования КА.

При работе на борту КА ЭРД их плазменные струи генерируют вблизи аппарата электрические поля и токи, которые замыкаются либо через около объектовые ГПО, либо через элементы конструкции КА, либо через ионосферу. Благодаря своей относительно высокой электро- и теплопроводности плазма струи весьма эффективно взаимодействует с КА за счет переноса электрических токов и тепла. Воздействие ЭФКП на КА проявляется в создании дополнительных механических и электромагнитных сил, крутящих моментов, а также тепловых и корпускулярных потоков.

В разделе 6 приведен перечень ЭФКП и эффекты их негативного воздействия на АКА и бортовые системы.

6 Перечень электрофизических воздействий, оказываемых на бортовые системы и элементы автоматических космических аппаратов

Перечень электрофизических воздействий на системы АКА и бортовые системы приведен в таблице 1.

Таблица 1 — Сводный перечень воздействий на системы АКА и бортовые системы

Электрофизический фактор	Система АКА	Эффект воздействия ЭФКП
ГПО, возникающие при работе бортовых плазменных и газовыделяющих систем	Радиосистемы АКА	Искажение диаграммы направленности бортовых радиоантенн. Искажение амплитудно-фазовых характеристик принимаемого сигнала
	НИПы, системы КВНО	Искажение координатной информации о АКА. Искажение радиолокационного облика АКА
	Бортовые оптические системы	Ложные световые сигналы за счет собственного излучения ГПО и за счет рассеяния излучения Солнца на частицах ГПО

Окончание таблицы 1

Электрофизический фактор	Система АКА	Эффект воздействия ЭФКП
Электрические поля, генерируемые между окружающей плазмой и элементами корпуса АКА под действием высоковольтных бортовых систем (высоковольтных СБ, высоковольтных источников питания, потоков высокоэнергичных космических частиц)	Радиосистемы АКА	Генерация помех в приемных трактах при импульсном изменении U в результате электростатического пробоя
	Системы управления АКА, ИПЭ, ЭРИ	Создание электрических наводок в чувствительных цепях в результате ЭСР
	Система терморегулирования	Деградация терморегулирующих покрытий АКА при микрометеоритной эрозии
	Функциональные поверхности АКА, служебной, целевой и научной аппаратуры	Деградация свойств функциональных поверхностей из-за их катодного распыления ионами, ускоренными при поверхностной U
Поток заряженных частиц на поверхность АКА из ГПО	Системы электропитания с СБ	Ухудшение оптических свойств стеклянных покрытий СБ при бомбардировке их поверхности заряженными частицами ГПО и при осаждении пленок конденсата ГПО
	Система терморегулирования	Деградация терморегулирующих покрытий АКА в результате эрозии и загрязнения продуктами распыления конструкционных материалов ЭРД и АКА под действием ускоренного потока ионов
	Система управления движением	Создание дополнительных крутящих моментов за счет несимметричного электростатического взаимодействия ускоренного потока ионов с элементами конструкции АКА. Потери тяги ЭРД в результате попадания элементов конструкции АКА в зону разлета реактивной струи
Объемное заряжение диэлектриков на поверхности вследствие электризации АКА	ЭРИ, кабельные сети, СОТР, СЭП	Электромагнитные помехи, паразитные сигналы в кабелях, разрушение элементов оборудования и конструкции

7 Характеристики воздействующих факторов

7.1 Параметры ГПО

7.1.1 ГПО характеризуется начальной плотностью ионов, их пространственным распределением, энергией и направлением скорости ионов.

7.1.2 Плотность ионов в начальном сечении реактивной струи

Плотность ионов в начальном сечении реактивной струи n_0 является рабочей характеристикой используемого двигателя и определяется m рабочего тела двигателя через площадь выходного сечения двигателя S согласно следующей зависимости

$$n_0 = \frac{m \cdot \alpha}{m_i \cdot u \cdot S},$$

где α — степень ионизации;

m_i — масса иона;

u — продольная компонента скорости.

7.1.3 Пространственное распределение ионов

На рисунке 1 показана структура струи ЭРД. При работе ЭРД формируются следующие зоны в ГПО:

- зона I — занимает пространство перед выходным сечением двигателя в пределах углов расходимости струи $\pm 45°$ относительно вектора среднемассовой скорости реактивной струи (расходимость струи варьируется от $\pm 20°$ до $\pm 60°$ для различных типов ЭРД и определяется экспериментально в ходе наземных испытаний двигателя). В этой зоне сосредоточено до 90 % ускоренных ионов реактивной струи;

- зона II — занимает пространство перед выходным сечением двигателя в пределах углов ± 90° относительно вектора среднемассовой скорости реактивной струи за исключением зоны I. В этой зоне формируется периферия потока ускоренных ионов реактивной струи;

- зона III — занимает пространство за выходным сечением двигателя (в ближней по потоку полусфере зоны IV). В этой зоне распространяются обратные потоки ионов вторичной плазмы из реактивной струи;

- зона IV — располагается на расстоянии 3—5 диаметров выходного сечения двигателя вниз по потоку внутри зоны I. В этой зоне образуется вторичная плазма в результате процесса рекомбинации ускоренных ионов струи на нейтралах СВА.

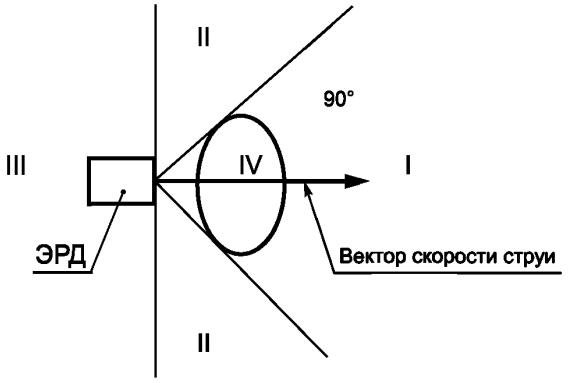


Рисунок 1 — Структура струи

Продольное и поперечное распределение ионов в струе двигателя на расстояниях менее 1 м определяют при испытаниях двигателя в наземных условиях.

Рекомендуемый порядок расчета продольного и поперечного распределения концентрации частиц в струе ЭРД на расстояниях более 1 м от выходного сечения двигателя приведен в приложении А.

Тестовые примеры расчета распределения плотности ионов для используемых на современных АКА ЭРД холловского типа приведены в приложении Б. На рисунках Б.1 и Б.2 в разных масштабах (для удобства использования) показаны распределения концентрации плазмы вдоль струи наиболее распространенного ЭРД СПД-100, на рисунках Б.3 и Б.4 — поперек струи. На рисунке Б.5 и Б.6 показано распределение энергии ионов вдоль и поперек оси двигателя соответственно. В струе ЭРД СПД-70 соответствующие распределения показаны на рисунках Б.7—Б.12 приложения Б.

7.1.4 Энергия ионов ГПО и направление скорости

При работе ЭРД генерируется поток ускоренных ионов с энергией, зависящей от напряжения разряда $U_р$. В зависимости от энергии выделяются четыре группы ионов:

- 1-я группа — однозарядные ионы с энергией $E_I = e \cdot (U_р - 3 \cdot U_{iI})$, где U_{iI} — потенциал однократной ионизации рабочего вещества двигателя. Они составляют от 90 % до 95 % от полного числа ионов в струе. Направление их скорости лежит в диапазоне углов расходимости реактивной струи;

- 2-я группа — двухзарядные ионы с энергией $E_{II} = e \cdot (2 \cdot U_р - 3 \cdot U_{iII})$, где U_{iII} — потенциал двукратной ионизации рабочего вещества двигателя. Они составляют от 5 % до 10 % от полного числа ионов в струе. Направление их скорости лежит в диапазоне углов расходимости реактивной струи;

- 3-я группа — однозарядные ионы периферии струи. Их энергия, как правило, не превышает $0,1 \cdot E_I$. Они составляют менее 10 % от полного числа ионов в струе. Направление их скорости лежит в диапазоне углов раскрыва зоны периферии струи;

- 4-я группа — ионы вторичной плазмы. Их энергия определена потенциалом струи и, как правило, не превышает $0,1 \cdot E_I$. Направление их скорости — радиально из зоны IV.

Ионы 1-й и 2-й группы сосредоточены в зоне I.

Ионы 3-й группы распространяются в зоне II.

Ионы 4-й группы рождаются в зоне IV и распространяются в зонах II и III.

Полную энергию иона в зависимости от его координат рассчитывают как

$$E_l = \frac{m_i(u^2 + v^2)}{2} = \frac{m_i V^2}{2},$$

где v — поперечная компонента скорости;

V — полная скорость потока.

7.2 Параметры электрических полей

Электрическое поле вокруг АКА формируется при возникновении U между поверхностью АКА (элемента конструкции АКА) и ГПО.

Напряженность электрического поля E вокруг АКА (элемента конструкции АКА) определяется U между поверхностью АКА (элемента конструкции АКА) и ГПО и d, в которой сосредотачивается вся U

$$E = U/d.$$

Толщину слоя Дебая d определяют параметрами окружающей плазмы

$$d = \left(\frac{\varepsilon_0 k T_e}{n e^2} \right)^{1/2},$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;

k — постоянная Больцмана;

T_e — температура электронов;

e — заряд электрона.

E внутри диэлектрических покрытий АКА определяется U и толщиной диэлектрического покрытия. При превышении E внутри диэлектрика пробойного значения для данного типа покрытия наступает электрический пробой диэлектрика.

7.3 Параметры потоков ионов из ГПО на КА

Величину потока ионов на принимающий элемент конструкции АКА определяют пространственным распределением плотности ионов в ГПО, площадью принимающей поверхности элемента АКА, находящегося внутри ГПО, ориентацией принимающей поверхности относительно вектора скорости ионов ГПО, с учетом возможного затенения другими элементами конструкции АКА.

Плотность потока ионов f определяют по формуле

$$f = nV(x, y, z).$$

Суммарный поток F на принимающую поверхность площадью S определяют по формуле

$$F = \int_S nV(x, y, z)dS.$$

7.4 Параметры электризации АКА

Электризацию АКА определяют накоплением зарядов (электронов и ионов космической плазмы) на внешней поверхности диэлектрических конструкций на этапе орбитального полета. Накопление зарядов приводит к возникновению U между диэлектрическими и проводящими элементами конструкции АКА, обуславливающей электрический пробой диэлектрика на проводящие части корпуса (устройства аппаратуры), разряд по поверхности диэлектрика, пробой облучаемой части диэлектрика с выбросом зарядов в окружающее пространство. В результате аппаратура АКА, его поверхность, кабельные сети и ЭРИ могут подвергаться локальному воздействию токов электростатических разрядов и генерируемых ими электромагнитных полей.

Параметрами электростатического разряда и его электрической цепи являются напряжение разряда, разрядная емкость и разрядное сопротивление, характеризующиеся следующими максимальными значениями их параметров:

- максимальное напряжение разряда . . . . . 20 кВ;
- емкость . . . . . $1 \cdot 10^{-9}$ Ф;
- сопротивление . . . . . 150 Ом.

Импульс тока электростатического разряда характеризуется следующими значениями его параметров:

- амплитуда импульса тока . . . . . до 100 А;
- длительность фронта импульса тока на уровне 0,1—0,9 амплитудного значения . . . . . от $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ с;
- длительность импульса тока на уровне 0,5 амплитудного значения . . . . . от $2 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ с.

Электростатические разряды могут быть одиночными и периодическими (с частотой появления до 50 Гц в течение нескольких секунд).

E вблизи канала электростатического разряда оценивается величиной до 200 кВ/м.

8 Требования по защищенности и стойкости к воздействиям электрофизических факторов космического пространства и статического электричества

8.1 Требования по защищенности и стойкости АКА к электрофизическим воздействиям должны включаться в состав ТТЗ (ТЗ) на создание АКА, в составе которых предусматрено использование ЭРД стационарного режима действия, других плазмо- и газовыделяющих систем.

Требования устанавливают по параметрам электрофизических факторов и статического электричества по 5.2, к воздействию которых должна быть обеспечена работоспособность аппаратуры АКА и его бортовых систем с необходимым (заданным по ТТЗ, ТЗ) уровнем вероятности.

8.2 В результате предварительной оценки на этапе проектирования АКА должны быть определены:

- возможные эффекты в бортовых системах и аппаратуре при воздействии электрофизических факторов с учетом режимов их работы;
- ожидаемые уровни воздействующих электрофизических факторов, при которых бортовые системы и аппаратура сохраняют стойкость;
- перечень эффектов, подлежащих оценке (оценку проводят расчетным путем или определяют экспериментально).

8.3 На этапе проектирования должно быть подтверждено (с учетом перечня по 8.2), что АКА и его бортовые системы в соответствии с таблицей 1 сохранят стойкость (работоспособность) в условиях воздействия ГПО с параметрами согласно 8.1 в течение срока активного существования АКА на заданных орбитах.

8.4 На этапе проектирования должно быть подтверждено (с учетом перечня по 8.2.), что АКА, его бортовые системы и оборудование в соответствии с таблицей 1 сохранят стойкость (работоспособность) в условиях воздействия электрических полей с параметрами согласно 8.2 в течение срока активного существования АКА на заданных орбитах.

8.5 На этапе проектирования должно быть подтверждено (с учетом перечня по 8.2), что АКА, его бортовые системы и материалы внешних поверхностей в соответствии с таблицей 1 сохранят стойкость (работоспособность) в условиях воздействия потоков ионов с параметрами согласно 7.3 в течение срока активного существования АКА на заданных орбитах.

8.6 Требования по защищенности и стойкости к воздействию статического электричества устанавливают к аппаратуре АКА, на которую в условиях полета возможно воздействие ЭСР с его внешних диэлектрических частей корпуса (устройств).

8.6.1 Требования стойкости аппаратуры к воздействию статического электричества устанавливают по параметру $U_р$ ЭСР и по параметрам электрической цепи этого разряда: разрядной емкости и разрядному сопротивлению, характеризующих поверхностный потенциал, обусловленный накоплением зарядов при электризации конструкции АКА, их собственную электрическую емкость и электрическое сопротивление цепи разряда.

8.6.2 Значения параметров ЭСР, к воздействию которых аппаратура должна быть стойкой, устанавливают в соответствии с 7.4.

8.6.3 Обеспечение защищенности и стойкости к статическому электричеству по ГОСТ 19005, ГОСТ 18707, ГОСТ 18714, ГОСТ 30804.4.2.

Приложение А
(рекомендуемое)

Порядок расчета распределения концентрации частиц в струе электроракетного двигателя

А.1 Расширение плазменных струй разных типов ЭРД в космосе носит разный характер и может быть адиабатическим или изотермическим.

А.2 Входные величины для расчета адиабатических течений (определяют экспериментально в ходе наземных испытаний двигателей):

- $\dot{N}$ — поток ионов в двигателе, $с^{-1}$;
- u_0 — скорость потока на выходе из ускорителя, м/с;
- a_0 — характерный размер струи в начальном сечении, м;
- a'_0 — расходимость струи в начальном сечении;
- γ — показатель адиабаты (определен типом рабочего вещества двигателя).

А.2.1 Для разреженных плазменных струй торцевых холловских двигателей:

$$n = \frac{\dot{N}(\gamma - 1/2)}{\pi a^2 u_0} \cdot \frac{1}{(1 + r^2/a^2)^{\gamma}};$$

$$u = u_0 \frac{1}{(1 + r^2/a^2)^{1/2}};\ \nu = u\frac{r}{a}a';$$

$$T = T_{c0}(a_0/a)^{2(\gamma - 1)};$$

$$a \approx a_0 + a'_m(x - x_0);\ (a'_m)^2 = (a'_0)^2 + \frac{2}{M^2(\gamma - 1)}.$$

А.2.2 Для низкоскоростных плотных струй дуговых двигателей:

$$n = \frac{\dot{N} \cdot \nu}{\pi a^2 u_0} \cdot \frac{1 + a' \cdot r^2/a^2}{(1 + r^2/a^2)^{\gamma + 1}};$$

$$u = \frac{u_0}{(1 + a'^2 \cdot r^2/a^2)^{1/2}};\ \nu = u\frac{r}{a}a';$$

$$T = T_{c0}(a_0/a)^{2(\gamma - 1)}\ \frac{1 + r^2/a^2}{1 + a'^2 \cdot r^2/a^2};$$

$$a \approx a_0 + a'_m(x - x_0);\ (a'_m)^2 = (a'_0)^2 + \frac{2}{M^2(\gamma - 1)};$$

$$r^2 = z^2 + y^2.$$

А.3 Входные величины для расчета изотермических течений (определяют экспериментально в ходе наземных испытаний двигателей):

- $\dot{N}$ — поток ионов, ускоренных в канале ЭРД, $с^{-1}$;
- u_0 — скорость потока на выходе из ускорителя, м/с;
- a_0 — характерный размер струи в начальном сечении, м;
- a'_0— расходимость струи в начальном сечении;
- T_{e0} — температура электронов в начальном сечении, эВ.

А.4 Для высокоскоростных, слаборасходящихся струй ионных двигателей и холловских двигателей:

$$n = \frac{\dot{N}(p-1/2)}{\pi a^2 u_c} \cdot \frac{1}{(1+r^2/a^2)^p};$$

$$nu = \frac{\dot{N}(p-1/2)}{\pi a^2} \cdot \frac{1}{(1+r^2/a^2)^{p+1/2}};$$

$$p = 1 - \frac{1}{1-\gamma M_0^2};\ T = T_0;$$

$$a' = \left(a_0'^2 + \frac{4p}{\gamma M_0^2} \ln \frac{a}{a_0}\right)^{1/2} \frac{u_0}{u_c};$$

$$\left(\frac{u_c}{u}\right)^2 = 1 + \frac{2}{\gamma M_0^2} \ln \frac{u_c a^2}{u_0 a_0^2}.$$

Приложение Б
(справочное)

Примеры расчета распределений концентрации частиц в струях двигателей типа СПД-70 и СПД-100

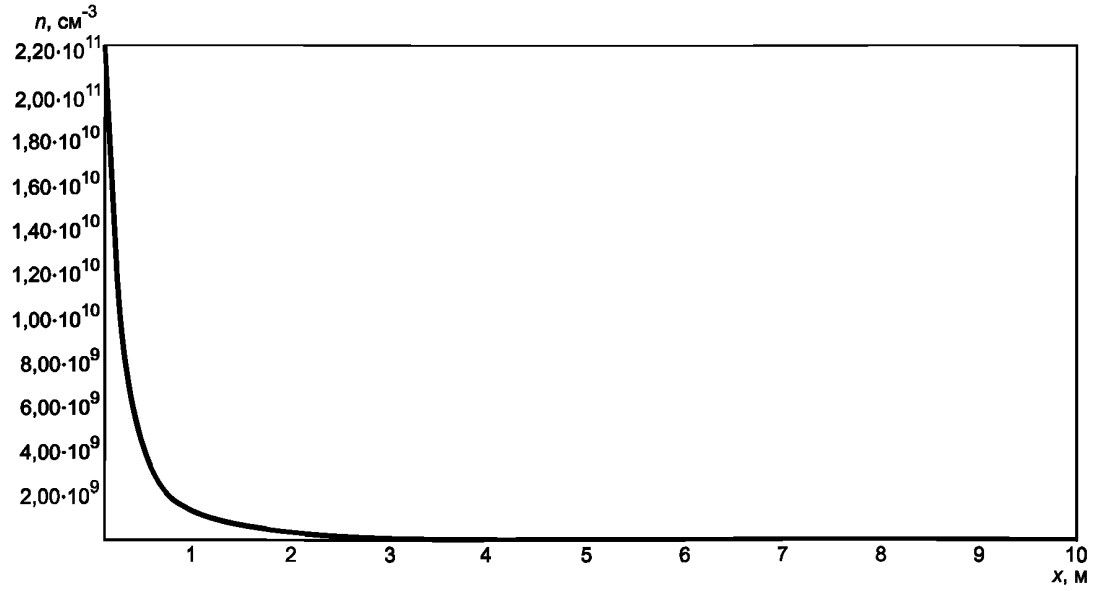
Ниже приведены результаты расчетов по зависимостям, приведенным в А.4.

Исходные данные

Для двигателя типа СПД-100:

$$\dot{N} = 2 \cdot 10^{19}\ c^{-1};\ u_0 = 1{,}7 \cdot 10^4\ \text{м/с};\ a_0 = 5{,}0\ \text{см};\ (a_0')^{-2} = 26;\ T_{e0} = 10\ \text{эВ}.$$

Для двигателя типа СПД-70:



$$\dot{N} = 1{,}2 \cdot 10^{19}\ c^{-1};\ u_0 = 1{,}45 \cdot 10^4\ \text{м/с};\ a_0 \cong 3{,}5\ \text{см};\ (a_0')^{-2} = 15;\ T_e = 1{,}5\ \text{эВ}.$$

Рисунок Б.1 — Распределение концентрации плазмы n, см$^{-3}$, в струе двигателя СПД-100 вдоль оси струи

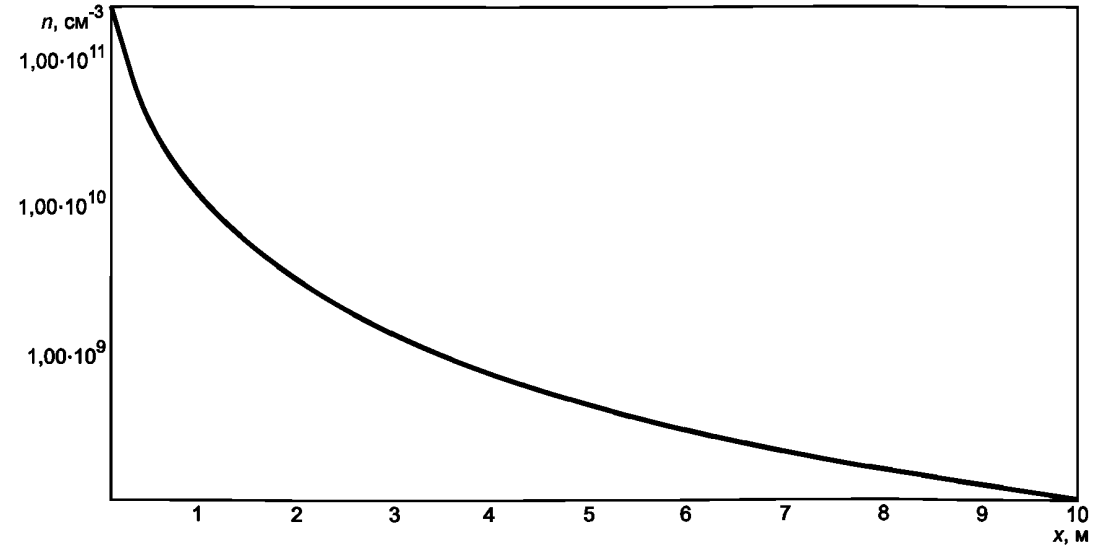


Рисунок Б.2 — Распределение концентрации плазмы n, см$^{-3}$, в струе двигателя СПД-100 вдоль оси струи (логарифмическая шкала)

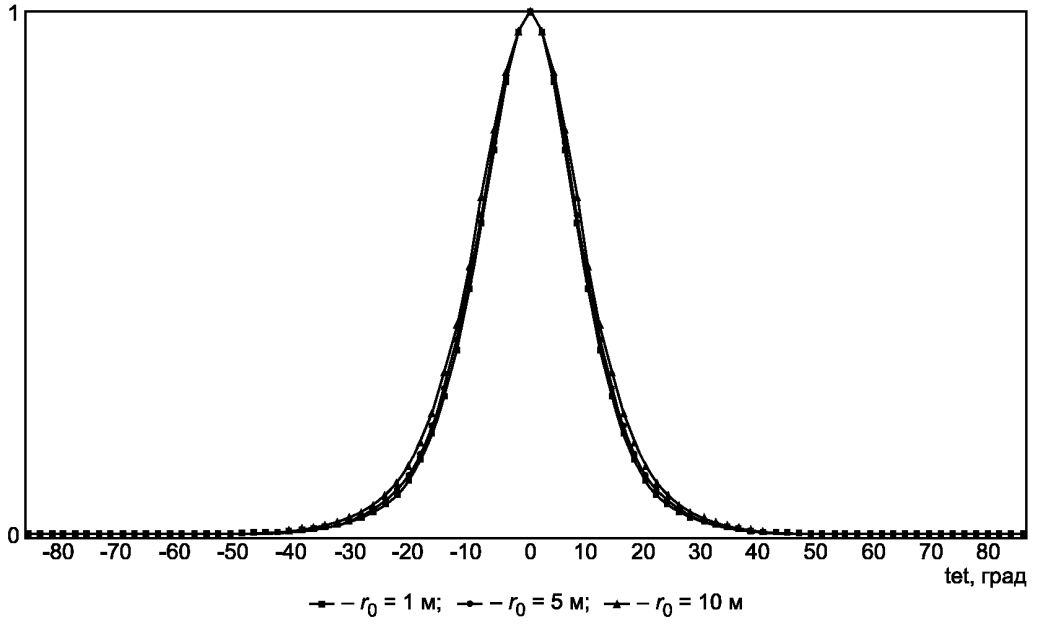


Рисунок Б.3 — Распределение концентрации плазмы n/n_c поперек струи для двигателя СПД-100

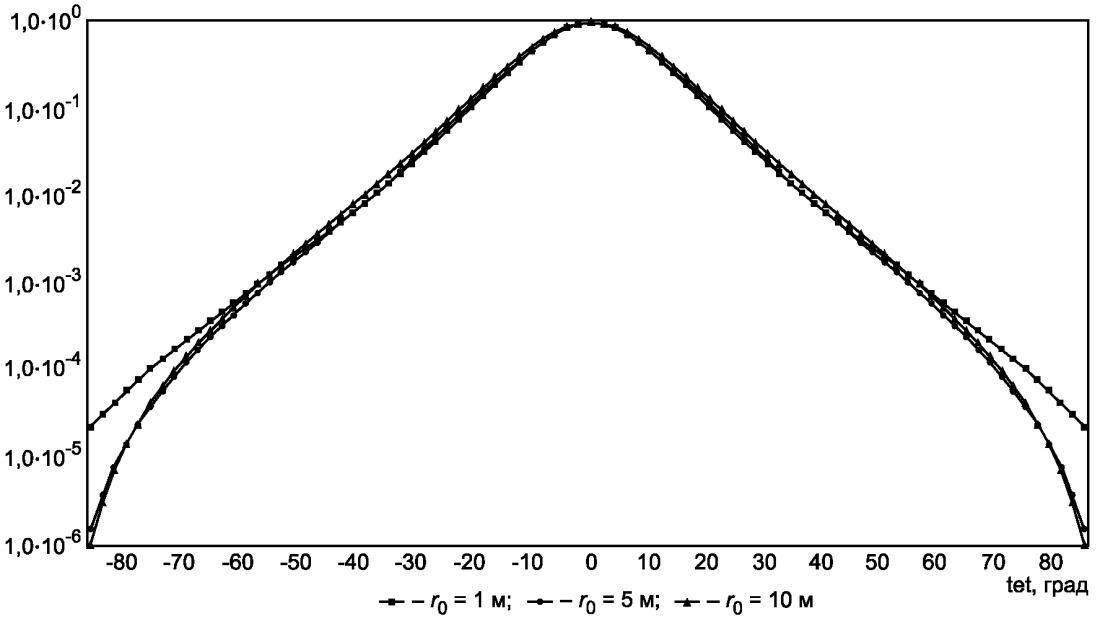


Рисунок Б.4 — Распределение концентрации плазмы n/n_c поперек струи для двигателя СПД-100 в логарифмическом масштабе

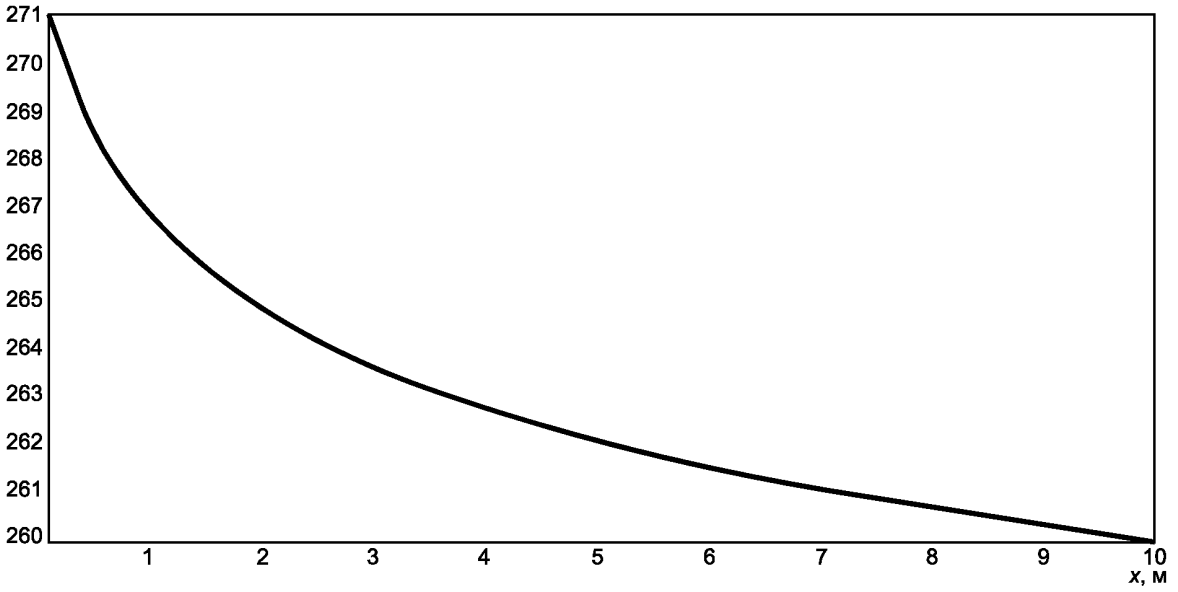


Рисунок Б.5 — Распределение энергии ионов E_c вдоль оси струи для двигателя СПД-100

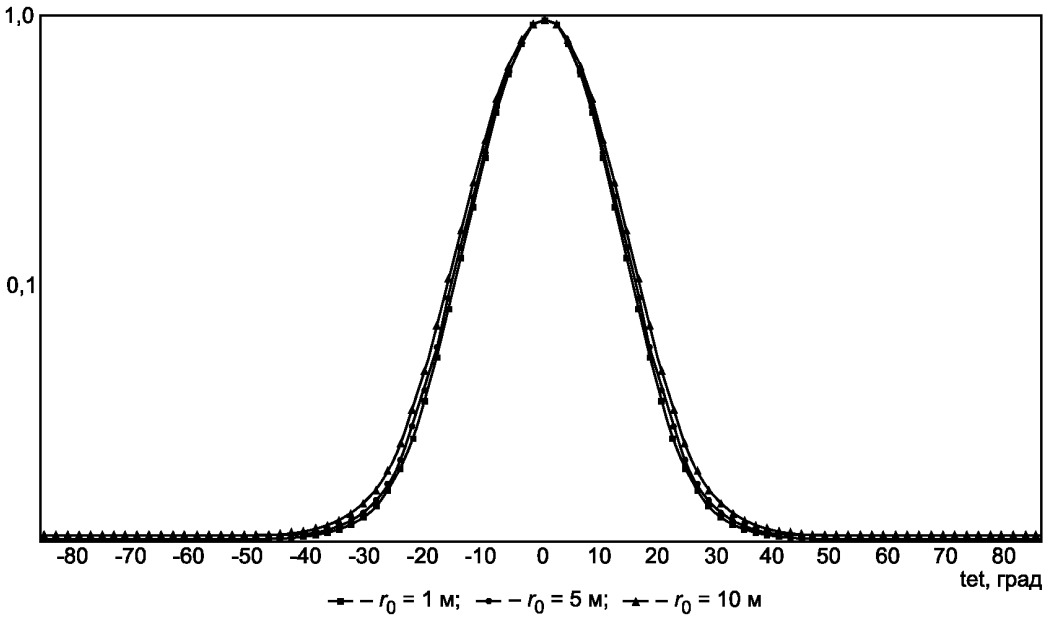


Рисунок Б.6 — Распределение энергии ионов E/E_c поперек струи для двигателя СПД-100

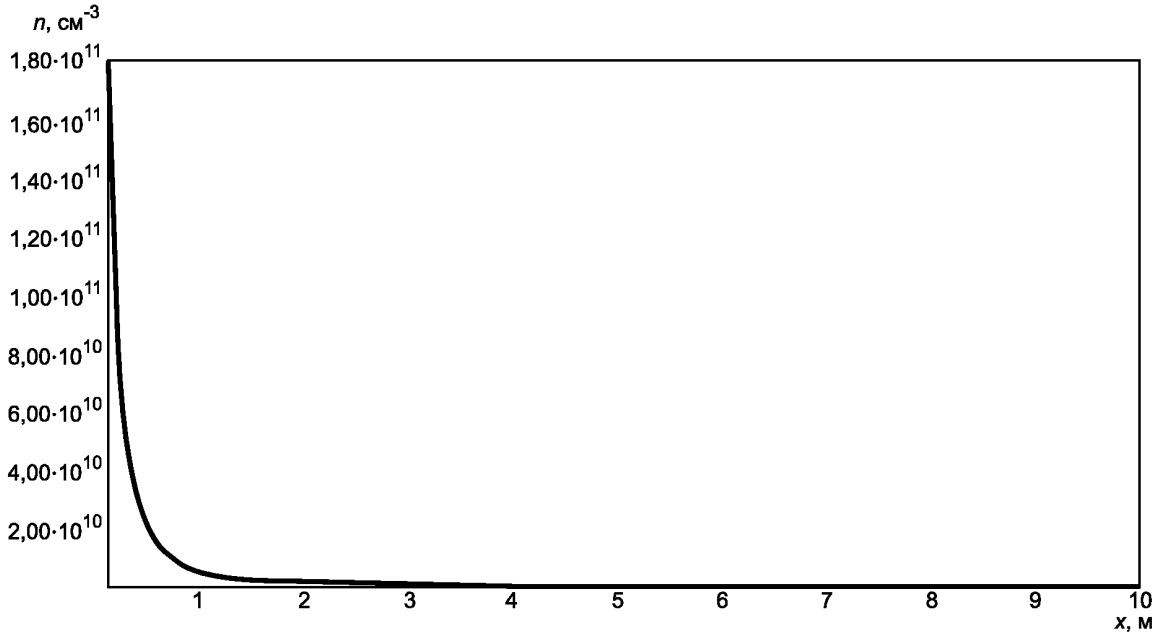


Рисунок Б.7 — Распределение концентрации плазмы n, см$^{-3}$, в струе двигателя СПД-70 вдоль оси струи

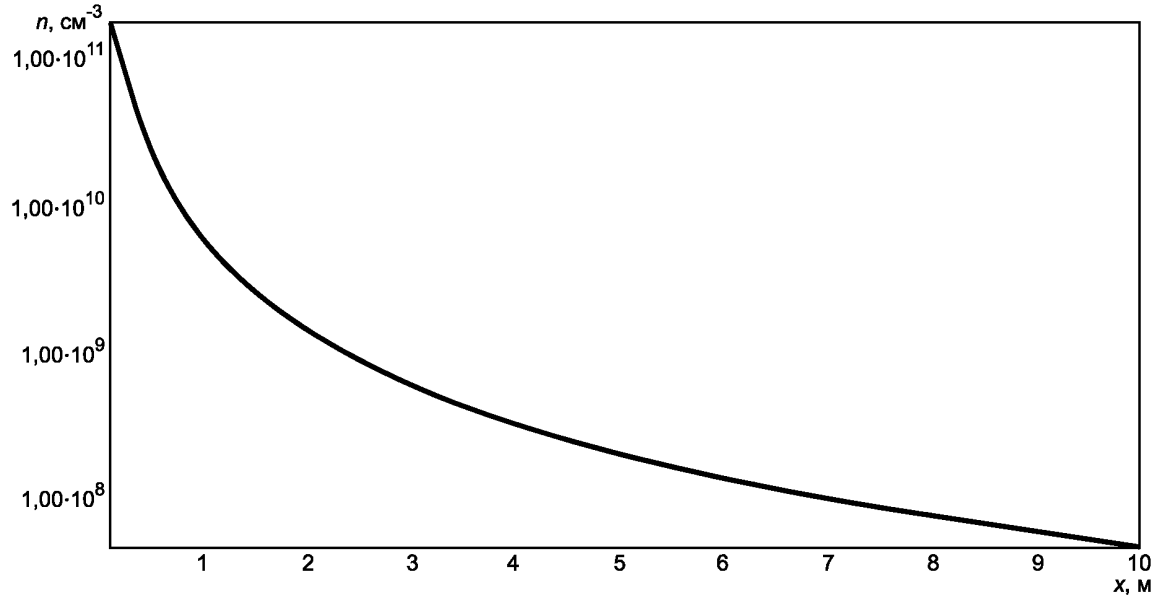


Рисунок Б.8 — Распределение концентрации плазмы n, см$^{-3}$, в струе двигателя СПД-70 вдоль оси струи (логарифмическая шкала)

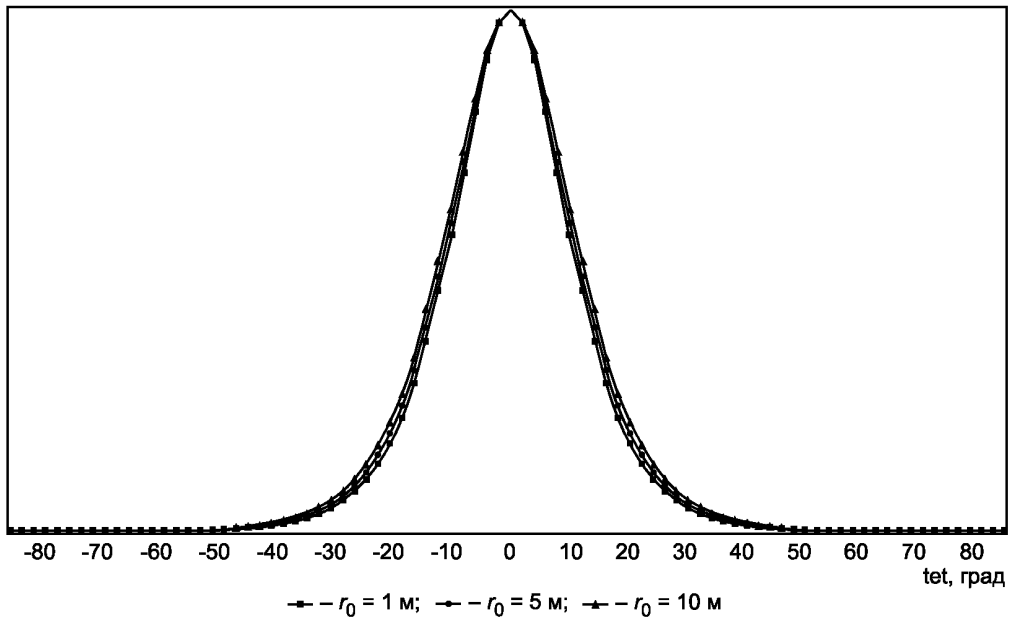


Рисунок Б.9 — Распределение концентрации плазмы n/n_c поперек струи для двигателя СПД-70

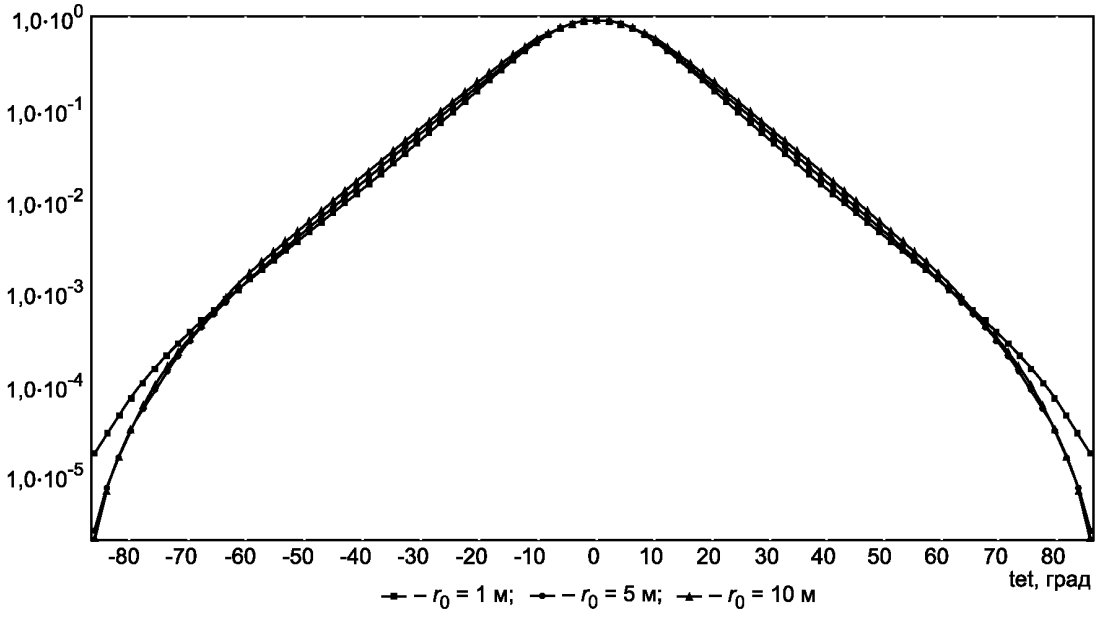


Рисунок Б.10 — Распределение концентрации плазмы n/n_c поперек струи для двигателя СПД-70 в логарифмическом масштабе

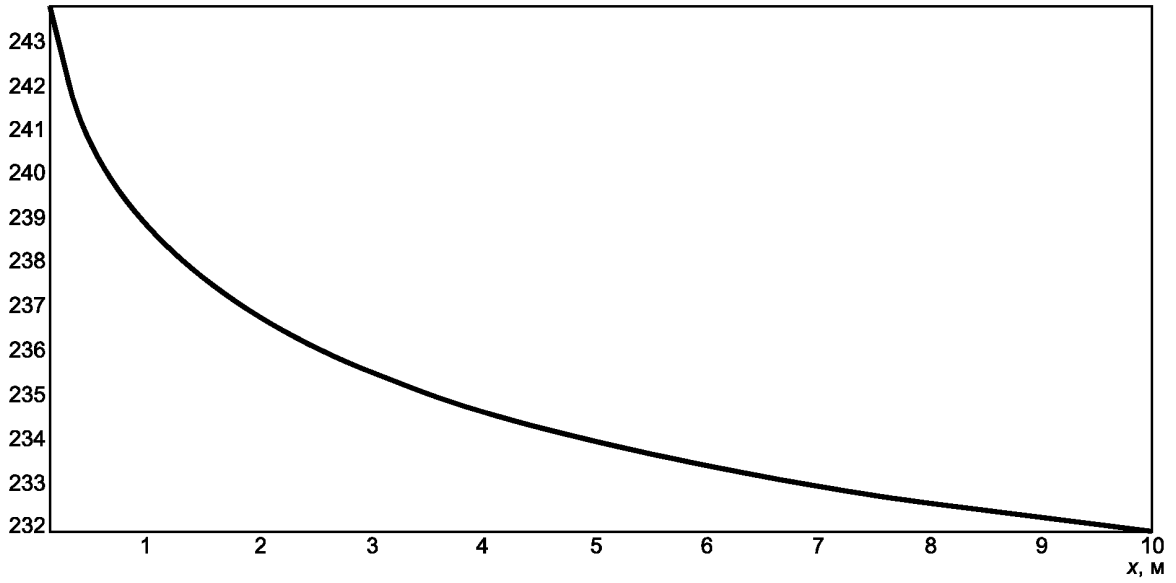


Рисунок Б.11 — Распределение энергии ионов E_c вдоль оси струи для двигателя СПД-70

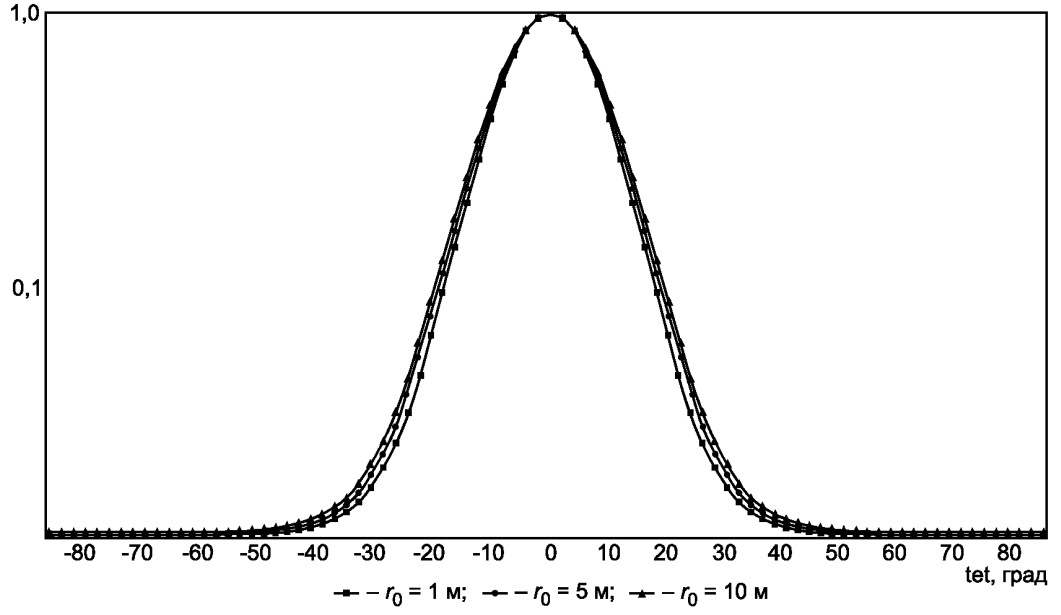


Рисунок Б.12 — Распределение энергии ионов E/E_c поперек струи для двигателя СПД-70

УДК 006:629.7.064 ОКС 49.140

Ключевые слова: аппараты космические автоматические, служебные бортовые системы космических аппаратов, защищенность, стойкость, электрофизические факторы космического пространства, статическое электричество

Редактор *В.М. Романов*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *В.И. Варенцова*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 27.11.2015. Подписано в печать 28.12.2015. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 1,85. Тираж 45 экз. Зак. 4353.

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru