



МЕХАНИКА

УДК 533.6.011: 533.72: 523.2

ГАЗОДИНАМИКА И МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖПЛАНЕТНОЙ И МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕД. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

В.Б. Баранов

Институт проблем механики РАН,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
кафедра аэромеханики и газовой динамики
E-mail: baranov@ipmnet.ru

Проблема взаимодействия межпланетной и межзвездной сред сводится к исследованию взаимодействия сверхзвукового потока полностью ионизованного водородного газа от источника (солнечный ветер) со сверхзвуковым поступательным потоком межзвездного газа, главными компонентами которого являются нейтральная (атомы водорода) и плазменная (протоны и электроны).

В работе описывается самосогласованная кинетико-континуальная модель такого взаимодействия, предложенная в [8]. Основная особенность модели заключается в том, что течение нейтральной компоненты и ее влияние на плазменную не могут быть описаны в рамках механики сплошных сред, поскольку для главного процесса резонансной перезарядки (атомов H на протонах) число Кнудсена порядка единицы ($Kn \sim 1$). В модели [8] уравнения Эйлера с «источниками» импульса и энергии для плазменной компоненты решаются совместно с уравнением Больцмана для нейтральной компоненты. Подробно описывается математическая постановка задачи и основные результаты численных расчетов. Некоторые предсказания модели в дальнейшем были подтверждены экспериментальными данными, полученными на космических аппаратах, исследующих внешние области солнечной системы. Например, образование «водородной стенки», предсказанное в [7, 8] и открытое на аппарате Hubble Space Telescope [11], пересечение аппаратами Voyager-1 и Voyager-2 гелиосферной ударной волны соответственно в декабре 2004 г. (на расстоянии 94 а.е.) и в августе 2007 г. (на расстоянии в 84 а.е.) и др.

В работе также описываются результаты развития модели [8], учитывающие влияние циклов солнечной активности, аномальных космических лучей, межзвездного магнитного и др.

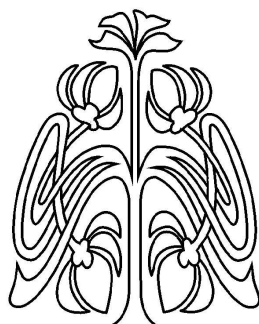
Gasdynamics and Magnetohydrodynamics of the Interplanetary and Interstellar Gas Interaction. Theory and Experiments

V.B. Baranov

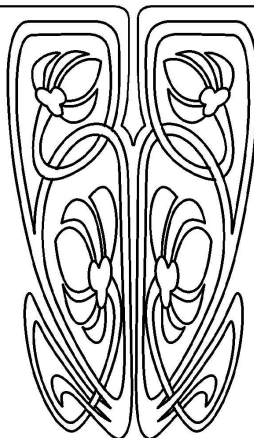
A problem of the interaction between interplanetary and interstellar gas flows is the problem of the interaction between the supersonic flow of the fully ionized hydrogen gas flow from a source (solar wind) and the supersonic translational flow of the interstellar gas which has neutral (H atoms) and plasma (electrons and protons) components.

Self-consistent, kinetic-continual model of this interaction, suggested in [8], is described in this paper. This model has the basic peculiarity connected with the mean free path of H atoms in a main process of the resonance charge exchange (charge exchange between H atoms and protons), namely, Knudsen number in this process $Kn \sim 1$, i. e. hydrodynamic equations are not correct for describing H atoms motion. Euler equations with «sources» of the momentum and energy for the plasma component and the Boltzmann equation for neutral component are solved in the model [8]. Mathematical formulation of the problem considered and the basic results of numerical calculations are in details described. Some predictions of the model [8] were later confirmed by experimental data obtained onboard of spacecraft investigating outer regions of the solar system. For example, the «hydrogen wall», predicted in [7, 8], was discovered experimentally onboard of Hubble Space Telescope [11] and Voyagers 1 and 2 have crossed the solar wind termination shock in December 2004 (at the distance 94 AU) and in August 2007 (at the distance 84AU) respectively (see Fig. 2) and so on.

Results of a development of the model in [8] taking into account effects of the solar cycles, anomalous cosmic rays, interstellar magnetic field and so on are also described.



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения газовой динамики проблема взаимодействия межпланетной и межзвездной сред сводится к исследованию взаимодействия сверхзвукового потока от источника (солнечный ветер) со сверхзвуковым поступательным потоком газа (межзвездная среда). В рамках механики сплошных сред в таком взаимодействии образуются три поверхности сильного разрыва: внешняя и внутренняя ударные волны торможения поступательного потока и потока от источника соответственно и тангенциальный разрыв, разделяющий эти потоки. Первая модель сверхзвукового обтекания полностью ионизованной водородной плазмы солнечного ветра межзвездным газом была построена в работе [1] в предположении, что межзвездный газ, так же как и солнечный ветер, является полностью ионизованной водородной плазмой, что позволило решить задачу в рамках уравнений гидроаэромеханики. При этом задача была решена в ньютоновском приближении тонкого слоя (см., напр. [2]), в котором толщина области между ударными волнами предполагается малой по сравнению с ее расстоянием от Солнца. Только несколько лет спустя путем численных расчетов удалось показать [3], что в реальных условиях область между ударными волнами не является тонкой, а наземные астрономические наблюдения показали [4], что солнечная система погружена в частично ионизованное локальное межзвездное облако и движется относительно него со скоростью $V_\infty \sim 25$ км/сек. Измерение температуры газа в локальном облаке привело к величине $T_\infty \sim 7000$ К, т.е. число Маха, набегающего на Солнце газа, оказалось равным $M_\infty \sim 2$. Таким образом, модель, предложенная в [1], оказалась непосредственно неприменимой к рассматриваемой проблеме взаимодействия солнечного ветра и межзвездного газа, хотя и привела к развитию некоторых направлений в астрофизике (межзвездные пузыри, обтекание межзвездных глобул звездными ветрами, взаимодействие звездных ветров в двойных системах и т.п. [5]).

Построение физически обоснованной модели взаимодействия двух сверхзвуковых потоков газа для рассматриваемой проблемы осложнялось тем, что взаимодействие солнечного ветра с заряженной компонентой межзвездного газа (в дальнейшем для краткости — плазменная компонента) можно описывать в рамках механики сплошных сред (см., напр. [6]), в то время как макроскопические уравнения гидроаэромеханики для описания взаимодействия солнечного ветра с нейтральной компонентой (атомами H) становятся некорректными, поскольку число Кнудсена $Kn = l/L \geq 1$ (l — длина свободного пробега атомов водорода в главном процессе перезарядки с протонами, а L — характерный размер задачи). В этом случае для описания движения атомов H требуется использование кинетического приближения, в котором основным является уравнение Больцмана для функции распределения атомов водорода f_H .

На рис. 1 приведена качественная картина рассматриваемого течения. Здесь НР — тангенциальный разрыв, разделяющий плазменную компоненту межзвездной среды и плазму солнечного ветра. Этот тангенциальный разрыв обычно называют гелиопаузой. На гелиопаузу справа набегают сверхзвуковой ($M_\infty > 1$) поток межзвездного газа, плазменная компонента которого тормозится через головную ударную волну BS. Солнечный ветер тормозится во внутренней ударной волне TS, которая обычно называется гелиосферной ударной волной. Движущиеся из межзвездной среды (область (4)) атомы водорода свободно проходят через поверхности сильного разрыва (их траектории показаны на рис. 1 пунктирными линиями), подвергаясь перезарядке с протонами в каждой из областей (1)–(3). В результате перезарядки в рассматриваемом течении рождаются новые протоны, параметры которых совпадают с параметрами атомов H . Эти протоны,

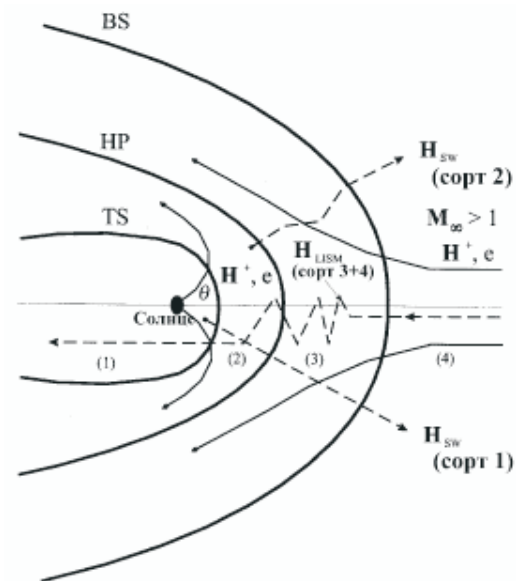


Рис. 1



взаимодействуя с плазменной компонентой основного течения, изменяют импульс и энергию последней. В результате перезарядки также рождается как минимум три сорта атомов водорода, которые имеют параметры протонов той области, в которой они родились. Атомы H_{SW} , образующиеся в сверхзвуковом солнечном ветре (сорт 1) и во внутреннем ударном слое (сорт 2), имеют параметры соответствующих областей. В частности, атомы сорта 1, имея большую среднюю скорость (относительно тепловой), направленную от Солнца, проникают в межзвездную среду и, перезаряжаясь с протонами набегающего потока, изменяют импульс и энергию плазменной компоненты межзвездной среды еще до головной ударной волны BS.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ЕЕ ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Впервые кинетико-континуальная модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой была предложена в [7] и численно решена в работе [8]. Как было отмечено выше, для описания движения плазменной компоненты межзвездной среды и солнечного ветра были использованы уравнения идеальной газодинамики с «источниковыми» членами, описывающими влияние атомов H через посредство процессов перезарядки ($H + H^+ = H^+ + H$). В стационарном случае они будут иметь вид

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \rho \mathbf{V} &= 0, & (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + \frac{1}{\rho} \nabla p &= \mathbf{F}_1[f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}), p, \mathbf{V}, \rho], \\ \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{V} \left(\varepsilon + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right) \right] &= F_2[f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H), p, \mathbf{V}, \rho], & p &= (\gamma - 1) \rho \varepsilon. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь \mathbf{V} , p , ρ и ε — средняя скорость, давление, плотность и внутренняя энергия плазменной компоненты соответственно, γ — отношение теплоемкостей, \mathbf{F}_1 и F_2 — «источниковые» члены, характеризующие изменение импульса и энергии плазменной компоненты за счет процессов перезарядки и являющиеся функционалами от функции распределения атомов водорода f_H и газодинамических параметров. Для замыкания системы уравнений Эйлера (1) необходимо добавить уравнение Больцмана для f_H , которое в рассматриваемом случае будет иметь вид

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_H \cdot \frac{\partial f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)}{\partial \mathbf{r}} + \left[\frac{\mathbf{F}_r + \mathbf{F}_g}{m_H} \right] \cdot \frac{\partial f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)}{\partial \mathbf{w}_H} &= f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \int |\mathbf{w}'_H - \mathbf{w}_H| \sigma f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}'_H) d\mathbf{w}'_H - \\ &- f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \int |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p| \sigma f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p) d\mathbf{w}_p, \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{r} , \mathbf{w} — радиус-вектор и индивидуальная скорость частицы, нижние индексы « H » и « p » относятся к атомам водорода и протонам соответственно, σ — эффективное сечение столкновения атома H и протона, сопровождающееся процессом перезарядки, верхний индекс «штрих» означает скорость частицы после столкновения, \mathbf{F}_r и \mathbf{F}_g — силы радиационного отталкивания и гравитационного притяжения Солнца соответственно. Функция распределения протонов f_p считается локально-максвелловской, поскольку только в этом случае уравнения (1) являются корректными. Поэтому уравнение (2) является линейным относительно f_H . «Источниковые» члены в уравнениях (1) вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1 &= \frac{1}{n_p} \int d\mathbf{w}_H \int d\mathbf{w}_p \sigma |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p| (\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p) f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p), \\ F_2 &= m_H \int d\mathbf{w}_H \int d\mathbf{w}_p \sigma |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p| \left(\frac{w_H^2}{2} - \frac{w_p^2}{2} \right) f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p), \\ n_H &= \int d\mathbf{w}_H f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H), & n_p &= \int d\mathbf{w}_p f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p), \end{aligned} \quad (3)$$

где n_H и n_p — концентрации атомов водорода и протонов. Уравнения Эйлера для полностью ионизованной плазмы (1) справедливы при предположении о равенстве электронной и протонной температуры. Кроме того, предполагается мгновенная релаксация вновь образовавшихся в результате перезарядки протонов, т.е. предполагается, что они мгновенно приобретают скорость и температуру протонов плазменной компоненты.



Для решения интегрального уравнения (2) для функции распределения f_H и вычисления «источниковых» членов в уравнениях (1) по формулам (3) использовался усовершенствованный метод Монте-Карло с расщеплением траекторий, разработанный для рассматриваемой проблемы в [9]. Этот метод дает существенно большую степень точности, чем прямой метод Монте-Карло. Предполагается, что солнечный ветер сферически симметричный. Это предположение дает возможность рассматривать задачу как осесимметричную (в сферической системе координат все параметры зависят от гелиоцентрического расстояния r и угла θ , отсчитываемого от оси Oz , направленной навстречу набегающему потоку). В качестве граничных условий для уравнений (1) использовались постоянные значения скорости V_E , концентрации электронов n_{eE} (протонов n_{pE}) и число Маха M_E на орбите Земли ($r = 1$ а.е.), а также значения тех же параметров в межзвездном газе (с индексом « ∞ »). Уравнения (1) решались численно методом Годунова с выделением поверхностей сильного разрыва. При этом на ударных волнах BS и TS (рис. 1) удовлетворялись соотношения Гюнио, а на гелиопаузе HP — равенство нулю нормальной компоненты скорости и равенство давлений (условия на тангенциальном разрыве). Для решения уравнения (2) функция распределения атомов водорода в межзвездной среде $f_{H\infty}$ считалась максвелловской. Кроме того, из наблюдательных данных необходимо было задавать отношение $\mu = F_r/F_g$, т.е. отношение сил солнечного радиационного давления и гравитационного притяжения.

Для решения поставленной осесимметричной задачи использовался метод глобальных итераций, первый шаг которого состоял в решении чисто газодинамической задачи, т.е. в решении уравнений (1) для задачи обтекания сферически симметричного сверхзвукового источника (солнечный ветер) сверхзвуковым поступательным потоком полностью ионизованного газа (межзвездный газ) с «источниковыми» членами, равными нулю. Затем методом Монте-Карло рассчитывались траектории атомов водорода в поле газодинамических параметров, что позволяло в первом приближении вычислить «источниковые» члены по формулам (3). Вычисленные в этом приближении «источниковые» члены использовались для решения газодинамической части проблемы на следующем шаге итераций, на котором принимались в расчет процессы перезарядки. Для расчета траекторий атомов H в новом поле газодинамических параметров и вычисления «источниковых» членов в следующем приближении снова использовался метод Монте-Карло. Процесс итераций продолжался до тех пор, пока последующее приближение не даст пренебрежимо малые поправки ($\sim 2\%$) к предыдущему. В работе [8] процесс итераций прекращался на четвертом шаге.

На рис. 2 представлены результаты расчета при следующих значениях параметров на орбите Земли и в набегающем потоке межзвездного газа

$$\begin{aligned} n_{eE} &= 7 \text{ см}^{-3}, & V_E &= 450 \text{ км/сек}, & M_E &= 10, & \mu &= 0.75, \\ n_{p\infty} &= 0.07 \text{ см}^{-3}, & V_\infty &= 25 \text{ км/сек}, & M_\infty &= 2, & n_{H\infty} &= 0.14 \text{ см}^{-3}. \end{aligned} \quad (4)$$

Пунктиром на рис. 2 представлены результаты расчетов при $n_{H\infty} = 0$, т.е. при отсутствии влияния атомов водорода. Как видно из рис. 2, перезарядка приводит, во-первых, к существенному уменьшению гелиоцентрического расстояния области сильного взаимодействия двух потоков (область между ударными волнами) и, во-вторых, сложная картина течения в хвостовой области, состоящая из отраженной ударной волны (RS), тангенциального разрыва (TD) и диска Маха (MD), исчезает при отсутствии перезарядки. Гелиосферная ударная волна становится гладкой (отсутствует тройная точка A), а течение в области меж-

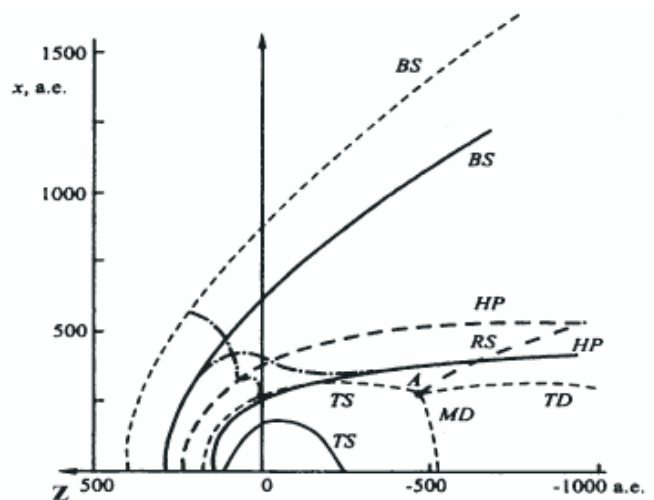


Рис. 2

ду гелиопаузой и гелиосферной ударной волной (внутренний ударный слой) — дозвуковым.

В номере журнала Science (2005 г., т. 309) американские ученые сообщили, что в декабре 2004 г. произошло событие, которого ждали в течение почти 30 лет, а именно пересечение аппаратом Voyager-1 гелиосферной ударной волны на расстоянии от Солнца в 94 а.е., что с большой степенью точности совпадает с предсказанием этого результата в [8] (см. рис. 2). Поскольку на этом аппарате не было приборов, измеряющих скорость, плотность и температуру солнечного ветра, то одним из решающих доказательств пересечения был измеренный скачок межпланетного магнитного поля [10].

В августе 2007 года Voyager-2, на котором такие приборы, были установлены, пересек эту ударную волну на расстоянии в 84 а.е. Это событие, которое широко обсуждалось на конференции Американского геофизического союза (AGU) в декабре 2007 года в Сан-Франциско, также подтвердило предсказание кинетико-континуальной модели по положению гелиосферной ударной волны с точностью в несколько процентов.

Еще одним неожиданным результатом модели в [8] было предсказание так называемой «водородной стенки» (этот результат был получен уже на первой итерации метода Монте-Карло в работе [7]), представляющей собой немонотонное поведение концентрации атомов водорода (рис. 3), проникающих в солнечный ветер из межзвездной среды.

Как видно из рис. 3, вблизи гелиопаузы концентрация атомов H имеет ярко выраженный максимум, связанный с образованием вторичных атомов H сорта 3. Протоны межзвездной среды, замедленные во внешнем ударном слое (области между BS и HP), в результате перезарядки с первичными атомами H межзвездной среды (сорт 4) превращаются в атомы H сорта 3, имеющими скорость партнеров по перезарядке. Уменьшение средней скорости атомов H сортов 3 и 4 приводит к возрастанию их суммарной концентрации. Уменьшение же их концентрации при приближении к Солнцу связано с процессами вторичных перезарядок в ударном слое и фотоионизации солнечным излучением. Физически очевидно, что «водородная стенка» наиболее ярко выражена вблизи критической линии тока (вблизи оси симметрии Oz) из-за наиболее эффективного торможения плазменной компоненты межзвездной среды на солнечном ветре вблизи гелиопаузы и практически отсутствует в хвосте.

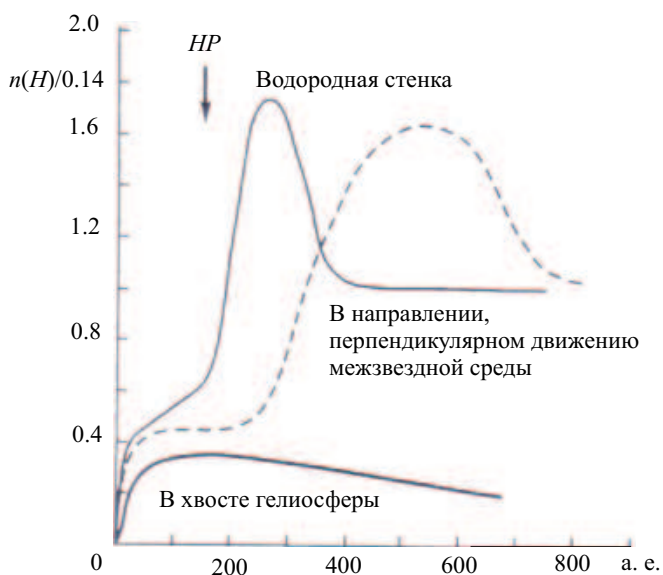


Рис. 3

Первое сообщение об экспериментальном открытии «водородной стенки» (см. [11]) на основе интерпретации наблюдений спектров поглощения излучения в водородной линии Лайман- α от звезды α -Cep при помощи прибора GHRS на борту американского аппарата Hubble Space Telescope было сделано в работе [12]. Один из полученных в этой работе спектров приведен на рис. 4. На этом рисунке кривая 1 представляет собой спектр излучения звезды, кривая 2 — спектр, полученный прибором GHRS. Кривая 3 получена в предположении, что поглощение от звезды происходит только на межзвездных атомах водорода. Видно, что это кривая не совпадает с измеренным спектром. Пунктирная линия 4 получена при учете поглощения не только в межзвездной среде, но и в «водородной стенке». Как видно из рис. 4, правая часть измеренного спектра полностью совпадает с кривой 4. Это привело авторов [11] к выводу об экспериментальном открытии «водородной стенки», поскольку именно «синему» доплеровскому смещению соответствуют атомы H , проникающие из межзвездной среды в солнечную систему. Интересно, что несовпадение левого крыла спектра («красное» доплеровское смещение) объясняется наличием поглощения в «водородных стенках» у наблюдаемых звезд [13, 14], что, в свою очередь, свидетельствует о наличии у них звездных ветров.

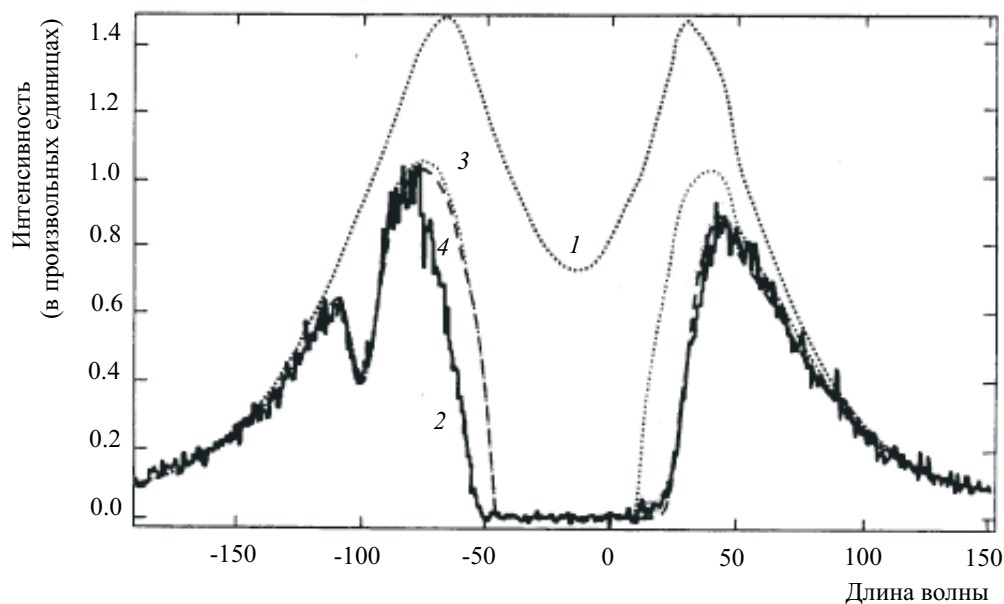


Рис. 4

Здесь следует заметить, что рассмотренная выше модель предсказала еще несколько физических явлений, одним из которых является эффект «фильтра», связанный с тем, что концентрация атомов H , проникших в солнечную систему, меньше, чем их концентрация в межзвездной среде (см. рис. 3) вследствие большого эффективного сечения столкновений, сопровождающихся перезарядкой. Этот эффект «фильтра», связанный в основном с внешним ударным слоем (область между BS и HP на рис. 1), оказался существенным и для атомов кислорода и азота [15], которые не влияют на рассмотренное течение из-за их малого космического содержания. Данные измерений на космическом аппарате *Ulysses* и их интерпретация доказали наличие такого «фильтра». Особенно убедительными явились прямые измерения на этом аппарате параметров гелия, которые показали [16], что его параметры в солнечной системе совпадают с теми параметрами, которые измеряются в межзвездной среде при помощи телескопов. Это связано с тем, что для атомов гелия эффективное сечение перезарядки очень мало по сравнению с сечениями для атомов H , O и N .

2. РАЗВИТИЕ КИНЕТИКО-КОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой, рассмотренная выше, не объясняет многих эффектов, которые были обнаружены при экспериментальном исследовании гелиосферы при помощи космических аппаратов. Модель в работе [8] является стационарной и не учитывает 11-летний цикл солнечной активности. Влияние этих циклов наиболее полно было исследовано в [17]. Было показано, в частности, что вдоль оси симметрии положение гелиосферной ударной волны (TS) меняется за цикл менее чем на 10%, гелиопаузы (HP) — около 2%, а положение головной ударной волны (BS) практически не меняется.

В рамках модели работы [8] предполагалось, что в результате процессов перезарядки вновь образовавшиеся протоны мгновенно приобретают скорость и температуру основных протонов (происходит мгновенная релаксация). Отказ от этого предположения приводит к необходимости добавить к системе уравнений (1) и (2) дополнительное уравнение для «давления» (момента функции распределения) вновь образовавшихся протонов. Результаты численного решения такой проблемы в [19] привели к выводу о том, что неравновесность приводит к некоторому уменьшению толщины внутреннего ударного слоя в головной части течения (область между TS и HP) и довольно сильному увеличению гелиоцентрического расстояния до гелиосферной ударной волны (на величину ~ 70 а.е.) в хвостовой области. Кроме того, в [19] были вычислены потоки энергичных H -атомов из области внутреннего ударного слоя, которые планируется измерять с 1 а.е. на специальном спутнике IBEX для изображения внутреннего ударного слоя в этих потоках. Показано, что модель с учетом неравновесности предсказывает меньшие (по сравнению с моделью в [8]) потоки частиц с энергией <1 кэВ и большие потоки частиц с энергией >1 кэВ. В США спутник IBEX предполагается запустить в 2008 году.



До последнего времени оставался открытым вопрос о размерах области влияния солнечного ветра на межзвездный газ в хвостовой части гелиосферы, поскольку гелиопауза является незамкнутой поверхностью и она может быть названа границей гелиосферы только в головной части течения (ее гелиоцентрическое расстояние вдоль оси симметрии ~ 150 а.е., как видно из рис. 2). Иными словами, возникает вопрос: до каких гелиоцентрических расстояний параметры солнечного ветра становятся неотличимыми от параметров невозмущенного поступательного потока? Эта проблема исследовалась в работе [18]. Численные расчеты в рамках осесимметричной модели показали, что процесс перезарядки приводит к постепенному выравниванию параметров солнечного ветра в хвостовой области, и на расстоянии ~ 40 – 50 тысяч а.е. параметры солнечного ветра и невозмущенного потока межзвездного газа становятся неотличимыми.

В работах [20, 21] было исследовано влияние космических лучей на рассмотренное в [8] течение. Было показано [20], что влияние процессов перезарядки существенно сильнее влияния галактических космических лучей (ГКЛ) и последним можно пренебречь. Однако аномальная компонента космических лучей, как показано в [21], приводит к образованию «предвестника» у гелиосферной ударной волны и, как результат, к уменьшению интенсивности этой ударной волны. Последнее может изменить параметры течения во внутреннем ударном слое, что важно для проектирования экспериментов на упомянутом выше спутнике IBEX.

В заключение заметим, что построение трехмерной магнитогидродинамической модели, учитывающей влияние межзвездного магнитного поля на рассмотренную проблему, было осуществлено в работе [22]. В систему уравнений (1) и (2) были добавлены члены, связанные с влиянием магнитного поля на течение, и добавлено уравнение индукции магнитного поля. В частном случае, когда магнитное поле в межзвездной среде составляет угол $\sim 45^\circ$ с направлением скорости, удалось объяснить асимметрию прихода межзвездных атомов H в солнечную систему, полученную путем измерения рассеянного солнечного излучения прибором SWAN на спутнике SOHO [23].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 07-01-00291, 07-02-01101, 06-02-72557) и программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН.

Библиографический список

1. Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г. Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // Докл. АН СССР. 1970. Т. 193, № 1. С. 41–44.
2. Черный Г.Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматгиз, 1959. 220 с.
3. Баранов В.Б., Лебедев М.Г., Рудерман М.С. Структура области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой и ее влияние на проникновение атомов H в солнечную систему // Astrophys. Space Sci. 1979. V. 66, № 2. P. 429–440.
4. Lallement R., Bertin P. Northern-hemisphere observations of nearby interstellar gas: possible detection of the local cloud // Astron. Astrophys. 1992. V. 266, № 1. P. 479–485.
5. Баранов В.Б., Краснобаев К.В. Гидродинамическая теория космической плазмы. М.: Наука, 1977. 335 с.
6. Baranov V.B. On the problem of fluid dynamics foundation for application in the space physics // Astrophys. Space Sci. 2000. V. 274, № 1–2. P. 3–16.
7. Baranov V.B., Lebedev M.G., Malama Yu.G. The influence of the interface between heliosphere and the local interstellar medium on the penetration of H-atoms to the solar system // Astrophys. J. 1991. V. 375, № 1. P. 347–351.
8. Baranov V.B., Malama Yu.G. Model of the solar wind interaction with the local interstellar medium: numerical solution of self-consistent problem // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, № A9. P. 15,157–15,163.
9. Malama Yu.G. Monte Carlo simulation of neutral atom trajectories in the solar system // Astrophys. Space Sci. 1991. V. 176, № 1. P. 21–46.
10. Burlaga L.F., Ness N.F., Acuna M.H., Lepping R.P., Connerney J.E.P., Stone E.S., McDonald F.B. Crossing the termination shock into the heliosheath: magnetic fields // Science. 2005. V. 309. P. 2027–2029.
11. Linsky J.L., Wood B.E. The α -Centauri line of sight: D/H ratio, physical properties of local interstellar gas and measurements of heated hydrogen at heliospheric interface // Astrophys. J. 1996. V. 463, № 1. P. 254–270.
12. Linsky J.L. GHRS observations of the LISM // Space Sci. Rev. 1996. V. 78. P. 157–164.
13. Wood B.E., Linsky J.L., Zank G.P. Heliospheric, astrospheric and interstellar Ly- α absorption toward 36 Ophiuchi // Astrophys. J. 2000. V. 537, № 1. P. 304–311.
14. Izmodenov V.V., Lallement R., Malama Yu.G. Heliospheric and astrospheric hydrogen absorption towards Sirius: No need for interstellar hot gas // Astron. Astrophys. 1999. V. 342, № 1. P. L13–L16.



15. *Izmodenov V.V., Malama Yu.G., Gloeckler G., Geiss J.* Filtration of interstellar H, O, N atoms through the heliospheric interface: Inferences on local interstellar abundances of the elements // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 414, № 3. P. L29–L32.
16. *Witte M.* Kinetic parameters of interstellar neutral helium. Review of results obtained during one solar cycle with Ulysses / GAS-instrument // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 426, № 3. P. 835–844.
17. *Izmodenov V.V., Malama Yu.G., Ruderman M.S.* Solar cycle influence on the interaction of the solar wind with the local interstellar cloud // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 34, № 3. P. 1069–1080.
18. *Измодепов В.В., Алексашов Д.Б.* Модель хвостовой области гелиосферного интерфейса // *Письма в Астрон. журн.* 2003. Т. 29, № 1. С. 69–75.
19. *Malama Yu.G., Izmodenov V.V., Chalov S.V.* Modeling of the heliospheric interface: multi-component nature of the heliospheric plasma // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 445, № 2. P. 693–701.
20. *Myasnikov A.V., Alexashov D.B., Izmodenov V.V., Chalov S.V.* Self-consistent model of the solar wind interaction with three-component circumsolar interstellar cloud: Mutual influence of the thermal plasma, galactic cosmic rays and H atoms // *J. Geophys. Res.* 2000. V.105, № A3. P. 5167–5177.
21. *Alexashov D.B., Chalov S.V., Myasnikov A.V., Izmodenov V.V., Kallenbach R.* The dynamic role of anomalous cosmic rays in the outer heliosphere // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 420, № 2. P. 729–736.
22. *Izmodenov V.V., Alexashov D.B., Myasnikov A.V.* Direction of the interstellar H atom inflow in the heliosphere: Role of the interstellar magnetic field // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 437, № 3. P. L35–L38.
23. *Lallement R., Quemerais E., Bertaux J.-L., Ferron S., Koutroumpa D., Pellinen R.* Deflection of the interstellar neutral hydrogen flow across the heliospheric interface // *Science.* 2005. V. 307, № 5714. P. 1447–1449.

УДК 539.3

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

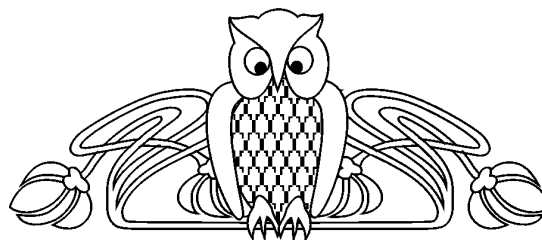
В.А. Еремеев, Е.А. Иванова*, Н.Ф. Морозов**

Южный научный центр РАН,
Южный Федеральный университет
E-mail: eremeyev@math.rsu.ru

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра теоретической механики
E-mail: ivanova@EI5063.spb.edu

** Санкт-Петербургский государственный университет
кафедра теории упругости
E-mail: morozov@NM1016.spb.edu

В последнее десятилетие производство и внедрение наноразмерных агрегатов и включений становится актуальным в электронике, медицине, космической технике и многих других отраслях производства. В связи с этим определилась необходимость анализировать нанообъекты на предмет прочности, устойчивости, дефектологии и долговечности. Какими же методами мы можем пользоваться? Естественно, обсуждается возможность применения традиционных методов классической механики, которые развивались и опробывались столетиями. Здесь мнения ученых разделились — некоторые считают это применение невозможным, а другие используют традиционные методы в полном объеме без корректив. Истина, как нам кажется, заключается в тезисе: традиционные методы механики можно использовать в задачах нанотехнологии, но необходима определенная корректировка. И здесь, прежде всего, возникает вопрос о правомерности использования при исследовании нанообъектов традиционных механических и физических параметров.



Mechanical Problems in Nanotechnology

V.A. Eremeev, E.A. Ivanova, N.F. Morozov

During the last decade, production and adoption of nano-aggregations and nano-inclusions have become actual in electronics, medicine, space engineering and many other branches of production. In this connection, the necessity of studying the nano-subject resistance, stiffness, defectology, durability has emerged. Which of the techniques are best applicable? Feasibility of applying the traditional methods of Newtonian Mechanics, which have been developed and tested for centuries, is widely discussed. However, the researchers' opinions differ much: some of the scientists think it impossible to use this method, others are apt to employ the traditional techniques entirely without any amendments. In our opinion, the truth is in the following thesis: the traditional methods of the Mechanics could be used to solve nanotechnology problems, but still with certain corrections. And here the question arises about appropriateness of using the traditional mechanical and physical parameters of nano-subjects.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЖЕСТКОСТИ НАНООБЪЕКТОВ

В работе [1] были найдены и проанализированы величины модуля Юнга и коэффициента Пуассона для слоев наноразмерной толщины. В качестве модели исследования использовался двумерный монокристалл, изображенный на рис. 1, имеющий бесконечную длину в направлении x и $N \geq 2$