

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Космодинамика — теория космических полетов

Буквальный смысл слова «космонавтика» (представляющего собой сочетание двух греческих слов) — «плавание во Вселенной». В обычном употреблении это слово означает совокупность различных отраслей науки и техники, обеспечивающих исследование и освоение космического пространства и небесных тел с помощью космических летательных аппаратов — искусственных спутников, автоматических станций различного назначения, пилотируемых космических кораблей.

Теория космических полетов, представлявших давнюю мечту человечества, превратилась в науку в результате основополагающих трудов великого русского ученого Константина Эдуардовича Циолковского. В течение продолжительного времени, до того момента, когда идеи, формулы и чертежи энтузиастов и ученых стали в конструкторских бюро и в цехах заводов превращаться в объекты, изготовленные «в металле», теоретический фундамент космонавтики покоился на трех китах: 1) теории движения космических аппаратов¹⁾; 2) ракетной технике; 3) совокупности астрономических знаний о Вселенной.

Впоследствии в недрах космонавтики зародился широкий цикл новых научно-технических дисциплин, таких, как теория систем управления космическими объектами, космическая навигация, теория космических систем связи и передачи информации, космическая биология и медицина и т. д. Сейчас, когда нам трудно представить себе космонавтику без этих дисциплин, полезно вспомнить о том, что теоретические основы космонавтики закладывались К. Э. Циолковским в то время, когда производились лишь первые опыты над использованием радиоволн и радио не могло считаться

¹⁾ Основоположники космонавтики писали не о «космических аппаратах», а о «кораблях» и имели в виду полеты людей. Лишь позже стала ясной эффективность использования в космосе автоматических научных станций.

средством связи в космосе. В течение многих лет в качестве средства связи всерьез рассматривалась сигнализация с помощью лучей солнечного света, отражаемых в сторону Земли зеркалами, находящимися на борту межпланетного корабля. Сейчас, когда мы привыкли не удивляться ни прямому телевизионному репортажу с поверхности Луны, ни полученным по радио фотографиям, сделанным вблизи Юпитера или на поверхности Венеры, в это трудно поверить. Поэтому можно утверждать, что теория космической связи, несмотря на всю свою важность, не является все же главным звеном в цепи космических дисциплин.

Таким главным звеном служит теория движения космических объектов. Именно ее можно считать теорией космических полетов. Специалисты, занимающиеся этой наукой, сами называют ее по-разному: *прикладная небесная механика, небесная баллистика, космическая баллистика, космодинамика* ¹⁾, *механика космического полета, теория движения искусственных небесных тел.*

Все эти названия имеют один и тот же смысл, точно выражаемый последним термином. Космодинамика, таким образом, является частью *небесной механики* — науки, изучающей движение любых небесных тел — как естественных (звезды, Солнце, планеты, их спутники, кометы, метеорные тела, космическая пыль), так и искусственных (автоматические космические аппараты и пилотируемые корабли). Но есть нечто, выделяющее космодинамику из небесной механики. Родившаяся в лоне небесной механики космодинамика пользуется ее методами, но не уместается в ее традиционных рамках.

Существенное отличие прикладной небесной механики от классической заключается в том, что вторая не занимается и не может заниматься выбором орбит небесных тел, в то время как первая занимается отбором из огромного числа возможных траекторий достижения того или иного небесного тела определенной траектории, которая учитывает многочисленные, зачастую противоречивые, требования ²⁾. Главное требование — минимальность скорости, до которой разгоняется космический аппарат на начальном активном участке полета и соответственно минимальность массы ракеты-носителя или орбитального разгонного блока (при старте с околоземной орбиты). Это обеспечивает максимальную полезную нагрузку и, следовательно, наибольшую научную эффективность полета. Учитываются также требования простоты управления, условий радиосвязи (например, в момент захода станции за планету при ее облете),

¹⁾ Употребляется также термин *астродинамика*, который способен ввести в путаницу, так как он буквально означает «динамика звезд», а такая астрономическая дисциплина уже давно существует.

²⁾ Нанлучшая с какой-либо одной точки зрения траектория называется *оптимальной*.

условий научных исследований (посадка на дневной или ночной стороне планеты) и т. п.

Космодинамика предоставляет в распоряжение проектировщиков космической операции методы оптимального перехода с одной орбиты на другую, способы исправления траектории. В поле ее зрения находится неведомое классической небесной механике *орбитальное маневрирование*.

Космодинамика представляет собой фундамент общей *теории космического полета* (подобно тому как аэродинамика представляет собой фундамент теории полета в атмосфере самолетов, вертолетов, дирижаблей и других летательных аппаратов). Эту свою роль космодинамика делит с *ракетодинамикой* — наукой о движении ракет. Обе науки, тесно переплетаясь, лежат в основе космической техники. Обе они являются разделами теоретической механики¹⁾, которая сама представляет собой обособившийся раздел физики.

Будучи точной наукой, космодинамика использует математические методы исследования и требует логически стройной системы изложения. Недаром основы небесной механики были разработаны после великих открытий Коперника, Галилея и Кеплера именно теми учеными, которые внесли величайший вклад в развитие математики и механики. Это были Ньютон, Эйлер, Клеро, Даламбер, Лагранж, Лаплас. И в настоящее время математика помогает решению задач небесной баллистики и в свою очередь получает толчок в своем развитии благодаря тем задачам, которые космодинамика перед ней ставит.

Классическая небесная механика была чисто теоретической наукой. Ее выводы находили неизменное подтверждение в данных астрономических наблюдений. Космодинамика привнесла в небесную механику эксперимент, и небесная механика впервые превратилась в экспериментальную науку, подобную в этом отношении, скажем, такому разделу механики, как аэродинамика. На смену пассивному характеру классической небесной механики пришел активный, наступательный дух небесной баллистики. Каждое новое достижение космонавтики — это вместе с тем свидетельство эффективности и точности методов космодинамики.

Космодинамика делится на две части: *теорию движения центра масс космического аппарата* (теорию космических траекторий) и *теорию движения космического аппарата относительно центра масс* (теорию «вращательного движения»). Как уже говорилось в предисловии, в книге будет рассказываться главным образом о траекториях, и космический аппарат в большинстве случаев будет рассматриваться как материальная точка.

¹⁾ Небесная механика является одновременно и разделом теоретической механики, и — традиционно — разделом астрономии.

§ 2. Основные законы механики

Прежде чем приступить к изучению движения искусственных небесных тел (спутников, лунных и межпланетных космических аппаратов, пилотируемых космических кораблей), вспомним основные законы механики, изучаемые еще в средней школе. В дальнейшем нам придется к ним обращаться.

Первый закон Ньютона (закон инерции): всякая материальная точка находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку приложенные силы не принудят ее изменить это состояние.

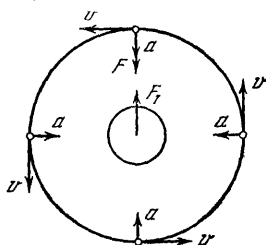


Рис. 1. Движение спутника по орбите.

Равномерное прямолинейное движение есть движение с неизменной по величине и направлению скоростью, т. е. движение с постоянным вектором скорости («движение по инерции»).

Во всех случаях, когда вектор скорости изменяется, существует ускорение. В частности, если материальная точка движется равномерно по окружности (например, спутник — по круговой орбите вокруг Земли, рис. 1), то, очевидно, существует ускорение, так как вектор скорости при этом является переменным (остается неизменным только его величина, направление же его непрерывно изменяется). Соответствующее ускорение a , как известно, равно по величине v^2/r , где v — неизменная величина скорости, а r — радиус окружности, и направлено во всех точках окружности к ее центру (рис. 1).

Согласно первому закону Ньютона причиной существования ускорения является сила. В нашем примере причиной кругового движения спутника является сила, не позволяющая ему совершать прямолинейное движение в направлении однажды сообщенной скорости. Это — сила притяжения Земли (сила гравитации), о которой подробно мы будем говорить в главе 2.

Второй закон Ньютона устанавливает связь между силой и ускорением.

Второй закон Ньютона: ускорение материальной точки пропорционально действующей на нее силе и направлено в ту же сторону, что и сила.

Если F — величина силы, a — величина ускорения, то

$$F = ma.$$

Величина m , или коэффициент той пропорциональности, о которой говорится во втором законе Ньютона, представляет собой меру инерции материальной точки и называется ее *массой*.

Зная в нашем примере массу m спутника и его ускорение $a = v^2/r$, мы теперь можем по приведенной формуле вычислить силу, под действием которой спутник совершает свое круговое движение. Направлена эта сила, как и ускорение, к центру окружности, т. е. к Земле.

Сакраментальный вопрос «Почему спутник не падает на Землю?», столь интриговавший журналистов в первые годы космической эры, не имеет смысла. Спутник не падает на Землю, т. е. его траектория не пересекает земной поверхности, так как законы природы не обязывают его двигаться в сторону действующей силы. В эту сторону всегда направлен вектор ускорения, но отнюдь не обязательно вектор скорости, указывающий направление движения.

С другой стороны, зная направление и величину силы, мы можем определить направление и величину (по формуле $a = F/m$) ускорения, а затем математически определить путь движущегося тела.

Здесь мы столкнулись в простейшем виде с двумя основными задачами механики космического полета:

1) определить силы, с помощью которых можно управлять космическим аппаратом, заставляя его совершать заданное движение;

2) определить движение космического аппарата, если известны действующие на него силы.

Этими задачами мы и будем в дальнейшем заниматься. Вторая из этих задач характерна для классической небесной механики, изучающей движение «естественных» небесных тел, первая же свойственна именно космодинамике и подчеркивает активный характер этой науки.

Вернемся, однако, к законам Ньютона.

Причиной силы, действующей на тело, всегда является какое-то другое материальное тело, которое в свою очередь подвергается воздействию со стороны первого тела.

Третий закон Ньютона: всякому действию соответствует равное по величине и противоположно направленное противодействие.

В нашем примере это означает, что действию Земли на спутник (сила F , направленная к Земле) сопутствует противодействие — сила F_1 , действующая со стороны спутника на Землю, равная по величине первой и направленная к спутнику. Эта сила, естественно, по второму закону Ньютона сообщает определенное ускорение Земле, которое во столько же раз меньше ускорения, сообщаемого Землей спутнику, во сколько масса Земли больше массы спутника. Так как масса Земли равна $5,9742 \cdot 10^{21}$ т, то, каков бы ни был искусственный спутник, ускорение, сообщаемое им Земле, ничтожно. По этой же причине мы никогда не будем интересоваться воздействиями

искусственных спутников, космических аппаратов и пилотируемых кораблей на естественные небесные тела (даже на небольшие астероиды) независимо от того, являются ли эти воздействия гравитационными или иного рода (например, удар, наносимый космическим аппаратом, падающим на поверхность Луны).

§ 3. О единицах силы и массы

В этой книге используется в основном Международная система единиц СИ, в которой, как известно, за единицу массы принимается килограмм, а за единицу силы ньютон (Н) — производная единица, равная той силе, которая массе 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2 , т. е., согласно второму закону Ньютона, $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2$.

На этом можно было бы и закончить, если бы не одно обстоятельство. В литературе по ракетной технике все еще привычны единицы силы из технической системы единиц — грамм-сила (гс), килограмм-сила (кгс), тонна-сила (тс)¹⁾, а автор рассчитывает, что ракетчики могут заинтересоваться книгой. Некоторые традиционные термины ракетной техники (например, «удельный импульс», см. § 1 гл. 1) основываются на килограмме-силе, и автор здесь в одиночку ничего поделать не может. Кроме того, приводя данные о тягах и удельных импульсах ракет, автор в некоторых случаях, пользуясь официальными источниками, не считал себя вправе что-либо менять, так как не мог знать, в какой мере указанное в источнике значение является округленным²⁾.

Впрочем, читатель всегда может совершить переход от килограммов-силы к ньютонам, если вспомнит, что 1 килограмм-сила (1 кгс) есть не что иное, как вес одного килограмма массы (1 кг), т. е. $1 \text{ кгс} = 1 \text{ кг} \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 = 9,81 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$. Но $1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 = 1 \text{ Н}$. Значит,

$$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н (точно } 1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н)}.$$

Термином «вес» при указании числовых характеристик ракет и космических аппаратов мы никогда пользоваться не будем. Вес, как известно, определяется силой давления тела, покоящегося на поверхности планеты, на опору. На разных небесных телах он, естественно, различен. Вдобавок космический аппарат при свободном полете в мировом пространстве находится в безопорном состоянии, в состоянии невесомости... Разумнее поэтому указывать его **м а с с у**.

¹⁾ Внимание! Буква «с» здесь означает «сила», а не «секунда». В противном случае перед «с» была бы точка как знак умножения. Это важно помнить.

²⁾ «Точный» перевод округленных значений физических величин при переходе к другой системе единиц — характерная ошибка многих научных рефератов. Тягу ракетной ступени в 2000 тс указывают как тягу 19 620 000 Н (или даже 19 613 300 Н)...

§ 4. О системах отсчета

Читатель, конечно, знаком с понятием *системы координат*, или *системы отсчета*.

Движение космического аппарата, как и любого тела, может описываться в разных системах координат. Нет систем координат правильных и неправильных, но есть системы координат хорошие и плохие, точнее — удобные и неудобные.

Например, движение планет удобнее всего описывать в *гелиоцентрической системе отсчета*, т. е. в системе Коперника. Но если бы мы стали рассматривать в этой же системе координат движение Луны, то труднее было бы выяснить характер действующих на нее сил. Более удобно изучать движение Луны в *геоцентрической системе координат* — системе Птолемея. Однако, если бы нас заинтересовал вопрос, попадет ли Луна в хвост кометы Галлея, когда в 1985—1986 гг. комета приблизится к Солнцу, разумно было бы применить гелиоцентрическую систему координат. Все дело в удобстве.

Наша повседневная жизнь — та, что «проходит у нас на глазах», — ощущается нами в основном в системе координат, *прочной связанной с вращающейся Землей*. «Спутник пролетел над Москвой», — скажет житель столицы, увидев светящуюся точку, движущуюся по сумеречному небу. А мог бы сказать: «Москва пересекла неподвижную плоскость орбиты спутника» — и был бы прав — в геоцентрической системе отсчета.

Интересно, что хотя в теоретических рассуждениях удобнее рассматривать движение спутника последним способом, люди, контролирующие космический полет, предпочитают систему отсчета, жестко связанную с Землей. Достаточно вспомнить хорошо знакомую телезрителям географическую карту в Центре управления полетом, по которой движется световой «зайчик» — изображение проекции на Землю космического корабля «Союз» или «Прогресс», — сближающийся с другим «зайчиком» — изображением орбитальной станции «Салют».

И в то же время нам показывают на телеэкране изображение корабля «Прогресс» так, как его «видит» телекамера, жестко скрепленная с корпусом станции «Салют» — в системе координат, жестко связанной со станцией.

Всеми этими и другими системами координат нам придется пользоваться, и мы научимся, хотя бы в принципе (без каких-либо математических выкладок), переходить от одной системы отсчета к другой, т. е. уметь смотреть на происходящее с различных точек зрения — и в буквальном и в переносном смысле.