

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 523.94

О РАСЩЕПЛЕНИИ ПЕРЕСОЕДИНЯЮЩЕГО ТОКОВОГО СЛОЯ

С. А. Марковский
(ГАИШ)

В приближении магнитной гидродинамики исследовано расщепление пересоединяющего токового слоя вследствие неэволюционности (отсутствия единственного решения задачи о малом возмущении) слоя, рассматриваемого как разрыв. Показано, что результатом расщепления являются медленные магнитозвуковые ударные волны.

Разрывные решения одномерных уравнений идеальной магнитной гидродинамики: ударные волны, тангенциальные, контактные и альфвеновские разрывы — должны удовлетворять требованию эволюционности, т. е. однозначной разрешимости задачи об эволюции во времени бесконечно малого начального возмущения [1, 2]. Если такая задача не имеет единственного решения, то разрыв не может существовать в реальной среде и расщепляется на другие (эволюционные) разрывы. Критерием эволюционности является совпадение двух величин: числа неизвестных параметров, которые описывают бесконечно малое возмущение (амплитуд волн, расходящихся от поверхности разрыва, и его смещения как целого) и числа независимых линеаризованных граничных условий, из которых эти параметры определяются по известным амплитудам падающих волн.

В работе [3] критерий эволюционности применен к пересоединяющему токовому слою, возникающему в окрестности гиперболической нулевой точки магнитного поля $\mathbf{B}_0 = (hy, hx, 0)$, в которой электрическое поле отлично от нуля. В этой окрестности нарушается условие вмороженности и непрерывное движение идеальной среды невозможно. Если справедливо приближение сильного магнитного поля, т. е.

$$\rho, \rho v^2 \ll B^2, \quad (1)$$

где ρ , v и ρv^2 — характерные значения давления, плотности и скорости среды, то в такой точке образуется разрыв — токовый слой, разделяющий магнитные поля противоположного направления [4]. Вне слоя зависимость \mathbf{B} от координаты $\zeta = x + iy$ представляется в виде [4]

$$B_y + iB_x = h \frac{\zeta^2 - x_*^2}{\sqrt{\zeta^2 - b^2}}.$$

Здесь b — полуширина слоя (размер вдоль оси x),

$$x_*^2 = \frac{b^2}{2} + \frac{2I}{ch},$$

I — полный ток в слое, а c — скорость света. В точке x_* магнитное поле меняет знак. При $|x| < |x_*|$ направление тока совпадает с направлением электрического поля (прямой ток), а при $|x_*| < |x| < b$ он имеет противоположное направление (обратный ток).

Силовые линии магнитного поля \mathbf{B} , вмороженного в среду, в области прямого тока вносятся вдоль оси y в слой, где вмороженность нарушается, пересоединяются в нем и выносятся вдоль оси x . Отсюда следует, что неоднородность скорости внутри слоя двумерна, поэтому в общем случае он не сводится к перечисленным выше одномерным разрывам. Однако существуют бесконечно малые возмущения [3], которые взаимодействуют с токовым слоем, как с одномерным разрывом, т. е. на его поверхности выполняются линеаризованные граничные условия. В [3] показано, что слой является неэволюционным относительно таких возмущений, если скорость течения среды поперек него в области обратного тока меньше максимальной проекции групповой скорости медленной магнитозвуковой волны малой амплитуды на нормаль к его поверхности. В этом случае происходит расщепление, в результате которого к каждому концу слоя присоединяются два (или более) разрыва.

Предположим, что незволюционный токовый слой расщепляется на одномерные разрывы, и докажем, что ими являются медленные магнитозвуковые ударные волны.

На тангенциальном разрыве электрическое поле E равно нулю. Для рассматриваемого течения

$$E = \{0, 0, E\} \neq 0, \quad (2)$$

поэтому тангенциальный разрыв невозможен.

Перейдем к альфвеновскому и быстрому магнитозвуковому разрывам. Поскольку

$$\lim_{\zeta \rightarrow \infty} B = \infty, \quad \lim_{\zeta \rightarrow \infty} \rho < \infty, \quad \lim_{\zeta \rightarrow \infty} v < \infty,$$

то существует окрестность точки $\zeta = \infty$, в которой

$$v < V_A, \quad (3)$$

где V_A — альфвеновская скорость. Отметим, что в силу (1) условие (3) справедливо не только в пределе $\zeta \rightarrow \infty$, но и при $|\zeta| \geq b$.

Для быстрой магнитозвуковой ударной волны нормальная к поверхности составляющая скорости удовлетворяет неравенству

$$v_n^\dagger > (V_{ph}^\dagger)^\dagger > V_A^\dagger, \quad (4)$$

где V_{ph}^\dagger — фазовая скорость быстрой магнитозвуковой волны малой амплитуды. Здесь и далее индексами «†» и «‡» обозначаются соответственно области, лежащие выше и ниже по потоку от поверхности разрыва. Однако (4) противоречит (3). Следовательно, быстрая ударная волна не реализуется.

На альфвеновском разрыве меняется направление магнитного поля, а его величина остается постоянной. В системе отсчета, в которой разрыв покоится и $v \parallel B$, т. е. $E = 0$, выполняется соотношение $v^\dagger = v^\ddagger = V_A$. В лабораторной системе он также покоится, но справедливо условие (2). Следовательно, в этой системе к скорости v добавляется составляющая v_n , параллельная поверхности разрыва, поэтому

$$(v^\dagger)^2 + (v^\ddagger)^2 = 2v_n^2 + 2V_A^2. \quad (5)$$

Поскольку (5) противоречит (3), то не возникает и альфвеновский разрыв.

Итак, тангенциальный, альфвеновский и быстрый магнитозвуковой разрывы запрещены условиями (2) и (3). Поэтому остаются два типа разрывов: медленная магнитозвуковая ударная волна и контактный разрыв. Принадлежность к одному из этих типов сохраняется не только в окрестности точки $\zeta = \infty$, в которой выполняется (3), но и во всей исследуемой области. Действительно, условиями эволюционности непрерывные переходы допускаются только между медленной ударной волной, альфвеновским и контактными разрывами, с одной стороны, и тангенциальным разрывом — с другой [5]. В данном случае такой переход невозможен в силу (2).

Контактный разрыв не удовлетворяет требованию эволюционности относительно диссипативных волн [6]. Поэтому расщепление на контактные разрывы не представляет физического интереса.

Таким образом, медленные магнитозвуковые ударные волны оказываются единственным типом одномерных разрывов, на которые может расщепиться пересоединяющий токовый слой. Этот вывод согласуется с результатом численного эксперимента [7], где помимо токового слоя были получены две медленные ударные волны, присоединенные к каждому из его концов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ахиезер А. И., Любарский Г. Я., Половин Р. В. //ЖЭТФ. 1958. 35, № 3 (9). С. 731. [2] Сыроватский С. И. //ЖЭТФ. 1958. 35, № 6 (12). С. 1466. [3] Марковский С. А., Сомов Б. В. //ЖЭТФ. 1993. 104, № 2(8). С. 2736. [4] Сыроватский С. И. //ЖЭТФ. 1971. 60, № 5. С. 1727. [5] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М., 1982. С. 349. [6] Ройхваргер З. Б., Сыроватский С. И. //ЖЭТФ. 1974. 66, № 4. С. 1338. [7] Брушлинский К. В., Заборов А. М., Сыроватский С. И. //Физика плазмы. 1980. 6, № 2. С. 297.