

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ДИСТАНЦИОННОМ СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ**И.А. Крюков***Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
Москва, 119526, Москва, просп. Вернадского, 101-1***Аннотация**

В работе представлена математическая модель турбулентного солнечного ветра, построенная на основе многожидкостного описания взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой и трехпараметрической модели турбулентности. Модель реализована в рамках программного комплекса MS-FLUKSS (Multi-Scale Fluid-Kinetic Simulation Suite). Представлены результаты численного моделирования дистанционного солнечного ветра с нестационарными граничными условиями, построенными на данных OMNI 2 на 1 AU. Полученные распределения характеристик плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля сравниваются с измерениями Voyager 2 в дистанционном солнечном ветре.

TURBULENCE IN UNSTEADY DISTANT SOLAR WIND**I.A. Kryukov***Institute for Problems in Mechanics RAS, Russia, Moscow, 119526*

In the article the mathematical model of the turbulent solar wind is presented. The model is developed on the basis of multi fluid description of the solar wind interaction with the local interstellar media and three-equation turbulence model. The model is implemented as an extension of the Multi-Scale Fluid-Kinetic Simulation Suite (MS-FLUKSS). Numerical results are presented of the distant solar wind simulation with the time-dependent boundary conditions provided by the OMNI data. The calculated distributions of plasma properties and interplanetary magnetic field are compared with the Voyager 2 observations in the distant solar wind.

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечный ветер (СВ) состоит главным образом из водородной плазмы и распространяется со скоростью превосходящей быструю магнитозвуковую скорость уже на расстоянии 10 солнечных радиусов. Благодаря нестационарным процессам вблизи Солнца и обширным сдвиговым слоям СВ является турбулентным. На расстояниях более 1–5 AU вклад в СВ турбулентность вносят захваченные ионы через интенсивное взаимодействие волн и частиц. Захваченные ионы возникают в СВ в результате обмена зарядом между плазмой СВ и межзвездными нейтральными атомами (главным образом нейтральный водород). Одним из важнейших турбулентных эффектов является существенный нагрев СВ. Этот эффект становится заметным на расстояниях около 10 AU от Солнца и приводит к существенному уменьшению интенсивности гелиосферной ударной волны [8].

Измерения, проводимые космическими аппаратами, показывают, что плазма СВ на 1 AU является сильно нестационарной. Существенная нестационарность наблюдается даже в осредненных по 27 дню данных, что позволяет предположить, что она не связана с турбулентными пульсациями. Для того, чтобы оценить влияние нестационарных процессов, проходящих вблизи Солнца, на параметры плазмы, измеренные Voyager 2, проведено численное моделирование турбулентного СВ с использованием базы данных OMNI 2, которая содержит осредненные по часу параметры межпланетного магнитного поля и плазмы СВ, измеренные различными космическими аппаратами вблизи орбиты

Земли. Эти данные могут быть использованы как нестационарные граничные условия на 1 AU.

Первая попытка использовать данные OMNI была предпринята в [10] в 1D сферически симметричной постановке. Более того, использовалась стационарная модель турбулентности. Прямым следствием такой постановки является постоянство скорости СВ. Это делает невозможным самосогласованное численное моделирование этого течения и требует искусственной процедуры для учета нестационарности параметров плазмы.

В настоящей работе численное моделирование нестационарного СВ выполнено в самосогласованной нестационарной трехмерной постановке. За основу взята многожидкостная модель [13]. Для учета турбулентности СВ уравнения, описывающие заряженные частицы в модели [13], усредняются по Рейнольдсу и к ним добавляются уравнения модели турбулентности. Как и в [11] используется обобщенная на трехмерный нестационарный случай модель турбулентности из [2].

К сожалению, данные OMNI получены только в одной «точке» – вблизи Земли. Это не позволяет учесть трехмерные эффекты, характерные для СВ (например, наличие быстрого и медленного ветра и т.п.). Поэтому в расчетах на 1 AU использовались сферически симметричные распределения плотности, скорости и температуры плазмы, определяемые по данным OMNI. Но межпланетное магнитное поле задавалось в форме спирали Паркера, что позволяет учесть пересечение Voyager 2 гелиосферного токового слоя, расположенного вблизи плоскости эклиптики.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

2.1. Модель среднего течения

Предполагается, что СВ описывается МГД уравнениями. Уравнения для осредненных величин получаются с использованием декомпозиции Рейнольдса и ряда замыкающих предположений, которые широко используются при моделировании турбулентности в одномерном (сферически симметричном) СВ [2,13]: (1) пульсации плотности малы, (2) структурное подобию вторых моментов скорости и магнитного поля, (3) турбулентность перпендикулярна к среднему магнитному полю, (4) нормализованная разность энергий σ_D постоянна, (5) пренебрегается корреляциями давление-скорость и тройными корреляциями. В результате получим

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{u}}) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}} + \bar{p}^* \mathbf{I} - \frac{\bar{\mathbf{B}} \bar{\mathbf{B}}}{4\pi} \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\sigma_D}{2} \rho Z^2 \hat{\mathbf{B}} \hat{\mathbf{B}} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \nabla \cdot \left((\bar{E} + \bar{p}^*) \bar{\mathbf{u}} - \frac{(\bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{u}})}{4\pi} \bar{\mathbf{B}} \right)$$

$$= \nabla \cdot \left(\left(\frac{\sigma_D}{2} \frac{(\bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{u}})}{(\bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{B}})} + \frac{\sigma_c}{4\sqrt{\pi\rho}} \right) \rho Z^2 \bar{\mathbf{B}} \right) + \frac{\rho}{2} \dot{E}_{PI} + Q_c(r),$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{B}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{B}} - \bar{\mathbf{B}} \bar{\mathbf{u}}) = 0,$$

где ρ , \mathbf{u} , \mathbf{B} , p^* и E – плотность, скорость, магнитное поле, полное давление и полная энергия, соответственно. В (1) использованы обычные обозначения (\cdot) и $(\cdot)'$ для средних значений и пульсаций.

$\hat{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{B}} / (\bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{B}})^{1/2}$ – нормализованное среднее магнитное поле. Средние полное давление и энергию можно записать в виде

$$\bar{p}^* = \bar{p} + \frac{1}{8\pi} (\bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{B}}) + \frac{1 + \sigma_D}{4} \rho Z^2,$$

$$\bar{E} = \frac{1}{\gamma - 1} \bar{p} + \frac{1}{2} \rho (\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{u}}) + \frac{1}{8\pi} (\bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{B}}) + \frac{1}{2} \rho Z^2.$$

Величина Z^2 – удвоенная энергия турбулентности $Z^2 = (\bar{\mathbf{u}}' \cdot \bar{\mathbf{u}}') + (\bar{\mathbf{b}}' \cdot \bar{\mathbf{b}}')$, $\bar{\mathbf{b}}' = \bar{\mathbf{B}}' / \sqrt{4\pi\rho}$.

Величины σ_c и σ_D – нормализованные разности турбулентных кинетической и магнитной энергий и поперечная спиральность:

$$\sigma_c = 2(\bar{\mathbf{u}}' \cdot \bar{\mathbf{b}}') / Z^2, \quad \sigma_D = [(\bar{\mathbf{u}}' \cdot \bar{\mathbf{u}}') - (\bar{\mathbf{b}}' \cdot \bar{\mathbf{b}}')] / Z^2.$$

$Q_c(r)$ описывает передачу энергии от пульсаций турбулентности к СВ плазме.

2.2. Модель турбулентности

Величины Z и σ_c не заданы и должны быть определены при помощи некоторой модели турбулентности. Как в [11] за основу возьмем модель турбулентности в 1D сферически симметричном СВ [2]. Если не использовать предположения о стационарности и сферической симметрии, то можно получить следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial (\rho Z^2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{u}} Z^2) = -\sigma_D M_1 \rho Z^2 - \frac{\alpha f^+(\sigma_c)}{\lambda} \rho Z^3 + \rho \dot{E}_{PI},$$

$$\frac{\partial (\rho Z^2 \sigma_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{u}} Z^2 \sigma_c) = -\frac{\alpha f^-(\sigma_c)}{\lambda} \rho Z^3, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \lambda)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{u}} \lambda) = \beta f^+(\sigma_c) \rho Z - \frac{\beta}{\alpha} \frac{\lambda}{Z^2} \rho \dot{E}_{PI},$$

где α и β – постоянные Кармана – Тейлора, $\alpha = 2\beta = 0.8$ [2],

$$f^\pm(\sigma_c) = (1 - \sigma_c^2)^{1/2} \left[(1 + \sigma_c^2)^{1/2} \pm (1 - \sigma_c^2)^{1/2} \right] / 2.$$

M_1 – скалярный множитель, описывающий неоднородность и симметрию турбулентности

$$M_1 = \frac{2}{\sigma_D Z^2} \left(\overline{u_i u_j} - \overline{b_i b_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}.$$

Используя перечисленные выше предположения, можно получить

$$M_1 = \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} / 2 - \hat{\mathbf{B}} \cdot (\hat{\mathbf{B}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}}.$$

В моделях турбулентности одномерного СВ M_1 обычно предполагается постоянной, например, $M_1 = 1/2$ в [2]. \dot{E}_{PI} – скорость порождения энергии за счет образования новых захваченных ионов [12,13]:

$$\dot{E}_{PI} = f_d \frac{UV_A n_H}{n_{sw} \tau_{ion}} \exp\left(-\frac{L_{cav}}{r}\right),$$

где f_d – параметр, учитывающий детали процесса ионизации захваченных ионов [9] (как и в [2] $f_d = 0.25$); V_A – альфеновская скорость на 1 AU; $\tau_{ion} = 10^6$ с – время ионизации нейтральных атомов; $n_H = 0.1 \text{ cm}^{-3}$ – плотность межзвездного нейтрального водорода; n_{sw} – плотность СВ на 1 AU; $L_{cav} = 8 \text{ AU}$ – размер ионизационной каверны вокруг Солнца.

3. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Описанная выше модель турбулентности была реализована как один из компонентов программного комплекса MS-FLUKSS (Multi-Scale Fluid-Kinetic Simulation Suite). Этот комплекс предназначен для решения многомасштабных задач при помощи квази-монотонных численных схем с высоким разрешением на сетках с адаптацией (adaptive mesh refinement AMR) и кинетическим (Монте-Карло) или многожидкостным описанием нейтральных частиц [4,6]. Альтернативный подход к адаптации [14,15].

Структура MS-FLUKSS позволяет довольно легко расширять реализованную математическую модель. Алгоритмическое и вычислительное ядро MS-FLUKSS было интенсивно протестировано и верифицировано на большом количестве тестовых вариантов и показало хорошее сочетание точности и эффективности при решении сложных задач физики гелиосферы [3,4,1].

Для численного моделирования течений турбулентного СВ использовался вариант метода Годунова второго порядка, который является консервативным

TVD вариантом схемы Куранта – Изакона – Риса [5]. Второй порядок по времени достигается использованием MUSCL Hancock схемы. Численные потоки через грани расчетных ячеек определяются на основе решения линеаризованной задачи Римана (метод Roe). Для получения второго порядка по пространству применяется MUSCL подход с линейным восстановлением параметров внутри ячеек. Соленоидальность магнитного поля достигается на основе 8 волнового МГД подхода [7].

4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исключения влияния 27-дневного солнечного цикла на полученные результаты все данные OMNI 2 были осреднены по 27 дневному временному интервалу. Таким образом, для плотности, температуры, скорости плазмы и межпланетного магнитного поля использовались осредненные данные. На внутренней границе 1 AU предполагалось наличие сферической симметрии, но межпланетное магнитное поле задавалось в форме спирали Паркера на основе радиальной компоненты магнитного поля, получаемой по осредненным данным OMNI.

Для получения параметров турбулентности на 1 AU использовался подход из [10]. Величина пульсаций магнитного поля оценивалась по измеренной нормальной компоненте межпланетного магнитного поля. Величина пульсаций скорости получена с использованием предположения $\sigma_D = -1/3$. Это дает граничные условия для Z и σ_c . Масштаб турбулентности был равен 0.03 AU на 1 AU. Внешняя граница располагалась на 80 AU, где СВ сверхзвуковой и не требуется граничных условий.

Численное моделирование выполнено на сферической сетке [1]. Базовая расчетная сетка в наших расчетах была $256 \times 64 \times 64$ ячейки. Для улучшения разрешения использовался AMR подход, но заметного влияния на результаты он не оказал.

На рис. 1–4 показаны измеренные и рассчитанные параметры плазмы и магнитного поля вдоль траектории Voyager 2 в зависимости от времени. Сплошная линия соответствует данным Voyager 2, а пунктирная – результаты нашего расчета, осредненные по 27 дням.

На рис. 1 представлено межпланетное магнитное поле, а на рис. 2 – скорость плазмы. На рис. 3 показаны плотность плазмы и на рис. 4 – температура. В целом проведенные расчеты воспроизводят существенно нестационарный характер измеренных величин и правильное поведение всех параметров вдоль траектории Voyager 2. Следует отметить, что причиной определенного расхождения результатов моделирования и измерений Voyager может служить предположение о сферической симметрии течения на внутренней границе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены некоторые предварительные результаты моделирования распространения СВ от 1 AU до 80 AU с использованием данных OMNI 2 в качестве граничных условий. При моделировании учтено влияние турбулентности и захваченных ионов. Удалось получить хорошее согласие с экспериментальными данными по ряду параметров.

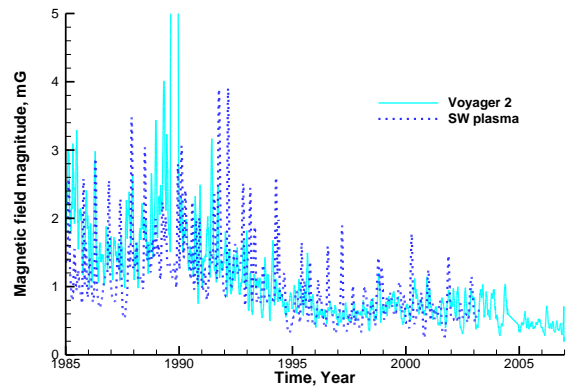


Рис. 1. Распределения магнитного поля вдоль траектории Voyager 2

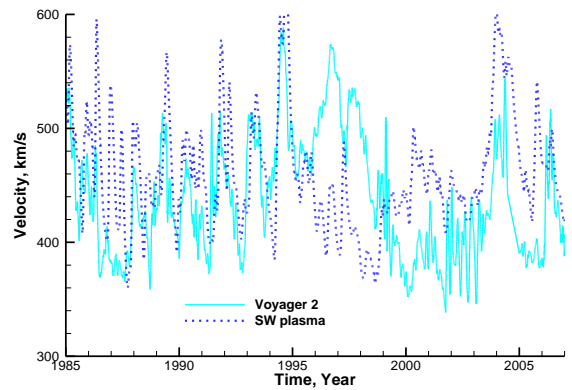


Рис. 2. Распределения скорости вдоль траектории Voyager 2

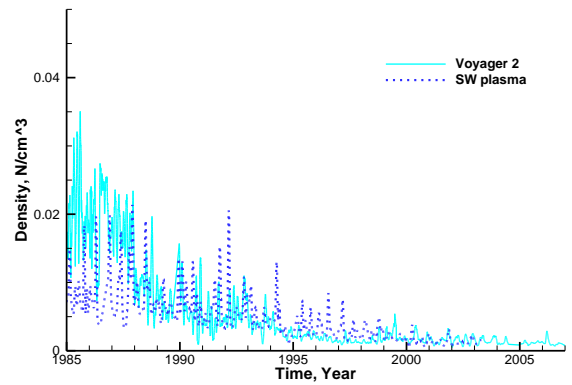


Рис. 3. Распределения плотности вдоль траектории Voyager 2

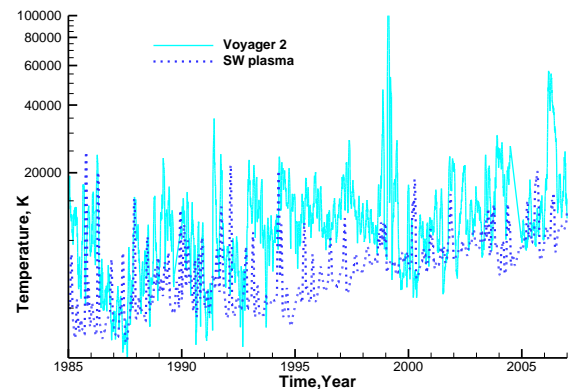


Рис. 4. Распределения температуры вдоль траектории Voyager 2

Данная работа продолжает исследования в области космической газодинамики и аэротермодинамики гиперзвуковых потоков, проводимых в лаборатории Радиационной газовой динамики [14, 15].

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- \mathbf{CB} – солнечный ветер;
 ρ – плотность;
 \mathbf{u} – скорость;
 \mathbf{B} – магнитное поле;
 p^* – полное давление;
 E – полная энергия;
 $\hat{\mathbf{B}}$ – нормализованное среднее магнитное поле;
 Z^2 – удвоенная энергия турбулентности;
 σ_c – нормализованная разница турбулентной кинетической и магнитной энергий;
 σ_D – поперечная спиральность;
 $Q_e(r)$ – функция, описывающая передачу энергии от пульсаций турбулентности к СВ плазме;
 α – постоянная Кармана – Тейлора;
 β – постоянная Кармана – Тейлора;
 M_1 – скалярный множитель, описывающий неоднородность и симметрию турбулентности;
 \dot{E}_{PI} – скорость порождения энергии за счет образования новых захваченных ионов;
 f_d – параметр, учитывающий детали процесса изотропизации захваченных ионов;
 V_A – альфеновская скорость на единицу AU;
 τ – время ионизации нейтральных атомов;
 n_H – плотность межзвездного нейтрального водорода;
 n_{sw} – плотность СВ на 1 AU;
 L_{cav} – размер ионизационной каверны вокруг Солнца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Borovikov S.N., Kryukov I.A., Pogorelov N.V., Adaptive Mesh Refinement on Curvilinear Grids // Astronomical Society of the Pacific Conf. Ser. 406, Numerical Modeling of Space Plasma Flows: ASTRONUM-2008. - ASP, San Francisco, 2009. Pp.127–134.
- Breech B., Matthaeus W.H., Minnie J., Bieber J.W., Oughton S., Smith C.W., Isenberg P.A. Turbulence transport throughout the heliosphere // J. Geophys. Res., 2008. 113, A08105.
- Kryukov I.A., Borovikov S.N., Pogorelov N.V., Zank G.P., Magnetohydrodynamics with Chombo: Tests and First Results // Astronomical Society of the Pacific Conf. Ser. 359, Numerical Modeling of Space Plasma Flows: ASTRONUM-2006. - ASP, San Francisco, 2006. Pp. 25–36.
- Kryukov I.A., Borovikov S.N., Pogorelov N.V., Zank G.P. // Astronomical Society of the Pacific Conf. Ser. 385, Numerical Modeling of Space Plasma Flows: ASTRONUM-2007. - ASP, San Francisco, 2008. Pp. 265–272.
- Kulikovskii A.G., Pogorelov N.V., Semenov A.Yu. Mathematical Aspects of Numerical Solution of Hyperbolic Systems.- Chapman & Hall, CRC, Boca Raton, FL, 2001.
- Pogorelov N.V., Borovikov S.N., Florinski V., Heerikhuisen J., Kryukov I.A., Zank G.P. // Astronomical Society of the Pacific Conf. Ser. 406, Numerical Modeling of Space Plasma Flows: ASTRONUM-2008. - ASP, San Francisco, 2009. Pp.149–159.
- Powell K.G., Roe P.L., Linde T.J., Gombosi T.I. De Zeeuw D.L., A solution-adaptive upwind scheme for ideal magnetohydrodynamics // J. Comp. Phys., 1999. 154, 284–309.
- Richardson J.D., Kasper J.C., Wang C., Belcher J.W., Lazarus A.J., Cool heliosheath plasma and deceleration of the upstream solar wind at the termination shock // Nature, 2008. 454, 63–66.
- Smith C.W., Matthaeus W.H., Zank G.P., Ness N.F., Oughton S., Richardson J.D. Heating of the low-latitude solar wind by dissipation of turbulent magnetic fluctuations // J. Geophys. Res., 2001. 106, 8253–8272.
- Smith C.W., Isenberg P.A., Matthaeus W.H., Richardson J.D. Turbulent Heating of the Solar Wind by Newborn Interstellar Pickup Protons // Astrophys.J., 2006. 638, Pp.508–517.
- Usmanov A.V., Matthaeus W.H., Breech B.A., Goldstein, M.L. Solar Wind Modeling with Turbulence Transport and Heating // Astrophys.J., 2011.727, p. 84.
- Williams L.L., Zank G.P., Matthaeus W.H. Dissipation of pickup-induced waves: A solar wind temperature increase in the outer heliosphere ? // Jour. Geophys. Res., 1995. 100, Pp. 17059–17067.
- Zank G.P., Matthaeus W.H., Smith C.W. Evolution of turbulent magnetic fluctuation power with heliospheric distance // J.Geophys.Res., 1996. 101, Pp. 17093–17107.
- Кузенов В.В. Использование регулярных адаптивных сеток для анализа импульсных сверхзвуковых струй плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-016.pdf>
- Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Построение двумерных неструктурированных сеток методом молекулярной динамики. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т.11. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-031.pdf>