

Исследование ионосферы с использованием аппаратуры, размещаемой на наноспутниках

Часть 2. Моделирование электронно-ионной ловушки

Предложена конструкция электронно-ионной ловушки для совмещенного датчика плотности и состава верхних слоев атмосферы (ионосферы), предназначенного для размещения на наноспутниках. Она позволяет улавливать заряженные частицы любой энергии и направления их скорости, разделяя их потоки по знаку заряда и энергии. Это обеспечивает корректную работу вакуумметрического преобразователя данного датчика и возможность регистрации плотности потоков заряженных частиц, разделяя их по знаку и энергии. Рассмотрены процессы, происходящие в ловушке, проведен расчет предельных энергий, улавливаемых верхней системой электродов ловушки и проведена оценка величин токов ловушки в требуемом диапазоне высот. Частицы высоких энергий, прошедшие через верхнюю систему электродов, улавливаются нижней системой электродов.

Ключевые слова:

ионосфера, плотность, состав, экспериментальные исследования, инверсно-магнетронный преобразователь, моделирование.

**В.Э.Дрейзин,
Аль Кадими Али Нури Мохаммед,
А.А.Гримов**

(Юго-Западный государственный университет,
г. Курск)

В данной статье представлена конструкция и проведен расчет процессов, происходящих в электронно-ионной ловушке, входящей в состав датчика, плотности и состава ионосферы, предназначенного для размещения на наноспутниках. В [1] была обоснована актуальность разработки такого датчика, описана конструкция разработанного для него вакуумметрического преобразователя с холодным катодом, проведены расчеты формируемых в его активной зоне скрещенных электрического и магнитного полей и происходящих в ней процессов ионизации нейтральных атомов и молекул воздушной среды. Эти процессы рассматривались при

условии, что все заряженные частицы внешней среды задерживаются и нейтрализуются электронно-ионной ловушкой, входящей в состав совмещенного первичного преобразователя. Проведена оценка диапазона вариации ионного тока вакуумметрического преобразователя для высот 150–500 км и коэффициента ионизации, который оказался весьма мал и слабо зависел от плотности воздушной среды (для высот 150–500 км изменялся примерно от $11 \cdot 10^{-7}$ до $3 \cdot 10^{-7}$), в то время как плотность воздушной среды изменялась на 3 порядка.

Конструкция электронно-ионной ловушки

Предлагаемая конструкция электронно-ионной ловушки в составе совмещенного преобразователя плотности и состава ионосферы представлена на рис.1. Она состоит из двух систем электродов, представляющих собой тонкостенные конусы, вложенные друг в друга. При этом зазоры верхней системы электродов сужаются с изменением высоты, что приводит к усилению напряженности электрического поля по мере проникновения заряженной частицы вглубь ловушки.

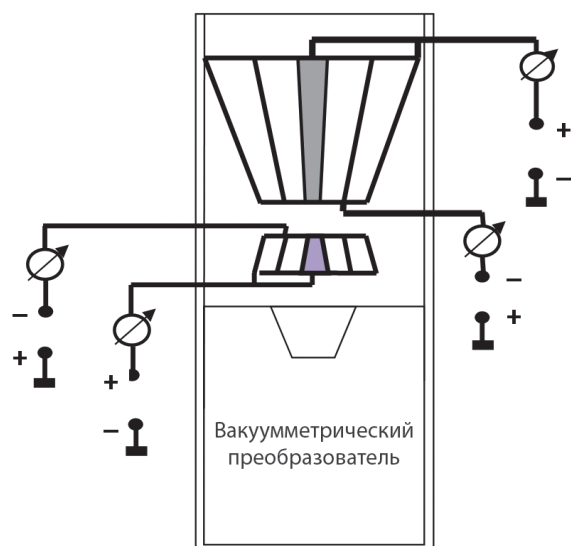


Рис.1. Конструкция электронно-ионной ловушки в составе совмещенного датчика для исследования ионосферы.

Подавляющая часть заряженных частиц обоих знаков и любых энергий (электронов, ионов и протонов) будет задерживаться верхней системой электродов (при этом ионы нейтрализуются за счет источника электропитания и далее уже в виде нейтральных частиц беспрепятственно проникают в активную зону вакуумметрического преобразователя). Проскакивать сквозь верхнюю систему электродов могут лишь высокоэнергичные заряженные частицы, начальная скорость которых направлена вдоль зазоров между электродами. Но эти частицы обязательно будут задержаны нижней системой электродов.

Поперечные размеры ловушки определяют поперечными размерами вакуумметрического преобразователя, а высота верхней системы электродов и зазоры между ними выбраны из условия нейтрализации всех заряженных частиц с энергией примерно до 40 кэВ (даже тех, начальная скорость которых направлена вдоль зазоров между электродами). Геометрические размеры электродов ловушки определены в результате пробных расчетов. Высота верхней системы электродов равна 30 мм. Сами электроды (кроме центральных) могут быть изготовлены штамповкой из латуни толщиной 0,1 мм. Центральные электроды – сплошные. Зазор между верхней и нижней системами электродов 10 мм. Все геометрические размеры электродов ловушки представлены в табл.1. В ней D_n – наружные диаметры, D_e – внутренние (с учетом толщины самих электродов).

Расчет электрических полей верхней системы электродов

Расчет электрических полей верхней системы электродов необходим для определения граничной энергии задерживаемых ею заряженных частиц, начальная скорость которых направлена вдоль зазоров между электродами. Поскольку высокой точности расчетов

Табл.1. Геометрические размеры электродов ловушки.

	Номер конуса		1	2	3
Верхняя система электродов	Верх	D_H , мм	19	13	7
		$D_{вн}$, мм	18,8	12,8	-
	Низ	D_H , мм	10	6	2
		$D_{вн}$, мм	9,8	5,8	-
Нижняя система электродов	Верх	D_H , мм	10	6	2
		$D_{вн}$, мм	9,8	5,8	-
	Низ	D_H , мм	13	9	5
		$D_{вн}$, мм	12,8	8,8	-

не требуется, то используется приближенный аналитический метод с применением известной формулы для электрического поля в коаксиальной цилиндрической системе электродов:

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{R_{вн}}{R_H}}. \quad (1)$$

где U – напряжение на электродах; r – текущий радиус; $R_{вн}$ и R_H – соответственно радиусы внутреннего и внешнего электродов.

Поскольку в нашем случае электроды не цилиндрические, а конические, причем зазор между ними с уменьшением высоты уменьшается, то расчет проводился следующим образом. Вся данная система электродов разделялась по высоте на 10 секций (каждая высотой 3 мм), и для каждой из них электроды считались цилиндрическими с диаметрами,

определяемыми для средних (по высоте) сечений этих секций. Тогда для каждой секции электрическое поле между электродами будет определяться выражением:

$$E(h) = \frac{U}{r(h) \ln \frac{R_{вн}(h)}{R_H(h)}} = \frac{1000}{r(h) \ln \frac{R_{вн}(h)}{R_H(h)}},$$

где $r(h)$ – значение текущего радиуса межэлектродного пространства; $R_H(h)$ – текущий радиус наружного электрода пары; $R_{вн}(h)$ – текущий радиус внутреннего электрода пары.

Результаты расчета поля для наружной пары электродов приведены в табл.2. График этой зависимости представлен на рис.2 (представлены зависимости у наружного электрода, внутреннего электрода и для середины зазора между ними).

Аналогично проведены расчеты электрического поля между внутренней парой электродов, а соответствующие графики представлены на рис.3.

Уравнение дрейфа частицы с массой m и зарядом q в поперечном электрическом поле с напряженностью E имеет вид:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = q E_r. \quad (2)$$

При движении заряженной частицы в поперечном электрическом поле на нее действует сила Лоренца, отклоняющая ее в поперечном направлении.

Табл.2. Расчет электрического поля для наружной пары электродов.

h , мм	$R_1(h)$, мм	$R_2(h)$, мм	$R_{cp}(h)$, мм	E_H , В/мм	$E_{вн}$, В/мм	E_{cp} , В/мм
28,5	9,175	6,334	7,755	294	425	359
25,5	8,725	5,983	7,354	304	443	373
22,5	8,275	5,632	6,953	315	462	388
19,5	7,825	5,281	6,553	325	482	403
16,5	7,375	4,930	6,152	336	503	419
13,5	6,925	4,579	5,752	349	527	438
10,5	6,475	4,228	5,351	363	555	449
7,5	6,025	3,877	4,951	376	585	480
4,5	5,575	3,256	4,550	392	619	505
1,5	5,125	3,175	4,150	407	658	535

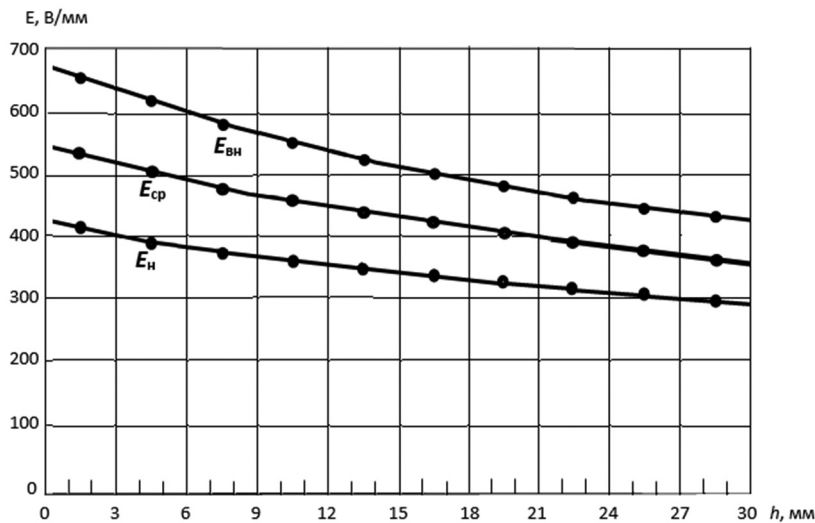


Рис.2. Зависимости $E = f(h)$ для наружной пары электродов.

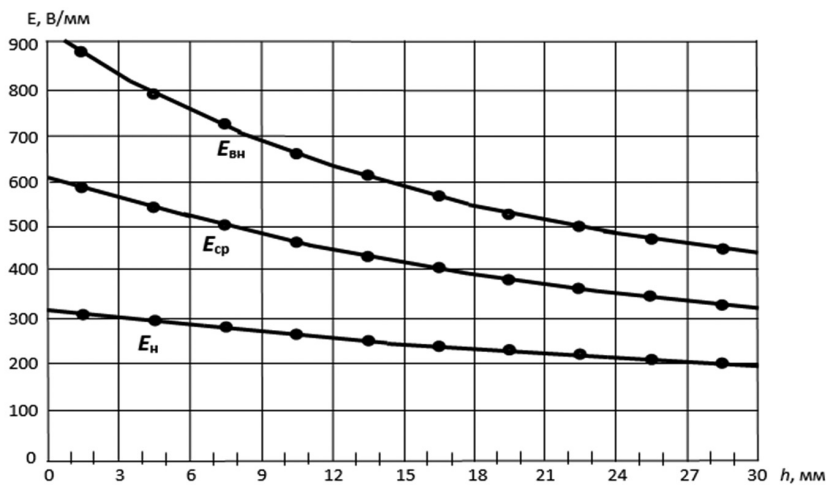


Рис.3. Зависимости $E = f(h)$ для внутренней пары электродов.

Так как наибольший пробег будут иметь частицы, падающие перпендикулярно направлению поля и вблизи одноименно заряженного электрода, то начальные условия запишем в виде: при $t = 0$: $r = r_l$; $V_r = \frac{dr}{dt} = 0$.

Тогда момент времени T , когда частица достигнет противоположного электрода, определяется из условия $r(T) = d$, где d — ширина зазора между электродами, откуда

$$T = \sqrt{\frac{2md}{qE}}. \quad (3)$$

Считая, что за время T составляющая скорости частицы по оси z остается неизменной и

равной V , находим текущую высоту ловушки $h = VT$, при которой частица достигнет противоположного электрода:

$$h = V \sqrt{\frac{2md}{qE}}.$$

Переходя от скорости к энергии частицы $E_{кин} = \frac{mV^2}{2}$,

откуда $V = \sqrt{\frac{2E_{кин}}{m}}$, и подставляя это выражение вместо скорости в формулу для h , получаем:

$$h_T = \sqrt{\frac{4E_{кин}d}{qE}}. \quad (4)$$

Находя отсюда $E_{кин}$ частицы, получаем:

$$E_{кин} = \frac{h_T^2 qE}{4d}. \quad (5)$$

Если сюда вместо текущей высоты h_T подставить полную высоту ловушки H , то получим предельную кинетическую энергию частиц, улавливаемых данной ловушкой в самом неблагоприятном случае, когда их скорость направлена вдоль зазора между электродами ловушки:

$$E_{кин max} = \frac{H^2 qE}{4d}. \quad (6)$$

Ширина зазора d и напряженность поля E на пути движения частицы будут меняться. Но поскольку нас интересуют лишь ориентировочные значения энергии, расчет будем вести для их средних величин и по высоте ловушки, и по ширине зазора для каждой пары верхних электродов.

С учетом этих допущений, и, учитывая коэффициент пересчета из джоулей в электрон-вольты: $K_n = 6,25 \cdot 10^{18}$, получаем:

- для наружной пары электродов:

$$E_{кин\ max} = \frac{30^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 450}{4 \cdot 2,5} = 6,48 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} = 40,5 \text{ кэВ};$$

- для внутренней пары электродов:

$$E_{кин\ max} = \frac{30^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 500}{4 \cdot 2,5} = 7,2 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} = 45 \text{ кэВ}.$$

Разница получается небольшая, только из-за некоторого увеличения среднего значения электрического поля между внутренней парой электродов (за счет уменьшения средних диаметров электродов).

Проводить расчет электрических полей между электродами нижней системы электродов нет необходимости, т. к. все заряженные частицы, прошедшие через верхнюю систему электродов, обязательно столкнутся с электродами нижней системы и будут нейтрализованы. При этом электроны и протоны прекратят свое существование, а ионы превратятся в нейтральные атомы и попадут в вакуумметрический преобразователь. Однако поскольку доля ионов в ионосфере на всех высотах существенно меньше доли нейтральных частиц, то при расчете тока вакуумметрического преобразователя этот эффект можно не учитывать. Тем более, что нам важно оценить лишь диапазон его возможной вариации на разных высотах.

Расчет токов электронно-ионной ловушки

Для расчета токов электронно-ионной ловушки необходимо знать высотное распределение плотности заряженных частиц всех видов и их энергии на высотах 150–500 км. При этом, поскольку скорости частиц при постоянстве прочих параметров распределены по закону Максвелла-Больцмана в достаточно широком диапазоне, будем вести расчет энергий для среднеквадратических скоростей. Что касается направления их скоростей, то по

отношению к скорости движения самого наноспутника можно считать их равновероятными. Дело в том, что на этих высотах движение заряженных частиц не является хаотическим, поскольку на высотах свыше 150 км плазма (т. е. заряженные частицы воздушной среды) является полностью замагниченной. Это означает, что частицы совершают циклоидальное вращение вокруг силовых линий магнитного поля Земли, а поскольку они имеют ненулевую составляющую скорости вдоль магнитного поля (с равной вероятностью с юга на север или с севера на юг), то движение происходит по винтовой линии с ведущим центром, движущимся вдоль магнитной силовой линии. Такое движение сохраняется в интервалах между столкновениями частиц с нейтральными частицами (которых на указанных высотах всегда больше, чем заряженных). Причем для электронов при каждом столкновении с нейтральной частицей направление скорости изменяется скачком весьма сильно, но величина скорости, а значит и кинетической энергии, практически не изменяется (поскольку масса электрона в десятки тысяч раз меньше массы молекулы или атома кислорода или азота). При столкновении электронов с положительным ионом последний захватывает электрон и превращается в нейтральную частицу. При столкновениях ионов с нейтральными молекулами происходит обмен их кинетическими энергиями при сохранении величины их суммарной энергии. Но, тем не менее, и в этом случае направление и величина скорости иона скачком изменяется, хотя и менее существенно, чем у электрона. Следует также учитывать, что в равновесном состоянии (при равных давлениях и температурах) средние кинетические энергии электронов, ионов и нейтральных частиц будут примерно равны, хотя средние скорости электронов будут примерно на два порядка выше средних скоростей нейтральных частиц и ионов (за счет разницы их масс).

Табл.3. Основные параметры атмосферы на высотах 150–500 км.

z , км	150	200	250	300	400	500
T , К	800	900	1000	1100	1400	1950
p , Па	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$0,95 \cdot 10^{-6}$	$0,55 \cdot 10^{-6}$
N_n , см ⁻³	$7 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$
N_e , см ⁻³	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^5$
$V_{кв}$, м/с	812	861	908	952	1073	1268
$E_{кв}$, эВ	0,98	1,1	1,23	1,35	1,71	5,67
$\lambda_{ср}$, М	3,37	29,5	143	337	$4,7 \cdot 10^3$	$14,7 \cdot 10^3$
ν_{nn} , с ⁻¹	222	26,9	5,85	2,33	0,21	0,079
ν_{en} , с ⁻¹	910	150	47	18	3,5	0,9
ν_{ei} , с ⁻¹	480	440	650	810	590	300
ν_{in} , с ⁻¹	60	6	2	0,7	0,2	0,05

Примечание: Скорости и энергии частиц определены с учетом их теплового равновесия. Здесь не учтены протоны и электроны, заносимые в верхние слои атмосферы солнечным ветром и из радиационных поясов Земли. Солнечный ветер состоит из протонов и электронов, испускаемых короной Солнца, и сопровождается коротковолновым фотонным излучением. Основные его параметры на расстоянии орбиты Земли от Солнца приведены в табл.4.

Высотное распределение всех этих параметров зависит от множества факторов и варьируется в значительных пределах. Поэтому будем рассматривать лишь ориентировочные распределения этих параметров. Их значения, найденные из ряда источников [2-4], представлены в табл.3.

В ней использованы следующие обозначения: T – температура; p – давление; N_n – концентрация нейтральных частиц; N_e – концентрация электронов; N_i – концентрация ионов; $V_{кв}$ – среднеквадратичная скорость нейтральных частиц; $E_{кв}$ – среднеквадратичная энергия частиц; $\lambda_{ср}$ – длина свободного пробега нейтральных частиц; ν_{nn} , ν_{en} и ν_{in} – частоты столкновений нейтральных частиц друг с другом, с электронами и с ионами на высотах 150–500 км.

Конечно подавляющая часть этих потоков тормозится магнитным полем Земли, образуя радиационные пояса. На высотах свыше 1000 км концентрация протонов превосходит концентрацию всех других частиц, и потому эту часть атмосферы называют протонос-

ферой. Но какая-то часть быстрых протонов и электронов проникает и в ионосферу. Особенно глубоко протоны солнечного ветра проникают во время солнечных вспышек. Кроме того, высокоэнергичные протоны регулярно проникают в ионосферу из радиационных поясов Земли. Именно проникновением высокоэнергичных протонов на глубину вплоть до 100 км объясняют нагрев атмосферы на высотах от 100 до 1000 км. Однако найти надежные сведения о концентрации и энергии протонов на этих высотах не удалось. Но, даже если учитывать лишь равнове-

сные значения скорости и энергии частиц, не следует забывать, что на самом деле даже для фиксированных значений температуры они распределены в весьма широком интервале, причем спад плотности распределения после наиболее вероятного значения очень пологий, что означает наличие на всех указанных высотах частиц с существенно (в несколько раз) большей энергией, чем указано в табл.3.

Тем не менее, расчет токов ловушки будем вести для условий термодинамического равновесия, при котором скорости теплового движения молекул воздуха в несколько раз меньше орбитальной скорости спутника (на низких орбитах она примерно равна 8000 м/с). Однако равновесные скорости электронов будут на 4 порядка выше скорости движения спутника. Соответственно, при расчете скорости молекул и ионов воздуха относительно ловушки их собственной тепловой скоростью можно пренебречь, а при расчете скорости электронов относительно ловушки можно пренебречь скоростью самого спутника.

Табл.4. Основные параметры солнечного ветра на орбите Земли.

Параметр	Средняя величина
Плотность, n , см ⁻³	8,8
Скорость, V , км/с	468
Температура, протоны, T_p , К	$7 \cdot 10^4$
Температура, электроны T_e , К	$1,4 \cdot 10^5$
T_e/T_p	1,9

Поэтому при расчете количества попадающих в ловушку ионов будем учитывать относительную скорость, равную орбитальной скорости ловушки $V_{orb} = 8000$ м/с. А при расчете количества попадающих в ловушку электронов будем считать ее неподвижной. К сожалению, распределение концентрации ионов по высоте найти в литературе не удалось. Известно лишь, что максимальная концентрация ионов соответствует высотам 150–200 км, тогда как максимальная концентрация электронов – высотам 250–400 км. Однако поскольку целью расчета является всего лишь определение возможных диапазонов вариации токов, то вполне можно считать, что на всех высотах плазма электронейтральна, т. е. на всех высотах концентрации электронов и ионов одинаковы. С учетом сказанного методика расчета количества захватываемых ловушкой ионов состоит в следующем.

1. Определяется площадь верхнего сечения зазоров между парами электродов верхней электродной системы. Поскольку внешние цепи положительных и отрицательного электродов разделены, то будем учитывать суммарное сечение зазора между ними:

$$S_{\lambda} = \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_e^2) = 0,785 (19^2 - 7^2) = 241,3 \text{ мм}^2 \approx 2,4 \text{ см}^2.$$

2. Определяется количество ионов N_u^h , попавших в ловушку за 1 с на разных высотах, с учетом скорости движения ловушки отно-

сительно самих частиц (условно их считаем неподвижными, поскольку тепловые скорости их движения во много раз ниже скорости движения ловушки):

$$N_u^h = N_i^h \cdot S_{\lambda} \cdot V_{\lambda}, \quad (7)$$

где $N_i^h = N^h$ – концентрация ионов (условно равная концентрации электронов) на высоте h ; V_{λ} – орбитальная скорость ловушки.

Поскольку нас интересует лишь диапазон вариации токов ловушки, то из данных табл.3 будем использовать лишь максимальное и минимальное значения концентрации ионов. Разброс здесь невелик (всего лишь десятикратный, в отличие от диапазона вариаций концентрации нейтральных частиц, составляющий 3 порядка). Соответственно, получаем:

$$N_{i \min}^h = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 2,4 \cdot 8 \cdot 10^5 = 1,92 \approx 1,9;$$

$$N_{i \max}^h = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 2,4 \cdot 8 \cdot 10^5 = 19,2 \approx 20.$$

3. Определяется количество электронов, попавших в ловушку за 1 с.

Из табл.3 следует, что даже в области максимальной ионизации (высота 300–400 км) степень ионизации атмосферы остается невысокой (n_e/n_n не выше 0,2), а с уменьшением высоты до 150 км она падает до 10^{-5} . Следовательно, будут преобладать столкновения электронов с нейтральными атомами и молекулами. Но, поскольку длина свободного пробега электронов на этих высотах на несколько порядков превышает геометрические размеры ловушки, то скорость дрейфа электронов вдоль направления электрического поля на фоне их беспорядочного теплового движения будет определяться выражением [6,7]:

$$V_{de} = -\frac{eE}{m_e}, \quad (8)$$

где e – заряд электрона; E – напряженность электрического поля; m_e – масса электрона.

Опуская знак минус и подставляя в (8) среднюю величину электрического поля между электродами ловушки E_{cp} (ее несложно оценить по рис.2 и 3 величиной $E_{cp} = 450$ В/мм =

$= 0,45 \cdot 10^6$ В/м), и выражая заряд электрона в кулонах, а его массу в кг, получаем:

$$V_{de\ cp} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,45 \cdot 10^6}{0,91 \cdot 10^{-30}} = 0,79 \cdot 10^{17} \text{ м/с}.$$

Результат получился выше скорости света ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с). Поэтому ее и примем в качестве скорости дрейфа: $V_{de} = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Определив скорость дрейфа V_{de} и оценив среднюю длину пути электронов l_{cp} от момента попадания в ловушку до момента нейтрализации, можно определить среднее время их жизни τ_i :

$$\tau_i = \frac{l_{cp}}{V_{de}}. \quad (9)$$

Из табл.1 следует, что величины зазоров между электродами верхней системы по верхнему торцу составляют 3 мм, по нижнему – 2 мм. Следовательно, средняя величина зазора составит 2,5 мм. Соответственно:

$$\tau_{e\ cp} = \frac{l_{cp}}{V_{de}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^8} = 0,83 \cdot 10^{-11} \text{ с}.$$

Убыль электронов будет непрерывно восполняться из внешней среды, т. е. минимальное и максимальное количество нейтрализуемых в ловушке за 1 с электронов будут равны:

$$N_{e\ min/c} = \frac{N_{e\ min}}{\tau_{e\ cp}} = \frac{1,9}{0,83 \cdot 10^{-11}} = 2,3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1};$$

$$N_{e\ max/c} = \frac{N_{e\ min}}{\tau_{e\ cp}} = \frac{20}{0,83 \cdot 10^{-11}} = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}.$$

4. Определяется диапазон вариации тока электронов:

$$I_{e\ min} = q_e \cdot N_{e\ min/c} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,3 \cdot 10^{11} = 3,7 \cdot 10^{-8} \text{ А} = 37 \text{ нА};$$

$$I_{e\ max} = q_e \cdot N_{e\ max/c} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,4 \cdot 10^{12} = 3,84 \cdot 10^{-7} \text{ А} = 384 \text{ нА}.$$

5. Оценка диапазона возможных величин токов нижней системы электродов.

Верхняя система электродов задерживает и нейтрализует все заряженные частицы

с энергией ниже 40 кэВ. При этом будут нейтрализованы практически все заряженные частицы на высотах от 150 до 500 км, находящиеся в термодинамическом равновесии с воздушной средой. Верхней, системой электродов будет задержана и нейтрализована и подавляющая часть заряженных частиц более высоких энергий, начальные скорости которых не направлены вдоль зазоров между электродами ловушки. Долю высокоэнергичных частиц, не задерживаемых верхней системой электродов, оценить весьма сложно, но их явно будет существенно меньше, чем частиц, задерживаемых верхней системой электронов. В основном, это будут частицы, заносимые солнечным ветром, и из радиационных поясов. Их концентрации могут резко возрастать при солнечных вспышках. Именно для нейтрализации этих частиц и служит нижняя система электродов ловушки. Но в любом случае таких частиц будет в десятки или сотни раз меньше, чем частиц, улавливаемых верхней системой электродов. Поэтому измерительные каналы нижней системы электродов должны иметь чувствительность, по крайней мере, до единиц наноампер.

Выводы

1. Поскольку в пределах ионосферы все характеристики атмосферы, включая плотность, состав, температуру, степень ионизации, радиус циклотронного вращения в магнитном поле Земли и т. д. весьма изменчивы и зависят не только от высоты, но и от времени суток, времени года, широты местности, солнечной активности и множества других факторов, влияние большинства которых плохо изучены, то это определяет актуальность разработки измерительных средств для прямых измерений плотности и состава верхних слоев атмосферы, пригодных для установки на микро- и наноспутники.

2. Основными факторами, затрудняющими использование для этих целей существующих

промышленных приборов (ионизационных вакуумметров и масс-спектрометров) являются высокая степень ионизации верхних слоев атмосферы и их сильная разреженность. Именно поэтому на этих высотах наиболее эффективной может стать специализированная научная аппаратура для определения плотности и состава ионосферы, пригодная для автономного функционирования на микро- и наноспутниках.

3. Для устранения влияния заряженных частиц на показания ионизационного вакуумметрического преобразователя к малогабаритному вакуумметрическому преобразователю должна пристраиваться электронно-ионная ловушка, не пропускающая заряженные частицы в активную зону вакуумметрического преобразователя, что позволит не только устранить погрешности вакуумметрического преобразователя в условиях ионосферы, но и

раздельно измерять концентрацию нейтральных и заряженных частиц (электронов, ионов и протонов) в условиях ионосферы.

4. В данной статье предлагается конструкция электронно-ионной ловушки для совмещенного датчика плотности и состава верхних слоев атмосферы и разработана ее математическая модель, по которой проведен расчет создаваемых в ловушке электрических полей, предельных энергий частиц, задерживаемых верхней системой электродов, и возможных диапазонов токов от нейтрализации заряженных частиц на высотах 150–500 км.

В дальнейшем предполагается, помимо представленного в данных статьях совмещенного датчика плотности и состава ионосферы, оснащать наноспутники миниатюрными сцинтилляционными детекторами гамма-излучения с полупроводниковыми ФЭУ.

Литература

1. Дрейзин В.Э., Аль Кадими Али Нури Мохаммед. Исследование ионосферы с использованием аппаратуры, размещаемой на наноспутниках. Ч. 1. Моделирование вакуумметрического преобразователя // АНРИ. 2020, № 2(101). С. 53-63.
2. Модель космоса. Научно-информационное издание в 2 т. Под ред.: Панасюка М.И., Новикова Л.С. Т. 1. Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007. 872 с.
3. Энциклопедия космоса STARBOOLS. Научные статьи. Режим доступа: <http://www.starbolls.narod.ru/index.files/25n.htm> (дата обращения: 14.02.2018).
4. ГОСТ 25645.115-84. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли.
5. Дрейзин В.Э., Аль Кадими Али Нури Мохаммед. Перспективы исследования плотности и состава верхних слоев атмосферы с помощью малых космических аппаратов. Инновационные информационные и коммуникационные технологии. Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции. 2018. С. 289-293.
6. Протасов Ю.С., Чувашев С.Н. Физическая электроника газоразрядных устройств. Плазменная электроника. Учебное пособие. В 2-х частях. Ч. 2. М.: Высшая школа, 1993. 734 с.
7. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. М.: Высшая школа, 1967. 352 с.

Research of the Ionosphere Using Equipment, Placed on Nano-Satellites Part 2. Modeling an Electron-Ion Trap

Dreyzin Valery, Al Kadhim Ali Noori Mohammed, Grimov Aleksandr
(South-West State University, Kursk, Russia)

Abstract. A design of an electron-ion trap for a combined density and composition sensor of the upper atmosphere (ionosphere) intended for placement on nanosatellites is proposed. It allows you to capture charged particles of any energy and the direction of their speed, separating their flows according to the sign of charge and energy. This ensures the correct operation of the vacuum gauge converter of this sensor and the ability to register the density of the fluxes of charged particles, separating them by sign and energy. The processes occurring in the trap are considered, the limiting energies captured by the upper trap electrode system are calculated, and the values of the trap currents in the required height range are estimated. Particles of higher energies are captured by the lower electrode system.

Key words: ionosphere, density, composition, experimental studies, inverse-magnetron converter, modeling.

В.Э.Дрейзин (профессор, д.т.н.) – ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск; (директор) – Центр коллективного пользования радиационных измерений, г. Курск; тел. (4712) 51-00-89, e-mail: dreyzin-ve@yandex.ru.

Аль Кадими Али Нури Мохаммед (аспирант) – ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск; e-mail: alinoorim@yahoо.com.

А.А.Гримов (к.т.н., доцент) – ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск; e-mail: Grimmer2007@yandex.ru.