

УДК 523.985

## ОБ ЭФФЕКТАХ ВЯЗКОСТИ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ, НАБЛЮДАВШЕЙСЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ ПОСЛЕ КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ 13 ДЕКАБРЯ 2006 ГОДА

© 2015 Х. Чавуш\*

*Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, 17100 Turkey*

Поступила в редакцию 03 февраля, 2014; принята в печать 18 сентября, 2014

Корональные выбросы массы (coronal mass ejections, CME) и солнечный ветер являются основными результаты солнечной активности. Эти события могут приводить к появлению ударных волн в межпланетном пространстве и вызывать геомагнитные бури. Их изучение очень важно для исследования космической погоды. Ударные волны возникают там, где солнечный ветер меняет свои характеристики со сверхзвукового (по отношению к окружающей межпланетной среде) на дозвуковой. Одной из главных проблем исследования является взаимосвязь ударных волн с вязкостью в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа. Основная цель настоящей работы — поиск эффектов вязкости в ударной волне, наблюдавшейся после коронального выброса массы 13 декабря 2006 г.

Ключевые слова: *солнечный ветер — Солнце: корональные выбросы массы (CME) — Солнце: активность*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Корона является внешней частью солнечной атмосферы. Она поднимается над солнечным хромосферным слоем. Температура в ней резко увеличивается с нескольких тысяч до нескольких миллионов градусов Кельвина [1]. В короне существуют разнообразные структуры, в том числе струи, петли и стримеры. Они привлекают интерес астрономов из-за их сложной природы. Структуры короны и ее форма меняются с циклом солнечных пятен [2].

Для солнечной короны характерно наличие сложных плазменных и магнитных структур. По сути дела, в ней есть два основных типа структурных элементов: замкнутые и открытые магнитные структуры. Взаимодействие между плазмой и магнитным полем в солнечной короне определяет тип возникающих явлений [2]. Замкнутые магнитные петли, находящиеся под корональными стримерами, могут начать расширяться и взрывообразно выбрасывать солнечные частицы в межпланетное пространство. В конце концов происходит транзитный CME, который создает огромное облако плазмы в межпланетном пространстве [3].

Корональные дыры формируются за счет открытых структур. От корональных дыр в межпланетное пространство распространяется быстрый поток плазмы (т.е. быстрый солнечный ветер) [4]. При корональных температурах плазма

больше не связана с Солнцем его гравитационным потенциалом; она расширяется в межпланетное пространство со сверхзвуковой скоростью. Это и есть солнечный ветер. Первая теория коронального расширения с кратким введением и расчетами приводилась в [5]. Паркер вывел уравнения и показал, что высокоскоростной солнечный ветер можно наблюдать около Земли. Измерение скорости и плотности солнечного ветра около Земли и усовершенствование теории привели к принятию основной идеи. Струи по краям корональных дыр были недавно предложены в качестве источников солнечного ветра [6].

Гэри [7] поделил солнечную атмосферу на четыре области, а именно: фотосферу, хромосферу, корону и область ускорения солнечного ветра по отношению к поверхности. Расстояния их начальных точек от солнечной поверхности приводятся как  $10^0$ ,  $10^1$ ,  $10^1-10^2$  и  $10^3$  Мм соответственно. Из-за взаимодействий с локальной межпланетной средой сверхзвуковые потоки частиц в солнечном ветре могут вызвать ударную волну. Существует несколько способов вызвать ударную волну в солнечном ветре, например, взрывные волны от Солнца, возмущения, связанные с корональными выбросами массы, а также взаимодействия между быстрыми и медленными потоками [8]. Они вызывают такие физические явления, как сжатие, нагрев и изменения в магнитном поле.

На Солнце происходит постоянное истечение

\*E-mail: [h\\_cavus@comu.edu.tr](mailto:h_cavus@comu.edu.tr)

частиц, которое называется солнечным ветром. Когда высокоскоростной солнечный ветер сталкивается с атмосферой планеты, на стороне, обращенной к Солнцу, может возникнуть ударная волна. Она возникает потому, что частицы солнечного ветра испускаются Солнцем со скоростями примерно  $550\text{--}700\text{ км с}^{-1}$  [9], а скорость звука в межзвездной среде составляет приблизительно  $100\text{ км с}^{-1}$  [10, 11]. Однако из-за флуктуаций ее точное значение зависит от плотности. Такие ударные волны также наблюдались спутником SOHO/LASCO; результатам этих наблюдений посвящена статья Степановой и Косовичева [12]. Они продемонстрировали, что ударные волны можно регистрировать, по крайней мере, для некоторых случаев СМЕ и солнечного ветра.

В своей работе Еселевич и Еселевич [13] показали, что перед фронтальной структурой СМЕ постепенно формируется возмущенная область; это вызвано взаимодействием СМЕ с невозмущенным солнечным ветром. Ее размер увеличивается по мере удаления СМЕ от Солнца. В узкой области фронта возмущенной зоны наблюдается скачок. Характеристики этой возмущенной зоны удовлетворяют критериям поршневой ударной волны. Эта волна является столкновительной при радиальных расстояниях  $r < 6 R_{\odot}$  от центра Солнца ( $R_{\odot}$  — это радиус Солнца) и становится бесстолкновительной при  $r > 6 R_{\odot}$ .

Вандегрифф и др. [14] разработали модель для предсказания прихода ударных волн из межпланетного пространства на Землю. Космический аппарат NASA ACE регулярно регистрирует такие события. Лиу и др. [15] исследовали ударную волну, возникшую после СМЕ 13 декабря 2006 г. Это один из самых больших СМЕ со времен геомагнитной бури 31 октября 2003 г. Он сопровождался вспышкой и корональными волнами. В настоящей работе модель, представленная Чавушем [16], будет применена к ударной волне, сформировавшейся после этого СМЕ. Значения физических параметров, описывающих условия за фронтом ударной волны, взяты из данных миссии ACE.

Основной целью данной работы, в отличие от работы Вандегриффа и др. [14], является исследование эффектов вязких потоков для ударной волны, возникшей после СМЕ 13 декабря 2006 г. Для описания такого типа ударного процесса следует решить уравнения Навье–Стокса с применением модели (например, [16]). Математически этот процесс можно аппроксимировать гидродинамическим случаем. В этой процедуре вязкое поведение газа было выражено через число Рейнольдса [17], как в работах Чавуша [16] и Брухна и др. [18]. В разделе 3 приведены характеристики, описывающие условия перед ударной волной, возникшей после

**Таблица 1.** Физические параметры за фронтом ударной волны, возникшей после СМЕ 13 декабря 2006 г. [15]

$n_1, \text{см}^{-3}$	$p_1, \text{нПа}$	$T_1, \text{К}$	$u_1, \text{км с}^{-1}$	$\beta_1$	$M_1$
1.8	0.982	$1.5 \times 10^5$	457	$1.7 \times 10^7$	4.6

СМЕ 13 декабря 2006 г. Сравнение результатов с другими схожими работами приведено в разделе 4 вместе с обсуждением и заключением.

## 2. ФИЗИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

### 2.1. Основные физические свойства

Физическая структура солнечной атмосферы представляет собой сложную плазму, в которой магнитное и плазменное давления играют важные роли переменного доминирования. Это доминирование можно описать параметром плазмы  $\beta$  (т.е. отношением давления газа к магнитному давлению). Давление газа преобладает над магнитным давлением, если  $\beta$  больше 1. Если  $\beta$  меньше 1, магнитное давление преобладает над газовым. Это соотношение принимает разные значения в зависимости от магнитного поля. Оно имеет большие значения ( $\beta \gg 1$ ) для области ускорения солнечного ветра, теоретически — до бесконечности [7]. В модели Маттеуса и др. [19] его значение было дано равным от 44 до бесконечности. Следовательно, можно с легкостью утверждать, что давление газа играет решающую роль в динамике солнечного ветра [20].

Интервал СМЕ определяется путем совмещения усиленных профилей плотности, давления, температуры и скорости. Мы используем ударную волну, возникшую после СМЕ 13 декабря 2006 г. Дополнительные параметры, описывающие условия за этой волной, можно получить из данных миссии ACE; они перечислены в таблице 1 [15]. Этот СМЕ — один из крупнейших после геомагнитной бури 31 октября 2003 г. В отличие от нее СМЕ 13 декабря 2006 г. был относительно изолирован от других СМЕ, так как произошел около солнечного минимума. Целью данной работы является поиск эффектов вязкости в ударной волне, наблюдавшейся в солнечном ветре после коронального выброса массы 13 декабря 2006 г., путем применения модели, описанной в работе Чавуша [16]. В настоящем анализе используются параметры, приведенные в таблице 1.

Во многих случаях на приход ударной волны могут указывать предварительные признаки в поведении данных о плотности [14]. Была указана скорость  $457\text{ км с}^{-1}$ . Как отмечалось выше, локальная скорость звука в межпланетной среде равна

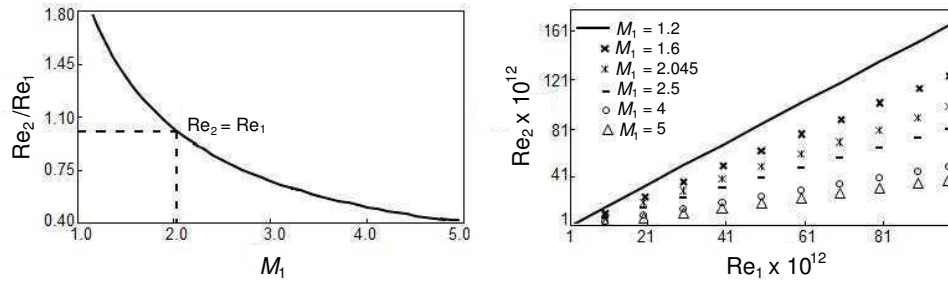


Рис. 1. Зависимости числа Рейнольдса перед фронтом ударной волны ( $Re_2$ ) от условий за фронтом: от значений  $M_1$  (слева) и  $Re_1$  (справа).

примерно  $100 \text{ км с}^{-1}$  [11], следовательно, ударная волна возникла в этой области. Температура перед этой ударной волной была равна приблизительно  $1.5 \times 10^5 \text{ К}$  (таблица 1).

## 2.2. Основные положения исследования

Выше было сказано, что плазменная  $\beta$

$$\beta = \frac{P_{\text{mag}}}{P_{\text{gas}}} \quad (1)$$

имеет более высокие значения в солнечном ветре [7, 19–21]. Следовательно, давление газа играет более важную роль, чем магнитное давление. Солнечный ветер может приводиться в движение в основном газовым давлением при высоких корональных температурах. В связи с этим задача становится схожей с гидродинамическим случаем, приведенным в работах Паркера [22] и Холзера и Аксфорда [23]. В этих работах описываются основные теории солнечных и звездных ветров.

Для сжимаемой вязкой ударной волны в стабильном течении получено следующее общее уравнение [16]:

$$\left[ \left( \frac{1}{2} - \frac{4}{3} \frac{1}{Re_1} \right) (\gamma - 1) M_1^2 + 1 \right] k^2 - \left[ \left( 1 - \frac{4}{3} \frac{1}{Re_1} \right) \gamma M_1^2 + 1 \right] k + \left( \frac{\gamma + 1}{2} - \frac{4}{3} \frac{1}{Re_2} \right) M_1^2 = 0. \quad (2)$$

Индексы 1 и 2 обозначают области за и перед фронтом ударной волны соответственно. В уравнении (2)  $Re_1$  и  $Re_2$  — значения числа Рейнольдса за и перед фронтом,  $\gamma$ ,  $k$  и  $M_1$  — адиабатический индекс (т.е. отношение удельных теплоемкостей), коэффициент сжатия (отношение плотностей перед и за фронтом) и число Маха за фронтом. Величины  $M_1$ ,  $Re_1$  и  $Re_2$  очень важны для распределения параметров перед фронтом ударной волны. Общее

уравнение можно решить численно путем введения подходящих условий. Согласно [24], значение  $\gamma$  удовлетворяет соотношению  $5/3 < \gamma < 3$  для бесстолкновительного фронта ударной волны.

## 2.3. Значение числа Рейнольдса перед фронтом ударной волны в солнечном ветре

Число Рейнольдса также играет важную роль в динамике этой области. Обычно оно имеет большие значения ( $Re \gg 1$ ) в солнечном ветре. Оно принимает большие значения между  $10^{12}$  и  $10^{14}$  в области ускорения солнечного ветра [6, 25].

Для упрощения задачи число Рейнольдса перед фронтом,  $Re_2$ , было выражено через  $\gamma$ ,  $Re_1$  и  $M_1$  аналогично [18] и [16]. На левой панели рис. 1 показано отношение  $Re_2/Re_1$  в зависимости от  $M_1$ . Оно уменьшается с увеличением числа Маха за ударным фронтом и равно единице (т.е.  $Re_1 = Re_2$ ) при  $M_1 \approx 2$ , как показано на этом рисунке. Это значение можно считать точкой перехода от слабых ударных волн к сильным (для слабых ударных волн  $M_1 < 2$ , для сильных  $M_1 > 2$ ) [15, 26].

Изменение  $Re_2$  по отношению к  $Re_1$  для разных значений  $M_1$  приведено для одноатомного газа с  $\gamma = 5/3$  на правой панели рис. 1. Используя число Рейнольдса из [25] и [6], можно получить  $Re_2$ . Оно увеличивается с увеличением  $Re_1$ . Еще один важный результат, полученный из этого графика, состоит в том, что  $Re_2$  имеет большие значения для меньших  $M_1$ .

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, СФОРМИРОВАВШЕЙСЯ ПОСЛЕ СМЕ 13 ДЕКАБРЯ 2006 ГОДА

Для нахождения параметров перед фронтом ударной волны, возникшей после СМЕ 13 декабря 2006 г., мы используем специальные решения уравнения (2) и соотношения Ренкина–Гюгонио для скачков [27]. Метод был адаптирован для Maple 9.5. Результаты по значениям некоторых

**Таблица 2.** Распределения некоторых физических параметров для разных значений  $M_1$  и  $Re_2/Re_1$

	$M_1 = 1.2$ $Re_2/Re_1 = 1.704$	$M_1 = 1.6$ $Re_2/Re_1 = 1.278$	$M_1 = 2.045$ $Re_2/Re_1 = 1$	$M_1 = 2.5$ $Re_2/Re_1 = 0.818$	$M_1 = 4$ $Re_2/Re_1 = 0.511$	$M_1 = 5$ $Re_2/Re_1 = 0.409$
$k$	1.297	1.842	2.329	2.703	3.368	3.571
$p_2/p_1$	1.550	2.950	4.978	7.563	19.750	31.000
$T_2/T_1$	1.195	1.602	2.137	2.798	5.863	8.680
$M_2/M_1$	0.705	0.429	0.294	0.221	0.123	0.095
$u_2/u_1$	0.771	0.543	0.437	0.437	0.297	0.280

физических параметров перед фронтом представлены в таблице 2 и на рис. 2–6. В этих вычислениях для солнечного ветра взято значение числа Рейнольдса за фронтом ударной волны  $10^{13}$  [6].

В таблице 2 представлены вариации параметров, которые описывают физическую структуру задачи для разных значений числа Маха за фронтом и чисел Рейнольдса. Эти параметры следующие: коэффициент сжатия (т.е. отношение плотностей  $n_2/n_1$ ), отношение давлений  $p_2/p_1$ , отношение температур  $T_2/T_1$ , а также отношение чисел Маха  $M_2/M_1$ , полученное из решения уравнения (2) и условий скачка. Одна из главных особенностей этих результатов состоит в том, что оба отношения  $M_2/M_1$  и  $u_2/u_1$  уменьшаются с возрастанием значений при  $Re_2/Re_1 > 1$  и увеличиваются при  $Re_2/Re_1 < 1$ . Критическое значение числа Маха для поворотной точки составляет  $M_1 = 2.045$ , при этом значении отношение чисел Рейнольдса равно единице, как показано на рис. 1. Эта точка важна не только для отношения чисел Рейнольдса, но и для силы ударных волн. Отношение давлений  $p_2/p_1$  возрастает в случае сильных возмущений. Как и  $p_2/p_1$ , отношение температур также возрастает с возрастающим значением числа Маха за фронтом.

На рис. 2 представлены зависимости плотности перед фронтом от  $M_1$  (слева) и  $Re_2/Re_1$  (справа). Значение плотности за фронтом было взято из таблицы 1. Как и предполагалось, значение  $n_2$  больше для более высоких значений числа  $M_1$  за фронтом. Однако плотность обратно пропорциональна увеличивающемуся отношению чисел Рейнольдса. Изменение почти линейно для слабых ударных волн (т.е.  $M_1 < 2$ ) и нелинейно для сильных (т.е.  $M_1 > 2$ ).

На рис. 3 представлены изменения давления перед фронтом в зависимости от  $M_1$  и  $Re_2/Re_1$ . В качестве значения давления за фронтом использовалось 0.983 нПа из таблицы 1.  $p_2$  больше для более высоких значений числа Маха за фронтом (например,  $M_1 = 5$ ). Как следует из таблицы 2,

вариации значений  $p_2$  при  $M_1 < 2$  малы, однако эти вариации велики при  $M_1 > 2$ .

Изменения температуры перед фронтом ( $T_2$ ) представлены на рис. 4 для разных значений  $M_1$  и  $Re_2/Re_1$ ; значение за фронтом взято из таблицы 1. Для слабых ударных волн (т.е.  $M_1 < 2$ ) вариации малы по сравнению с вариациями для сильных ударных волн ( $M_1 > 2$ ). На рис. 5 показаны изменения скорости перед фронтом  $u_2$  в зависимости от  $M_1$  и  $Re_2/Re_1$ . Значение скорости за фронтом было взято из таблицы 1. В отличие от других параметров ( $p_2$ ,  $\rho_2$  и  $T_2$ ) для слабых возмущений (т.е.  $M_1 < 2$ ) вариации велики по сравнению с вариациями для сильных ударных волн ( $M_1 > 2$ ).

На рис. 6 показаны зависимости отношения  $c_{s2}^2/c_{s1}^2$  от  $M_1$  и  $Re_2/Re_1$ . Оно возрастает с возрастанием числа Маха за фронтом аналогично  $p_2$ ,  $\rho_2$  и  $T_2$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СМЕ и солнечный ветер являются главными проявлениями солнечной активности. Эти события могут приводить в действие ударные волны и вызывать геомагнитные штормы. Следовательно, изучение этих явлений очень важно для исследования космической погоды. Другими словами, отслеживание ударных волн, вызванных СМЕ и следующих от Солнца в межпланетное пространство, является ключевой задачей для прогнозирования космической погоды. Понимание эволюции физических параметров остается очень сложной задачей и требует постоянных наблюдений.

Когда происходит корональный выброс массы, помимо взаимодействия с окружающим газом, происходит также сложный процесс с участием магнитной и тепловой энергий. Около Солнца доминирует магнитное давление. Давление газа становится преобладающим вдали от Солнца. Следовательно, гидродинамические модели могут быть применены в исследованиях ударных волн в солнечном ветре, вызванных СМЕ [7, 19, 20].

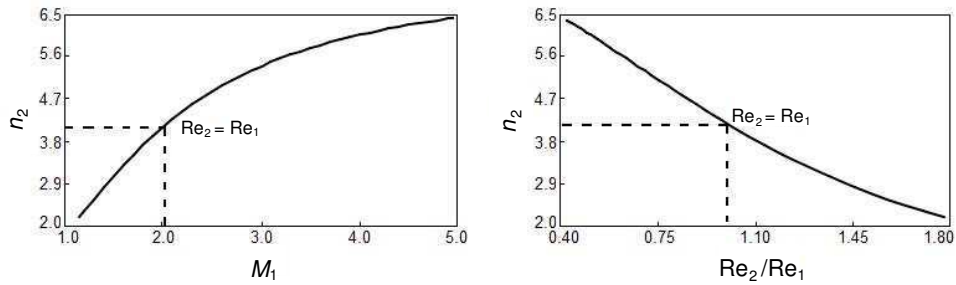


Рис. 2. Изменение плотности перед фронтом ударной волны (в  $\text{см}^{-3}$ ) в зависимости от значений  $M_1$  и  $\text{Re}_2/\text{Re}_1$ .

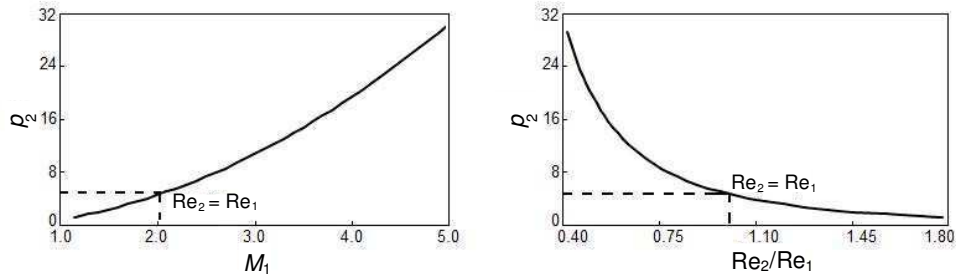


Рис. 3. Зависимость  $p_2$  (в нПа) от  $M_1$  и  $\text{Re}_2/\text{Re}_1$ .

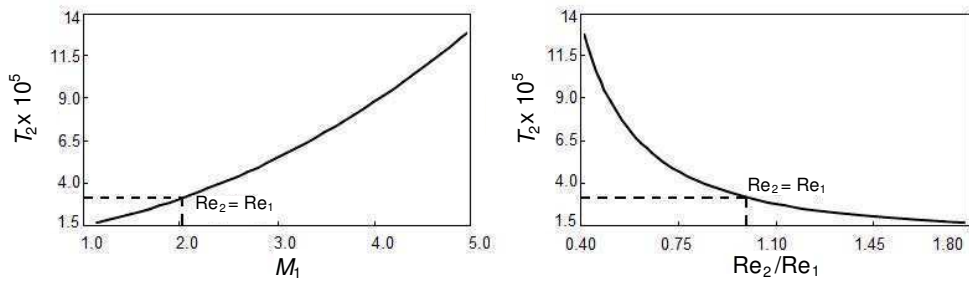


Рис. 4. Поведение  $T_2$  в зависимости от значений  $M_1$  и  $\text{Re}_2/\text{Re}_1$ .

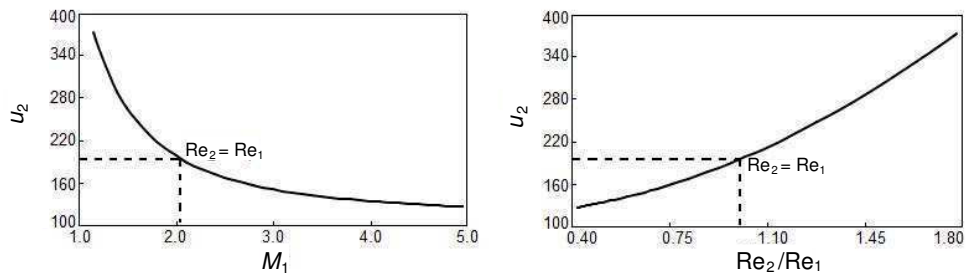


Рис. 5. Изменение скорости перед фронтом  $u_2$  в зависимости от  $M_1$  и  $\text{Re}_2/\text{Re}_1$ .

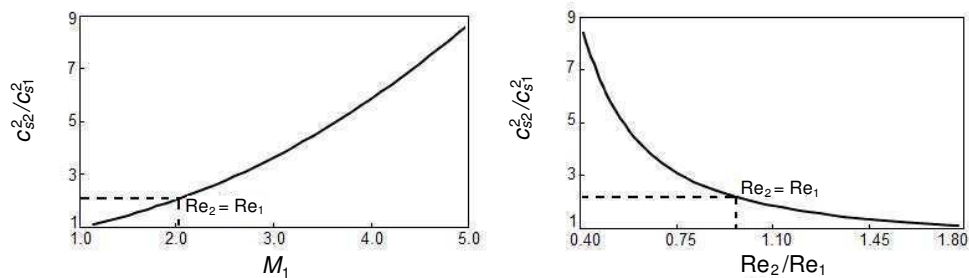


Рис. 6. Вариации отношения скоростей звука в зависимости от  $M_1$  и  $\text{Re}_2/\text{Re}_1$ .

В настоящей работе была изучена ударная волна, возникшая после СМЕ 13 декабря 2006 г. Мы проанализировали эволюцию ударной волны, распространяющейся в окружающей межпланетной среде, с помощью одномерной гидродинамической численной модели, где основное внимание уделяется исследованию эффектов числа Рейнольдса. Выводы, полученные в данной статье, представлены ниже по пунктам.

- Мы сравнили наш результат с исследованием Лиу и др. [15]. Значения физических параметров перед фронтом ударной волны (например, плотность равна  $6 \text{ см}^{-3}$ ) соответствуют значению  $M_1 \approx 4.5$  в настоящей модели (как показано на рис. 2). Этот результат, указывающий на то, что речь идет о сильной ударной волне ( $M_1 > 4$ ), согласуется с тем фактом, что СМЕ от 13 декабря 2006 г. был одним из сильнейших в истории солнечной активности.
- Отношение чисел Рейнольдса  $Re_2/Re_1$  приблизительно равно 0.45 для заданного значения числа Маха за фронтом (рис. 1). Из этого результата следует, что  $Re_2 < Re_1$ . Другими словами, газобразная среда за фронтом ударной волны имеет более турбулентный характер, чем среда перед фронтом [26].
- Коэффициент сжатия в таком типе ударных волн больше тройки.
- Значения давления и температуры перед фронтом, полученные в настоящей модели, приблизительно равны 24.6 нПа и  $1.08 \times 10^6$  К для сильных ударных волн при  $M_1 \approx 4.5$  (рис. 3 и 4).
- Из рис. 5 следует, что скорость афтершока составляет  $143 \text{ км с}^{-1}$  при  $M_1 \approx 4$ .
- Из значения числа Маха за фронтом около 4.5 следует, что скорость звука в межпланетной среде составляет примерно  $102 \text{ км с}^{-1}$  для данных значений (таблица 1). Это согласуется с работами Сузуки [10] и Накарякова и др. [11]. По их оценкам, ее значение составляет примерно  $100 \text{ км с}^{-1}$ .
- Отношение скоростей звука приблизительно равно 7.19 для  $M_1 \approx 4.5$  (рис. 6) при скорости звука перед фронтом, равной примерно  $274 \text{ км с}^{-1}$ . Из этого значения следует, что отношение чисел Рейнольдса очень близко к 0.5 (а именно 0.45). Это подтверждает приведенный выше результат.
- Было также продемонстрировано, что результаты, полученные из модели, близки к результатам из литературы. Мы планируем использовать эти

модельные результаты для исследования поведения энтропии во время ударной волны, ассоциированной с СМЕ 13 декабря 2006 г. Также будут изучаться эффекты числа Рейнольдса в ударных волнах для замагниченной плазмы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор с благодарностью отмечает техническую поддержку и помощь в обработке данных Фонда исследований университета Çanakkale Onsekiz Mart (проект № 2011/012). Он также благодарит анонимного рецензента за улучшение данной статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. N. Parker, *Astrophys. J.* **372**, 719 (1991).
2. E. R. Priest, *Solar Magnetohydrodynamics*, (D. Riedel Publ. Company, 2000).
3. S. K. Antiochos, C. R. De Vore, and J. A. Klimchuk, *Astrophys. J.* **510**, 485 (1999).
4. M. Stix, *The Sun*, (Springer-Verlag, 2004).
5. E. N. Parker, *Astrophys. J.* **128**, 664 (1958).
6. J. E. Borovsky and H. O. Funsten, *J. Geophysical Research Space Physics* **108**, SMP 13-1 (2003).
7. G. A. Gary, *Solar Physics* **203**, 71 (2001).
8. P. A. Sturrock and J. R. Spreiter, *J. Geophysical Research* **70**, 5345 (1965).
9. A. P. Rouillard, D. Odstrcil, N. R. Sheeley, et al., *Astrophys. J.* **735**, 7 (2011).
10. T. Suzuki, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **349**, 1227 (2004).
11. V. M. Nakariakov, L. Ofman, and T. D. Arber, *Astron. and Astrophys.* **353**, 741 (2000).
12. T. V. Stepanova and A. G. Kosovichev, *Advances in Space Research* **9**, 1855 (2000).
13. V. Eiselevich and M. Eiselevich, *Astrophys. J.* **761**, 68 (2012).
14. J. Vandegriff, K. Wagstaff, G. Ho, and J. Plauger, *Advances in Space Research* **36**, 2323 (2003).
15. Y. Liu, J. G. Luhmann, R. Müller-Mellin, et al., *Astrophys. J.* **689**, 563 (2008).
16. H. Çavuş, *Advances in Astronomy* **2013**, 1 (2013).
17. O. Reynolds, *Philosophical Transactions of the Royal Society* **174**, 935 (1883).
18. F. C. Bruhn, K. Pauly, and V. Kaznov, in *Proc. 8th Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space*, Ed. by B. Battrick, ESA SP-603, id. 46.1 (2005).
19. W. H. Matthaeus, S. Ghosh, S. Oughton, and D. A. Roberts, *J. Geophysical Research* **101**, 7619 (1996).
20. J. A. González-Esparza, P. Corona-Romero, and E. Aguilar-Rodríguez, in *Proc. XXIX Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases* (Cancun, Mexico, 2009).
21. D. Tsiklauri, V. M. Nakariakov, and T. D. Arber, *Astron. and Astrophys.* **395**, 285 (2002).
22. E. N. Parker, *Astrophys. J.* **134**, 20 (1961).

23. T. E. Holzer and W. I. Axford, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **8**, 31 (1970).  
 24. M. V. Eiselevich and V. G. Eiselevich, *Astronomy Reports* **55**, 359 (2011).  
 25. I. Veselovsky, *Astrophys. and Space Sci.* **277**, 219 (2001).  
 26. Z. U. A. Warsi, *Fluid dynamics: Theoretical and Computational Approaches*, 2nd ed. (CRC Press, Boca Raton Fla., 1998).  
 27. Y. B. Zel'dovich and Y. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (Dover Publications Inc., New York, 2002).

*Перевод Е. Чмырёвой*

## **On the Viscosity Effects in the Shock Wave Observed in the Solar Wind After the December 13, 2006 Coronal Mass Ejection**

**H. Çavuş**

Coronal mass ejections (CMEs) and solar wind are the main results of solar activity. These events can drive interplanetary shock waves and produce geomagnetic storms. The study of these events is very important for space weather purposes. The shock waves occur where the solar wind changes its characteristics from being supersonic (with respect to the surrounding interplanetary medium) to being subsonic. In the supersonic regime of compressible gas flow, the interaction of shock waves with viscosity is one of the central problems. The main purpose of this study is to search for the effects of viscosity in the shock wave observed after the December 13, 2006 coronal mass ejection.

*Keywords: solar wind—Sun: coronal mass ejections (CMEs)—Sun: activity*