

УДК 535.36

А.М. Шайдук

Экспериментальная проверка наличия ударного скачка в окрестности аэрозольной частицы

В пресс-релизе NASA от 24 мая 2005 г. сообщено, что космический аппарат «Вояджер-1» прошел зону турбулентности, обусловленную наличием ударного скачка газодинамических параметров солнечного ветра [1].

При распространении мощного оптического излучения в аэрозольной среде частицы среды могут нагреваться до температур существенно выше температуры кипения материала частицы [2]. При этом давление насыщенных паров оказывается существенно больше атмосферного давления. В этом случае диффузионные модели испарения, даже с учетом стефановского приближения, становятся неприменимыми, поскольку при высоких температурах приводят к стефановской скорости, превышающей скорость звука. При таких скоростях течения газов нельзя, разумеется, считать плотность среды постоянной и необходимо использовать газодинамическое приближение.

Газодинамическая модель испарения горячей аэрозольной частицы, находящейся в поле мощного излучения, изложена в работе [3]. Однако при численном решении исходных уравнений модели были теоретически обнаружены режимы газодинамического испарения частиц, при которых на некотором расстоянии от поверхности частицы наблюдаются скачки (разрывы пространственных производных) термодинамических характеристик испаренного вещества: температуры, давления, плотности и скорости.

К настоящему моменту прямых экспериментальных подтверждений наличия квазистационарных ударных скачков в окрестности испаряющейся аэрозольной частицы по разным причинам до сих пор не существует.

Однако, возможно, подтверждение наличия подобных ударных скачков косвенным образом будет получено из совсем другой области физики, а именно из исследований параметров гелиосферы (атмосферы Солнца).

Прежде всего заметим, что необходимость существования ударных скачков при сверхзвуковом сферически симметричном испарении частицы практически очевидна и может быть показана без всякого численного решения исходной, довольно сложной задачи. Действительно, пусть имеется сферическая частица, находящаяся в холодном воздухе в поле мощного лазерного излучения. Уравнения газовой динамики, описывающие поля температур и парциальных давле-

ний компонент в окрестности испаряющейся частицы, запишутся в виде [1, 2]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \operatorname{div}(-\rho \bar{v} + \rho D \operatorname{grad}(c_i)), \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -(\bar{v}, \nabla) \bar{v} - \frac{1}{\sum_i \rho_i m_i} \cdot \operatorname{grad}(P); \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\operatorname{div}\left(\bar{v}(E + P) - \rho D \operatorname{grad}\left(\sum_i c_i \varepsilon_i\right)\right); \quad (3)$$

где

$$E = \sum_i \rho_i \left(\varepsilon_i + \frac{m_i v^2}{2}\right), \quad \varepsilon_i = C_i T; \quad (4)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^4 \rho_i; \quad c_i = \rho_i / \rho.$$

Здесь ρ_i – концентрация молекул i -го сорта (в единицах см^{-3}); m_i – масса молекул i -го сорта, причем индекс $i = 1$ соответствует кислороду (O_2), 2 – продуктам сгорания частицы, 3 – испаренному веществу частицы, 4 – нейтральной компоненте (азоту); \bar{v} – массовая скорость газовой смеси; D – коэффициент взаимодиффузии; P – давление газовой смеси; E – энергия единицы объема газа; T – температура газа; C_i – теплоемкость при постоянном объеме i -го сорта газа в расчете на одну молекулу.

Пренебрежем теперь многокомпонентностью среды, окружающей частицу, и учтем сферическую симметрию задачи. В этом простейшем случае уравнения газодинамики в квазистационарном приближении есть

$$\frac{d(r^2 \rho v)}{dr} = 0, \quad (5)$$

$$v \frac{dv}{dr} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} = 0. \quad (6)$$

Используя соотношение $dP/dr = dP/d\rho \cdot d\rho/dr$ и вводя традиционно местную скорость $c^2 d\rho/d\rho$, легко получить

$$\frac{dv}{dr} = \frac{2v}{r} \frac{c^2 / v^2}{1 - c^2 / v^2}. \quad (7)$$

Разумеется, даже в этом приближении уравнение (7) не может быть решено аналитически, так как мест-

ная скорость звука зависит от температуры, в свою очередь являющейся функцией $T = T(r)$.

Если краевые условия таковы, что вблизи поверхности испаряющейся частицы скорость газа $v < c$, то, как следует из (7), производная $dv/dr < 0$, причем это условие автоматически сохраняется при любом r , поскольку скорость v будет только уменьшаться при увеличении r . При достаточно больших r из (7) следует, что $v(r) \sim 1/r^2$. Это соответствует разлету вещества с постоянной плотностью. Следовательно, указанное решение может автоматически удовлетворять краевым условиям на бесконечном удалении от испаряющейся частицы, где плотность среды постоянна и скорость среды равна нулю.

Однако если вблизи поверхности испаряющейся частицы скорость газа окажется $v > c$, то производная $dv/dr > 0$ и скорость газа при удалении от частицы все время увеличивается, оставаясь сверхзвуковой. При этом плотность газа уменьшается. При достаточно больших r из (7) следует, что $\rho(r) \sim 1/r^2$, что соответствует разлету вещества с постоянной скоростью. Очевидно, что такие краевые условия на бесконечности могут соответствовать только испарению частицы в вакуум. При испарении частицы в среду с противодействием плотность испаренного газа должна переходить в плотность среды, а скорость обращаться в нуль. Следовательно, на некотором расстоянии от частицы должна образоваться поверхность, на которой сверхзвуковой режим движения должен перейти в дозвуковой, т.е. газодинамические параметры испаренного вещества должны претерпеть разрыв. Это и интерпретируется как ударная волна, движущаяся из бесконечности к поверхности частицы навстречу испаренному веществу. В точке, где скорость ударной волны равна скорости $v(r)$ испаренного вещества, волна образует сферический ударный фронт, неподвижный относительно испаряющейся частицы.

Прямые экспериментальные подтверждения возникновения ударного фронта для аэрозольных частиц, находящихся в поле мощного оптического излучения не получены до настоящего времени. Одной из причин является то, что мы всегда имеем дело с ансамблем аэрозольных частиц. Создать установку, регистрирующую поля температур, скоростей, давления или плотности среды в окрестности отдельной частицы, испаряющейся в газодинамическом режиме, не удалось.

Однако можно надеяться получить косвенное подтверждение существования подобных ударных скачков, неподвижных относительно испаряющейся частицы. Как известно, параметры солнечного ветра в окрестности Солнца таковы, что он представляет собой сверхзвуковое течение [1, 5]. Например, параметры солнечного ветра на расстоянии 150 млн км (орбита Земли) составляют: концентрация — $n \approx 9 \text{ см}^{-3}$, скорость — $v \approx 5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$, температура — $T_p \approx 7 \cdot 10^4 \text{ К}$. Это, безусловно, сверхзвуковое течение с числом

Маха около 10. Длину свободного пробега частиц плазмы солнечного ветра грубо можно оценить как

$\lambda \sim 5 \cdot 10^5 T^2 / (n\Lambda)$. Здесь концентрация n указана в см^{-3} . Принимая кулоновский логарифм $\Lambda = 15$,

получаем $\lambda \sim 10^{12} \text{ см}$. Это заметно меньше радиуса земной орбиты ($\sim 10^{13} \text{ см}$). Поэтому можно попытаться, имея в виду расстояния, существенно большие $\sim 10^{12} \text{ см}$, рассматривать сверхзвуковое движение солнечного ветра в приближении газовой динамики, используя уравнения Эйлера. Подобная модель применяется, например, в работе [4].

С учетом сделанных выше оценок уравнения движения газовой среды, окружающей Солнце, в стационарном сферически симметричном приближении запишутся [7]

$$v(r) \frac{dv(r)}{dr} + \frac{1}{\rho(r)} \frac{dP(r)}{dr} + \frac{GM}{r^2} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d(\rho(r)v(r)r^2)}{dr} = 0$$

Вид уравнений полностью совпадает (за исключением последнего слагаемого в уравнении Эйлера, учитывающего гравитационное притяжение Солнца) с соответствующими уравнениями, описывающими газодинамический разлет пара в окрестности испаряющейся аэрозольной частицы. Необходимо сравнить соответствующие краевые условия. Краевые условия вблизи поверхности Солнца, очевидно, сверхзвуковые, поскольку наблюдаемое движение солнечного ветра сверхзвуковое. Можно ли рассматривать движение солнечного ветра как аналог испарения в среду с противодействием? Иными словами, каковы должны быть краевые условия для течения на бесконечно большом удалении от Солнца? Если оценивать длину свободного пробега межзвездного газа, состоящего из нейтральных атомов водорода ($n \sim 1 \text{ см}^{-3}$), то имеем $\lambda \sim 1/\sigma n \sim 10^{16} \text{ см}$, т.е. около тысячи радиусов Земли. Это равносильно испарению в вакуум. Но оценки степени ионизации межзвездного газа показывают, что это, скорее, плазма, несмотря на довольно низкую температуру ($10^2 - 10^4 \text{ К}$). В этом случае ситуация кардинально меняется, так как длину свободного пробега плазмы с такими параметрами можно оценить как $\lambda \sim 5 \cdot 10^5 T^2 / (n\Lambda) \sim 10^9 - 10^{13} \text{ см}$. Имея в виду существенно большие масштабы, можно считать, что солнечный ветер, по существу, испытывает разлет в среду с противодействием и краевые условия на бесконечности для уравнений (8) должны приводить к нулевой скорости разлета. Следовательно, в математическом смысле, задачи разлета испаренного вещества частицы в поле мощного лазерного излучения и движения солнечного ветра в окрестности Солнца совпадают.

Возражение может вызывать использование сферической симметрии задачи, поскольку межзвездный газ

движется относительно Солнца. Представляется, однако, что это приближение не является определяющим для факта существования ударных скачков параметров. Имеются работы, которые корректно учитывают движение межзвездного газа (и снимают ряд других упрощений), однако эти модели также приводят к необходимости существования ударного скачка в окрестности Солнца [5]. Следовательно, можно обратиться к экспериментальным исследованиям характеристик течения солнечного ветра и предположить, что аналогичные характеристики сверхзвукового разлета пара в окрестности аэрозольной частицы, находящейся в поле мощного оптического излучения, будут вести себя одинаковым образом.

В настоящее время имеется ряд космических аппаратов, которые удаляются от Солнца на значительные расстояния, измеряя параметры окружающего газа (плазмы). Это, например, аппараты «Вояджер-1», «Вояджер-2», запущенные в 1977 г. В ближайшие несколько лет эти аппараты должны пересечь фронт теоретически предсказанной ударной волны, что будет зафиксировано резким изменением скорости и концентрации межзвездного газа. Если это произойдет, то этот факт можно считать косвенным подтверждением наличия аналогичных

ударных скачков в окрестности испаряющейся частицы. В 2003 г. представители NASA объявили, что аппарат «Вояджер-1» вошел в зону турбулентности, связанную с наличием ударной волны. 24 мая 2003 г. представители NASA заявили, что аппарат прошел зону фронта ударной волны.

Автор не считает, что этот факт является прямым доказательством существования ударных скачков в окрестности испаряющейся частицы. Однако это означает, что надо контролировать совсем другие параметры математической модели газодинамического испарения, приводящие к ударным скачкам. Прежде всего обязательно получить экспериментальные подтверждения правильности сверхзвуковых краевых условий вблизи поверхности испаряющейся частицы, понять, как повлияет на параметры скачка возможная переконденсация испаренного вещества, для разлета солнечного ветра аналогичного процесса нет. Следует установить устойчивость сферического фронта ударной волны относительно малых возмущений. Ясно также, что определить динамику формирования неподвижного фронта ударной волны в рамках квазистационарного приближения вообще невозможно. Для этого необходимо ставить и решать нестационарную газодинамическую задачу.

Библиографический список

1. Voyager Spacecraft Enters Solar System's Final Frontier/ RELEASE:05-131, May 24, 2005 [Электронный ресурс] / Режим доступа http://www.nasa.gov/home/hqnews/2005/may/HQ_05131_Voyager_agu.html, свободный. – Яз. англ.
2. Букатый, В.И. Испарение горячей углеродной частицы в интенсивном оптическом поле / В.И. Букатый, В.Н. Краснопевцев, А.М. Шайдук // Физика горения и взрыва. – 1988. – №1.
3. Букатый, В.И. Температура поверхности аэрозольных частиц в поле лазерного излучения / В.И. Букатый, И.А. Суторихин, А.М. Шайдук // Теплофизика высоких температур. – 1986. – Т. 24.
4. Паркер, Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде / Е.Н. Паркер. – М., 1965.
5. Баранов, В.Б. Влияние межзвездной среды на строение гелиосферы / В.Б. Баранов // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №11.
6. Pudovkin, M.I. J. Geophys. Res / M.I. Pudovkin. – 1995. – V. 100, №A5.
7. Пудовкин М.И. Солнечный ветер / М.И. Пудовкин // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №12.