

04

Оценка величины концентрации электронов плазмы и ее частоты в окрестности гиперзвукового летательного аппарата при его движении в атмосфере и определение частот распространения электромагнитных волн в данной плазме

© В.А. Федоров

Радиотехнический институт им. акад. А.Л. Минца,
125083 Москва, Россия
e-mail: f_v99@mail.ru

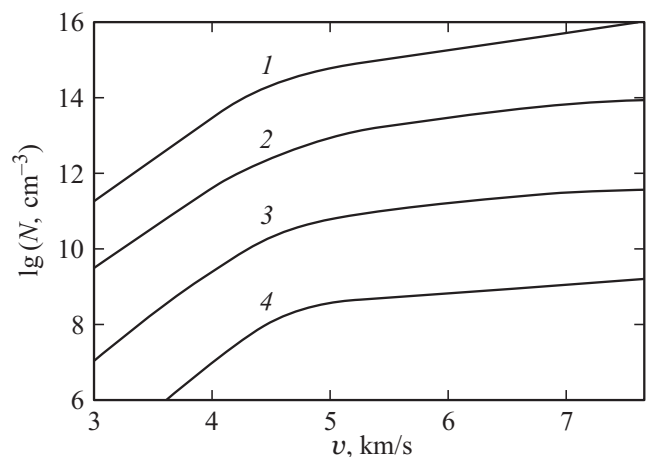
(Поступило в Редакцию 14 сентября 2015 г.)

Проведены оценки величины концентрации электронов плазмы и ее частоты для плазмы, образующейся в окрестности гиперзвукового летательного аппарата, движущегося в атмосфере. Найдены частоты электромагнитных волн, при которых возможно их распространение в плазме, возникающей вблизи аппарата. Для двух значений скорости движения получены формулы, которые определяют концентрацию электронов плазмы на высотах движения 30, 60 и 90 km аналитически, а не из графиков. Представлены некоторые особенности изменения концентрации электронов плазмы в зависимости от приведенных выше значений высот и двух значений скорости движения. Отмечено, что, увеличивая и уменьшая скорость движения аппарата, можно получить квазипериодические изменения концентрации плазмы.

1. Во время движения гиперзвукового летательного аппарата (ГЗЛА) в атмосфере с гиперзвуковой скоростью в его окрестности возникает ряд физических явлений, которые отрицательным образом влияют как на функционирование систем самого ГЗЛА, так и на условия распространения электромагнитных волн в его окрестности. Эти явления возникают при входе и движении в плотных слоях атмосферы. Причем основным физическим явлением, которое кардинальным образом влияет на условия распространения электромагнитных волн в окрестности ГЗЛА, движущегося с гиперзвуковой скоростью в атмосфере, является образование плазменной оболочки вокруг аппарата благодаря ионизации нейтральных частиц атмосферного воздуха [1,2]. Отметим, что концентрация возникающих заряженных частиц при ионизации молекул воздуха возрастает с увеличением скорости движения ГЗЛА и уменьшением высоты его движения.

Образующаяся плазма вокруг ГЗЛА имеет очень большую концентрацию электронов, которая может приблизительно изменяться от 10^7 до 10^{16} cm^{-3} в зависимости от скорости и высоты движения [2]. Приведенные величины концентрации электронов плазмы намного превосходят, например, максимальное значение концентрации электронов в ионосферной плазме, которое равно 10^6 cm^{-3} на высотах около 150 km [3]. Данное обстоятельство приводит к тому, что плазма, образовавшаяся в окрестности ГЗЛА, препятствует распространению электромагнитных волн в пространстве, частично их поглощая и отражая от своей поверхности. При этом необходимо отметить, что основным фактором, влияющим на взаимодействие электромагнитных волн с плазмой, является соотношение их частот [4].

2. Чтобы оценить величину концентрации электронов плазмы, возникающую в окрестности ГЗЛА на различных высотах и при различных скоростях его движения в атмосфере, воспользуемся результатами исследований, которые приведены в виде графического материала на рис. 2.10 в [2], где представлена величина концентрации электронов плазмы, образующейся в окрестности ГЗЛА при движении в зависимости от скорости на высотах 30, 60, 90 и 120 km. Так как высота 120 km расположена в ионосфере, где концентрация молекул воздуха мала и концентрация электронов образующейся плазмы сравнима по величине с концентрацией электронов ионосферной плазмы, высоту 120 km не будем рассматривать.



Концентрация электронов N в заторможенном потоке в зависимости от высоты и скорости набегающего потока. 1 — 30, 2 — 60, 3 — 90, 4 — 120 km

Таблица 1. Величина концентрации электронов в плазме N, cm^{-3}

	30 km	60 km	90 km
3 km/s	$2.0 \cdot 10^{11}$	$2.5 \cdot 10^9$	$7.0 \cdot 10^6$
4 km/s	$3.5 \cdot 10^{13}$	$4.3 \cdot 10^{11}$	$2.5 \cdot 10^9$
5 km/s	$7.7 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{13}$	$7.0 \cdot 10^{10}$
6 km/s	$2.4 \cdot 10^{15}$	$4.5 \cdot 10^{13}$	$1.9 \cdot 10^{11}$
7 km/s	$7.4 \cdot 10^{15}$	$7.7 \cdot 10^{13}$	$4.0 \cdot 10^{11}$

Таблица 2. Плазменная частота ω_0, s^{-1}

	30 km	60 km	90 km
3 km/s	$2.5 \cdot 10^{10}$	$2.8 \cdot 10^9$	$1.5 \cdot 10^8$
4 km/s	$3.3 \cdot 10^{11}$	$3.7 \cdot 10^{10}$	$2.8 \cdot 10^9$
5 km/s	$1.6 \cdot 10^{12}$	$2.0 \cdot 10^{11}$	$1.4 \cdot 10^{10}$
6 km/s	$2.8 \cdot 10^{12}$	$3.6 \cdot 10^{11}$	$2.5 \cdot 10^{10}$
7 km/s	$4.8 \cdot 10^{12}$	$5.0 \cdot 10^{11}$	$3.6 \cdot 10^{10}$

Таблица 3. Плазменная частота f_p, Hz

	30 km	60 km	90 km
3 km/s	$4.0 \cdot 10^9$	$4.5 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^7$
4 km/s	$5.3 \cdot 10^{10}$	$5.9 \cdot 10^9$	$4.5 \cdot 10^8$
5 km/s	$2.5 \cdot 10^{11}$	$3.1 \cdot 10^{10}$	$2.3 \cdot 10^9$
6 km/s	$4.4 \cdot 10^{11}$	$5.7 \cdot 10^{10}$	$3.9 \cdot 10^9$
7 km/s	$7.7 \cdot 10^{11}$	$7.9 \cdot 10^{10}$	$5.7 \cdot 10^9$

Исходя из графиков на рисунке, получим значения концентрации электронов плазмы в окрестности ГЗЛА на высотах $h = 30, 60, 90 \text{ km}$ в зависимости от скорости движения для величин 3, 4, 5, 6, 7 km/s, которые представлены в табл. 1.

3. Чтобы найти величины плазменной частоты, учитывая полученные выше значения концентрации электронов плазмы (см. табл. 1), воспользуемся формулой

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi e^2}{m_e} N}, \quad (1)$$

где ω_0 — плазменная частота, e, m_e — заряд и масса электрона, N — концентрация электронов плазмы. Для сравнения величин плазменной частоты, которая измерялась в cm^{-3} , с величинами частот электромагнитных волн (Ω), падающих на плазму, выразим плазменную частоту в герцах. Имеем

$$f_p = \frac{\omega_0}{2\pi}, \quad (2)$$

где f_p — плазменная частота в герцах.

Найденные по формуле (1) значения ω_0 представлены в табл. 2, а найденные по формуле (2) значения f_p представлены в табл. 3.

Отметим, что, учитывая данные табл. 3, относящиеся к f_p , можно сделать следующие заключения о возможности распространения электромагнитных волн в плазме [4]. Если $\Omega < f_p$, то электромагнитная волна не может распространяться в данной плазме. Если $\Omega > f_p$, то электромагнитная волна может распространяться в данной плазме.

4. Заметим, что определение величины N и затем ω_0 при различных значениях v и h достаточно трудно в плане вычислений. Однако рассмотрение графиков на рисунке показывает, что существует два значения v , а именно, $v \approx 3.3 \text{ km/s}$ и $v \approx 4.3 \text{ km/s}$, которые позволяют уменьшить вычислительные трудности и оценить по порядку величины N и приближенно ω_0 .

Если $v \approx 3.3 \text{ km/s}$, то формулы для оценки величины N и приближенного ω_0 определения имеют вид

$$N(h = n30 \text{ km}) \sim 10^{(14-2n)}, \quad (3)$$

$$\omega_0(h = n30 \text{ km}) \approx 5.6 \cdot 10^4 \sqrt{10^{(14-2n)}}, \quad (4)$$

где $n = 1, 2, 3$.

Если $v \approx 4.3 \text{ km/s}$, то формулы для оценки величины N и приближенного определения ω_0 имеют вид

$$N(h = n30 \text{ km}) \sim 10^{(16-2n)}, \quad (5)$$

$$\omega_0(h = n30 \text{ km}) \approx 5.6 \cdot 10^4 \sqrt{10^{(16-2n)}}, \quad (6)$$

где $n = 1, 2, 3$.

Выражения (3–6) позволяют оценить N для принятых скоростей для высот движения ГЗЛА 30, 60, 90 km атмосферы. При этом величины N получаются кратными целым основаниям четных степеней показателей. Данное обстоятельство приводит к возможности простым образом вычислить ω_0 , извлекая квадратный корень из четных степеней по основанию десять.

Представим некоторые свойства формул (3–6). Увеличение (уменьшение) высоты движения с $h = 30 \text{ km}$ для рассматриваемых скоростей уменьшает (увеличивает) величину N на два порядка. Например, если высота движения увеличивается с $h = 30$ до 60 km , то N меняется с 10^{12} до 10^{14} . Другая особенность выражений (3–6) состоит в том, что при изменении скорости от $v \approx 3.3$ до 4.3 km/s величина N возрастает на 2 порядка на одной и той же высоте. Соответственно при уменьшении v от $v \approx 4.3$ до 3.3 km/s значение N уменьшается на 2 порядка на той же высоте. Заметим, что увеличение N с уменьшением h связано с увеличением плотности нейтральных частиц атмосферы на более низких высотах, что приводит к повышению степени ионизации молекул воздуха.

5. Кроме приведенных изменений N , связанных с уменьшением или увеличением высоты полета h ГЗЛА, существуют и другие возможности пространственного изменения величины N , связанные, например, с варьированием скорости движения v ГЗЛА. При этом, изменяя скорость движения ГЗЛА, можно получить квазипериодические изменения N в пространстве. Данная

возможность связана с тем, что увеличение скорости полета аппарата на фиксированной высоте h приводит к увеличению N в пространстве по ходу движения ГЗЛА. Если после увеличения v начать уменьшать v , то это приведет к уменьшению N в пространстве. Таким образом, увеличение и уменьшение v на определенных одинаковых промежутках времени приводит к получению квазипериодического изменения N вдоль траектории движения.

Другая возможность осуществления данного эффекта состоит в уменьшении скорости аппарата до такой величины, когда концентрация образующейся плазмы во время движения ГЗЛА мала по сравнению с существующей, либо плазма не возникает. Например, если уменьшить скорость движения аппарата v до 1 km/s или меньше, то образование плазмы даже на высоте $h = 30$ km станет невозможным (см. рисунок). Если теперь увеличить v до такой величины, что образование плазмы станет снова возможным, то получим квазипериодические изменения N в пространстве. Причем данное квазипериодическое образование плазмы будет иметь нулевую или очень малую концентрацию в промежутках между ее высокими значениями.

Необходимо иметь в виду, что отрезки времени изменения v должны быть существенно меньше времени диссоциации электронов и ионов, чтобы уменьшение N было мало по сравнению с существующим значением N . Данное замечание особенно важно для тех h , где плотность воздуха достаточно высока, так как процесс диссоциации протекает активнее на высотах с большей плотностью воздуха. Исходя из сказанного необходимо, чтобы время создания квазипериодической структуры было меньше, чем время диссоциации частиц плазмы.

Список литературы

- [1] Черный Г.Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматгиз, 1959.
- [2] Мартин Дж. Вход в атмосферу. Введение в теорию и практику. М.: Мир, 1969.
- [3] Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1978.
- [4] Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968.