

УДК 533.95

В. А. Шувалов¹, А. А. Лукенюк², Н. И. Письменный¹, С. Н. Кулагин¹

¹ Інститут технічної механіки Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

² Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Львів

ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ОКОЛОСПУТНИКОВОЙ СРЕДЫ НА КА «СИЧ-2»

Разработана методика, получены формулы для обработки и анализа исходных сигналов датчиков нейтральных DN и заряженных частиц DE, которые входят в состав научной аппаратуры КА «Сич-2». Показано, что исходные сигналы датчиков DN и DE позволяют замкнуть задачу диагностики ионосферной разреженной плазмы и определить полный комплекс основных кинетических параметров ионизированной среды: температуру электронов, ионов и нейтралов; концентрацию нейтральных и заряженных частиц; среднюю массу ионов; степень ионизации, неизотермичности и потенциал плазмы.

ВВЕДЕНИЕ

Состояние околоспутниковой среды в ионосфере характеризуется такими кинетическими параметрами: температура электронов T_e , ионов T_i и нейтралов T_n , концентрация нейтральных N_n и заряженных частиц $N_{i,e}$ (ионов и электронов), степень неизотермичности T_i/T_e , ионизации $\epsilon_i = N_i/(N_i + N_n)$ и потенциал пространства (плазмы) ϕ_0 . Для диагностики плазмы низкой плотности в ионосфере обычно используются зондовые методы. При этом зондовые методы диагностики потоков разреженной неизотермической плазмы в лабораторных условиях и в ионосфере при давлениях ниже, чем 0.01 Н/м^2 не замкнуты: вольтамперные характеристики электрических зондов не позволяют определить параметры тяжелых частиц — ионов и нейтралов плазмы. Для диагностики ионосферной плазмы низкой плотности традиционно используются ионные и электронные ловушки. Техника применения и интерпретация выходных сигналов таких ловушек сложна. Плоские ионные ловушки (анализаторы с тормозящим потенциалом)

используются для диагностики ионного компонента. Температура T_i и концентрация N_i ионов определяются в результате достаточно сложной математической обработки вольтамперных характеристик (интегральных энергетических спектров) с использованием метода подбора (подгонки) аналитической модели к экспериментальным данным. Аналогичным образом определяются температура T_e и концентрация N_e электронов по вольтамперным характеристикам электронной ловушки в потоке плазмы низкой плотности в лабораторных условиях и в ионосфере [3, 8, 27]. Параметры нейтрального компонента потока разреженной плазмы не определяются.

С целью повышения информативности зондовых методов при диагностике неизотермической плазмы низкой плотности в ионосфере в состав комплекса научной аппаратуры КА «Сич-2» (запущен 17.08.2011 г. на гелиосинхронную орбиту высотой 700 км и наклоном 98°) включены две зондовые системы:

1) одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра (DE) радиусом $r_p = 0.05 \text{ см}$ и длиной $l_p = 12.0 \text{ см}$ с охранным электродом радиусом $r_g = 0.2 \text{ см}$ и длиной $l_g = 12.5 \text{ см}$. При измерении вольтамперной характеристики ось симмет-

© В. А. ШУВАЛОВ, А. А. ЛУКЕНЮК, Н. И. ПИСЬМЕННЫЙ,
С. Н. КУЛАГИН, 2013

рии зонда Ленгмюра должна быть ортогональна вектору скорости \mathbf{U}_∞ полета КА;

2) детектор нейтральных частиц (DN), состоящий из двух зондов давления с инверсно-магнетронными преобразователями (ИМП) в качестве чувствительных элементов. Нормали к апертурам входных отверстий ИМП взаимно ортогональны. При измерениях нормаль \mathbf{n}_1 к апертуре входного отверстия первого датчика ИМП должна быть параллельна вектору скорости \mathbf{U}_∞ полета КА ($\theta_1 = 0$), а нормаль \mathbf{n}_2 к апертуре второго датчика ИМП — перпендикулярна к вектору скорости \mathbf{U}_∞ ($\theta_2 = \pi/2$). Углы θ_1 и θ_2 — углы между нормалью $\mathbf{n}_{1,2}$ и вектором скорости полета КА.

Зонды DN и DE разработаны и изготовлены в Институте технической механики. Система сбора научной информации разработана и изготовлена Львовским центром Института космических исследований.

Цель данной работы — на примере зондовых измерений на борту КА «Сич-2» показать, что применение ряда приемов, процедур и формул, полученных авторами для обработки и интерпретации выходных сигналов датчиков DN и DE, позволяют замкнуть задачу зондовой диагностики и определить комплекс основных кинетических параметров нейтральных и заряженных компонентов ионосферной плазмы.

ДАТЧИК DE — ОДИНОЧНЫЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ЗОНД ЛЕНГМЮРА

Применение одиночного цилиндрического зонда в качестве диагностического средства обусловлено, прежде всего, техническими удобствами эксплуатации, полнотой теории собрания зондового тока, простотой и достоверностью интерпретации вольтамперной характеристики. Ток на бесконечно длинный тонкий цилиндрический зонд ($l_p/r_p \ll 1$, $r_p/\lambda_d \ll 1$, где l_p — длина, r_p — радиус зонда; λ_d — дебаевский радиус в невозмущенной плазме), ось симметрии которого перпендикулярна к силовым линиям внешнего магнитного поля, практически не зависит от влияния последнего. При $l_p/r_e < 2\pi$, $r_p \ll r_e$ (r_e — ларморовский радиус электронов) и произвольной ориентации относительно век-

тора напряженности магнитного поля \mathbf{B} его влиянием на вольтамперную характеристику можно пренебречь [2, 15, 26, 27, 28].

Поток электронов на поверхность такого зонда при положительных потенциалах может быть представлен в виде

$$I_e = A_p j_{0e} i_e^-(\Phi_w, r_p/\lambda_d), \quad (1)$$

где $A_p = 2\pi r_p l_p$ — площадь поверхности зонда, $j_{0e} = eN_e (kT_e/2\pi m_e)^{0.5}$ — плотность теплового тока электронов на зонд, e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана, m_e — масса электрона, $i_e^- = I_e/A_p j_{0e}$ — безразмерный коэффициент электронного тока, $\Phi_w = e\varphi_w/kT_e$ — безразмерный потенциал зонда, $\varphi_w = \varphi_p - \varphi_0$ — потенциал зонда φ_p относительно потенциала плазмы φ_0 .

Для широкого диапазона параметров системы «плазма — зонд» ток электронов на цилиндрический зонд может быть определен из соотношения [23]

$$I_e = 9.32 \cdot 10^{-6} \frac{l_p}{r_p} \left(\frac{kT_e}{e} \right)^{3/2} \left(\frac{r_p}{\lambda_d} \right)^2 i_e^-(\Phi_w). \quad (2)$$

При $r_p/\lambda_d \leq 2.0$ и $\Phi_w \geq 5$ ток ограничен орбитальным движением электронов в поле зонда и для значений коэффициента i_e^- может быть использована аппроксимация

$$i_e^- \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} (1 + \Phi_w)^{0.5}, \quad (3)$$

а при $\Phi_w \geq 10$

$$i_e^- \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \Phi_w^{0.5}. \quad (4)$$

Расчетные зависимости $i_e^- = i_e^-(r_p/\lambda_d, \Phi_w)$ и i_e^- от $(r_p/\lambda_d)^2 i_e^-$ при $5 \leq \Phi_w \leq 100$ и $0.01 \leq r_p/\lambda_d \leq 100$ приведены в работах [21, 23].

Собрание ионного тока при высоких отрицательных потенциалах поперечного цилиндрического зонда в бесстолкновительном потоке неизотермической разреженной плазмы характеризует зависимость

$$I_i = A_p j_{ei} i_i^+(\Phi_w, r_p/\lambda_d, T_i/T_e, S_i), \quad (5)$$

где $j_{ei} = eN_i (kT_e/2\pi M_i)^{0.5}$ — плотность хаотического ионного тока, $S_i = U_\infty/\sqrt{2kT_i/M_i}$ — скоростное отношение, M_i — масса иона, i_i^+ — безразмерный коэффициент ионного тока.

Величина i_i^+ определена в работах [9, 25] для широкого диапазона значений величин Φ_w, S_i при $T_i/T_e = 0.5$ и 1.0 .

Для фиксированных значений $\Phi_w = 25, T_i/T_e = 0.5$ и 1.0 зависимости $i_i^+(r_p/\lambda_d, S_i)$ приведены в работе [22]. При $r_p/\lambda_d \leq 2.0; \Phi_w \geq 10$ и $0 \leq S_i \leq 10$ расчетные значения коэффициента i_i^+ из [9, 22, 25] с погрешностью не более 3 % аппроксимирует зависимость, характеризующая режим собирания тока, ограниченного орбитальным движением ионов в электрическом поле зонда:

$$i_i^+ = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\beta S_i^2 + \Phi_w}, \quad (6)$$

где $\beta^{0.5} S_i = U_\infty / \sqrt{2kT_e/M_i}$, $\beta = T_i/T_e$.

Зависимости (2)–(6) позволяют использовать линейность участков насыщения электронного $I_e^2(\Phi_w)$ и ионного $I_i^2(\Phi_w)$ токов вольтамперной характеристики одиночного цилиндрического зонда в широком диапазоне значений параметра r_p/λ_d для определения концентрации заряженных частиц N_e и потенциала ϕ_0 плазмы низкой плотности из соотношений

$$N_e = \left(\frac{\pi^2 m_e}{2A_p^2 e^3} \frac{dI_e^2}{d\phi_p} \right)^{0.5} \quad (7)$$

и

$$\phi_0 = \phi_p - I_e^2 \left(\frac{dI_e^2}{d\phi_p} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Процедура вычисления концентрации заряженных частиц N_e с использованием соотношения (7) позволяет пренебречь влиянием тока фотоэмиссии в ионосферной плазме: плотность потока фотоэлектронов, покидающих положительно заряженный зонд ($\phi_p \gg \phi_0$), пренебрежимо мала; при отрицательных потенциалах зонда ($\phi_p < 0$) плотность фототока не зависит от потенциала, и число фотоэлектронов, покидающих поверхность зонда, постоянно [18, 20]. Это упрощает задачу, так как знание потенциала плазмы ϕ_0 не требуется. При условии квазинейтральности плазмы $N_e \approx N_i$ из (7) и

$$N_i = \left(\frac{\pi^2 M_i}{2A_p^2 e^3} \frac{dI_i^2}{d\phi_p} \right)^{0.5} \text{ следует соотношение для оценки средней массы ионов потока разреженной плазмы} \quad (9)$$

$$\frac{M_i}{m_e} = \left(\frac{dI_e^2}{d\phi_p} \right) / \left(\frac{dI_i^2}{d\phi_p} \right).$$

Температура электронов T_e может быть определена традиционным способом из соотношения $T_e = \frac{e}{k} \left(\frac{d \ln I_e}{d\phi_p} \right)^{-1}$ или с использованием зависимостей

$$T_e = \frac{4e}{\pi k} \frac{I_{0e}^2}{dI_e^2/d\phi_p} \quad (10)$$

и

$$T_e = \frac{e}{k} \left(\frac{1}{I_e} \frac{dI_{0e}}{d\phi_p} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Величина $I_{0e} = A_p j_{0e}$ характеризует электронный ток при $\Phi_w = \phi_p - \phi_0 = 0$. Измерения электронного тока при положительных потенциалах зонда ($\phi_p > 0$) в ионосфере [15, 27] осуществляются, как правило, при малых, но конечных значениях скоростного отношения для электронов: $0.001 \leq S_e \leq 0.1$ ($S_e = U_\infty / \sqrt{2kT_e/m_e}$). При положительных потенциалах зонда $e\phi_p \leq M_i U_\infty^2 / 2$ на собирание электронов оказывает направленное движение ионов плазмы. При определении температуры T_e и концентрации N_e по электронной ветви вольтамперной характеристики влияние направленного движения разреженной плазмы характеризуют поправочные коэффициенты K_{T_e} и K_{N_e} [21]. Концентрация электронов N_e , вычисленная по соотношению (7), равна

$$N_{ej} = K_{N_e} N_{e0}, \text{ где } K_{N_e} = \left(\frac{dI_{ej}^2}{d\phi_p} / \frac{dI_{e0}^2}{d\phi_p} \right)^{0.5}, \text{ а } N_{e0}$$

соответствует условиям при $S_e = 0$. Для температуры электронов, измеренной традиционным способом, получено выражение $T_{ej} = K_{T_e} T_{e0}$, где

$$K_{T_e} = \frac{d \ln I_e}{d\phi_p} / \frac{d \ln I_{e0}}{d\phi_p} \text{ (индекс «j» соответствует измерениям при } S_e \neq 0 \text{).}$$

Зависимости $K_{T_e}(S_e)$ и $K_{N_e}(S_e)$ для цилиндрического зонда при $0 \leq S_e \leq 0.1$ приведены в работе [21].

Приведенные выше формулы позволяют в предположении максвелловского распределения для заряженных частиц определять по вольтамперной характеристике одиночного цилиндрического зонда концентрацию заряженных частиц $N_e \approx N_i$, температуру электронов T_e и потенциал плазмы ϕ_0 .

ДАТЧИК DN — ДЕТЕКТОР НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Датчик DN предназначен для определения и контроля параметров нейтрального компонента высокоскоростного потока разреженной плазмы в режиме бесстолкновительного обтекания. Конструктивно датчик DN содержит два ИМП-зонда давления. Схема такого зонда давления с инверсо-магнетронным преобразователем с замкнутой камерой ионизации приведена в работе [21]. Для использования на КА «Сич-2» преобразователь помещен в корпус, выполняющий одновременно функции защитного и магнитного экранов. Внешний диаметр корпуса $D_h = 50$ мм, длина $L_h = 85$ мм, диаметр входного отверстия трубки $d_{ch} = 7$ мм, длина трубки $L_{ch} = 22$ мм.

Газ внутри зонда находится в равновесии, которое не нарушается потоком частиц, влетающих через входное отверстие. Давление газа в резервуаре зонда определяется выражением [10]

$$P_{pp} = P_n \sqrt{T_w / T_n} B(S_n \cos \theta) \Psi(S_n, l, \theta), \quad (12)$$

где $P_n = N_n k T_n$ — давление нейтрального компонента в невозмущенном потоке плазмы, T_w — температура стенок корпуса зонда,

$$B = \exp(-S_n^2 \cos^2 \theta) + \sqrt{\pi} S_n \cos \theta (1 + \operatorname{erf} S_n \cos \theta),$$

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz$$

— интеграл вероятности, θ — угол между вектором скорости \mathbf{U}_∞ и нормалью \mathbf{n} к плоскости входного отверстия зонда, $S_n = U_\infty / \sqrt{2kT_n / M_n}$ — скоростное отношение потока нейтральных частиц, $\Psi = W(S_n, l, \theta) / W(0, l)$, $W(S_n, l, \theta)$ — коэффициент Клаузинга для частиц, поступающих в резервуар зонда через трубку, $W(0, l)$ — коэффициент Клаузинга для частиц, уходящих из резервуара зонда, $l = L_{ch} / d_{ch}$.

Для двух зондов давления датчика DN при $\theta_1 = 0$ и $\theta_2 = \pi/2$ из (12) следуют выражения

$$\frac{P_1}{P_2} = \sqrt{T_{w1} / T_{w2}} B_1(S_n) \frac{\Psi_1}{\Psi_2} \quad (13)$$

и

$$P_2 = P_n \sqrt{T_{w2} / T_n} \Psi_2. \quad (14)$$

В ионосфере при $S_n \geq 2.5$ из (13) и (14) получим соотношения для определения температуры

T_n и концентрации N_n нейтральных частиц в плазме низкой плотности:

$$T_n = \xi \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 \frac{T_{w1}}{T_{w2}} \frac{\Psi_1}{\Psi_2}, \quad (15)$$

$$N_n = P_1 / k \sqrt{\xi T_{w1}} \Psi_1, \quad (16)$$

или

$$N_n = P_2 / k \sqrt{T_n T_{w2}} \Psi_2. \quad (17)$$

Здесь $B_1 = B(S_n, \theta_1 = 0)$, $P_1 = P_{pp}(\theta_1 = 0)$,

$$P_2 = P_{ps}(\theta_2 = \pi/2), \quad \xi^{0.5} = U_\infty \sqrt{2\pi M_n / k}.$$

Зависимости функций $\Psi_1(S_n, l, \theta_1 = 0)$ и $\Psi_2(S_n, l, \theta_2 = \pi/2)$ приведены в работе [10]. Индивидуальная характеристика ИМП зонда для нейтрального компонента может быть представлена в виде [4]

$$P = a(q_j I_c)^b, \quad (18)$$

где P — давление окружающей среды, I_c — ток разряда ИМП, a, b — постоянные ИМП, q_j — коэффициент чувствительности магнитораэрозных вакуумметров для частиц сорта j .

Соотношения (15) — (17) позволяют оценить по выходным сигналам датчика DN значения параметров S_n , T_n и N_n нейтрального компонента потока ионосферной плазмы, а в совокупности с параметрами электронов T_e , N_e и ϕ_0 , вычисленными по вольтамперной характеристике одиночного цилиндрического зонда (датчика DE) — практически полный комплекс основных кинетических параметров неравновесной плазмы низкой плотности в ионосфере.

Таким образом, применение датчиков DN и DE позволяет в приближении $T_i \approx T_n$ определить полный комплекс параметров ионосферной плазмы, включая степени неизотермичности $T_i \approx T_e$ и ионизации среды $\varepsilon_i = N_i / N_i + N_n$. По температуре T_i ионов разреженной плазмы процедура диагностики не замкнута.

СТЕПЕНЬ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ. ТЕМПЕРАТУРА ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ (ИОНОВ И НЕЙТРАЛОВ)

В работе [12] для слабоионизованной разреженной плазмы по результатам анализа энергообмена при столкновениях между заряженными и нейтральными частицами получена зависи-

мость, устанавливающая связь между температурами ионов, электронов и нейтралов:

$$T_e = \frac{\lambda_{en}^2 \delta_{in}}{\lambda_{in}^2 \delta_{en}} T_i (T_i - T_n), \quad (19)$$

где $\lambda_{\alpha n}$ — средняя длина свободного пробега при столкновениях заряженных и нейтральных частиц, $\delta_{\alpha n}$ — средняя доля энергии, теряемой при столкновениях заряженных частиц с нейтралами ($\alpha = e, i$).

С учетом $\lambda_{en}^2 = 1 / N_n^2 \sigma_{en}^2$ и $\lambda_{in}^2 = T_i / N_n \sigma_{in}^2 (T_i + T_n)$ из выражения (19) следует

$$T_i = \left(T_n^2 + \frac{\sigma_{en}}{\sigma_{in}} \frac{\delta_{en}^2}{\delta_{in}^2} T_e^2 \right)^{0.5} \quad (20)$$

или при $\delta_{in} = \frac{8}{3} \frac{M_i M_n}{(M_i + M_n)^2} \left(1 - \frac{T_n}{T_i} \right)$ [1, 13, 17, 21]:

$$\left(\frac{T_e}{T_i} \right)^2 = \frac{0.67 \sigma_{in}^2}{\delta_{en} \sigma_{en}^2} \left(1 - \frac{T_n}{T_i} \right) \left(1 - \frac{T_n}{T_i^2} \right), \quad (21)$$

где $\sigma_{\alpha n}$ — эффективные сечения соударений заряженных и нейтральных частиц. Значения $\sigma_{\alpha n}$ и $\delta_{\alpha n}$ для широкого диапазона энергий частиц и пар «ион — нейтрал» и «электрон — нейтрал» приведены в работах [6, 13, 16, 17], а значения $\delta_{en}(T_e)$ — в работах [14, 17, 19, 24].

Для атомарного кислорода в ионосфере $\delta_{eO} = 82.5 / (T_n T_e^{0.5})$ [5, 11] из (21) следует

$$T_n (T_i^2 - T_n^2) \left(1 - \frac{T_n}{T_i} \right) = 123 T_e^{3/2} \sigma_{en}^2 / \sigma_{in}^2. \quad (22)$$

С другой стороны, в работе [5] зависимость между температурами заряженных и нейтральных частиц плазмы представлена в виде

$$T_i = T_n + \frac{T_e - T_n}{1 + \frac{\delta_{in} v_{in}}{\delta_{ei} v_{ei}}}, \quad (23)$$

где

$$v_{in} = N_n \sigma_{in} \sqrt{\frac{8k}{\pi M_n} (T_i + T_n)} \quad \text{и} \quad v_{ei} = 3.7 N_i \ln \Lambda / T_e^{3/2}$$

— частоты соударений для пар «ион — нейтрал» и «электрон — ион», $\ln \Lambda$ — кулоновский логарифм [16].

Зависимости (20) — (23) позволяют замкнуть задачу диагностики ионосферной плазмы: оценить величину температуры ионов T_i , если зна-

чения T_e и T_n определены по результатам зондовых измерений датчиков DN и DE.

ДИАГНОСТИКА ОКОЛОСПУТНИКОВОЙ ПЛАЗМЫ НА КА «СИЧ-2»

Приведенные выше формулы и соотношения использовались для оценки кинетических параметров околоспутниковой плазмы на КА «Сич-2». Результаты измерений на орбите (один виток 23.11.2011 г.) представлены на рис. 1. В результате

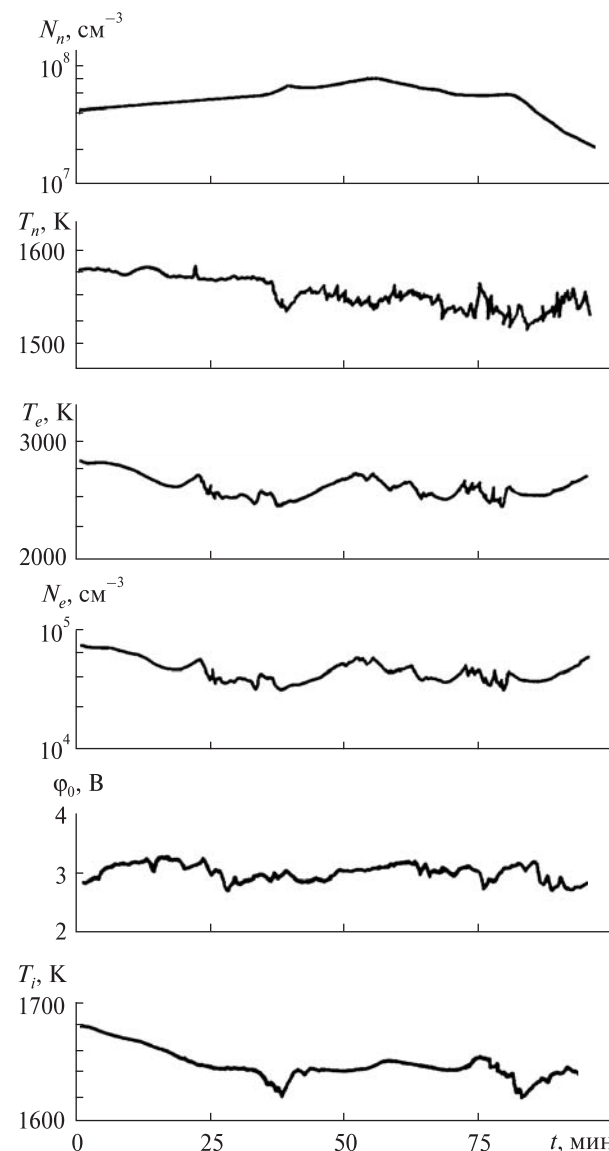


Рис. 1. Вариации кинетических параметров нейтральных и заряженных частиц на КА «Сич-2» (виток 23.11.2011 г., UT₀ = 20 ч 56 мин 36 с)

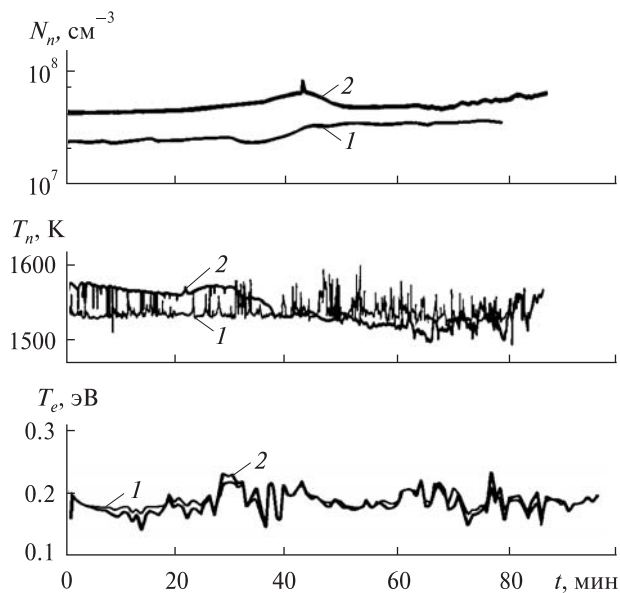


Рис. 2. Временные вариации концентрации, температуры нейтральных частиц и «холодных» электронов: 1 — зондовые измерения на КА «Сич-2» 1 сентября 2011 г. (начало $UT_0 = 00$ ч 23 мин 37 с), 2 — летные испытания 14 сентября 2011 г. (начало $UT_0 = 00$ ч 57 мин 15 с)

обработки выходных сигналов ИМП 1,2 датчика DN и вольтамперной характеристики датчика DE получены временные распределения температуры T_n и концентрации N_n нейтральных частиц, температуры T_e и концентрации N_e электронов, температуры T_i ионов; значение средней массы ионов $M_i \approx 15.6$. При вычислениях значений T_i использовались уравнения (22) и (23), приближения $\delta_{e0} \approx 82.5 / (T_n T_e^{0.5})$, $\delta_m = 2 / 3(1 - T_n / T_i)$, $\sigma_{e0} = 3.3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ и $\sigma_m^{O^+ - O} \approx 4.6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ из [5, 11]. При вычислениях T_i по (23) использовались три итерации, нулевое приближение соответствует упругим соударениям. Разброс вычисленных по (22) и (23) значений T_i не превосходит 3%. Для сравнения на рис. 2 приведены временные распределения параметров нейтрального и заряженного компонентов околоспутниковой плазмы, вычисленные по выходным сигналам датчиков DN и DE при проведении летных испытаний 1 и 14 сентября 2011 г., кривые 1 и 2 соответственно. Измерения на КА «Сич-2» проводились со сдвигом по времени $\Delta UT \approx 34$ мин (практически в одно и то же время суток). Приведенные на рис. 2

значения параметров околоспутниковой плазмы хорошо согласуются между собой. Кроме того, полученные значения кинетических параметров околоспутниковой плазмы согласуются с данными [7] ($h = 700$ км, максимум солнечной активности) и результатами измерений на КА DEMETER [27] на высоте $h = 750$ км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика, получены формулы для обработки и анализа выходных сигналов датчика DN — детектора нейтральных частиц и датчика DE — одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра при диагностике разреженной плазмы в ионосфере. На примере диагностики околоспутниковой среды на орбите КА «Сич-2» показано, что выходные сигналы датчиков DN и DE дают возможность определить комплекс основных кинетических параметров плазмы низкой плотности в ионосфере, таких как температуры электронов, ионов и нейтралов, концентрации нейтральных и заряженных частиц, средняя масса ионов, степени ионизации, неизотермичности и потенциал плазмы. Приведенные формулы и процедуры позволяют замкнуть задачу диагностики потоков ионосферной разреженной плазмы зондовыми методами, повысить их точность и информативность.

1. Альвен Г., Фельтхаммар К. Г. Космическая электродинамика. — М.: Мир, 1967. — 260 с.
2. Бахит Ф. Г., Дюжев Г. А., Циркель Б. И. и др. Зондовая диагностика низкотемпературной плазмы в магнитном поле. III. Электронный ток насыщения зондовой характеристики // Журн. технической физики. — 1977. — 47, № 11. — С. 2269—2279.
3. Бойд Р. Зонды Ленгмюра на космическом корабле // Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. — М.: Мир, 1971. — С. 506—568.
4. Вакуумная техника. Справочник / Фролов Б. С., Минайчев В. Е., Александров А. Т. и др. — М.: Машиностроение, 1985. — 360 с.
5. Гуревич А. В., Шварцбург А. В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — 272 с.
6. Дресвин С. В., Донской А. В., Гольдфарб В. М., Клубник В. С. Физика и техника низкотемпературной плазмы. — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.
7. ECSS-E-10-04A. Параметры космического пространства. — Введен 21.01.2000. — Noordwijk: ESTEC, 2000. — 219 с.

8. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969. — 291 с.
9. Котельников В. М. Вольтамперные характеристики цилиндрического зонда в потоке столкновительной и бесстолкновительной плазмы // Теплофизика высоких температур. — 2008. — **46**, № 3. — С. 342—347.
10. Кошмаров Ю. А., Рыжов Ю. А., Сvirщевский С. Б. Экспериментальные методы в механике разреженных газов. — М.: Машиностроение, 1981. — 200 с.
11. Криберг И. А. Кинетика электронов в ионосфере и магнитосфере Земли. — М.: Наука, 1978. — 215 с.
12. Ленерт Б. Плазма космического и лабораторного масштабов // Физика плазмы и магнитная гидродинамика. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — С. 65—134.
13. Мак-Даниель И. Процессы столкновений в ионизованных газах. — М.: Мир, 1967. — 832 с.
14. Мессу Т., Бархон Е. Электронные и ионные столкновения. — М.: Изд-во иностр. лит., 1959. — 567 с.
15. Москаленко А. М. К теории цилиндрического зонда // Космич. исследования. — 1979. — **17**, № 1. — С. 51—59.
16. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987. — 592 с.
17. Саттон Дж., Шерман А. Основы технической магнитной газодинамики. — М.: Мир, 1968. — 402 с.
18. Смирнова В. В. К теории горячего зонда и фотозонда // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1966. — **6**, № 2. — С. 276—283.
19. Хаксли Л., Кроптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. — М.: Мир, 1977. — 672 с.
20. Шотт Л. Электрические зонды // Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. — М.: Мир, 1971. — С. 459—495.
21. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др. Контактная диагностика высокоскоростных потоков разреженной плазмы // Теплофизика высоких температур. — 2005. — **43**, № 3. — С. 343—351.
22. Шувалов В. А., Лазуцков Д. Н., Кочубей Г. С., Носиков С. В. Диагностика нейтрального и заряженного компонентов потока разреженной плазмы калориметрическими зондами // Приборы и техника эксперимента. — 2010. — **53**, № 3. — С. 80—87.
23. Шувалов В. А., Письменный Н. И., Приймак А. И., Кочубей Г. С. Зондовая диагностика потоков разреженной частично диссоциированной плазмы // Приборы и техника эксперимента. — 2007. — **50**, № 3. — С. 92—100.
24. Энгель А. Ионизованные газы. — М.: Физматгиз, 1959. — 332 с.
25. Godard R., Laframboise J. G. Total current to cylindrical collectors in collisionless plasma flow // Planet. and Space Sci. — 1983. — **31**, N 3. — P. 275—283.
26. Laframboise J. G., Sonmor L. J. Current collection by probes and electrodes in space magnetoplasma: A Review // J. Geophys. Res. — 1993. — **98**, N A1. — P. 337—357.
27. Lebreton J. P., Sverak S., Travnicek P., et al. The ISL Langmuir probe experiment processing on board DEMETER: Scientific objectives description and first results // Plan. and Space Sci. — 2006. — **54**. — P. 472—486.
28. Szuszczewicz E. P., Takacs P. Z. Magnetosheath effects on cylindrical Langmuir probes // Phys. Fluids. — 1979. — **22**, N 12. — P. 2424—2429.

Стаття надійшла до редакції 22.10.12

В. О. Шувалов, А. А. Лукенюк, М. І. Письменный,
С. М. Кулагін

ЗОНДОВА ДІАГНОСТИКА НАВКОЛОСУПУТНИКОВОГО СЕРЕДОВИЩА НА КА «СІЧ-2»

Розроблено методику, отримано формули для обробки та аналізу вихідних сигналів давачів нейтральних DN і заряджених часток DE, які входять до складу наукової апаратури КА «Січ-2». Показано, що вихідні сигнали давачів DN і DE дозволяють замкнути задачу діагностики іоносферної розрідженої плазми та визначити повний комплекс основних кінетичних параметрів іонізованого середовища: температуру електронів, іонів і нейтралів; концентрацію нейтральних і заряджених часток; середню масу іонів; ступені іонізації, неізотермічності та потенціал плазми.

V. A. Shuvalov, A. A. Lukenjuk, N. I. Pismenny,
S. N. Kulagin

PROBE DIAGNOSTICS OF LABORATORY AND IONOSPHERIC RAREFIED PLASMA FLOWS

We developed a procedure and elaborated equations for the processing and analysis of output signals from the detectors of neutral particles, DN, and charged particles, DE, which are parts of the scientific devices of the spacecraft “Sich-2”. The procedure allows one to determine the complex main kinetic parameters of the spacecraft environment.