

РАДИОПРОЗРАЧНОСТЬ ИОНИЗОВАННОЙ ОБОЛОЧКИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ВОКРУГ ГИПЕРЗВУКОВОГО ОБЪЕКТА В МЕЗОСФЕРЕ

В.И. Тамбовцев, И.А. Шевяков, А.А. Литвинов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Рассматриваются основные свойства ионизированной газовой оболочки, образующейся вокруг объектов, движущихся в мезосфере с гиперзвуковой скоростью с целью определения частотного диапазона для радиосвязи.

Ионизация осуществляется за счёт энергии ударной волны. Толщина переходного слоя определяется межмолекулярными расстояниями. Предельное сжатие связано с адиабатой Гюгонио и зависит от количества степеней свободы – для двухатомного газа равно 6. Оставшаяся при торможении энергия идёт на нагрев газа в ударной волне и, согласно Саха, на ионизацию. Температурное поле оболочки с учётом коэффициента теплопереноса на порядок выше температуры поверхности объекта. Вблизи носовой части, перегрев которой, например, для Бурана достигает 1400 °С, температура газа превышает 10 000 °С – это на высоте 63 км при скорости 17 махов.

В оболочке находится ионизованный газ – трёхкомпонентная среда атомов (молекул), ионов и электронов с малой степенью ионизации. Основными характеристиками являются частота столкновений электронов с атомами и плазменная частота. Если плазменная частота превышает частоту столкновений, то среда является газовой плазмой. Если частота столкновений превышает значение плазменной частоты, то газ не достигает плазменного состояния. Плазменная частота является критической: выше критической частоты в газовой плазме преобладают диэлектрические свойства, а до критической частоты – преобладают проводящие свойства.

Плазменная оболочка радиопрозрачна, если значение скин-слоя превышает нормальную к корпусу толщину оболочки. Расчёты и модельные испытания показывают, что прозрачность радиоканала обеспечивается в сантиметровом диапазоне, где $f > 9$ ГГц.

Ключевые слова: радиопрозрачность, мезосфера, ударная волна, ионизованный газ, плазма, скин-слой, гиперзвуковой объект.

Введение

Мезосфера располагается выше 40–50 км и ниже 80–90 км. При вхождении космического объекта в мезосферу, вокруг него образуется оболочка из раскаленного газа, обладающего плазменными свойствами. Ввиду специфических радиофизических свойств оболочки происходит нарушение радиосвязи со спускаемым аппаратом в широком диапазоне частот. Расследование крушения корабля «Колумбия» при торможении было затруднено из-за отсутствия данных радиообмена при полёте на высотах ниже слоя E ионосферы (катастрофа произошла 1 февраля 2003 года при снижении корабля до 75 км). Подобные проблемы могут возникнуть и при движении в мезосфере гиперзвуковых экспериментальных аппаратов. Плазменная оболочка увеличивает эффективное сечение отражения радиолокационного сигнала, что наблюдается и при вторжении метеоров в относительно плотные слои верхней части мезосферы.

Разогрев газа в ударной волне

При обтекании сверхзвуковым газовым потоком твёрдого тела на его передней кромке образуется ударная волна, а иногда не одна, в зависимости от формы тела. На рис. 1 видны ударные

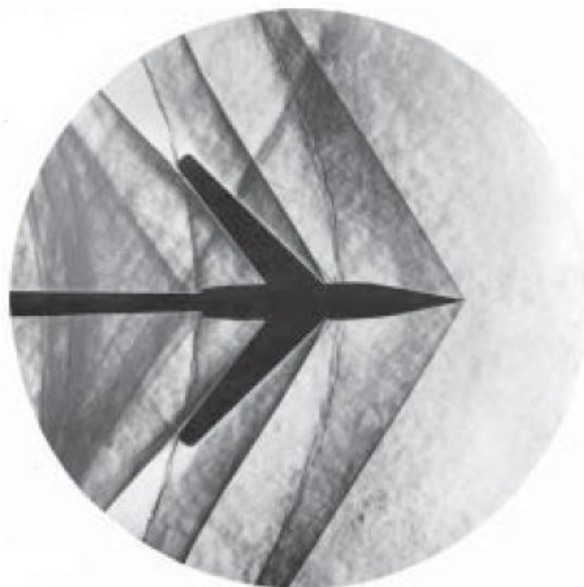


Рис. 1. Ударные волны для модели летательного аппарата в сверхзвуковом потоке [1]

верхностью разрыва. За фронтом газ образует по направлению Z слоистую структуру и внутри слоёв газ однородный. Так называемая адиабата Гюгоньо идёт круче, чем дозвуковая адиабата. Для гиперзвуковых УВ (число Маха $M = v/a$ превышает 6) для плотности ρ получается:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)}{(\gamma - 1)}. \quad (1)$$

Здесь γ – показатель адиабаты, индекс «0» – для невозмущённой части, «1» – для УВ [3].

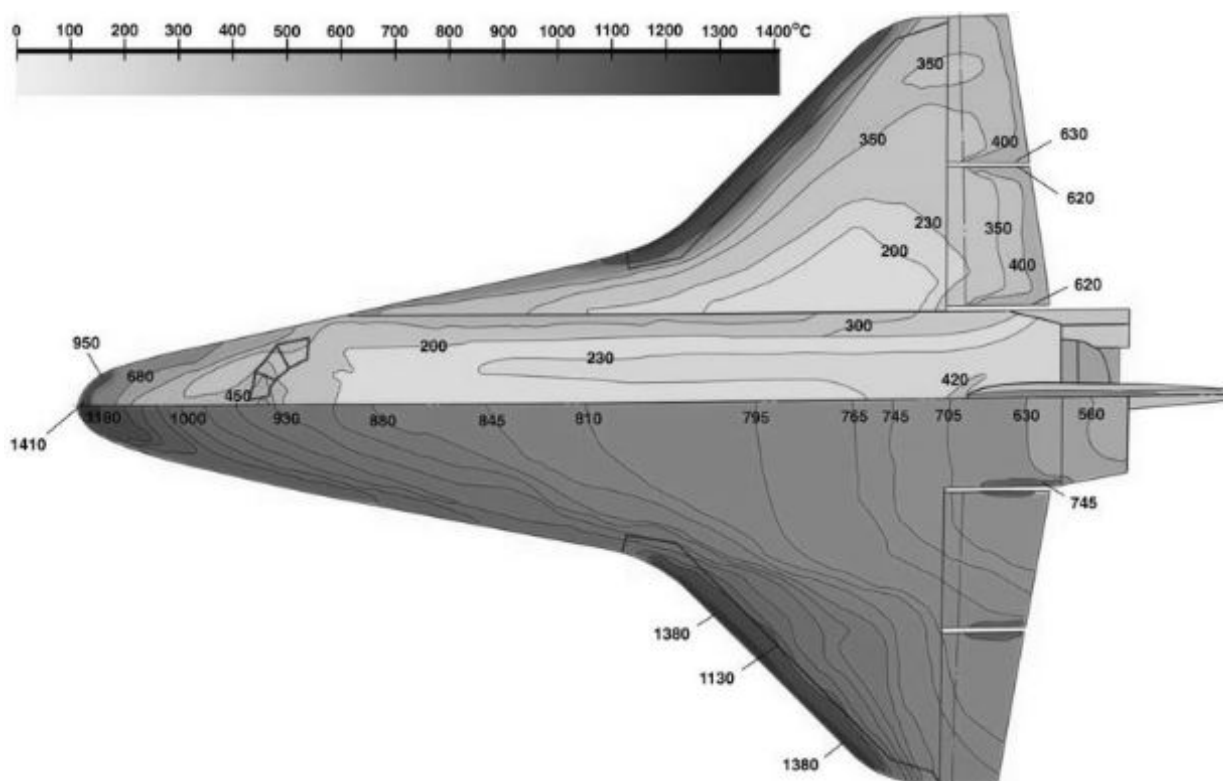


Рис. 2. Уровни нагрева на поверхности корпуса Бурана. Высота 63 км, $M = 17$ [2]

Предельное сжатие для одноатомного газа равно 4 (три степени свободы), а для двухатомного – 6 (пять степеней свободы). Отстающая при торможении энергия в частности идёт на нагрев газа в ударной волне. Для ударных волн достаточно большой интенсивности необходимо учитывать (последовательно) стадии установления термодинамического равновесия поступательных, вращательных, для молекулярных газов еще и колебательных степеней свободы, в определенных условиях – диссоциацию и рекомбинацию молекул, химические реакции, процессы с участием электронов (ионизацию, электронное возбуждение).

Свойства столкновительного ионизованного газа

В настоящей работе рассматриваем столкновительный частично ионизованный газ (СИГ) – трёхкомпонентная среда атомов (молекул), ионов и электронов с относительно малой степенью ионизации. Обратимся к электронной компоненте ионизованного газа, которая определяет радиофизические свойства исследуемой среды.

В термодинамически равновесной среде с кинетической температурой kT концентрация электронов определяется формулой Саха [4]. Формула также применима при детальном равновесии в стационарном случае [5]. Запишем формулу для концентрации электронов n_e :

$$n_e = (2\pi m_e)^{3/4} (kT)^{1/4} P_0^{1/2} h^{-3/2} \exp\left(-\frac{\chi_r}{2kT}\right), \tag{2}$$

где m_e – масса электрона, χ_r – энергия ионизации, k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка, P_0 – давление нейтрального газа.

При одной и той же скорости ЛА плотность электронов n_e возрастает с уменьшением высоты, но скорость аппарата уменьшается. На высоте $h \approx 75$ км при скорости $u = 5$ км/с плотность $n_e \approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$, а частота столкновений $\nu_e \approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

Радиус Дебая – Хюккеля d характеризует масштаб квазинейтральности или электрической неоднородности СИГ (здесь и далее предполагается, что параметры приводятся в усреднённом виде). Кулоновское взаимодействия частиц мало, в сравнении с kT , при выполнении неравенства $e/4\pi\epsilon_0 d < kT/e$, где ϵ_0 – электрическая постоянная в СИ.

Основными характеристиками СИГ являются ν_e – частота столкновений электронов и плазменная частота ω_p :

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}\right)^{1/2}. \tag{3}$$

Плазменные колебания могут развиваться и существовать в интервале между столкновениями: $\tau_e = 1/\nu_e$. Характерные параметры для *ионизованного газа* и *газовой плазмы*:

$$\begin{aligned} \omega_p \tau_e > 1, \quad d \ll L, \quad N_d \gg 1 & \text{ – газовая плазма;} \\ \omega_p \tau_e < 1, \quad d \ll L, \quad N_d \gg 1 & \text{ – ионизованный газ,} \end{aligned} \tag{4}$$

где τ_e – интервал между двумя столкновениями частиц, d – радиус Дебая – Хюккеля, L – линейный масштаб исследуемой среды, N_d – количество заряженных частиц в сфере Дебая.

Среда становится радиопрозрачной, если $\omega_0 > \omega_p$: а) $\omega_0 = \omega_p$ при $\omega_p > 2\pi\nu_e$ или б) $\omega_0 = 2\pi\nu_e$ при $2\pi\nu_e > \omega_p$. Здесь ω_0 – критическая частота. Отражение наблюдается при частоте ω ниже критической ω_0 , если $\omega_p > 2\pi\nu_e$, а если $2\pi\nu_e > \omega_p$, то происходит поглощение на толщине скин-слоя δ без отражения. На толщине скин-слоя напряжённость поля электромагнитной волны убывает в e раз.

Распространение волны через исследуемую среду

Были проведены лабораторные исследования газоразрядной плазмы, в которой электронная температура превышала 10 000 °С. Тяжёлая компонента при этом имела температуру не более 60 °С [5].

Для оценки глубины проникновения электромагнитной волны воспользуемся определением скин-слоя как обратной величины от постоянной затухания [6]. Получается в безразмерном виде:

$$\delta \frac{f}{c} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\nu_e^2 + \omega^2} \right)^2 + \frac{\nu_e^2}{\omega^2} \left(\frac{\omega_p^2}{\nu_e^2 + \omega^2} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\nu_e^2 + \omega^2} \right) \right)^{-1/2}, \tag{5}$$

где $\omega = 2\pi f$ и c – скорость света.

Графики, построенные по формуле (5), приведены на рис. 3. Для удобства круговая частота ω была заменена линейной f . Толщина скин-слоя характерно увеличивается с увеличением частоты радиосигнала в области $f=f_p$. Однако такое резкое увеличение толщины скин-слоя характерно лишь при незначительных величинах частоты столкновений электронов. При больших значениях ν_e увеличение толщины скин-слоя происходит гораздо медленнее и его значение остаётся довольно высоким во всём диапазоне частот. Это показывает, что частота столкновений электронов значительно влияет на характер распространения электромагнитной волны в ионизированной среде.

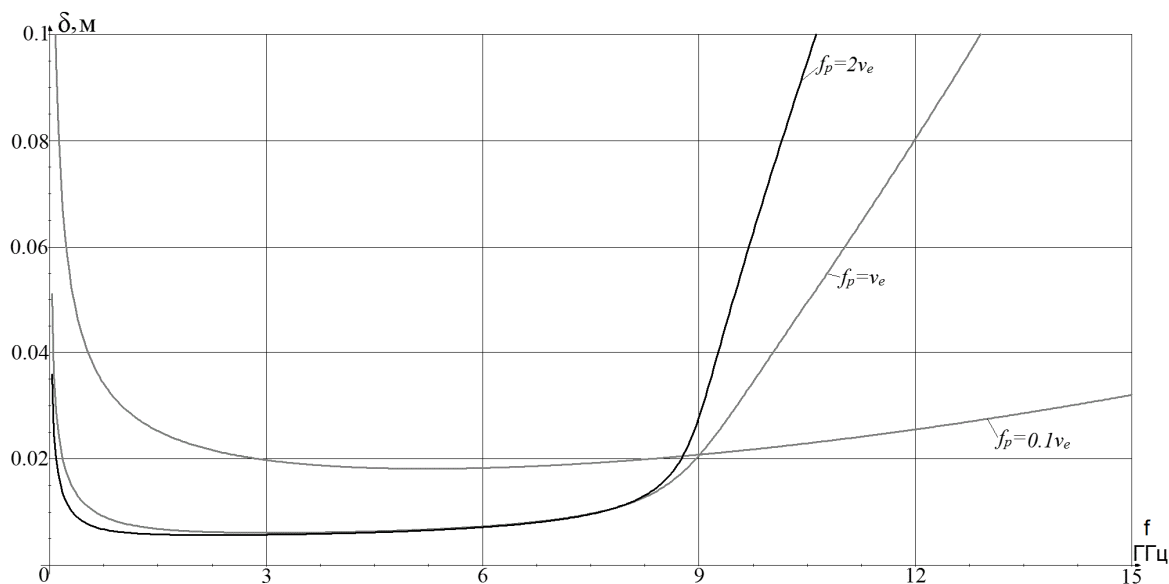


Рис. 3. Зависимости δ от f . Выделен график для типичного случая

Выводы

Плазменная оболочка радиопрозрачна, если значение скин-слоя превышает нормальную к корпусу толщину оболочки. Радиоотражающие свойства определяются по этому же алгоритму. Расчёты и модельные испытания показывают, что прозрачность радиоканала обеспечивается в сантиметровом диапазоне, где $f > 9$ ГГц. Надо отметить, что уже решаются конкретные задачи, и следует ожидать появления в печати экспериментальных данных.

Литература

1. <http://avia-simply.zvukovoj-barjer-volnovoj-krizis/>
2. <http://www.buran.ru/hm/tersaf5.htm/>
3. Чёрный, Г.Г. Газовая динамика / Г.Г. Чёрный. – М.: Наука, 1983. – 424 с.
4. Bradt, H.V. Astrophysics Processes / H.V. Bradt. – Cambridge University Press, 2008. – 536 с.
5. Шевяков, И.А. Радиофизические свойства столкновительной плазмы газового разряда / И.А. Шевяков, В.И. Тамбовцев, А.А. Кучуркин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, механика и физика». – 2013. – Т. 5, № 1. – С. 100–106.
6. Шевяков, И.А. О радиопрозрачности плазменной оболочки гиперзвукового летательного аппарата / И.А. Шевяков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, механика и физика». – 2014. – Т. 6, № 2. – С. 80–84.

Тамбовцев Владимир Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tamboval@mail.ru.

Шевяков Игорь Андреевич, аспирант приборостроительного факультета, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Regnlager@mail.ru.

Литвинов Артём Александрович, магистрант приборостроительного факультета, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; artelemur@gmail.com.

Поступила в редакцию 12 марта 2015 г.

RADIO TRANSPARENCY OF IONIZED SHELL, WHICH FORMING AROUND HYPERSONIC OBJECTS IN MESOSPHERE

V.I. Tambovtsev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, tamboval@mail.ru,
I.A. Shevyakov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, Regnlager@mail.ru,
A.A. Litvinov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, artelemur@gmail.com

This article discusses the basic properties of ionized gas shell formed around objects moving in the mesosphere at hypersonic speeds to determine the frequency band for the radio communication.

Ionization occurs due to the energy of the shock wave. The thickness of the transition layer is defined between molecular distances. Limiting compression due to the Hugoniot adiabat and depends on the number of degrees of freedom – for diatomic gas is equal to 6. The energy which remained when braking goes for heating of gas in a shock wave and, agrees Sakha, to ionization. Temperature field of the shell taking into account the heat transfer coefficient is much higher surface temperature of the object. Near the bow, which overheating, for example, Buran reaches 1400 °C, the gas temperature exceeds 10 000 °C – this is at a height 63 km and at a speed of 17 Machs.

The shell is three-component gas. There are atoms (molecules), ions and electrons with a low degree of ionization. The main features are the frequency of collisions of electrons with atoms and the plasma frequency. If the plasma frequency exceeds the frequency of collisions, the medium is a gas plasma. If the frequency of collisions exceeds value of plasma frequency, gas doesn't reach a plasma status. The plasma frequency is critical: above the critical frequency gas plasma is dominated by the dielectric properties, and to the critical frequency – dominated conductive properties.

Plasma sheath radio transparency if the value of the skin layer to the body exceeds the normal thickness of the shell. Calculations and model tests show that the transparency of the radio channel is provided in the centimeter range, where $f > 9$ GHz.

Keywords: radio transparency, mesosphere, hypersonic speed, shock wave, ionized gas, plasma, skin layer, hypersonic object.

References

1. <http://avia-simply.zvukovoj-barjer-volnovoj-krizis/>
2. <http://www.buran.ru/html/tersaf5.htm/>
3. Cherniy G.G. *Gazovaya dinamika* [Gas Dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 484 p.
4. Bradt H.V. *Astrophysics Processes*. Cambridge University Press, 2008, 536 p. DOI: 10.1017/CBO9780511802249.
5. Shevyakov I.A., Tambovtsev V.I., Kuchurkin A.A. [Radio Physical Properties of Collisional Plasma in Gas Discharge]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematics. Mechanics. Physics*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 100–106. (in Russ.)
6. Shevyakov I.A. [Radio Transparency of Plasma Shell for Hypersonic Aircraft]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematics. Mechanics. Physics*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 80–84. (in Russ.)

Received 12 March 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тамбовцев, В.И. Радиопрозрачность ионизированной оболочки, образующейся вокруг гиперзвукового объекта в мезосфере / В.И. Тамбовцев, И.А. Шевяков, А.А. Литвинов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 142–146. DOI: 10.14529/ctcr150317

FOR CITATION

Tambovtsev V.I., Shevyakov I.A., Litvinov A.A. Radio Transparency of Ionized Shell, which Forming Around Hypersonic Objects in Mesosphere. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 142–146. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr150317