

## ВВЕДЕНИЕ

1. При изучении движения небесных тел — как естественных, так и искусственных — необходимо в первую очередь принимать во внимание силы взаимного притяжения тел в пространстве. Свою основную задачу классическая небесная механика видела в изучении движения тел именно под воздействием их взаимного притяжения. Отправным пунктом в построении небесной механики служит закон всемирного тяготения, открытый 300 лет тому назад, в 1665—1666 годах, великим английским физиком и математиком Исааком Ньютоном (1643—1727). Этот закон характеризует взаимодействие материальных точек (то есть геометрических точек, снабженных массами). Он гласит:

*Всякая материальная точка притягивает каждую другую материальную точку с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между этими точками.*

Материальные точки, притягивающиеся друг к другу по закону всемирного тяготения, иногда называют гравитирующими (от слова гравитация, то есть тяготение).

Если  $m_1$  и  $m_2$  — массы двух материальных точек,  $r$  — расстояние между ними, то величина силы  $F$ , с которой каждая из этих точек притягивает другую, определяется по формуле

$$F = f \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где  $f$  — коэффициент пропорциональности. Величина  $f$  называется *универсальной постоянной тяготения*. В интернациональной системе единиц (SI)

$$f = 6,670 (1 \pm 0,0007) \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}$$

В небесной механике и космонавтике изучение движения *тел* часто заменяют изучением движения тех *материальных точек*, которые образовались бы, если бы вся масса каждого из тел была сосредоточена в его центре тяжести. Это во многих случаях позволяет получить удовлетворительное представление о движении самих тел.

2. Отметим некоторые особенности тяготения.

Действие тяготения к данному телу может быть обнаружено на громадных расстояниях от этого тела. Так, например, притяжение к Солнцу проявляется на расстояниях, в 20 000 раз больших, чем расстояние от Земли до Солнца (то есть на расстоянии в 3000 млрд. км): на таком расстоянии солнечное притяжение еще определяет движение некоторых комет.

Промежуточная среда между двумя телами никак не влияет на величину силы тяготения: эта сила останется одной и той же независимо от того, разделены ли тела разреженным межзвездным пространством или между ними находится какая-либо плотная среда; тяготение безразлично к преградам и препятствиям. Никакие лабораторные эксперименты и астрономические наблюдения не позволили обнаружить какого-либо влияния преград на распространение тяготения.

Наконец, тяготение распространяется мгновенно. Французский математик и астроном Ж. П. Лаплас (1749—1827) попытался ответить на вопрос: если допустить, что тяготение передается с определенной скоростью, то какова должна быть эта скорость распространения тяготения, если она не может быть обнаружена при наблюдении небесных тел с помощью современных (для Лапласа) приборов? Он пришел к выводу, что если тяготение и передается с некоторой скоростью, то эта скорость во всяком случае более чем в миллион раз превышает скорость света.

Природа тяготения получила удовлетворительное объяснение лишь в XX столетии в так называемой общей теории относительности, созданной А. Эйнштейном в 1914 году.

3. При изучении движения небесных тел обычно делаются некоторые упрощающие допущения. Отметим наиболее важные из них:

1°. При рассмотрении движения некоторого тела (например, планеты, кометы или космического корабля) учи-

тывают влияние лишь одного, двух или нескольких тел. При этом пренебрегают воздействием бесконечного множества других тел, либо обладающих малыми массами, либо расположенных на больших расстояниях от изучаемого тела.

2°. Тела считаются абсолютно твердыми.

3°. В ряде случаев тела рассматриваются как материальные точки.

Одной из важнейших по своим приложениям задач небесной механики является задача  $n$  материальных точек (ее чаще называют «задачей  $n$  тел»), которая формулируется следующим образом: *изучить движение  $n$  взаимно гравитирующих материальных точек, если известны массы этих точек, их положения и скорости в какой-то один («начальный») момент времени*. В задаче  $n$  тел пренебрегают воздействием других тел на указанные  $n$  материальных точек, а также всеми другими силами взаимодействия между ними (кроме сил тяготения).

Важнейший для астрономии конкретный случай задачи  $n$  тел — это задача о движении девяти больших планет вокруг Солнца ( $n = 10$ ).

Задача  $n$  тел полностью решена лишь при  $n = 2$ . Даже при  $n = 3$  она не имеет практически удобного общего решения. Однако в небесной механике используются численные методы, которые позволяют для каждого конкретного случая задачи  $n$  тел и для не слишком большого промежутка времени найти удовлетворительное для практики приближенное частное решение этой задачи.

Особенно интересен для космонавтики тот случай задачи  $n$  тел, когда масса одного тела ничтожно мала по сравнению с массами других тел. Так, например, обстоит дело в случае движения космической ракеты к Луне (система четырех тел: Земля, Луна, Солнце и тело малой массы — ракета) или при подлете автоматической межпланетной станции к Венере (система трех тел: Солнце, Венера и малое тело — межпланетная станция). В каждом из этих случаев можно практически считать, что тело малой массы вовсе не влияет на движение остальных, больших тел; говоря точнее, допустимо пренебречь теми ускорениями, которые сообщаются малым телом каждому из больших тел. Последнее допущение равносительно тому, что мы пренебрегаем

силами, с которыми малое тело притягивает большие тела. Надо при этом отдавать себе отчет в том, что мы пренебрегаем этими силами не потому, что они малы, — сила, с которой малое тело притягивает большое тело, в точности равна (по величине) силе, с которой большое тело притягивает малое; первой из этих сил мы пренебрегаем, а вторую учитываем; мы пренебрегаем здесь названными выше силами потому, что малы вызываемые ими ускорения.

Таким образом, мы приходим к целесообразности рассмотрения так называемой *ограниченной задачи  $n$  тел*. Задача эта формулируется так: *известно движение  $n - 1$  взаимно гравитирующих материальных точек  $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}$  (с массами  $m_1, m_2, \dots, m_{n-1}$ ) относительно некоторой инерциальной системы отсчета; эти  $n - 1$  материальных точек притягивают материальную точку  $A_n$ ; материальная точка  $A_n$  ни одну из точек  $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}$  не притягивает. Требуется изучить движение точки  $A_n$ . Материальную точку  $A_n$ , о которой говорится в этой задаче, называют *пассивно гравитирующей*; остальные материальные точки  $A_1, \dots, A_{n-1}$  называют *активно гравитирующими*.*

Тщательное исследование ограниченной задачи  $n$  тел и ее частных случаев, качественный анализ ее решений, получение удобных вычислительных формул чрезвычайно важны для практики космических полетов. Особенно часто находят применение случаи  $n = 2, 3, 4$ .

Аппарат классической небесной механики, находящий широчайшее применение и при изучении движения искусственных небесных тел, был разработан великими математиками прошлого — И. Ньютоном, Л. Эйлером, Ж. Л. Лагранжем, Ж. П. Лапласом, И. Ламбертом, К. Ф. Гауссом, Дж. Хиллом, А. М. Ляпуновым, А. Пуанкаре и другими.

4. Классическая небесная механика, созданная для нужд астрономии, интересовалась лишь *разгадкой* путей, по которым движутся небесные тела. В настоящее же время на первый план вышли новые задачи — задачи *выбора* траекторий небесных тел, создаваемых человеком.

Для космонавтики очень важны многие виды траекторий, с которыми практически не приходится встречаться при изучении движения естественных небесных тел и которые поэтому почти не рассматривались в прошлом.

Основополагающую роль в построении теории полета космических аппаратов сыграли труды К. Э. Циолковского, И. В. Мещерского, Ф. А. Цандера и других русских и советских ученых. Важную роль сыграли также работы иностранных пионеров космонавтики (Р. Годдард, Г. Оберт, В. Гоман и др.).

В течение последних десяти — пятнадцати лет советскими и зарубежными учеными были исследованы и решены многие актуальные и трудные траекторные проблемы механики космического полета.

Блестящими образцами успешного выбора траекторий для искусственных небесных тел могут служить траектории космических ракет, посланных для облета Луны и для попадания в нее, траектории автоматических межпланетных станций, направленных к Венере и Марсу, и другие.

Отметим некоторые важные задачи, которые относятся к динамике космического полета.

1. **Задача о близком спутнике.** Спутник планеты может иногда двигаться настолько близко от нее, что уже недопустимо считать планету материальной точкой. Если при расчете орбиты спутника мысленно сосредоточить всю массу планеты в ее барицентре (центре тяжести, центре масс), то такая орбита может значительно отличаться от реальной траектории спутника; отклонение реального положения спутника от предвычисленного (при таком допущении) может оказаться с течением времени недопустимо большим.

При расчете орбит первых искусственных спутников Земли оказалось необходимым учитывать сплюснутость Земли, то есть то обстоятельство, что более точной моделью Земли, чем шар, притягивающий как материальная точка, может служить сжатый сфероид (эллипсоид вращения).

Ошибка от пренебрежения сплюснутостью Земли сказывается тем сильнее, чем ближе к поверхности Земли происходит движение спутника. Для спутников, движущихся на расстоянии до 40 000 км от центра Земли, эта ошибка больше, например, чем ошибка от пренебрежения влиянием Луны и Солнца.

Эффект сжатия необходимо будет учитывать и при расчете орбит искусственных спутников планет солнечной системы (Юпитера, Марса и др.).

2. Движение космического корабля в сопротивляющейся среде. Несмотря на свою крайнюю разреженность на больших высотах, атмосфера оказывает весьма значительное тормозящее действие на движение искусственного спутника Земли. В результате такого торможения спутник снижается, совершает более быстрый облет вокруг Земли и, в конце концов, прекращает свое существование. Возникают, в частности, такие вопросы: каким образом возможно предсказать «продолжительность жизни» спутника? Каким образом влияет на движение спутника сопротивление верхних слоев атмосферы? И обратно, какие выводы о верхней атмосфере можно сделать на основании наблюдений за изменением орбиты спутника? Понятно, что эти же вопросы встанут при изучении движения искусственных спутников других небесных тел.

3. В отличие от естественных космических тел космический корабль может изменить свою траекторию в космическом пространстве благодаря временному (импульсному) включению ракетного двигателя. Это дает возможность перейти от первоначальной орбиты к другой, с совершенно иными параметрами. Такой переход носит название космического маневра.

Изучение различных видов космических маневров, выбор оптимального варианта космического маневрирования при соблюдении определенных требований (например, при минимальной затрате топлива) — актуальная задача динамики космического полета. Только применение космических маневров позволит в ближайшем будущем решить многие актуальные проблемы космонавтики, например запуск с Земли искусственных спутников Луны, Марса и Венеры.

В тесной связи с этой проблемой находится другая важная проблема — проблема встречи космических кораблей, то есть выбор такого маневра, который позволил бы одному из этих кораблей попасть в заданный момент времени в наперед заданную точку пространства с определенной, заданной скоростью.

Динамика космического полета интересуется также оптимальными (наиболее выгодными) вариантами вывода космического аппарата на орбиту, спуска с орбиты, прохож-

дения через атмосферу при возвращении космического корабля на Землю или при спуске на какую-либо другую планету.

4. Космический корабль выводится в космическое пространство на заданную траекторию с помощью ракетных двигателей. В результате работы двигателей осуществляется отброс части массы ракеты, несущей корабль. Таким образом, мы имеем дело с движением тел, чья масса меняется в процессе движения.

Понятно, что изменение массы может иметь место не только на стадии выведения корабля в космическое пространство — это будет происходить и в самом космическом пространстве при включении ракетного двигателя для космического маневра.

Изучение движения тел переменной массы (с учетом сопротивления среды, тяготения и других факторов) — одна из актуальнейших задач динамики космического полета.

5. Наряду с мощными ракетными двигателями, работающими на высококалорийном топливе в течение небольших промежутков времени, можно использовать и иные виды двигателей, источники энергии, которые создают весьма малую тягу, действующую на космический корабль в течение длительного времени. Уже сейчас разрабатываются проекты космических кораблей с ионными двигателями, кораблей, использующих давление солнечного света. В динамике космического полета рассматривается движение космических аппаратов с двигателями малой тяги, изучаются возможности использования малой тяги для осуществления космических маневров.

6. До сих пор мы рассматривали космический аппарат как материальную точку: говоря о движении аппарата, мы, по существу, имели в виду движение некоторой материальной точки — той, которая получилась бы, если вся масса аппарата была бы сосредоточена в его центре тяжести. Практически можно считать, что это и будет траектория центра тяжести аппарата. Но большой интерес представляет вопрос о движении космического аппарата относительно своего барицентра, выяснение того, будет ли аппарат вращаться вокруг этой точки, совершать колебательные или какие-либо другие движения. Одной из важных

задач динамики космического полета является исследование колебательно-вращательных движений искусственных спутников Земли.

7. На движение космических аппаратов могут оказать влияние многочисленные факторы. К ним относятся, в частности: вращение земной атмосферы, магнитное поле Земли, солнечная радиация и многие другие. В ряде случаев в космонавтике приходится принимать во внимание и эти факторы.

В настоящей книге мы ограничимся рассмотрением лишь некоторых простейших задач динамики космического полета, наиболее близких к классической небесной механике.