

УДК 533.951, 539

Мясников Евгений Николаевич¹, профессор кафедры Физика ФБГО ВО «ВГУВТ»
e-mail: myasnikov.ev@yandex.ru

Забороноква Татьяна Михайловна², профессор кафедры Физика ФБГО ВО «НГТУ» им.
Р.Е. Алексеева
e-mail: t.zaboronkova@ Rambler.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный политехнический университет им. Р.Е.Алексеева Россия

ТРАНСПОРТИРОВКА ВОЗМУЩЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ АЛЬФВЕНОВСКИМИ МГД ВОЛНАМИ

Аннотация. Приведены решения уравнений двухжидкостной магнитной гидродинамики, которые допускают существование в одножидкостном и двухжидкостном приближениях двух типов линейно независимых волн - альфвеновской и МГД - дрейфовой. Альфвеновская волна имеет линейную поля, дрейфовая волна - круговую. Взаимодействие указанных волн может приводить к переносу возмущений плотности плазмы в направлении геомагнитного поля со скоростью порядка альфвеновской, как в ионосферной, так и магнитосферной плазме Земли.

Ключевые слова: одножидкостная, двухжидкостная магнитная гидродинамика (МГД), альфвеновская, дрейфовая МГД волны, ионосфера, магнитосфера Земли.

В приближениях одножидкостной и двухжидкостной МГД в анизотропной плазме исследованы поляризационные характеристики альфвеновских и дрейфовых МГД-волн. Показано, что эти волны являются линейно независимыми, поскольку векторы (операторы) вихревых полей плотности тока и магнитного поля в них взаимно ортогональны. Вместе с тем направления распространения образуемых ими волн могут быть существенно различными, что предполагает возможность их взаимодействия, в частности, ситуация, при которой эти волны могут распространяться с общей (альфвеновской) скоростью вдоль направления внешнего регулярного магнитного поля. Здесь можно указать на эффект эхо рассеяния, обнаруженный Ю.М.Ямпольским [1], при исследованиях ракурсного рассеяния КВ радиоволн от искусственной ионосферной турбулентности, возникающей в результате нагрева плазмы верхней ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением, и наблюдениях в лабораторных экспериментах эффектов резонанса, возникающих при взаимодействии циклотронных волн [2].

Рассмотрим МГД-волны в анизотропной магнитоактивной плазме. Представим возмущения электромагнитных (ЭМ) и гидродинамических (ГД) полей в виде плоских волн $\propto \exp\{-i\omega t + i\vec{k}\vec{r}\}$. В одножидкостном приближении существует альфвеновская волна, которая является волной гиперболического типа и на частотах $\omega \leq \omega_{Bi}$ имеет следующую дисперсионную зависимость [3]:

$$\omega_A^2 = \frac{c^2 k^2}{n_A^2} \sin^2 \theta.$$

Здесь c – скорость света, $n_A = c\sqrt{4\pi n_i n} / B_0$ – показатель преломления, ω_{Bi} – гирочастота, m_i – масса иона, θ – угол между направлениями волнового вектора k и магнитным полем B_0 . Вихревые электромагнитные (ЭМ) поля вместе с волновым вектором k образуют тройку взаимно перпендикулярных векторов. Пусть, волновой вектор лежит в плоскости (к B_0) и составляет угол θ с нормалью к внешнему магнитному полю. Тогда вектор возмущения тороидального магнитного поля \vec{B}_A находится в плоскости, ортогональной \vec{B}_0 , а вектор соленоидального поля плотности тока \vec{j}_A составляет угол θ с внешним магнитным полем. Вектор индукционного электрического поля ортогонален \vec{B}_0 и имеет вихревую $E \sin \theta$ и потенциальную $E \cos \theta$ компоненты. Отметим, что в альфвеновской волне отсутствуют возмущения электронной концентрации, а ее распространение подобно волноводной ТМ моде, направляющими структурами которой являются силовые линии поля. \vec{B}_0 .

В двухжидкостном приближении возмущения ЭМ и ГД полей представим в виде $\propto \delta n_k \exp\{-i\omega t + i\vec{k}\vec{r}\}$, где δn_k – скалярная волновая функция относительного возмущения плотности плазмы. Дисперсионное уравнение дрейфовой МГД волны при $\theta \ll 1$ имеет вид [4]

$$\omega_D = \frac{ck^2(T_e + T_i)}{2eB_0}.$$

Оператор дрейфовой частоты $\omega_D = i[k \times r]$ – является вихрем дрейфовой скорости, T_e, T_i – температуры электронной и ионной компонент плазмы, e – заряд электрона. Операторы ЭМ полей в дрейфовой волне имеют такую же структуру, как и в альфвеновской, за исключением того, что вектор плотности тока \vec{j}_D представляет тороидальное вихревое поля и ортогонален B_0 , а вектор возмущения магнитного поля \vec{B}_D является соленоидальным полем, лежащим в плоскости (к B_0). Таким образом векторы возмущения вихревых ЭМ полей в альфвеновской и дрейфовой волнах являются взаимно ортогональными, поэтому они линейно независимы. В области пересечения дисперсионных характеристик $\omega_A \approx \omega_D$ взаимодействие этих волн, механизм которого в настоящее время не понятен, может привести к переносу возмущений плотности плазмы, как более тяжелой компоненты, альфвеновскими волнами, распространяющимися вдоль геомагнитного поля со скоростью порядка $v_A = c/n_A$ от источника возмущения до магнитно - сопряженной точки ионосферы (туда и обратно) со временем порядка $\tau \approx 20$ секунд.

Согласно условию равновесия, сила Ампера, возникающая при протекании диамагнитного тока, компенсирует градиент поперечного к магнитному полю газокINETического давления плазмы [5] и приводит к возникновению индукционного электрического поля, которое обеспечивает режим дипольной диффузии флуктуаций в однородной плазме. Дипольная диффузия протекает существенно медленнее, чем

униполярная, и может сохранять структуры возмущений плотности плазмы при распространении вдоль силовых линий геомагнитного поля.
Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00-385). Авторы выражают благодарность РФФ за научную и материальную поддержку при проведении исследований.

Список литературы:

1. Ямпольский Ю.М. «Эхо-рассеяние» КВ сигналов на искусственной ионосферной турбулентности. Изв. вузов Радиофизика Т. 32, N 4. С. 512-521.
2. Моисеев С.С., БУЦ В.А. Особенности динамики заряженных частиц при авторезонансе. Международная конференция МСС-14, Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность. 24-27 ноября 2014. Сборник трудов.С.12-17.
3. Alfvén H. On the existence MHD waves. Mat Astron. Fysic, 1942 N2 (7 p.p.).
4. Мясников Е.Н. Дрейфовая МГД-волна в двухжидкостной магнитоактивной плазме Международная конференция МСС-14, Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность. 24-27 ноября 2014. Сборник трудов.С.328-333..
5. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М. Наука 1980, 3030 с.

TRANSPORTATION OF PLASMA DENSITY DISTURBANCES BY ALFVEN MHD WAVES

Evgeny N. Myasnikov, Tatiana M. Zaboronkova

Abstract. Solutions of the equations of two-fluid magnetic hydrodynamics (MHD) are given, which admit the existence of two types of linearly independent waves in single-fluid and two-fluid approximations - alfvén and drift MHD - waves. The Alfvén wave has linear polarization, the drift wave has circular polarization. In magnetoactive plasma interaction Alfvén and drift MHD waves can lead to the transfer of plasma density disturbances with a velocity of the Alfvén wave in both ionospheric and magnetospheric plasma of the Earth.

Keywords: single-fluid, two-fluid magnetic hydrodynamics (MHD), Alfvén, drift MHD waves, ionosphere, Earth's magnetosphere.

