

САМАРСКАЯ ОБЛАСТНАЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ШКОЛА

**ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА,  
ПАДАЮЩЕГО В АТМОСФЕРЕ МАРСА**

(научно-исследовательская работа)

**Выполнил:**

Першин Андрей,  
11 класс СОФМШ

---

**Научный руководитель:**

Филиппов Юрий Петрович,  
к.ф.-м.н., старший препода-  
ватель кафедры общей и  
теоретической физики  
Самарского государствен-  
ного университета

---

Самара, 2011 г.

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Динамика идеального метеороида в атмосфере Марса</b>	<b>8</b>
1.1 Атмосфера Марса . . . . .	8
1.2 Модель идеального метеороида и его кинематика в окрестности Марса . . . . .	13
1.3 Приближение изотермической атмосферы. Барометрическая формула . . . . .	16
1.4 Динамика идеального метеороида . . . . .	18
1.5 Элементарный количественный анализ взаимодействия ИМ с атмосферой Марса . . . . .	22
<b>2 Динамика неидеального метеороида в атмосфере Марса</b>	<b>25</b>
2.1 Определение модели физической системы . . . . .	25
2.2 Построение функции $\rho(y)$ . . . . .	28
2.3 Основные уравнения баллистики неидеального метеороида . . .	30
2.4 Обезразмеривание и редукция уравнений . . . . .	32
2.5 Численные результаты и анализ . . . . .	33
<b>Заключение</b>	<b>44</b>
<b>Литература</b>	<b>48</b>

# Введение



Рис. 1. Планета Марс.

Актуальность работы. **Марс** – классическая планета Солнечной системы, как небесное тело, был известен людям тысячи лет назад. Свое название планета получила во времена Древнего Рима, в честь кровожадного бога войны. Причиной тому стал ее красный цвет, который ассоциировался с разрушениями и кровью. Человечество стало проявлять особый интерес к этой планете с появлением на свет первых измерительных приборов, способных помочь человеку рассмотреть небесные тела и их движение более подробно [1].

Первым, кто с помощью точнейшего по тем временам прибора – секстанта обнаружил несоответствие движения Марса с уже имеющимися на тот момент системами движения планет, сформулированными Птолемеем, был датский астроном Тихо Браге. Произошло это в 80-х годах XVI века.

Дальнейшее изучение, основанное на наблюдениях Браге, продолжил Иоганн Кеплер, который с помощью расчетов в 1605 году показал, что орбита Марса является эллипсом, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Одним из первых, кто наблюдал планету в телескоп, был Г. Галилей, который установил, что Марс имеет шарообразную форму. Регулярные телескопические наблюдения планеты были начаты во второй половине XVII века, которые дали возможность определить характерные черты поверхности планеты и установить величину периода его вращения вокруг собственной оси ( $T_M = 24$  часа 37 мин).

В 1704 году были обнаружены полярные шапки, предположительно, состоящие из льда и снега, а уже в 1837-м – составлены первые карты поверхности планеты.

В 1877 году итальянский астроном Дж. Скиапарелли обнаружил на поверхности планеты прямолинейные участки, которые он принял за рукотворные сооружения и назвал "каналами". Это дало повод полагать, что на Марсе существует (или существовала в прошлом) разумная жизнь. С тех пор споры по поводу существования жизни на Марсе не утихают. И сегодня, Марс остается главным объектом ближнего космоса для поиска внеземной жизни [2].

С началом космической эры начался качественно новый этап изучения красной планеты. Спектрографические исследования, а впоследствии и прямая посадка на Марс со всей очевидностью подтвердили, что в настоящее время высшей формы жизни (тем более разумной) на нем не может быть. Причина проста: отсутствие кислорода в атмосфере, микроскопические доли водяного пара и озона, низкие температуры [1].

С другой стороны, обнаружены сухие русла древних рек, эрозия почвы, характерная для больших потоков воды, поэтому все большее число ученых склоняется к версии, что много миллионов лет назад на планете была более плотная атмосфера и, возможно, вода, а, следовательно, вполне могли существовать те или иные формы органической жизни. Кроме того, в атмосфере планеты обнаружен метан, правда, в небольших количествах. Его присутствие в атмосфере может быть результатом жизнедеятельности микроорганизмов.

Из всех объектов в Солнечной системе Марс наиболее схож с Землей по многим факторам, способствующим возникновению и развитию примитивных жизненных форм [3]. Например, 1) угол наклона оси вращения Марса к его орбитальной плоскости ( $65^{\circ}04'$ ) приблизительно близок по значению к углу наклона земной оси ( $66^{\circ}33'$ ) [4], а потому там, как и на Земле, происходит смена сезонов; 2) водяного пара в марсианской атмосфере совсем немного, но при низком давлении и температуре он находится в состоянии, близком к насыщению, и часто собирается в облака, как и на Земле.

Для поиска примитивных форм жизни на Марсе необходимо подобраться к нему как можно ближе. Именно поэтому на сегодняшний день, к поверхности планеты отправлена большая эскадра космических аппаратов, оснащенных спускаемыми модулями или марсоходами (машин-планетоходов, перемещающихся по поверхности планеты, предназначенных для изучения Марса): 1) спускаемые модули аппаратов Марс-2 и Марс-3 (СССР, 1971, миссия провалилась из-за исчезновения сигнала), 2) марсоходы миссий Viking 1 (NASA США, 1976-1982, см рис. 2) и 2 (NASA США, 1976-1980); 3) Sojourner (NASA США, работал на Марсе в ходе программы Mars Pathfinder, 4.07-27.09. 1997 года); 4) Mars Polar Lander – марсоход в рамках проекта Mars Surveyor 98, вышел из строя по техническим причинам, не достигнув поставленных целей (см. рис. 3); 5) Beagle 2 – британский марсоход в рамках Европейского про-

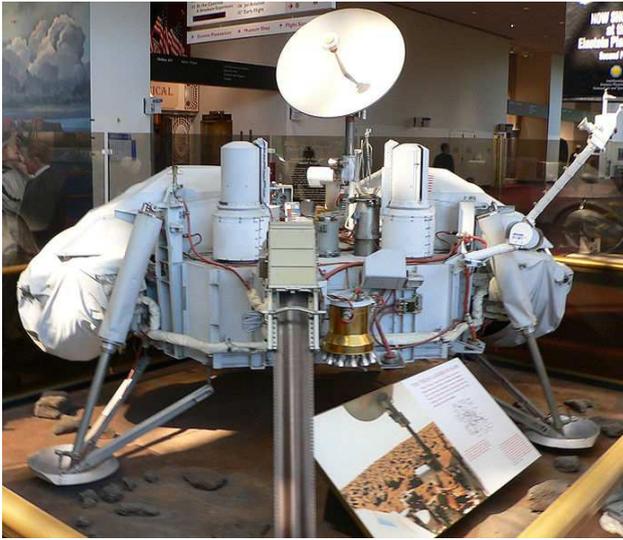


Рис. 2. Один из посадочных модулей Viking-1 и 2.

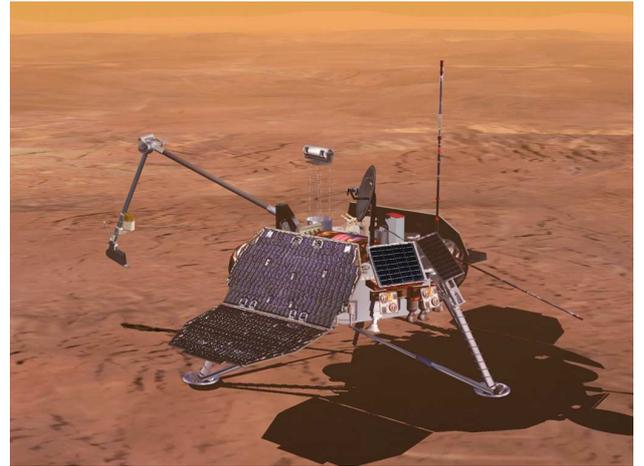


Рис. 3. Марсоход Mars Polar Lander.

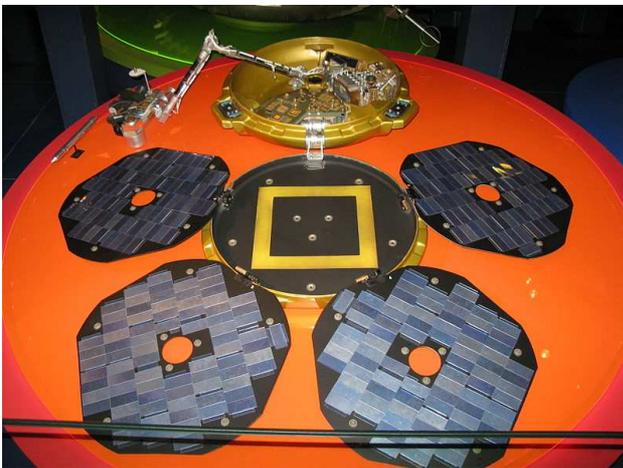


Рис. 4. Посадочный модуль Beagle 2.

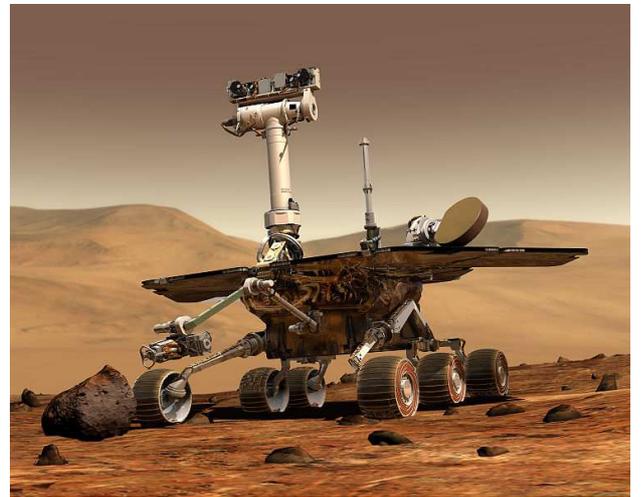


Рис. 5. Один из марсоходов-близнецов Spirit и Opportunity.

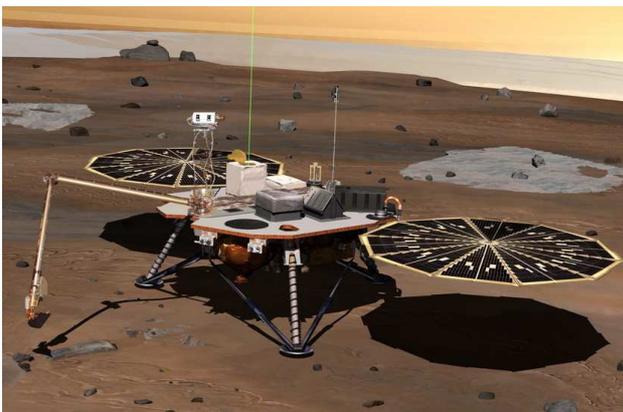


Рис. 6. Спускаемый модуль Phoenix.

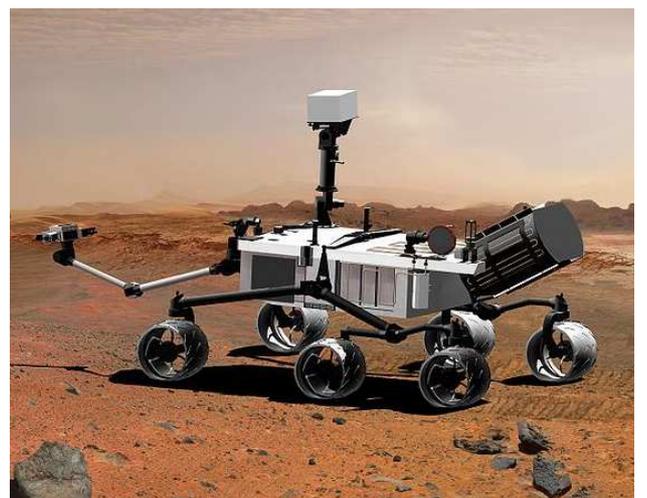


Рис. 7. Марсоход Mars Science Laboratory.

екта Mars Express, проект сорван по техническим причинам в 2003 году (см. рис. 4); 6)-7) Spirit и Opportunity – марсоходы-близнецы работают на Марсе с

января 2004 года (см. рис. 5); 8) Phoenix Mars Lander (NASA США) работал на поверхности планеты с 26.05 по 2.11. 2008 года (см. рис. 6).

В ближайшие годы готовятся следующие миссии с марсоходами 1) Mars Science Laboratory (марсоход NASA нового поколения, старт – осень 2011 года, см. рис. 7); 2) EхoMars – марсоход Европейского космического Агентства (запуск в 2018 году); 3) Mars Sample Return Mission (возможно, марсоход будет одним из элементов этой миссии, старт – 2018 год).

Все эти миссии связаны с решением одной из важнейших задач – движением посадочного модуля в атмосфере планеты и его благополучным приземлением. Данная задача является весьма сложной, поскольку с одной стороны атмосфера Марса весьма разреженная и парашютный метод торможения при падении аппарата не всегда эффективен, а масса посадочного модуля может достигать нескольких тонн (для перевозки необходимого оборудования). С другой стороны, из-за относительно высоких скоростей входа посадочного модуля в атмосферу планеты, температура поверхности аппарата может быть крайне высокой, и сопровождаться плавлением и сгоранием значительной части обшивки аппарата. Значит, обшивка спускаемых модулей должна быть тугоплавкой (преимущественно из металла) и не очень тонкой, что существенно увеличивает массу аппарата. При падении аппарата нужно вовремя уменьшить скорость падения, путем включения ракетных двигателей модуля.

Форму спускаемого модуля выгодно делать близкой к форме шара, поскольку, во-первых, сила сопротивления шара при данных размерах в атмосфере, одна из самых низких, что уменьшает нагрев обшивки, во-вторых, при данной площади поверхности модуля, его объем максимален (известное свойство шара) [5], что позволяет "загружать" аппарат "научной начинкой" по максимуму.

*Задача о движении тела, имеющего форму, близкую к форме шара в атмосфере Марса* видится автору настоящей работы актуальной, как минимум, еще в двух частных случаях.

Во-первых, исследования Марса направлены также на изучение возможности колонизации планеты и создания постоянных научно-исследовательских баз. Для искусственных инженерных конструкций, созданных человеком в будущем на поверхности Марсе серьезную угрозу представляют **метеороиды** – это малые тела, возникающие при разрушении ядер комет (98%) и астероидов (1 – 2%), являются наиболее динамичным типом вещества Солнечной системы [6]. В силу разреженности атмосферы многие из них могут достигать поверхности планеты, не сгорая, и попадая в строение, разрушать последнее. Важно знать тела какой массы, размеров, плотности и химического состава могут быть наиболее опасны для искусственных строений.

Во-вторых, сегодня точно установлено (см. например, работу [7]), что Фобос

– бóльший спутник Марса медленно падает на Марс по плотно закрученной спирали. Согласно [7] через 17.67 млн. лет он будет разрушен приливными силами Марса, останки которого образуют кольцо, подобное кольцу Сатурна, а еще через 0.53 млн. лет эти останки рухнут на поверхность планеты. Оценки последствий глобальной катастрофы Марса невозможно выполнить адекватно без моделирования процесса падения осколков в атмосфере планеты, их взаимодействия с последней.

В связи со сказанным главной целью настоящей работы является количественный анализ динамики неидеального метеороида, падающего в атмосфере Марса с заданными параметрами, с учетом нелидирующих факторов.

Согласно сформулированной цели основными задачами являются следующие положения:

1. Адаптация модели процесса взаимодействия неидеального метеороида с атмосферой планеты, предложенной в работе [8], к условиям, определяющим стационарную атмосферу Марса.

2. Определение массовой плотности смеси основных газов атмосферы Марса, как функции высоты с учетом ее химического состава и использованием обобщенной барометрической формулы [9].

3. Обобщение замкнутой системы дифференциальных уравнений модели [8], описывающих процесс падения неидеального метеороида сферической формы с учетом массовых потерь на случай реактивных сил ракетных двигателей (включаемых в определенный момент времени). Выполнение процедуры обезразмеривания системы уравнений и начальных условий.

4. Решение полученной системы и численный анализ результатов.

*Основными методами решения поставленных задач* являются:

1. Методы интегро-дифференциального исчисления.

2. Основные уравнения динамики материальной точки и элементы термодинамики.

3. Избранные теоретические инструменты статистической физики.

Данная работа имеет следующую структуру.

В **первой главе** изложены современные представления об атмосфере Марса и баллистике идеального метеороида.

Во **второй главе** представлены решения поставленных теоретических задач и их анализ.

Резюме по проделанной работе представлено в **заключении**. Финальная часть работы содержит список использованных источников.

# Глава 1

## Динамика идеального метеороида в атмосфере Марса

В настоящей главе будут даны современные представления об атмосфере Марса. Особое внимание будет уделено модели идеального метеороида и анализу его динамики в атмосфере Марса.

### 1.1 Атмосфера Марса

*Атмосфера Марса* (от. др.-греч. *атмос* — «пар» и *сфера* — «шар») — газовая оболочка, окружающая планету Марс. Внутренняя ее поверхность покрывает кору планеты, внешняя граничит с космическим пространством. Совокупность разделов физики и химии, изучающих атмосферу какой-либо планеты, принято называть *физикой атмосферы*.

Основные физические свойства. Толщина атмосферы составляет примерно 110 км от поверхности Марса. Среднее давление атмосферы у поверхности планеты около 6.1 мбар (1/160 от земной, или эквивалентна земной на высоте примерно несколько десятков километров). В самых глубоких впадинах давление достигает 10 мбар. Полная масса атмосферы составляет  $2.5 \cdot 10^{16}$  кг. Средняя плотность атмосферы на уровне поверхности оценивается  $0.0161 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует плотности земной атмосферы на высоте 35 км.

Химический состав атмосферы. Атмосфера на 95% состоит из углекислого газа, с небольшими примесями азота, аргона, кислорода (см. таблицу 1). Несмотря на сильную разреженность, атмосфера Марса содержит примерно в 23 раза (по объему) больше углекислого газа, чем земная.

Оксид углерода (CO) является продуктом фотодиссоциации и составляет  $8 \cdot 10^{-4}$  от концентрации  $\text{CO}_2$ . Молекулярный кислород ( $\text{O}_2$ ) появляется в результате фотодиссоциации как  $\text{CO}_2$ , так и  $\text{H}_2\text{O}$  в верхней атмосфере Марса. При этом кислород диффундирует в более низкие слои атмосферы, где его концентрация достигает  $1.3 \cdot 10^{-3}$  от приповерхностной концентрации  $\text{CO}_2$ .