

# Исследование ионосферы с использованием аппаратуры, размещаемой на наноспутниках

## Часть 1. Моделирование вакуумметрического преобразователя

Обоснована актуальность задачи исследования плотности и состава верхних слоев атмосферы с помощью инструментальных средств, размещаемых в микро- и нанокосмических аппаратах. Показаны актуальность и проблемы инструментальных исследований плотности и состава верхних слоев атмосферы (ионосферы). Предложено решение этих проблем путем разработки совмещенного датчика плотности и ионного состава верхних слоев атмосферы, размещаемого на наноспутниках. Приведена примерная конструкция компактного инверсно-магнетронного вакуумметрического преобразователя, на базе которого строится совмещенный преобразователь плотности и ионного состава верхних слоев атмосферы путем комплексирования его с ловушкой заряженных частиц. Эта ловушка не только обеспечивает корректность его показаний, но и позволяет определять концентрацию отрицательно и положительно заряженных частиц. Проведено моделирование ионизационных процессов в рабочей зоне вакуумметрического преобразователя.

### **Ключевые слова:**

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

**В.Э.Дрейзин,  
Аль Кадими Али Нури Мохаммед**  
(Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск)

**И**змерение плотности и состава ионосферы имеет важное значение для понимания происходящих в ней сложных процессов под действием солнечной и галактической радиации, для прогнозирования дальнейшего развития глобальной экосистемы Земли, ее взаимодействия с солнечным излучением и ближним космосом, для изучения антропогенного воздействия на нее, а также для дальнейшего освоения ближнего космоса, который все теснее вовлекается в хозяйственную деятельность человека.

Однако прямыми измерениями плотность и состав земной атмосферы исследовались лишь до высот 30–70 км, т. е. в пределах тропосфе-

ры и стратосферы (с помощью аппаратуры, устанавливаемой на высотных самолетах, стратосферных шарах-зондах и геофизических ракетах). На высотах до 20 км для измерения атмосферного давления успешно использовались деформационные манометры, на высотах до 50–70 км – теплоэлектрические вакуумметры. Но на высотах до 500–1000 км, где давление становится менее 1 Па, теплоэлектрические вакуумметры (не говоря уже о деформационных) непригодны, а использовать ионизационные вакуумметры затруднительно, поскольку на таких высотах уже велика концентрация заряженных частиц (электронов, ионов и протонов), что может привести к большим искажениям их показаний. В то же время именно на этих высотах под действием ультрафиолетовой и рентгеновской составляющих солнечного излучения происходят важные процессы, связанные с ионизацией молекул кислорода и азота, их диссоциацией и появлением атомарных ионов, воздействием солнечного ветра (протонно-электронной плазмы) на магнитосферу Земли и верхние слои атмосферы. Следствием ионизации атомов и молекул воздуха является появление в ионосфере значительной концентрации свободных электронов и ионов, а поскольку ионосферная плазма находится в геомагнитном поле, то электроны и ионы закручиваются им, совершая циклотронные вращения вдоль силовых линий геомагнитного поля.

Структура ионосферы претерпевает суточные, сезонные и солнечно-цикловые изменения. В ней протекают значительные ионосферные электрические токи и волновые процессы [1-3]. Регистрация этих изменений, их зависимостей от широты и долготы местности, времени суток, времени года, солнечной активности и других факторов чрезвычайно важны для построения моделей состояния верхних слоев атмосферы и более глубокого понимания происходящих в них процессов.

Вот почему столь важны прямые инструментальные исследования плотности и состава атмосферы на этих высотах, проводимые с помощью научной аппаратуры, размещаемой на пилотируемых и беспилотных ИСЗ (искусственный спутник земли) [4]. Но орбиты пилотируемых ИСЗ располагаются на высотах свыше 350–400 км, а высоты от 80 до 400 км, где как раз и происходят наиболее важные процессы взаимодействия атмосферы с солнечным и галактическим излучением, оказались наименее исследованными. Поэтому именно на этих высотах важную роль в исследованиях может сыграть аппаратура, размещаемая на микро- и нано-спутниках, запускаемых с международной космической станции (МКС) или с борта пилотируемых или беспилотных космических аппаратов, и в течение нескольких месяцев вращающихся вокруг Земли по постепенно снижающимся орбитам. Наноспутники в настоящее время являются наиболее дешевыми инструментальными средствами исследования ближнего космоса (верхних слоев атмосферы). Они конструируются на основе стандартизованных каркасов *CubSat*: одинарного 100×100×100 мм, двойного 100×100×200 мм или тройного 100×100×300 мм, несколько наружных граней которых образованы солнечными батареями, используемыми для электропитания размещаемой в них аппаратуры и подзарядки аккумуляторов (используемых, когда спутник заходит в тень Земли). Кроме научной аппаратуры и системы электропитания, спутник обязательно содержит радиопередатчик для передачи на Землю собранных данных, систему спутниковой навигации и, как правило, видеокамеру для наблюдения земной поверхности. Однако использовать для измерения плотности атмосферы существующие промышленные ионизационные вакуумметрические датчики не представляется возможным в силу их низкой механической прочности и недостаточной устойчивости к вибрациям,

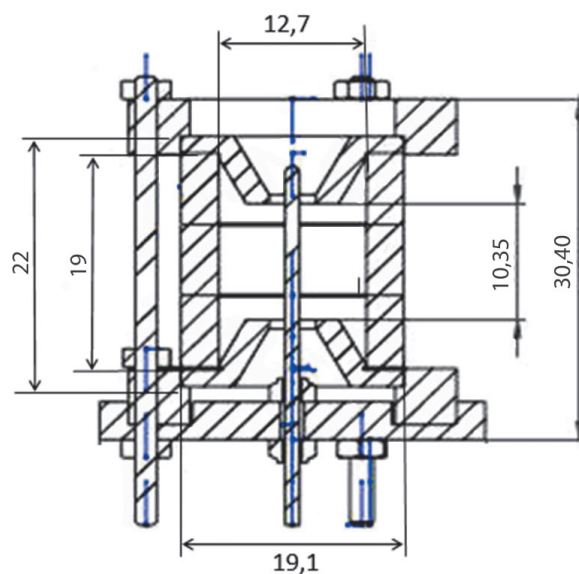
значительных массогабаритных характеристик и мощности, потребляемой от источника электропитания. Но самой важной проблемой, несомненно, является влияние заряженных частиц на показания этих датчиков в условиях ионосферы.

В данной статье описывается модернизированный инверсно-магнетронный преобразователь, приспособленный для размещения на наноспутниках, проводится анализ происходящих в нем процессов ионизации нейтральных атомов и молекул электронами, разгоняемыми в скрещенных электрическом и магнитном полях. При этом предполагается, что он будет снабжен электронно-ионной ловушкой, не пропускающей заряженные частицы из ионосферы в рабочую зону вакуумметрического преобразователя.

### Конструкция модернизированного вакуумметрического преобразователя

Наиболее подходящей конструкцией ионизационного вакуумметрического преобразователя для применения в ионосфере является инверсно-магнетронная конструкция с холодным катодом. Такой преобразователь обладает высокой механической прочностью, устойчивостью к вибрациям и существенно меньшим энергопотреблением, чем преобразователи с горячим катодом, обеспечивая при этом возможность измерения давления от 1 до  $10^{-6}$  Па, что соответствует высотам от 80 до 500 км. Основными недостатками промышленных датчиков такого типа, применительно к использованию в составе микро- и наноспутников, являются значительные массогабаритные характеристики и довольно высокое энергопотребление за счет потерь энергии на включаемом последовательно с преобразователем высокоомном балластном сопротивлении. Но эти недостатки вполне преодолимы. Гораздо сложнее исключить влияние на его показания заряженных частиц, концентрация которых на данных

высотах весьма велика. Учитывая ничтожно малый коэффициент ионизации нейтральных частиц в активной зоне этого преобразователя (порядка  $10^{-6}$ ), проникновение в его активную зону заряженных частиц из внешней среды может исказить его показания в десятки раз. Чтобы избавиться от их влияния, необходимо снабдить этот преобразователь ловушкой заряженных частиц с тем, чтобы в рабочую зону самого вакуумметрического преобразователя могли попадать только нейтральные атомы и молекулы. В этом случае показания ионизационного датчика будут корректными. Если при этом измерять токи, определяемые нейтрализацией заряженных частиц на электродах ловушки, то дополнительно можно отдельно определять концентрацию положительно заряженных частиц (положительных ионов и протонов) и отрицательно заряженных частиц (электронов и отрицательных ионов). Конструкция прототипного вакуумметрического преобразователя (без электронно-ионной ловушки) представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструкция модернизированного вакуумметрического инверсно-магнетронного преобразователя.

Снизу магнитная система закрыта диэлектрической шайбой, в которой закреплен анод.

Верхняя шайба имеет центральное отверстие для сообщения с внешней средой. Обе шайбы стянуты тремя шпильками. На рис.1 изображен прототипный образец преобразователя, предназначенный для проведения экспериментальных исследований в вакуумной камере в наземных условиях (без электронно-ионной ловушки). Его магнитная система состоит из трех серийно выпускаемых кольцевых неодимовых магнитов, состыкованных разноименными полюсами, и полюсных накладок. При этом сила притяжения колец друг к другу и полюсных накладок к ним настолько велика, что сборка не требует дополнительного крепления.

### Моделирование электрического и магнитного полей в рабочей зоне преобразователя

Анод и катод преобразователя образуют коаксиальную систему, напряженность электрического поля которой от текущего радиуса определяется формулой:

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (1)$$

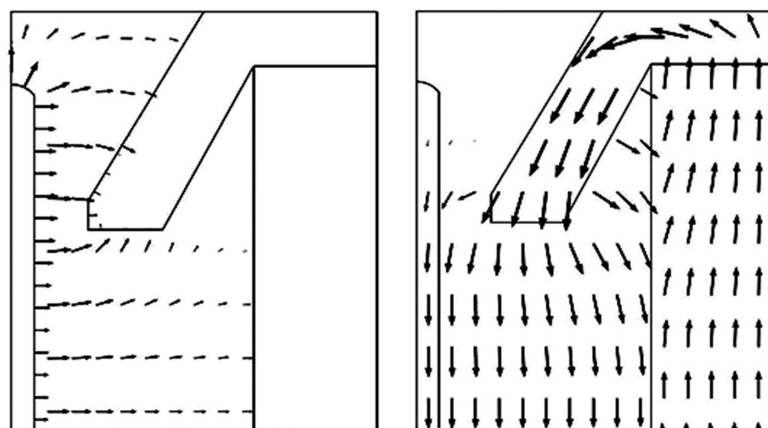
где  $R_1$  – радиус анода, составляет 0,75 мм;  $R_2$  – радиус катода, равный 6,3 мм.

Для среднего диаметрального сечения активной зоны преобразователя влияние по-

люсных накладок, находящихся под потенциалом катода, можно не учитывать, поскольку для среднего сечения оно будет взаимно компенсироваться, и вектор напряженности электрического поля будет направлен вдоль радиуса, что позволяет производить расчет поля в этом сечении по формуле (1). Однако по мере приближения к полюсным накладкам продольная составляющая поля будет возрастать. За счет этой составляющей электроны, вылетающие к полюсным накладкам, будут возвращаться в центральную зону. Это очень важно, т. к. магнитное поле на продольную составляющую скорости электронов не влияет и не может предотвратить потерю электронов (с их нейтрализацией на аноде), вылетающих из центральной зоны преобразователя.

Чтобы определить границы центральной зоны, был проведен расчет напряженности электрического и магнитного полей преобразователя в активной зоне, выполненный в системе *COMSOL*. Результаты расчета представлены на рис.2 (слева для электрического поля, справа – для магнитного). На данном рисунке с учетом симметрии электродной системы преобразователя изображена конфигурация полей для одной четверти электродной системы (стрелочки показывают направления линий напряженности электрического поля и магнитной индукции).

Учитывая, что уже на расстоянии 2 мм от среднего сечения начинает проявляться продольная составляющая электрического поля, вызванная влиянием полюсных накладок, и по мере приближения к полюсным накладкам она растет, электроны, вылетающие в эту зону, будут выталкиваться обратно в центральную зону. Что же касается магнитного поля, то



**Рис.2.** Результаты численного моделирования электрического (слева) и магнитного (справа) полей в квадранте магнитной системы преобразователя.

**Табл.1.** Зависимость напряженности электрического поля  $E$  от текущего радиуса  $r$  для среднего сечения преобразователя.

$r$ , мм	0,75	1,0	1,5	2,0	3	4	5	6,3
$E$ , В/мм	626	470	313	235	157	118	94	75

уже на расстоянии 1 мм от торца полюсной накладки оно практически однородно. Поэтому в дальнейших расчетах можно считать магнитное поле в рабочей зоне преобразователя однородным с индукцией 0,1 Тл (величина индукции в рабочем зазоре магнитной системы была измерена экспериментально).

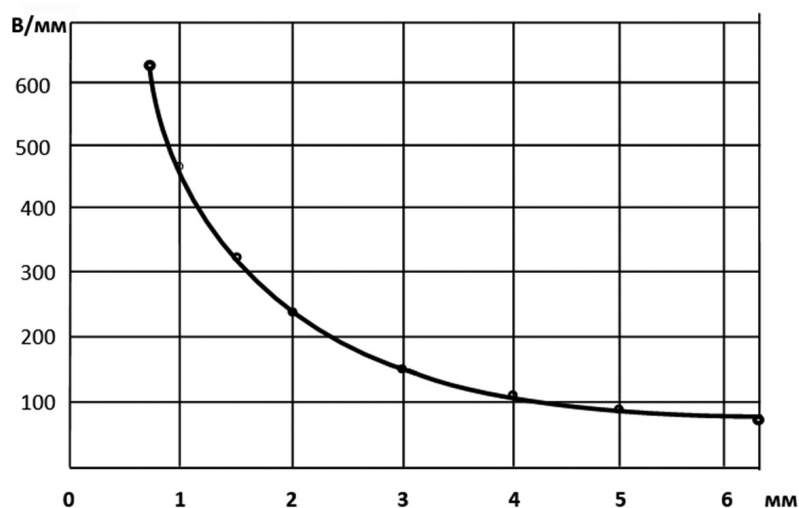
Для создания оптимальной напряженности электрического поля, обеспечивающего ударную ионизацию нейтральных атомов в рабочей зоне преобразователя, оказалось достаточным анодное напряжение в 1000 В. Результаты расчета электрического поля в межэлектродном пространстве для центрального сечения представлены в табл.1 и на рис.3.

Ионизация нейтральных частиц газа в ионизационных вакуумметрических преобразователях происходит путем неупругих электронных ударов [2]. «Затравочные» электроны в активной зоне преобразователя при наличии электронно-ионной ловушки образуются в самой активной зоне за счет вылета электронов из пристеночных слоев магнита и полюсных накладок при взаимодействии с ними гамма- и рентгеновского излучений (которые на этих высотах существенно сильнее, чем у поверхности Земли). Важно лишь не допустить автоэлектронной эмиссии в зазоре между боковой поверхностью полюсных накладок и анодом, где электрическое поле сильнее, чем в рабочей зоне, а магнитное уже не перпендикулярно электриче-

скому и не может предотвратить попадание электронов автоэлектронной эмиссии на анод. При анодном напряжении 1000 В напряженность электрического поля в этом зазоре не превышает 1000 В/мм, что на порядок ниже пороговой напряженности поля для автоэлектронной эмиссии из металлов.

### Анализ движения электронов и ионов в скрещенных электрическом и магнитном полях

Абсолютное значение средней скорости электронов, следовательно и их энергия, будет определяться аддитивной суммой тепловой (хаотической) и дрейфовой скоростей, а значит, и энергия электронов будет складываться из тепловой и дрейфовой составляющих. Поскольку дополнительную энергию электроны получают за счет электрического поля, то для ионизации важна именно дрейфовая скорость электронов. Составляющие дрейфовой скорости вдоль осей  $x$  и  $y$ , пер-



**Рис.3.** Зависимость напряженности электрического поля от текущего радиуса в среднем сечении активной зоны преобразователя.

пендикулярных продольной оси  $z$ , определяются выражениями [5,6]:

$$V_{\partial x} = -\mu_e \frac{E_x}{1 + \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}}; V_{\partial y} = \mu_e \frac{\omega_c / v_m}{1 + \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}} E_x. \quad (2)$$

Здесь  $\mu_e = \frac{e}{m_e v_{en}}$  – подвижность электронов;  $\omega_c$  – частота циклотронного вращения;  $v_{en}$  – частота столкновений электронов с нейтральными частицами.

Как следует из этих выражений, скорость дрейфа будет зависеть не только от напряженности электрического поля, но и от соотношения циклотронной частоты вращения электронов в магнитном поле и частоты их столкновений с нейтральными частицами газа. Это и понятно, поскольку от этого соотношения зависит, сколько циклов вращения успеет совершить электрон между двумя последовательными столкновениями. Поэтому для определения дрейфовой скорости электронов в скрещенных полях необходимо найти частоту циклотронного вращения электронов  $\omega_c$  и частоту их столкновений с нейтральными частицами  $v_{en}$ .

В [6] для циклотронной частоты приводится общая формула, пригодная для любой заряженной частицы:

$$\omega_c = |q| \frac{B}{m}, \quad (3)$$

где  $q$  – величина заряда частицы (в Кл);  $m$  – ее масса (в кг);  $B$  – индукция магнитного поля (в Тл).

Применительно к электрону формула примет вид:

$$\omega_c = \frac{eB}{m_e} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{0,911 \cdot 10^{-30}} \cdot B = 1,756 \cdot 10^{11} \cdot B. \quad (4)$$

Подставляя величину магнитной индукции, равную 0,1 Тл, получаем:

$$\omega_c = 1,756 \cdot 10^{11} \cdot 0,1 = 1,756 \cdot 10^{10} \text{ [с}^{-1}\text{]}.$$

Длина свободного пробега электронов (обозначим ее  $l_e$ , чтобы отличать от длины свободного пробега нейтральных частиц газа,

которая обозначена через  $\lambda$ ) согласно [3] примерно в  $4\sqrt{2}$  раз больше длины свободного пробега самих частиц газа, находящегося при тех же условиях. В диапазоне высот от 150 до 500 км длина свободного пробега нейтральных частиц газа составляет от 3,37 м до 14,7 км. Следовательно, длина свободного пробега электронов будет в пределах от 19 м до 83 км. Это на несколько порядков больше размеров активной зоны преобразователя, а значит, движение электронов в межэлектродном пространстве преобразователя вполне допустимо рассматривать как движение свободных электронов в вакууме при наличии соответствующих электрического и магнитного полей. Теперь можно подсчитать **дрейфовую скорость** и **дрейфовую энергию** электронов. Используя выражение (2) для ортогональных составляющих скорости дрейфа электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях, и учитывая тот факт, что на эти составляющие в каждый момент времени можно разложить орбитальную скорость электрона (которая нас и интересует), будем находить ее как модуль векторной скорости:

$$\begin{aligned} V_{\perp \partial} &= \sqrt{V_{\partial x}^2 + V_{\partial y}^2} = \sqrt{\frac{\mu_e^2 \cdot E^2 + \mu_e^2 \cdot E^2 \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}}{\left(1 + \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}\right)^2}} = \\ &= \frac{\mu_e \cdot E}{1 + \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}} \sqrt{1 + \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}} = \frac{\mu_e \cdot E}{\sqrt{1 + \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя сюда  $\mu_e = \frac{e}{m_e v_{en}}$ , получаем:

$$V_{\perp \partial} = \frac{e}{m_e} \cdot \frac{E}{v_{en} \sqrt{1 + \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}}}. \quad (6)$$

Величины  $e$  и  $m_e$  в этом выражении постоянны. Подставив их значения, окончательно получаем (далее индекс  $\perp$ , определяющий направление дрейфа, будем опускать):

**Табл.2.** Скорость дрейфа электронов  $V_{de}$ , дрейфовая энергия электронов  $\epsilon_{de}$  и радиус циклотронных орбит электронов  $r_{ce}$  в зависимости от значения текущего радиуса активной зоны преобразователя  $r$ .

$r$ , мм	0,8	1,0	1,5	2,0	3	4	5	6
$E \cdot 10^5$ , В/м	5	4,7	3,13	2,35	1,57	1,17	0,94	0,75
$V_{de} \cdot 10^5$ , м/с	50	47	31,3	23,5	15,7	11,3	9,4	7,5
$\epsilon_{de}$ , эВ	71,3	63	56	31,5	14	7,6	5	3,2
$r_{ce}$ , мм	0,28	0,26	0,18	0,14	0,09	0,06	0,05	0,04

$$V_{\partial} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{0,911 \cdot 10^{-30}} \cdot \frac{E}{v_{en} \sqrt{1 + \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}}} = r_c = \frac{V_{\partial}}{\omega_c} =$$

$$= 1,756 \cdot 10^{11} \cdot \frac{E}{v_{en} \sqrt{1 + \frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}}} \quad (7)$$

Подставляя численные значения  $\omega_c$  и  $v_{en}$ , получаем, что отношение их квадратов составляет более  $10^6$ . Это означает, что в подкоренном выражении (7) можно пренебречь единицей, и тогда оно еще более упростится:

$$V_{\partial} = 1,756 \cdot 10^{11} \cdot \frac{E}{v_{en} \sqrt{\frac{\omega_c^2}{v_{en}^2}}} = 1,756 \cdot 10^{11} \cdot \frac{E}{\omega_c} \quad (8)$$

Частота циклотронного вращения  $\omega_e$  электронов зависит только от индукции в воздушном зазоре и для значения индукции  $B = 0,1$  Тл равна  $\omega_e = 1,756 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ . Соответственно, вместо (8) можно записать:

$$V_{\partial} = 1,756 \cdot 10^{11} \frac{E}{1,756 \cdot 10^{10}} = 10E.$$

Имея значения дрейфовой скорости  $V_{\partial}$  и учитывая коэффициент пересчета  $K_n = 0,625 \cdot 10^{19}$  из Дж в эВ, несложно подсчитать дрейфовую энергию электронов:

$$\epsilon_{\partial} = \frac{m_e V_{\partial}^2}{2} \cdot 0,625 \cdot 10^{19} =$$

$$= \frac{0,911 \cdot 10^{-30} \cdot 0,625 \cdot 10^{19}}{2} V_{\partial}^2 =$$

$$= 0,285 \cdot 10^{-11} V_{\partial}^2. \quad (9)$$

При этом **средний радиус ларморовских (циклотронных) орбит** циклоидального вращения электронов в поперечном магнитном поле будет равен:

Результаты расчетов дрейфовой скорости  $V_{\partial}$ , дрейфовой энергии  $\epsilon_{\partial}$  и радиуса циклотронных орбит  $r_c$  от значений текущего радиуса представлены в табл.2. В ней минимальное значение текущего радиуса принято равным 0,8 мм, что на 0,05 мм больше радиуса анода, а максимальное значение равным 6 мм, что на 0,3 мм меньше внутреннего радиуса катода (вблизи катода электрическое поле близко к однородному). Из табл.2 следует, что в прианодной зоне (для значений текущего радиуса от 0,8 до 2 мм) дрейфовая энергия электронов достаточна даже для прямой ионизации нейтральных частиц воздуха, а с учетом многоступенчатой ионизации (возбужденных атомов) зона ионизации расширяется почти на всю активную зону преобразователя (до значений текущего радиуса в 5 мм).

Ионы под действием электрического поля будут дрейфовать к катоду. Для расчета скорости дрейфа ионов используются те же формулы, что и для электронов, только вместо массы электрона  $m_e$  подставляется масса молекулы воздуха (усредненная между молекулами азота и кислорода), вместо частоты столкновений электронов с нейтральными молекулами  $v_{en}$  – частота столкновений ионов с нейтральными молекулами  $v_{in}$ , а вместо частоты циклотронного вращения электронов  $\omega_e$  – частота циклотронного вращения ионов  $\omega_i$ . Результаты расчетов показывают, что, как и следовало ожидать, скорости дрейфа ионов и электронов совпадают (поскольку заряды одинаковы по величине, а столкновения ионов

и с нейтральными молекулами, и между собой в диапазоне измеряемых давлений практически отсутствуют), но энергии и радиусы циклотронных орбит для ионов примерно на 4 порядка выше, чем для электронов (поскольку именно во столько раз масса иона больше массы электрона). Поэтому все ионы сразу после их образования будут покидать активную зону преобразователя, нейтрализуясь на катоде, т. е. попадания на катод. При этом, поскольку длина свободного пробега для ионов во много раз превышает поперечные размеры активной зоны преобразователя, то при движении к катоду они не будут сталкиваться ни с нейтральными частицами, ни с электронами, ни между собой.

### Процессы ионизации нейтральных частиц в активной зоне вакуумметрического преобразователя

Пороговая энергия ионизации воздуха (с учетом соотношения между азотом и кислородом) составляет 33,9 эВ. Следовательно, **прямая одноступенчатая ионизация воздуха** электронами становится возможной при значениях текущего радиуса активной зоны преобразователя менее 2 мм (табл.2), а максимальная вероятность ионизации будет иметь место при значениях текущего радиуса от 0,8 до 1,5 мм (при этом радиусы циклотронных орбит электронов составляют от 0,25 до 0,15 мм). Но в этом случае учитывается лишь одноступенчатая ионизация, а реально будет происходить и многоступенчатая ионизация. Механизм **многоступенчатой ионизации** состоит в высокой вероятности возбуждения молекул воздуха уже в диапазоне энергий электронов свыше 2 эВ, а для возбужденных молекул потенциал ионизации снижается как раз на величину энергии возбуждения. При этом количество возбуждающих столкновений электронов с нейтральными частицами в несколько раз превышает количество ионизирую-

щих столкновений как для электронов с энергией, меньшей потенциала ионизации, так и для электронов с энергией, большей потенциала ионизации. Хотя время жизни возбужденных молекул в общем случае мало (порядка  $10^{-8}$  с), однако и для молекул азота, и для молекул кислорода возможно возбуждение метастабильных состояний с временем жизни много больше 1 с, а сечение этих реакций является достаточно высоким (примерно равным 10 барн) [5]. Соответственно, многоступенчатая ионизация становится возможной практически во всей активной зоне преобразователя.

Процесс ионизации нейтральных атомов в активной зоне инверсно-магнетронного преобразователя развивается во времени лавинообразно, поскольку при каждом ионизирующем столкновении электрона с нейтральной частицей из нее выбивается дополнительный электрон, т. е. при каждом ионизирующем столкновении происходит процесс размножения свободных электронов, которые, ускоряясь электрическим полем, приводят к дополнительной ионизации. Лавинообразное нарастание числа ионизирующих столкновений происходит до тех пор, пока не установится динамическое равновесие между числом рождающихся в единицу времени пар электрон/положительный ион и числом ионов и электронов, нейтрализующихся на аноде и катоде преобразователя. Нас, однако, интересует не переходный процесс, а равновесное состояние установившегося электрического разряда в преобразователе, т. к. о давлении мы судим по установившемуся ионному току.

Поскольку электронный и ионный токи замыкаются по единой внешней цепи, то они должны быть одинаковы. Тогда, зная скорость дрейфа ионов  $V_{di}$  и оценив среднюю длину их пути  $l_{cp}$  от момента рождения до момента гибели (т. е. нейтрализации на катоде), можно определить среднее время их жизни  $\tau_i$ :



**Табл.3.** Значения коэффициента ионизации для давлений от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$  Па.

$p$ , Па	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
$N_i^y$	49,5	$4,8 \cdot 10^2$	$4,7 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^4$
$N_n^y$	$4,6 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{11}$
$k_i$	$10,8 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$3,07 \cdot 10^{-7}$

$$\tau_i = \frac{l_{cp}}{V_{\partial icp}}. \quad (10)$$

Дрейфовая скорость ионов зависит от текущего радиуса активной зоны преобразователя. Но поскольку зона максимальной ионизации соответствует значениям текущего радиуса от 1 до 2 мм, примем ее средней, соответствующей текущему радиусу 1,5 мм, и равной  $V_{\partial i} = 31,3 \cdot 10^5$  м/с (табл.2), а в качестве средней длины пути – расстояние между этой зоной и внутренней поверхностью катода, что составляет  $l_{cp} \approx 6 - 1,5 = 4,5$  мм. Подставив эти значения в (10), получаем:

$$\tau_i = \frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{31,3 \cdot 10^5} = 1,438 \cdot 10^{-9} \approx 1,44 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Если известна экспериментально найденная характеристика преобразования, т. е. зависимость ионного тока от давления  $I_u = \varphi(p)$ , то по ней можно определить количество ионов, приходящих на катод преобразователя за единицу времени:

$$N_i^i = \frac{I}{e}. \quad (11)$$

Верхний индекс  $i$  здесь означает, что мы определяем не плотность ионов (т. е. их количество в единице объема), а их количество, приходящее за единицу времени на катод преобразователя. Учитывая, что ионы сразу после их образования достигают катода, можно найти равновесное количество свободных ионов, находящихся в плазме в активной зоне преобразователя  $N_i^y$ :

$$N_i^y = N_i^i \cdot \tau_i. \quad (12)$$

Чтобы перейти к средней объемной плотности, необходимо разделить эту величину на объем  $V$  активной зоны преобразователя:

$$N_i = \frac{N_i^y}{V}. \quad (13)$$

Активной зоной преобразователя будем считать полый цилиндр с наружным диаметром  $D = 12,7$  мм (внутренний диаметр катода) и внутренним диаметром  $d = 2$  мм (с учетом радиуса циклотронных орбит электронов в прианодной зоне). Высота активной зоны равна расстоянию между полюсными накладками и составляет  $H = 10$  мм. Тогда ее объем будет равен:

$$V = \frac{\pi}{4}(D_n^2 - d_n^2)H = \frac{3,14}{4}(12,7^2 - 2^2) \cdot 10,6 = 1308 \text{ мм}^3 = 1,308 \text{ см}^3.$$

Коэффициент ионизации молекул газа в активной зоне преобразователя будем находить как отношение определенного по измеренному значению ионного тока количеству ионов, образующихся в активной зоне в установившемся режиме, к количеству нейтральных частиц в этом объеме:

$$k_i = \frac{N_i}{N_n}. \quad (14)$$

Экспериментальные исследования преобразователя для нахождения реальных значений коэффициента ионизации проводились в вакуумной камере Курского завода «Маяк», которая позволяла получать минимальное давление до  $10^{-6}$  Па. Высотам от 150 до 500 км соответствуют давления от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $0,5 \cdot 10^{-6}$  Па. Полученные экспериментально значения коэффициента ионизации представлены в табл.3.

Из табл.3 следует, что коэффициент ионизации весьма мал, и с ростом давления коэффициент ионизации монотонно (хотя и незначительно) снижается. Это можно объяснить влиянием рекомбинации электронов и ионов,

поскольку с ростом давления ее вероятность возрастает.

### Заключение

1. Прямые инструментальные исследования верхних слоев атмосферы (ионосферы) чрезвычайно важны для построения модели экосистемы Земли, ее взаимодействия с солнечным излучением и ближним космосом, для изучения антропогенного воздействия на нее, а также для дальнейшего освоения ближнего космоса, который все теснее вовлекается в хозяйственную деятельность человека. При этом наименее исследованными являются процессы, происходящие на высотах от 100 до 500 км, т. е. в ионосфере. Их экспериментальное исследование наиболее эффективно с помощью научной аппаратуры, устанавливаемой на микро- и наноспутниках. Однако пригодных для этих целей инструментальных средств, приспособленных к автономному функционированию в условиях ближнего космоса и пригодных для установки на микро- и наноспутники, не существует.

2. Для исследования плотности и состава верхних слоев атмосферы предлагается мини-

атурный датчик, состоящий из модернизированного вакуумметрического инверсно-магнетронного преобразователя, дополненного электронно-ионной ловушкой, не пропускающей заряженные частицы в его активную зону, что, во-первых, повышает достоверность его показаний, а во-вторых, дополнительно позволяет измерять концентрацию положительных и отрицательных заряженных частиц, которая в ионосфере на несколько порядков превышает их концентрацию у поверхности Земли.

3. Проведено моделирование электрического и магнитного полей в активной зоне вакуумметрического преобразователя и процессов ударной ионизации нейтральных частиц электронами в скрещенных электрическом и магнитном полях.

4. Проведенные экспериментальные исследования макетного образца этого преобразователя в вакуумной камере позволили определить реальный коэффициент ионизации нейтральных частиц в этом преобразователе и подтвердили корректность разработанной математической модели происходящих в нем процессов.

### Литература

1. Модель космоса. Научно-информационное издание: в 2 т. Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. Т. 1: Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007. 872 с.
2. Энциклопедия космоса STARBOOLS. Научные статьи. Режим доступа: <http://www.starbolls.narod.ru/index.files/25n.htm> (дата обращения 20.11.2019).
3. ГОСТ 25645.115-84. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли.
4. 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.
5. 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.
6. 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 1. Modeling a Vacuum Transducer

Dreyzin Valery, Al Kadimi Ali Nuri Mohammed (South-West State university, Kursk, Russia)

**Abstract.** The urgency of the task of studying the density and composition of the upper layers of the atmosphere with the help of tools placed in micro- and nano-satellites vehicles is substantiated. A brief description of the structure of the atmosphere is carried out, the relevance and problems of instrumental studies of the density and composition of the upper atmosphere (ionosphere) are shown. A solution to these problems is proposed by developing a combined density and ion composition sensor for the upper atmosphere layers placed on nanosatellites. An approximate design of a compact inverse-magnetron vacuum gauge transducer is proposed, on the basis of which a combined transducer of density and ion composition of the upper atmosphere is constructed by combining it with a charged particle trap. This trap not only ensures the accuracy of its readings, but also allows you to determine the concentration of negatively and positively charged particles. The simulation of ionization processes in the working area of a compact inverse magnetron vacuum gauge transducer is carried out.

**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 Центра коллективного пользования радиационных измерений (ЦКП РИ, 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: alinoorimm@yahoo.com.*