

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ.

## ТУРБУЛЕНТНОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Александр Иванович Бажанов, член-корр. РИА и МИА

*В статье на основе знаний, полученных при разработке теории турбулентности, предпринята попытка объединить процессы, происходящие в микромире и Космосе, и проиллюстрировать это на конкретных примерах, полученных при исследовании Солнечной системы.*

*In article on the basis of the knowledge received by working out of the theory of turbulence, attempt to unite the processes existing in a microcosm and Space is undertaken, and to illustrate it on the concrete examples received at research of Solar system.*

**Ключевые слова:** турбулентность, ячейка Бенара, фуллерен, вязкость солнечного ветра, ударные явления в солнечной системе.

**Keywords:** turbulence, cell of Benar, fullerene, viscosity of a solar wind, the shock phenomena in solar system.

Солнечная система - это наша колыбель и наше пристанище. Это то место, где коротает свой мизерный век человек. Но! Человечество в целом занимает в пространстве и времени достаточно продолжительный интервал и промежуток. Солнечная система - это наше повседневное хозяйство. По-видимому, в этой системе кроме Человека на Земле разумных существ нет. Человек занимается поиском хоть какого-нибудь разума. Он отлетает от Земли на большие расстояния и пока никого не встретил. Но, может быть, его разума недостаточно, чтобы понять разумное другой стороны. Может быть тот более высокий разум не допускает его так близко. Всё это, так или иначе, говорит в пользу того, что знает человек о своём "Жилище" совсем мало. Самые первые созерцательные знания, как у чукчи, скользящем в нартах на оленях по бескрайней снежной равнине, в песне, с восторгом выражающей увиденное, дают только отрывочные, как правило, бессвязные факты.

Можно сказать, что на этой стадии познания человеком Космоса происходит только коллекционирование новых объектов, событий и пространственно-временных констант. Так, например, было установлено, что водород и гелий главенствуют в Солнечной системе. Источником всего являются атомы водорода, или протоны, которые, зарождаясь (или, что все равно, давным-давно зародились) внутри Солнечной системы под воздействием термоядерной реакции порождают атомы гелия, или что тоже самое,  $\alpha$ -частицы. В итоге Солнце испускает альфа протонную субстанцию, или, по-русски, солнечный ветер. Потоки солнечного ветра, вылетающие с поверхности, имеют температуру 6000 градусов, скорость порядка 106 м/с и энергию  $0,633 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, двигаются в радиальном направлении, заполняя космическое пространство и воздействуя на всё, что попадает на пути. А это Земля и другие планеты, астероиды и метеориты, космические аппараты и т.д.

Солнце настолько большое по сравнению с любыми планетами Солнечной системы (рис. 1), что оно способно удержать как

сами планеты, так и то, что само испускает - солнечный ветер. Конечно, этот ветер обладает электромагнитными свойствами, радиационными (всевозможные лучи от инфракрасных до ультрафиолетовых), волновыми (с широким диапазоном частот), ну и, конечно, механическими. Следует отметить, что в процентном содержании водорода, гелия и других элементов в Солнечной системе соответственно 76, 23 и 1 процент. Если распределить весовые доли остальных элементов, кроме H<sub>2</sub> и He, то на последние придется 0,7677 и 0,2323. Это означает, что коэффициент адиабаты Пуассона для такой системы будет равен -1,46, средневзвешенная масса этой условной альфапротонной космической частицы (альфапротон) равна  $\sim 0,30 \cdot 10^{-27}$  кг, а диаметр альфа протона  $\sim 1,3 \cdot 10^{-10}$  м (1,3 Å). По сравнению с Солнцем это очень маленькие массы и размеры: масса Солнца  $M_C = 1,99 \cdot 10^{30}$  кг, а его радиус  $R_C = 6,96 \cdot 10^8$  м.

С помощью специальных миссий были обозначены размеры Солнечной системы. С помощью аппарата "Вояджер-1" было установлено, что ограничивающая Солнечную систему сферическая ударная волна начинается на расстоянии 94 а.е. Она отходит от границы галактического окружения, подпирющую Солнечную систему, на расстояние  $\sim 8 \cdot 12$  а.е. Эта граница называется гелиопаузой (110 а.е.). Ширина волны оценивается примерно в 4 а.е. Здесь солнечный ветер останавливается.

Было установлено, что в процессе движения солнечный ветер тормозится и подходит к границе ударной волны со скоростью 400 000 м/с. За время активного исследования Солнечной системы Человеком многое стало известным. Исследования с помощью мощных современных телескопов, с помощью космических аппаратов и, наконец, самого Человека снабдили знаниями, которые позволили составить карту ближайшего Космоса, качественно описать планеты и астероиды, определить карты магнитных полей и пр.

Каждая крупница знаний направлена на изучение антропологических свойств Вселенной, эволюции Солнечной системы, на разработку прогнозов, предсказаний будущих историй, а главное - на облегчение практической жизни Человека (мониторинг погоды, связь, навигация, поиск полезных ископаемых, предсказание катаклизмов, стихийных бедствий и т.д.).

Для реализации этих желаний не достаточно только созерцательного, эмпирического подхода. Требуется поиск взаимосвязей, взаимозависимостей. И здесь Человек может применить свой научный опыт для изучения процессов внутри Солнечной системы. Пусть расстояния измеряются не в метрах, а в астрономических единицах, пусть время измеряется не в секундах, а в тысячелетиях. Зато концентрации измеряются в космосе в "нанах", а массы элементарных частиц - в "фемтах". Другими словами, если "гиги" умножить на "наны", то будет единица. А это значит - можно переносить земные научные наработки на космические. Мы попробуем проиллюстрировать на нескольких примерах справедливость этих утверждений. Базируясь на теории турбулентности попробуем



Рис. 1 Планеты Солнечной системы

вести концы с концами в "хаосе", наблюдаемом в космосе и показать что это не хаос, а тонко организованная структура (1).

**Шестиугольники в солнечной системе**

Исследования космоса осуществляются с помощью телескопов и космических аппаратов, как с пролётной траектории, так и находящихся на орбитах вокруг планет (рис. 2, 3, 4, 5). Солнце учёные начали систематически исследовать с орбиты Земли.



Рис. 2 Вояджер-1



Рис. 3 Вояджер-2



Рис. 4 Пионер-11



Рис. 5 Кассини

НАСА запустило 8 обсерваторий, которые стали функционировать как единая Орбитальная солнечная станция. Семь из них успешно отработали и наблюдали Солнце в ультрафиолетовых и рентгеновских лучах. Среди прочих достижений были сделаны фотографии солнечной короны. Была реконструирована структура Солнца (рис. 6) и, в частности, установлен приповерхностный слой конвективных потоков. Это такая зона, в которой с большой скоростью происходит обмен энергией внутренних слоёв и хромосферы. Система течения внутри слоя достаточно стабильна. Горячие потоки идут в направлении от центра Солнца, а холодные спускаются внутрь. Анализ такого течения наводит на мысль, что оно аналогично конвекции Бенара. Всё налицо! Слой по толщине достаточно стабилен и относительно радиуса составляет величину чуть больше четверти (0, 2582). Движение потоков вверх (горячих) и вниз (холодных) возможно только в случае радиальной циркуляции, то есть по образующим тора. Причем потоки вверх осуществляются через центр тора, а вниз по периферии. Поскольку тороидальный вихрь один существовать не может - он не устойчив, то всегда его подпирают шесть подобных торов, вращение в совокупности с которыми создаёт вихревую парность.

Один тор с внешней стороны подкручивается шестью смежными торами, каждая шестая часть из которых в сумме даёт ответное вращение полной внешней поверхности центрального. Такая картина впервые реализована на медной сковородке Бенара.



Рис. 6 Солнце в разрезе

Также изначально точно была известна толщина слоя вращающегося силиконового масла. На нагретой поверхности образовалась гексагональная структура, именуемая ячейками Бенара. А на Солнце возникают гексагональные структуры? Тогда они будут устойчивы только в том случае, если они покрывают без прорех всю поверхность Солнца. А как это доказать? Привлечём для этого теорию фуллеренов. Фуллерены - это аллотропные модификации углерода. Они представляют собой молекулы углерода, выстроенные в виде замкнутых поверхностей, близких к сферам, и содержат помимо шестиугольников, в вершинах которых находятся атомы углерода, пятиугольники (пентагоны), которые придают кривизну. Подобные геометрические конструкции названы фуллеренами в честь великого американского архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера (рис. 7). Всю свою яркую жизнь Бакминстер

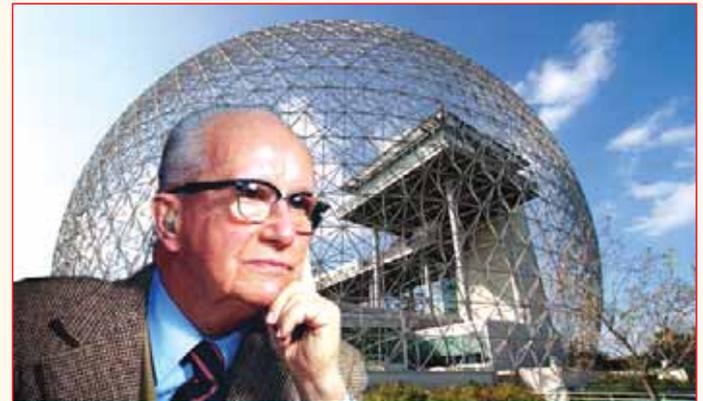


Рис. 7 Ричард Бакминстер Фуллер и одна из его конструкций

Фуллер посвятил созданию больших сферических конструкций, собранных из лёгких элементов. Многие из них являются великолепными памятниками архитектуры\*. Но Фуллер мечтал ещё и о создании огромных оболочек, способных заключить в себе самодостаточные инфраструктуры, подобные Земным. Он мечтал о сферах космического масштаба, внутри которых мог бы комфортно жить человек и совершать межпланетные экспедиции.

Его идеи плодотворно вписались в различные разделы техники. Фуллерены вошли базовой составляющей в нанотехнологию. Ведь самый знаменитый фуллерен C<sub>60</sub>, который называется бакминстерфуллереном (рис. 8) имеет размер в диаметре один нанометр.

Итак, фуллерены - это такие молекулы, в которые укладываются атомы углерода в виде шести- и пятиугольников в сферы. Но это происходит не всегда. На известную сферическую поверхность можно уложить только строгое число шестигранников и тогда они сомкнутся. Что же это за число? Это "магическое" число и оно не одно. Существует множество "магических" чисел и по ним идентифицируют фуллерен. Эти числа пишутся индексом при атоме углерода: C<sub>20</sub>, C<sub>24</sub>, C<sub>26</sub>, C<sub>28</sub>, C<sub>32</sub>, C<sub>50</sub>, C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>, C<sub>76</sub>, C<sub>78</sub>, C<sub>84</sub>, C<sub>90</sub>. Начиная от 100 и до 150 эти числа отличаются на 2: C<sub>102</sub>, C<sub>104</sub>... C<sub>148</sub>, C<sub>150</sub>. Известен фуллерен C<sub>200</sub>.

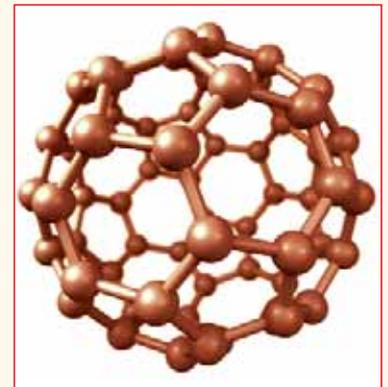


Рис. 8 Бакминстерфуллерен

Что же остаётся? Остаётся доказать, что конвективные ячейки будут существовать устойчиво, если все они без прорех покроют поверхность Солнца. И если вдруг они покроют его, то число вершин будет равно одному из "магических" чисел.

Как уже говорилось, отношение толщины слоя (диаметр вихря, а два диаметра - диаметр тора) к радиусу Солнца составляет

\*Аналогичными конструкциям при строительстве башен занимался русский инженер и архитектор Владимир Григорьевич Шухов

0,258. Определим количество торов на поверхности Солнца как отношение площади Солнца к площади проекции тороидального вихря в виде функции  $n = S_C/S_\delta = 4(R_C/r)^2$ . Отношение даёт число, в точности равное 60. По теореме Эйлера для многогранников  $V - P + \Gamma = 2$ , где  $V$  - количество вершин,  $P$  - количество рёбер,  $\Gamma$  - количество граней, применительно к ячейкам в виде шестигранников и пятигранников, определим по количеству граней количество вершин. Так как  $2P = 3V$  (для пятиугольников), то количество вершин равно  $V = 2\Gamma - 4$  или  $V = 2 \cdot 60 - 4 = 116$ .

Полученное число 116 является одним из "магических", доказывающее утверждение, что на поверхности Солнца находятся ячейки Бенара, а само Солнце - это фуллерен  $C_{116}$ .

Теперь о Сатурне. Космический аппарат "Вояджер-1" в период своей миссии обнаружил гигантский гексагон на северном полюсе Сатурна, а в 2006 году КА "Кассини-Гюйгенс" сделал много великолепных снимков с четким изображением этого образования (рис. 9). Качественно этот феномен уже комментировался в

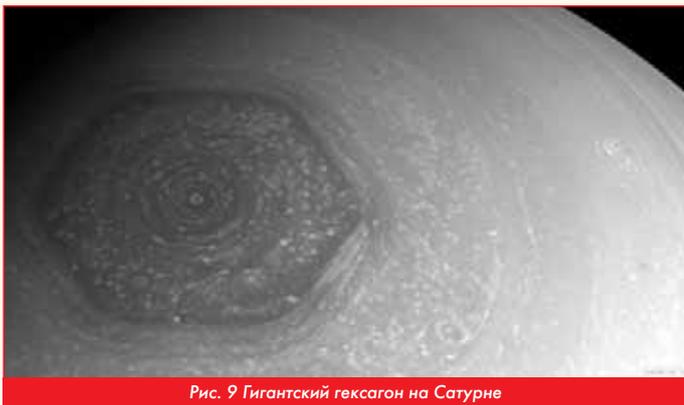


Рис. 9 Гигантский гексагон на Сатурне

[2], где выдвигалась версия о конвективных ячейках Бенара на поверхности газового гиганта. Теперь проделаем вычисления. Площадь поверхности верхнего облачного слоя Сатурна оценивается в  $4,27 \cdot 10^{10}$  км<sup>2</sup>, площадь шестигранника -  $3 \cdot 10^7$  км<sup>2</sup>. Рассчитаем отношение этих поверхностей  $S_C/S_\delta = 60$ . Опять 60! Ему соответствует  $n = 116$ . То есть, то же самое, что и на Солнце. И Солнце, и Сатурн - это фуллерен  $C_{116}$ .

Теперь о турбулентности. Тороидальные вихри это тоже турбулентность. Более того такая турбулентность наряду с волнами Толмина-Шлихтинга, торсионными жгутами, является классической турбулентностью, представляющей собой классическую разновидность устойчивых образований. Но сейчас разговор пойдёт о причинах, их вызывающих. Это вязкость и положительный градиент давления.

### Вязкость солнечного ветра

Что такое вязкость с молекулярно-физической точки зрения? Это сопротивление телу, движущемуся в среде, организованное окружающими его частицами среды. Каждая частица среды, ударяющаяся о тело, отбирает у него импульс. Тело тормозится. Такой эффект был зафиксирован и в космосе при полете космических аппаратов "Пионер-10" и "Пионер-11". Аппараты сталкивались с пылинками, льдинками и другими частицами, причём были зафиксированы частицы размером до 10 мкм. Именно такие пылинки были обнаружены современными инфракрасными телескопами. Для торможения "Пионеров" в тех пределах, которые были зафиксированы при их полёте, достаточно сталкиваться с такими частицами через каждые 10 км полёта. Мешают полёту и атомы водорода (протоны). С феноменологической точки зрения вязкость - это некий коэффициент пропорциональности при поперечном градиенте скорости. Известно, что этот коэффициент зависит от температуры в степени  $n \sim 0,5$ . Воспользуемся фактическими измерениями, которые были получены по условиям освещённости планет. Будем воспринимать освещённость  $N_{уд}$  (Вт/м<sup>2</sup>) как удельную мощность, падающую на единицу поверхности или как удельную энергию, падающую на эту поверхность за одну секунду. Дру-

Планета	$r$ , млн км	$N_{уд}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$r^2 \cdot N_{уд}$
Солнце	$R_C = 0,696$	63 300 000	$3,0 \cdot 10^{25}$
Меркурий	57,87	9250	$3,09 \cdot 10^{25}$
Венера	108,14	2730	$3,193 \cdot 10^{25}$
Земля	149,5	1373	$3,0 \cdot 10^{25}$
Марс	227,79	610	$3,165 \cdot 10^{25}$
Юпитер	777,8	52	$3,146 \cdot 10^{25}$
Сатурн	1426,1	15,4	$3,132 \cdot 10^{25}$
Уран	2867,7	3,68	$3,026 \cdot 10^{25}$
Нептун	4494,0	1,15	$3,029 \cdot 10^{25}$
Плутон	9508,0	-	-

гими словами, будем считать эту величину температурой, выраженной в энергиях. Термодинамическая температура будет отличаться от последней на величину константы Больцмана. В кратностях энергии Солнца можно строго записать:  $T/T_C = N_{уд}/N_{удC}$ .

Тогда величину вязкости для альфапротонового потока можно вычислить по формуле:  $\mu/\mu_C = (T/T_C)^{0,5} = (N_{уд}/N_{удC})^{0,5}$ . Вязкость альфапротонового ветра на Солнце при температуре 6000 °С с учетом весов будет равна  $\mu_C = 0,9072$  Па·с. Зависимость освещённости от расстояния от Солнца до каждой из планет представлена в таблице.

Из таблицы видно, что произведение в правой колонке является величиной постоянной. Отсюда получается рабочая формула для определения величины вязкости от расстояния до планет:  $\mu = \mu_C \cdot R_C/r$ .

Эта зависимость отражает закономерность изменения основной газодинамической величины в зависимости от координат любой точки пространства в Солнечной системе.

### Ударные явления в Солнечной системе

Второй причиной возникновения турбулентности является положительный градиент давления, то есть повышение его абсолютной величины. Такой эффект наблюдается, например, при возникновении ударных волн. В отличие от бесстолкновительной ударной волны эта волна стоячая. Она не движется. Так, например, ударная волна после ядерного взрыва движется (бесстолкновительная волна) и её движение можно зафиксировать с течением времени на разных расстояниях. Следует отметить, что возникающая на расстоянии 94 а.е. от Солнца ударная волна не является бесстолкновительной. Эта волна подпирается плазмой галактического ветра. Не случайно эта граница находится вблизи с гелиопаузой.

Будем применять для ударных волн закономерности, полученные в земных условиях. Во-первых, необходимо разобраться со скоростью натекающего на ударную волну альфапротонного ветра. Здесь придётся воспользоваться измерениями и известными закономерностями. По нескольким наблюдаемым астрономам точкам сконструируем уравнения для скорости ветра. С учётом изменения вязкости в космическом пространстве Солнечной системы получим расчётную формулу:

$$V/V_C = 0,092911766 [lg(r/R_C)/(μ/μ_C \cdot r/R_C)] \approx \approx 0,1 [lg(r/R_C)/(μ/μ_C \cdot r/R_C)].$$

Под логарифмом стоит величина, также отнесённая к радиусу Солнца. Сразу определим скорость натекания на ударную волну. Она будет равна 400 000 м/с.

Скорость за ударной волной определяется из соотношения Прандтля:

$$V_{до} \cdot V_{пос} = \alpha_{кр}^2 \text{ или } \lambda_{до} = 1/\lambda_{пос}.$$

Здесь  $V_{до}$  и  $V_{пос}$  - скорости до и после ударной волны. Поскольку величина  $\lambda$  имеет вид кривой насыщения, то при больших скоростях, начиная с числа Маха равного  $\sim 4$ , величину  $\lambda$  можно считать как предельную

$$\lambda \sim \lambda_{пред} = \sqrt{[(k+1)/(k-1)]}.$$

При этом скорость после скачка можно определить как:

$$V_{пос} = V_{до} \cdot (1/\lambda_{до}^2) = V_{до} \cdot [(k-1)/(k+1)].$$

Для рассматриваемого случая это будет:

$$V_{пос} = 400\,000 \cdot (0,40/2,40) = 74\,796,76 \text{ м/с.}$$

Критическая скорость звука определится как:

$$\alpha_{кр} = \sqrt{(V_{до} \cdot V_{пос})} = 172\,970 \text{ м/с,}$$

что с точностью ~50 % совпадает с приведёнными в литературе данными ( $a_{кр} = 100\,000$  м/с).

Итак, скорость на входе в ударную волну соответствует числу Маха  $M = 4$ . Учтём это при расчёте размеров ударной волны. В книге [3] приведены расчёты Сакураи методом Мотт-Смита для толщины ударной волны в зависимости от числа Маха набегающего потока. Аппроксимация этих расчётов в виде

$$1,4 (\lambda_o / \sigma_{ск}) = 1 - e^{-0,3(M_{до} + 2)}$$

была использована и получено соотношение для рассматриваемой волны:

$$\sigma_{ск} / \lambda_o = 1,677.$$

То есть для условий космической ударной волны её толщина равна ~1,68 длины свободного пробега.

Найдём величину отхода ударной волны от границы галактического ветра (~110 а.е.). Пересчитаем превращение кинетической энергии после ударной волны в потенциальную энергию после торможения:

$$\rho \cdot V_{пос}^2 / 2 = P \text{ или } \kappa \cdot (V^2 / 2) = \kappa \cdot (P / \rho) = \alpha^2.$$

То есть

$$V_{пос} = \alpha \sqrt{2/\kappa} \text{ или } \delta_{отх} / \tau_{рел} \approx \alpha \sqrt{2/\kappa}.$$

Получаем

$$\delta_{отх} = N \lambda_o \sqrt{2/\kappa}.$$

Потребуем, чтобы поток затормозился через ~3-5 соударений молекулы альфапротона, тогда

$$\delta_{отх} = (3-5) \cdot \lambda_o \sqrt{2/1,46} = (3,5112...5,8521) \cdot \lambda_o.$$

Далее найдём отношение

$$\delta_{отх} / \delta_{ск} = [(3,5112...5,8521) \cdot \lambda_o] / 1,677 \cdot \lambda_o = 2,0937...3,4896 \approx 2...3,5.$$

К объяснению требования привлечём фотографию из книги [4] крупного специалиста по экспериментальной газовой динамике Г.Ф. Глотова (рис. 10) по обтеканию шара потоком воздуха при  $M = 4$  (рис. 11). На фотографии удивительно чётко видны границы скачка ( $\delta_{ск}$ ) и величины его отхода ( $\delta_{отх}$ ) от преграды. Прямым измерением, определив отношение  $\delta_{отх} / \delta_{ск} \approx 2,75$ , подтверждаем своё требование. Далее остаётся сравнить результаты проведенных оценок с результатами космических наблюдений (рис. 12), которые дают значение толщины ударной волны, меньшей примерно в 2...3 раза величины отхода, что соответствует полученным значениям.



Рис. 10 Геннадий Федорович Готов

волны, меньшей примерно в 2...3 раза величины отхода, что соответствует полученным значениям.

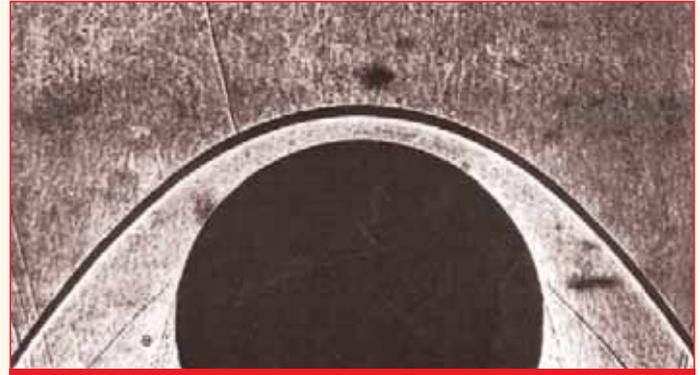


Рис. 11 Скачок и величина отхода ударной волны от преграды при  $M=4$

Литература

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность не хаос, а тонкоорганизованная структура // Двигатель. № 6, 2004 г.
2. Ю.М. Кочетков. Турбулентность Космоса // Двигатель. № 6, 2009 г.
3. Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений // М. Наука, 1966 г.
4. Г.Ф. Готов (под ред. Г.И. Майкопара). Аэротермодинамика летательных аппаратов в фотографиях// Жуковский, ЦАГИ, 2003 г.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com

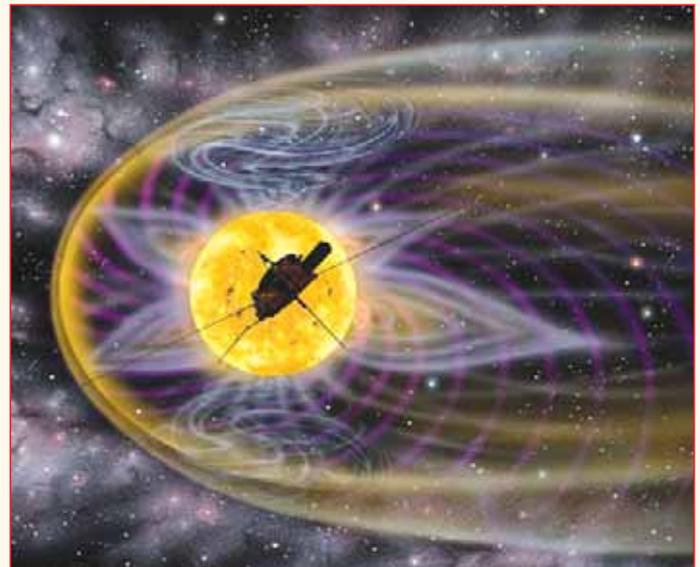


Рис. 12 Художественная интерпретация ударной волны в Солнечной системе

ИНФОРМАЦИЯ

Россия планирует с 2025 г. проводить ежегодно один-два запуска пилотируемого корабля "Федерация" к Луне.

Перспективная лунная пилотируемая программа России, прорабатываемая в ЦНИИмаш (на конец мая 2016 г.), предусматривает облет и высадку космонавтов на поверхность Луны, а также доставку их в точку либрации системы Земля - Луна.

Испытания нового корабля начнутся в 2021 г. беспилотным запуском с космодрома Восточный. В 2023 г. предусмотрены два старта корабля - в беспилотном и пилотируемом режимах. Для запуска предполагается использовать ракету-носитель "Ангара-А5В" повышенной грузоподъемности.

"Использование ракеты-носителя "Ангара-А5В" в условиях сокращенного финанси-

рования позволит реализовать начальный этап решения задач Лунной пилотируемой программы, в том числе для облета Луны в беспилотном и пилотируемом режимах с отработкой входа в атмосферу Земли со второй космической скоростью.

Ранее сообщалось, что для завершения летных испытаний "Федерации" потребуется провести четыре успешных полета корабля, в том числе не менее двух в пилотируемом режиме, включая один с облетом Луны.

Космический корабль разработки РКК "Энергия" предназначен для доставки людей и грузов к Луне и на орбитальные станции, находящиеся на околоземной орбите. Численность экипажа составит от четырех до шести человек. В режиме автономного полета корабль сможет находиться до 30

суток, при полете в составе орбитальной станции - до 1 года.



КК "Федерация"