

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 524.3

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РАСПАД МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
УДАРНЫХ ВОЛН МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ

С. А. Марковский

(ГАИШ)

Предлагается новый сценарий временной эволюции транс-альфвеновских ударных волн малой амплитуды: колебательный распад, т.е. взаимобратимая трансформация в альфвеновский разрыв. При этом излучаются ударные и автомодельные волны, а также контактные разрывы. Таким образом, неэволюционная ударная волна не может существовать как стационарное течение.

В последние годы возобновился интерес к вопросу о формировании и эволюции магнитогидродинамических ударных волн (см., напр., [1]). Как известно, транс-альфвеновские ударные волны (ТАУВ), на которых скорость течения переходит через альфвеновскую, являются неэволюционными [2], т.е. для них задача об эволюции во времени начального малого возмущения не имеет единственного решения. Отсюда можно сделать вывод, что ТАУВ не может существовать как стационарное течение. Еще один аргумент в пользу этой точки зрения состоит в том, что структура неэволюционного ударного перехода неоднозначна (см., напр., [3]).

Недавно проблема существования неэволюционных разрывов получила новое развитие в работах [4, 5], в которых рассматривается неплоская структура ударных волн. В этом случае граничные значения транс-альфвеновского ударного перехода также соединяются неединственной интегральной кривой. Для того чтобы устранить эту неоднозначность, в работе [4] постулируется, что помимо граничных значений следует зафиксировать некоторую дополнительную величину. Она равна интегралу I_z (между граничными состояниями) от компоненты магнитного поля, перпендикулярной к плоскости течения впереди и позади ударной волны. Величина I_z однозначно выделяет интегральную кривую и остается постоянной в процессе временной эволюции ударной волны. В результате решение граничной задачи, описывающей ударный переход, становится единственным. Исходя из этого, в работе [4] утверждается, что ТАУВ может образоваться из начально непрерывного профиля и существовать как стационарное течение.

Однако для этого необходимо предположить, что в начальном профиле возникает один разрыв. Такая конфигурация не является единственно возможной. Если данный ударный переход может быть реализован через несколько ударных или автомодельных волн, то неоднозначность структуры не устраняется [6]. Таким образом, неэволюционная волна структурно неустойчива. Отсутствие единственного решения задачи об

эволюции во времени ее малого возмущения означает, что малое возмущение приводит к немалому изменению исходного разрывного течения уже в начальный момент времени. Этим изменением является расщепление на другие разрывы или переход к более общему нестационарному течению.

Распадные конфигурации для ТАУВ найдены только в некоторых частных случаях. Мы ограничимся случаем разрывов малой амплитуды, для которых касательная компонента магнитного поля не мала по сравнению с нормальной компонентой [7]. Скачки Δ магнитогидродинамических (МГД) величин на таком разрыве даются формулой

$$\Delta_0 Q_j = \Delta_A Q_j + A_{0j} \Delta_0 \rho. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{Q} = (\rho, p, v_x, v_y, B_y)$ есть вектор состояния, A_{0j} — некоторые известные коэффициенты, ось x направлена по нормали к поверхности разрыва, а $\Delta_A Q_j$ суть отличные от нуля скачки B_y и v_y на альфвеновском разрыве. В рассматриваемом случае, когда B_y не мало, а амплитуда $\Delta \rho$ мала, ТАУВ может представлять собой только переход II \rightarrow III. Здесь и далее римские цифры обозначают состояния вверх и вниз по потоку, в которых значения нормальной составляющей скорости течения находятся в интервалах, разделенных фазовыми скоростями магнитозвуковых и альфвеновских волн малой амплитуды.

Распадная конфигурация для неэволюционной волны определяется из того условия, что суммы скачков на вторичных волнах равны скачкам на исходной волне. Для этого скачки на контактном разрыве, а также на быстрых и медленных ударных или автомодельных волнах следует выразить через скачок плотности. Эти выражения совпадают с выражениями для возмущений, переносимых волнами малой амплитуды. Тогда получается следующее уравнение:

$$\sum_i A_{ij} \Delta_i \rho + \Delta_A Q_j = A_{0j} \Delta_0 \rho + \Delta_A Q_j, \quad (2)$$

где индекс i обозначает тип разрыва. Решение этих

алгебраических уравнений

$$\Delta_i \rho = a_i \Delta_0 \rho \quad (3)$$

позволяет определить амплитуды вторичных волн $\Delta_i \rho$ по амплитуде исходной волны $\Delta_0 \rho$. Явные выражения для величин a_i приведены в работе [7].

Для дальнейших рассуждений существенно, что ТАУВ не может появиться после распада в качестве вторичной волны. Это связано с тем, что для данного I_z состояние III позади ударной волны однозначно определяется состоянием II впереди нее [4]. В приближении малой амплитуды отсюда следует, что амплитуды исходной и вторичной ТАУВ равны, а все остальные вторичные волны отсутствуют. Отметим, что утверждение о связи I_z с амплитудой волны доказано в работе [4] только для изоэнтропических течений. Однако этот вывод можно сделать, исходя также из следующего обстоятельства. Анализ особых точек МГД уравнений, соответствующих граничным состояниям ударных переходов, показывает, что переход II \rightarrow III может осуществляться по двум интегральным кривым: правой и левой поляризации. В этом состоит его отличие от переходов I \rightarrow III (II \rightarrow IV) и I \rightarrow IV, которые описываются соответственно одно- и двухпараметрическими семействами кривых (см., напр., [8]). Хотя структура ударной волны II \rightarrow III является неоднозначной, она не содержит других произвольных параметров, кроме амплитуды. Поэтому если величина, характеризующая структуру, и состояние впереди волны заданы, то ее амплитуда фиксирована.

Итак, исходная неэволюционная ударная волна распадается на контактный разрыв, магнитозвуковые волны и альфвеновский разрыв. Однако альфвеновский разрыв также является неэволюционным при наличии сколь угодно малой, но ненулевой диссипации [9]. Следовательно, вопрос о дальнейшей эволюции во времени рассматриваемой конфигурации остается открытым.

В данной работе предлагается сценарий такой эволюции: колебательный распад. Под действием малого возмущения ТАУВ распадается на систему волн, включающую альфвеновский разрыв. При этом интеграл от B_z по профилю исходной волны сохраняется и равен интегралу по профилю альфвеновского разрыва, а течение в остальных вторичных волнах является плоским. В свою очередь альфвеновский разрыв также распадается с образованием ТАУВ. Ее амплитуда равна амплитуде исходной волны, задаваемой величиной I_z . Амплитуды остальных волн удовлетворяют уравнению (2), в котором $\Delta_0 Q_j$ переносится в левую часть. Поэтому они определяются формулой (3), в которой a_i заменяется на $-a_i$, т.е. вместо ударных волн образуются автомодельные и наоборот. Далее процесс расщепления повторяется. В приближении малых амплитуд вторичные волны не взаимодействуют друг с

другом, причем волны разных типов могут догонять и перегонять друг друга, а волны одного и того же типа распространяются, в первом приближении, с одинаковой скоростью и догоняют друг друга за бесконечное время.

Такой процесс аналогичен самопроизвольному излучению волн малой амплитуды в обычной гидродинамике. Это явление наблюдалось экспериментально (см., напр., [10]). Оно возникает в особом случае гофрированной неустойчивости, когда возмущение не нарастает со временем, а распространяется от поверхности разрыва в виде незатухающих волн, энергия которых черпается из всей движущейся среды. В этом случае при наличии падающих волн малой амплитуды коэффициенты их отражения и преломления на поверхности разрыва обращаются в бесконечность и, следовательно, задача о малом возмущении не имеет решения. Поэтому такая ударная волна является неэволюционной [6].

В то же время колебательный распад имеет два существенных отличия. Во-первых, амплитуды излучаемых, т.е. возникающих при распаде, волн сравнимы с амплитудой исходной волны. Во-вторых, излучение связано не с колебаниями поверхности разрыва, а с превращением одного типа разрыва в другой.

Таким образом, процесс эволюции во времени неэволюционной ударной волны представляет собой колебательный распад, т.е. взаимобратимую трансформацию в альфвеновский разрыв. При этом излучаются ударные и автомодельные волны, а также контактные разрывы малой амплитуды, которые движутся относительно друг друга. Такой сценарий эволюции согласуется с точкой зрения, согласно которой, ТАУВ не может существовать как стационарное течение.

Литература

1. *Karimabadi H.* // Adv. in Space Research. 1995. **15**, N 8–9. P. 507.
2. *Ахуезер А.И., Любарский Г.Я., Половин Р.В.* // ЖЭТФ. 1958. **35**, № 3. С. 731.
3. *Anderson J.E.* Magnetohydrodynamic Shock Waves. Cambridge, Massachusetts, 1963.
4. *Kennel C.F., Blandford R.D., Wu C.C.* // Phys. Fluids. 1990. **B2**, N 2. P. 987.
5. *Wu C.C., Kennel C.F.* // Phys. Rev. Lett. 1992. **68**, N 6. P. 56.
6. *Markovskii S.A., Somov B.V.* // Space Sci. Rev. 1996. **78**, N 3–4. P. 443.
7. *Половин Р.В., Черкасова К.П.* // ЖЭТФ. 1961. **41**, № 1. С. 263.
8. *Hau L.-N., Sonnerup B.U.Ö.* // J. Geophys. Res. 1989. **94**, N 6. P. 6539.
9. *Ройхваргер З.Б., Сыроватский С.И.* // ЖЭТФ. 1974. **66**, № 4. С. 1338.
10. *Мишин Т.И., Бедин А.П., Юшенкова Н.И. и др.* // ЖЭТФ. 1981. **51**, № 11. С. 2315.

Поступила в редакцию
12.02.97