

А. А. Космодемьянский • К. Э. Циолковский



А. А. Космодемьянский
**Константин
Эдуардович
ЦИОЛКОВСКИЙ**

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р



РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ «НАУЧНО-БИОГРАФИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА»
И ИСТОРИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ КОМИССИЯ
ИНСТИТУТА ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ АН СССР
ПО РАЗРАБОТКЕ НАУЧНЫХ БИОГРАФИЙ ДЕЯТЕЛЕЙ
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ:

*Л. Я. Бляхер, А. Т. Григорьян, Я. Г. Дорфман, Б. М. Кедров,
Б. Г. Кузнецов, В. И. Кузнецов, А. И. Гупцов, Б. В. Левшин,
С. Р. Микулинский, Д. В. Ознобишин, Э. К. Соколовская (ученый
секретарь), В. Н. Сокольский, Ю. И. Соловьев,
А. С. Федоров (зам. председателя), И. А. Федосеев,
Н. А. Фигуровский (зам. председателя),
А. А. Чеканов, С. В. Шухардин, А. П. Юшкевич,
А. Л. Яншин (председатель), М. Г. Ярошевский*

А. А. Космодемьянский

**Константин Эдуардович
ЦИОЛКОВСКИЙ**

(1857 — 1935)



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА

1976

Книга представляет собой научную биографию К. Э. Циолковского. В ней приведены интересные сведения о работах Циолковского по аэронавтике, ракетной технике и космонавтике, дана характеристика творческого стиля ученого.

К $\frac{20\ 100-010}{054(02)-76}$ 68—75 НП

© Издательство «Наука». 1976 г.

От автора

Константин Эдуардович Циолковский — знаменитый деятель русской науки и техники. Он — наша национальная гордость. Циолковский сделал ряд выдающихся открытий по экспериментальной аэродинамике, теории полета аэроплана, ракетодинамике и космонавтике. Его перу принадлежат оригинальные статьи по геофизике и биологии, философии и языкознанию, социологии и этике, астрономии и многим частным проблемам техники.

Автор этой книги — специалист по теоретической механике, и естественно, что наиболее детально рассмотрению подвергнуты исследования Циолковского по аэродинамике, ракетодинамике и космонавтике. Эти работы Циолковского оказывают существенное влияние на современный научно-технический прогресс и находятся в поле зрения ведущих специалистов по космическим проблемам.

В этой книге не анализируются исследования Константина Эдуардовича по проблемам астрономии, биологии, социологии и философии, а также статьи по частным научно-техническим вопросам.

Содержание книги *разделяется на две части: основной текст и приложения. Основной текст вполне доступен читателям, окончившим 8—10 классов средней школы.* Цель приложений (А—Д) — показать, что Циолковский подтвердил справедливость многих своих открытий строго математически. *Приложения понятны читателям, знающим высшую математику.* Оптимальные режимы полета изложены по ранее опубликованным работам автора. Главная цель их — показ плодотворности математических методов исследования экстремальных задач.

Принятый план изложения материала неизбежно привел к некоторым повторениям. Автор просит извинить его за эти повторы — он имел в виду написать книгу, интересную для различных групп читателей.

В Приложении Д рассмотрены некоторые вопросы психологии творчества идеальных (по Циолковскому) ученых-мыслителей.

Циолковский — один из любимых ученых-исследователей автора данной книги, опубликовавшего большое число статей, посвященных творчеству Константина Эдуардовича. Следует учесть, что автор иногда отходит от строгого изложения в область интуиции и труднодоказуемой романтики, но писать о Циолковском, только исходя из «ума холодных наблюдений», нельзя. Его работы требуют от изучающего и мудрости человеческого сердца.

* * *

«Популяризация, сказали бы мы автору, очень далека от вульгаризации, от популярничанья. Популярный писатель подводит читателя к глубокой мысли, к глубокому учению, исходя из самых простых и общеизвестных данных, указывая при помощи несложных рассуждений или удачно выбранных примеров главные *выводы* из этих данных, наталкивая думающего читателя на дальнейшие и дальнейшие вопросы. Популярный писатель не предполагает не думающего, не желающего или не умеющего думать читателя, — напротив, он предполагает в неразвитом читателе серьезное намерение работать головой и *помогает* ему делать эту серьезную и трудную работу, *ведет* его, помогая ему делать первые шаги и *уча* идти дальше самостоятельно»¹.

При написании книги автор стремился следовать этим глубоким, строгим и ясным мыслям нашего гениального учителя.

В процессе подготовки рукописи к печати большую помощь мне оказала кандидат физико-математических наук Л. В. Глики. Старший научный сотрудник С. А. Соколова помогла в работе над неопубликованными архивными материалами. Приношу им искреннюю благодарность.

¹ В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 5, стр. 358—359.

Введение

Напрасно думают, что она (фантазия.— *А. К.*) нужна только поэту. Это глупый предрассудок. Даже в математике она нужна, даже открытие дифференциального и интегрального исчисления невозможно было бы без фантазии. Фантазия есть качество величайшей ценности.

В. И. Ленин

Мы — современники величайшей научно-технической революции. Овладение процессами преобразования внутриядерной энергии, создание сверхзвуковых реактивных самолетов и ракет дальнего действия, разнообразные, порой прямо фантастические возможности быстроедействующих электронных вычислительных машин, радиолокации и телеуправления невероятно ускорили научно-технический прогресс. Пробуждены и организованы такие силы промышленности и науки, о которых не могли даже мечтать в предшествующие периоды истории человеческого общества.

Достаточно указать, что в 30—40-е годы нашего века человечество совершило величайшие научно-технические открытия; огромны достижения в телевидении (черно-белое и цветное изображения); освоено массовое производство реактивных двигателей (ракетных и воздушно-реактивных в авиации), электронно-вычислительных машин (аналоговых и цифровых), электронных микроскопов, открывших новую эру исследований в физике, биологии и медицине. Широко используется атомная энергия. Дают промышленный ток атомные электростанции, созданы атомные грузовые и пассажирские суда, подводные лодки.

Всему миру известны пионерские работы по завоеванию космоса, осуществленные в Советском Союзе. В 1957 г. в СССР был запущен на эллиптическую орбиту первый искусственный спутник Земли, а в 1961 г. Юрий Алексеевич Гагарин открыл эпоху пилотируемых

полетов в космическом пространстве. Мы пока еще недостаточно оцениваем достижения микроэлектроники (хотя транзисторные радиоприемники производятся миллионами штук) и лазерной техники. Мы теперь уже привыкли к тому, что путешествие из Москвы на Дальний Восток совершается за 8—9 час. С появлением на воздушных трассах сверхзвуковых самолетов (Ту-144), мы, вылетая из Хабаровска в 10 час. утра (по местному времени), будем прилетать в Москву в тот же день в 8 час. утра (по московскому времени), т. е. будем обогнать Землю в ее движении, обусловленном вращением около оси, проходящей через Северный и Южный полюсы.

В основе этих величайших открытий, революционное значение которых человечество начинает осознавать во всей их широте и многогранности только в последние 30—40 лет, лежат в сущности простые явления природы, которые доступны пониманию каждого культурного человека. Главное содержание научно-технических открытий теперь уже проверено жизнью — и в этом состоит колоссальное могущество этих областей науки и техники и неограниченные возможности дальнейших усовершенствований, открытий и изобретений.

Крупнейшие в истории цивилизации открытия новых научно-технических фактов и законов, развитие применений которых в наши дни обогащает все новые отрасли науки и техники, стали возможными при концентрации усилий и творческих талантов ученых, инженеров и изобретателей всех стран.

Эта книга посвящена рассказу о жизни, научной и изобретательской деятельности знаменитого советского ученого Константина Эдуардовича Циолковского. Научные интересы Циолковского охватывали весьма широкий спектр проблем: от философии и социологии до геолого-биологических задач, стоящих перед развивающимся человеческим обществом. Автор книги считает, что наиболее прогрессивными и жизнеспособными были следующие три направления исследований Циолковского:

— *работы по авиации* (сюда относятся исследования и изобретательские предложения по дирижаблю, цельнометаллическому аэроплану, летательному аппарату на воздушной подушке, а также создание первой в мире аэродинамической трубы с открытой рабочей ча-

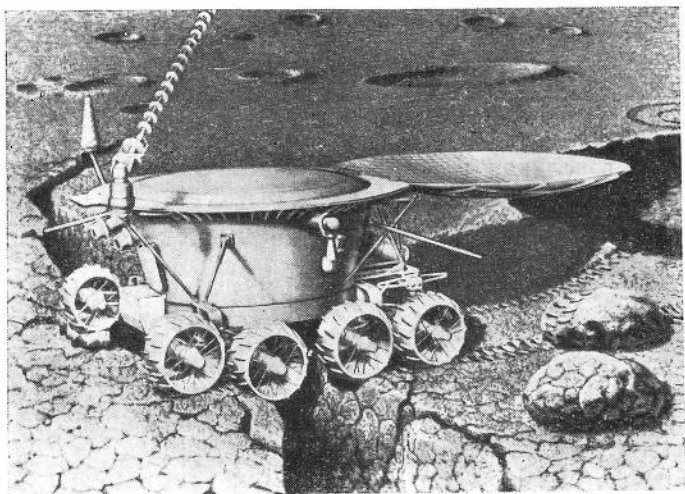


Рис. 1. Луноход — выдающееся достижение советской ракетной техники и космонавтики. Впервые в истории цивилизации на Луну был доставлен и приступил к научным исследованиям автоматический лунный самоходный аппарат, управляемый с Земли

стью и проведение работ по экспериментальной аэродинамике),

— *работы по ракетодинамике* (это — выдающийся цикл исследований и изобретений по ракетам дальнего действия и ракетам для полета в космическом пространстве; Циолковскому принадлежит создание строгой математической теории движения одноступенчатых и многоступенчатых ракет с жидкостными реактивными двигателями),

— *работы по космонавтике* (сюда относятся исследования прямолинейных движений ракет в ньютоновском гравитационном поле, приложение законов небесной механики к определению возможности реализации полетов в солнечной системе и подробное рассмотрение вопросов механики и физики в условиях невесомости, а также тщательное обсуждение средств жизнеобеспечения экипажа ракеты во время полета; интересными и актуальными для наших дней остаются прогнозы Циолковского о будущем реактивных приборов).

Следует подчеркнуть, что *строго научная и аргументированная разработка проблем указанных трех направлений научно-технического прогресса впервые осуществлена в исследованиях Циолковского.*

При изучении творческой биографии Циолковского поражает великая и всепоглощающая страсть исследователя — искателя новых путей прогресса науки и техники. Эта одержимость поисками нового, человечеству еще не известного, поддерживала Константина Эдуардовича в самые тяжелые моменты его жизни. Он писал: «Жизнь несла мне много горестей, и только душа, кипящая радостным миром идей, помогла мне их перенести».

Работы Циолковского по ракетодинамике написаны с широким русским размахом и необычайным взлетом фантазий. Его первые оригинальные вычисления, относящиеся к движению ракет, были сделаны в конце XIX столетия (в 1897 г.) и опубликованы в 1903 г. Он первый понял и строго доказал преимущества реактивных двигателей для больших скоростей полета. Из математических расчетов Циолковского следует, что для достижения заатмосферных высот и осуществления космических путешествий ракета является самым многообещающим техническим решением.

В рассмотренных задачах теории реактивного движения выводы Циолковского логически безупречны и обоснованы подробными вычислениями. «Без вычислений я никогда не обходился. Они направляли мою мысль и мечту», — писал в одной из своих статей по ракетодинамике Константин Эдуардович.

Циолковский сделал выдающиеся открытия в области аэронавтики. Он первый выдвинул проект цельнометаллического дирижабля изменяемого объема с тонкой металлической гофрированной оболочкой и искусственным подогревом газа; предложенный им цельнометаллический аэроплан со свободонесущими монопланными крыльями, хорошо обтекаемым корпусом, имеющим очертания «застывшей парящей птицы», составил «эпоху в развитии авиационной техники»¹.

Необходимость строго научно определять летные характеристики дирижабля и аэроплана естественно при-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. I. М., Изд-во АН СССР, 1951, стр. 8, 12.

вела проницательного Циолковского к созданию аэродинамической трубы (первой в мире — с открытой рабочей частью) и постановке большой серии экспериментов с телами различной формы. Эти исследования положили начало «современной экспериментальной аэродинамике».

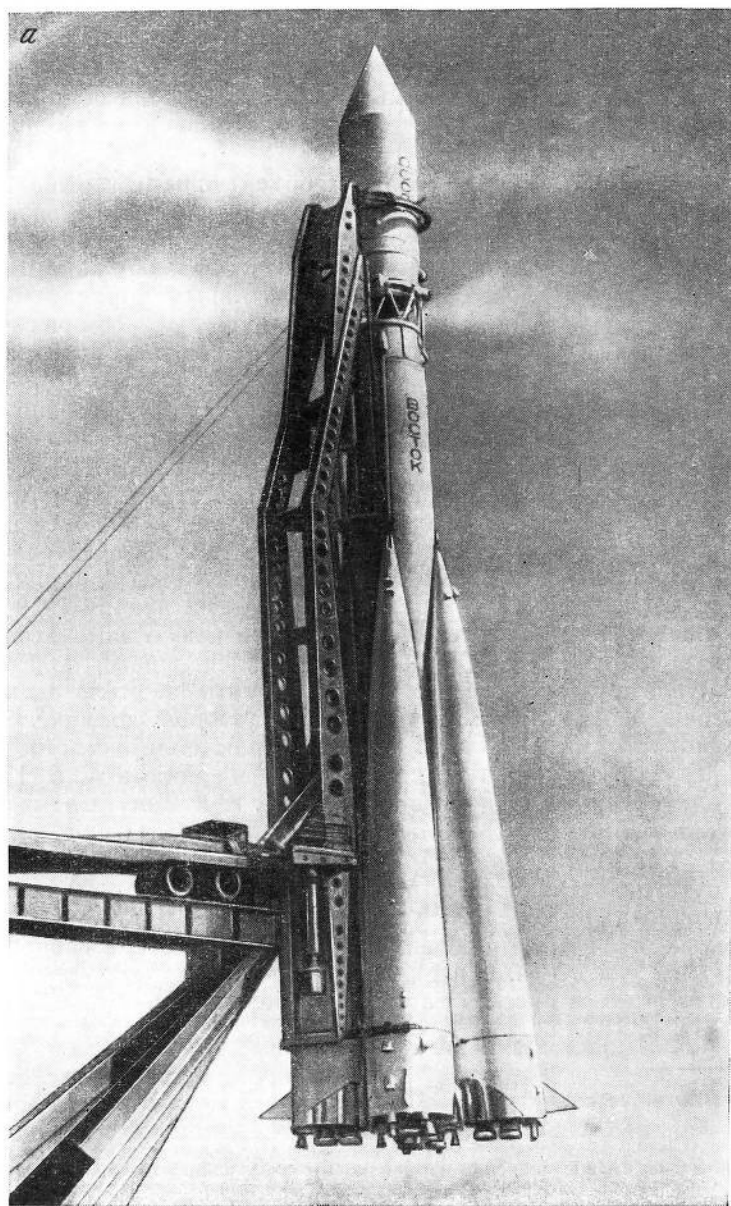
Великий человек, владея объективными методами науки, предвидит дальнейшее научно-техническое развитие общества. Плодотворные идеи Циолковского реализуются на наших глазах в виде разнообразных конструкций ракет дальнего действия, реактивных управляемых снарядов для противовоздушной обороны космических кораблей и все более совершенных реактивных сверхзвуковых самолетов.

4 октября 1957 г. человечество вступило в новую эру — эру пристального и систематического изучения космического пространства. В этот день был запущен на орбиту первый в мире советский искусственный спутник Земли. Впервые в истории человечества была достигнута *первая космическая скорость* полета, приблизительно равная 8000 м/сек¹. Вместе со спутником вышла на орбиту последняя ступень ракеты-носителя. 2 января 1959 г. советская наука и техника одержали новую замечательную победу: в СССР был осуществлен первый полет к Луне, причем последняя ступень ракеты-носителя с многочисленными приборами достигла *второй космической скорости*, равной 11 200 м/сек². Теорию полета многоступенчатых ракет начал своими исследованиями К. Э. Циолковский, опубликовавший в 1929 г. в Калуге замечательную работу «Космические ракетные поезда».

Ракетная техника в России прошла поучительный путь развития. Еще в первой половине XIX в. трудами военных инженеров А. Д. Засядко и К. И. Константинова были созданы боевые пороховые ракеты с реактивными двигателями на черном дымном порохе, хорошо известные в русской армии в течение 30—70-х годов XIX в.

¹ Более точное значение первой космической скорости, принимаемое в современных работах: $v_1=7912$ м/сек (СССР) и $v_1=7909$ м/сек (США).

² Более точное значение второй космической скорости, принимаемое в современных работах: $v_2=11\,189$ м/сек (СССР) и $v_2=11\,186$ м/сек (США).



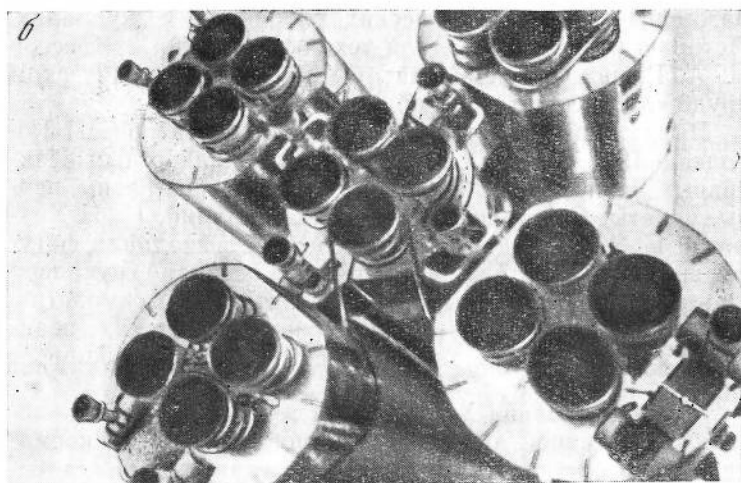


Рис. 2. «Восток» — советская трехступенчатая ракета-носитель, широко использовавшаяся для вывода в космос кораблей различного назначения. Эта ракета 12.IV 1961 г. вывела на орбиту первый в мире космический корабль, пилотируемый летчиком-космонавтом Ю. А. Гагариным

а — ракета-носитель «Восток» (вид сбоку); б — вид со стороны основных двигательных установок

В трагических условиях тюремного каземата, за несколько дней перед казнью, народоволец, талантливый химик Н. И. Кибальчич предложил в 1881 г. устройство ракетного летательного аппарата, движущегося при помощи пороховых ракет.

В конце XIX — начале XX в. исследованиями Константина Эдуардовича Циолковского и Ивана Всеволодовича Мещерского были заложены основы наук — *ракетодинамики и механики тел переменной массы*. Динамика прямолинейных движений ракет дальнего действия с жидкостным реактивным двигателем была детально разработана Циолковским. Мещерский в своих основных трудах, опубликованных в 1897 и 1904 гг., дал основные уравнения динамики точки переменной массы. Большое значение для развития ракетной техники и космонавтики имеют работы В. П. Глушко, С. П. Королева, М. К. Тихонравова, Ф. А. Цандера и других, опубликованные в

различных научно-технических сборниках и журналах. Историю развития ракетной техники изложил профессор Н. А. Рынин в своем девятитомном энциклопедическом труде «Межпланетные сообщения».

Выдающийся советский ученый и конструктор С. П. Королев в 1940 г. создал ракетопланер с жидкостным реактивным двигателем, и на нем были осуществлены первые полеты. Советские пилоты И. П. Полунин, Н. И. Храмов и Е. Э. Савицкий первыми в мире выполнили фигуры высшего пилотажа и мастерски освоили групповой пилотаж на скоростных турбореактивных самолетах. Максимальные скорости современных советских реактивных истребителей значительно превосходят скорость звука.

Вторая половина XX в. является эпохой бурного развития реактивной авиации, ракетной техники и космонавтики. Советский Союз стоит во главе прогресса современной космонавтики. Наша страна имеет ракеты всех классов и назначений. Мы первыми создали и успешно испытали межконтинентальную ракету. Начиная с 1950 г. ракеты используются для исследований верхних слоев атмосферы. Метеорологические ракеты, созданные в СССР, запускались в течение Международного геофизического года (VII.1957—XII.1958) в различных районах страны, а также в Арктике и Антарктике.

При оценке путей дальнейшего прогресса ракетостроения для развития промышленности и науки всех стран необходимо рассмотреть научно-технические изыскания пионеров ракетной техники. Их трудами заложены надежные основы этого направления технического развития.

Работы К. Э. Циолковского по аэронавтике, ракетодинамике и теории межпланетных сообщений были *первыми* серьезными *изысканиями* в мировой научно-технической литературе. В этих исследованиях математические формулы и расчеты не затеяют глубоких и ясных идей, сформулированных оригинально и четко. Прошло более 75 лет с конца XIX в., когда Циолковский осуществил великую программу работ по экспериментальной аэродинамике и создал теорию полета одноступенчатой ракеты с жидкостным реактивным двигателем (компоненты топлива: окислитель — жидкий кислород, горю-

чее — жидкий водород), и современное развитие науки и техники лишь подтверждает мысли и дела гениального Циолковского (он сам проводил аэродинамические эксперименты и сам строил модели дирижаблей).

Следует подчеркнуть, что, работая над созданием ракет, Циолковский имел в виду сугубо мирные применения этих летательных аппаратов. В большом количестве публикаций (более 140) у него нет ни одного слова о военных аспектах использования ракет дальнего действия. Вот что писал Циолковский в редакцию газеты «Биржевые ведомости» 12.V 1905 г.: «Работая над реактивными приборами, я имел мирные и высокие цели: завоевать Вселенную для блага человечества, завоевать пространство и энергию, испускаемую Солнцем».

Строгий и беспощадный судья — время — лишь выявляет и подчеркивает грандиозность замыслов, своеобразие творчества и высокую мудрость проникновения в сущность новых закономерностей явлений природы и техники, которые свойственны этим произведениям Константина Эдуардовича Циолковского. *Его труды помогают осуществлять новые дерзания ученых и инженеров Страны Советов.* Россия может гордиться своим знаменитым ученым, подлинным украшением человеческого рода, зачинателем новых направлений в науке и промышленности.

Глава первая

Первые шаги в науке

Я учился творя...

К. Э. Циолковский

Константин Эдуардович Циолковский — выдающийся советский ученый, инженер-исследователь огромной трудоспособности и настойчивости, человек большого доброго сердца. Широта и богатство творческой фантазии соединились у него с логической последовательностью и математической точностью суждений. Это был подлинный новатор в науке.

Уже в конце жизни (в 1932 г.) в одном из писем Циолковский так характеризовал свою научно-техническую деятельность: «Я революционер в науке и технике и очень бы страдал, если бы мне не дали возможности, например, работать над стратопланом или конструкцией атома. Нельзя требовать от меня, чтобы я сосредоточился исключительно на дирижабле. Мной олицетворяется революционный дух науки и техники»¹.

В этой книге основное внимание уделено исследованиям Циолковского, связанным с летательными аппаратами. Это дирижабль, цельнометаллический аэроплан, ракета для покорения космоса и аэроплан с реактивным двигателем.

Дирижабль, аэроплан, ракета были в центре многолетних творческих исканий Константина Эдуардовича. Но было бы ошибочным предполагать, что диапазон научного творчества Циолковского ограничен только проблемами создания летательных аппаратов. Он высказал ряд удивительно глубоких и оригинальных мыс-

¹ Письмо В. А. Зарзару от 28 апреля 1932 г. К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

лей, относящихся к астрономии, геофизике и биологии. «По моей чрезвычайной любознательности я энциклопедист... Моя натурфилософия, которую я вырабатывал в течение всей жизни и ставил выше всякой другой своей деятельности, также требовала сведений во всех отраслях знания»¹,— писал Циолковский в своей автобиографии.

Астрономия и вопросы строения Вселенной особенно занимали Константина Эдуардовича. Он трактовал Вселенную с позиций «космического» мировоззрения, считая, что разумное начало будет в беге времени господствовать над всем миром. «Астрономия увлекала меня потому, что я считал и считаю до сего времени не только Землю, но отчасти и Вселенную достоянием человеческого потомства»².

Укажем также, что его перу принадлежат оригинальные (но спорные) статьи по философии, языкознанию, проблемам прогрессивного переустройства общества и организации промышленности на искусственных островах-оранжереях, плавающих вокруг Солнца, где-то между орбитами Марса и Юпитера. Эти работы Циолковского вызывают страстные дискуссии среди ученых и инженеров в наши дни.

Особое внимание и советской и мировой научно-технической общественности привлекают исследования Константина Эдуардовича, относящиеся к обоснованию теории реактивного движения. Результаты этих исследований являются наиболее важными и фундаментальными для современной ракетной техники и космонавтики.

В последней четверти XIX и начале XX столетий, когда Циолковский создавал новую науку, определяющую законы движения ракет и набрасывал эскизы первых конструкций для исследования безграничных мировых пространств реактивными приборами, многие считали реактивные двигатели и ракетную технику делом бесперспективным и ничтожным по своему практическому значению, а ракеты — пригодными лишь для праздничных и высокаторжественных фейерверков и иллюминаций.

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

² Там же.

Константин Эдуардович Циолковский родился 17 сентября 1857 г. в селе Ижевском Спасского уезда Рязанской губернии в семье лесничего Эдуарда Игнатьевича Циолковского. О своих родителях Циолковский писал: «Отец всегда был холоден, сдержан. Среди знакомых он слыл умным человеком и оратором. Среди чиновников — красным и нетерпимым по своей идеальной честности... У него была страсть к изобретательству и строительству. Меня еще не было на свете, когда он придумал и устроил молотилку. Увы, неудачно! Старшие братья рассказывали, что он строил с ними модели домов и дворцов. Всякий физический труд отец в нас поощрял, как и вообще самодеятельность. Мы почти всегда все делали сами. Мать была совершенно другого характера — натура сангвиническая, горячка, хохотунья, насмешница и даровитая. В отце преобладал характер, сила воли, в матери — талантливость»¹.

Первые годы детства Константина Эдуардовича были счастливыми. Он был живым смышленным ребенком — предприимчивым и впечатлительным. Летом мальчик строил с товарищами в лесу шалаши, любил лазить на заборы, крыши и деревья. Много бегал, играл в мяч, лапту, городки. Часто запускал змея и отправлял ввысь по нитке «почту» — коробочку с тараканом. Зимой с увлечением катался на коньках.

Циолковскому было восемь, когда мать подарила ему крошечный воздушный шар (аэростат), выдутый из коллодиума и наполненный водородом. Будущий создатель теории цельнометаллического дирижабля с удовольствием занимался этой игрушкой. Вспоминая об этих годах детства, Циолковский писал: «Я страстно любил читать и читал все, что можно было достать... Любил мечтать и даже платил младшему брату за то, что он слушал мои бредни. Мы были маленькие, и мне хотелось, чтобы и дома, и люди, и животные — все тоже было маленькое. Потом я мечтал о физической силе. Я мысленно высоко прыгал, взбирался, как кошка, на шести, по веревкам. Мечтал о полном отсутствии силы тяжести»²

¹ К. Э. Циолковский. Моя жизнь и работа. Сборник Аэрофлота, посвященный Циолковскому. М., 1939, стр. 17.

² Там же, стр. 19.



Костя Циолковский в 1862 г.

На десятом году жизни Циолковский, катаясь на санках, простудился и заболел скарлатиной. Болезнь была тяжелой, и вследствие ее осложнения мальчик почти совершенно потерял слух. Глухота не позволила продолжать учебу в школе. «Глухота делает мою биографию малоинтересной,— пишет позднее Циолковский,— ибо лишает меня общения с людьми, наблюдения и заимствования. Моя биография бедна лицами и столкновениями»¹. С 10 до 14 лет жизнь Циолковского была «самым грустным, самым темным временем... Я стараюсь восстановить его в памяти, но ничего сейчас не могу вспомнить. Нечем помянуть это время»².

С 14 лет Константин Эдуардович начал заниматься самостоятельно, пользуясь небольшой библиотекой сво-

¹ К. Э. Циолковский. *Моя жизнь и работа*, стр. 20.

² Там же, стр. 23.

его отца, в которой были книги по естественным наукам и математике. Тогда же в нем пробуждается страсть к изобретательству. Он строит воздушные шары из тонкой папиросной бумаги, делает маленький токарный станок и конструирует коляску, которая должна была двигаться при помощи ветра. Модель коляски прекрасно удалась и двигалась на крыше по доске, даже против ветра. «Проблески серьезного умственного сознания,— пишет Циолковский об этом периоде своей жизни,— появились при чтении. Так, лет четырнадцати я вздумал почитать арифметику, и мне показалось все там совершенно ясным и понятным. С этого времени я понял, что книги вещь немудреная и вполне мне доступная. Я стал разбирать с любопытством и пониманием некоторые отцовские книги по естественным и математическим наукам. И вот меня увлекает астролябия, измерение расстояния до недоступных предметов, снятие планов, определение высот. И я устраиваю астролябию—угломер. С помощью нее, не выходя из дома, определяю расстояние до пожарной каланчи. Нахожу 400 аршин. Иду и проверяю. Оказывается верно. *С этого момента я поверил теоретическому знанию*»¹.

Выдающиеся способности, склонность к самостоятельной работе и несомненный талант изобретателя заставили родителей задуматься над будущей профессией и дальнейшим образованием сына. Константину Эдуардовичу было 16 лет, когда отец решил отправить его в Москву для знакомства с промышленностью и продолжения самообразования. Один из лучших знатоков биографии Циолковского инженер Б. Н. Воробьев писал: «Как и многие юноши и девушки, стекавшиеся в столицу для получения образования, он был полон самых радужных надежд. Но никто и не думал обращать внимание на молодого провинциала, всеми силами стремившегося к сокровищнице знаний. Тяжелое материальное положение, глухота и практическая непригодность к жизни меньше всего способствовали выявлению его талантов и способностей»².

Из дома Циолковский получал 10—15 руб. в месяц. Питался одним черным хлебом, не имел даже картошки

¹ К. Э. Циолковский *Моя жизнь и работа*, стр. 24.

² Б. Н. Воробьев. Циолковский. М., «Молодая гвардия», 1940, стр. 25.

и чаю. Зато покупал книги, реторты, ртуть, серную кислоту и прочее для различнейших опытов и самодельных приборов. «Я помню,— писал Циолковский в своей автобиографии,— что кроме воды и черного хлеба у меня тогда ничего не было. Каждые три дня я ходил в булочную и покупал там на 9 копеек хлеба. Таким образом, я проживал в месяц 90 копеек... Все же я был счастлив своими идеями, и черный хлеб меня нисколько не огорчал»¹.

Циолковский проводил элементарные опыты по физике и химии, много читал, тщательно изучал курсы начальной и высшей математики, аналитической геометрии, высшей алгебры. «17-ти лет, по книгам, я уже прошел курс дифференциального и интегрального исчисления и решал задачи по аналитической механике, не имея о ней никакого понятия. И решал, как потом оказалось, верно»²,— писал Константин Эдуардович. Часто, разбирая какую-нибудь теорему, Циолковский старался сам найти доказательство. Это ему нравилось, хотя не всегда удавалось.

В эти годы у Циолковского зарождается мысль о завоевании человеком мировых пространств. Ему казалось, что можно подняться в космическое пространство, используя свойства центробежной силы. Механизм придуманного Циолковским прибора состоял из закрытой камеры или ящика, в котором вибрировали два повернутых вверх маятника с массивными шарами на концах. Шары двигались по дугам окружностей, а центробежная сила шаров должна была, по мысли юноши, поднимать кабину и нести ее в межпланетное пространство.

«Я был так взволнован, даже потрясен, что не спал всю ночь — бродил по Москве — и все думал о великих следствиях моего открытия. Но уже к утру я убедился в ложности моего изобретения. Разочарование было так же сильно, как и очарование. Эта ночь оставила след на всю мою жизнь; через 30 лет я еще вижу иногда во сне, что поднимаюсь к звездам на моей машине и чувствую такой же восторг, как в ту незапамятную ночь»³.

Необходимо отметить, что к занятиям по высшей математике, механике, физике, химии Циолковский шел от

¹ К. Э. Циолковский. *Моя жизнь и работа*, стр. 26.

² К. Э. Циолковский. *Собр. соч.*, т. V.

³ К. Э. Циолковский. *Моя жизнь и работа*, стр. 26.

своих изобретательских предложений. Так, изучение аэродинамики он начал для обоснования аэродинамического расчета дирижабля, органическую химию Циолковский подробно штудировал в поисках наиболее калорийных топлив для реактивных двигателей, а его исследования по астрономическим вопросам обусловлены постоянным вниманием к освоению мировых пространств и межпланетным путешествиям. В одной из своих работ он писал: *«Мысль о сообщении с мировым пространством не оставляла меня никогда. Она побудила меня также заниматься высшей математикой»*. Таким образом, на общенаучный цикл дисциплин (математика, механика, физика, химия) К. Э. Циолковский смог рел как на необходимый инструментарий ученого при конкретных исследованиях технических проблем.

Вот некоторые из вопросов, которые особенно занимали молодого Циолковского.

«Нельзя ли практически воспользоваться энергией движения Земли? Тогда же я нашел ответ: нельзя.

Нельзя ли устроить поезд вокруг экватора, в котором не было бы тяжести от центробежной силы? Ответил сам себе отрицательно: нельзя. Этому помешает сопротивление воздуха и многое другое.

Нельзя ли строить металлические аэростаты, не пропускающие газа и вечно носящиеся в воздухе? Ответил: можно.

Нельзя ли эксплуатировать в паровых машинах высокого давления мятый пар? Ответил так же, что можно»¹.

Обращает на себя внимание крайняя независимость юноши. Он составил программу своих теоретических занятий и опытов. Работая систематически в библиотеке, он широко пользовался учебниками по механике, физике, химии и математике, написанными выдающимися русскими учеными — деятелями высшей школы. Так, после изучения курса физики средней школы Циолковский тщательно проработал курс наблюдательной физики профессора Петербургского университета Ф. Ф. Петрушевского, а по химии подробно конспектировал знаменитую книгу профессора Д. И. Менделеева «Основы химии». Учился Циолковский совершенно самостоятельно.

¹ К. Э. Циолковский. Моя жизнь и работа, стр. 25.

«Учителей у меня не было. Меня можно считать самоучкой чистой крови»,— сообщал Константин Эдуардович профессору Н. А. Рынину в 1926 г.

Странный вид имел он в эту пору своей жизни. «Благодаря главным образом кислотам я тогда ходил в штанах с желтыми пятнами и дырами. Мальчики на улице замечали мне — что это, мыши что ли изъели ваши брюки? — Затем носил длинные волосы, просто оттого, что некогда было их стричь». «Что я читал в Москве и чем увлекался? — писал Циолковский. — *Прежде всего точными науками...* Известный публицист Писарев заставлял меня дрожать от радости и счастья... Из беллетристических произведений наибольшее впечатление производили на меня романы и рассказы Тургенева, в особенности его „Отцы и дети“»¹.

Учась в Москве, Циолковский вел переписку с отцом. «был счастлив своими мечтами и никогда не жаловался». Он брал в публичных библиотеках книги и журналы: «Помню механику Вейсбаха и Брашмана, ньютоновские „Принципы“ и другие. Из журналов за все годы перечитал: „Современник“, „Дело“, „Отечественные записки“. Эти журналы имели на меня громадное влияние»².

Кто-то из знакомых семьи Циолковских, будучи в Москве, встретил Константина на улице и был поражен его утомленным и истощенным видом. «Отец пригласил меня «под благовидным предлогом» приехать к семье. Дома обрадовались, только изумились моей черноте. Очень просто — я „съел“ весь свой жир»³. Результатом постоянного недоедания была сильная физическая слабость и расстройство зрения. Именно с этих пор Циолковский начал носить очки.

Три года прожил Циолковский в Москве, а затем, вернувшись домой к отцу, стал давать частные уроки по математике и физике плохо успевающим гимназистам. Несомненные педагогические способности и хорошие отзывы об этих частных уроках решили вопрос о выборе профессии. Мы убеждены, что успехи молодого Циолковского как репетитора объяснялись тем вынужденным (из-за глухоты) методом приобретения знаний, который обуславливает быстрое развитие самостоятельного мыш-

¹ Там же, стр. 27.

² Там же.

³ Там же.

ления. Говоря современным педагогическим языком, Константин Эдуардович прошел идеальную школу проблемного обучения. Эта школа была тяжелой и напряженной, так как направляющих указаний учителя не было. Часто не было и хороших учебников. В неопубликованной рукописи Циолковского под названием «Фатум, судьба, рок» можно прочесть: «Учителей у меня совсем не было, а *потому мне приходилось больше создавать и творить, чем воспринимать и усваивать*. Указаний, помощи ниоткуда не было, непонятного в книгах было много, а разъяснять приходилось все самому. Одним словом, творческий элемент, элемент саморазвития, самобытности преобладал (курсив мой.— А. К.). Я, так сказать, всю жизнь учился мыслить, преодолевать трудности, решать вопросы и задачи. Многие науки создавались мной, за неимением книг и учителей, прямо самостоятельно»¹.

Осенью 1879 г. Константин Эдуардович сдал экстерном экзамен на звание учителя народного училища, а месяца через четыре был назначен на должность учителя арифметики и геометрии в Боровское уездное училище Калужской губернии².

По рекомендации жителей Боровска Циолковский «попал на хлеба к одному вдовцу с дочерью, жившему на окраине города» Е. Н. Соколову. Ему сдали две комнаты со столом. Дочь Соколова Варя была почти ровесницей Циолковского (моложе его на два месяца). Ее характер, трудолюбие пришлись по душе Константину Эдуардовичу, и вскоре Циолковский на ней женился. «Венчаться мы ходили за 4 версты пешком, не наряжались. В церковь никого не пускали. Вернулись — и никто о нашем браке ничего не знал... Помню, в день венчания купил у соседа токарный станок и резал стекло для электрических машин. Все же про свадьбу как-то пронюхали музыканты. Насилу их выпроводили. Напился только венчавший поп. И то угощал его не я, а хозяин»³.

¹ Архив АН СССР, ф. 555, оп. 2, д. 1.

² «Предписанием г. попечителя Московского учебного округа от 24 января 1880 года за № 630 определен исправляющим должность учителя арифметики и геометрии в Боровском уездном училище» (из послужного списка К. Э. Циолковского).

³ К. Э. Циолковский *Моя жизнь и работа*, стр. 30.

В своей квартире в Боровске Циолковский устроил маленькую лабораторию. Здесь сверкали электрические молнии, гремели громы, знонили колокольчики, загорались огни, вертелись колеса и блистали иллюминации. «Я предлагал желающим попробовать ложкой невидимого варенья. Соблазненные угощением получали электрический удар. Посетители любовались и дивились на электрического осьминога, который хватал всякого своими лапами за нос или за палец, и тогда у попавшего к нему волосы становились дыбом, и выскакивали искры из любой части тела»¹.

В 1881 г. Циолковский самостоятельно разработал основы кинетической теории газов. Работу он послал в Петербургское физико-химическое общество, где она получила одобрение видных членов общества, в том числе и гениального русского химика Д. И. Менделеева. Однако важные открытия, сделанные Циолковским в глухом провинциальном городке, не стали новостью для науки; аналогичные открытия были сделаны несколько раньше в Германии. За вторую научную работу, названную «Механика животного организма»², Циолковского единогласно избирают членом Физико-химического общества. Эту моральную поддержку своим первым научным исследованиям Циолковский вспоминал с благодарностью всю свою жизнь. В предисловии ко второму изданию своей работы «Простое учение о воздушном корабле и его построении» (Калуга, 1904, стр. V) Константин Эдуардович писал: «Содержание этих работ несколько запоздало, т. е. я сделал самостоятельно открытия, уже сделанные ранее другими. Тем не менее общество отнеслось ко мне с большим вниманием, чем поддержало мои

¹ Там же, стр. 31.

² Работа получила благоприятный отзыв знаменитого физиолога И. М. Сеченова (*К. Э. Циолковский. Собр. соч.*, т. IV, стр. 161—263. М., «Наука», 1964). Есть следующие замечания Константина Эдуардовича к рукописи под названием «Механика в биологии», датированной им 3 января — 12 марта 1920 г. «Работа эта начата автором (Циолковским.— А. К.) еще в 1882 г. Тогда же известный профессор Сеченов отозвался о ней так: «Труд Циолковского, несомненно, доказывает его талантливость. Автор солидарен с французскими биологами-механистами. Жаль, что он не закончен и не готов к печати... Только теперь, через 38 лет, ему суждено появиться в свет. Он даже не переделан, а вновь написан, но дух его остался неизменным. Начатое сочинение еще хранится, если не считать потерю немногих листков».

силы. Может быть, оно и забыло меня, но я не забыл гг. Боргмана, Менделеева, Фан-дер-Флита, Петрушевского, Бобылева и в особенности Сеченова»¹.

В 1883 г. Константин Эдуардович написал в форме научного дневника работу «Свободное пространство», в которой он рассмотрел ряд задач классической механики о движении тел в пространстве без действия силы тяжести и сил сопротивления. В этом случае основные характеристики движения тел определяются только силами взаимодействия между телами данной механической системы, и особое значение для количественных выводов приобретают законы сохранения основных кинетических величин (количества движения, момента количества движения или кинетического момента и кинетической энергии), составляющие важную главу теоретической механики.

Циолковский дает многочисленные примеры и красочные описания явлений в пространстве без действия внешних сил. Вот некоторые из его записей, относящиеся к *24 февраля 1883 г.* «В свободном пространстве наблюдаемое тело не давит на опору и — наоборот. Поэтому если бы в свободном пространстве нужны были жилища, то, как бы ни были они велики, они не могли сами собой разрушиться от своей непрочности. Целые горы и дворцы, произвольной формы и величины, могли бы держаться в пространстве без всякой поддержки и связи с опорой. Если я встану на острие у поверхности Земли, то оно проколет мою ногу; если же это случится в свободном пространстве, то мое тело не будет давить на иглу, и там я могу стоять на острие штыка так же спокойно, как на ровном полу.

На земле в руках я не удержу 4 пуда, а в свободном пространстве тысяча пудов нисколько не отяготит мою руку или мой мизинец.

...В свободном пространстве нет ни верха, ни низа... Там нельзя сказать: я поднимаюсь, я опускаюсь, я выше, вы ниже; ...там маятник не качается, и часы (маятниковые) не ходят. Но время можно отлично узнавать посредством карманных часов или вообще посредством

¹ Простое учение о воздушном корабле и его построении К. Циолковского, изд. 2. Калуга, 1904.

часов, у которых маятник качается не силою тяжести, а упругостью стальной пружины»¹.

Движение тел в свободном пространстве может происходить только за счет обмена количествами движения между отдельными телами. Здесь будет справедлив закон сохранения количества движения.

Если в начальный момент времени скорости всех точек (тел) системы равны нулю, то в любой момент времени при движении такой системы ее количество движения также будет равно нулю.

Представим себе, что в свободном пространстве имеется всего два тела: человек, вес которого на Земле равен 80 кг, и камень весом 1 кг. Пусть в начальный момент времени скорости человека и камня равны нулю. Если затем человек бросит камень, сообщив ему, например, скорость 16 м/сек, то он начнет двигаться в противоположном направлении. Из закона сохранения количества движения² в проекции на прямую, по которой движутся человек и камень, мы получим

$$v_1 = -\frac{m}{M} v_2 = -\frac{p}{P} v_2,$$

где p — вес на Земле камня, а P — вес человека. Из этой формулы следует, что величина скорости человека будет равна 0,2 м/сек, или 20 см/сек.

Рассмотрение примера показывает, что для перемещения в свободном пространстве наиболее естественным является способ отбрасывания кусков материи, т. е. *реактивный способ сообщения движения*. Если частицы вещества отбрасывать непрерывно, то мы получим простейшую ракету. Это и осознал Циолковский. Вот его запись от 28 марта 1883 г.: «Положим, что дана бочка, наполненная сильно сжатым газом. Если отвернуть один из ее тончайших кранов, то газ непрерывной струей устремится из бочки, причем упругость газа, отталкивающая его частицы в пространство, будет также непрерывно отталкивать и бочку. Результатом этого будет непрерывное изменение движения бочки. ...Посредством

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II. М., Изд-во АН СССР, 1957, стр. 32—33.

² Закон сохранения количества движения вытекает из законов движения Ньютона, и доказательство (строгое) этого закона можно найти в любом вузовском курсе теоретической механики.

достаточного количества кранов (шести) можно так управлять отбрасыванием газа, что движение бочки или полого шара будет совершенно зависеть от желания управляющего кранами, т. е. бочка может описать какую угодно кривую (в пространстве) и по какому угодно закону скоростей... Вообще равномерное движение по кривой или прямолинейное неравномерное движение сопряжено в свободном пространстве с непрерывною потерю вещества»¹.

В этих записях Циолковского еще нет количественных зависимостей; все рассуждения и утверждения носят чисто качественный характер. Основой всех этих заключений являются известные в теоретической механике законы сохранения количества движения и момента количества движения (кинетического момента) для механических систем, находящихся под действием только внутренних сил (сил взаимодействия). Но совершенно очевидно, что реактивный способ сообщения движения привлекал внимание Константина Эдуардовича на самых первых ступенях его самостоятельной научной деятельности.

Позднее (в 1896—1897 гг.) эти качественные суждения будут облечены Циолковским в строгую математическую форму, и числовые расчеты дадут точную инженерную оценку преимуществ ракеты.

Начало самостоятельной научной работы Циолковского протекало в очень своеобразных условиях. С точки зрения какого-нибудь правоверного доктринера от науки заниматься научным творчеством Циолковскому вообще было невозможно. В самом деле, представьте себе тихий провинциальный городок Боровск в 80-х годах прошлого века, расположенный вдали от магистральных дорог страны. Ни библиотеки, ни научных журналов, ни лабораторий. Он учитель городского двухклассного училища, программы которого по физике и математике касаются только самых элементарных истин. Интересы коллег не поднимаются выше обсуждений чисто методических вопросов. Газеты приходят с недельным опозданием. И Циолковский делает почти невероятное! Пользуясь отдельными замечаниями о новых вопросах науки в учебниках, собственным запасом наблю-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 52.

дений в Москве, развивая последовательно принятую им методику самостоятельных доказательств и исследований уже известного, он начинает догадываться о постановке насущных научно-технических проблем. Возникшую идею Циолковский не может проверить по изданной литературе — ее в Боровске нет; он ведет все исследование от начала до логического конца самостоятельно, в полной уверенности, что родившаяся у него идея нова и никем не обследована. В случае удачи — работа оформляется и отправляется на суд официальной науки — в столицу.

«Сначала я делал открытия давно известные, потом не так давно, а затем и совсем новые», — писал Циолковский в своей автобиографии. Совпадение найденных результатов с открытиями других ученых давало ему уверенность в собственных силах и таланте к научным исследованиям.

Циолковский обладал прекрасной памятью, сохранившейся до самых последних дней его жизни. Он не делал больших выписок из работ других авторов. Уловив основную мысль какой-нибудь работы или ознакомившись с постановкой какой-либо интересной задачи, он предлагал собственные доказательства, проводимые независимо и самостоятельно. Такой способ освоения добытых наукой данных требовал колоссальной затраты умственной энергии, но Циолковский предпочитал его другим.

Уже в первых работах Константина Эдуардовича виден самобытный оригинальный ум. Он умеет выбирать темы для размышлений и находить решения, открывающие новые пути в науке. Для него характерна ясная и отчетливая постановка научно-технических проблем. Популяризуя свои идеи, он обычно прибегает к красочным примерам, убедительно раскрывающим суть дела. Для доказательств используются самые простые математические средства. Полученные результаты и следствия из них подвергаются тщательному анализу. Циолковский умел видеть за теоретическими расчетами подлинную горячую жизнь техники, борьбу заскорузлых отмирающих академических школ с новыми идеями. Он умел настойчиво и последовательно добиваться победы нового в труднейших условиях творческого труда. Его крайняя самостоятельность и оригинальность в научных исканиях граничит иногда с пренебрежением к общепринятым

нормам. Однако он тщательно разбирает все критические замечания оппонентов по достигнутым им результатам и умеет аргументированно отстаивать свои научные убеждения. Циолковский глубоко принципиален в своих творческих исканиях, а его умение самостоятельно работать над научными проблемами — великолепный пример для всех начинающих. Его первые шаги в науке, сделанные в труднейших условиях, — это шаги большого мастера, революционного новатора, зачинателя новых направлений и в науке и в технике.

Некоторые ученые и инженеры, поверхностно знающие многогранное творчество Циолковского, утверждают, что исследовательская манера Константина Эдуардовича исполнена пренебрежения к предыдущим творческим достижениям великих умов человечества. Мы приведем здесь некоторые из высказываний, содержащихся в неопубликованной работе Циолковского «Беседы о Земле» (1932 г., ф. 555). Эти высказывания являются принципиальными и, как пишет Циолковский, могут служить пояснением ко всем его трудам. «У меня, в моих работах мало имен и ссылок на знаменитые сочинения. Но это не значит, что я их не уважаю, не признаю, или считаю все мною сказанное за открытое мною.

Мои взгляды и учение — несомненный продукт науки и прочитанных мною книг. Вследствие глухоты с детства у меня один источник: написанное или напечатанное.

Без науки, без этого склада трудов великих и гениальных людей всех времен и народов я был бы крошечной величиной.

Человек и даже целый народ, предоставленный самому себе, блуждает во тьме и не в силах, например, сам дойти до известной всем теперь нумерации, или десятичному обозначению чисел.

...Правда, я самостоятелен и многое открываю сам, но все же и я продукт веяний и мыслей, витающих среди людей.

...Мне просто удобно писать так, как я пишу. Отсутствие имен и названий облегчает и читателя. Дело ведь не во мне и в других, а в том, чтобы *сообщить как можно короче и проще то, что людям нужнее всего знать.*

...Я не только признаю заслуги мудрецов, ученых и всех двигателей просвещения и технического прогресса, но и не знаю, как выразить свой восторг и преклонение перед ними».

Глава вторая

Работы по авиации и экспериментальной аэродинамике

Я думаю, что людям всего дороже истина, а не прекрасное заблуждение. Заблуждение не имеет цены.

К. Э. Циолковский

В одной из своих автобиографических статей Циолковский писал: «В 1885 году, имея 28 лет, я твердо решил отдалиться воздухоплаванию и теоретически разработать металлический управляемый аэростат». Константин Эдуардович обратил внимание на существенные недостатки применявшихся аэростатов с оболочками из прорезиненной ткани. Такие оболочки скоро изнашивались, обладали малой прочностью, и вследствие проницаемости ткани наполняющий их газ (в те годы — водород) быстро терялся. Кроме того, проникающий внутрь оболочки воздух образовывал, смешиваясь с водородом, гремучий газ, и достаточно было небольшой искры, чтобы произошел взрыв.

Результатом исследовательской работы Циолковского явилось объемистое сочинение «Теория и опыт аэростата». В этом сочинении было дано научно-техническое обоснование создания новой и совершенно оригинальной конструкции дирижабля с тонкой металлической оболочкой; Циолковский разработал чертежи общих видов дирижабля и некоторых важных узлов конструкции.

Дирижабль Циолковского имел следующие характерные особенности. Во-первых, это был дирижабль *переменного объема*, что позволило сохранять *постоянную* подъемную силу при различных температурах окружающего воздуха и различных высотах полета. Возможность изменения объема конструктивно достигалась при помощи особой стягивающей системы и гофрированных боковин. Во-вторых, *газ*, наполняющий дирижабль, *можно*

было подогревать путем пропускания по змеевикам отработанных газов моторов.

Третья особенность конструкции состояла в том, что тонкая металлическая оболочка для увеличения прочности и устойчивости была гофрированной, причем для обеспечения жесткости оболочки волны гофра располагались перпендикулярно к оси дирижабля¹. Выбор геометрической формы дирижабля и расчет прочности его тонкостенного корпуса Циолковский предложил впервые.

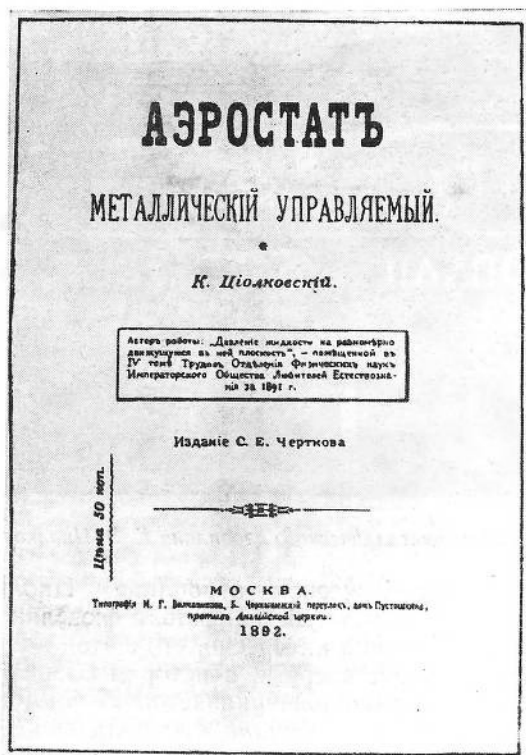
Этот проект не получил признания. Официальная организация царской России по проблемам воздухоплавания — VII воздухоплавательный отдел Русского технического общества — нашла, что проект цельнометаллического дирижабля, способного изменять свой объем, не может иметь большого практического значения и дирижабли «вечно будут игрушкой ветров». Поэтому автору было отказано даже в субсидии на постройку модели. Обращения Циолковского в Генеральный штаб армии также не имели успеха. Печатный труд «Аэростат металлический управляемый» (1892 г.) получил несколько сочувственных отзывов, и этим дело ограничилось.

Циолковскому принадлежит прогрессивная идея постройки *цельнометаллического аэроплана*.

В статье «Аэроплан, или птицеподобная (авиационная) летательная машина», опубликованной в журнале «Наука и жизнь» в 1894 г.², даны описание, расчеты и чертежи моноплана со свободнонесущим, безрасчалочным крылом. В противоположность ряду изобретателей и конструкторов, разрабатывающих в те годы аппараты с машущими крыльями, Циолковский указывал, что «подражание птице в техническом отношении весьма затруднительно вследствие сложности движения крыльев и хвоста, а также вследствие сложности устройства этих органов».

¹ Принятое в работах Циолковского расположение волн гофра приводит к увеличению шероховатости поверхности корпуса дирижабля и, как показали эксперименты, к существенному увеличению сопротивления трения. Первые эксперименты по определению влияния шероховатости на сопротивление трения были поставлены в лаборатории Людвиг Прандтля (в Геттингене) известным экспериментатором Никурадзе (см.: *I. Nikuradse. Strömungsgesetze in rauhen Röhren, VDI. Forschungsheft 1933, N 361*).

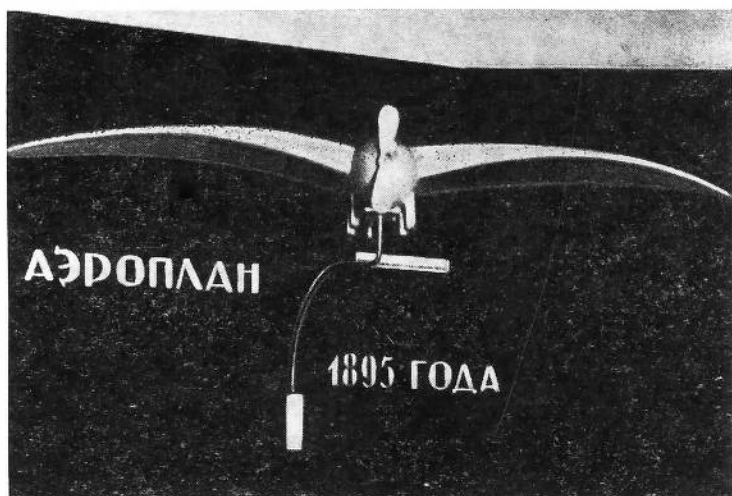
² Статья вышла отдельной брошюрой в 1895 г. См. также: *К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. 1, стр. 40—74.*



Титульный лист первой книги К. Э. Циолковского

Аэроплан Циолковского имеет форму «застывшей парящей птицы, но вместо ее головы вообразим два гребных винта, вращающихся в обратные стороны... Мускулы животного мы заменим взрывными нейтральными двигателями. Они не требуют большого запаса топлива (бензин) и не нуждаются в тяжелых паровиках и больших запасах воды... Вместо хвоста устроим двойной руль — из вертикальной и горизонтальной плоскости... Двойной руль, двойной винт и неподвижность крыльев придуманы нами не ради выгоды и экономии работы, а единственно ради исполнимости конструкции»¹.

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. I, стр. 44.



Макет цельнометаллического аэроплана К. Э. Циолковского

В цельнометаллическом аэроплане Циолковского крылья уже имеют толстый профиль, а фюзеляж — обтекаемую форму. Весьма интересно, что в этой журнальной статье Циолковский впервые в истории развития самолетостроения особенно подчеркивает *необходимость улучшения обтекаемости аэроплана для получения больших скоростей*. Конструктивные очертания аэроплана Циолковского были несравненно совершеннее, нежели более поздние конструкции братьев Райт, Сантос-Дюмона, Вуазена и других изобретателей. О своих расчетах Циолковский писал: «При получении этих чисел я принял самые благоприятные, идеальные условия сопротивления корпуса и крыльев; в моем аэроплане нет выдающихся частей, кроме крыльев; все закрыто общей плавной оболочкой, даже пассажиры».

В этой работе Циолковский впервые делает попытку определить расчетом основные летные характеристики аэроплана для установившегося горизонтального полета. Он находит потребную скорость для поддержания горизонтального полета, определяет потребную мощность двигателей и ряд других летных характеристик. Следует подчеркнуть, что Циолковский правильно утверждает, что «давление на крылья встречного воздуха пропорцио-

нально синусу угла отклонения их от направления воздушного потока». При нахождении потребной тяги в работе учитываются коэффициенты полезного действия воздушного винта. Таким образом, в данном исследовании Циолковский заложил основы аэродинамического расчета летных характеристик аэроплана. Позднее в «Отчете Академии наук» он показал, что потребная мощность двигателей пропорциональна коэффициенту лобового сопротивления и обратно пропорциональна коэффициенту подъемной силы в степени $3/2$. Этот результат приводится в ряде учебников по аэродинамическому расчету самолетов.

Циолковский предвидел значение бензиновых двигателей внутреннего сгорания: «...У меня есть теоретическое основание верить в возможность построения чрезвычайно легких и в то же время чрезвычайно сильных бензиновых двигателей, вполне удовлетворяющих задаче летания»¹. Константин Эдуардович предсказывал, что со временем маленький аэроплан будет успешно конкурировать с автомобилем.

*Разработка цельнометаллического свободнонесущего моноплана с толстым изогнутым крылом есть крупнейшая заслуга Циолковского перед авиацией*². Он первый исследовал эту наиболее распространенную в наши дни схему аэроплана. Но идея Циолковского о постройке пассажирского аэроплана не получила признания среди русских ученых.

Об этом периоде своей жизни ученый писал с горечью: «При своих опытах я сделал много-много новых выводов, но новые выводы встречаются учеными недоверчиво. Эти выводы могут подтвердиться повторением моих трудов каким-нибудь экспериментом, но когда же это будет? Тяжело работать в одиночку многие годы при неблагоприятных условиях и не видеть ниоткуда ни про света, ни поддержки»³.

Над созданием цельнометаллического дирижабля и хорошо обтекаемого моноплана ученый работал с 1885

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. I, стр. 70.

² Вероятно, большой опыт, полученный при разработке тонкостенного металлического дирижабля, был использован К. Э. Циолковским при эскизном проектировании и расчетах металлического, хорошо обтекаемого моноплана.

³ Н. А. Рынин. К. Э. Циолковский, его жизнь, работы и ракеты. Л., 1931, стр. 13, 14.

по 1898 г. Эти научно-технические изобретения натолкнули Циолковского на важнейшие открытия. В области дирижаблестроения он выдвинул ряд совершенно новых идей. В сущности говоря, он был зачинателем исследований в области металлических управляемых аэростатов. Его техническая интуиция значительно опередила уровень промышленного развития 90-х годов прошлого столетия.

Целесообразность своих предложений он обосновал подробными вычислениями и схемами. Реальная постройка цельнометаллического воздушного корабля, как всякая большая и новая техническая проблема, затрагивала широкий комплекс совершенно неразработанных в науке и технике задач. Сюда входили вопросы аэродинамики, устойчивости гофрированных оболочек, прочности, газонепроницаемости, герметической пайки металлических листов и т. д. Сейчас приходится изумляться, как далеко удалось продвинуть Циолковскому, кроме общей идеи, отдельные технические и научные вопросы.

Константин Эдуардович разработал метод так называемых гидростатических испытаний корпусов дирижаблей. Для определения прочности тонких оболочек, какими являются оболочки цельнометаллических дирижаблей, он рекомендовал наполнять их опытные модели водой. Этот метод применяется сейчас во всем мире для проверки прочности и устойчивости тонкостенных сосудов и оболочек. Ученый создал прибор, позволяющий графически определить форму сечения оболочки дирижабля при заданном сверхдавлении. Однако невероятно тяжелые условия жизни и работы, отсутствие учеников и последователей заставили его во многих случаях ограничиться в сущности только формулировкой проблем.

Вероятно, для многих читателей будет не вполне ясно, почему до настоящего времени ни в нашей стране, ни за рубежом нет серьезных попыток осуществить постройку цельнометаллического дирижабля. Причина этого лежит в печальном опыте эксплуатации крупных цельнометаллических дирижаблей¹ типа «Цепелин». Так, например, построенный в 1936 г. в Германии дирижабль LZ-129 («Гинденбург») очень большого подъема (200 тыс. м³) погиб 6 мая 1937 г. при посадке. От раз-

¹ Дирижабли, объем которых меньше 30 тыс. м³, менее экономичны, чем самолеты и вертолеты.

ных причин (метеоусловия, прочность) ранее разбились английский дирижабль R-101 объемом 140 тыс. м³ в 1930 г. и американские «Акрон» и «Мэкон» объемом 184 тыс. м³ в 1933 и 1935 гг. Опыт работы советской организации «Дирижаблестрой» не дал обнадеживающих результатов. Были построены небольшие модели дирижабля Циолковского, и затем работы были прекращены.

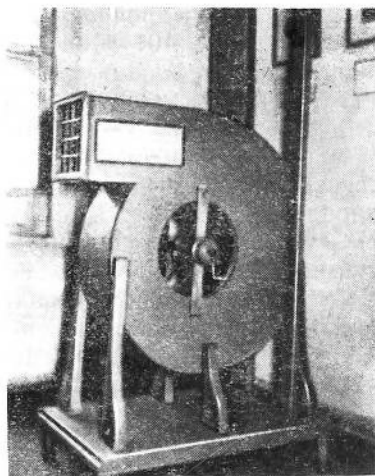
Уже на склоне лет, в 1934 г. Циолковский в статье «Знаменательные моменты моей жизни» так оценил свои исследования по дирижаблю: «1892 год. Возраст 35 лет. Первая книга о металлическом дирижабле из волнистого металла. Отрицательный отзыв в специальном журнале. Отзыв сделал председатель VII отдела бывшего императорского технического общества. Возможно, что этот отзыв и оправдается. *И сам я в новое дело не верю, пока не увижу его реализации*» (Калужская газета «Коммуна», 18.VIII. 1934 г., № 193).

Работы Константина Эдуардовича по теоретической и экспериментальной аэродинамике, несомненно, были обусловлены необходимостью дать более точные значения подъемной силы и лобового сопротивления и, следовательно, более строго обосновать аэродинамический расчет летных характеристик дирижабля и аэроплана.

Циолковский был выдающимся ученым-естествоиспытателем. Наблюдения и мечты, вычисления и размышления соединялись у него с постановкой опытов и моделированием.

В рождественские каникулы 1890/91 г. он пишет работу «К вопросу о летании посредством крыльев». Выдержка из этой рукописи, опубликованная при содействии знаменитого физика профессора Московского университета А. Г. Столетова в трудах Общества любителей естествознания в 1891 г., являлась *первой напечатанной работой Циолковского*. В ней он впервые в мировой научной литературе указал на значение продолговатости (по установившейся теперь терминологии — удлинения) крыла, дал математический анализ явления и подтвердил его экспериментально с помощью изобретенного им прибора.

Профессор Московского университета Н. Е. Жуковский высоко оценил результаты первых аэродинамических исследований Циолковского. В своем отзыве он писал: «Сочинение г. Циолковского производит приятное



*Рис. 3. Аэродинамическая труба К. Э. Циолковского
(«воздуходувка»)*

впечатление, так как автор, пользуясь малыми средствами анализа и дешевыми экспериментами, пришел по большей части к верным результатам. Оригинальная методика исследования, рассуждения и остроумные опыты автора не лишены интереса и, во всяком случае, характеризуют его как талантливого исследователя... Рассуждения автора применительно к летанию птиц и насекомых верны и вполне совпадают с современными на этот предмет»¹.

В дальнейшем в процессе борьбы за идеи своего аэроплана и дирижабля, желая получить более точные (нежели расчетные) коэффициенты сопротивления воздуха для тел различной формы, Циолковский в 1897 г. сооружает в Калуге первую в России аэродинамическую трубу с открытой рабочей частью («воздуходувку», по терминологии Циолковского, рис. 3) и в следующем году публикует ее описание и результаты первых опытов с подробным рассмотрением методики экспериментов.

¹ См.: К. Э. Циолковский. Сопротивление воздуха и скорый поезд. Калуга, 1927, стр. 69.

Эта замечательная работа по экспериментальной аэродинамике была напечатана в 1898 г. в журнале «Вестник опытной физики и элементарной математики». Циолковский, приобретя значительный опыт аэродинамического проектирования цельнометаллического дирижабля и аэроплана, с величайшей ясностью и убедительностью доказал *необходимость систематического эксперимента по определению сил воздействия воздушного потока на движущиеся в нем тела*. Он писал: «А как важно возможно точно формулировать законы сопротивления и трения! Какое громадное приложение они имеют к теории аэростата и аэроплана! Да и есть ли области техники и науки, в которых законы сопротивления упругой среды не имели бы значения. Так пожелаем же горячо установления этих законов и поспособствуем, насколько от нас зависит, производству необходимых для того опытов»¹.

В этой работе Циолковского на основании систематических экспериментов по определению сопротивления тел различной формы выяснена роль сил сопротивления трения для дирижаблей, даны интерполяционные формулы для подсчета сил трения, по своей структуре близкие к современным, показано влияние кормовой части тела на величину сил сопротивления давления. Стремясь подчеркнуть важность и полную достоверность полученных выводов, Константин Эдуардович писал: «Каждому желающему я готов охотно повторить любой из опытов, описанных в этой статье. Прибор (аэродинамическая труба), устроенный мною, так дешев, удобен и прост, так быстро решает неразрешимые теоретические вопросы, что должен считаться необходимою принадлежностью каждого университета или физического кабинета».

Замечательное предвидение Циолковского значения аэродинамических труб и его программа работ по экспериментальной аэродинамике получили полное подтверждение в дальнейшем развитии авиации и воздухоплавания. Важно отметить также, что мысли Циолковского и его эксперименты прямо откликаются на программу работ по изучению сопротивления воздуха, изложенную Д. И. Менделеевым в его труде «О сопротивлении жидкостей и воздухоплавании», изданном в 1881 г. Д. И. Мен-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., стр. I, стр. 120.

делеев отмечал несостоятельность теоретических попыток решить вопрос о сопротивлении среды без планомерных и обширных экспериментальных исследований: «Оттого с высот общих теоретических соображений в деле сопротивления *должно спуститься до опыта и измерений*, если желательно, чтобы было достигнуто совершенство в гипотезах и теориях предмета, а затем и в практических результатах, а самые опыты и измерения имеют свойство наводить на понимание сущности дела больше, чем попытки охватить сразу всю сущность предмета»¹.

«Недостаточность опытных данных о сопротивлении среды для полного решения задачи воздухоплавания, однако, столь очевидна, что я считал невозможным умолчать о неизбежной необходимости новых точных опытов, о их цели, о необходимых приемах и о средствах, для выполнения их нужных. Этим недостатком точных опытных данных о сопротивлении среды объясняется в одно и то же время причина слабого развития как общей теории сопротивления среды, так и практики воздухоплавания»².

Выдающиеся инженеры и ученые нашей страны — Можайский, Жуковский, Циолковский — в ряде своих статей и выполненных экспериментальных работ активно поддерживали эти глубокие и прогрессивные высказывания Менделеева, которые *были по существу боевой программой передовой русской науки*.

В 1899 г. Циолковский обратился в Академию наук с просьбой о выдаче ему средств для производства опытов по определению сил сопротивления тел, помещенных в искусственно создаваемый поток воздуха. При этом он указал на результаты своих предыдущих опытов, опубликованные в научных журналах. Академия наук поручила рассмотрение работ Циолковского академику М. А. Рыкачеву, который дал благоприятный отзыв: «Опыты эти заслуживают полного внимания академии как по идее, так и по разнообразию опытов. Несмотря на примитивные домашние средства, какими пользовался автор, он достиг определения скорости при различных грузах, приводивших в движение воздуходувку».

¹ Д. И. Менделеев. Соч., т. VII. Л.— М., Изд-во АН СССР, 1946, стр. 375.

² Там же, стр. 303.

...Автор определил зависимость сопротивления от скорости потока и от продолговатости формы. Весьма интересны опыты, производимые с целью определения влияния кормовой части. ...По всем этим причинам производство опытов в более широких размерах и более точными приборами было бы крайне желательно, и я позволю себе просить Отделение исполнить просьбу автора и оказать ему материальную поддержку из фонда, предназначенного на ученые потребности»¹.

После отзыва М. А. Рыкачева Физико-математическое отделение Академии наук решило выдать Циолковскому пособие в сумме 470 руб. на производство новых опытов. (Это пособие было первым и единственным в дореволюционное время, полученным Константином Эдуардовичем от официального правительственного учреждения.) Подробная программа опытов была представлена Циолковским в Академию наук в мае 1900 г.

На полученные деньги Циолковский соорудил новую воздуходувку с квадратным сечением рабочей части размером 71×71 см². «Сделаны были и измерительные приборы (аэродинамические весы) — и все это чуть не 6 раз переделывалось и перестраивалось, пока не получился воздушный поток, достаточно удовлетворительный». К концу 1900 г. начались опыты, а в декабре 1901 г. первая серия экспериментов по утвержденной академией программе была закончена.

В пояснениях, сделанных Циолковским к этой работе, мы можем прочесть: «Опытами по сопротивлению воздуха я занимаюсь уже лет 15 с лишком. ...Для своих последних опытов (1900—1901 гг.) я употребил большую лопастную воздуходувную машину, вроде веялки. Такой же вентилятор я употреблял и ранее (1897—1898 гг.), только значительно меньших размеров. Площадь поперечного сечения воздушного потока в настоящее время увеличена в 4 раза. ...Мне пришлось произвести несколько десятков тысяч записей при своих опытах».

Циолковский в своих экспериментах детально обследовал силы сопротивления для серии плоских пластинок, круглых и эллиптических цилиндров, моделей дирижаблей с различным удлинением и различной геометрической формой головки и кормовой части (рис. 4). Он определял подъемную силу и лобовое сопротивление для

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. I, стр. 254.

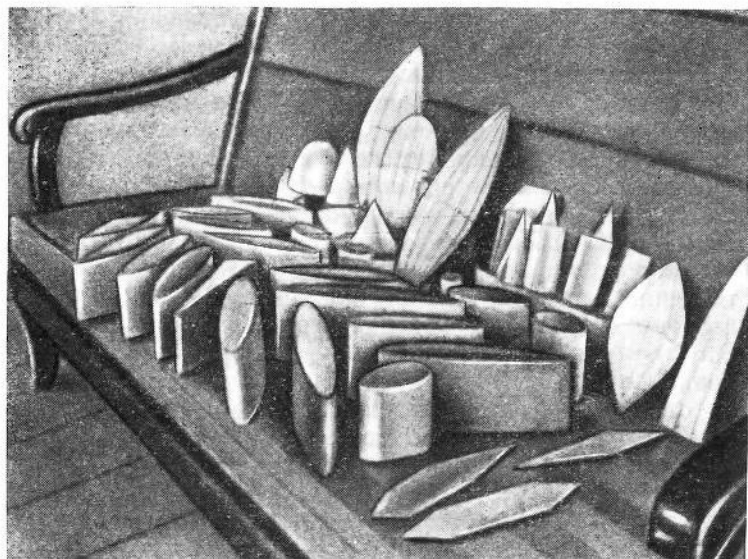


Рис. 4. Модели, обследованные К. Э. Циолковским в аэродинамической трубе в г. Калуге в 1897—1901 гг.

крыльев аэроплана. Специальному экспериментальному изучению была подвергнута модель дирижабля Шварца, имевшего цилиндрическую среднюю часть, конические нос и кормовую часть. В этих опытах, которые Циолковский проводил без техников и лаборантов, своими руками, были выявлены важнейшие закономерности в аэродинамике дозвуковых скоростей. Было доказано, что сила сопротивления плохо обтекаемых тел растет пропорционально квадрату скорости и некоторой характерной для каждого тела площади (например, площади плоской пластины, площади поперечного сечения модели дирижабля и т. п.). Несмотря на то, что в опытах Циолковского скорость воздушного потока изменялась в очень малом диапазоне, ему удалось показать, что сила сопротивления трения изменяется в зависимости от произведения скорости воздушного потока и характерного линейного размера тела в некоторой степени, причем показатели степени у скорости и длины — одинаковы. Так как Циолковский производил свои опыты, как он писал

в Академию наук, примерно в одинаковых условиях (давление и температура воздуха), то сделанные им выводы впервые установили зависимость аэродинамического сопротивления трения от числа Рейнольдса. В современной аэродинамике представление коэффициента сопротивления трения в функции числа Рейнольдса стало общепринятым. В ряде своих работ Циолковский подчеркивал «аналогию между сопротивлением воды и воздуха». В наши дни для небольших дозвуковых скоростей воздушного потока этот факт установлен совершенно строго.

С горечью приходится отмечать, что большинство результатов Циолковского по экспериментальной аэродинамике не были опубликованы в дореволюционной России, поэтому многие его выводы о законах сопротивления воздуха были повторены в XX в. другими исследователями (главным образом в аэродинамических лабораториях Эйфеля во Франции и Прандтля в Германии).

После окончания большой серии экспериментов на новой воздуходувке (где Циолковский для улучшения равномерности поля скоростей воздушного потока по сечению струи впервые применил решетку из тонких горизонтальных и вертикальных перегородок) Константин Эдуардович подготовил в 1901 г. отчет о своих исследованиях под названием «Отчет К. Э. Циолковского Российской академии наук об опытах по сопротивлению воздуха». Отчет был направлен на рецензию академику М. А. Рыкачеву и получил отрицательный отзыв, а поэтому не мог быть опубликован в трудах академии. Позднее (в 1902 г.) часть отчета была опубликована в журнале «Научное обозрение», № 5, 21 марта 1908 г. Циолковский отправил свою рукопись об опытах по сопротивлению воздуха профессору Н. Е. Жуковскому. Жуковский (по рассеянности) затерял рукопись и не мог дать какого-либо ответа Циолковскому, несмотря на неоднократные его письма. Рукопись была обнаружена лишь в 1935 г. и напечатана в первом томе Собрания сочинений Циолковского в 1951 г. (стр. 121—207). После горестных «событий» 1908 г. Циолковский начал писать свои работы карандашом, подкладывая копировальную бумагу под 2—3—4 экземпляра, и имел у себя всегда 2—3 образца оригинальной рукописи.

Основные работы по цельнометаллическому дирижаблю были выполнены Циолковским в г. Боровске.

В 1892 г. Константин Эдуардович переехал в г. Калугу, где он провел грандиозную (для одного человека) программу аэродинамических исследований и экспериментов.

Странной и малопонятной казалась жизнь К. Э. Циолковского обывателям русских провинциальных дореволюционных городов Боровска и Калуги. Его изобретения, эксперименты, научное творчество не встречали поддержки и сочувствия среди «благонамеренных и аккуратных» городских обывателей.

В г. Боровске летом 1886 г. Константин Эдуардович, увлеченный идеями воздухоплавания, построил большую летающую птицу — ястреба с размахом крыльев около 70 см. Дети и взрослые толпой шли глядеть, как Циолковский запускал на улице своего ястреба. Ночью Циолковский заставлял ястреба летать с фонарем. Обыватели видели движущуюся звезду и спорили: «Что это: звезда, или чудак учитель пускает свою птицу с огнем?».

Погруженный в свои размышления, чему, несомненно, способствовала и глухота, ученый часто не замечал на улице коллег по работе в школе, знакомых, начальства. Был рассеян и нередко забывал различные вещи и книги. Он был одержим научным поиском.

«Однажды я поздно возвращался от знакомого. Это было накануне солнечного затмения в 1887 году. На улице, по которой я шел, стоял колодец. Около него что-то блестело. Подхожу и вижу, в первый раз, ярко светящиеся большие гнилушки! Набрал их полный подол и пошел домой. Раздробил гнилушки на кусочки и забросал их по комнате. В темноте было впечатление звездного неба... утром ищу зонтик, чтобы выйти на улицу, а его нет. Потом вспомнил, что зонтик оставил у колодца. За него получил гнилушки и звездное небо»¹, — с грустной улыбкой замечал Константин Эдуардович.

Он был полон идей. Весьма деятелен и энергичен, хотя внешне казался спокойным и уравновешенным. Среднего роста с длинными черными волосами и черными, немного печальными глазами, он был неловок и застенчив в обществе. У него было мало друзей. В Боровске он близко сошелся с коллегой по школе Е. С. Еремеевым; затем в Калуге ему много помогали В. И. Ассонов,

¹ К. Э. Циолковский. *Моя жизнь и работа*, стр. 34.

П. П. Каннинг и позднее С. В. Щербаков. При защите своих идей он был решителен и настойчив — мало считаясь с пересудами коллег и обывателей.

...Зима. Изумленные боровские жители видят, как на коньках по замерзшей реке мчится учитель уездного училища Циолковский. Он воспользовался сильным ветром и, распустив зонт, катится со скоростью курьерского поезда, влекомый силой ветра. «Всегда я что-нибудь затевал. Вздумал я сделать сани с колесом так, чтобы все сидели и качали рычаги. Сани должны были мчаться по льду. Потом я заменил это сооружение особым парусным креслом. По реке ездили крестьяне. Лошади пугались мчащегося паруса, проезжие ругались. Но, по глухоте, я долго об этом не догадывался. Потом уже, завидя лошадей, поспешно убирал парус»¹.

Почти все сослуживцы по школе и представители местной интеллигенции считали Циолковского неисправимым фантазером и утопистом. Более злые называли его дилетантом и кустарем. Идеи Циолковского казались обывателям невероятными. «Он думает, что железный шар поднимется в воздух и полетит. Вот чудак!».

Ученый всегда был занят, всегда трудился. Если не читал и не писал, то работал на токарном станке, паял, строгал. Мастерил для своих учеников много действующих моделей. «...Сделал огромный воздушный шар из бумаги. Спирта достать не смог. Поэтому внизу шара приспособил сетку из тонкой проволоки, на которую клал несколько горящих лучинок. Шар, имевший иногда причудливую форму, поднимался вверх, насколько позволяла привязанная к нему нитка. Однажды нитка перегорела и шар мой умчался в город, роняя искры и горящую лучину. Попал на крышу сапожнику. Сапожник заарестовал шар»².

Обыватели смотрели на все опыты Циолковского как на курьезы и баловство; многие, не размышляя, считали его чудачком и «немножко тронутым». Нужны были изумительная энергия и настойчивость, величайшая вера в пути прогресса техники, чтобы в таком окружении и в тяжелых, почти нищенских условиях ежедневно работать, изобретать, вычислять, двигаясь все вперед.

¹ Там же, стр. 32.

² Там же, стр. 33.

Глава третья

Работы по теории реактивного движения

Практические дела делаются только исходя из общих начал, только при знакомстве с абстрактами, до них относящимися.

Д. И. Менделеев

Среди великих технических и научных достижений XX столетия одно из первых мест, несомненно, принадлежит ракетам и теории реактивного движения. Вторая мировая война обусловила необычайно быстрое совершенствование конструкции реактивных летательных аппаратов. На полях сражений вновь появились пороховые ракеты, но уже на более калорийном бездымном пероксилиновом порохе («Катюши»). Были созданы самолеты с воздушно-реактивными двигателями, беспилотные самолеты с пульсирующими воздушно-реактивными двигателями и баллистические ракеты с дальностью полета до 270—280 км (рис. 5).

Ракетно-космическая техника становится сейчас очень важной и быстро растущей отраслью промышленности. Развитие теории полета реактивных аппаратов — одна из насущных проблем современного научно-технического развития.

К. Э. Циолковский много сделал для познания основ теории движения ракет. Он был первым в истории науки, кто сформулировал и исследовал проблему изучения прямолинейных движений ракет, исходя из законов теоретической механики.

Как мы указывали, принцип сообщения движения при помощи сил реакции отбрасываемых частиц был осознан Циолковским еще в 1883 г., однако создание им математически строгой теории реактивного движения относится к концу XIX столетия.

Циолковский писал: «Долго на ракету я смотрел, как и все: с точки зрения увеселений и маленьких примене-

ний. Не помню хорошо, как мне пришло в голову сделать вычисления, относящиеся к ракете. Мне кажется, первые семена — мысли — были заронены известным фантазером Жюль Верном; он пробудил работу моего мозга в известном направлении. Явились желания, за желаниями возникла деятельность ума.

...Старый листок с окончательными формулами, относящимися к реактивному прибору, помечен датой 25 августа 1898 года... Никогда я не претендовал на полное решение вопроса. Сначала неизбежно идут: мысль, фантазия, сказка. За ними шествует научный расчет. И уже в конце концов исполнение венчает мысль. Мои работы о космических путешествиях относятся к средней фазе творчества. Более чем кто-нибудь я понимаю бездну, разделяющую идею от ее осуществления, так как в течение моей жизни я не только мыслил и вычислял, но и исполнял, работаю также руками. Однако нельзя не быть идее: исполнению предшествует мысль, точному расчету — фантазия»¹.

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 179 и 180.

1 — отсек приборов, стабилизации и управления полетом ракеты; 2 — бак для горючего; 3 — бак для окислителя; 4 — стабилизатор с воздушным рулем на задней кромке; 5 — сопло реактивного двигателя

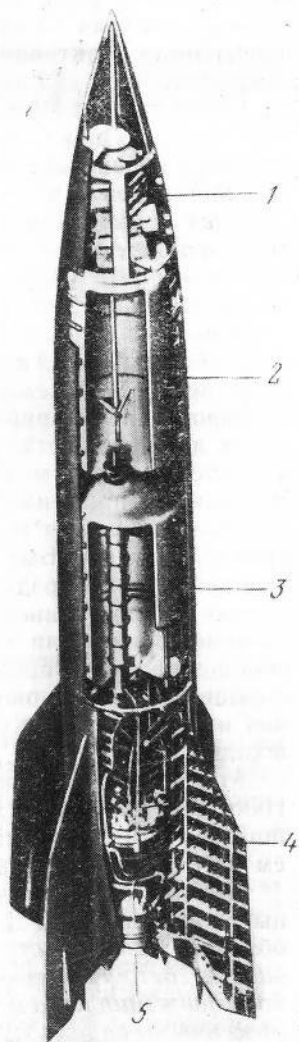


Рис. 5. Ракета ФАУ-2

В 1903 г. в журнале «Научное обозрение» появилась первая статья Константина Эдуардовича по ракетной технике, которая называлась «Исследование мировых пространств реактивными приборами». В этом труде на основании простейших законов теоретической механики (закона сохранения количества движения и закона независимого действия сил) была дана теория полета ракеты и обоснована возможность применения реактивных аппаратов для межпланетных сообщений¹.

Идея применения ракеты для решения научных проблем, использование реактивных двигателей для создания движения грандиозных межпланетных кораблей целиком принадлежат Циолковскому. Он родоначальник современных жидкостных ракет дальнего действия, один из создателей новой главы теоретической механики.

Классическая механика, изучающая законы движения и равновесия материальных тел, базируется на трех законах движения, отчетливо и строго сформулированных английским ученым Исааком Ньютоном еще в 1687 г. Эти законы применялись многими исследователями для изучения движения тел, масса которых не изменялась во время движения. Были рассмотрены очень важные случаи движения и создана фундаментальная наука — механика тел постоянной массы. Аксиомы механики тел постоянной массы или законы движения Ньютона явились обобщением всего предыдущего развития механики. В настоящее время основные законы механического движения излагаются во всех учебниках физики для средней школы.

Мы здесь кратко остановимся на законах движения Ньютона, так как последующий шаг в науке, позволивший изучать движения ракет, был дальнейшим развитием методов классической механики.

Первый закон Ньютона, в частных случаях известный еще Галилею и Декарту, формулируется следующим образом: всякое материальное тело продолжает пребывать в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

¹ Создание общей теории движения тел, масса которых изменяется в процессе движения, принадлежит профессору Петербургского политехнического института И. В. Мещерскому (1859—1935).

1903

годъ X-й.

НАУЧНОЕ ОБОЗРѢНІЕ

ЕЖЕМѢСЯЧНЫЙ

НАУЧНО-ФИЛОСОФСКИЙ и ЛИТЕРАТУРНЫЙ ЖУРНАЛЪ.

№ 5.

М А Й.



Журнал «Научное обозрение»

Этот закон часто называется законом инерции; он выражает одно из существенных свойств материальных тел. Суть закона инерции состоит в том, что механическое движение тела не может возникнуть из ничего, а возникает только под влиянием взаимодействия с другими телами. Изолированное от влияния других тел всякое материальное тело или находится в покое, или движется прямолинейно и равномерно, сохраняя свое движение. Взаимодействия тел друг с другом, передача движения от одного тела к другому суть причины изменения покоя или равномерного прямолинейного движения. Движение тела не может исчезнуть и превратиться в ничто, а может быть передано другому материальному телу как механическое движение или превратиться в другие формы движения (например, в тепло). Если m — масса тела, а v — его скорость, то произведение mv

называют количеством движения тела. Для изолированного тела его количество движения остается постоянным во все время движения тела. Изменение количества движения может произойти только под влиянием других тел или, как говорят в механике, под действием сил. Стремление тела сохранить свое количество движения проявляется на опыте в том, что при встрече движущегося тела с препятствием оно производит тем большее давление, чем больше его скорость и масса.

Второй закон Ньютона устанавливает меру механического взаимодействия между телами: *изменение количества движения тела пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.*

Если должным образом выбрать единицы массы, скорости и времени, то второй закон (при $m = \text{const}$) можно сформулировать так: *масса тела, умноженная на его ускорение, равна движущей силе; направление ускорения совпадает с направлением приложенной силы.*

Таким образом, величину механического взаимодействия между телами мы можем измерять по изменению количества движения¹, а для тел постоянной массы — по ускорению движущегося тела. Из второго закона Ньютона следует, что одна и та же сила сообщает телам с разными массами (разными весами) разные ускорения. Разные силы сообщают какому-либо выбранному телу ускорения, пропорциональные силам. В современной теоретической механике второй закон Ньютона является той основой, на которой базируются все математические расчеты. Однако следует указать, что второй закон Ньютона справедлив только для тел, масса которых сохраняется постоянной во все время движения. Следовательно, второй закон Ньютона можно, например, применять для изучения движения артиллерийского снаряда, но нельзя использовать для изучения реактивного снаряда. Для тел постоянной массы законы Ньютона и выводы из них подтверждаются всей общественно-производственной практикой человечества, за исключением

¹ Если масса тела изменяется с течением времени, то сила взаимодействия будет измеряться изменением количества движения только при условии, что абсолютная скорость отбрасываемых частей равна нулю.



К. Э. Циолковский в 1903 г.

специальных областей техники, охватываемых механикой теории относительности.

*Третий закон Ньютона имеет весьма большое значение в теории движения ракет; действию всегда есть равное и противоположно направленное противодействие, иначе говоря, взаимные действия тел друг на друга между собой равны и противоположны по направлению*¹.

В самом деле, если какое-нибудь тело давит на что-либо другое или тянет его, то оно само этим последним давится или тянется. Если кто-либо нажимает пальцем на камень, то и палец его также нажимается камнем.

¹ В формулировках первого-третьего законов Ньютона имеется в виду тело достаточно малых размеров, которое в теоретической механике называется материальной точкой.

Если какое-либо тело, ударившись о другое тело, изменяет его количество движения на сколько-нибудь, то и оно претерпит от второго тела в своем собственном количестве движения то же самое изменение, но противоположно направленное, ибо давления этих тел друг на друга постоянно равны. Следует отметить, что *действие и противодействие приложены к разным телам и поэтому не представляют уравновешенной системы сил*. По этой причине как действие, так и противодействие могут вызвать движение тел, к которым они приложены. Возьмем, например, камень, находящийся под действием силы притяжения Земли; сила противодействия будет в данном случае приложена к Земле. Действие вызывает движение камня, противодействие — движение Земли. Так как масса камня ничтожно мала по сравнению с массой Земли, то смещения Земли не могут быть обнаружены современными приборами; перемещения камня видны простым невооруженным глазом. Противодействие на латинском языке — реакция (*reactio*), поэтому силы, возникающие в результате взаимодействия соприкасающихся тел, часто называются силами реакции, или реактивными силами. Например, весло действует на воду, сообщая ей движение, а частицы воды дают реактивные силы давления на весло и тем способствуют движению лодки. Хотя законы Ньютона и некоторые выводы из них, необходимые для создания теории реактивного движения, были хорошо известны, потребовалось более 200 лет, чтобы открыть основные положения этой новой науки.

Из законов Ньютона или аксиом механического движения можно сделать целый ряд заключений о закономерностях наблюдаемых движений. Для понимания основ теории движения тел переменной массы и теории полета ракет весьма существенное значение имеет *закон сохранения количества движения для замкнутой механической системы*. Поясним сущность этого закона.

Представим себе систему частиц или тел, которые находятся в движении только под действием сил взаимодействия между ними. Такую механическую систему называют замкнутой. Наиболее наглядным примером замкнутой механической системы является солнечная система, состоящая из Солнца и планет, так как движение тел в этой системе обусловлено только силами их взаимного притяжения, или внутренними силами. Внешние силы,

обусловленные воздействием на солнечную систему звезд и звездных скоплений, пренебрежимо малы из-за громадных расстояний между нашей солнечной системой и звездами. Движение любого тела в замкнутой механической системе зависит от движения и положения остальных тел системы. Можно строго математически доказать, что в замкнутой механической системе количество движения остается постоянным во время движения, равным начальному количеству движения этой системы. Если в начальный момент времени все частицы замкнутой механической системы были неподвижными, то начальное количество движения этой системы равно нулю и под действием внутренних сил не может измениться и в дальнейшем. Поэтому хотя внутренние силы и могут вызвать движение отдельных частей системы, но эти движения должны происходить так, чтобы результирующий вектор количества движения системы оставался равным нулю.

Рассмотрим, например, два шарика одинакового веса (массы), расположенных на гладком полированном столе или находящихся в космическом пространстве, где нет сил тяготения и сил сопротивления воздуха. Поместим между шариками пружину, сожмем ее, накинем на шарики петлю и положим их на стол (рис. 6). Действие упругой силы пружины на шарики будет силой внутренней, и если в начальный момент скорости шариков равны нулю, то количество движения этой системы будет равно нулю и в последующие моменты времени. Разрежем или пережжем петлю, стягивающую два шарика; тогда пружина толкнет их в прямо противоположных направлениях. В соответствии с законом сохранения количества движения, шарики будут двигаться так, что их суммарное количество движения по-прежнему будет равно нулю. Если количество движения первого шарика равно m_1v_1 , где m_1 —масса первого шарика, а v_1 —его скорость, и если количество движения второго шарика равно m_2v_2 , где m_2 —масса второго шарика, а v_2 —его скорость, то на основании закона сохранения количества движения мы получим уравнение¹

$$m_1v_1 + m_2v_2 = 0.$$

¹ Так как в начальный момент скорости шариков равны нулю, то начальное количество движения также равно нулю.

Из этого уравнения следует

$$v_1 = -\frac{m_2}{m_1} v_2.$$

Если массы шариков равны между собой ($m_1 = m_2$), то скорости шариков также будут равны по величине, но противоположны по направлению (на это указывает знак «минус»). Если массы шариков не равны, то шарик, обладающий большей массой, будет иметь меньшую скорость. Аналогичное явление наблюдается, если человек

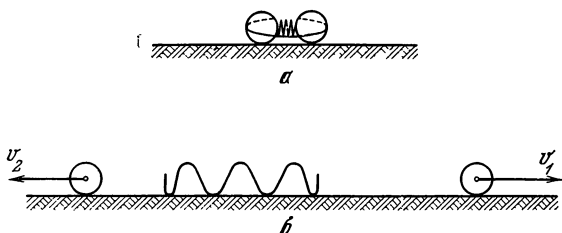


Рис. 6. Два шарика с пружиной

а — шарики неподвижны, пружина сжата; б — пружина разжалась, шарики получили скорости в соответствии с законом сохранения количества движения

прыгает с неподвижной лодки. Всем известно, что если прыгать, отталкиваясь от лодки (т. е. приобретая при толчке скорость в горизонтальном направлении), то лодка начнет двигаться в противоположном направлении. Если масса (вес) лодки больше массы человека в 4 раза, а человек при прыжке получил горизонтальную скорость, равную 2 м/сек, то v лодки $= -\frac{1}{4}v$ человека $= \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$ м/сек.

Знак «минус» показывает, что лодка будет двигаться в противоположном направлении. Если человек прыгает с той же горизонтально направленной скоростью с большого парохода, масса которого в 40 тыс. раз больше массы человека, то пароход получит скорость

$$v_{\text{парохода}} = -\frac{1}{40\,000}; v_{\text{человека}} = \frac{1}{20} \text{ мм/сек.}$$

Из этих простых расчетов вытекают очень важные заключения.

1. Если от какого-либо тела (лодки, парохода) отбрасывается (отталкивается) второе тело, то количество движения на этом теле равно по величине приобретаемому количеству движения на втором теле.

2. Силу толчка, получаемую лодкой или пароходом от ног прыгающего человека, можно рассматривать как реактивную силу, и она, очевидно, будет тем больше, чем больше масса (вес) человека и чем большую скорость сообщил он себе при толчке. По закону действия и противодействия в момент отделения человека от лодки его давление на лодку будет равно давлению лодки на подошвы ног человека.

3. Если с лодки или парохода будет последовательно каждую секунду прыгать с некоторой относительной скоростью несколько человек, то скорость парохода будет постепенно увеличиваться, а его масса уменьшаться. Такой пароход с отделяющимися (отталкивающимися) от него людьми подобен ракете.

На рис. 7 показана в разрезе простейшая ракета с пороховым реактивным двигателем. Такая ракета представляет собой тело вращения с конической головной частью, в которой располагается полезный груз (взрывчатое вещество, приборы, почта и т. п.). Большую часть объема корпуса ракеты занимает пороховой реактивный двигатель (или, как говорят, двигатель на твердом топливе), состоящий из камеры, заполненной пороховыми шашками, и специально профилированного сопла (часть сопла Лавалья). При горении пороховых шашек образующиеся горячие газы устремляются с большой скоростью через сопло Лавалья

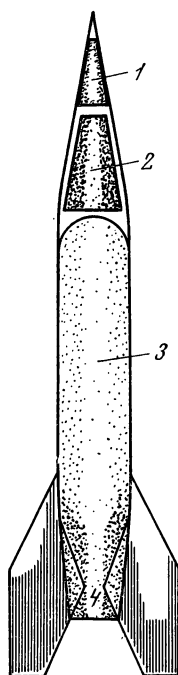


Рис 7. Схема ракеты с двигателем на твердом топливе

1 — полезный груз; 2 — отсек приборов управления; 3 — камера сгорания, заполненная твердым топливом; 4 — сопло реактивного двигателя

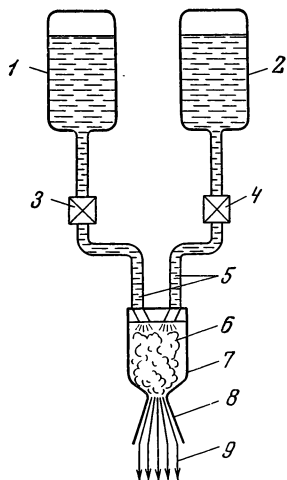


Рис. 8. Простейшая схема жидкостного реактивного двигателя

- 1 — бак окислителя;
- 2 — бак горючего;
- 3 — насос для подачи окислителя;
- 4 — насос для подачи горючего;
- 5 — форсунки;
- 6 — камера сгорания;
- 7 — корпус камеры сгорания;
- 8 — сопло;
- 9 — струя отбрасываемых частиц (продуктов горения)

и создаюг реактивную силу, которая будет тем больше, чем больше скорость вытекающих из сопла частиц и чем больше (по весу) этих частиц истекает в одну секунду.

Для наглядности представлений о возникающей при истечении газов реактивной силе можно рассматривать частицы нагретых газов как маленькие, выпрыгивающие из сопла живые существа, которые отталкиваются от корпуса ракеты (как человек — от лодки) и тем самым создают ее движение.

Простейший реактивный двигатель на жидком топливе представляет собой камеру, похожую по форме на горшок, в котором жители сельских местностей хранят молоко. Через форсунки, расположенные на днище этого горшка, происходит подача жидкого горючего и окислителя в камеру сгорания. Подача компонентов топлива рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить полное сгорание. В камере сгорания (рис. 8) происходит воспламенение топлива, и продукты горения — горючие газы — с большой скоростью выбрасываются через специально профилированное сопло. Окислитель и горючее помещаются в специальных баках, располагающихся на

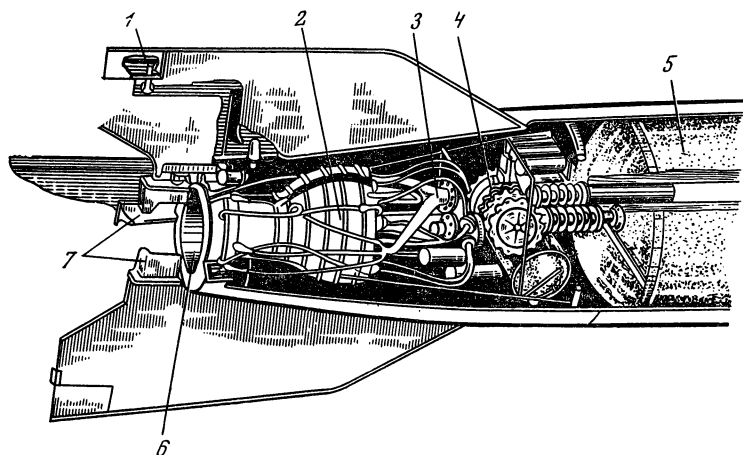


Рис. 9. Жидкостный реактивный двигатель, смонтированный в хвостовой части ракеты

1 — воздушный руль; 2 — камера сгорания; 3 — трубопровод для подачи горючего (спирта); 4 — турбонасосный агрегат; 5 — бак для окислителя; 6 — выходное сечение сопла; 7 — газовые рули

ракете или самолете. Для подачи окислителя и горючего в камеру сгорания применяют турбонасосы или выдавливают их из баков сжатым нейтральным газом (например, азотом). На рис. 9 приведена фотография реактивного двигателя ракеты (конструкция 1944 г.).

Струя горячих газов, выбрасываемая из сопла реактивного двигателя, создает реактивную силу, действующую на ракету в направлении, противоположном скорости частиц струи. Величина реактивной силы равна произведению массы отбрасываемых в одну секунду газов на их относительную скорость. Если скорость измерять в метрах в секунду, а секунднй расход массы через вес частиц в килограммах, разделенный на ускорение силы тяжести $g=9,8$ м/сек², то реактивная сила будет получаться в килограммах. Возьмем, например, реактивный двигатель, в котором каждую секунду сжигает 4,9 кг топлива. Пусть относительная скорость отбрасываемых частиц (продуктов сгорания) равна 2000 м/сек; тогда реак-

тивная сила, которую мы обозначим через Φ , будет равна

$$\Phi = \frac{4,9}{9,8} \cdot 2000 = 1000 \text{ кг.}$$

У немецкой ракеты ФАУ-2 весовой секундный расход составляет в среднем 127,4 кг. Скорость истечения продуктов сгорания из сопла двигателя — 2000 м/сек. Реактивная сила в этом случае

$$\Phi = \frac{127,4}{9,8} \cdot 2000 = 26\,000 \text{ кг.}$$

Прошло только 30 лет со дня первых пусков ракет с максимальной дальностью полета 270—280 км и максимальной скоростью в конце активного участка, не превосходящей 1700 м/сек, а в развитии баллистических ракет (и вообще реактивных летательных аппаратов) произошли большие сдвиги.

Замечательные успехи, наметившие новые пути развития ракетной техники и реактивной авиации, принадлежат Советскому Союзу. Достаточно указать, что 27 августа 1957 г. в нашей стране был осуществлен запуск многоступенчатой баллистической ракеты. В СССР 4 октября 1957 г. был запущен первый в мире искусственный спутник Земли, а следовательно, была получена первая космическая скорость (7912 м/сек). В течение 1959 г. осуществлено три успешных запуска советских космических станций в сторону Луны и впервые достигнута вторая космическая скорость ($\sim 11,2$ км/сек). Созданные в СССР ракета-носитель «Восток» и космический корабль «Восток» позволили осуществить 12 апреля 1961 г. успешный полет вокруг земного шара летчика-космонавта Гагарина Юрия Алексеевича. К началу 1976 г. пилотируемые космические полеты совершили более 30 летчиков-космонавтов СССР.

Крупнейшим достижением ракетной техники США является создание ракеты-носителя «Сатурн-V», вес которой достигает 3000 т. При помощи этой ракеты были произведены первые высадки американских космонавтов на поверхность Луны. Последние ступени ракеты (системы «Сатурн-V»-«Аполлон») получили также вторую космическую скорость.

Первая ступень ракеты «Сатурн-V» имела пять реактивных двигателей F-2, каждый из которых развивал тягу в 690 т. Если тяга двигателя первых баллистических

ракет составляла 25 т, то суммарная тяга двигателей первой ступени ракеты «Сатурн-V» достигала 3450 т при секундном расходе топлива, примерно равном 13,2 т.

Примеры показывают, что *реактивная сила тем больше, чем больше секундный расход топлива и чем больше относительная скорость отбрасываемых частиц.*

В некоторых случаях для сжигания горючего в камере реактивного двигателя приходится забирать воздух из атмосферы. В этих случаях в процессе движения реактивного аппарата происходит присоединение частиц воздуха и выбрасывание нагретых газов. Мы получаем так называемый воздушно-реактивный двигатель. Простейшим примером воздушно-реактивного двигателя является открытая с обоих концов и имеющая переменное поперечное сечение обыкновенная трубка, внутри которой помещен вентилятор. Если заставить вентилятор работать, то он будет засасывать воздух с одного конца трубки и выбрасывать его через другой. Если в трубку, в пространство за вентилятором, впрыснуть бензин и поджечь его, то скорость выходящих из трубки горячих газов будет значительно больше, чем входящих, и трубка получит тягу в направлении, противоположном струе выбрасываемых из нее газов. Можно соответствующим подбором сечений (радиусов) по длине трубки достигнуть весьма больших скоростей истечения выбрасываемых газов. Чтобы не возить с собой двигатель для вращения вентилятора, можно заставить струю текущих по трубке газов вращать его с нужным числом оборотов. Некоторые трудности будут возникать только при пуске такого двигателя. Идея использования воздушно-реактивного двигателя для современных типов самолетов была с большой тщательностью самостоятельно разработана К. Э. Циолковским. Он дал первые в мире расчеты летных характеристик самолета с воздушно-реактивным двигателем и турбокомпрессорным винтовым двигателем.

На рис. 10 дана схема прямоточного воздушно-реактивного двигателя, у которого движение частиц воздуха по оси трубы создается за счет начальной скорости, полученной ракетой от какого-либо другого двигателя, а дальнейшее движение поддерживается за счет реактивной силы, обусловленной увеличенной скоростью отбрасываемых частиц по сравнению со скоростью входящих частиц.

Энергия воздушно-реактивного двигателя получается за счет сжигания горючего, так же как и в простой ракете. Таким образом, *источником движения любого реактивного аппарата является запасенная в этом аппарате энергия, которую можно преобразовать в механическое движение выбрасываемых из аппарата с большой скоростью частиц вещества.* Как только начнется выбрасы-

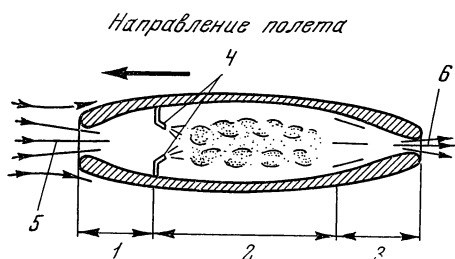


Рис. 10. Схема прямого воздушно-реактивного двигателя

1 — диффузор; 2 — камера сгорания; 3 — сопло; 4 — форсунки; 5 — вход воздуха; 6 — продукты сгорания, вытекающие с большой скоростью

вание таких частиц из аппарата, он может получить движение в направлении, противоположном струе извергающихся частиц.

Направленная соответствующим образом струя выбрасываемых частиц — основное в конструкциях всех реактивных аппаратов. Методы получения мощных потоков извергающихся частиц очень разнообразны. Проблема получения потоков отбрасываемых частиц простейшим и наиболее экономичным способом, разработка методов регулирования таких потоков — благодарная задача изобретателей и конструкторов.

Рассмотрим движение простейшей ракеты; легко понять, что ее вес изменяется, так как часть массы ракеты с течением времени сгорает и отбрасывается.

Ракета представляет собой тело переменной массы. Теория движения тел переменной массы создана в конце XIX в. в России И. В. Мещерским и К. Э. Циолковским.

Замечательные работы Мещерского и Циолковского прекрасно дополняют друг друга. Изучение прямолинейных движений ракет, проведенное Циолковским, суще-

ственно обогатило теорию движения тел переменной массы благодаря постановке совершенно новых проблем. Следует указать, что основные формулы, относящиеся к прямолинейным движениям ракет (в свободном от действия сил пространстве и однородном поле силы тяжести), были получены Циолковским до 10 мая 1897 г., хотя публикацию первой части работы удалось осуществить лишь в 1903 г. под названием «Исследование мировых пространств реактивными приборами».

Основные результаты диссертации И. В. Мещерского были получены не позднее 27 марта 1897 г. В этот день диссертация Ивана Всеволодовича была представлена деканом физико-математического факультета Петербургского университета в типографию. Работа вышла в свет в ноябре 1897 г. Детальное изучение опубликованных и архивных материалов позволяет прийти к выводу о том, что открытия Мещерского и Циолковского по ракетодинамике *были сделаны независимо*¹.

Изучение движения реактивных аппаратов представляет большие трудности, так как во время движения вес любого реактивного аппарата значительно изменяется. Уже сейчас существуют ракеты, вес которых при работе двигателя уменьшается в 8—10 раз. Изменение веса ракеты в процессе движения не позволяет использовать непосредственно те формулы и выводы, которые получены в классической механике, являющейся теоретической базой расчетов движения тел, вес которых постоянен во время движения.

Известно также, что в тех задачах техники, где приходилось иметь дело с движением тел переменного веса (например, самолеты с большими запасами горючего), предполагалось, что траекторию тела можно разделить на участки и считать на каждом отдельном участке вес движущегося тела постоянным. Таким приемом трудную задачу о движении тела переменной массы заменяли более простой и уже изученной задачей о движении тела постоянной массы. Изучение движения ракет как тел переменного веса было поставлено на твердую почву К. Э. Циолковским. Мы называем теперь теорию полета ракет ракетодинамикой.

¹ См.: А. А. Космодемьянский. Первые работы К. Э. Циолковского и И. В. Мещерского по динамике ракет.— Вопросы истории естествознания и техники, вып 2 (43). М., «Наука», 1973.

Циолковский является основоположником современной ракетодинамики. Опубликованные труды по ракетодинамике позволяют установить последовательное развитие его идей в этой новой области человеческого знания.

Каковы же основные законы, управляющие движением тел переменной массы? Как рассчитывать скорость полета реактивного аппарата? Как найти высоту полета ракеты, выпущенной вертикально? Как выбраться на реактивном приборе за пределы атмосферы — пробить «панцирь» атмосферы? Как выбраться за пределы притяжения Земли, пробить «панцирь» тяготения? Вот некоторые из вопросов, рассмотренных и решенных Циолковским.

С нашей точки зрения, самой драгоценной идеей Циолковского в теории ракет является приобщение к классической механике Ньютона нового раздела — механики тел переменной массы. Сделать подвластной человеческому разуму новую большую группу явлений, объяснить то, что видели многие, но не понимали, дать человечеству мощное орудие технических преобразований — вот те задачи, которые ставил перед собой гениальный Циолковский. Весь талант исследователя, вся оригинальность, творческая самобытность и необычайный взлет фантазии с особой силой и продуктивностью выявились в его работах по ракетодинамике. Он на десятилетия вперед предсказал пути развития реактивных аппаратов, рассмотрел те изменения, которым должна была подвергнуться обыкновенная фейерверочная ракета, чтобы стать мощным орудием технического прогресса в новой области человеческого знания.

В своей работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами» (1911) Циолковский высказал глубокую мысль о простейших применениях ракет, известных людям достаточно давно. «Такие жалкие реактивные явления мы обыкновенно и наблюдаем на Земле. Вот почему они никого не могли поощрить к мечтам и исследованиям. *Только разум и наука могли указать на преобразование этих явлений в грандиозные, почти непостижимые чувства*»¹.

¹ К. Э. Циолковский. Труды по ракетной технике. М., Оборонгиз, 1947, стр. 60.



Рис. 11. Первый вариант жидкостной ракеты К. Э. Циолковского

При полете ракеты на сравнительно небольших высотах на нее действуют три основные силы: силы тяжести (сила ньютоновского тяготения), аэродинамическая, обусловленная наличием атмосферы (обычно эту силу разлагают на две: подъемную и силу лобового сопротивления) и реактивная, вызванная процессом отбрасывания частиц из сопла реактивного двигателя. Если учитывать все указанные силы, то задача изучения движения ракеты получается достаточно сложной. Естественно поэтому начать теорию полета ракеты с простейших случаев, когда некоторыми из сил можно пренебречь. Циолковский в своей работе (1903) прежде всего исследовал, какие возможности заключает в себе реактивный принцип создания механического движения, не учитывая действия аэродинамической силы и силы тяжести. Такой случай движения ракеты может иметь место при межзвездных перелетах, когда силами притяжения планет солнечной системы и звезд можно пренебречь (ракета находится достаточно далеко от солнечной системы и от звезд — в «свободном пространстве», по терминологии Циолковского). Эту задачу¹ называют сейчас первой задачей Циолковского. Движение ракеты в этом случае

¹ Строгое решение этой задачи дано в Приложении А.

обусловлено только реактивной силой. Формулируя задачу математически, Циолковский вводит предположение о постоянстве относительной скорости отбрасываемых частиц. При полете в пустоте это предположение означает, что реактивный двигатель работает при установившемся режиме и на срезе сопла скорости истекающих частиц не зависят от скорости движения ракеты.

Вот как обосновывает эту гипотезу Константин Эдуардович в работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами». «Чтобы снаряд получил наибольшую скорость, надо, чтобы каждая частица продуктов горения или иного отброса получила наибольшую относительную скорость. Она же постоянна для определенных веществ отброса. Экономия энергии тут не должна иметь места: невозможна и невыгодна. Другими словами: *в основу теории ракеты надо принять постоянную относительную скорость частиц отброса*»¹.

Циолковский составляет и подробно исследует уравнение движения ракеты при постоянной скорости отбрасываемых частиц и получает весьма важный математический результат, известный сейчас под названием *формулы Циолковского*.

Если обозначить буквой v скорость ракеты в момент, когда ее масса равна M , а через V_e — постоянную скорость отбрасываемых из сопла двигателя частиц, то формула Циолковского будет иметь следующий вид:

$$v = V_e \ln \frac{M_0}{M} \approx 2,3 \left(\lg \frac{M_0}{M} \right) V_e,$$

где M_0 — масса ракеты в момент старта, когда ее скорость равна нулю.

Участок полета ракеты при работающем двигателе называют *активным участком полета*. Скорость ракеты в конце активного участка будет наибольшей. Если масса ракеты при полностью израсходованном топливе будет M_k , а наибольшая скорость — v_{\max} , то из формулы Циолковского следует, что

$$v_{\max} \approx 2,3 V_e \lg \frac{M_0}{M_k}.$$

Пусть отношение начальной массы (веса) ракеты к мас-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 197.

се (весу) в конце процесса горения равно 10 и относительная скорость отбрасываемых частиц равна 3000 м/сек, тогда максимальная скорость ракеты будет

$$v_{\max} \approx 2,3 \cdot 3000 \cdot 1 = 6900 \text{ м/сек.}$$

Из формулы Циолковского следует весьма важный практический результат: *для получения возможно больших скоростей ракеты в конце работы двигателя нужно увеличивать относительные скорости отбрасываемых частиц и увеличивать относительный запас топлива.*

Отметим, что увеличение относительных скоростей истечения частиц требует совершенствования реактивного двигателя и разумного выбора составных частей (компонентов) применяющихся топлив, а второй путь, связанный с увеличением относительного запаса топлива, требует значительного улучшения (облегчения) конструкции корпуса ракеты, «сухого» веса двигателей, вспомогательных механизмов и приборов управления полетом.

Строгий математический анализ, проведенный Циолковским, выявил основные закономерности движения ракет и *создал возможность количественной оценки совершенства реальных конструкций ракет.*

Простая формула Циолковского позволяет путем элементарных вычислений установить исполнимость того или другого задания. В самом деле, пусть, например, мы хотим создать одноступенчатую ракету для полета на Марс и располагаем двигателем, имеющим относительную скорость отбрасываемых частиц 2500 м/сек. Тогда, зная, что для преодоления поля тяготения Земли нужна скорость 11,2 км/сек, можно найти необходимый относительный запас топлива в ракете. Из формулы Циолковского

$$11,2 = 2,3 \cdot 2500 \lg \frac{M_0}{M_k},$$

или

$$\lg \frac{M_0}{M_k} = 1,948.$$

По таблицам десятичных логарифмов находим, что $M_0/M_k = 88$,

т. е. суммарный вес конструкции корпуса ракеты, двигателя, вспомогательных механизмов и приборов управления должен составлять немногим больше 1% стартового веса. Такую ракету сделать в наши дни невозможно. Если удастся увеличить относительную скорость истечения до 4850 м/сек, то, как легко найти из формулы Циолковского, в этом случае

$$\ln \frac{M_0}{M_k} = 1,$$

а следовательно,

$$M_0/M_k = 10,$$

т. е. вес ракеты без топлива должен составлять 10% ее стартового веса. Такую ракету можно создать.

Формулой Циолковского можно пользоваться для приближенных оценок скорости ракеты и в тех случаях, когда сила аэродинамическая и сила тяжести сравнительно невелики по отношению к реактивной силе. Подобного рода задачи возникают при создании пороховых ракет с непродолжительным временем горения и большими секундными расходами. Реактивная сила у таких пороховых ракет превосходит силу тяжести в 40—120 раз и силу лобового сопротивления — в 20—60 раз. Максимальная скорость такой пороховой ракеты, подсчитанная по формуле Циолковского, будет отличаться от истинной на 1—4%; такая точность определения летных характеристик на первоначальных стадиях проектирования вполне достаточна.

Формула Циолковского позволила *количественно оценить* максимальные возможности реактивного способа сообщения движения. После работы Циолковского 1903 г. началась новая эпоха развития ракетной техники, ознаменовавшаяся тем, что летные характеристики ракет можно заранее определять путем вычислений. Следовательно, *работой Циолковского положено начало научного проектирования ракет*. Предвидение К. И. Константинова, конструктора пороховых ракет XIX в., возможности создания новой науки *баллистики ракет (или ракетодинамики)* получило реальное осуществление в работах Циолковского.

Глава четвертая

Из истории авиации и ракетной техники в России

Жизненность и важность идей познается только долгим опытом. Значение творческой работы ученого определяется временем.

В. И. Вернадский

Остановимся сначала на истории развития ракетной техники в России XIX в. В более ранние периоды ракеты использовались только для праздничных фейерверков и иллюминаций.

Боевая ракета, или реактивный снаряд, — летательный аппарат, тяжелее воздуха, которому сообщают движение за счет сил реакции (сил отдачи) отбрасываемых от аппарата частиц. Результирующую сил реакций отбрасываемых частиц часто называют реактивной силой, или *реактивной тягой*. В большом числе задач сила тяги направлена по скорости центра масс ракеты или (как, например, при маневре или программном полете по заданной криволинейной траектории) образует с вектором скорости центра масс некоторый угол.

В программных полетах на активном участке для межконтинентальных ракет и ракет средней дальности (до 5000 км) этот угол (между \vec{v} и продольной осью ракеты) невелик. Слово «ракета» происходит от итальянского «роккетто», что означает — стержень, веретено.

Принцип реактивного способа сообщения движения (двигатели прямой реакции) был известен очень давно. В глубокой древности теряются различные попытки людей использовать двигатели прямой реакции для создания летательных аппаратов, т. е. ракет различных систем и применений.

История сохранила нам предания, согласно которым в Китае более 2000 лет тому назад ракеты применялись для развлечения во время народных праздников. Позднее китайцы стали применять ракеты и как боевое оружие.

Известно успешное применение китайцами боевых ракет против монгольских орд еще в 1232 г.

В американском справочнике «Handbook of Astronautical Engineering» утверждается, что первые рисунки ракет были обнаружены в вавилонских рукописях, относящихся к 3200 г. до н. э. Первые ракеты применены в Китае в 2000 г. до н. э. Миф о полете Икара датируется 1500 г. до н. э.

Из серьезных исследований по конструкциям ракет следует отметить работу польского инженера Казимира Сименовича, который в 1650 г. опубликовал на немецком языке книгу «Ракеты для воздуха и воды» («Rogetten für Luft und Wasser») и впервые в мире дал чертеж трехступенчатой ракеты.

В конце XVIII в. при завоевании Индии англичанам пришлось встретиться с отрядами обученных воинов-ракетчиков. Индийский князь Гайдар-Али создал корпус ракетных стрелков из 1200 человек еще в 1766 г. Позднее его сын Типпу-Сагиб увеличил состав этого корпуса до 5000 человек. Индийские боевые ракеты были применены против англичан в 1799 г. под Серингапатом. Образцы этих ракет до настоящего времени хранятся в Вульвичском музее в Англии.

Ракеты войск Типпу-Сагиба состояли из железной гильзы длиной около 30 см, к которой для стабилизации полета прикреплялся шест из бамбука длиной 2,5—3 м. Этот шест соединялся с гильзой перетяжкой из проволоки. Внешне индийские ракеты напоминали скорее фейерверочные ракеты, так как «боевая часть» их состояла из железного острия (стрелы), прикрепленного к донной части гильзы¹. Однако эффект применения этих ракетных снарядов — «огненных стрел» — был весьма значительным. Войска Типпу-Сагиба совершенно деморализовали английскую кавалерию.

Первый, кто заинтересовался индийскими боевыми ракетами на Европейском континенте, был английский генерал Уильям Конгрев (1772—1828). Он организовал производство боевых пороховых ракет в Вульвичском арсенале и провел с ними большое число экспериментов. В частности, он нашел, что оптимальный угол пусковой

¹ Более подробное описание индийских ракет можно найти, например, в кн.: В. Williams, S. Epstein. The Rocket Pioneers. London, 1957.

установки, при котором достигается максимальная дальность полета ракеты, составляет 55°. В 1806 г. в успешном обстреле ракетами Копенгагена, в котором участвовал Конгрев, было выпущено около 25 000 ракет. После обстрела Копенгагена работы над боевыми порохowymi ракетами развернулись почти во всех странах Европейского континента.

В России первое ракетное заведение было организовано в конце XVII в.

...Когда Россия молодая,
В борнях силы напрягая,
Мужала с гением Петра...

В дневнике путешественника Патрика Гордона за 1690 г. можно прочесть, что Петр I сам руководил изготовлением фейерверочных ракет и организовывал грандиозные увеселительные фейерверки. В эти же годы в России было налажено массовое производство пороха весьма высокого качества. Об этом свидетельствуют многие иностранные гости. Вот, например, одна из записей датского посланника в Москве, относящаяся к 1710 г.: «Трудно представить себе, какая масса пороху истреливается за пирами и увеселениями, при получении радостных вестей, на торжествах и при салютах, подобно нынешнему: ибо в России порохом дорожат не более чем песком, и вряд ли найдешь в Европе государство, где бы его изготовляли в таком количестве и где бы по качеству и силе он мог сравниться со здешним»¹.

В петровскую эпоху руководители русской армии осознали и боевое значение ракет. В 1717 г. была разработана знаменитая сигнальная ракета, которая состояла на вооружении русской армии почти без всяких изменений свыше 150 лет.

Русские фейерверкеры имели мировую славу. Они создали большое число фейерверочных ракет и пороховых составов. В отдельных случаях применялись составные (ступенчатые) ракеты. Устраиваемые фейерверки поражали своей грандиозностью. За один вечер выпускались десятки тысяч ракет. В изготовлении ракет и ракетных составов участвовали тысячи рабочих. В качестве примера можно указать, что над одним из фейерверков,

¹ «Русский архив», 1892, № 8, стр. 498.

устроенных в 1733 г., «2000 человек десять недель столь ревностною охотою трудились»¹.

Большой конструкторский и производственный опыт работы над созданием фейерверочных ракет был использован русскими инженерами при проектировании первых боевых пороховых ракет. Развитие ракетной техники в России шло самостоятельными путями. Основной экспериментальной и технической базой были ракетные заведения и мастерские, изготавливавшие фейерверочные ракеты.

Наиболее крупным вкладом в создание боевых пороховых ракет явились работы русских военных инженеров: Александра Дмитриевича Засядко (1779—1837) и Константина Ивановича Константинова (1818—1871). Благодаря трудам этих выдающихся деятелей русской военной техники наши отечественные ракеты по своим летным (баллистическим) и эксплуатационным характеристикам в ряде случаев превосходили аналогичные образцы за рубежом.

Александр Дмитриевич Засядко родился в 1779 г. в деревне Лютенке Полтавской губернии. По окончании кадетского корпуса он был назначен подпоручиком артиллерии. Участвовал в ряде боевых кампаний.

А. Д. Засядко прошел с боями Северную и Южную Италию, участвуя в сражениях против Наполеона. В 1812 г. он командовал 15-й артиллерийской бригадой, с которой дошел до Парижа. За отличие в битве под Лейпцигом он был награжден орденом Георгия III класса (только трое во всей русской армии имели этот орден в полковничьем звании). К 1814 г., когда А. Д. Засядко возвратился в Россию, он был одним из наиболее опытных и широко образованных офицеров-артиллеристов.

В это время Засядко заинтересовался пороховыми боевыми ракетами, методы проектирования и изготовления которых англичане держали в большом секрете. Основная идея исследований Засядко состояла в том, чтобы, опираясь на большой технический опыт создания русских фейерверков, доработать фейерверочную ракету до боевой. Он правильно считал, что никакого особого секрета английские боевые ракеты (конгревовы, как их называли) не представляли.

¹ Д. А. Ровинский. Описание фейерверков и иллюминаций, СПб, 1903.



А. Д. Засядко

В одной из докладных записок Засядко писал: «Вменяя всегда в священную себе обязанность и особенное счастье быть по возможности полезным службе... искал я открыть способ употребления ракет средством зажигательным и, хотя не имел никогда случая видеть, ниже получить малейшие сведения, коим образом англичане делают и в войне употребляют, думал однако же, что ракета обыкновенная с должным удобством приспособленная есть то самое, что они столь необыкновенным и важным открытием высказать стараются»¹.

Не получив материальной помощи от правительства на проведение опытов, Засядко, считая дело создания пороховой боевой ракеты наиважнейшим, продал перешедшее ему от отца имение и на эти средства начал свою опытно-конструкторскую работу. Пробразом ракет Засядко явились русские фейерверочные («верховые») ракеты.

В боевых ракетах, созданных Засядко, использовали пороховой двигатель верховой ракеты, но стенки камеры

¹ ЦГВИА, ф. 35, оп. 4/245, д. 65

изготавливались из железа, а не из картона, широко применявшегося для фейерверочных ракет. Для стабилизации полета он применял длинный деревянный шест, так же как это делалось для фейерверочных ракет. Полезным грузом в ракетах Засядко был зажигательный состав или граната. А. Д. Засядко разработал конструкции боевых пороховых ракет трех калибров: 4-дюймовые (101,5 мм), 2,5-дюймовые (63,5 мм) и 2-дюймовые (50,4 мм).

Первые официальные испытания ракет конструкции А. Д. Засядко были проведены в Петербурге в 1817 г. Испытания прошли успешно, и Засядко был направлен в г. Могилев в главную квартиру фельдмаршала Барклая де Толли для обучения личного состава специально сформированного подразделения боевому применению ракет. Из помощников Засядко следует отметить В. М. Внукова, впоследствии заведовавшего Петербургским ракетным заведением.

В декабре 1817 г. Барклай де Толли специальным рапортом доносил о результатах работ А. Д. Засядко в Могилеве: «Хотя опыты сии, сделанные в употреблении и действии сего нового и вообще еще улучшения требующего оружия, конечно, не могут быть сочтены окончательными, однако доведены до такой степени, что полезность сих ракет неоспорима, равно как и необходимость иметь оные при войсках... Большие ракеты, бросаемые навесно, может быть лучшее до сих пор известное средство при осадах в особенности тесно построенных восточных городов... При тихой погоде или по крайней мере при небольшом ветре направление оных довольно может быть определено... Я почитаю долгом моим засвидетельствовать при сем, что во все время нахождения полковника Засядко при главной моей квартире я с удовольствием видел особенное его усердие и труды в открытии и исследовании сего, у нас еще неизвестного и столь полезного оружия, а успехами в достижении настоящей цели начатых и проводимых им опытов он дал вернейшее доказательство отличнейших своих познаний и способностей»¹.

В 1818 г. А. Д. Засядко был произведен в генерал-майоры, а в 1820 г. был назначен начальником Артилле-

¹ ЦГВИА, ф. 35, оп. 4/245, св. 188.

рийского училища. По его настоянию при Петербургском ракетном заведении была создана впервые в России рота ракетчиков (1826).

Первое боевое применение ракеты Засядко получили во время русско-турецкой войны (1828—1829). Ракеты изготовлялись в действующей армии в непосредственной близости к фронту. По-видимому, основной причиной переноса производства ракет в действующую армию являлось растрескивание порохового состава при транспортировке изготовленных ракет, что приводило к увеличению поверхности горения, увеличению давления в камере и преждевременным разрывам гильз.

В эти же годы ракеты Засядко применялись русскими войсками на Кавказе. Как показывает изучение архивных документов, количество изготавливаемых ракет исчислялось тысячами.

Следует отметить, что боевые ракеты Засядко были совершеннее ракет Конгрева. «Секреты» изготовления конгревовых ракет неоднократно предлагались русскому правительству иностранными изобретателями и коммерсантами. Эти «секреты» несколько раз приобретались за довольно крупные суммы. Но сравнительные испытания различных вариантов конгревовых ракет и ракет Засядко всегда доказывали превосходство ракет Засядко.

Дальнейший шаг вперед в деле совершенствования боевых пороховых ракет был сделан К. И. Константиновым — отцом русской боевой пороховой ракеты и основоположником экспериментальной ракетодинамики, организатором прогрессивных методов массового производства пороховых ракет (на черном дымном порохе).

Константин Иванович Константинов родился в 1818 г. По окончании в 1838 г. курса Михайловской артиллерийской академии он был назначен начальником школы мастеров порохового и селитряного дела. В 1844 г. К. И. Константинов разработал электробаллистический прибор для определения скоростей артиллерийского снаряда в любой точке траектории и сконструировал прицел для гладкоствольных мортир, за что получил Михайловскую премию.

Ракеты Засядко изготовлялись в России в условиях плохо оборудованных мастерских, и качество выпускаемых ракет-снарядов в значительной степени зависело от производственного опыта мастеров-рабочих. Никаких ин-



К. И. Константинов

струкций по изготовлению ракет не существовало, и опыт передавался устно от одного рабочего к другому.

В 1847 г. полковник Костырко, бывший тогда командиром Петербургского ракетного заведения, получил приказание изложить письменно в форме инструкции методике фабрикации ракет. В этом первом письменном руководстве по изготовлению ракет излагались детали изготовления ракет, принятые калибры, особенности конструкции, состав пороха и ряд производственных приемов.

Это руководство и определяет технический уровень массового производства боевых пороховых ракет в Петербургском ракетном заведении к 1849 г., когда начальником этого заведения был назначен К. И. Константинов.

Константинов произвел настоящую техническую революцию в массовом производстве ракет. Он правильно считал, что «секрет приготовления боевых ракет заключается прежде всего в обладании способами фабрикации, производящими идентичные результаты, и это не только относительно размеров различных частей ракет, но и от-

О БОВЕВЫХЪ РАКЕТАХЪ

СЪЧИНЕНІИ

ГЕНЕРАЛЪ-МАЮРА КОНСТАНТИНОВА,

ЗАВЪДЪВАННАГО ИЗГОТОВЛЕНІЕМЪ И УПОТРЕБЛЕНІЕМЪ БОВЕВЫХЪ РАКЕТЪ

Данное сочиненіе издано въ Императорскомъ Артиллерійскомъ Академіи въ 1860 году
и издано на французскомъ языкѣ въ Парижѣ въ 1861 году

СЪ ВЫСОЧАЙШАГО СОВЪЩАНІИ

On pense, que la fusée de guerre est un
artifice non pas indispensable, ni qui puisse
jamais remplacer, sous aucun rapport,
le canon, mais on la considère comme un
auxiliaire utile, et qu'on regrettera tou-
jours, de n'avoir pas à sa disposition

Historique du service de l'artillerie du
siège de Sébastopol, publié par ordre du
Ministre de la guerre en France en
1859 T. I. p. 316

Переводъ съ Французскаго Георгія Шмидта-Ханцова

№ 447301

САНКТПЕТЕРБУРГЪ

ВЪ ТИПОГРАФИИ ЭДУАРДА ВЕЙМАРА

1864.

*Титул известной работы К. И. Константинова
«О боевых ракетах»*

носителю физических и химических свойств материалов, из коих сделаны эти части; и, наконец, в удобстве производить многочисленные испытания при текущей фабрикации, без потери времени, по мере представляющейся в том надобности»¹.

Основной задачей массового производства Константинов считал обеспечение таких условий, когда «сего дня можно приготовить ракету в строгости подобную той, которая была приготовлена вчера»².

¹ К. И. Константинов. О боевых ракетах. СПб., 1864, стр. 70—71.

² Там же, стр. 71.

Для решения этой задачи Константинов последовательно проводит механизацию основных процессов производства боевых пороховых ракет. Разумное сочетание машинной техники и искусства рабочих должно было обеспечить высокое качество изготавливаемых ракет.

Константинов последовательно рассмотрел все стадии производства пороховых ракет. Предложенные и введенные им усовершенствования состояли в следующем:

- набивка ракет сухим (и, следовательно, неизменяемым) пороховым составом вместо сырого;

- увеличение глубины ракетной пустоты и заделке переднего конца ракет холодным свинцом;

- автоматизация процесса пробивания дыр в прямоугольниках из листового железа, свертываемых и склепываемых для образования ракетных гильз;

- введение наклонных бочек из красной меди для растирания и смешивания составных частей порохового состава и введение особых деревянных бочек, снабженных счетчиками оборотов, для обеспечения идентичности обработки пороховых составов;

- введение специальных прессов (конструкции Константинова) для набивки гильз пороховым составом и новой системы набойников;

- изобретение новой машины (с предохранителем) для сверления ракетной пустоты;

- изобретение и применение баллистического маятника для определения реактивной силы как функции времени.

Рассмотрим более подробно некоторые из нововведений К. И. Константинова. Он был выдающимся технологом по производству боевых пороховых ракет. При вступлении К. И. Константинова в должность начальника Петербургского ракетного заведения там имелись четыре горизонтальные бочки для растирания и смешения составных частей черного пороха и получения однородной пороховой массы.

Эти бочки помещались в неотапливаемом бараке и приводились во вращение восемью рабочими, находящимися в помещении, отделенном от бочек только легкой перегородкой. Зимой эти люди работали на морозе и вообще имели больше шансов погибнуть, нежели остаться в живых, так как растирание составных частей пороха было весьма опасным.

«Мною было исходатайствовано поместить людей, приводящих бочки во вращательное движение, вдали от этих бочек, в теплом покое, где люди вертели бы маховые колеса, от которых вращательное движение передавалось бы бочкам механической передачею движения. Для большей безопасности между баракон, помещающим бочки, и зданием, укрывающим людей, возведен был земляной вал».

Для получения одинаковой структуры пороховой массы Константинов ввел для каждой партии выпускаемых ракет счетчики оборотов, которые помещались перед рабочими и служили им постоянно руководством для выбора скорости вращения бочек.

Наблюдательность и инженерный опыт Константинова привели его к новой конструкции бочек с наклонной осью для перетиравания порохового состава, и опыт показал, что если «при прежних бочках потребовалось 10 часов работы, в продолжение которых бочки производили 4200 оборотов... с новыми бочками достаточно вдвое меньшего числа оборотов (при той же скорости вращения) в продолжение 5 часов работы».

Удачные результаты, полученные с наклонными бочками в Петербургском ракетном заведении, были поводом для их внедрения еще на трех казенных пороховых заводах для увеличения производства пороха.

Усовершенствовав изготовление однородной пороховой массы, Константинов сделал важный шаг в деле совершенствования массового производства ракет.

Второй не менее ответственной задачей была набивка ракетных гильз пороховой массой. Имевшиеся в ракетном заведении механические прессы давали «самое наибольшее давление только в 80 пудов на квадратный дюйм». Этого было недостаточно для получения из сыпучего тела (пороха) плотной сплошной массы, обеспечивающей постоянную скорость горения. Константинов сконструировал новый пресс, обеспечивающий суммарное давление до 400 тыс. кг (24 419 пудов). Три экземпляра этого прессы были изготовлены по заказу русского правительства в Париже.

«Нет сомнения, — писал Константинов, — что трудность иметь достаточно сильные прессы при начале ракетного делопроизводства породила идею *смачивать состав при набивке*, к чему прибегнули как к паллиативно-

му средству для облегчения набивки и устранения разрывов ракет; но смачивание состава влечет за собой весьма важные неудобства. Смоченный состав, высыхая малопомалу с большей или меньшей скоростью, смотря по времени года и состоянию атмосферы, при которой происходила набивка ракет, и смотря по обстоятельствам, которым сопровождается их хранение и перевозка, изменяется постепенно и дает при стрельбе результаты, весьма разнообразные».

Разработка мощных прессов позволила снаряжать ракеты сухим однородным порохом и получать при стрельбе более близкие к опорной траектории (от выстрела к выстрелу) результаты, т. е. уменьшить рассеивание снарядов.

Для экспериментальной проверки величины реактивной силы, развивающейся при горении пороха, К. И. Константинов детально разработал методику стендовых испытаний ракет с использованием баллистического маятника. Самый простой способ проверки достоинств какого-либо снаряда состоит в его испытаниях в реальных условиях. Но такие испытания дают суммарный (интегральный) результат, обусловленный весьма многими причинами, причем некоторые из них являются случайными. Для выяснения истинных характеристик снаряда приходится увеличивать число испытаний, обрабатывая их методами математической статистики. Однако полученные при этих стрельбах характеристики не раскрывают влияния отдельных конструктивных параметров снаряда на полученный интегральный результат.

В наше время, когда создаются сложные многопараметрические конструкции (объекты), проведение наземных испытаний (а иногда и целенаправленных летных натурных экспериментов) по выявлению влияния отдельных наиболее важных параметров объекта считается обязательным. Поиски рационального (оптимального) решения путем проведения испытаний многочисленных натуральных вариантов отвергнуты практикой современного проектирования: они дороги и очень часто кончаются закрытием темы, хотя она и нужна и полезна для государства.

К. И. Константинов первый в истории развития ракетной техники начал внедрять научный эксперимент для оценки влияния отдельных конструктивных изменений на баллистические характеристики ракеты. Он писал: «Испы-

тание в условиях действительности дает нам лишь результат, в котором поглощаются все частности явлений, порождающих этот результат. Из всего этого истекает необходимость иметь средства аналитических исследований для изучения одного или нескольких отдельных явлений из тех, которые производят окончательный результат. Эти соображения повели к изобретению баллистического маятника...»

К. И. Константинов — основоположник экспериментальной ракетодинамики, глубоко осознавший значение научного эксперимента для прогресса ракетной техники.

Он хорошо понимал, что измерение реактивной силы у ракеты, укрепленной на баллистическом маятнике, является некоторой схематизацией явления действительно полета. Но основную характеристику — главную часть реактивного действия — таким образом можно получить достаточно надежно.

«Для измерения движущей силы ракет было бы самым лучшим — иметь возможность производить эти измерения, не переменяя скорости ракеты, которую она имеет во время полета, и определить в этих условиях внутреннее давление на голову ракеты и внутреннюю упругость газов в различные моменты сгорания движущего состава; но поставленный таким образом вопрос, нам кажется, недостаточно подчиняется средствам испытания, которые находятся ныне в нашем распоряжении¹. Нужно изменить условия задачи и начать с того, чтобы сделать ракету неподвижной или значительно ограничить скорость ее движения. При этом неоспоримо изменятся результаты, так как внутреннее напряжение газов и скорость их истечения через отверстия в поддоне не могут быть одинаковыми в той ракете, которая при движении переносит только свой собственный груз, и той, которую делают более или менее неподвижно, заставляя упираться головой в динамометр или какое-либо препятствие, представляющее определенное сопротивление. Приобретенные таким образом результаты могут, однако же, дать верные указания относительно изготовления ракет, для проверки однообразия их фабрикации и могут

¹ Только применение в настоящее время телеметрии позволило определить давление в камере сгорания реактивного двигателя у летящей ракеты. Зная давление в камере двигателя, можно найти реактивную силу (или реактивную тягу).

быть принятыми, кажется, как приблизительное решение задачи определения движущей силы, запасенной в ракете»¹.

Проанализировав весьма несовершенные динамометры, употреблявшиеся для определения реактивной силы, Константинов указал на существенные преимущества предложенного им для этой цели баллистического маятника.

Баллистический маятник Константинова подобен оружейному маятнику-приемнику, но ракетой не стреляют в приемник, она закрепляется в приемнике неподвижно, так, чтобы ее ось проходила через центр удара (центр качаний) маятника. На основе законов механики по углу отклонения маятника при действии реактивной силы можно найти величину этой силы. Для определения реактивной силы как функции времени Константинов сконструировал самописец, прикрепляемый сбоку маятника.

Одним из самых существенных выводов, полученных из опытов на баллистическом маятнике, было указание о том, «что движущая сила в ракетах развивается лишь при обгорании ракетной пустоты» и что эта сила очень мала, когда горит поперечное сечение глухого состава.

Наличие этой малой силы приводило, однако, к большим неправильностям и отклонениям в полете ракет, и одним из фундаментальных предложений Константинова было уничтожение глухого состава при набивке ракетных гильз для увеличения кучности боя ракет.

«Ракетный маятник,— писал К. И. Константинов,— доставил нам многие указания, относящиеся до влияния соразмерности составных частей ракетного состава, внутренних размеров ракетной пустоты, числа и размеров очков на порождение движущей силы и образа ее действия; но опыты с этим прибором не были еще достаточно многочисленны, чтобы воспользоваться всем, чего можно ожидать от подобного аппарата»².

Результаты больших экспериментальных исследований и опыта производства боевых пороховых ракет были изложены К. И. Константиновым в его лекциях в Михайловской артиллерийской академии. Эти лекции в виде книги «О боевых ракетах» были изданы сначала на фран-

¹ К. И. Константинов. О боевых ракетах, стр. 178—179.

² Там же, стр. 189.

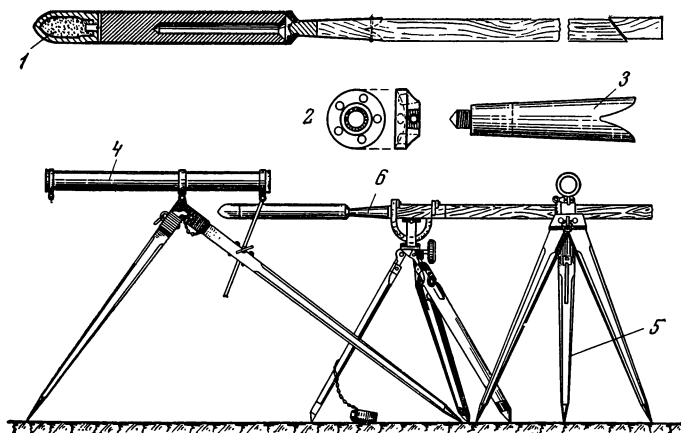


Рис. 12. Детали двухдюймовой ракеты К. И. Константинова и общий вид ракетного пускового станка

1 — продольный разрез двухдюймовой ракеты с длинным призматическим хвостом, вооруженной двухфунтовой гранатой (образец тех ракет, которые долгое время употреблялись на Кавказе, и тех, которые были отправлены в Севастополь во время войны 1853—1856 гг.); 2 — поддон; 3 — хвостовая трубка призматических двухдюймовых ракетных хвостов; 4, 5 — пусковой станок для двухдюймовых ракет (вид сбоку и спереди); 6 — станок с желобом для двухдюймовых ракет с длинными хвостами

цузском языке в 1861 г., а затем на русском языке в 1864 г.

В этой книге даны подробные описания боевых ракет, усовершенствованных Константиновым и принятых на вооружение русской армии. На рис. 12 и 13 даны чертежи деталей двухдюймовой ракеты, выпускавшейся Петербургским ракетным заведением, и общий вид ракетного пускового станка.

Большое число научно-технических статей Константинова по вопросам ракетной техники было опубликовано в «Артиллерийском журнале».

Изучая обширные исследования Константинова по пороховым ракетам, можно утверждать, что в середине XIX в. он был идейным руководителем школы ракетчиков, создавшей в России передовые методы производства боевых пороховых ракет и разработавшей основы экспериментальной ракетодинамики.

Этот период развития ракетной техники в России был тесно связан с непосредственными запросами армии, что и привело к разработке и созданию образцов вооружения.

В научном отношении это был период накопления технического опыта, период научных наблюдений и качественной систематизации опытного материала. Весь комплекс вопросов, связанный с созданием новых образцов реактивных снарядов, решался на полигоне и в ракетном заведении. Россия стояла во главе прогресса ра-

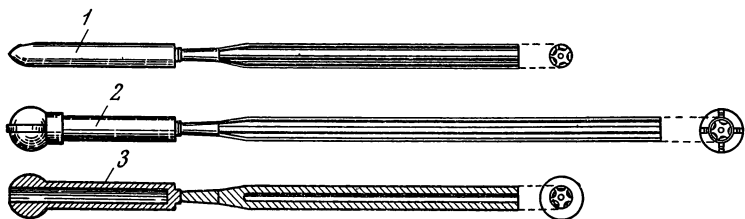


Рис. 13. Ракеты К. И. Константинова

1 — прицельная двухдюймовая ракета с двухфунтовой гранатой, снабженная коротким желобатым хвостом; 2 — навесная двухдюймовая ракета с шести фунтовой гранатой, снабженная желобатым хвостом; 3 — продольный разрез учебной ракеты

кетной техники потому, что благодаря инженерной интуиции и проницательности К. И. Константинова в качестве существенного элемента при совершенствовании боевых ракет был введен научно поставленный опыт, позволивший анализировать влияние отдельных конструктивных параметров на баллистические характеристики ракетных снарядов. Однако большой производственный и экспериментальный материал, собранный в Петербургском ракетном заведении под руководством Константинова, не получил широких научных обобщений, и теории полета ракет (теории баллистического проектирования) Константинову создать не удалось. Это трезво оценивал и сам Константинов. В своем труде «О боевых ракетах» он писал: «Факты эти составляют только результаты наблюдений, но они указывают уже возможность математической теории конструкции и стрельбы ракет, одним словом — возможность баллистики ракет. Но это наука, которую еще надобно создать».

Константинов понимал, что в основу теории полета ракеты должна быть положена теорема теоретической механики об изменении количества движения. Он указывал: «В каждый момент горения ракетного состава количество движения, сообщаемого ракете, равно количеству истекающих газов»¹. Однако следует отметить, что главная трудность в применении этого ясного закона состоит в том, что масса ракеты существенно изменяется на активном участке полета (полета с работающим двигателем).

Изобретение и усовершенствование в середине XIX в. нарезных артиллерийских орудий стреляющих продолговатыми вращающимися снарядами, явилось сильным тормозом для дальнейшего развития и совершенствования боевых пороховых ракет. Новые артиллерийские орудия, разработанные и созданные знаменитым русским ученым-артиллеристом генералом Н. В. Маиевским (1823—1892), показали превосходные боевые качества: большую дальность стрельбы, неслыханную в те годы точность попаданий и значительную скорострельность. Нарезные артиллерийские орудия, заряжаемые с казенной части, вытеснили пороховые ракеты, и на долгие годы — до второй мировой войны — боевые пороховые ракеты были забыты.

Попытки К. И. Константинова создать более совершенное ракетное заведение в городе Николаеве окончились неудачей. Петербургское ракетное заведение было закрыто, а постройка ракетного заведения в Николаеве не была закончена, хотя машинное оборудование для этого заведения, изготовленное во Франции, и было доставлено в Николаев. Несмотря на очевидные преимущества боевых пороховых ракет — большую подвижность, эффективность стрельбы по площадям, сильное моральное воздействие на войска противника, удобства в горной войне и в войне в городах, — интерес к ним все более ослабевал, и среди руководителей русской армии второй половины XIX в. не нашлось никого, кто бы практически поддержал предложения Константинова.

Мы приведем здесь грустные мысли «отца боевой пороховой ракеты», высказанные им в одной из последних

¹ См.: В. П. Глушко. Развитие ракетостроения и космонавтики в СССР. М., АПН, 1973, стр. 7.

статей под названием «Боевые ракеты в России в 1867 году»¹:

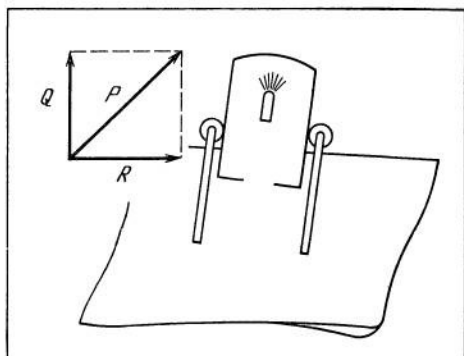
«Ныне Николаевское ракетное заведение могло бы быть окончено в самом непродолжительном времени, и с 1868 года могли бы в нем происходить работы по приготовлению ракет в полном ходу... Между тем постройка Николаевского ракетного заведения шла у нас до сих пор весьма медленно в особенности потому, что неоднократно возникал вопрос: не отказаться ли вовсе у нас от боевых ракет и поэтому не прекратить ли постройку этого заведения — это приводило к более или менее продолжительным остановкам... В последний раз возникло предложение прекратить совершенно дальнейшее осуществление Николаевского ракетного заведения вследствие мнения о ненадобности в теперешнее время ракет». И Константинов совершенно правильно писал: «Если материальные потери и можно иногда вознаградить впоследствии, то это не без значительного ущерба, когда со временем приходится оставленные предметы заводить вновь. Но чего нельзя ничем вознаградить — это потерю времени и что столь же невозможно — это восстановить прерванную нить преданий и сформировать впоследствии, скоро, вновь людей, в особенности по предметам военно-лабораторной техники... При упразднении ракетного заведения (в Николаеве.— А. К.), долголетние труды, плоды огромных издержек, все это исчезало бы и пришлось бы впоследствии новым лицам начинать все снова»² (так и случилось в 20-х годах XX столетия). Основоположник экспериментальной ракетодинамики скончался в городе Николаеве в 1871 г.

Из предшественников Циолковского, разрабатывавших идею реактивного движения в применении к дирижаблю и самолету, следует отметить Н. Соковнина, опубликовавшего в 1866 г. книжку «Воздушный корабль», и Ф. Гешвенда, выпустившего в 1887 г. в Киеве брошюру под названием «Общее основание устройства воздухоплавательного парохода (паролета)».

Для истории развития идей мирного использования реактивных летательных аппаратов весьма интересным является изобретательское предложение известного на-

¹ «Артиллерийский журнал», 1867, № 6.

² Там же.



Н. И. Кибальчич и его схема реактивного летательного аппарата

родовольца Николая Ивановича Кибальчича. Краткая пояснительная записка об этом изобретении была составлена Кибальчичем в тюрьме за несколько дней до казни.

Н. И. Кибальчич, сын сельского священника, родился 19 октября 1853 г. в Черниговской губернии. В 1871 г. поступил на первый курс Петербургского института инженеров путей сообщения. Окончив два курса этого института, летом 1873 г. он перешел студентом в Медико-хирургическую академию. Во время летних каникул 1875 г., находясь в Киевской губернии в имении своего брата, он дал прочитать одному крестьянину запрещенную цензурой сказку «О четырех братьях». Жандармерия возбудила дело, и осенью уже в Петербурге на квартире Кибальчича был устроен обыск. При обыске у него были найдены два тюка с нелегальной литературой. 11 октября 1875 г. Кибальчич был арестован, и, пробыв 2 года 7 месяцев в разных тюрьмах, 1 мая 1878 г. был приговорен судом к месячному тюремному заключению.

В 1879 г. Н. И. Кибальчич предлагает Исполнительному комитету организации «Земля и воля» свои услуги по изготовлению мин и бомб. Он участвует в изготовлении мины для взрыва в Одессе, готовит мины для взрыва в Зимнем дворце и обеспечивает бомбами участников покушения на царя Александра II 1 марта 1881 г.

Кибальчич был одним из высокообразованных людей своей партии и относился к порученному делу с серьез-

ностью кабинетного ученого, не входя в подробности организации покушений. Задержанный 17 марта 1881 г., после убийства Александра II, Кибальчич в тюрьме чертил сначала на стене, а затем на принесенной ему бумаге проект реактивного летательного аппарата и в своем последнем слове перед судом говорил об этом проекте.

Пояснительная записка о проекте воздухоплавательного прибора была приобщена к «делу о 1 марта» и пролежала 37 лет в секретных архивах жандармского управления. В 1918 г. проект Кибальчича был полностью опубликован в журнале «Былое» (№ 10—11, стр. 112). Вот некоторые выдержки из описания проекта Кибальчича:

«Находясь в заключении, за несколько дней до своей смерти, я пишу этот проект. Я верю в осуществимость моей идеи, и эта вера поддерживает меня в моем ужасном положении. Если же моя идея, после тщательного обсуждения учеными-специалистами, будет признана исполнимой, то я буду счастлив тем, что окажу громадную услугу Родине и человечеству. Я спокойно тогда встречу смерть, зная, что моя идея не погибнет вместе со мною, а будет существовать среди человечества, для которого я готов был пожертвовать своей жизнью...

Многие изобретатели основывают движение воздухоплавательных снарядов на мускульной силе человека... Я думаю, что если и возможно устроить такого типа летательное приспособление, то оно все-таки будет иметь характер игрушки и серьезного значения иметь не может. Какая же сила применима к воздухоплаванию? Такой силой, по моему мнению, являются медленно горящие взрывчатые вещества... Если мы возьмем фунт зернистого пороха, вспыхивающего при зажигании мгновенно, спрессуем его под большим давлением в форму цилиндра, а затем зажмем один конец этого цилиндра, то увидим, что горение не сразу охватит цилиндр, а будет распространяться довольно медленно от одного конца к другому и с определенной скоростью. На этом свойстве прессованного пороха основано устройство боевых ракет... Представим себе теперь, что мы имеем из листового железа цилиндр известных размеров, закрытый герметически со всех сторон и только в нижнем дне своем заключающий отверстие известной величины. Расположим по оси цилиндра кусок прессованного пороха цилиндри-

ческой же формы и зажжем его с одного из оснований; при горении образуются газы, которые будут давить на всю внутреннюю поверхность металлического цилиндра, но давления на боковую поверхность будут взаимно уравновешиваться, и только давление газов на закрытое дно цилиндра не будет уравновешено противоположным давлением, так как с противоположной стороны газы имеют свободный выход — через отверстие в дне. Если цилиндр поставлен закрытым дном кверху, то при известном давлении газов (величина которого зависит, с одной стороны, от внутренней емкости цилиндра, а с другой стороны, от толщины куска прессованного пороха) цилиндр должен подняться вверх».

Реактивный летательный аппарат Н. И. Кибальчича можно представить схематически в виде платформы, к которой на стойках прикреплен мощный пороховой реактивный двигатель. Особым механизмом в камеру двигателя должны были последовательно вводиться пороховые шашки. Развивающаяся при сгорании пороховых шашек реактивная сила при вертикальном расположении камеры двигателя должна была, по мысли изобретателя, поднимать платформы вверх. Изменяя ориентацию относительно платформы оси двигателя, закрепленного на двух стойках в специальных цапфах, можно было сообщать платформе движение в горизонтальном направлении. Образуя говоря, воздухоплавательный аппарат, по проекту Кибальчича, напоминал собой сказочный ковер-самолет, движение которого обуславливалось работой мощного порохового реактивного двигателя.

В заключение Кибальчич писал в своем проекте: «Верна или не верна моя идея — может решить окончательно лишь опыт. Из опыта же можно лишь определить необходимые соотношения между размерами цилиндра, толщиной пороховых свечей и весом поднимаемого аппарата. Первоначальные опыты могут быть удобно произведены с небольшими цилиндриками даже в комнате».

Рассмотренный нами материал показывает, что в течение XVIII и XIX вв. в России был получен весьма интересный и содержательный фактический материал в области ракет на твердом топливе (пороховые фейерверочные и боевые ракеты различных конструкций). Этот краткий исторический очерк охватывает только часть проведенных исследований и до известной степени характери-

зует уровень научного мышления в теории и практике реактивного движения, который был и в России, и за рубежом до основополагающих работ К. Э. Циолковского.

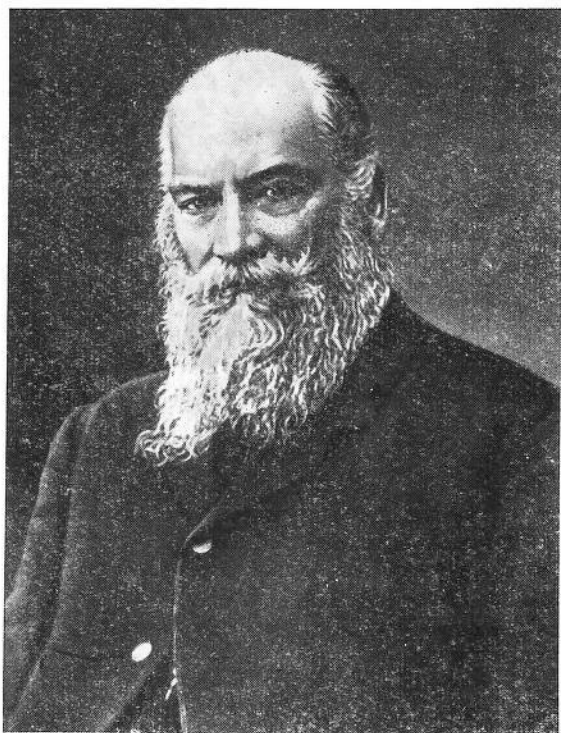
К 80-м годам XIX в. боевые ракеты с двигателями на черном дымном порохе были сняты с вооружения русской армии, и в те дни, когда Константин Эдуардович создавал в Калуге теоретические основы ракетодинамики, ракеты применялись только для праздничных (часто религиозно-пасхальных) фейерверков и иллюминаций.

Развитие авиационной техники (создание моделей и полноразмерных самолетов) проходило в России XIX и начала XX в. с еще большими трудностями, нежели развитие воздухоплавания. До 1909—1910 гг. была по существу единственная попытка русского моряка А. Ф. Можайского построить пилотируемый винтовой самолет с паровыми двигателями. О цикле его исследований, проводимых в труднейших материально-технических условиях, и опыте конструирования мы расскажем достаточно подробно далее.

Мы излагали ранее также работу К. Э. Циолковского «Аэроплан, или птицеподобная (авиационная) летательная машина». Эта работа исполнена в стиле Циолковского: сначала вынашивается основная идея, а затем дается математическое обоснование предложения. В этом сочинении впервые в научной литературе даны некоторые формулы аэродинамического расчета и предложена схема хорошо обтекаемого самолета. Исследования Циолковского по аэроплану не получили признания, а на мизерное жалование учителя организовать конструкторские работы было невозможно.

Развитие теоретических работ в России опережало создание реальных конструкций («исполнение не венчало мысль»). Особенно важные теоретические открытия в области аэронавтики и ракетной техники были сделаны Д. И. Менделеевым, Н. Е. Жуковским и К. Э. Циолковским. После успешных полетов братьев Райт интенсивное развитие пилотируемых самолетов началось во Франции. Франция купила за крупную сумму (500 тыс. франков) лицензию на самолет братьев Райт.

Следует отметить, что в знаменитых лекциях Н. Е. Жуковского по теоретическим основам воздухоплавания (1911—1912) в одной из глав, где дается описание аэро-

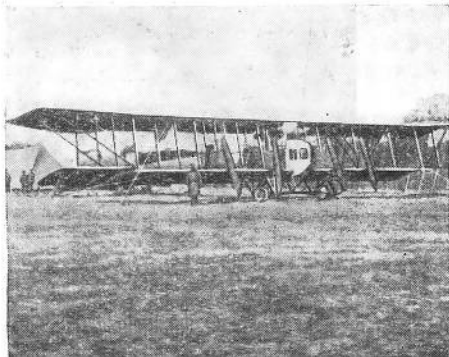


Н. Е. Жуковский

планов и гидропланов, совсем нет русских конструкций. Отмечены конструкции аэропланов братьев Райт, Вуазена, Фармана, Блерио и многие другие зарубежные аппараты.

В 1908 г. в России начинают возникать авиационные клубы и добровольные кружки по авиации, которые или закупают или копируют конструкции иностранных фирм. Показательные полеты первых русских пилотов М. Н. Ефимова, Н. Е. Попова, Б. И. Россинского, С. И. Уточкина вызвали необычайный интерес и пользовались всеобщим вниманием.

Самостоятельные практические работы русских конструкторов И. И. Сикорского, Я. М. Гаккеля и Д. П. Григоровича начались через 5—8 лет после успешных поле-



И. И. Сикорский и самолет его конструкции «Илья Муромец»

тов братьев Райт. Особенно следует отметить постройку тяжелых многомоторных самолетов конструкции И. И. Сикорского «Русский витязь» (1913) и «Илья Муромец» (1914). На этих самолетах был установлен ряд мировых рекордов (по дальности, высоте, продолжительности полета и грузоподъемности). В одном из полетов «Илья Муромец» с десятью пассажирами достиг высоты 2000 м (мировой рекорд). 5 июня 1914 г. этот самолет с шестью пассажирами продержался в воздухе 6 час. 33 мин. (также мировой рекорд).

К началу первой мировой войны Россия имела лучшие в мире тяжелые самолеты, но частные авиастроительные заводы в Петрограде, Москве и Одессе производили для нужд русской армии самолеты по французским (преимущественно) лицензиям и устаревших образцов («Ньюпор-4», «Фарман-16», «Вуазен»).

Настоящее развитие русской авиации началось после Великой Октябрьской социалистической революции.

Остановимся более подробно на развитии аэронавтики в России XIX — начала XX столетий. В XIX столетии внимание русских ученых и изобретателей было обращено главным образом на аппараты легче воздуха — аэростаты (воздушные шары). Первый полет с научными целями был организован Академией наук в 1804 г. Руководство экспериментами, которые надлежало провести во время подъема на воздушном шаре, было поручено ака-

демику Я. Д. Захарову. В своей объяснительной записке, представленной конференции Академии наук 16 мая 1804 г., Захаров писал: «Известно, что еще до сих пор точно не определено, в каком содержании воздух при отдалении своем от земного шара разжижается; также неизвестно, из каких он состоит газов и в каком содержании смешан он из них в высоте атмосферы. Для сего предложить имею честь учинить при поднятии на шару, как самом благоприятном для испытания случае, оный опыт следующим образом». Далее в записке излагается методика взятия проб воздуха на различных высотах. Полет состоялся 30 июня 1804 г. в Петербурге; воздушный шар поднялся на высоту 2000 м и через 3,5 часа приземлился в 60 км от Петербурга. Во время полета были проведены все задуманные наблюдения и измерения (кроме магнитных измерений). Среди научных приборов, которыми пользовался академик Я. Д. Захаров, были барометр, термометр, два электрометра, 12 стеклянных банок для взятия проб воздуха и т. п. Академия наук с большим удовлетворением отметила научное значение этого воздушного путешествия. «Главный предмет сего путешествия состоял в том, — докладывал Я. Д. Захаров Академии наук, — чтобы узнать с большей точностью о физическом состоянии атмосферы и о составляющих ее частях в разных определенных возвышениях оной»¹.

В дальнейшем полеты с научными целями на неуправляемых воздушных шарах проводили в России трижды: академик М. А. Рыкачев в 1868 и в 1873 гг., а также генеральный русский химик Д. И. Менделеев в 1887 г.

Д. И. Менделеев опубликовал в журнале «Северный вестник» большую статью под названием «Воздушный полет из Клина во время затмения»², в которой дано подробное описание подготовки аэростата к полету и проведения полета, а также изложение некоторых результатов научных наблюдений. В статье имеются замечательные высказывания, характеризующие состояние русской науки и воздухоплавательной техники в конце XIX в. Менделеев писал: «Уверен прежде всего в том, что аэростатика встала на верный путь, но еще очень далеко от воз-

¹ «История воздухоплавания и авиации в СССР» (по архивным материалам и свидетельствам современников). Период до 1914 г. Под ред. В. А. Попова. М., Оборонгиз, 1944.

² См.: Д. И. Менделеев. Соч., т. VII, стр. 471—546.

можно в ней совершенства. Так, на аэростатах можно подниматься выше, чем поднимались до сих пор... Легко устроить соответствующие цели приборы, например, подъемные шары, с аэростата спускаемые и заключающие самопишущие приспособления, или же замкнутые со всех сторон помещения, в которых наблюдатель будет и на тех высотах оставаться в безопасности и управлять подъемом и спуском шара и между тем изучать условия верхних слоев атмосферы, где надобно искать зародыш всех погодных изменений, в атмосфере содержащихся. Если можно осуществлять подводное плавание или подводные работы в водолазных колоколах, то очевидно, что возможно устроить и безопасность пребывания в разреженном воздушном слое».

В 1875 г. в работе «О температуре верхних слоев земной атмосферы» Менделеев указывал на необходимость постройки аэростата с герметической кабиной для наблюдателя. Он писал, что следует «...прикреплять к аэростату герметически закрытый оплетенный упругий прибор для помещения наблюдателя, который тогда будет обеспечен сжатым воздухом и может безопасно для себя делать определения и управлять шаром»¹. С помощью таких аэростатов (по-современному — стратостатов) можно «изучать условия верхних слоев атмосферы, где надобно искать зародыш всех погодных изменений, в атмосфере совершающихся»².

Менделеев утверждал, что, изучая аэронавтику во всех подробностях, можно увеличить продолжительность полетов, значительно удешевить и улучшить добычу водорода, которым в те годы наполняли воздушные шары; нет технических препятствий и для постройки управляемых аэростатов. Несмотря на цензурные ограничения, Менделеев утверждал: «Ясные дни для русской науки, однако, еще не пришли. Они наступят... Когда-нибудь придет, уверен, такое время, что на подобные предприятия не станут жалеть средств, потому что общие средства придут, когда люди узнают место образования погоды. Не в технике аэростатики причины того, что до сих пор верхние слои атмосферы не измерялись приборами и не

¹ Д. И. Менделеев. Соч., т. VII, стр. 19.

² Там же, стр. 476.

ответили на вопросы тех, кто вникал в задачи равновесия и возмущения воздуха»¹.

В 1880 г. было создано «Русское общество воздухоплавания». В решении организационного собрания этого общества записано: «Лица, серьезно преданные делу воздухоплавания, приняв во внимание громадное значение его для России как в научном, так и культурном и военном отношениях, постановили:

1. Основать в Петербурге по примеру других стран «Русское общество воздухоплавания».
2. Обществу иметь целями:
 - а) развитие науки и искусства воздухоплавания вообще;
 - б) решение наивыгоднейшего способа передвижения по воздуху;
 - в) осуществление проектов летательных снарядов, усовершенствование последних и практическое их применение;
 - г) популяризование и распространение в обществе науки и искусства воздухоплавания при помощи печати, публичных опытов и покровительства изобретателям приборов для передвижения по воздуху»².

В декабре 1880 г. по инициативе Д. И. Менделеева был организован VII воздухоплавательный отдел Русского технического общества. Для развития воздухоплавания на неуправляемых аэростатах в России этот отдел сыграл значительную и положительную роль. Начиная с 1883 г. Военное министерство отпускало отделу ежегодно 1000 руб. субсидии; он издавал журнал «Воздухоплавание и исследование атмосферы». Следует отметить, что большинство видных членов VII отдела были военные. Так, в 1889 г. в рапорте военному министру докладывалось: «В отделе числится 55 членов, преимущественно офицеров всех родов оружия: гвардии, армии и флота; частные же лица составляют до 15% общего числа членов и состоят из техников, ученых, заводчиков и фабрикантов, исключительно русских подданных»³.

Так как полет неуправляемых аэростатов целиком

¹ Д. И. Менделеев. Соч., т. VII, стр. 476.

² «История воздухоплавания и авиации в СССР», стр. 97.

³ Там же, стр. 98.

зависел от направления воздушных течений в атмосфере, то благодаря этому их применение в народном хозяйстве и военном деле было весьма ограниченным. Мысль изобретателей и инженеров искала пути технических решений управляемого полета. В XIX столетии в России было предложено несколько вариантов управляемых аэростатов с силовыми установками на борту. Они не были осуществлены.

Наиболее успешно над созданием управляемого аэростата работал капитан Огнеслав Стефанович Костович, серб по происхождению, моряк по профессии. Костович считал Россию своей второй родиной. Он запроектировал аэростат в виде цилиндра с двумя конусами. Получилась удобообтекаемая веретенообразная форма. По бокам баллона были расположены небольшие крылья. По оси аэростата проходил вал, к которому на конце крепился воздушный толкающий винт. Для рассмотрения проекта в Главном инженерном управлении была создана комиссия, в которую входили известные русские ученые: академик А. В. Гадолин, профессор В. Л. Кирпичев и профессор Н. П. Петров. В отзыве комиссия писала: «О. С. Костович ознакомил нас с чертежами, моделями и вычислениями проектированного им аэростата, который должен иметь возможность свободно дзигаться в воздухе по желаемым направлениям, несмотря на ветер средней силы. Аэростат должен иметь вид цилиндра с конусами на концах и с небольшой гондолой под его серединою. Длина его около 30 сажен, а наибольший диаметр 6 сажен. Движение аэростата предполагается сообщать посредством машины, вращающей винт, расположенный на одном конце аэростата... Такое устройство аэростата вполне рационально в отношении его удобоподвижности, а представленные нам Костовичем работы по этому предмету не заключают в себе ничего противоречащего законам природы, и успешное исполнение его возможно»¹.

В 1889 г. на суммы, отпущенные военным ведомством, были изготовлены основные детали и двигатель внутреннего сгорания мощностью около 80 л. с. Однако на сборку аэростата и проведение испытаний средств не хватало, и хорошее начинание было загублено.

¹ «История воздухоплавания и авиации в СССР», стр. 155.



Д. И. Менделеев

Если в условиях царской России вопросам воздухоплавания уделялось ничтожное внимание, то идеи об осуществлении летательных аппаратов тяжелее воздуха считались абсолютно утопичными, и официальные правительственные организации этим вопросом не занимались. Изобретателям аэропланов приходилось работать на свой страх и риск. Расскажем здесь о работах капитана 1-го ранга Александра Федоровича Можайского.

Можайский первым в мире разработал оригинальную и разумную конструкцию аэроплана с паровым двигателем, построил такой аэроплан и начал проводить его испытания на летном поле (аэродроме). Уже в советское время в военно-исторических и государственных исторических архивах были обнаружены детальные описания

аэроплана Можайского и многие документы, характеризующие процесс его создания и испытаний.

А. Ф. Можайский родился 9 марта 1825 г. в г. Рочексальме Выборгской губернии в семье морского офицера русского военного флота. Он избрал профессию моряка и в 1841 г. окончил Морской кадетский корпус. В 1853—1855 гг. Можайский участвовал в походе на корабле-фрегате «Диана» к берегам Японии через Атлантический и Тихий океаны. В 1862 г. служба во флоте была оставлена, и Можайский переселился на Украину, где был помощником мирового посредника и служил в Российском обществе пароходства и торговли. По-видимому, в эти годы и зародился у него интерес к полетам на аппаратах тяжелее воздуха — аэропланах. В 1876 г. он переехал в Петербург.

Академия наук СССР опубликовала сборник документов, последовательно раскрывающих работу Можайского над первым в мире аэропланом¹.

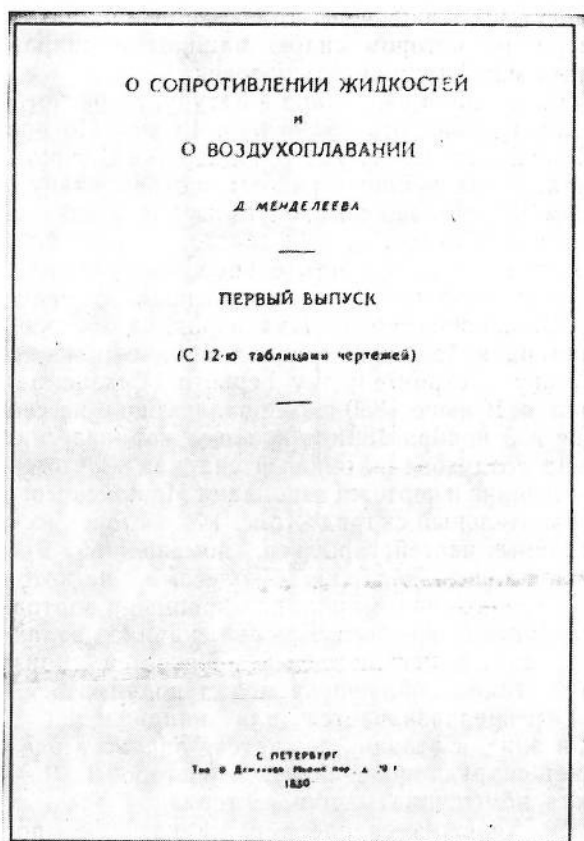
Документы, относящиеся к 1877—1880 гг., характеризуют исследования Можайского над небольшими моделями аэроплана задуманной им схемы. Эти исследования показали, что модели аэропланов, приводящиеся в движение при помощи воздушных винтов, могут разбегаться по плоскости и взлетать. Полеты моделей производили глубокое впечатление на современников.

«На днях нам довелось быть при опытах над летательным аппаратом (моделью), придуманным нашим моряком г. Можайским. Изобретатель весьма верно решил давно стоящий на очереди вопрос воздухоплавания. Аппарат, при помощи своих двигательных снарядов, не только летает, бегаёт по земле, но может и плавать. Быстрота полета аппарата изумительная; он не боится ни тяжести, ни ветра и способен летать в любом направлении»², — писал член технического комитета Морского министерства П. Богословский.

В конце 1876 г. Можайский обратился в Военное министерство с просьбой поддержать его опыты с летающими моделями. Комиссия в составе профессора Д. И. Менделеева и Н. П. Петрова, полковника П. Бо-

¹ «А. Ф. Можайский — создатель первого самолета». — Сб. док. АН СССР. М., 1955.

² «Кронштадтский вестник», 1877, № 5, стр. 1—2.



*Титул известной работы Д. И. Менделеева
по гидроаэродинамике*

гословского, генерала Зверева и военного инженера Струве дала положительное заключение по докладу Можайского и в результате ему было разрешено выдать на исследования полетов моделей 3000 руб.

Последующие опыты с моделями убедили Можайского в необходимости постройки полномасштабного летательного аппарата. «Употребив на опыты около 1800 руб. и потеряв много времени, я пришел к убеждению, что необходимо изменить способ производства исследований и что требуемые для разрешения вопроса дан-

ные могут быть получены только над аппаратом таких размеров, на котором силою машины и направлением аппарата мог бы управлять человек»¹.

Для постройки аэроплана в натуру, по расчетам изобретателя, требовалось 18 895 руб. 45 коп. Но предложение Можайского не получило поддержки Военного министерства, и дальнейшие работы по аэроплану велись главным образом за счет средств изобретателя.

В отзыве Главного инженерного управления утверждалось, что создание летательных аппаратов тяжелее воздуха «признается пока бесполезным и нерациональным». Можайский продолжал аэродинамические исследования на небольших моделях и одновременно начал подготовку к строительству первого образца натурального аэроплана. В июне 1880 г. он подал заявку на свое изобретение и 3 ноября 1881 г. получил «привилегию» — патент «на воздухоплавательный снаряд». В этом патенте даны описание и чертежи аэроплана Можайского: «...Воздухоплавательный снаряд (рис. 14) состоит из следующих главных частей: крыльев, помещенной между ними лодки, хвоста, тележки с колесами, на которую поставлен весь снаряд, машин для вращения винтов и мачт для укрепления крыльев. Крылья снарядов делаются неподвижными. Хвост состоит из плоскостей: горизонтальной и вертикальной; первая может подниматься и опускаться и предназначается для направления снаряда вверх и вниз, а вторая движется вправо и влево и заставляет снаряд поворачиваться в стороны. Лодка служит для помещения машин, материалов для них, груза и людей. Тележка с колесами, на которую поставлен весь снаряд и прочно прикреплен, служит для разбега летательного снаряда по земле перед его подъемом; в воздухе же тележка действует как балансир или отвес. При поступательном движении в воздухе винты летательного снаряда, вращаемые машиною, вследствие сопротивления воздуха, приводят снаряд в движение». На чертеже (см. рис. 26) изображен описываемый аэроплан Можайского в плане, сбоку и сзади².

На основании имеющихся документов можно утверждать, что постройка аэроплана была начата в конце 1879 г.

¹ Сборник документов АН СССР, стр. 36.

² Там же, стр. 82—85.

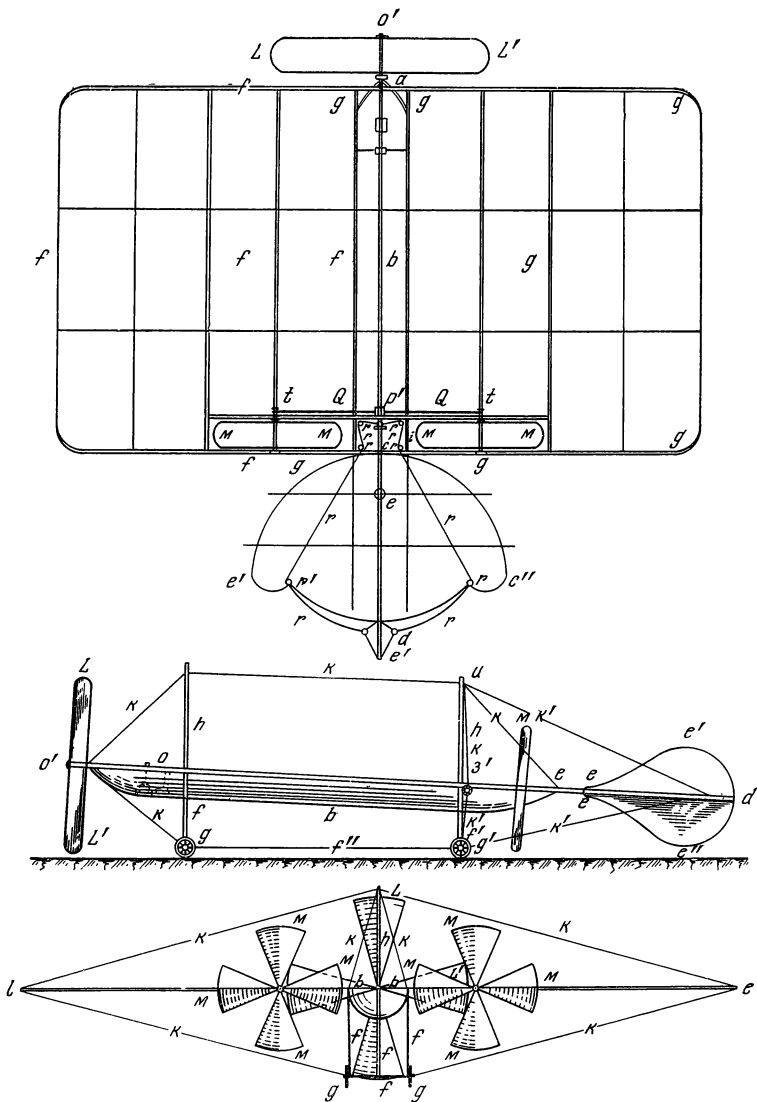


Рис. 14. Чертежи аэроплана А. Ф. Можайского

Наиболее трудным вопросом при реализации изобретения явилось создание легких, быстроходных и надежно работающих двигателей. Можайский спроектировал две паровые машины облегченной конструкции мощностью 10 и 20 л. с. и добился их изготовления в Англии фирмой «Арбекер — Хемкенс».

«Летом 1881 г. основные части самолета были готовы. К этому времени были привезены из Англии и паровые машины. Для сборки самолета на Красносельском военном поле изобретателю был отведен отдельный участок, который он огородил высоким деревянным забором. Вначале А. Ф. Можайский разрешал осматривать строящийся самолет, но незадолго до завершения сборки доступ посторонним лицам был закрыт. К середине 1882 г. самолет был построен»¹. Пользуясь современной терминологией, можно сказать, что самолет Можайского представлял собою моноплан с высокорасположенным крылом малого удлинения ($\lambda=1,5$) и хордой, равной 14,2 м; площадь крыла составляла около 370 м², а стартовый вес был равен 933 кг. Нагрузка на квадратный метр площади крыла была весьма малой — 2,7 кг/м², примерно на два порядка меньше, чем у современных конструкций самолетов, а нагрузка на лошадиную силу весьма большой — около 23 кг на 1 л. с. (современные пассажирские самолеты имеют нагрузку около 3—4 кг на 1 л. с.). Мощность двигателей была явно недостаточной для самолета такого веса.

Первый полет самолета Можайского был неудачным. Он отделился от земли и, накренившись на бок, налетел на высокий забор, повредив крыло и шасси. По-видимому, причиной неудачного полета было отсутствие элеронов (обеспечивающих поперечную устойчивость) и неуравновешенность реактивного момента переднего винта.

Главное инженерное управление (Военного министерства) увидело в этом неудачном полете лишь подтверждение своего отрицательного отношения к работам Можайского.

С 1886 г. Можайский, добившись незначительной финансовой поддержки Морского министерства, начал создавать более мощные паровые двигатели для своего аэроплана. Своих средств изобретатель уже не имел. Мно-

¹ Сборник документов АН СССР, стр. 12.

голетняя исследовательская и конструкторская работа, постройка полномасштабного аэроплана, испытания принудили Можайского заложить и продать не только принадлежавшие ему имения на Украине и в Вологодской губернии, но даже личные вещи — часы и обручальные кольца. Работы по созданию новых двигателей так и не были закончены. 20 марта 1890 г. выдающийся русский инженер А. Ф. Можайский скончался.

Так как работы над созданием аэроплана Можайского начиная с 1882 г. были засекречены, имеющиеся материалы не выявляют всего сделанного для русской авиации этим талантливым самородком. Можно поражаться и глубоко сочувствовать подлинной одержимости изобретателя ценнейшей идеей, открывавшей путь к одному из великих направлений технического прогресса в XX столетии. Можайский стоял на верном пути, предвосхитив своими исследованиями многие последующие научно-технические решения, пришедшие в авиацию двумя десятилетиями позднее.

Весьма большое значение для развития авиационной науки и техники в России имели труды гениального русского ученого Дмитрия Ивановича Менделеева. Его цикл статей, посвященных изучению свойств газов и паров, дал исходные данные для построения новой науки — аэродинамики. От физико-химических исследований газов он постепенно переходит к задачам метеорологии и аэродинамики. Для того чтобы освоить воздушный океан для целей прогноза погоды и воздушного сообщения, писал Менделеев, необходимо одновременно решать две задачи: изучать атмосферу во всей ее толще, создавая необходимую точную измерительную аппаратуру, а для подъема ее — летательные аппараты и воздушные суда, которые по их разработке откроют эру воздушных сообщений.

Особенно привлекали внимание Менделеева аппараты легче воздуха — аэростаты. В одной из своих записок в Военно-морское министерство он отмечал, что хотя оба рода воздухоплавания одинаково заслуживают внимания исследователя, но для практической потребности, какова, например, военная, только одни аэростаты обещают дать скорый и возможный результат, тем более что весь вопрос с теоретической стороны в главных чертах здесь окончательно ясен. Поэтому, писал Менделеев,

нужно обратиться в практике к опытам в большом виде над хорошо обдуманым *управляемым аэростатом*. Дмитрий Иванович Менделеев был убежден, что большим аэростатом управлять возможно в такой же мере, как кораблем.

В 1875 г. Менделеев предложил проект устройства большого высотного аэростата с герметической гондолой. *Это был проект первого в мире стратостата*. К идее стратостата Менделеев возвращался неоднократно и позднее в целом ряде своих научных работ.

Менделееву принадлежит капитальный труд по сопротивлению жидкостей (по теории лобового сопротивления, как сказали бы мы теперь). Первая часть этого труда вышла в свет в 1880 г. в Петербурге. В этой монографии были проанализированы все наиболее крупные работы по вопросам сопротивления движению тел в жидкостях или газах. Дмитрий Иванович разбирает ударную теорию Ньютона, струйную теорию Бернулли и Эйлера, волновую теорию и теорию сопротивления трения. Его анализ показал, что имеющиеся экспериментальные данные не подтверждают созданных теорий, да и правильно поставленных опытов было еще очень мало. Поэтому Менделеев считает важнейшей задачей накопление фактов путем систематических научно поставленных опытов. Следует подчеркнуть принципиальное и методологическое значение этих выводов Менделеева.

Как видно из материалов, опубликованных в советское время, в России XIX в. было довольно много изобретательских предложений по постройке летательных аппаратов. Но научной базы для сознательно направляемого конструирования еще не было создано. Не существовало такой научной базы и в других странах мира. Имелись отдельные, чисто интуитивные догадки, иногда подтверждаемые единичными опытами. Для аэропланов не был решен коренной вопрос об определении подъемной силы. Не существовало методов расчета тяги воздушных гребных винтов. Конструирование вели ощупью, с большими сомнениями в правильности избираемого решения. В этих условиях разумное и верное направление дальнейшей научно-исследовательской работы по вопросам авиации и воздухоплавания было дано в замечательной монографии Менделеева. Вот некоторые из его высказываний:

«Нужен действительно и будет решать дело разумный и твердый опыт, а молодое и неопытное умственное построение пойдет на поводу и в ту и в другую сторону, пока приученное опытом к верной дороге само не станет везти за собой или на себе всю сущность опытного знания, как обученная на поводу лошадь повезет. куда следует...

Наконец, надо же понять, что, устраивая первое колесо и доходя с ним до локомотива, человек сочинил род движения не как простой рабский подражатель природных форм, а как разумный творец, пользующийся в природе материалами и силами для своих собственных, общечеловеческих созданных целей, не имевшихся в виду у природы»¹.

«У научного изучения предметов,— говорил Менделеев,— две основные или конечные цели: предвидение и польза. Предвидеть или предсказать то, что еще неизвестно,— значит во всяком случае не менее открытия чего-либо существенного, но еще не описанного (например, новой страны или неизвестных явлений, тел, приемов промышленности и т. п.), а имеет то высшее значение, что указывает на возможность людям проникать в самую сущность вещей... Научные предсказания, основываясь на изучении, дают в обладание людское такие уверенности, при помощи которых можно направлять естество вещей в желаемую сторону и достигать того, что желаемое и ожидаемое приближается к настоящему и невидимое к видимому»².

Хорошо известно, что Д. И. Менделеев был дружен с выдающимся русским физиологом И. М. Сеченовым, что он сочувственно относился к нелегальным изданиям А. И. Герцена, встречался с Н. Г. Чернышевским. В работах и высказываниях Менделеева *очень хорошо видна тесная связь русской материалистической философии и передовой демократической естественнонаучной мысли.*

Выдающиеся по глубине и оригинальности прогрессивные идеи развития авиационной науки, смелые и тщательно продуманные технические проекты, замечательные по высокому мастерству и культуре исполнения конструкции самолетов, созданные после 1908 г., были бук-

¹ Д. И. Менделеев. Соч., т. VII, стр. 293—459.

² Д. И. Менделеев. Основы химии, т. I. М.—Л., ГНТИХЛ, 1947, стр. 354.

важно выстраданы передовой частью русских ученых и инженеров.

Перечислим величайшие открытия по теоретической, экспериментальной и технической (прикладной) аэродинамике, сделанные Н. Е. Жуковским, профессором Московского университета и Московского высшего технического училища¹. Он доказал основную теорему о подъемной силе профиля крыла, сформулировал гипотезу о подсчете циркуляции скорости вокруг крыла с острой задней кромкой, предложил три серии теоретических профилей (рули Жуковского, крылья типа инверсии параболы, крылья типа Антуанетт) и дал формулы для определения подъемной силы и линии ее действия для этих профилей. Жуковский создал аэродинамические лаборатории в университете и техническом училище. Ему принадлежат превосходные пионерские работы по созданию вихревой теории винта (пропеллера). Он же разработал строгую теорию определения летных характеристик аэроплана и провел исследование по устойчивости полета таких летательных аппаратов.

Задержать развитие науки и техники в России не могли никакие искусственные преграды. Препятствия побеждались талантом и настойчивостью, одаренностью и творческой дерзостью русских исследователей. Передовые люди русского дореволюционного общества приветствовали и поддерживали смелые научно-технические идеи русской науки.

¹ См.: А. А. Космодемьянский. Н. Е. Жуковский. М., «Просвещение», 1969. Аэродинамическим работам Жуковского посвящены главы VI (стр. 80—119), VII (стр. 119—132) и VIII (стр. 132—147).

Ракеты для космических полетов и скорый поезд на «воздушной подушке», предложенные К. Э. Циолковским

Есть высшая смелость: смелость изобретения, создания, где план обширный объемлется творческой мыслью.

А. С. Пушкин

Мы указывали, что в 80-х годах прошлого столетия боевые пороховые ракеты (на черном дымном порохе) были сняты с производства и перестали поступать в армию. Исследования по ракетной технике (и теоретические, и экспериментальные) считались бесполезными и ненужными для страны. Надо было обладать необычайной проницательностью и научной смелостью, чтобы вопреки мнениям и утверждениям авторитетов вести исследования по теории реактивного движения.

В конце XIX в. Циолковский возродил научно-технические изыскания по ракетной технике в России и предложил большое число оригинальных схем конструкций ракет. Существенно новым шагом в развитии ракетной техники были разработанные Циолковским схемы ракет дальнего действия и ракет для межпланетных путешествий с реактивными двигателями на жидком топливе. До работ Циолковского исследовались и предлагались для решения различных задач ракеты с пороховыми реактивными двигателями.

Применение жидкого топлива (горючего и окислителя) позволяет дать весьма рациональную конструкцию жидкостного реактивного двигателя с тонкими стенками, охлаждаемыми горючим (или окислителем), легкого и надежного в работе. Для ракет больших размеров такое решение было единственно приемлемым.

Ракета 1903 года. Первый тип ракеты дальнего действия был описан Циолковским в его работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами», опубликованной в 1903 г. Ракета представляет собой

металлическую продолговатую камеру, очень похожую на дирижабль или большое веретено. «Представим себе,— писал Циолковский,— такой снаряд: металлическая продолговатая камера (формы наименьшего сопротивления), снабженная светом, кислородом, поглотителями углекислоты, миазмов и других животных выделений, предназначенная не только для хранения разных физических приборов, но и для человека, управляющего камерой... Камера имеет большой запас веществ, которые при своем смешении тотчас же образуют взрывчатую массу. Вещества эти, правильно и равномерно взрываясь в определенном для того месте, текут в виде горючих газов по расширяющимся к концу трубам вроде рупора или духового музыкального инструмента... В одном узком конце трубы совершается смешение взрывчатых веществ: тут получают сжатые и пламенные газы. В другом расширенном ее конце они, сильно разредившись и охладившись от этого, вырываются наружу через раструбы с громадной относительной скоростью»¹.

На рис. 15 показаны объемы, занимаемые жидким водородом (горючее) и жидким кислородом (окислитель). Место их смешения (камера сгорания) обозначено на рис. 15 буквой А. Стенки сопла окружены кожухом с охлаждающей, быстро циркулирующей в нем жидкостью (одним из компонентов топлива).

Для управления полетом ракеты в верхних разреженных слоях атмосферы Циолковский рекомендовал два способа: графитовые рули, помещаемые в струе газов вблизи среза сопла реактивного двигателя, или поворачивание конца раструба (поворачивание сопла двигателя). Оба приема позволяют отклонять струю горючих газов от направления оси ракеты и создавать силу, перпендикулярную к направлению полета (управляющую силу). Следует отметить, что указанные предложения Циолковского нашли широкое применение и развитие в современной ракетной технике. Все известные нам жидкостные реактивные двигатели сконструированы с принудительным охлаждением стенок камеры и сопла одним из компонентов топлива. Охлаждение позволяет делать стенки достаточно тонкими и выдерживающими высокие температуры (до 3500—4000° С) в течение нескольких

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 73—74.

минут. Без охлаждения такие камеры прогорают за 2—3 сек.

Газовые рули, предложенные Циолковским, применяются для управления полетом ракет различных классов как в нашей стране, так и за рубежом. Если реактивная сила, развиваемая двигателем, превосходит силу тяжести ракеты в 1,5—3 раза, то в первые секунды полета, когда скорость ракеты невелика, воздушные рули будут неэффективны даже в плотных слоях атмосферы, и

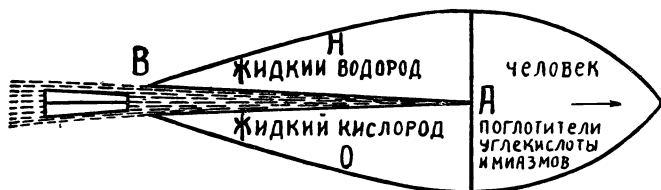


Рис. 15. Ракета Циолковского. Проект 1903 г. (с прямым соплом).
Чертеж К. Э. Циолковского

правильный полет ракеты обеспечивают при помощи газовых рулей. Обычно в струю реактивного двигателя помещают четыре графитовых руля, располагаемых в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Отклонение одной пары позволяет изменять направление полета в вертикальной плоскости, а отклонение второй пары изменяет направление полета в горизонтальной плоскости. Следовательно, действие газовых рулей аналогично действию рулей высоты и направления у самолета или планера, изменяющих угол тангажа и курса при полете. Для устранения вращения ракеты около собственной оси одна пара газовых рулей может отклоняться в разных направлениях; в этом случае их действие аналогично действию элеронов у самолета.

Газовые рули, помещаемые в струе горячих газов, уменьшают реактивную силу, поэтому при сравнительно продолжительном времени работы реактивного двигателя иногда оказывается более выгодным или поворачивать соответствующим автоматом весь двигатель, или ставить на ракету дополнительные (меньшего размера) поворачивающиеся двигатели, которые и служат для управления полетом ракеты. Для наглядности укажем, что дей-

ствии вертикальной пары газовых рулей аналогично действию руля на лодке, движущейся по поверхности воды. Следует также отметить, что каждому закону отклонения газовых рулей будет соответствовать вполне определенная траектория центра масс ракеты. Можно получать бесконечное разнообразие траекторий полета, если задавать различные «программы» изменения величины реактивной силы и ее направления.

*Ракета 1914 года*¹. Внешние очертания ее близки к ракете 1903 г., но устройство «взрывной трубы» (т. е. сопла) реактивного двигателя усложнено. В качестве горючего Циолковский рекомендует использовать углеводороды (например, керосин, бензин). Вот как описывается устройство этой ракеты (рис. 16). «Левая задняя кормовая часть ракеты состоит из двух камер, разделенных не обозначенной на чертеже перегородкой. Первая камера содержит жидкий, свободно испаряющийся кислород. Он имеет очень низкую температуру и окружает часть взрывной трубы и другие детали, подверженные высокой температуре. Другое отделение содержит углеводороды в жидком виде. Две черные точки внизу (почти посередине) означают поперечное сечение труб, доставляющих взрывной трубе взрывчатые материалы. От устья взрывной трубы (см. кругом двух точек) отходят две ветки с быстро мчащимися газами, которые увлекают и вталкивают жидкие элементы взрыва в устье, подобно инжектору Жиффара или пароструйному насосу... Взрывная труба делает несколько оборотов вдоль ракеты параллельно ее продольной оси и затем несколько оборотов перпендикулярно к этой оси. Цель — уменьшить вертлявость ракеты или облегчить ее управляемость»².

В этой схеме ракеты внешняя оболочка корпуса может охлаждаться жидким кислородом. Циолковский хорошо понимал трудность возвращения ракеты из космического пространства на землю, имея в виду, что при больших скоростях полета в плотных слоях атмосферы ракета может сгореть или разрушиться, подобно метеориту.

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 149, 150.

² Там же, стр. 149.

По существу этого предложения К. Э. Циолковский писал в брошюре «Звездоплавателям» (Калуга, 1930, стр. 31): «Западные математики доказали, что стабилизировать такая труба не будет...



К. Э. Циолковский в 1911 г.

В носовой части ракеты Циолковский располагал: запасы газов, необходимых для дыхания и поддержания нормальной жизнедеятельности пассажиров; приспособления для предохранения живых существ от действия больших перегрузок, возникающих при ускоренном (или замедленном) движении ракеты; приспособления для управления полетом; запасы пищи и воды; вещества, поглощающие углекислый газ, миазмы и вообще все вредные продукты дыхания. Очень интересна идея Циолковского о предохранении живых существ и человека от действия больших перегрузок («усиленной тяжести», по терминологии Циолковского) при помощи погруже-

Сначала мне этот вывод показался неверным (парадоксальным) Но скоро я должен был убедиться в полной его правильности, несмотря на кажущуюся и очевидную роль труб с завитками.

ния их в жидкость равной плотности. Впервые эта идея встречается в работе Циолковского 1891 г. Вот краткое описание простого опыта, убеждающего нас в правильности предложения Циолковского для однородных тел (тел одинаковой плотности). Возьмем нежную восковую фигуру, которая едва выдерживает собственный вес. Нальем в крепкий сосуд жидкость такой же плотности, как и воск, и погрузим в эту жидкость фигуру. Теперь посредством центробежной машины вызовем перегруз-

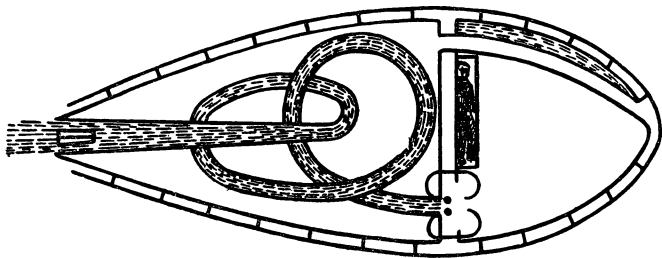


Рис. 16. Ракета Циолковского (с кривым соплом). Проект 1914 г. Чертеж К. Э. Циолковского

ки, превышающие силу тяжести во много раз. Сосуд, если недостаточно крепок, может разрушиться, но восковая фигура в жидкости будет сохраняться целой. «Природа давно пользуется этим приемом,— пишет Циолковский,— погружая зародыш животных, их мозги и другие слабые части в жидкость. Так она предохраняет их от всяких повреждений. Человек же пока мало использовал эту мысль»¹.

Следует отметить, что для тел, плотность которых по всему объему неодинакова (тела неоднородные), влияние перегрузки будет проявляться и при погружении тела в жидкость. Так, если в восковую фигуру заделать свинцовые дробинки, то при больших перегрузках все они выползут из восковой фигуры в жидкость. Но, по-видимому, несомненно, что в жидкости человек может выдержать большие перегрузки, чем, например, в специальном кресле.

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т II, стр. 170.

Ракета 1915 года. В работе Я. И. Перельмана «Межпланетные путешествия», изданной в 1915 г. в Петрограде, помещены чертеж и описание ракеты, выполненные Циолковским (рис. 17).

«Труба *A* и камера *B* из прочного тугоплавкого металла покрыты внутри еще более тугоплавким материалом, например, вольфрамом. *C* и *D* — насосы, накачивающие жидкий кислород и водород в камеру взрыва. Ракета имеет еще вторую наружную тугоплавкую оболочку»



Рис. 17. Ракета Циолковского — 1915 г. Чертеж К. Э. Циолковского

ку. Между обеими оболочками есть промежуток, в который устремляется испаряющийся жидкий кислород в виде очень холодного газа, он препятствует чрезмерному нагреванию обеих оболочек от трения при быстром движении ракеты в атмосфере. Жидкий кислород и такой же водород разделены друг от друга непроницаемой оболочкой (не изображенной на рис. 17). *E* — труба, отводящая испаренный холодный кислород в промежуток между двумя оболочками, он вытекает наружу через отверстие *K*. У отверстия трубы имеется (не изображенный на рис. 17) руль из двух взаимно перпендикулярных плоскостей для управления ракетой. Вырывающиеся разреженные и охлажденные газы благодаря этим рулям изменяют направление своего движения и, таким образом, поворачивают ракету»¹.

Составные ракеты. В работах Циолковского, посвященных рассмотрению составных ракет или ракетных поез-

¹ Н. А. Рынин. К. Э. Циолковский, его жизнь, работы и ракеты, стр. 41.

дов, не дано чертежей с общими видами конструкций, но по приведенным в работах описаниям можно утверждать, что Циолковский предлагал конструировать два типа ракетных поездов. Первый тип поезда подобен железнодорожному, когда паровоз толкает состав сзади. Представим себе две ракеты, сцепленные последовательно одна за другой (рис. 18). Такой поезд толкается сначала нижней — хвостовой ракетой (работает двигатель первой ступени). После использования запасов ее топлива ракета отцепляется и падает на землю.

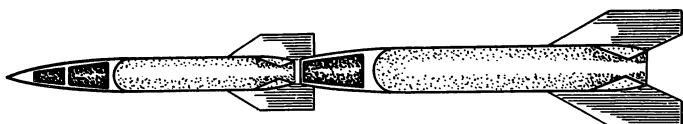


Рис. 18. Схема двухступенчатой ракеты на твердом топливе.

Далее начинает работать двигатель второй ракеты. После полного использования топлива этой ракеты она получает достаточно высокую скорость благодаря работе двигателей первой ступени.

Циолковский доказал расчетами наиболее выгодное распределение весов отдельных ракет, входящих в поезд¹.

Приведем в качестве примера вычисление стартовых весов многоступенчатых ракет, считая $V_e = 2500$ м/сек, а отношение массы ракеты без топлива к массе ракеты с топливом, равным 5; вес полезного груза пусть будет 1 т. В этом случае скорость одноступенчатой ракеты будет

$$v_{\max} = 2,5 \ln 5 = 2,5 \cdot 1,6 = 4 \text{ км/сек.}$$

Вес конструкции ракеты без топлива также примем равным 1 т. Следовательно, для того чтобы полезному грузу в 1 т сообщить скорость в 4 км/сек, требуется ракета со стартовым весом 7 т.

Приведем результаты расчетов для ряда многоступенчатых ракет, полагая конструктивное совершенство последовательных ступеней одинаковым (табл. 1).

¹ Точное решение задачи об оптимальном распределении весов последовательных ступеней многоступенчатой ракеты дано в Приложении В.

Таблица 1

Максимальная скорость, км/сек	Число ступеней	Стартовый вес ракеты (в тоннах) для полезного груза 1 т
4	1	7
8	2	49
12	3	343
16	4	2 401
20	5	16 807

Из приведенной таблицы можно усмотреть следующую закономерность. В то время как максимальная скорость, которую можно получить в случае многоступенчатой ракеты, возрастает в арифметической прогрессии, полный стартовый вес возрастает в геометрической прогрессии¹.

Следует подчеркнуть здесь принципиальное значение для совершенствования ракет, предназначенных для межпланетных путешествий, увеличения относительной скорости отбрасываемых частиц.

Второй тип составной ракеты, предложенной Циолковским в 1935 г., назван им эскадрилей ракет, которые соединяются как бревна плота на реке. При старте все четыре реактивных двигателя начинают работать одновременно. Когда каждый из них израсходует половину запаса топлива, две ракеты (например, по одной справа и слева) перельют свой неизрасходованный запас топлива в полупустые емкости оставшихся двух ракет (рис. 19) и отделятся от эскадрильи. Дальнейший полет продолжают две ракеты с полностью заправленными баками. Израсходовав половину своего топлива, одна из ракет эскадрильи переливает оставшуюся половину в ракету, предназначенную для достижения цели путешествия. Преимущество эскадрильи состоит в том, что все ракеты одинаковы. Переливание компонен-

¹ М. Фертрегг. Основы космонавтики. М., «Просвещение», 1969, стр. 137.



К. Э. Циолковский в 1927 г.

тов топлива в полете является хотя и трудной, но вполне технически разрешимой задачей.

Создание разумной конструкции ракетного поезда является одной из наиболее актуальных проблем в настоящее время, и многие научно-технические журналы систематически публикуют статьи ученых и инженеров,

посвященные развитию этих грандиозных по замыслу проектов Циолковского.

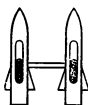
Составная пассажирская ракета. Описание этой ракеты Циолковский дает в своей книге «Вне Земли», изданной в Калуге в 1920 г. Он описывает события, происходящие в 2017 г., и поэтому ракету называет «составной пассажирской ракетой 2017 года». Вот подробное описание ракеты 2017 года.

«Составная пассажирская ракета состояла из двадцати простых ракет, причем каждая простая заключала в себе запас взрывчатых веществ, взрывную камеру с самодействующим инжектором, взрывную трубу и прочее. Однако среднее (двадцать первое) отделение не имело реактивного прибора и служило каюткомпанией; оно имело

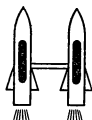
двадцать метров длины и четыре метра в диаметре. Длина всей ракеты 100 метров, диаметр 4 метра. Форма ее походила на гигантское веретено... Взрывные трубы были завиты спиралью и постепенно расширялись к выходному отверстию. Извивы одних были расположены поперек длины ракеты, других — вдоль. Газы, вращаясь во время взрыва в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, придавали огромную устойчивость ракете¹. Она не вихляла, как дурно управляемая лодка, а летела стрелой. Но расширенные концы всех труб, выходя наружу сбоку



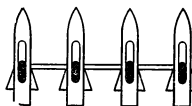
После переливания бак последней ракеты заправлен полностью — эта ракета достигает цели



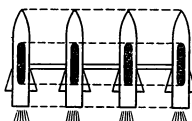
Топливо у обеих ракет израсходовано наполовину



Баки двух ракет заправлены полностью



Топливо у всех четырех ракет израсходовано наполовину



Баки четырех ракет заправлены полностью

Рис. 19. Схема составной ракеты (эскадрилья ракет К. Э. Циолковского)

¹ К. Э. Циолковский. Звездоплавателям. Калуга, 1930, стр. 31,

ракеты, все имели почти одно направление и обращены в одну сторону. Ряд выходных отверстий составлял винтообразную линию кругом прибора.

Камеры взрывания и трубы, составляющие их продолжение, были сооружены из весьма тугоплавких и прочных веществ, вроде вольфрама. Также и инжекторы. Весь взрывной механизм окружался камерой с испаряющейся жидкостью, температура которой была поэтому достаточно низкой. Эта жидкость была одним из элементов взрывания. Другая жидкость помещалась в других изолированных отделениях. Наружная оболочка ракеты состояла из трех слоев. Внутренний слой — прочный металлический с окнами из кварца, прикрытыми еще слоем обыкновенного стекла, с дверями, герметически закрывающимися. Второй — тугоплавкий, но почти не проводящий тепло. Третий — наружный — представлял очень тугоплавкую, но довольно тонкую металлическую оболочку. Во время стремительного движения *ракеты* в атмосфере наружная оболочка накалялась до бела, но теплота эта излучалась в пространство, не проникая сильно через другие оболочки в нутро. Этому еще мешал холодный газ, непрерывно циркулирующий между двумя крайними оболочками, проникая рыхлую малотеплопроводную среднюю прокладку. Сила взрывания могла регулироваться с помощью сложных инжекторов, также прекращаться и возобновляться. Этим и другими способами можно было изменять направление взрывания.

Температура внутри *ракеты* регулировалась по желанию с помощью кранов, пропускающих холодный газ через среднюю оболочку ракеты. Из особых резервуаров выделялся кислород, необходимый для дыхания. Другие снаряды были назначены для поглощения продуктов выделения кожи и легких человека. Все это также регулировалось по надобности. Были камеры с запасами для пищи и воды. Были особые скафандры, которые надевались при выходе в пустое пространство и вхождении в чужую атмосферу чуждой планеты. Было множество инструментов и приборов, имеющих известное или специальное назначение. Были камеры с жидкостями для погружения в них путешествующих во время усиленной относительной тяжести. Погруженные в них люди дышали через трубку, выходящую в воздушную атмосфе-

ру ракеты. Жидкость уничтожала их вес, как бы он ни был велик в краткое время взрывания. Люди совершенно свободно шевелили своими членами, даже не чувствовали их зеса, как он чувствуется на земле: они были подобны купающимся или прованскому маслу в вине при опыте Плато. Эта легкость и свобода движений позволяла им превосходно управлять всеми регуляторами ракеты, следить за температурой, силою вращения, направлением движения и т. д. Рукоятки, проведенные к ним в жидкость, давали им возможность все это делать. Кроме того, был особый автоматический управитель, на котором, на несколько минут, зарегистрировалось все управление снарядом. На то время можно было не касаться ручек приборов: они сами собой делали все, что им заранее «приказано». Взятые были запасы семян разных плодов, овощей и хлебов для разведения их в особых оранжереях, выпускаемых в пустоту. Также заготовлены и строительные элементы этих оранжерей.

Объем ракеты составлял около 800 куб. метров. Она могла бы вместить 800 тонн воды (тонна — 61 пуд). Меньше третьей доли этого объема (240 тонн) было занято двумя постепенно взрывающимися жидкостями. Этой массы было довольно, чтобы 50 раз придать ракете скорость, достаточную для удаления снаряда навеки от солнечной системы, и вновь 50 раз потерять ее. Такова была сила взрывания этих материалов. Вес оболочки, или самого корпуса ракеты со всеми принадлежностями, был равен 40 тоннам. Запасы, инструменты, оранжереи составляли 30 тонн. Люди и остальное — менее 10 тонн. Объем для помещения людей, т. е. заполненного разреженным кислородом пространства, составлял около 400 куб. метров. Предполагалось отправить в путь 20 человек. На каждого доставалось помещение в 20 куб. метров или около двух кубических сажень, что при постоянно очищаемой атмосфере было в высшей степени комфортабельно. Все отделения сообщались между собой небольшими проходами. Средний объем каждого отсека составлял около 32 куб. метров. Но половина этого объема была занята необходимыми вещами и взрывающейся массой (компонентами топлива). Оставалось на каждое отделение около 16 куб. метров. Средние отделения были больше, и каждое могло слу-

жить отличным помещением для одного человека. Одно отделение, в наиболее толстой части ракеты, имело в длину 20 метров и служило залом собраний. На боковых сторонах этих отделений были расположены окна с прозрачными стеклами, закрываемыми наружными и внутренними ставнями»¹.

Для получения эффекта ускорения, которое сообщало бы людям в ракете привычное ощущение тяжести и направления верха и низа, Циолковский предусматривает сообщение ракете вращательного движения около поперечной оси, проходящей через центр масс. Если ракета будет совершать, например, один оборот в минуту, то ускорение в наиболее удаленных ее точках будет примерно в 20 раз меньше земного.

Отопление ракеты производится при помощи солнечных лучей, проникающих через окна, а также за счет нагревания солнцем оболочки ракеты. Для регулирования температуры внутри ракеты Циолковский предусматривает изменение формы и окраски внешней поверхности ракеты. При помощи сферических зеркал можно получать очень высокие температуры и, следовательно, использовать энергию солнца для производства металлургических работ.

Ракеты, предложенные Циолковским, не были оформлены автором в виде эскизных и предэскизных проектов, привычных современному инженеру-ракетостроителю. В сущности это были заявки на новые идеи. Основное внимание Циолковский уделил научно-техническим расчетам, доказывающим осуществимость этих предложений. Расчеты потребовали создания и строгой формулировки основных принципов новой науки — ракетодинамики.

В 1927 г. в Калуге вышла в свет работа Циолковского «Сопrotивление воздуха и скорый поезд». По современной терминологии это — поезд на воздушной подушке. Вот как разъясняет Константин Эдуардович эту совершенно оригинальную идею: «Трение поезда почти уничтожается избытком давления воздуха, находящегося между полом вагона и плотно прилегающим к нему железнодорожным полотном. Необходима работа для

¹ К. Э. Циолковский. Путь к звездам. М., Изд-во АН СССР, 1960, стр. 140.

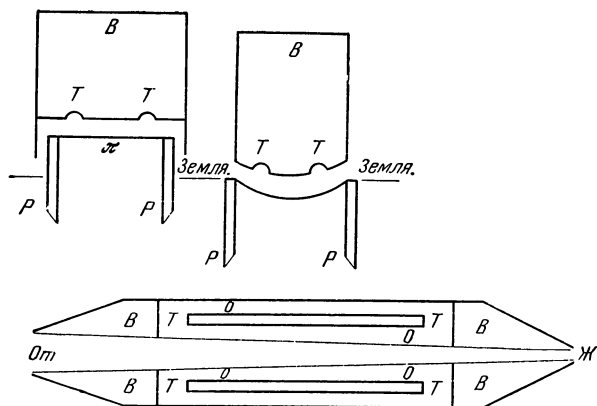


Рис. 20. Чертежи К. Э. Циолковского, поясняющие его идею поезда на воздушной подушке.

накачивания воздуха, который непрерывно утекает по краям щели между вагоном и путем. Она велика, между тем как подъемная сила поезда может быть громадна. Так, если сверхдавление в одну десятую атмосферы, то на каждый м^2 основания вагона придется подъемная сила в одну тонну. Это было в 5 раз больше, чем необходимо для легких вагонов.

Не нужно, конечно, колес и смазки. Тяга поддерживается задним движением вырывающегося из отверстия вагона воздуха. Работа накачивания тут также довольно умеренна (если вагон имеет хорошую, легко обтекаемую форму птицы или рыбы), является возможность получать огромные скорости»¹.

Приведем краткое описание одного из вариантов скорого поезда Циолковского. На рис. 20 изображены поперечный разрез и план такого поезда (буквенные обозначения совпадают с принятыми в опубликованной в 1927 г. работе). В днище вагона *В* устроены полутрубы *ТТ*. Полотно пути *П* составляет одну плоскость с рельсами *Р* и *Р*. В полутрубы накачивается воздух, который распространяется в узкой щели между днищем вагона и полотном дороги. Он поднимает вагон

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. IV. М., «Наука», 1964, стр. 324.

на несколько миллиметров и вытекает по краям основания вагона. Днище вагона делается рифленным, что замедляет утечку газа и, следовательно, уменьшает работу для его накачивания. Вагон уже не трется о полотно дороги, а висит на тонком слое воздуха (воздушной подушке) и испытывает только сопротивление трения. Воздух поступает через переднее сопло *Ж* (у Циолковского сопло называется жерлом) вагона, отчасти вытекает через щели вокруг него и заднее отверстие *От* или диффузор, дает реактивную силу (тягу) и заставляет вагон двигаться. Спереди и сзади вагону приданы очертания *В*, уменьшающие сопротивление воздуха. Можно ввести дополнительный мотор, накачивающий воздух в диффузор *От*, что позволит регулировать реактивную силу в нужных пределах. Для описанного здесь варианта Циолковский рекомендует пристыковать к рельсам закраины.

Идея Циолковского о движущихся аппаратах на воздушной подушке получила широкое развитие. За последние 20—25 лет были внесены радикальные усовершенствования, позволяющие таким аппаратам двигаться над поверхностью воды и по бездорожью. Главное усовершенствование состоит в том, что по периметру плоского днища вагона (или другого транспортного аппарата) прикрепляется прямоугольная полоса из прочной (обычно синтетической) ткани, образуя гибкий параллелепипед («юбку», на языке инженеров). В этот параллелепипед накачивается воздух и создается давление, немного (примерно на 5%) превышающее атмосферное. Воздух вытекает по нижней кромке «юбки». Такие аппараты эксплуатируются в СССР (Тюменская область). В Англии суда на воздушной подушке более пяти лет курсируют через Ла-Манш, перевозя пассажиров и автомобили. Длина «юбки» может достигать десятков сантиметров (а не миллиметров, как думал Циолковский).

В 1926 и 1927 гг. в Калуге вышли две замечательные работы Циолковского: «Исследование мировых пространств реактивными приборами» (переиздание работ 1903 и 1911 гг. с некоторыми изменениями и дополнениями) и «Сопротивление воздуха и скорый поезд». Но упрямство Циолковского, настаивавшего на замене в формулах латинских букв русскими, делало указанные

работы непонятными, как бы зашифрованными. Например, формула для аэродинамического лобового сопротивления пластинки записывается во всех учебниках и журнальных статьях в следующем виде:

$$X = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2,$$

где X — сила сопротивления, ρ — плотность среды, S — характерная площадь (обычно площадь пластинки), v — скорость пластинки, C_x — безразмерный коэффициент сопротивления.

У Циолковского эта же формула выглядит так:

$$C_{пл} = \text{Дл Ш. Пл. в.} \frac{C_k^2}{2} K_{пл},$$

и, конечно, переучиваться с общепринятого написания формул на новое (по-моему, неудачное и громоздкое) мало кто хотел.

В 40—50-х годах мы предполагали, что в калужских типографиях не было латинского шрифта и обозначения Циолковского родились по необходимости. Но эта наша гипотеза оказалась несостоятельной. Вот что писал по этому поводу Циолковский:

«Объясняю, почему я употребляю в русских сочинениях русские буквы в формулах. *Думаю, что математика проникает во все области знания.* Формулы содержат сокращенные обозначения величин, т. е. означают слова, а нередко и длинные фразы. Язык формул так же сложен, как и обыкновенный язык. Было бы недурно употреблять для этого латинский язык, как известный большинству ученых. Но этот язык мертвый. На нем никто теперь не говорит и не пишет. Поэтому он отстал и не может выражать новых научных и общественных понятий. Какой же язык взять? Общепонятный пока не укрепился и не развился достаточно. Французский будет непонятен русским, немцам и проч. Да и нужно его хорошо знать, иначе не подберешь очень сложных обозначений величин. Пока всякий народ может брать для формул только свой родной язык и его алфавит. Когда разовьется и установится общечеловеческий язык, тогда, конечно, и текст, и формулы можно писать на этом языке.

У нас в старину русский язык мешали с французским. Не смешно ли это! Так же смешно мешать разные алфавиты и языки, когда можно употреблять один.

При простых формулах неудобство это не составляет особенного затруднения. Например, скорость (v), время (t), длина (l) и т. д. Но в сложных вычислениях скорость может быть десяти сортов. Обозначать так: v_1, v_2, v_3 иногда бессмысленно, потому что каждая скорость имеет свою характеристику и *должна быть обозначена буквами характеризующего слова*. Латинские обозначения оставляю только для обозначения «логарифмирования»¹.

У нас сложилось теперь твердое убеждение, что русифицированные обозначения в формулах Циолковский начал применять еще в XIX столетии. В статьях, направляемых в научные журналы, написание формул общепринятое, так как работы с обозначениями Циолковского печатать никто бы не стал.

¹ К. Э. Циолковский. Общественная организация человечества, изд. автора. Калуга, 1928, стр. I—II.

Глава шестая

Новая наука — ракетодинамика

Нет ничего более практичного,
чем хорошая теория.

Л. Б о л ь ц м а н

Современная ракетодинамика — это обширная наука о движении летательных аппаратов (ракет, реактивных самолетов, искусственных спутников Земли, межпланетных станций, пилотируемых кораблей, орбитальных станций и других объектов), снабженных реактивными двигателями. Главной задачей этой науки является определение летных характеристик объектов как на участках траектории при работающих двигателях (активные участки полета), так и на участках — при выключенных двигателях (пассивные участки полета).

Летные характеристики реактивных летательных аппаратов содержат в себе основные данные о движении центра тяжести аппарата и количественное описание его движения около центра тяжести. При проектировании ракет различных классов и назначений весьма важно знать, какую траекторию будет описывать центр тяжести ракеты, какие скорости и ускорения будет она иметь на активном участке полета, как нужно расходовать (сжигать) в реактивном двигателе имеющийся в баках ракеты запас топлива, для того чтобы ракета имела наибольшую дальность полета, достигала заданной цели в минимальное время, получала на заданной высоте максимальную скорость. Во многих случаях движение центра тяжести ракеты зависит от случайных небольших возмущений, которые отклоняют траекторию ракеты от расчетной или запрограммированной траектории и вызывают так называемое рассеивание траекторий полета и, следовательно, неточное попадание

в заданную цель. Теория рассеивания при изучении полета ракет является важной главой ракетодинамики.

Закономерности движения ракеты около центра тяжести характеризуют динамическую устойчивость ракеты и ее способность реагировать на действие рулей. Весьма важным является изучение управляемости и маневренности ракеты, выявление ее располагаемых перегрузок на различных высотах полета, определение влияния жидкого топлива в баках на стабилизацию и управляемость ракеты, а также изучение упругих колебаний крыльев, стабилизаторов и корпуса ракеты, вызываемых возмущающими воздействиями воздушного потока и реактивного двигателя.

При выявлении специфических задач современной ракетодинамики (ведущей свое начало от Циолковского) мы рассмотрим два основных класса современных ракет: неуправляемые, управляемые.

Хорошо известными примерами неуправляемых ракет являются советские пороховые ракеты периода второй мировой войны («Катюши») или метеорологические ракеты МР-1, применявшиеся в нашей стране для исследования верхних слоев атмосферы в течение Международного геофизического года. В числе первых управляемых ракет можно назвать немецкую баллистическую ракету ФАУ-2 и американскую зенитную ракету Найк-Аякс. В нашей стране созданы весьма совершенные управляемые ракеты-носители для космических кораблей «Восток», «Восход» и «Союз».

Мы хотим привести здесь аргументацию К. Э. Циолковского преимуществ ракет при полетах в космос. Вот итог его размышлений (он сравнивает ракету с пушкой, полагая, что ядро пушки есть космический корабль, а у ракеты полезным грузом является кабина пилота с системами жизнеобеспечения);

— ракета много легче пушки (если, конечно, иметь в виду большие скорости полета);

— ракета дешевле пушки;

— ускорение ракеты можно регулировать и, следовательно, можно иметь для путешественников (космонавтов) приемлемые перегрузки;

— вектор скорости ракеты можно изменять по заданной программе. Реактивная сила (регулируемая) может

обеспечить мягкую посадку на небесные тела, не имеющие атмосферы;

— в плотных слоях атмосферы Земли (при разгоне) скорость ракеты мала, и потери энергии на преодоление аэродинамической силы сопротивления могут быть существенно меньше, чем у пушечного ядра. При малых и умеренных скоростях корпус ракеты не нагревается.

Ракетодинамика неуправляемых ракет аналогична внешней баллистике артиллерийского снаряда. Иногда принимают, что активный участок полета неуправляемой ракеты аналогичен весьма длинному стволу артиллерийского орудия. Ракетодинамика неуправляемых ракет, так же как и внешняя баллистика артиллерийских снарядов, состоит из следующих трех основных разделов: теории движения центра тяжести ракеты; теории движения ракеты около центра тяжести; экспериментальной ракетодинамики.

Ракетодинамика управляемых ракет, таких, как зенитные управляемые ракеты, предназначенных для стрельбы с земли по самолетам противника, ракетодинамика баллистических управляемых ракет, предназначенных для стрельбы по наземным неподвижным целям, и управляемых ракет, подвешиваемых под самолет и предназначенных для стрельбы с самолета по самолету, по своему содержанию и применяемым методам исследования гораздо ближе к динамике полета самолета — хорошо известной науке, основанной еще Н. Е. Жуковским.

В ракетодинамике управляемых ракет можно также выделить теорию движения центра тяжести ракеты и экспериментальную ракетодинамику, аналогичные по содержанию соответствующим разделам ракетодинамики неуправляемых ракет. Однако движение управляемой ракеты около центра тяжести, как правило, нельзя отделить от исследования движения самого центра тяжести. Вопросы динамической устойчивости сильно усложняются благодаря применению на борту ракеты автопилота, который исполняет передаваемые команды. Для зенитных управляемых ракет, у которых (часто) радиолокатор наведения «видит» одновременно на индикаторе и ракету и цель, команды по каналам автопилота (тангаж, рысканье, крен) передаются по радио. Автопилот для зенитных управляемых ракет и ракет для стрельбы с самолета по самолету входит в состав бортовой аппаратуры

ракеты и предназначается для исполнения противоречивых требований. С одной стороны, он должен хорошо *стабилизировать ракету*, возвращая ее в заданное положение, при всякого рода случайных возмущениях (например, порывах ветра, перемещающихся по корпусу ракеты, ударных волнах и др.), а с другой стороны, автопилот должен *обеспечить высокую маневренность* ракеты при получении команд, т. е. должен быстро изменять данное положение ракеты на другое.

К. Э. Циолковский сделал фундаментальные открытия в теории движения центра тяжести ракет (т. е. в теории поступательных движений ракет). Хотя Константин Эдуардович в ряде своих статей и указывал на целесообразность применения гироскопов для стабилизации ракеты при ее полете в свободном пространстве, но математических расчетов в этом направлении он, по-видимому, не проводил.

При исследовании движения центра тяжести ракеты (или поступательного движения ракеты как твердого тела), стартующей с поверхности Земли, принимают во внимание следующие силы, действующие на ракету в полете:

— силу тяжести, или силу притяжения ракеты Землей (а иногда силы притяжения Луны, Солнца и других планет солнечной системы);

— аэродинамические силы, обусловленные наличием атмосферы (подъемная сила и сила лобового сопротивления);

— реактивную силу.

Рассмотрим более подробно указанные силы. Законы действия силы тяжести, или силы притяжения, можно дать в совершенно строгой математической трактовке. Действие силы притяжения, или всемирного тяготения, было обнаружено И. Ньютоном при рассмотрении законов падения тел и тщательном анализе движения Луны. Закон тяготения, открытый Ньютоном, гласит: каждые две материальные частицы во Вселенной притягивают друг друга с силой, действующей по прямой, их соединяющей, напряжение (величина) которой изменяется прямо пропорционально произведению их масс и обратно пропорционально квадрату их взаимного расстояния.

Далее было доказано (в предположении), что Земля — шар, плотность сферических слоев которого зависит только от расстояния до центра Земли, что Земля притягивает любую внешнюю материальную частицу (материальную точку) массы m , как точка, расположенная в центре Земли и имеющая массу M , равную массе Земли. Таким образом, если расстояние частицы от центра Земли обозначить через R , то величина силы притяжения Земли, действующей на эту частицу, будет определяться по формуле

$$F = f \frac{mM}{R^2},$$

где $f = 6,67 \cdot 10^{-8}$ см³/г·сек² — универсальная постоянная тяготения. Обозначая произведение fM через k , формулу для силы тяготения можно написать в виде

$$F = km/R^2.$$

Ракету, движущуюся в поле тяготения Земли, мы можем принять за материальную частицу, масса которой равна массе ракеты. Равнодействующая сил тяготения, действующих на отдельные части ракеты, будет приложена к центру тяжести ракеты; на поверхности Земли эта равнодействующая сила равна весу ракеты $P = mg_0$, где m — масса ракеты, а g_0 — ускорение силы тяжести на поверхности Земли; среднее значение этого ускорения равно 9,81 м/сек². Пусть радиус Земли равен R_0 ; тогда формулу для силы тяготения (силы притяжения) на поверхности Земли можно представить в следующем виде:

$$F = km/R^2;$$

ясно, что

$$F = P = mg_0.$$

Сравнивая значения F и P , мы легко найдем, что $k = g_0 R_0^2$ и, следовательно, сила тяготения для ракеты, находящейся на расстоянии R от центра Земли, будет

$$F = mg_0 \frac{R_0^2}{R^2} = P \frac{R_0^2}{R^2}.$$

Полученная формула показывает, что ракета, весящая на поверхности Земли 100 т, на высоте, равной радиусу Земли ($R_0 = 6371$ км), будет весить (на пружинных ве-

сах) только 25 т, а на высоте $R=5R_0$, т. е. на расстоянии около 35 855 км от центра Земли, всего 4 т. Поле тяготения Земли с динамической точки зрения можно характеризовать двумя скоростями: скоростью искусственного спутника и скоростью освобождения, или параболической скоростью. Скорость искусственного спутника, летающего по круговой орбите с радиусом, равным радиусу Земли, называют *первой космической скоростью*. Эта скорость v_1 определяется по формуле

$$v_1 = \sqrt{g_0 R_0};$$

следовательно, $v_1=7912$ м/сек, или приблизительно 8000 м/сек. Скорость освобождения v_2 позволяет ракете удалиться от Земли и стать спутником Солнца. Эта скорость, называемая *второй космической скоростью*, определяется по формуле

$$v_2 = \sqrt{2g_0 R_0};$$

следовательно, $v_2=11\,189$ м/сек, или приблизительно 11,2 км/сек. Доказательство правильности указанных формул мы дадим в Приложении В.

Если полет ракеты происходит вблизи поверхности, то R мало отличается от R_0 и силу притяжения можно считать постоянной, не зависящей от высоты. Для реактивных гражданских самолетов это можно принимать всегда.

Так как Земля вращается около своей оси, то сила тяготения благодаря центробежной силе будет изменяться в зависимости от географической широты места. Скорость v_e точек Земли, лежащих на каком-либо меридиане, можно определять по формуле

$$v_e = 465 \cos \varphi \text{ м/сек,}$$

где φ — широта места в градусах.

Значения ускорения силы тяжести (в см/сек²) в зависимости от широты места даны ниже.

0° экватор	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90° полюс
978,03	978,19	978,63	979,32	980,17	981,07	981,91	981,61	983,06	983,21

Аэродинамические силы, действующие на ракету в полете, зависят от геометрической формы ракеты, плотности атмосферы и скорости полета. Для большинства современных ракет, имеющих хорошо обтекаемую форму, можно выделить сравнительно небольшую область вблизи скорости звука (трансзвуковую область), где аэродинамические силы изменяются в зависимости от скорости полета по законам, еще не открытым теоретически. В трансзвуковой области аэродинамические силы для каждого объекта определяются экспериментально продувками в аэродинамических трубах. Для дозвуковых скоростей полета (примерно до 270—280 м/сек) и сверхзвуковых скоростей (от 400 м/сек и выше) аэродинамические силы растут пропорционально квадрату скорости полета.

Для дозвуковых скоростей полета (порядка 0,5—0,7 скорости звука) силу лобового сопротивления ракеты можно представить в виде

$$X = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2,$$

где X — сила лобового сопротивления в килограммах, C_x — коэффициент лобового сопротивления ракеты (отвлеченное число), изменяющийся в зависимости от угла атаки, ρ — плотность воздуха; S — характерная площадь (площадь крыла у крылатой ракеты или площадь поперечного сечения корпуса бескрылой ракеты в м²); v — скорость полета в метрах в секунду. Для сверхзвуковых скоростей полета ($v > 400$ м/сек) структура формулы для силы лобового сопротивления останется прежней, но коэффициент лобового сопротивления $C_x^{(1)}$ будет больше, чем C_x в дозвуковой области. Если ракета летит горизонтально на данной высоте, то произведение $\frac{1}{2} C_x \rho S$ будет постоянным, и силу лобового сопротивления в дозвуковой области можно представить математически в виде

$$X = k_1 v^2,$$

а в сверхзвуковой области в виде

$$X = k_2 v^2,$$

причем $k_2 > k_1$.

Подъемную силу можно представить математически в следующей форме:

$$Y = \frac{1}{2} C_y \rho S v^2,$$

где C_y — коэффициент подъемной силы (отвлеченное число), изменяющийся в зависимости от угла атаки; Y — подъемная сила в килограммах, ρ , S , v , имеют тот же смысл, что и в формуле для силы лобового сопротивления. Отношение $K = C_y/C_x$ называют аэродинамическим качеством (летательного) аппарата. В дозвуковой и сверхзвуковой областях качество можно считать зависящим только от угла атаки; в трансзвуковой области K сильно убывает (вообще K зависит от скорости полета). При сверхзвуковых скоростях качество летательного аппарата значительно меньше, чем при дозвуковых скоростях. Так, например, если аэродинамическое качество дозвукового бомбардировщика может достигать 14—16, то аэродинамическое качество сверхзвукового бомбардировщика составляет всего 6—6,5.

Приведем совершенно кратко некоторые данные об аэродинамических силах для гиперзвуковых (т. е. скоростей, больших 7—8 скоростей звука) и околокосмических скоростей полета. Простые интерполяционные формулы для коэффициентов лобового сопротивления C_x и подъемной силы C_y формируются на основе (возрожденной) теории Ньютона¹. Эта теория отражает особенности физических процессов обтекания, для которых скорость полета больше 10 скоростей звука, достаточно правильно. В соответствии с современными теоретическими и экспериментальными данными допустим, что

$$C_x = a + b\alpha^3, \quad C_y = k\alpha^2,$$

где α — угол атаки, a , b , k — постоянные числа. Исключая из этих уравнений α , легко находим

$$C_x = a + b \left(\frac{C_y}{k} \right)^{3/2} = C_{x_0} + AC_y^{3/2},$$

где $A = b/k^{3/2}$, C_{x_0} — коэффициент сопротивления при $C_y = 0$. Полученную зависимость $C_x = C_x(C_y)$ называют

¹ См.: А. П. Мельников. Основы аэродинамики больших скоростей. М., Воениздат, 1961.

уравнением поляры летательного аппарата. При дозвуковых скоростях уравнение поляры примет вид

$$C_x = C_{x_0} + A_1 C_y^2.$$

Отношение подъемной силы летательного аппарата к его весу определяет также располагаемую перегрузку данного аппарата. Чем больше располагаемая перегрузка, тем лучше маневрирует летательный аппарат. Так как подъемная сила прямо пропорциональна плотности воздуха ρ , а плотность убывает с подъемом на высоту, то при прочих равных условиях располагаемые перегрузки ракеты убывают с подъемом на высоту. Так, например, плотность воздуха на высоте 25 км будет в 30 раз меньше, чем у поверхности Земли, и, следовательно, при одинаковой скорости и равных углах атаки располагаемая перегрузка ракеты уменьшается в 30 раз. Такое сильное уменьшение располагаемой перегрузки сделает ракету «вялой», плохо слушающей рулей и «лениво» (медленно) выполняющей предписанный маневр. Увеличение располагаемой перегрузки на больших высотах можно получить за счет увеличения скорости полета и угла атаки аппарата. На очень больших высотах, где аэродинамические силы ничтожны, управляющую силу получают за счет реактивных двигателей.

Для получения математического выражения *реактивной силы* следует воспользоваться теоремой об изменении количества движения механической системы в единицу времени (в одну секунду). Эта теорема утверждает: изменение количества движения механической системы точек в единицу времени равно результирующей всех внешних сил, действующих на систему. Представим себе камеру реактивного двигателя, расположенную на горизонтальной плоскости. Когда двигатель работает, продукты химической реакции горения в камере выбрасываются через сопло с некоторой скоростью V_1 ; сила давления дна камеры на опору A (рис. 21) и есть реактивная сила. Обозначим эту силу Φ . Пусть через срез сопла с площадью σ в одну секунду выбрасывается $M_1 g = P_1$ кг горячих газов; тогда масса этих газов будет $M_1 = P_1 / g$, а секундное количество движения — $M_1 V_1$. Результирующую всех внешних сил, действующих на камеру двигателя, мы можем подсчитать следующим

образом. Пусть давление в струе истекающих газов на единицу площади среза сопла будет p_s , а атмосферное давление вне струи равно p_a , тогда суммарная сила давления составит $\sigma (p_s - p_a)$. На основании теоремы об изменении количества движения получим

$$M_1 V_1 = \Phi - \sigma (p_s - p_a),$$

откуда

$$\Phi = M_1 V_1 + \sigma (p_s - p_a) = M_1 \left[V_1 + \frac{\sigma (p_s - p_a)}{M_1} \right].$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках, называют эффективной скоростью истечения и обозначают V_e . Та-

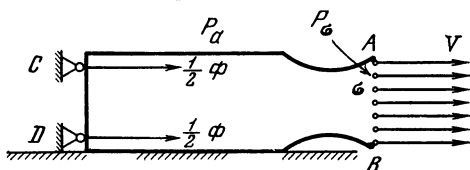


Рис. 21.

ким образом, реактивная сила равна массовому секунднему расходу топлива, умноженному на эффективную скорость истечения струи. При постоянном секундном расходе массы эффективная скорость истечения зависит только от высоты полета. Построив график реактивной силы Φ в зависимости от высоты полета, мы получим высотную характеристику реактивного двигателя. Величину $V_e/g = I_{уд}$ называют удельным эффективным импульсом, или удельной тягой. Физически удельный импульс определяет количество килограммов тяги двигателя при сжигании одного килограмма топливной смеси в секунду. Чем лучше ракетное топливо, чем совершеннее конструкция двигателя, тем больший удельный импульс мы получаем. Хорошие современные жидкостные реактивные двигатели имеют удельную тягу в пустоте порядка 350 и даже 400 кг на 1 кг топлива в 1 сек. В теории реактивных двигателей доказывается, что V_e является функцией температуры газа в камере сгорания, свойств газа (молекулярного веса и отношения теплоемкостей) и отношения площади среза сопла σ к площади его критического (обычно минимального) сечения¹.

¹ См.: «Космическая техника». М., «Наука», 1964, стр. 407—412.

В последние 10—15 лет получили широкое применение ракетные двигатели на твердом топливе. Технология производства этих двигателей стала столь совершенной, что в США, например, изготавливаются пороховые цилиндрические шашки диаметром до 3 м. Шашка твердого топлива обычно крепится к корпусу камеры сгорания. В середине шашки имеется отверстие (например, в форме звезды), и топливо горит по внутренней поверхности. Звездообразная форма обеспечивает меньшие колебания величины реактивной силы, так как секундные расходы пропорциональны поверхности горения.

Твердое топливо, прикрепленное к стенкам камеры сгорания, защищает их от горячих газов. Большие трудности возникают при конструировании сопла, так как оно не изолировано слоем топлива. Потребовалось создание специальных тугоплавких материалов, термостойких покрытий и испаряющихся покрытий (абляционное охлаждение).

В США разработку боевых ракет на твердом топливе активно поддерживали военные. В настоящее время почти все боевые ракеты (межконтинентальные и оперативно-тактические), состоящие на вооружении американской армии, имеют двигатели на твердом топливе. По опубликованным данным, в 1975 г. в США будет на вооружении 1000 межконтинентальных ракет «Минитмен-2» и «Минитмен-3», имеющих двигатели на твердом топливе, и 656 ракет «Полярис», размещенных на 41 подводной лодке с максимальными дальностями стрельбы от 2400 до 3200 км (эти ракеты имеют также двигатели на твердом топливе).

К преимуществам реактивных двигателей на твердом топливе можно отнести:

- высокую надежность как следствие простоты конструкции;

- возможность длительного хранения и связанную с этим постоянную готовность к запуску;

- возможность получения очень больших (кратковременных) сил тяги;

- безопасность в обращении из-за отсутствия токсичных веществ в топливе;

- большую плотность топлива (1,5—2,2 г/см³).

Важнейшими недостатками двигателей на твердом топливе являются: меньший (по сравнению с жидко-

стными—реактивными двигателями) удельный импульс, ограничение количества топлива размерами камеры сгорания и трудности (теперь уже преодоленные), связанные с регулированием вектора реактивной силы.

Циолковский в своих работах дал решение важнейших задач ракетодинамики для прямолинейных движений ракет.

Первая задача Циолковского решается в предположении, что силы ньютоновского тяготения и аэродинамические силы отсутствуют. Мы приходим тогда к формуле Циолковского для скорости ракеты (см. Приложение А). Эта формула показывает теоретические возможности реактивного способа сообщения движения без учета потерь скорости, которые обуславливаются силами тяготения и лобового сопротивления (при вертикальном взлете ракеты с поверхности Земли).

Во второй задаче ракетодинамики, решенной К. Э. Циолковским, исследуется прямолинейный вертикальный взлет ракеты с учетом силы тяжести. Предполагая, что активный участок траекторий невелик по сравнению с радиусом Земли, можно считать поле силы тяжести однородным и ускорение силы тяжести постоянным, равным его значению на поверхности Земли. В этом случае скорость ракеты на активном участке полета будет определяться по формуле

$$v_{\text{ракеты}} = v_1 - v_2,$$

где v_1 — скорость, определяемая по формуле Циолковского без учета силы тяжести и силы лобового сопротивления, а v_2 — скорость, «съедаемая» (или снимаемая) благодаря действию силы тяжести. Как известно из курса элементарной физики, $v_2 = gt$, где g — ускорение силы тяжести, а t — время полета ракеты в секундах, отсчитываемое от момента старта. Таким образом,

$$v_{\text{ракеты}} = V_e \ln \frac{M_0}{M} - gt.$$

Весьма интересный случай вертикального взлета ракеты будет иметь место, когда реактивная сила пропорциональна массе ракеты. В этом случае масса ракеты в полете на активном участке траектории будет изменяться по показательному закону вида $M = M_0 e^{-\alpha t}$, а ускорение, обусловленное действием реактивной силы,

будет постоянным и равным αV_e . В однородном поле силы тяжести ракета будет двигаться по траектории с постоянным ускорением $(\alpha V_e - g)$. Очевидно, чем меньше параметр α , тем меньше реактивная сила и тем больше время горения имеющегося запаса топлива. Чем больше α , тем больше реактивная сила, тем форсированнее работает двигатель, тем меньше время полета на активном участке.

Естественно, возникает мысль о наилучшем выборе параметра α . Этот наилучший, или оптимальный, выбор величины α (т. е. величины реактивной силы) называют обычно *оптимальным программированием* величины реактивной силы. Выбор оптимального α зависит от конкретных требований к некоторым суммарным летным характеристикам ракеты. Так, например, можно искать оптимальное значение α , при котором общая высота подъема ракеты над поверхностью Земли (она складывается из активного и пассивного участков траектории) будет наибольшей при данном запасе топлива. Результат решения задачи показывает, что максимальная высота, достигаемая ракетой, получается в том случае, если мгновенно выбросить весь запас топлива со скоростью V_e (мгновенное сгорание). В этом случае

$$H = V_z^2/2g,$$

где $V_z = V_e \ln(M_0/M_k)$ — скорость, определяемая по формуле Циолковского. Указанный результат можно подтвердить простыми физическими соображениями. В самом деле, если в течение весьма малого промежутка времени происходит отбрасывание всего запаса топлива, то реактивная сила во много раз превосходит силу тяжести, и этой последней можно просто пренебречь. Но тогда скорость будет определяться формулой Циолковского, а вся траектория полета будет пассивным участком. Пассивный участок ракета пролетит в однородном поле силы тяжести, и высоту подъема можно определить по формуле Галилея $H = v_0^2/2g$ (в нашем случае $v_0 = V_z$).

Если бы мы желали выбрать оптимальное значение α , обеспечивающее *максимальную высоту активного участка*, то, как показывают вычисления, выполненные в Приложении А, мы получили бы

$$\alpha_{\text{opt}} = 2g/V_e,$$

откуда

$$\alpha_{\text{опт}} V_e = 2g.$$

Эти формулы показывают, что максимальный активный участок полета при заданном запасе топлива обеспечивается в том случае, когда ускорение, обусловленное реактивной силой, ровно в два раза превосходит ускорение силы тяжести. Длина активного участка в этом случае

$$L_{\text{акт}} = V_z^2/8g,$$

а полная высота подъема

$$H_2 = V_z^2/4g.$$

Таким образом, увеличение длины активного участка полета (или иначе — уменьшение реактивной силы) приводит к существенной потере суммарной высоты подъема ракеты над поверхностью Земли. Практически этот вывод означает, что если на участке разгона ракета поднялась на значительную высоту (порядка 80—100 км), где сила сопротивления ничтожно мала, то оставшийся в ракете запас топлива целесообразно расходовать быстрее, если мы желаем получить максимальную дальность полета.

Отношение $\alpha V_e/g = n$ дает перегрузку, обусловленную реактивной силой. Полная высота подъема при перегрузке, равной n , выражается весьма просто через H_{max} и n . Соответствующая расчетная формула имеет вид

$$H_n = H_{\text{max}} \frac{n-1}{n}.$$

Из этой формулы следует, что при перегрузке $n=2$ мы теряем половину возможной высоты подъема за счет очень медленного расходования имеющегося запаса топлива. При $n=4$ мы теряем 25%, а при $n=50$ — всего 2%. Суть дела здесь состоит в том, что при увеличении времени горения мы должны поддерживать ракету в поле силы тяжести большее время. Преодоление силы тяжести требует расхода топлива.

Циолковский в своих трудах рассматривал также задачу о вертикальном подъеме ракеты в сопротивляющейся среде (атмосфере), учитывая все три силы: реак-

тивную, силу тяжести и силу лобового сопротивления. В этом, более сложном случае можно написать формулу для скорости ракеты на активном участке полета в следующем виде:

$$v_{\text{ракеты}} = v_1 - v_2 - v_3,$$

где v_1 — скорость, определяемая по формуле Циолковского и равная $V_e \ln(M_0/M)$; v_2 — скорость, снимаемая действием силы тяжести и равная $v_2 = gt$; v_3 — скорость, снимаемая действием силы лобового сопротивления. Подсчет этой скорости v_3 связан с существенными математическими трудностями.

В ряде случаев (задача Г. Оберта) можно, однако, потребовать такой работы реактивного двигателя, при которой скорость ракеты будет в каждой точке активного участка вполне определенной и такой, чтобы при этой скорости *сила лобового сопротивления была равна весу ракеты* в данный момент времени. При таком программировании реактивной силы суммарная сила, препятствующая подъему ракеты, будет равна удвоенному весу ракеты, и, следовательно, $v_3 = gt$, а скорость ракеты можно подсчитать по формуле

$$v_{\text{ракеты}} = V_e \ln \frac{M_0}{M} - 2gt.$$

Если, кроме того, масса ракеты будет изменяться по показательному закону, то ракета будет двигаться на активном участке с ускорением

$$a_1 = (\alpha V_e - 2g).$$

Следует указать, что в первые десятилетия XX в. наши знания о силах сопротивления при больших (сверхзвуковых) скоростях были весьма ограниченными и основные расчеты, выполненные Константином Эдуардовичем для определения v_3 , могут рассматриваться в наши дни как первое (грубое) приближение.

Из существенных достижений К. Э. Циолковского по ракетодинамике следует отметить его расчеты летных характеристик многоступенчатых ракет. Особенный интерес имеет случай ракетного поезда, у которого приращения скорости от каждой ступени одинаковы. В этом случае веса последовательных ракет, входящих в поезд, будут расти в геометрической прогрессии. Уже после

смерти Циолковского было строго математически доказано, что такая оптимальная многоступенчатая ракета будет обеспечивать максимальную высоту (или максимальную дальность) полета¹. Полезный груз при расчетах в Приложении Б принят условно равным одной тонне.

Учитывая, что с увеличением стартового веса ракеты реактивная сила и силы тяжести растут пропорционально кубу характерного размера летательного аппарата, а сила сопротивления — лишь пропорционально квадрату этого размера, при эскизном проектировании можно с достаточной точностью определять летные характеристики больших ракет, принимая во внимание только силу тяжести и реактивную силу. Поэтому в наши дни вторая задача Циолковского в неоднородном гравитационном поле приобретает особо важное значение.

В современной ракетодинамике рассмотренные задачи Циолковского являются простейшими, так как в них траектория центра тяжести ракеты принимается прямой линией, а влияние систем управления на летные характеристики вообще не рассматривается. У большинства современных образцов реактивного вооружения системы управления полетом ракеты есть системы управления на расстоянии (системы телеуправления), и их влияние на летные характеристики становится определяющим (мы имеем в виду ракеты классов «земля — воздух» и «воздух — воздух»)².

В самом общем случае система управления полетом ракеты состоит из следующих элементов:

1) приборы и устройства телеуправления, которые вырабатывают (вычисляют) и передают по радиопередающим линиям команды управления полетом; эти команды изменяют процессы в аппаратуре управления на борту ракеты (например, изменяют положение рулей или интерцепторов ракеты, включают реактивные двигатели, изменяют передаточные числа по каналам автопилота и исполняют ряд других функций) таким образом, чтобы обеспечить наведение ракеты на цель;

¹ Теория многоступенчатых ракет дана в Приложении Б.

² Ракеты «земля — воздух» — это зенитные управляемые ракеты, а «воздух — воздух» — ракеты, предназначенные для стрельбы с самолета (вертолета) по самолету.

2) приборы и устройства стабилизации ракеты и автоматического выполнения в определенной последовательности принимаемых команд радиоуправления полетом; главным прибором на борту ракеты, обеспечивающим стабилизацию в полете и воздействие на органы управления (рули, элероны, интерцепторы, управляющие двигатели), является автопилот;

3) приборы и устройства телеконтроля. Обычно системы телеконтроля дают информацию о положении цели и ракеты, а также информацию о функционировании агрегатов ракеты.

Взаимодействие главных элементов системы управления схематически можно представить, рассмотрев, например, полет зенитной управляемой ракеты, предназначенной для поражения вражеского самолета.

Комплекс средств телеконтроля (на первой стадии — средств целеуказания) фиксирует на командном пункте текущие координаты цели. Если цель входит в боевую зону данной ракеты, то осуществляется старт ракеты, и в дальнейшем средства телеконтроля дают одновременно текущие координаты цели и ракеты, что позволяет знать их относительное расположение. Если относительное расположение цели и ракеты не соответствует требуемому по принятому методу наведения (который обычно выбирается из кинематических условий сближения цели и ракеты), то приборы телеуправления вырабатывают и передают бортовым приборам и устройствам ракеты соответствующие команды, назначение которых — вывести ракету на траекторию метода наведения и обеспечить поражение цели.

Процессы в системах телеконтроля, телеуправления, стабилизации и других бортовых системах, которые функционируют в комплексе приборов управления полетом ракеты, определяются весьма сложными уравнениями. Изучение процессов, описываемых такого рода уравнениями, сводится к решению трудных задач теории автоматического регулирования.

Важнейшими характеристиками элементов комплекса системы управления являются устойчивость системы (или частей системы) и «реакция» системы на внешние воздействия. Следует отметить, что внешние воздействия на некоторые элементы системы управления могут математически представиться случайными функциями вре-

мени и исследование «реакции» системы управления в этом случае требует основательного знакомства с теорией вероятностных процессов.

Для оперативно-тактических баллистических ракет (дальность полета 4000—5000 км) и межконтинентальных баллистических ракет (дальность полета 10 тыс. км и более) для управления движением обычно применяют так называемые автономные системы. Главная задача автономной системы управления полетом состоит в том, чтобы обеспечить изменение угла тангажа ракеты по заданной программе и углы рысканья и крена близкими к нулю. В качестве чувствительных элементов, по которым определяются углы поворота осей (жестко связанных с корпусом ракеты), используются гироскопические датчики, имеющие в наши дни фантастические точности. Боковые отклонения ракеты определяются по показаниям датчиков боковых ускорений.

Для того чтобы баллистическая ракета (или ее головная часть) попала в заданную цель, необходимо обеспечить в конце активного участка вполне определенный вектор скорости центра масс и вполне определенные координаты относительно места старта. Это требование еще более усложняет систему управления движением ракеты. Указанный класс задач ракетодинамики привел к созданию новых областей промышленности и способствовал развитию теоретической и прикладной механики.

Более сложные движения управляемых ракет потребовали, конечно, развития идей К. Э. Циолковского, но последующий прогресс в развитии методов ракетодинамики показывает глубину и величие исследований Константина Эдуардовича, правильно отразившего главные особенности движения ракет.

В последние годы своей жизни К. Э. Циолковский много работал над созданием *теории полета реактивных самолетов*. В его статье «Реактивный аэроплан» (1930) подробно выясняются преимущества и недостатки реактивного самолета по сравнению с самолетом, снабженным воздушным винтом. Указывая на большие секундные расходы горючего в реактивных двигателях как на один из самых существенных недостатков, Циолковский писал: «...*Наш реактивный аэроплан убыточнее обыкновенного в 5 раз. Но вот он летит вдвое скорее там, где плотность атмосферы в 4 раза меньше. Тут он будет убы-*

точнее только в 2,5 раза. Еще выше, где воздух в 25 раз реже, он летит в 5 раз скорее и уже использует энергию так же успешно, как винтовой самолет. На высоте, где среда в 100 раз реже, его скорость в 10 раз больше, и он *будет выгоднее обыкновенного аэроплана в 2 раза*».

Эту статью Циолковский заканчивает замечательными словами, показывающими глубокое понимание законов техники. *«За эрой аэропланов винтовых должна следовать эра аэропланов реактивных, или аэропланов стратосферы»*¹ (подчеркнуто нами.— А. К.). Следует отметить, что эти строки написаны за 10 лет до того, как первый реактивный самолет, построенный в Советском Союзе, поднялся в воздух.

В статьях «Ракетоплан» и «Стратоплан полуреактивный» Циолковский дает теорию движения самолета с жидкостным реактивным двигателем и подробно развивает идею самолета с турбокомпрессорным винтовым реактивным двигателем.

Характеризуя свои работы по аэронавтике, ракетной технике и космонавтике, Циолковский писал: «Ценность моих работ состоит главным образом в *вычислениях и вытекающих отсюда выводах*. В техническом же отношении мною почти ничего не сделано. Тут необходим длинный ряд опытов, сооружений и выучки. Этот практический путь и даст нам техническое решение вопроса. Длинный путь экспериментального труда неизбежен»².

Мы кратко указали здесь основные направления глубоких теоретических исследований Циолковского по ракетодинамике. Заслуга Константина Эдуардовича состоит в том, что *он сделал подвластными точному математическому анализу и инженерному расчету совершенно новые явления*. Тысячи и миллионы людей наблюдали пороховые ракеты на фейерверках и иллюминациях, и однако никто до Циолковского не дал количественных выводов о законах движения ракет.

Ракетодинамика — наука XX столетия. Основные принципы этой науки — в значительной степени создание К. Э. Циолковского.

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 337, 338.

² К. Э. Циолковский. Реактивные летательные аппараты. М., «Наука», 1964, стр. 289.

Глава седьмая

Работы по теории межпланетных путешествий

Какое это великое человеческое счастье
получить новый результат.

Л. П а с т е р

Современная теория движения ракет, космических кораблей и реактивных летательных аппаратов достигла высокой степени совершенства. В наши дни ученые и инженеры могут с большой точностью проектировать желательные для осуществления траектории полета, корректировать их в процессе движения и получать огромные потоки информации как о процессах внутри корабля, так и о свойствах космического пространства. В настоящее время осуществляется громадное и экономически выгодное народнохозяйственное применение искусственных спутников Земли.

Достаточно указать, что советские искусственные спутники Земли успешно осуществляют ретрансляцию телевизионных передач по большей части отдаленных районов СССР, позволяют вести многоканальную устойчивую радиосвязь с самыми северными и восточными областями нашей страны.

Спутники теперь успешно используются для прогнозов погоды (глобальных), астрономических наблюдений, определения ледовой обстановки, места лесных пожаров, разведки косяков рыбы в океанах и даже для разведки полезных ископаемых.

Мирное использование космической техники было доминирующей мечтой К. Э. Циолковского. Он всю свою творческую энергию направлял на то, чтобы продвинуть человечество хоть немного вперед и дать надежные технические средства для овладения верхними слоями атмосферы, всем околосолнечным пространством, всей могучей энергией Солнца.

«В качестве исследователя атмосферы,— писал Циолковский,— предлагаю реактивный прибор, т. е. род ракеты, но ракеты грандиозной и особенным образом устроенной. Мысль не новая, но вычисления, относящиеся к ней, дают столь замечательные результаты, что умолчать о них было бы недопустимо. Эта моя работа¹ далеко не рассматривает всех сторон дела и совсем не решает его с практической стороны относительно осуществимости; но в далеком будущем уже виднеются сквозь туман перспективы до такой степени обольстительные и важные, что о них едва ли теперь кто мечтает».

Вопрос о реальном осуществлении межпланетных путешествий интересовал Циолковского с самого начала его самостоятельных научных изысканий. Наивные юношеские мечты, систематический анализ процессов простейших механических явлений в пространстве без действия сил (в свободном пространстве, по терминологии Циолковского), затем тщательная математическая разработка идеи реактивного движения с подробным количественным анализом прямолинейных движений и, наконец, теория полета многоступенчатой ракеты, ракеты грандиозной и приспособленной для перемещения людей в космическом пространстве — вот последовательные этапы творческих исканий Константина Эдуардовича, подготовившие научную почву для возникновения новой научной дисциплины — космонавтики, или звездоплавания.

Небесный корабль должен быть подобен ракете, говорил Циолковский. В самом деле: «Основа действия каждого экипажа и корабля одна и та же: они отталкивают какую-нибудь массу в одну сторону, а сами от этого двигаются в противоположную. Пароход отталкивает воду, дирижабль и аэроплан — воздух, человек и лошадь — земной шар. Ракета заключает в самой себе вещества для отброса. Это компоненты топлива: горючее плюс окислитель. Для создания движения ракете не нужна внешняя среда (внешняя опора). В пустоте увеличение скорости ракеты происходит быстрее, так как не нужно преодолевать силу сопротивления воздуха. «Очевидно, прибор для движения в пустоте должен быть подобен ракете, т. е. содержать не только энергию, но и опорную массу в самом себе». Реактивная сила, разви-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 69—99.

вающаяся при работе реактивного двигателя, может быть использована для любых перемещений в пространстве. Снаряд-ракета в состоянии «удаляться от Земли, блуждать между планетами, между звездами, посещать планеты, их спутники, кольца и другие небесные тела, возвращаться на Землю. Лишь бы было довольно содержащего энергию взрывчатого материала»¹.

Движение ракеты в космическом пространстве определяется законами небесной механики. Ракета для космических путешествий — это новая планета, орбита которой определяется человеком. Так как плотные слои атмосферы у планет солнечной системы сосредоточены на малых (по сравнению с радиусом соответствующей планеты) высотах, то при изучении движений ракет в пределах солнечной системы при перелетах с одной планеты на другую нужно в большинстве случаев принимать во внимание только силы тяготения. Для изучения движения искусственных спутников Земли и ракет, предназначенных для достижения (или облета) Луны, в ряде случаев нужно учитывать только поле сил тяготения, обусловленное массой Земли.

Рассмотрим более подробно движение ракеты в поле тяготения Земли. В теоретической механике доказывалось, что при некоторых ограничениях движение ракеты (как тела постоянной массы) в поле тяготения Земли подчиняется законам Кеплера, открытым по данным астрономических наблюдений, для описания движений планет солнечной системы. Эти законы утверждают следующее:

1-й закон. Орбиты планет представляют собой эллипсы, в одном из фокусов которых находится Солнце.

2-й закон. Радиус-вектор, соединяющий центр Солнца с центром планеты, описывает (ометает) в равные времена равные площади.

3-й закон. Квадраты времен обращения планет пропорциональны кубам больших полуосей их орбит.

При изучении движения ракеты в поле тяготения Земли центр Земли играет ту же роль, что и центр Солнца для движения планет солнечной системы. Планеты солнечной системы — это спутники Солнца. Ракета, движущаяся

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 172.

щаяся в поле тяготения Земли, во многих случаях — это спутник Земли.

Исследования, проведенные в небесной механике, показали, что форма орбиты (форма траектории) спутника существенно зависит от величины и направления его начальной скорости, а также расстояния от притягивающего центра в момент, соответствующий получению этой начальной скорости. *Для ракеты за начальную скорость нужно принимать скорость в конце активного участка полета.*

Пусть ракета имеет начальную скорость V_0 , направленную под углом α к местному горизонту. Тогда под действием силы притяжения к центру Земли она будет описывать траекторию, вид которой зависит от V_0 и α . В общем случае можно лишь утверждать, что траекторией ракеты будет или *эллипс*, или *парабола*, или *гипербола*, причем оказывается, что если начальная скорость V_0 будет меньше 11,2 км/сек, то траекторией ракеты будет эллипс (или окружность); если начальная скорость $V_0 = 11,2$ км/сек, то траекторией ракеты будет парабола; если V_0 больше 11,2 км/сек, то траекторией будет гипербола. Скорость $V_0 = 11,2$ км/сек часто называют второй космической скоростью для планеты Земля, или параболической скоростью. Легко понять, зная геометрический вид параболы и гиперболы, что при $V_0 \geq 11,2$ км/сек ракета не будет возвращаться на Землю, удаляясь от нее в сферы тяготения других планет или Солнца. При эллиптических траекториях ракета или возвращается на Землю, или становится спутником Земли. Эллиптические траектории — замкнутые кривые; параболические и гиперболы имеют, как говорят в математике, бесконечно удаленные точки и являются незамкнутыми.

Для семейства эллиптических траекторий можно сравнительно просто определить наивыгоднейший угол α и наименьшую начальную скорость V_0 , обеспечивающие заданную дальность полета на поверхности Земли. В табл. 2 мы приводим результаты таких вычислений и, кроме того, даем время полета по траектории и максимальное удаление ракеты H от поверхности Земли (цифры округлены).

Дальность 10 тыс. км соответствует четверти земного меридиана. На рис. 22 эта траектория вычерчена с соб-

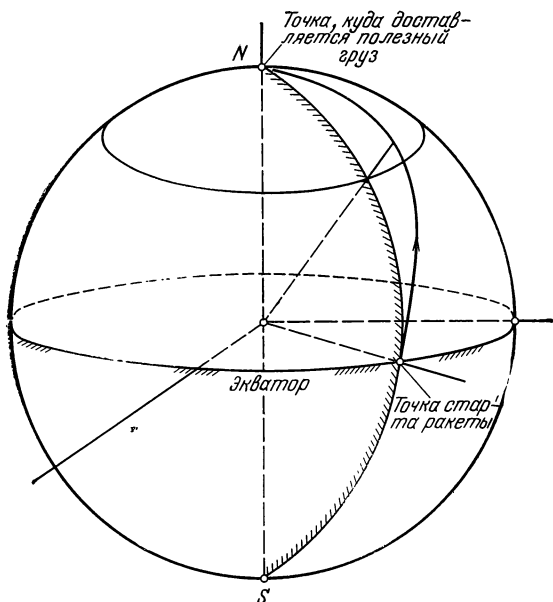


Рис. 22. Оптимальная эллиптическая траектория межконтинентальной ракеты с дальностью полета 10 000 км (влияние атмосферы не учтено)

людием масштаба (при стрельбе с экватора на полюс).

Особый интерес представляют круговые орбиты спутников Земли. Достаточно точное представление о круговых орбитах можно получить из следующих простых рассуждений.

Будем пренебрегать сопротивлением воздуха и считать Землю шаром, радиус которого приблизительно равен 6400 км. Пусть ракета (или какой-либо другой летательный аппарат) движется по экватору так, что сила притяжения ее к центру Земли в точности равна центробежной силе. Можно показать, что центробежная сила будет равна mv^2/R_0 , где m — масса ракеты, v — ее скорость, а R_0 — радиус Земли. У поверхности Земли сила притяжения к центру Земли равна весу ракеты, т. е. mg_0 , где g_0 ускорение силы тяжести.

Таким образом, для круговой орбиты радиуса R_0

$$m \frac{v^2}{R_0} = mg_0,$$

Т а б л и ц а 2

Основные параметры оптимальных эллиптических траекторий
в поле тяготения Земли

Дальность полета, км	Начальная скорость (v_0), м/сек	Наивыгоднейший угол бросания α	Максимальное удаление H от поверхности Земли, км	Время полета
1 100	3 270	42°30'	266	8 мин. 23 сек.
3 350	5 100	37°30'	720	15 мин. 57 сек.
5 600	6 100	32°30'	1 050	22 мин. 6 сек.
7 800	6 750	27°30'	1 250	27 мин. 39 сек.
8 900	7 000	25°00'	1 300	29 мин. 58 сек.
10 000	7 200	22°30'	1 3 0	32 мин. 14 сек.
12 250	7 500	17°30'	1 250	36 мин. 7 сек.
15 600	7 800	10°00'	900	40 мин. 13 сек.

т. е. центробежная сила равна силе тяжести (силе притяжения), откуда

$$v = \sqrt{g_0 R_0} \cong 8000 \text{ м/сек} = v_1$$

(точное значение $v_1 = 7912$ м/сек). Скорость $v_1 \cong 8000$ м/сек есть первая космическая скорость. Зная эту скорость и длину окружности радиуса R_0 , можно найти время полного оборота спутника вокруг Земли. Это время будет равно 84 мин. 26 сек.

Ускорение, обусловленное силой тяжести, убывает с высотой по закону

$$g = g_0 \frac{R_0^2}{(R_0 + H)^2},$$

где H — высота над поверхностью Земли. Скорость спутника Земли на высоте H можно также определить, приравняв силу притяжения центробежной силе. Получим

$$m \frac{v^2}{(R_0 + H)} = \frac{mg_0 R_0^2}{(R_0 + H)^2},$$

г. е. центробежная сила равна силе тяжести на высоте H .

Следовательно,

$$v = \sqrt{g_0 R_0} \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + H}} = 7912 \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + H}} \text{ м/сек.}$$

По этой формуле можно найти скорость спутника на любой высоте H над поверхностью Земли. Зная длину окружности радиуса $(R_0 + H)$, легко определим период T обращения спутника вокруг Земли

$$T = \frac{2\pi(R_0 + H)}{v} = \frac{2\pi(R_0 + H)}{7912 \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + H}}} \frac{R_0}{R_0} =$$

$$= 84 \text{ мин. } 26 \text{ сек.} \left(\frac{R_0 + H}{R_0} \right)^{3/2}.$$

Полученная формула дает математическое выражение третьего закона Кеплера¹. Формулы для определения v и T показывают, что с увеличением высоты период обращения спутника увеличивается, а его орбитальная скорость уменьшается.

Т а б л и ц а 3

Высота спутника над поверхностью Земли, км	Скорость спутника, м/сек	Период обращения спутника			Видимая поверхность Земли (со спутника), в % от общей поверхности Земли
		час.	мин.	сек.	
0	7912	1	24	26	0
200	7791	1	28	26	1,5
400	7675	1	32	30	3
1000	7356	1	45	02	7
3000	6525	2	30	31	16
6000	5679	3	48	18	25

В табл. 3 даны значения скоростей спутников Земли, обращающихся на разных высотах по круговым орбитам, периоды их обращения и величина (в процентах) видимой со спутника части поверхности Земли. Первая

¹ Более строгие доказательства законов движения в центральном поле тяготения Земли даны в Приложении В.

Таблица 4

Планета	Скорость отделения, или параболическая скорость, м/сек	Скорость спутника, или круговая скорость, м/сек
Меркурий	4 282	3 023
Венера	10 351	7 319
Земля	11 189	7 912
Марс	(на экваторе) 5 038	3 562
Юпитер	59 686 (на экваторе)	42 205
Сатурн	35 495 (на экваторе)	25 100
Уран	21 648	15 303
Нептун	22 810	16 129

строка этой таблицы имеет чисто теоретическое значение, так как у поверхности Земли пренебрегать силой сопротивления воздуха нельзя.

Исходя из формулы для T , можно найти высоту H , при которой время обращения искусственного спутника Земли будет равно 24 час.

Вычисления дают здесь $H=35\,810$ км. Видимая поверхность Земли будет в этом случае достигать 42,6%.

Так как в современной астрономии хорошо известны радиусы планет нашей солнечной системы и значения ускорений на поверхности этих планет, то по приведенным выше формулам легко вычислить скорости спутников, периоды их обращения, а также соответствующие параболические скорости для любой планеты.

В табл. 4 приведены значения скоростей спутников (при $H=0$) и параболических скоростей для планет солнечной системы.

Как было указано, скорость спутника часто называют первой космической скоростью для данной планеты, а параболическую скорость называют второй космической скоростью. Эра космических полетов началась на нашей планете с достижения первой космической скорости, равной примерно 8 км/сек; эра межпланетных пу-

тешествий стала на прочную основу после достижения второй космической скорости. *Советские ракетостроители первыми в мире достигли первой и второй космических скоростей для искусственных космических тел — первого спутника Земли и станции «Луна—1».*

Чем же располагает человечество для получения первой и второй космических скоростей? *Ответ на этот вопрос дает формула Циолковского.* Как мы указывали, из формулы Циолковского следуют два пути для получения больших скоростей полета ракеты:

- 1) увеличение относительной скорости отбрасываемых частиц;
- 2) увеличение отношения стартового веса ракеты к весу ракеты без топлива.

Циолковский подверг тщательному анализу методы получения больших относительных скоростей отбрасываемых частиц. Если конструкция двигателя выбрана рационально, то увеличение скорости истечения определяется компонентами топлива. Константин Эдуардович много занимался исследованием топлив для реактивных двигателей. Он выявил основные требования, которыми до сих пор руководствуются ученые и инженеры при выборе топлив. Вот итог его изысканий, сформулированный в последние годы жизни:

«Элементы взрывчатых веществ для реактивного движения должны обладать следующими свойствами.

1. На единицу своей массы при горении они должны выделять максимальную работу.

2. Должны при соединении давать газы или летучие жидкости, обращающиеся от нагревания в пары.

3. Должны при горении развивать возможно низкую температуру, чтобы не сжечь или не расплавить камеру сгорания.

4. Должны занимать небольшой объем, т. е. иметь возможно большую плотность.

5. Должны быть жидки и легко смешиваться. Употребление же порошков сложно.

6. Они могут быть и газообразны, но иметь высокую критическую температуру и низкое критическое давление, чтобы удобно было их употреблять в ожиженном виде.

Ожиженные газы вообще невыгодны своей низкой температурой, так как они поглощают тепло для своего

нагревания. Поэтому употребление их сопряжено с потерями от испарения и опасностью взрыва. Не годятся также дорогие химически неустойчивые или трудно добываемые продукты»¹.

Циолковский рассмотрел большое число различных окислителей и горючих и отобрал для практического применения лучшие из них. В частности, он рекомендовал для реактивных двигателей следующие топливные пары: жидкий водород и жидкий кислород, керосин и жидкий кислород, спирт и жидкий кислород, метан и жидкий кислород.

В работах по окислителям для жидкостных реактивных двигателей Циолковский указывал (расчетным путем) на возможность еще большего увеличения скоростей истечения, если в качестве окислителя применять озон². Рекомендованные Циолковским компоненты топлива: спирт и жидкий кислород были широко использованы в Германии при создании реактивного двигателя ракеты ФАУ-2. Эта ракета применялась в 1944—1945 гг. при обстреле Лондона.

В современной ракетной технике качество применяемых топлив для реактивных двигателей оценивается главным образом по удельному импульсу. Пусть эффективная относительная скорость истечения газов будет V_e , а ускорение силы тяжести g ; тогда удельным импульсом называют величину

$$I_s = I_{уд} = \frac{V_e}{g} \cong 0,1V_e.$$

Исследуя различные конструкции жидкостных и пороховых реактивных двигателей и методы их термодинамического расчета, можно показать, что при достаточно общих предположениях удельный импульс будет пропорционален $\sqrt{T/\mu}$, где T — абсолютная температура в камере сгорания (в градусах Кельвина), а μ — молекулярный вес топливной смеси.

В табл. 5 даны основные характеристики некоторых топливных пар (горючего и окислителя), применяющих-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 371.

² Озон ядовит, вызывает самовоспламенение ряда жидких и твердых горючих, нестабилен и весьма взрывоопасен. Поэтому расчеты Циолковского имеют пока чисто теоретическое значение.

Таблица 5

Топливная пара (окислитель + горючее)	Давление в камере сгорания, кг/см ²	Отношение веса окислителя к весу горючего, γ_0	Удельный импульс, I_s	Абсолютная температура, T	Эффективная скорость отбрасываемых частиц, V_e (цифры округлены)	Удельный вес топливной смеси
Жидкий кислород + бензин	21	2,5	242	3020°	2380	0,965
Жидкий кислород + гидразин	21	0,5	259	2482°	2540	1,05
Жидкий кислород + керосин	21	2,2	248	3077°	2440	1,01
Жидкий кислород + 100%-ный метиловый спирт	21	1,25	238	2860°	2340	0,895
Жидкий фтор + гидразин	21	1,9	299	4165°	2940	1,31
Азотная кислота + анилин	21	3,0	221	2770°	2170	1,37
Азотная кислота + фурфуроловый спирт	21	1,9	214	2770°	2100	1,37
Жидкий кислород + жидкий водород	35	3,5	364	2482°	3570	0,26

* Данные взяты из книги: G. P. Sutton. Rocket Propulsion Elements. N. Y., 1956.

ся в созданных реактивных двигателях или находящихся в разработке.

Следует иметь в виду, что удельный импульс, а следовательно, и относительная скорость истечения продуктов сгорания возрастают с увеличением давления в камере реактивного двигателя. Одновременно с увеличением давления растет и температура. Легко понять, что увеличение давления будет выгодно только в определенных пределах, так как вес двигателя и трудности, связанные с охлаждением его стенок, возрастают с увеличением давления в камере сгорания.

Кроме того, при высоких температурах в реактивных двигателях возникает явление диссоциации (разложение молекул на более простые молекулы или атомы). Диссоциация обычно вызывает понижение удельного импульса.

Исследования химиков, проведенные в последние 15—20 лет, не дают каких-либо топливных пар, существенно превосходящих приведенные в табл. 5.

Для оценки максимальных возможностей, доставляемых современной химией, примем $V_e = 4000$ м/сек. Тогда из формулы Циолковского (без учета потерь на преодоление сил тяготения и сопротивления атмосферы) следует, что для получения первой космической скорости необходимо, чтобы

$$\ln \frac{M_0}{M_s} = \frac{v_{\max}}{V_e} \cong \frac{8000}{4000} = 2.$$

По таблицам натуральных логарифмов находим

$$M_0/M_k = 7,4, \quad \text{или} \quad M_k = M_0/7,4,$$

т. е. вес пустой ракеты (без топлива) должен составлять примерно 14% от ее стартового веса. Такую одноступенчатую ракегу создать можно, и, следовательно, в перспективе искусственные спутники Земли можно будет запускать при помощи одноступенчатых ракет.

Для второй космической скорости при $V_e = 4000$ м/сек формула Циолковского дает

$$\ln \frac{M_0}{M_k} = \frac{v_{\max}}{V_e} \cong \frac{11\,200}{4000} \cong 2,8.$$

По таблицам натуральных логарифмов находим

$$M_0/M_k = 16,5, \quad \text{или} \quad M_k = M_0/16,5,$$

т. е. вес пустой ракеты (без топлива) должен составлять примерно 6% от ее стартового веса. Такую одноступенчатую ракету при *известных в наши дни конструкционных материалах создать весьма трудно* (а при ограниченном стартовом весе просто невозможно). Совершенно новые возможности открылись бы перед конструкторами, если химикам удалось бы получить более высокие скорости истечения. Некоторые, пока чисто теоретические возможности выявляются в наши дни в области так называемых атомарных топлив. В химии хорошо известно, например, что при превращении атомарного водорода Н в молекулу Н₂ выделяется огромное количество тепла (около 51 тыс. ккал/кг рекомбинирующего атомарного водорода). Такая теплотворная способность атомарного водорода делает реальной скорость истечения $V_e = 10$ тыс. м/сек. К сожалению, консервация атомарного водорода и управление процессом рекомбинации пока не удается, и проблема его освоения в реактивных двигателях дело, по-видимому, далекого будущего.

При использовании атомарного водорода для получения первой космической скорости необходимо, чтобы

$$M_0/M_k = 2,2, \quad \text{или} \quad M_k = M_0/2,2,$$

а для получения второй космической скорости —

$$M_0/M_k = 3,06, \quad \text{или} \quad M_k = M_0/3,06.$$

Многоступенчатые ракеты, предложенные Циолковским в 1929 г., дают реальные основания для получения первой и второй космических скоростей при достаточно скромных (уже достигнутых) значениях удельных импульсов.

Приведем здесь некоторые данные, полученные К. Э. Циолковским в 1934—1935 гг. для эскадрилий ракет.

Пусть имеется большое число совершенно одинаковых ракет с отношением масс $M_0/M_k = 5$. Предположим, что эффективная относительная скорость отбрасываемых частиц V_e одинакова у всех ракет эскадрильи и равна 3000 м/сек. «С помощью эскадрильи этих ракет путем переливания запасов топлива мы можем получить выс-

шие скорости, которых одна ракета получить не может. Переливание, например, бензина из одного аэроплана в другой — вещь не только возможная, но и бывающая»¹.

Применяя последовательно формулу Циолковского, получим следующие данные².

Число ракет в эскадрилье	1	2	4	8	16	32	64	128	256
Скорость последней ракеты после израсходова- ния всего топлива, м/сек	4827	6361	7895	9429	10 962	12 497	14 031	15 565	17 099

Циолковский первый научно обосновал возможность получения космических скоростей полета при помощи многоступенчатых ракет и строго математически доказал реальность межпланетных путешествий. Более 45 лет прошло со дня опубликования бессмертной работы основоположника теории межпланетных путешествий К. Э. Циолковского («Космические ракетные поезда», 1929), и накопленный за это время научно-технический опыт подтвердил правильность его идей³.

Вот некоторые из мыслей Константина Эдуардовича о ракетных полетах: «Сначала можно летать на ракете вокруг Земли, затем можно описать тот или иной путь относительно Солнца, достигнуть желаемой планеты, приблизиться или удалиться от Солнца, упасть на него или уйти совсем, сделавшись кометой, блуждающей многие тысячи лет во мраке среди звезд, до приближения к одной из них, которая делается для путешественников или их потомков новым Солнцем. Человечество обрывает ряд межпланетных баз вокруг Солнца, используя в качестве материала для них блуждающие в пространстве астероиды (маленькие планеты, которые в большом числе имеются в нашей солнечной системе — А. К.). Реактивные приборы завоюют людям беспредельные пространства и дадут солнечную энергию, в два мил-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 424.

² Там же, стр. 426.

³ Математическую теорию многоступенчатых ракет см. в Приложении Б.

лиарда раз бoльшую, чем та, которую человечество имеет на Земле».

Вот план завоевания мировых пространств, который наметил и страстно пропагандировал К. Э. Циолковский.

«Обыкновенно идут от известного к неизвестному: от иголки к швейной машине, от ножа к мясорубке, от молотильных цепов к молотилке, от коляски к автомобилю, от лодки к кораблю. Так и мы думаем перейти от аэроплана к реактивному прибору — для завоевания солнечной системы. Мы уже говорили, что ракета, летя сначала неизбежно в воздухе, должна иметь некоторые черты аэроплана. Но мы уже доказывали, что в нем непригодны колеса, воздушные винты, мотор, проницаемость помещения для газов, обременительны крылья. Все это мешает ему получить скорость, бoльшую 200 м/сек, или 720 км/час. Самолет не будет пригоден для целей воздушного транспорта¹, но постепенно станет пригоден для космических путешествий. Разве и сейчас аэроплан, летя на высоте 12 км, не одолевает уже 70—80% всей атмосферы и не приближается к сфере чистого эфира, окружающего Землю? Поможем же ему достигнуть большего. Вот грубые ступени развития и преобразования аэропланного дела для достижения высших целей.

1. Устраивается ракетный самолет с крыльями и обыкновенными органами управления. Но бензиновый мотор заменен взрывной трубой (т. е. реактивным двигателем. — А. К.), куда слабосильным двигателем накачиваются взрывные вещества. Воздушного винта нет. Есть запас взрывных материалов, и остается помещение для пилота, закрытое чем-нибудь прозрачным для защиты от встречного ветра, так как скорость такого аппарата больше аэропланной. Этот прибор от реактивного действия взрывания покатится на полозьях по смазанным рельсам (ввиду небольшой скорости могут остаться колеса). Затем поднимается на воздух, достигает максимума скорости, потеряет весь запас взрывчатых веществ и, облегченный, начнет планировать как обыкновенный или безмоторный аэроплан, чтобы безопасно спуститься на сушу. Количество взрывчатых веществ и силу взрывания надо понемногу увеличивать, также максимальную скорость, дальность, а главное — высоту полета. Ввиду про-

¹ Современное состояние гражданской авиации не подтверждает этого высказывания К. Э. Циолковского.

ницаемости для воздуха человеческого помещения в самолете высота, конечно, не может быть больше известной рекордной высоты. Достаточно и 5 километров. Цель этих опытов — уметь управлять аэропланом (при значительной скорости движения), взрывной трубой и планированием.

2. Крылья последующих самолетов надо понемногу уменьшать, силу мотора и скорость увеличивать. Придется прибегнуть к получению предварительной, до взрыва, скорости с помощью описанных ранее средств.

3. Корпус дальнейших аэропланов следует делать непроницаемым для газов и наполненным кислородом, с приборами, поглощающими углекислый газ, аммиак и другие продукты выделения человека. Цель — достигнуть любого разрежения воздуха. Высота может много превосходить 12 километров. В силу большой скорости спуск для безопасности можно делать на воду. Непроницаемость корпуса не дает ракете потонуть.

4. Принимаются описанные мною рули, действующие отлично в пустоте и в очень разреженном воздухе, куда залетает снаряд. Пускается в ход бескрыльный аэроплан, сдвоенный или строенный, надутый кислородом, герметически закрытый, хорошо планирующий. Он требует для поднятия на воздух большой предварительной скорости и, стало быть, усовершенствования приспособлений для разбега. Прибавочная скорость дает ему возможность подниматься все выше и выше. Центробежная сила может уже проявить свое действие и уменьшить работу движения.

5. Скорость достигает 8 км/сек, центробежная сила вполне уничтожает тяжесть, и ракета впервые заходит за пределы атмосферы. Полетав там, насколько хватит кислорода и пищи, она спирально возвращается на Землю, тормозя себя воздухом и планируя без взрывания.

6. После этого можно употребить корпус простой, несдвоенный. Полеты за атмосферу повторяются. Реактивные приборы все более и более удаляются от воздушной оболочки Земли и пребывают в эфире все дольше и дольше. Все же они возвращаются, так как имеют ограниченный запас пищи и кислорода.

7. Делаются попытки избавиться от углекислого газа и других человеческих выделений с помощью подобранных мелкорослых растений, дающих в то же время

питательные вещества. Над этим много работают и медленно, но все же достигают успеха.

8. Устраиваются эфирные скафандры (одежда) для безопасного выхода из ракеты в эфир.

9. Для получения кислорода, пищи и очищения ракетного воздуха придумывают особые помещения для растений. Все это в сложенном виде уносится ракетами в эфир и там раскладывается и соединяется. Человек достигает большой независимости от Земли, так как добывает средства жизни самостоятельно.

10. Вокруг Земли устраиваются обширные поселения.

11. Используют солнечную энергию не только для питания и удобств жизни (комфорта), но и для перемещения по всей солнечной системе.

12. Основывают колонии в поясе астероидов и других местах солнечной системы, где только находят небольшие небесные тела.

13. Развивается промышленность и увеличивается число колоний.

14. Достигается индивидуальное (личности, отдельного человека) и общественное (социалистическое) совершенство.

15. Население солнечной системы делается в сто тысяч миллионов раз больше теперешнего земного. Достигается предел, после которого неизбежно расселение по всему Млечному пути.

16. Начинается угасание Солнца. Оставшееся население солнечной системы удаляется от нее к другим солнцам, к ранее улетевшим братьям»¹.

Огромное идейное богатство работ Циолковского, который последовательно и систематически, в течение более 35 лет, разрабатывал наиболее важные проблемы теории и техники реактивного движения, подтверждает его бесспорный приоритет в основании новых наук: *ракетодинамики и космонавтики*. Начиная с 1903 г. в печати появляются статьи и книги Циолковского по ракетодинамике и космонавтике.

Изучая эти исследования и сравнивая их с более поздними зарубежными работами, можно легко убедиться в том, что именно в России были созданы теоретические основы расчета движений всех реактивных аппа-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 258—260.

ратов и что Циолковский, зачинатель этих новых научных дисциплин, дал ракетодинамике и космонавтике тот необычайный размах и глубину заключений, которые характерны для больших произведений человеческого ума.

Во всех статьях Циолковского по ракетной технике видна самостоятельная, оригинальная исследовательская работа. Статьи написаны доступным языком, и математические расчеты служат только для логических выводов и заключений, нигде не затемняя технических идей, сформулированных ясно и четко. Как во всяком бессмертном творении, для которого проверка временем только выявляет величие и прогрессивность идей, в работах Циолковского всякий внимательный читатель увидит еще ту замечательную простоту суждений и высокую мудрость проникновения в закономерности природы, которые свойственны классическим сочинениям.

И тем не менее работы Циолковского, написанные до Великой Октябрьской социалистической революции, постигла судьба многих открытий и изобретений, сделанных в царской России. Некоторые исследователи из разных стран частями и целиком начали присваивать идеи Циолковского. В 1913 г. во Франции появилась работа инженера Эсно-Пельтри «Соображения о результатах безграничного уменьшения веса моторов», в которой приводились некоторые формулы ракетодинамики, полученные ранее Циолковским. Но фамилия Циолковского в этой статье даже не упоминалась, хотя Эсно-Пельтри, посетившему в 1913 г. Петербург, показывались работы Константина Эдуардовича.

В 1919 г. американский профессор Годдард написал и опубликовал работу по теории прямолинейных движений ракет, где снова была приведена формула Циолковского и поставлена задача об отыскании оптимального режима вертикального подъема ракеты. Годдард ни одной строчки не посвятил результатам Циолковского, хотя к тому времени в России вышло в свет три работы Константина Эдуардовича.

В 1923 г. немецкий ученый Оберт широко популяризовал идею космической ракеты, но в своей книге «Ракета в космическое пространство» также не счел нужным привести вычисления и проекты Циолковского, хотя они во многих случаях были очень близки к тому, что опубликовал Оберт. Только благодаря широкой кампании в со-

ветской прессе и заявлениям ряда видных советских ученых Оберт, в частных письмах к Циолковскому, вынужден был признать его приоритет в разработке ракет для космических полетов. Вот выдержки из этих писем: «Я только сожалею, что не раньше 1925 года услышал о Вас. Я был бы наверное в моих собственных работах сегодня гораздо дальше и обошелся бы без тех многих напрасных трудов, зная Ваши превосходные работы... Надеюсь, что Вы дождетесь исполнения Ваших высоких целей. Вы зажгли огонь, и мы не дадим ему погаснуть, но приложим все усилия, чтобы исполнилась величайшая мечта человечества... Мою новую книгу посылаю Вам и буду очень рад, если взамен получу Ваши последние труды»¹.

Следует отметить, что в третьем издании книги Оберта «Ракета в космическое пространство» (1929 г.) ссылок на работы Циолковского снова нет, и его фамилия лишь упомянута в подстрочном примечании.

Замалчивание трудов нашего выдающегося ученого, изобретателя и мыслителя продолжается некоторыми учеными в капиталистических странах до наших дней. Основоположниками теории ракет дальнего действия и космических ракет называют Годдарда, Оберта, фон Брауна и других, сознательно не упоминая имя Циолковского, который более полувека тому назад получил основные расчетные формулы и указал ряд выдающихся конструкторских идей для ракет этого типа. Некоторые из работ Циолковского по теории реактивного движения были напечатаны в кратком изложении в немецких технических журналах в 20-х годах.

Будем надеяться, что после издания Академией наук основных работ К. Э. Циолковского по реактивным летательным аппаратам зарубежные авторы будут иметь возможность прочесть Циолковского в подлиннике и, следовательно, оценить его творческую самобытность и значение его трудов для современной ракетной техники.

В ряде своих статей Циолковский дает красочные картины полета космической ракеты и тех явлений, которые будут наблюдать пассажиры межпланетного корабля: «Мы, отправившись в путь, будем испытывать весьма

¹ Подлинники писем Оберта хранятся в фонде К. Э. Циолковского в Академии наук СССР.



Ю. А. Гагарин и С. П. Королев

странные, совсем чудесные неожиданные ощущения, с описания которых и начнем.

Подан знак; началось взрывание, сопровождаемое оглушительным шумом. Ракета дрогнула и двинулась в путь. Мы чувствуем, что страшно отяжелели. Четыре пуда моего веса превратились в 40 пудов. Я повалился на пол, расшибся вдребзги, может быть, даже умер; тут уже не до наблюдений! Есть средства перенести такую

ужасную тяжесть, но, так сказать, в упакованном виде или же в жидкости (об этом после).

Погруженные в жидкость, мы также едва ли будем склонны к наблюдениям. Как бы то ни было, тяжесть в ракете, по-видимому, увеличилась в 10 раз. Об этом нам бы возвестили пружинные весы или динамометр (фунт золота, подвешенный на их крюк, превратился в 10 фунтов), ускоренные качания маятника (в 3 с лишком раза более частые), более быстрое падение тел, уменьшение величины капель (диаметр их уменьшается в 10 раз), утяжеление всех вещей — и много других явлений¹.

Явления усиленной тяжести (увеличение перегрузки) наблюдаются только на активном участке траектории. Когда ракета достигнет второй космической скорости (11,2 км/сек), работу двигателя можно прекратить и продолжать дальнейшее движение за счет приобретенной скорости. На больших высотах (больше 100 км) на ракету и ее спутники будет действовать только сила тяжести.

«Испытываемая нами адская тяжесть будет продолжаться, пока не окончится взрывание и его шум. Затем, когда наступит мертвая тишина, тяжесть так же моментально исчезнет, как и появилась. Теперь мы поднялись за пределы атмосферы на высоту 575 км. Тяжесть не только ослабла, она испарилась без следов: мы не испытываем даже земного тяготения, к которому привыкли, как к воздуху, но которое для нас совсем не так необходимо, как последний. 575 км — это очень мало, это почти у поверхности Земли, и тяжесть должна бы уменьшиться весьма незначительно. Оно так и есть. Но мы имеем дело с относительными явлениями, и для них тяжести не существует.

Сила земного тяготения действует одинаково на ракету и находящиеся в ней тела. Поэтому нет разницы в движении ракеты и помещенных на ней тел. Их уносит один и тот же поток, одна и та же сила, и для ракеты как бы нет тяжести.

В этом мы убеждаемся по многим признакам. Все не прикрепленные к ракете предметы сошли со своих мест и висят в воздухе, ни к чему не прикасаясь; а если они и касаются, то не производят давления друг на друга или

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 116—117.

на опору. Сами мы также не касаемся пола и принимаем любое положение и направление: стоим на полу, и на потолке, и на стене; стоим перпендикулярно и наклонно; плаваем в середине ракеты, как рыбы, но без усилий и ни к чему не касаясь; ни один предмет не давит на другой, если их не прижимать друг к другу.

Вода не льется из графина, маятник не качается и висит боком. Громадная масса, привешенная на крючок пружинных весов, не производит натяжения пружины, и они всегда показывают нуль. Рычажные весы тоже оказываются бесполезны: коромысло их принимает всякое положение безразлично и независимо от равенства или неравенства грузов на чашках. Золото нельзя продавать на вес. Нельзя обычными, земными способами определить массу.

Масло, вытряхнутое из бутылки с некоторым трудом (так как мешало давление и упругость воздуха, которым мы дышим в ракете), принимает форму колеблющегося шара; через несколько минут колебание прекращается и мы имеем превосходной точности жидкий шар; разбираем его на части — получаем группу из меньших шаров разной величины. Все это ползет в разные стороны, расползается по стенам и смачивает их.

Ртутный барометр поднялся доверху и ртуть наполнила всю трубку.

Двухколенный сифон не переливает воду.

Выпущенный осторожно из рук предмет не падает, а толкнутый — движется прямолинейно и равномерно, пока не ударится о стенку или не наткнется на какую-нибудь вещь, чтобы снова прийти в движение, хотя и с меньшей скоростью. Вообще он в то же время вращается, как детский волчок. Даже трудно толкнуть тело, не сообщив ему вращения.

Нам хорошо, легко, как на нежнейшей перине, но кровь немного приливает в голову; для полнокровных вредно¹.

¹ Современные длительные космические полеты показывают, что процесс приспособления к состоянию невесомости проходит сравнительно безболезненно и быстро (2—4 дня), но в организме (если не продумана система физических тренировок) происходят существенные физиологические изменения (уменьшается объем сердца и некоторых мышц, вымывается кальций). Процесс привыкания к силе тяжести после длительного полета также требует времени.

Мы способны к наблюдению и размышлению. Несмотря на то что могучая рука Земли со страшною силою непрерывно тормозит подъем снаряда, т. е. сила земного тяготения не прекращается ни на один момент, в ракете мы ощущаем то же, что и на планете, сила тяжести которой исчезла каким-нибудь чудом или парализована центробежной силой.

Все так тихо, хорошо, спокойно. Открываем наружные ставни всех окон и смотрим через толстые стекла во все шесть сторон. Мы видим два неба, два полушара, составляющих вместе одну сферу, в центре которой мы как будто находимся. Мы как бы внутри мячика, состоящего из двух разноцветных половин. Одна половина — черная — со звездами и Солнцем, другая — желтоватая — со множеством ярких и темных пятен и с обширными, не столь яркими пространствами. Это Земля, с которой мы только что простились. Она не кажется нам выпуклой в качестве шара, а, напротив, по законам перспективы, вогнутой, как круглая чаша, во внутренность которой мы смотрим.

В марте месяце мы полетели с экватора в полуденное время, и Земля поэтому занимает почти полнеба. Полетев вечером или утром, мы увидели бы, что она покрывает четверть неба в виде гигантского изогнутого серпа; в полночь мы увидели бы только зону или кольцо, сияющее пурпуровым цветом — цветом зари — и разделяющее небо пополам: одна половина без звезд, почти черная, чуть красноватая; другая — черная, как сажа, усеянная бесчисленным множеством весьма сравнительно ярких, но не мерцающих звезд.

По мере удаления от поверхности Земли и поднятия в высоту зона становится все меньше и меньше, но зато все ярче и ярче. Земной шар, в этом ли виде, или в виде серпа или чаши, как будто уменьшается, между тем как мы обозреваем (абсолютно) все бóльшую и бóльшую часть его поверхности. Вон он нам представляется в виде огромного блюда, которое, постепенно уменьшаясь, превращается в блюдечко.

...Верха и низа в ракете собственно нет, потому что нет относительной тяжести, и оставленное без опоры тело ни к какой стенке ракеты не стремится, но субъективные ощущения верха и низа все-таки остаются. Мы чувствуем верх и низ, только места их меняются с пере-

менюю направления нашего тела в пространстве. В стороне, где наша голова, мы видим верх, а где ноги — низ. Так, если мы обращаемся головой к нашей планете, она нам представляется в высоте; обращаясь к ней ногами мы погружаем ее в бездну, потому что она кажется нам внизу. Картина грандиозная и на первый раз страшная; потом привыкаешь и на самом деле теряешь понятие о верхе и низе»¹.

Какая же выгода человечеству от овладения безднами космического пространства? Циолковский считает, что *главное — это солнечная энергия*. Земля, по его подсчетам, получает только одну двухмиллиардную часть этой энергии. Это очень мало.

В своей работе по теории многоступенчатых ракет он пишет: «Но зато как прекрасно будет достигнутое. Завоевание солнечной системы даст не только энергию и жизнь, которые в 2 миллиарда раз будут обильнее земной энергии и жизни, но и простор еще более обильный. Человек в своей власти над Землей владеет, так сказать, только двумя измерениями, третье же ограничено, т. е. распространение вверх и вниз пока невозможно. Тогда же человек получит три измерения.

А отсутствие тяжести, а девственные лучи Солнца, а любая температура, получаемая в сооружениях только силой солнечных лучей, а ничего не стоящее передвижение во все шесть сторон, а познание вселенной... Мы не можем тут оценить всех благ и преимуществ завоевания солнечной системы. Кое-что я даю в... моем сочинении «Вне Земли»»².

«План дальнейшей эксплуатации солнечной энергии, вероятно, будет следующий.

Человечество пускает свои снаряды на один из астероидов и делает его базой для первоначальных своих работ. Оно пользуется материалом маленького планетоида и разлагает или разбирает его до центра для создания своих сооружений, составляющих первое кольцо кругом Солнца. Это кольцо, переполненное жизнью ра-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 117—119.

² К. Э. Циолковский. Реактивные летательные аппараты. М., «Наука», 1964, стр. 314—315. Работа «Вне Земли» опубликована в книге К. Э. Циолковского «Путь к звездам» (М., Изд-во АН СССР, 1960, стр. 117—247).

зумных существ, состоит из подвижных частей и подобно кольцу Сатурна.

Разложив и использовав также и другие крохотные астероиды, разумное начало образует для своих целей в очищенном, т. е. свободном от астероидов пространстве, еще ряд колец, где-нибудь между орбитами Марса и Юпитера»¹.

Межпланетные путешествия откроют безграничные возможности научных изысканий. Величайшая лаборатория природы делается доступной, а расшифровка происходящих в ней явлений более простой и достоверной.

А скептикам Циолковский говорит:

«...Было время, и очень недавнее, когда идея о возможности узнать состав небесных тел считалась даже и у знаменитых ученых и мыслителей безрассудной. Теперь это время прошло. Мысль о возможности более близкого, непосредственного изучения Вселенной, я думаю, в настоящее время покажется еще более дикой. Стать ногой на почву астероидов, поднять рукой камень с Луны, устроить движущиеся станции в эфирном пространстве, образовать живые кольца вокруг Земли, Луны, Солнца, наблюдать Марс на расстоянии нескольких десятков верст, спуститься на его спутники или даже на самую его поверхность,— что, по-видимому, может быть сумасброднее! *Однако только с момента применения реактивных приборов начинается новая великая эра в астрономии: эпоха более пристального изучения неба.* Устрашающая нас громадная сила тяготения не пугает ли нас более чем следует!

Пушечное ядро, вылетевшее со скоростью 2 км/сек, не кажется нам изумительным. Почему же снаряд, летящий со скоростью 16 км/сек и удаляющийся навеки от солнечной системы в бездны Вселенной, одолевающий силу тяготения Земли, Солнца и всей его системы,— должен повергать нас в ужас. Разве такая пропасть между числами 2 и 16! Всего только одно больше другого в 8 раз.

Если возможна единица скорости, то почему невозможна скорость в 8 таких единиц. Не все ли прогрессирует, движется вперед и притом с поражающей наш ум быстротой.

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 127.

Давно ли десятиверстная скорость передвижения по земле казалась нашим бабушкам невероятной, головоломной, а теперь автомобиль делает 100—200 верст в час, т. е. в 20 раз быстрее, чем ездили при Ньютоне. Давно ли казалось странным пользоваться иной силою, кроме мускулов, ветра и воды! Говоря на эту тему, можно никогда не кончить»¹.

Советские ученые, инженеры и рабочие запуском 4 октября 1957 г. первого искусственного спутника Земли начали эпоху прямых исследований небесных тел и космического пространства.

Дальнейшая научная разработка грандиозных замыслов Циолковского, исследование различных аспектов проблемы межпланетных путешествий, изучение жизнедеятельности человека и животных в космическом пространстве — вот благородные задачи советской науки.

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т II, стр 137.

Знаменитый деятель науки

Вся история науки на каждом шагу показывает, что отдельные личности были более правы в своих утверждениях, чем целые корпорации ученых или сотни и тысячи исследователей, придерживающихся господствующих взглядов.

В. И. Вернадский

Первые годы (до 1921 г.) после Великой Октябрьской социалистической революции были очень трудными для Циолковского. Иногда он просто голодал. Но настроение Константина Эдуардовича резко изменилось. В своей автобиографии он отмечал: «Революцию я встретил радостно, с надеждою. Училища были преобразованы, и я попал в трудовую советскую школу преподавателем физики. Меня очень утешало отсутствие отметок, экзаменов, братские отношения с учениками и уничтожение классово-розовой розни и враждебности. Потом мне предложили преподавание астрономии и химии, за что я охотно взялся»¹.

Когда К. Э. Циолковский узнал, что в Москве организована Социалистическая академия общественных наук², он 30 июля 1918 г. послал туда свою автобиографию и предложил тему для исследований под широким названием «Социалистическое устройство человечества». Академия приняла предложение Циолковского, и 25 августа 1918 г. утвердила его своим членом-соревнователем с окладом 300 руб. в месяц. Константин Эдуардович поблагодарил академию и попросил разрешения работать в Калуге, числясь как бы в командировке. К 12 ноября тема исследований была существенно рас-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

² Социалистическая академия общественных наук была организована в июне 1918 г. В 1923 г. она была переименована в Коммунистическую академию. В 1936 г. основные институты Коммунистической академии были переданы в Академию наук СССР.

ширена, а содержание формулировалось в виде следующих пяти частей: 1) Основы нравственности; 2) Богатства Вселенной; 3) Современный человек и его свойства; 4) Идеальный общественный строй; 5) Прошедшее и будущее человечества¹.

Работал Циолковский с увлечением.

Приятным для Циолковского событием было избрание его (5 июня 1919 г.) почетным членом Русского общества любителей мироведения (РОЛМ). Председатель РОЛМ Н. А. Морозов писал Циолковскому, что это избрание является знаком уважения «к ученым заслугам Вашим... Вы развивали смелые и научно обоснованные идеи о межпланетных сообщениях и приборах, построенных по принципу ракеты»².

Калужское общество изучения природы и местного края также приветствовало избрание Циолковского в РОЛМ. Он писал обществу, что теперь не чувствует себя одиноким. Общество помогло в 1920 г. издать превосходную научно-фантастическую повесть «Вне Земли».

Условия жизни и работы К. Э. Циолковского радикально изменились, когда Постановлением Совета Народных Комиссаров РСФСР ему была назначена персональная пенсия. Вот текст этого постановления:

«РСФСР. Совет Народных Комиссаров.
Москва, Кремль, 10.XI—1921 г. № а16085.

Совет Народных Комиссаров в заседании от 9 ноября 1921 года, рассмотрев вопрос о назначении т. К. Э. Циолковскому пожизненной усиленной пенсии, постановил: ввиду особых заслуг ученого-изобретателя, специалиста по авиации, назначить К. Э. Циолковскому пожизненную пенсию».

Комиссия по улучшению быта ученых взяла на себя заботу о Циолковском, обеспечив ему удовлетворительные условия жизни в тот весьма трудный и напряженный период гражданской войны.

Правительственные и общественные организации ста-

¹ Циолковский дал теме новое название: «Общечеловеческая Конституция». См.: *С. И. Самойлович. Гражданин Вселенной. Калуга, 1969, стр. 94.*

² *С. И. Самойлович. Гражданин Вселенной, стр. 96.*

ли оказывать помощь Циолковскому в издании его работ. *За годы 1917—1935 было издано в 4 раза больше статей, брошюр и книг Циолковского, чем за весь предшествующий период его деятельности.* За 7 лет, с 1925 по 1932 г., было опубликовано около 60 работ Циолковского, посвященных физике, астрономии, механике и философии.

Повседневное внимание Коммунистической партии и Советского правительства к научно-исследовательской работе Константина Эдуардовича способствовало широкой популярности и признанию его работ. Циолковский становится известным всему научно-техническому миру. Переводы статей Циолковского стали появляться в печати и в зарубежных журналах. Крупнейшие специалисты по теории ракет во всем мире систематически изучают и обсуждают исследования Циолковского. Он становится признанным главой нового направления в технике — ракетостроения. Уравнениям и формулам Циолковского посвящаются специальные дискуссии, его работы по реактивному движению и межпланетным путешествиям находят талантливых продолжателей во всех странах. Группы и общества по изучению возможностей межпланетных путешествий создаются в СССР, Германии, Англии, Франции, США; начинается экспериментальная и конструкторская работа. Идея межпланетных путешествий была тем творческим стимулом, который объединил значительные коллективы ученых и изобретателей. По существу тот *колоссальный прогресс ракетной техники, свидетелями которого мы все являемся, был начат более 70 лет тому назад К. Э. Циолковским.* Он в значительной степени подготовлен исследованиями как самого Константина Эдуардовича, так и его многочисленных последователей в 30—40-х годах нашего века.

Группы изучения реактивного движения (ГИРДы) были организованы в Москве и Ленинграде. Эти группы имели тесную связь с Циолковским, и часто его рукой писались первые планы научно-технических исследований по ракетной технике.

Коллективы ученых, изобретателей и инженеров, работавшая богатое идейное наследство Константина Эдуардовича, способствовали созданию первых образцов реактивных аппаратов.

ПРОТОКОЛ № 776

РАСПОРЯДИТЕЛЬНОГО ЗАСЕДАНИЯ МАЛОГО СОВЕТА НАРОДНЫХ КОМИССАРОВ
От 9/ХІ-21 года.-

8./7/.-О назначении т.К.А.Циол-
ковскому покаянной усиленной
пенсии. /Литиелс/.

В.В. в виду особых заслуг
изобретателя, специалиста по
авиации К.Э. Циолковского в
области научной разработки
вопросов авиации, назначить
К.Э. Циолковскому покаянную
пенсию в размере 500.000 р.
в месяц, с распространением
на этот оклад всех последую-
щих повышений тарифных сто-
вок.-

ПРЕДСКАТЕЛЬ: *Труфанов*

Ч л е н ы:

А.Т.Сидоров
Каролинский *Мухоморов* *Штормов*
(Сидоров)

В 1930—1931 гг. одним из последователей Циолковского известным специалистом по ракетной технике Ф. А. Цандером был сконструирован первый реактивный двигатель ОР-1, работавший на бензине и газообразном кислороде с тягой до 5 кг. Затем Цандер разработал реактивный двигатель ОР-2 на бензине и жидком кислороде с тягой до 50 кг. Этот двигатель был построен в Московской группе изучения реактивного движения в 1932 г. и после доводочных работ успешно прошел огневые испытания.

Инженеры и ученые, объединенные в ГИРДах, стали впоследствии тем руководящим ядром советской ракетной техники, которое обеспечило решение труднейших задач современного ракетостроения и космонавтики.

Циолковский перестал чувствовать себя одиноким. Чрезвычайно характерно для новых настроений Константина Эдуардовича его известное письмо к И. В. Сталину, которое он отправил 13 сентября 1935 г. за несколько дней до смерти. Вот выдержки из этого письма:

«...Всю свою жизнь я мечтал своими трудами хоть немного продвинуть человечество вперед. До революции моя мечта не могла осуществиться.

Лишь Октябрь принес признание трудам самоучки, лишь Советская власть и партия... оказали мне действительную помощь. Я почувствовал любовь народных масс, и это давало мне силы продолжать работу, уже будучи больным. Однако сейчас болезнь не дает закончить начатого дела.

Все свои труды по авиации, ракетоплавлению и межпланетным сообщениям передаю партии большевиков и Советской власти — подлинным руководителям прогресса человеческой культуры. Уверен, что они успешно закончат эти труды.

Всей душой и мыслями Ваш
с последним искренним приветом всегда Ваш

К. Циолковский».

В ответе И. В. Сталина Циолковский был назван знаменитым деятелем науки. Больной Константин Эдуардович был чрезвычайно тронут и обрадован ответной телеграммой.

И. В. Сталин писал:

«Знаменитому деятелю науки товарищу К. Э. Циолковскому. Примите мою благодарность за письмо, полное доверия к партии большевиков и Советской власти.

Желаю Вам здоровья и дальнейшей плодотворной работы на пользу трудящихся.

Жму Вашу руку И. Сталин».

Великая Октябрьская социалистическая революция была той могучей силой, которая вдохнула в 60-летнего Циолковского новые творческие дерзания. Его талант выявился во всем могуществе и блеске. Он предстал перед современниками как зачинатель новой области человеческого знания, новой науки, новой отрасли промышленности. Полеты ракет наблюдали многие и до Циолковского. Как было отмечено, первые фейерверочные ракеты были построены в Китае более трех тысяч лет тому назад. И, однако, никто из строителей ракет, никто из многих миллионов людей, наблюдавших фейерверки и

иллюминации, не пришел к созданию новой науки — теории полета ракет. Более того, как мы уже указывали, пороховые ракеты были предметом внимания значительного круга крупных военных специалистов в течение почти всего XIX столетия, и все же *теории реактивного движения не существовало до работ Циолковского.*

Как Галилей увидел в обыденных явлениях падения тел, явлениях, наблюдаемых каждым человеком, начиная с рождения, стоящие за ними законы равнопеременных (равноускоренных и равнозамедленных) движений, законы простые и адекватные сущности явлений, так и в новой области движения ракет *Циолковский открыл закономерности, выявившие основные принципы, характерные для этого класса движений.* Эти закономерности просты и прозрачны, как ключевая вода. От них не уйдешь в задачах ракетостроения, и их не предать забвению. Они просматриваются, как основа, во многих современных работах по теоретической ракетодинамике. Иногда только эти глубокие и простые закономерности, вытекающие из более сложных рассуждений, и придают цену некоторым претендующим на новизну, но совершенно трафаретным работам, где блестящая математическая техника часто окутывает густым туманом мизерную суть дела. Жизнь К. Э. Циолковского — это жизнь бедняка, труженика и, смеем сказать, оптимиста в научных исканиях. Вот его жизненное кредо: «Мы мало знаем. *Нас ждут бездны открытий и мудрости* (подчеркнуто мной. — А. К.). Будем жить, чтобы получить их и царствовать во Вселенной, подобно другим бессмертным»¹.

Отметим в связи с этим, что для многих западных ученых наших дней характерны пессимистические высказывания лауреата Нобелевской премии профессора Р. Фейнмана (США): «Нам необыкновенно повезло, что мы живем в век, *когда еще можно делать открытия.* Это как открытие Америки, которую *открывают раз и навсегда.* Век, в который мы живем, это век открытия основных законов природы, и это время уже никогда не повторится. Это удивительное время, время волнений и восторгов, но этому наступит конец». И далее Фейнман утверждает: «Наступит время вырождения идей, вырож-

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

дение такого же сорта, которое знакомо географу-первооткрывателю, узнавшему, что по его следам двинулись полчища туристов»¹. Мы привели эти высказывания Фейнмана, чтобы ярче оттенить оптимизм Циолковского, который жил в несравненно более трудных условиях.

Все величие таланта Циолковского, вся его творческая самобытность и оригинальность и проявились во всем блеске именно в теории движения ракет, где многие и многие из ученых не видели ничего достойного внимания.

Умение выявить всю важность исследования полета ракет как тел переменной массы в условиях экономического и научного уровня развития России конца XIX и начала XX столетий нам представляется явлением выдающимся. *Расширить границы познания объективных законов природы, проложить новые пути исследований в неизведанной области и дать результаты классической ясности и простоты мог только человек выдающегося дарования и гениальной проницательности.*

Но в условиях царской России прогрессивные идеи Циолковского не встречали почти никакой поддержки. Весьма характерным эпизодом, выявившим отношение высокопоставленных чиновников Военного министерства к развитию русской научно-технической мысли, был случай с изобретательским предложением австрийского подданного Д. Шварца.

В начале 1892 г. военный агент русского правительства в Австрии полковник Зуев сообщил Военному министерству, что австриец Давид Шварц, по специальности лесничий, изобрел управляемый металлический аэростат и предлагает построить его в России. Ориентировочная сумма затрат определялась в 10 тыс. рублей.

И здесь происходит самое удивительное! Без рассмотрения и изучения проекта, без каких-либо сравнений его с хорошо известным Военному министерству предложением Циолковского, военный министр Ванновский дал согласие на ассигнование денег и приглашение в Россию Шварца.

Если Циолковскому было отказано в нескольких десятках рублей на постройку моделей, то Шварц сразу получил 10 тыс. рублей на разработку совершенно не-

¹ Р. Фейнман. Характер физических законов. М., «Мир», 1968, стр. 191.

известного проекта. Позднее выяснилось, что Шварц предлагает строить цельнометаллический дирижабль с каркасом и оболочкой из алюминия (в те годы весьма дорогого металла) и что отпущенных сумм будет недостаточно. Ассигнования Шварцу были увеличены, и работы по постройке шли в течение 1893—1894 гг.

Дирижабль был построен. Но в результате теоретической недоработки проекта и неумения проанализировать поведение металлической оболочки при заполнении баллонов из шелковой материи газом, корпус дирижабля был сильно деформирован при пробном заполнении баллонов.

Шварц заявил, что виной всему являются некачественные баллоны, изготовлявшиеся в России, и потребовал еще 10 тыс. рублей на заказы новых баллонов за границей. И эти деньги были выданы, после чего Шварц уехал за границу и больше в Россию не возвращался.

О проекте Циолковского, теоретически подробно обоснованном в работе, изданной в 1892 г., никто и не вспомнил, хотя Циолковский всеми доступными ему средствами продолжал борьбу за осуществление постройки цельнометаллического дирижабля по своему проекту.

Когда Циолковский получил данные о дирижабле Шварца, он подробно его изучил, изготовил модели и определил аэродинамические характеристики этого дирижабля продувками в своей аэродинамической трубе. Сравнительный анализ показывал несомненные преимущества дирижабля Циолковского. Однако на эти экспериментальные работы Циолковского никто из представителей Военного министерства не обратил внимания.

Работы Циолковского по теории реактивного движения считались фантастической игрой ума, не имеющими какого-либо практического значения.

После победы Великой Октябрьской социалистической революции в нашей стране созданы самые благоприятные условия для развития передовой науки, для общего подъема и роста материальной и духовной культуры народа. Наступило время, о котором мечтал М. В. Ломоносов, когда «науки художествам путь показывают; художества происхождение наук ускоряют»¹.

¹ «Художества» — это совокупность практических приемов промышленности, строительного искусства и ремесел.

Благодаря развитию научных методов изучения наблюдаемых процессов, накоплению знаний, открытию новых явлений и новых закономерностей мы познаем окружающий нас мир и сознательно вырабатываем меры воздействия на природу, исследуем и овладеваем ею, совершенствуем ее, направляем познанные объективные законы природы на службу интересам народа, на службу Родине. Полная уверенность в том, что передовая наука страны социализма достигает объективного познания процессов природы и техники, составляет главную сущность, коренную идею научно-технического прогресса. Диалектический материализм, являющийся передовым научным мировоззрением, исходит из того, что мир и его закономерности вполне познаваемы, что наши знания о законах природы, проверенные опытом, практикой, являются достоверными знаниями, имеющими значение объективных истин, что нет в мире непознаваемых вещей, а есть вещи, еще не познанные, которые будут раскрыты и познаны силами науки и практики.

В советских условиях наука и ее методы стали главным орудием сознательного планового руководства экономическим развитием. При помощи науки мы не только познаем объективные законы внешнего мира, но и переделываем его, строя материально-техническую базу коммунистического общества. Каждое новое открытие советских ученых, каждое новое изобретение, каждая новая конструкция расширяют область научного познания. Наука вечна в своих источниках и безгранична в своем объеме. Мы думаем, что уверенность Циолковского в объективном значении открываемых им истин, уверенность, что его работы станут началом величайших технических преобразований, «дадут обществу горы хлеба и бездну могущества», и была тем источником оптимизма, который Константин Эдуардович сохранял всю свою жизнь. Он горел стремлением «внушить всем людям разумные и бодрящие мысли».

Как же работал этот великий человек? Внимательное изучение как трудов Циолковского, так и высказываний о нем его друзей, родных и знакомых позволяет восстановить некоторые детали творческого труда Циолковского.

После Великой Октябрьской социалистической революции он преподавал относительно немного, а с ноября

1921 г. все силы почти целиком переключил на новые научные изыскания.

Он был всегда собран и сосредоточен. Ясность, целеустремленность и систематическое действие (деяние, — как говорил А. М. Горький) — главные особенности его жизни. Циолковский не любил праздности, ничегонеделания. Его отдых был простой переменной труда. Вот примерное расписание его занятий в самый обычный день, когда он перестал преподавать.

Вставал он в 8 часов утра, хотя просыпался несколько раньше. Обычно напевал только ему известные мотивы — без слов. Это было характерной привычкой Циолковского. Вот как пишет он сам в своей автобиографии: «Когда же не был занят, особенно во время прогулок, всегда пел. И пел не песни, а как птица, без слов. Слова бы дали понятие о моих мыслях, а я этого не хотел. Пел и утром и ночью. Это было отдыхом для ума. Мотивы зависели от настроения. Настроение же вызывалось чувствами, впечатлениями и часто чтением. И сейчас я почти каждый день пою и утром, и перед сном, хотя уже и голос охрип, и мелодии стали однообразней. Ни для кого я этого не делал, и никто меня не слышал. Я это делаю сам для себя. Это была какая-то потребность. Неясные мысли и ощущения вызывали звуки. Помнится, певческое настроение появилось у меня с 19 лет»¹.

В девять он уже сидел за работой. В рабочей комнате всегда было просторно и светло. Циолковский не любил сидеть за столом и обычно писал, сидя в глубоком кресле, положив на колени кусок фанеры. Придерживая левой рукой расползающиеся листы бумаги, он записывал мысли размашистым крупным почерком. Серебро волос обрамляло его высокий мощный лоб.

В Калуге, в доме, где Циолковский жил более 25 лет, теперь устроен музей. В годы немецко-фашистской оккупации многие из экспонатов музея погибли, но все же работники музея восстановили, по возможности, ту обстановку в доме, которая была при жизни ученого. Поражает посетителей большая застекленная веранда, на которой помещен ткацкий станок, станок-вальцы для получения гофрированного металла. Восстановлены

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

(после варварства фашистских оккупантов) и выставлены на первом этаже модели дирижаблей и действующая аэродинамическая труба. Веранда служила для Циолковского исследовательской лабораторией, в ней он *исполнял собственными руками* первые образцы всех своих установок и приборов. Циолковский изготовил у себя дома большое число демонстрационных приборов по учебному курсу физики и математики Боровского училища и Калужского епархиального училища.

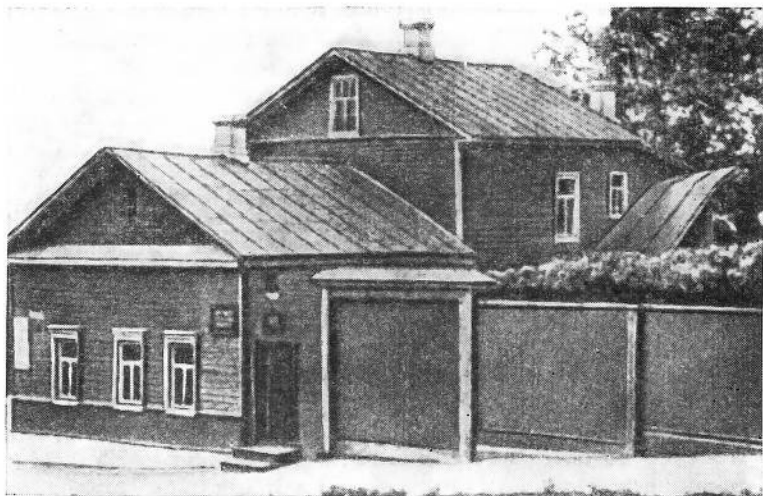
После четырехчасового напряженного труда он отправлялся на прогулку. Циолковский очень любил велосипед и обычно ехал в бор, или на реку, или в Калужский загородный сад, делая 7—10 км ежедневно.

По возвращении с прогулки обедал, немного отдыхал и снова работал три-четыре часа, сидя в своем кресле. Вечером принимал посетителей. Чтобы лучше слышать собеседников, сконструировал и построил себе рупор в виде удлиненного конуса; во время разговора он представлял его к уху и направлял к собеседнику.

Константин Эдуардович много читал. Его любимыми авторами были Чехов, Горький и Мамин-Сибиряк. Чтение произведений любимых авторов, которым часто заканчивался его рабочий день, являлось для него своеобразным отдыхом. Эта *дисциплина ежедневного труда* сдерживала и направляла творческие стремления его увлекающейся, страстной натуры. Усилиями разума он не позволял себе разбрасываться, мысли и идеи, которые кипели в его талантливой голове, поддерживали в нем оптимизм в самые трудные моменты жизни.

Иногда он полностью отдавался своим увлечениям. Тогда забрасывалось все, и направленность усилий давала тот необычайный размах и силу мысли, которые поражают каждого внимательного читателя его произведений. Такие творческие взлеты были у Циолковского, когда он работал над проектом цельнометаллического управляемого аэростата (дирижабля), проектом аэроплана, теорией полета ракет и философской работой «Монизм Вселенной».

Как экспериментатор и изобретатель он увлекался и новинками техники. Вот что пишет о Константине Эдуардовиче хорошо знавший его калужский инженер А. В. Асонов: «...Это было после переезда в домик под горой. Он через мастерские Верейтинова купил очень



Дом-музей К. Э. Циолковского в Калуге



Рабочий кабинет К. Э. Циолковского

старый мотоцикл за 80 рублей. К нему приделал для зажигания ящик с сухими элементами своего изделия, укрепил его сзади сидения на специально устроенной подставке и решил отправиться в путешествие. Надо сказать, что увлечение мотоциклом было настолько велико, что были заброшены все дела и работы, он мечтал о каком-то новом карбюраторе, магнето и т. д. По этому поводу он писал мне: «Я страшно болтаюсь с мотоциклом, но хочу взять себя в руки и заняться серьезно».

Во всех его делах и увлечениях видно неукротимое стремление пройти всю дорогу исследования от начала и до логического конца самостоятельно. Работая над различными проблемами науки или техники, литературы и философии, он всегда думал о людях, социалистическом Отечестве, общечеловеческом счастье. «Я интересовался более всего тем, что могло бы прекратить страдания человечества, дать ему могущество, богатство, знание и здоровье», — писал Циолковский в 1935 г. За выдающиеся заслуги перед Страной Советов Циолковский был награжден в 1932 г. орденом Трудового Красного Знамени, который ему вручил М. И. Калинин.

«С чувством глубочайшего уважения, поздравляю Вас, Герой труда» — телеграфировал в Калугу великий русский писатель Максим Горький в день 75-летия Константина Эдуардовича.

Широта научного кругозора Циолковского может быть отчасти охарактеризована названиями его статей, написанных в период с 1916 по 1930 г. Вот примерно одна шестая часть опубликованных в эти годы работ:

- «Горе и гений» (Калуга, 1916);
- «Вне земли» (фантастическая повесть, опубликовалась в журнале «Природа и люди», 1918);
- «Монизм Вселенной» (Калуга, 1925);
- «Причина космоса» (Калуга, 1925);
- «Исследование мировых пространств реактивными приборами» (Калуга, 1926);
- «Моя пишущая машинка» (Калуга, 1928);
- «Ум и страсти» (Калуга, 1928);
- «Растение будущего» (Калуга, 1929);
- «Звездоплавателям» (Калуга, 1930);
- «Реактивный аэроплан» (Калуга, 1930);
- «От самолета к звездолету» (Калуга, 1930);
- «Научная этика» (Калуга, 1930).



К. Э. Циолковский на прогулке

Приведем здесь некоторые из высказываний К. Э. Циолковского. Как справедливо заметил академик И. Д. Крачковский, для хорошего понимания человека вовсе не обязательно знать его непосредственно: книги, письма, фотографии открывают его не хуже, а иногда, может быть, и непринужденнее, чем личное общение.

В небольших отрывках, взятых из основных работ и писем Константина Эдуардовича, виден большой оригинальный ум и человеческое благородство, его целеустремленность и одержимость научными исканиями.

Он говорил:

«...Трудно предвидеть судьбу какой-нибудь мысли или какого-нибудь открытия: осуществится ли оно и через сколько времени — десятилетия или столетия для этого нужны, — как осуществится, в какой форме, к чему оно поведет, насколько изменит и улучшит жизнь человечества, не преобразует ли оно в корне наши взгляды и нашу науку».

«...Сколько было ложных открытий, на стороне которых были люди и правдивые и авторитетные. И... — скольким пренебрегалось, что потом стало великим».

«...Только наша Советская власть отнеслась ко мне человечно. Новая и настоящая родина создала мне условия для жизни и работы.

В 1932 г. крупнейшее капиталистическое общество металлических дирижаблей прислало мне письмо, просили дать подробные сведения о моих дирижаблях. Я не ответил на заданные вопросы, я считаю свои знания достоянием СССР.

Я горжусь своей страной, да, горжусь! Комсомольцы и молодежь, учитесь еще больше, делайте это с радостью, ни на один час не забывайте о будущем нашей великой родины».

«...Есть действительно вещи и дела несвоевременные, но они падают сами собой без всякого насилия над ними. В то же время известно, что все великие начинания оказывались несвоевременными и хотя не запрещались, но, не находя сочувствия, гасли или проникали помалу, с большими усилиями и жертвами. Так, несвоевременными оказались железные дороги. Комиссии известных ученых и специалистов не только находили их несвоевременными, но даже вредными и губительными, например, для здоровья. Пароход сочли игрушкой».



К. Э. Циолковский после награждения орденом Трудового Красного Знамени в 1932 г.

«...Радио — одно из современных чудес. Счастливы вы (Циолковский обращается к юным техникам. — А. К.), что занимаетесь таким делом. Со временем короткие радиоволны проникнут за атмосферу и будут основанием для небесных сообщений».

«...Сколько среди нас людей в разные времена было гениев, двигающих земное человечество по пути к познанию и счастью! Во всякий момент земной жизни найдутся такие необыкновенные, драгоценные для земли люди. Сколько их забыто людским неведением, сколько неузнано и погребено, не проявив своих благотворительных свойств! Будущий порядок земли устранил это несчастье, эту безмерную убыль для человечества, и во главе управления, на самом деле, будут наиболее полезные, наиболее совершенные люди».

«...Мы должны быть мужественными и не прекращать своей деятельности от неудач. Надо искать их причины и устранять их».

В 1912 г. в письме к Б. Н. Воробьеву (известному собирателю научного наследства К. Э. Циолковского) он писал: «Вы видите, что... моя жизнь исключительно состоит из работы, что я все еще надеюсь быть полезным, хотя бы и после смерти».

«...Моя работа далеко не рассматривает всех сторон дела и совсем не решает его практической стороны относительно осуществимости; но в далеком будущем уже виднеются сквозь туман перспективы, до такой степени обольстительные и важные, что о них едва ли теперь кто мечтает».

«...Исполнению предшествует мысль, точному расчету — фантазия».

«...Радость делает добрым».

«...Новые идеи надо поддерживать, пока они не осуществятся или пока не выяснится полная их несостоятельность, злобедность или неприменимость. Немногие имеют такую смелость, но это очень драгоценное свойство людей».

В трудные моменты своей жизни Циолковский писал своим последователям и друзьям горькие (пессимистические) слова о своих настроениях:

«...Старость и работа дали мне знание, опытность, осторожность, но *лишили энтузиазма и веры* в какую бы то ни было теорию, до проверки ее в жизни».

«...В этом году (1927 г.) мне исполнится 70 лет. Качусь быстро под гору. Страшно устал, падаю духом и ослабел в стремлении жить и работать».

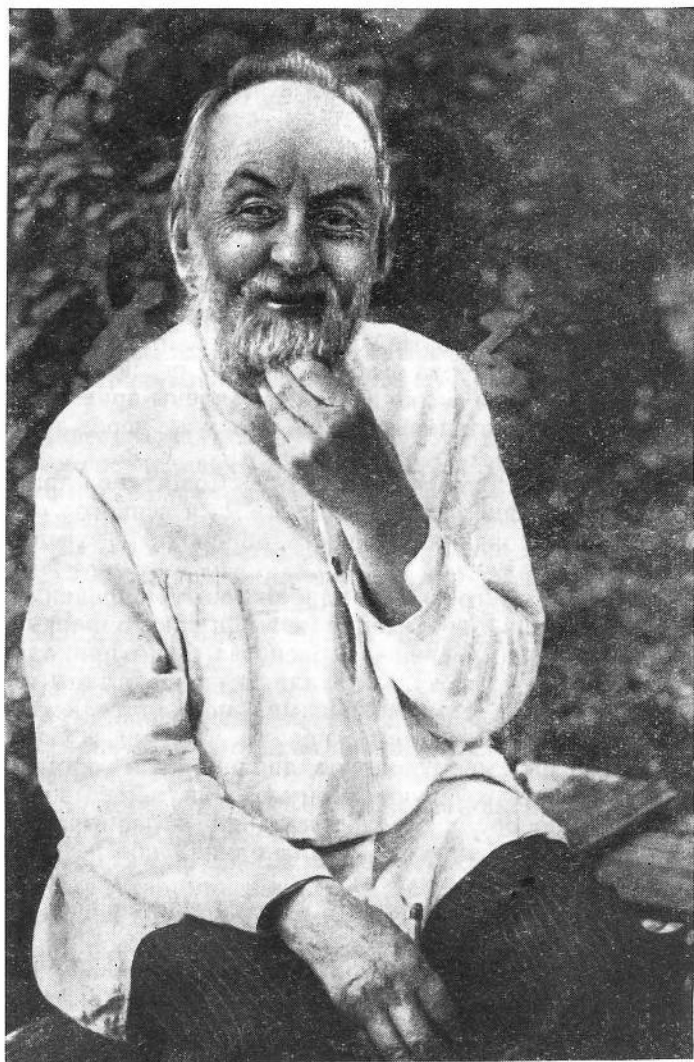
«...Никогда я не претендовал на полное решение вопроса. Сначала неизбежно идут: мысль, фантазия, сказка; за ними шествует научный расчет, и уже в конце концов исполнение венчает мысль».

Еще юного Циолковского увлекала возможность космических путешествий, преодоление силы притяжения Земли. Циолковский много мечтал, размышлял, вычислял, проектировал.

Он говорил:

«...Астрономия увлекала меня потому, что я считал и считаю до сего времени не только Землю, но отчасти и Вселенную достоянием человеческого потомства».

Статьи в газетах и журналах, посвященные 70-летию со дня рождения К. Э. Циолковского.



Циолковский в 1933 г.

«...Планета есть колыбель разума, но нельзя вечно жить в колыбели».

«...Человечество не останется вечно на Земле, но в погоне за светом и пространством сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет себе все околосолнечное пространство».

«...Чем больше я работал, тем больше находил разные трудности и препятствия. До последнего времени я предполагал, что нужны сотни лет для осуществления полетов с астрономической скоростью (в диапазоне 8—17 км в секунду). Это подтверждалось теми слабыми результатами, которые получены у нас и за границей. Но непрерывная работа в последнее время поколебала эти мои пессимистические взгляды: найдены приемы, которые дадут изумительные результаты уже через десятки лет¹.

Внимание, которое уделяет наше Советское правительство развитию индустрии в СССР и всякого рода научным исследованиям, надеюсь, оправдает и утвердит эту мою надежду».

«...Все, о чем я говорю, — слабая попытка предвидеть будущее авиации, воздухоплавания и ракетоплавания. В одном я твердо уверен — первенство будет принадлежать Советскому Союзу. Капиталистические страны также работают над этими вопросами, но капиталистические порядки мешают всему новому. Только в Советском Союзе мы имеем мощную авиационную промышленность, богатство научных учреждений, общественное внимание к вопросам воздухоплавания и необычайную любовь всех трудящихся к своей Родине, обеспечивающую успех наших начинаний».

«...Наша молодежь должна учиться еще больше, как можно больше приобретать знаний и вести самостоятельную деятельность — без нее вы ничего не сможете дать Родине. Мы должны понимать наше будущее и будущее своих изобретателей. Мы должны работать во имя нашей славной Родины. Вы, молодые друзья, должны гордиться Родиной так же, как горжусь ею я, старик».

¹ В 1957 г. в нашей стране была получена первая космическая скорость 8 км/сек, а в 1959 г. — вторая космическая скорость 11,2 км/сек.

«...Желаю вам радостной, роскошной жизни, у вас всех счастливое время и вы доживете до еще более счастливых дней в нашей социалистической стране».

Он писал в 1928 г.¹: «Будем смелы. Не будем бояться кары авторитетов, хотя бы за ними были тысячелетия. Мы охотно за ними пойдем, если они с точки зрения несомненных знаний пришли к верным, хотя и недоказанным ими выводам».

Как мы можем быть виновны, если мы следуем своему разуму? Что же может быть выше его? Конечно, возможны существа сильнее нас по разуму. Но где они? Они не приходят к нам на помощь. Когда придут, тогда и послушаем их. Сейчас мы имеем только указания наиболее даровитых своих собратьев. Разум же неба молчит.

Через тысячи лет наука расширится, усовершенствуется и сам человек преобразится к лучшему. Но пока этого нет, нам приходится довольствоваться имеющимся. Наши выводы, наверное, будут неполны, даже ошибочны. Но что же делать, если нет сейчас того, что будет через 100, тысячу, миллион лет и что даст нам более верные выводы!»

Из письма в Ассоциацию изобретателей (от 29.X 1927 г.): «Честь для меня дороже всего, даже успеха».

«...Я всю жизнь рвусь к новым победам и достижениям, вот почему только большевики меня понимают. Я бесконечно благодарен партии и Советскому правительству».

С 1939 г. автор книги изучал все напечатанное в трудах К. Э. Циолковского и достаточно внимательно познакомился с архивом Константина Эдуардовича, хранящимся в Академии наук СССР. Нам хочется высказать некоторые мысли об оригинальности и самобытности творческого стиля этого выдающегося ученого, мыслителя и человека. Он, конечно, был энциклопедистом и работал плодотворно во многих областях науки и техники: авиации, ракетной технике, астрономии, космонавтике, биологии, философии и социологии. Циолковский писал в одном из вариантов своей автобиографии («Черты из моей жизни»²:

¹ К. Э. Циолковский. Любовь к самому себе, или истинное себялюбие, изд. автора. Калуга, 1928, стр. 4.

² К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

«По моей чрезвычайной любознательности я энциклопедист... Моя натурфилософия, которую я вырабатывал в течение всей жизни и ставил выше всякой другой своей деятельности, также требовала сведений во всех отраслях знания...

Я все время искал, искал самостоятельно, переходил от одних трудных и серьезных вопросов к другим, еще более трудным и важным. Сдерживались мои мысли и фантазия только наукой»¹.

Константин Эдуардович был неистовым мечтателем. Его душа кипела множеством идей. Он размышлял о неиспользуемой человечеством колоссальной энергии Солнца, о законах движения ракет, о создании грандиозных цельнометаллических дирижаблей и хорошо управляемых аэропланов, о новых формах государственного устройства, о межпланетных искусственных островах, населенных смелыми потомками людей, уже превративших своим трудом нашу планету в цветущий сад, о новом научном интернациональном языке вместо средневековой латыни и множестве других вопросов.

Строгий математический анализ, обязательная количественная оценка — *число* — обуздывали эти полеты фантазии.

Девизом его исканий был *научный расчет*, который шествовал за мечтой, фантазией, сказкой.

Он стремился показать своим современникам новые неизведанные пути научных исканий, новые неоткрытые миры, новые человеческие отношения, иную жизнь. Он тревожил умы, звал к созиданию великого, возбуждая желание размышлять, искать, творить. Он был могуч в своих свершениях и даже заблуждениях. Он был обаятелен в своей страстной и горячей вере в силу разума, силу науки, силу неукротимого стремления человека к лучшему.

Он учился созидая. Нередко тернистыми путями приходил к открытому ранее другими, но это не огорчало ученого, а лишь убеждало в правильности выбранного метода познания нового. Его неудержимо увлекал процесс интеллектуального творчества. Радость созидания согревала и питала его воображение.

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

Многие ученые его не понимали. Он публиковал свои статьи в журналах, редко привлекавших внимание официально признанных научных деятелей. Его больше знали инженеры-изобретатели, люди, чуткие к новому, неожиданному. В конце XIX в. и первой четверти XX в. для большинства ученых был неактуален сам предмет основных исследований Константина Эдуардовича. С «общего согласия» боевые пороховые ракеты были похоронены в 80-х годах XIX столетия. Ленивым и холодным умам казалось, что Циолковский пишет о несбыточном, уже отвергнутом ходом истории. Форма и стиль его статей часто раздражали педантов. Новые русифицированные обозначения, применявшиеся Циолковским для записи привычных с гимназических лет формул, считали блажью умирающего славянофильства. Отсутствие ссылок на опубликованные результаты предшественников называли гордыней и игрой в гениальность.

Горестная жизнь почти всех дореволюционных открытий Циолковского поднимала в душе его бурю протеста. Он мысленно листал великую книгу истории науки и сопоставлял свои открытия с открытиями великих мужей естествознания и техники. Ему импонировали многие сравнения и аналогии. Он говорит в предисловии к работе «Ракета в космическое пространство»: «...Ламарк написал книгу, где разбирал и доказывал постепенное развитие существ от низших организмов до человека. Французская академия во главе с знаменитым Кювье изымалась над этой книгой и публично приравнивала Ламарка к ослу. Галилей был пытан, заключен в тюрьму и принужден с позором отречься от своего учения о вращении Земли. Только этим он спасся от сожжения. Кеплер сидел в тюрьме. Бруно сожжен за учение о множественности миров. Французская академия отвергла Дарвина, а русская — Менделеева. Колумб, после открытия им Америки, был закован в цепи. Майер был доведен измывательством ученых до сумасшедшего дома. Химик Лавуазье казнен. Коперник лишь на смертном одре получил свои печатные труды. Работы Менделя обратили внимание на себя только через десятки лет после их издания. Гальвани, открывший динамическое электричество, был осмеян. Изобретатель книгопечатания — Гутенберг — умер в нищете, так же как (недавно)

и изобретатель холодильных машин Казимир Пелье Фультон отвергнут самим Наполеоном (первым). Не перечислить сожженных и повешенных за истину. История переполнена фактами такого рода. И почему это академиям, ученым и профессионалам суждено играть такую жалкую роль гасителей истины и даже ее карателей?»

Циолковский, после 1917 г., в резких выражениях писал о слепоте академической дореволюционной науки к новому, о ее приверженности к дряхлеющему, канонизированному.

Он понимал, что находится в первых рядах зачинателей великого, и ему хотелось открыть всем глаза на те богатства, которые ежедневно стояли перед его умственным взором.

Иногда его мысли формулировались как откровение гения. В известной философской работе «Монизм Вселенной»¹, изданной в 1925 г., он писал: «В мои годы умирают, и я боюсь, что вы уйдете из этой жизни с горестью в сердце, не узнав от меня (из чистого источника знания), что вас ожидает непрерывная радость... Я хочу привести вас в восторг от созерцания Вселенной, от ожидающей всех судьбы, от чудесной истории прошедшего и будущего каждого атома».

Творчество Константина Эдуардовича протекало в условиях, очень тяжелых даже для времен царской России. Мизерное жалованье. Большая семья. Тесная и неудобная квартира. Нужда и недоедание. Почти полное непонимание сограждан. Пожары и наводнения неоднократно уничтожали его рукописи и черновые расчеты. Он не имел ни в Боровске, ни в Калуге необходимой научной литературы. О журналах (текущей научной периодике) можно было только мечтать. Грубые насмешки обывателей провинциальной России были единственным «поощрением» ученому. Вряд ли способствовали продуктивности работы жалающие уколы коллег-преподавателей, готовых придрасться к мельчайшему методическому нововведению. Все недовольны тем, что бедняк Циолковский печатает на собственные средства научные статьи и рассылает их бесплатно. Автор полагает, что глухота

¹ Циолковский утверждал, что «Монизм Вселенной» есть попытка определить судьбу всего живого, основываясь на точных науках (Архив АН СССР, ф. 555, оп. 2, д. 10).

спасла от тины «благонамеренного и толстокожего» мешанства величие этого человека. Содержание научных статей Циолковского в дореволюционной Калуге понимали максимум 10—15 человек.

Циолковский писал ленинградскому профессору Н. А. Рынину в 1926 г., характеризуя дореволюционные условия своего научного творчества: «Книг было тогда вообще мало, а у меня в особенности. Поэтому приходилось больше мыслить самостоятельно и часто идти по ложному пути. Нередко я изобретал и открывал давно известное. *Я учился творя*, хотя часто неудачно и с опозданием. Зато я привык мыслить и относиться ко всему критически. Впрочем, самобытность, я думаю, была в моей природе. Глухота же и невольное удаление от общества только расширили мою самостоятельность».

В неопубликованной рукописи Циолковского под названием «Фатум, судьба, рок» (Архив АН СССР, ф. 555, оп. 2, д. 1) можно прочесть: «...Учителей у меня совсем не было, а потому мне приходилось больше создавать и творить, чем воспринимать и усваивать. Указаний, помощи ниоткуда не было, непонятого в книгах было много, а разъяснять приходилось все самому. Одним словом, творческий элемент, элемент саморазвития, самобытности преобладал (курсив мой.— А. К.). Я, так сказать, всю жизнь учился мыслить, преодолевать трудности, решать вопросы и задачи. Многие науки создавались мной, за неимением книг и учителей, прямо самостоятельно».

Он не владел во всех деталях сложной математической техникой XX в. Применяемый им в работах математический аппарат очень прост и доступен каждому, изучавшему обычный вузовский курс высшей математики. Но он видел и предугадывал суть многих явлений, не боясь ошибиться при попытках открыть новые закономерности¹.

Математическая техника и символика — это нечто вроде нотной грамоты или правил стихосложения. Можно великолепно объяснять, какие аккорды и последовательности аккордов заложены в менюэтах Гайдна и Мо-

¹ Константин Эдуардович правильно отмечал: «Элементарность изложения некоторых моих трудов составляет особенное их достоинство» (Архив АН СССР, ф. 555, оп. 2, д. 17).

царта, но не уметь написать самостоятельно ничего. Можно по-разному трактовать структуру и ритмику стихов Пушкина, Блока и Есенина, но с грустью убеждаться, что в этом нет ни гроша истинной поэзии. Вы можете воспроизводить на память все чудесные открытия по математике, сделанные до вас, но не уметь применить их к самому простому делу. Есть какой-то логический неуловимый скачок в нашем сознании, когда мы начинаем идти от известного к неизвестному, когда открытое великими предшественниками не мешает вам видеть в этом мире новое, еще не открытое, бывшее до вас незамеченным.

Самое трудное в подлинном научном воспитании и состоит в том, чтобы *обучающийся не попал под обаяние* известных, часто более могущественных предшественников, а сохранял *творческое, свое понимание действительности*.

Циолковский не любил просматривать до деталей пути-дороги предшественников. Он обычно схватывал «изюминку» нового в любой научной работе, а доказательства придумывал сам. Поэтому даже известные в науке результаты излагал Циолковский по-своему, неожиданно, свежо, оригинально.

Он умеет мечтать и видеть «обольстительные и важные перспективы» ракетной техники, он мудр и точен в своих формулировках и выводах, он тревожит ваш ум и находит дорогу к самому лучшему в вашем сердце, когда ставит новые проблемы.

В предисловии к своей работе «Растение будущего» Циолковский так характеризует свой творческий почерк. «Почему я часто не упоминаю об источниках и не угощаю читателей мудростью энциклопедических словарей? Да потому, что это страшно увеличит размер работ, запутает и утомит читателя, заставит его бросить книгу. Времени и сил так мало! Моя цель — в малом и доступном объеме дать много. *Горю стремлением внушить всем людям разумные и бодрящие мысли* (курсив мой. — А. К.). Притом, я *тружусь самостоятельно и ново*, только основы научны, стары и известны. Множество имен, мнений и дат мешает главному — усвоению истины. Дело специалистов и исторических наук давать эти даты, имена и их противоречивые мнения. Я же выбираю из всего материала то, что считаю наиболее вероят-

ным. Компиляции требуют, конечно, иного изложения. Мои же работы не компиляции»¹. В одном из сохранившихся вариантов автобиографии Константин Эдуардович пишет: «Вся моя жизнь состояла из размышлений, вычислений, практических работ и опытов. Меня всегда сопровождала домашняя мастерская»². Он, конечно, хотел публикации своих работ и стремился к обсуждению своих произведений по существу. Но он признавал для себя только суд народа. И потому неоднократно писал: «Мне бы только хотелось избежать предварительного суда специалистов, которые забракуйте работы, *так как они опередили время* (курсив мой. — А. К.); также и по общечеловеческой слабости: не признавать ничего оригинального, что так несогласно с воспринятыми и *окаменевшими* уже мыслями.

Вообще я хочу избавиться от всякого суда и контроля, кроме общественного, после издания моих работ. Если рукописи не будут изданы, то легко могут затеряться после моей смерти (мне 65 лет). Кроме того, обнародование их придаст мне бодрости закончить остальные работы и изобретения. Государство же от своей маленькой жертвы не разорится, так как таких, как я, немного»³.

Циолковский часто говорил:

«Основной мотив моей жизни: сделать что-нибудь полезное для людей, не прожить даром жизнь, продвинуть человечество хоть немного вперед. Вот почему я интересовался тем, что не давало мне ни хлеба, ни силы, но я надеюсь, что мои работы, может быть скоро, а может быть и в отдаленном будущем — дадут обществу *горы хлеба и бездну могущества* (курсив мой. — А. К.)»⁴.

Константин Эдуардович хорошо понимает важность и оригинальность своих работ. Он страстно желает их публикации. Но он не хочет посылать их на отзыв специалистам, он не хочет, чтобы его работы кто-нибудь редактировал и рецензировал. Он пишет:

«Как жаль, что я не имею возможности издавать мои труды. Единственное спасение для этих работ — немед-

¹ К. Э. Циолковский. Растение будущего. Калуга, 1929, стр. 1.

² Архив АН СССР, ф. 555, оп. 2, д. 2.

³ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. IV, стр. 430.

⁴ Там же, стр. 429.

ленное, хотя и постепенное их издание, здесь в Калуге, *под моим собственным наблюдением. Отсылать рукописи на суд средних людей я никогда не соглашусь.* Мне нужен суд народа. Труды мои попадут к профессионалам и будут отвергнуты или просто затеряются. *Заурядные люди, хотя бы и ученые, как показывает история, не могут быть судьями творческих работ.* Только по издании их, после жестокой борьбы, спустя немало времени, отыщутся в народе понимающие читатели, которые и сделают им справедливую оценку и воспользуются ими. И на то уходят века и даже тысячелетия. Если некоторые мои работы не погибли, то только благодаря печати или отдельным их изданиям.

Желательно, чтобы мне дали средства для издания моих трудов здесь в Калуге под моим личным надзором, без предварительной оценки, которая неприемлема для границ науки. Мой авторитет и без того установлен настолько, чтобы доверить ничтожные суммы, необходимые для издания.

Я сделал открытия во многих областях знания, между прочим в учении о строении атома; кто может во всем свете быть тут судьей? *Также и другие мои труды опередили современность.* Спасите же их, если желаете себе добра. Зачем повторять жестокие заблуждения, описанные в истории открытий и изобретений! Надо воспользоваться этими уроками и не попираť больше истину»¹.

Можно обучить математической технике. Познать созданное другими — это только терпение. Но едва ли можно научить создавать великое. Польза самой лучшей научной школы состоит в том, что она дает возможность пробудить и усовершенствовать природные данные, если они хороши; но никакая научная школа не может заметить недостающие способности, не может выработать проникательности и остроумия — если их нет.

К. Э. Циолковский имел выдающиеся способности, необыкновенно проникающий взгляд на явления природы и техники, колоссальную силу воли и терпение.

Работы К. Э. Циолковского по ракетодинамике и теории межпланетных сообщений были *первыми* строго на-

¹ К. Э. Циолковский. Ракета в космическое пространство. Калуга, 1924, стр. V—VI.



Памятник К. Э. Циолковскому в Калуге

учными изысканиями в мировой научно-технической литературе. В этих исследованиях математические формулы и расчеты не затевают глубоких и ясных идей, сформулированных оригинально и четко. Строгий и беспощадный судья — время — лишь выявляет и подчеркивает грандиозность замыслов, своеобразие творчества и высокую мудрость проникновения в сущность новых закономерностей и явлений природы, которые свойственны этим произведениям К. Э. Циолковского. Его труды по авиации (реактивный аэроплан, скорый поезд на воздушной подушке), ракетодинамике и космонавтике помогают осуществлять новые дерзания советской науки и техники. Россия может гордиться своим знаменитым ученым, подлинным украшением человеческого рода, начинателем новых направлений развития науки и техники.

Приложения

Мы даем пять приложений: А, Б, В, Г, Д. В первых четырех приведены строгие математические доказательства основных результатов К. Э. Циолковского. От читателя этих четырех приложений требуется знание основ высшей математики и вариационного исчисления.

В пятом приложении рассматриваются некоторые вопросы научно-технического творчества К. Э. Циолковского.

Приложение А

Прямолинейные движения одноступенчатой ракеты

Первые исследования поступательных прямолинейных движений ракет были выполнены К. Э. Циолковским и опубликованы в журнале «Научное обозрение» в 1903 г.¹ *Формулы, полученные К. Э. Циолковским, выявляют основные возможности и закономерности реактивного движения.*

§ 1. Две задачи Циолковского. Законы изменения массы

1. Основное уравнение движения ракеты. Формула Циолковского. Пусть ракета движется поступательно в безвоздушном пространстве без действия внешних сил

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, 1954, стр. 69.

(в «свободном пространстве», по терминологии Циолковского).

Пусть относительная скорость отбрасываемых реактивным двигателем частиц — продуктов горения — постоянна и направлена прямо противоположно скорости центра масс ракеты. Будем считать, что при выгорании топлива центр масс ракеты не смещается относительно ее корпуса. При сделанных упрощающих предположениях дифференциальное уравнение движения центра масс ракеты будет совпадать с основным уравнением движения точки переменной массы (уравнением Мещерского). Уравнение Мещерского для центра масс ракеты можно написать в виде¹

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{\Phi} + \vec{R}, \quad (\text{A-1})$$

где M — масса ракеты; \vec{v} — вектор скорости центра масс; \vec{R} — результирующая всех внешних сил, действующих на ракету; $\vec{\Phi}$ — реактивная сила.

При движении ракеты в свободном пространстве $\vec{R} = 0$. Величина реактивной силы

$$\Phi = - \frac{dM}{dt} V_e, \quad (\text{A-2})$$

где $(-dM/dt)$ — секундный расход массы, а V_e — эффективная скорость отбрасывания (истечения) частиц — продуктов горения.

Спроектируем векторное уравнение (A-1) на направление скорости ракеты (рис. 23).

$$M \frac{dv}{dt} = - V_e \frac{dM}{dt}, \quad (\text{A-3})$$

или

$$dv = V_e \frac{dM}{M}. \quad (\text{A-4})$$

При движении ракеты в свободном пространстве можно принять $V_e = \text{const}$. Пусть $M = M_0 f(t)$, где $f(t)$ — функция, определяющая закон изменения массы; очевидно, что $f(0) = 1$, так как $M = M_0$ при $t = 0$. Учитывая, что

¹ Вывод уравнения Мещерского см в кн.: А. А. Космодемьянский. Курс теоретической механики. М., Учпедгиз, 1955, стр. 464—469.

$dM = M_0 df$, мы можем написать

$$dv = -V_e \frac{df}{f}. \quad (\text{A-5})$$

Из уравнения (A-5) после интегрирования получим

$$v = -V_e \ln f + C_1,$$

где C_1 — постоянная интегрирования.

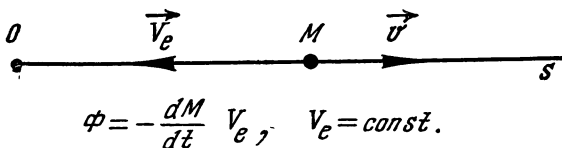


Рис. 23

Пусть $f=1$ и $v=v_0$ при $t=0$, тогда $C_1=v_0$ и, следовательно,

$$v = v_0 - V_e \ln f = v_0 - V_e \ln \frac{M}{M_0}, \quad (\text{A-6})$$

или

$$v = v_0 + V_e \ln \frac{M_0}{M}. \quad (\text{A-7})$$

Эта формула позволяет определить скорость ракеты для любого значения ее уменьшающейся массы M . Формулу (A-7) будем называть формулой Циолковского.

Из формулы (A-7) ясно, что скорость движения ракеты зависит от отношения начальной массы к массе остающейся. Если обозначим массу ракеты в конце процесса горения (в конце работы реактивного двигателя) через M_k , а отброшенную массу (массу топлива) через M_T , то для скорости $v_1 = v_{\text{max}}$, которую приобретет ракета в конце процесса горения, при $v_0=0$ мы получим из формулы (A-7) следующее соотношение:

$$v_1 = V_e \ln \frac{M_k + M_T}{M_k} = V_e \ln \left(1 + \frac{M_T}{M_k} \right) = V_e \ln (1 + Z). \quad (\text{A-8})$$

Для некоторых конструкций ракет можно считать $V_e = 2000$ м/сек. В табл. (A-1) мы приводим значения скорости центра масс ракеты в зависимости от отношения масс при $V_e = 2000$ м/сек, $v_0 = 0$.

Таблица (А—1)

$\frac{M_k}{M_0}$	$Z = \frac{M_T}{M_k}$	v_1 м/сек	$\frac{M_k}{M_0}$	$Z = \frac{M_T}{M_k}$	v_1 м/сек
1,000	0,000	0	0,090	10,111	4 817
0,900	0,111	210,5	0,080	11,500	5 052
0,800	0,250	446,3	0,070	13,286	5 318
0,700	0,429	713,8	0,060	15,667	5 626
0,600	0,667	1022	0,050	19,000	5 991
0,500	1,000	1386	0,030	32,333	7 013
0,400	1,500	1832	0,010	99,000	9 210
0,300	2,333	2408	0,001	999	13 845
0,200	4,000	3218	0,0001	9999	18 420
0,100	9,000	4605	0,0000		

В нашей отечественной литературе отношение $M_T/M_k = Z$ называют числом Циолковского.

Из формулы Циолковского (А—8) вытекают следующие основные выводы:

а) скорость ракеты в конце процесса отбрасывания частиц (в конце активного участка полета) тем больше, чем больше относительная скорость отбрасываемых частиц. Если относительная скорость отбрасывания удваивается, то и скорость ракеты возрастает в два раза;

б) скорость ракеты в конце активного участка возрастает при увеличении отношения начальной массы ракеты к ее массе в конце процесса отбрасывания частиц, или, иначе говоря, скорость ракеты в конце активного участка тем больше, чем больше число Циолковского;

в) скорость ракеты в конце активного участка не зависит от закона изменения массы (режима работы двигателя). Заданному числу Циолковского в конце процесса отбрасывания соответствует вполне определенная скорость движения ракеты независимо от того, быстро или медленно происходило отбрасывание (сжигание) имеющегося запаса топлива.

Логарифмический закон (А—8) был сформулирован К. Э. Циолковским в 1914 г.¹ в виде следующей теоремы.

¹ К. Э. Циолковский. Исследование мировых пространств реактивными приборами (дополнение к I и II частям труда того же названия). Калуга. 1914.

«Когда масса ракеты плюс масса взрывчатых веществ, имеющихся в реактивном приборе, возрастает в геометрической прогрессии, скорость ракеты увеличивается в прогрессии арифметической».

В самом деле, формулу (А—8) можно записать в виде

$$v_1 = v_{\max} = V_e \ln \frac{M_0}{M_k}, \quad (\text{А—9})$$

следовательно, если отношение M_0/M_k будет, например, последовательно принимать значения 2, 4, 8, 16, 32..., то отношение скоростей v_1/V_e будет принимать значения $\ln 2 = a, 2a, 3a...$

Из формулы Циолковского следует весьма важный практический результат: для получения возможно больших скоростей ракеты в конце активного участка гораздо выгоднее идти по пути увеличения относительных скоростей отбрасывания частиц, чем по пути увеличения относительного запаса топлива.

Определим теперь закон изменения расстояния центра масс ракеты от выбранного начала координат. Из уравнения (А—7)

$$dL = v_0 dt - (V_e \ln f) dt.$$

Интегрируя, получим

$$L = L_0 + v_0 t - V_e \int_0^t (\ln f) dt. \quad (\text{А—10})$$

Как видно из формулы (А—10), вычисление закона расстояний требует знания законов изменения массы ракеты с течением времени, т. е. задания вида функции $f(t)$.

2. *Законы изменения массы.* Закон изменения массы того или иного летательного аппарата определяется режимом работы реактивного двигателя, т. е. его секундными расходами массы. В современных теоретических работах по ракетодинамике наибольшее применение получили два закона изменения массы:

1) $f(t) = 1 - \alpha t$ — так называемый линейный закон изменения массы;

2) $f(t) = e^{-\alpha t}$ — так называемый показательный закон изменения массы; здесь α есть величина постоянная.

Эти законы имеют то преимущество перед другими законами изменения массы, что допускают ясную механическую интерпретацию.

В самом деле, если

$$M = M_0(1 - \alpha t),$$

то секундный расход массы равен

$$\left(-\frac{dM}{dt}\right) = \alpha M_0 = \text{const},$$

т. е. линейный закон изменения массы соответствует постоянному секунднему расходу отделяющихся частиц.

Так как реактивная сила

$$\Phi = -\frac{dM}{dt} V_e = \alpha M_0 V_e,$$

то при выполнении гипотезы Циолковского о постоянстве относительной скорости отбрасываемых частиц реактивная сила $\Phi = \text{const}$.

Таким образом, при соблюдении гипотезы Циолковского можно утверждать, что линейный закон изменения массы соответствует постоянной реактивной силе.

На рис. 24 приведены два графика изменения реактивной силы в функции времени, полученных при испытаниях реальных двигателей на стенде.

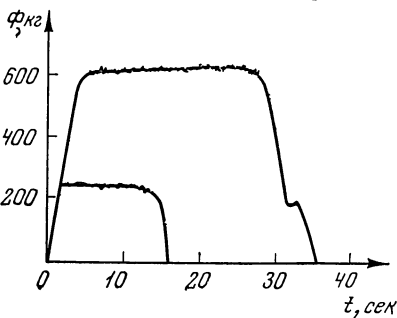


Рис. 24.

Как видно из рис. 23 основная часть графика весьма близка к прямой, параллельной оси времени t , т. е. на основном режиме данный реактивный двигатель развивает постоянную реактивную силу (тягу). В промежутки времени, соответствующие началу и концу работы двигателя, реактивная тяга является более сложной функцией времени.

Обозначив секундный расход — dM/dt через m , получим

$$\alpha = \frac{(-dM/dt)}{M_0} = \frac{m_s}{M_0}. \quad (\text{A}-11)$$

Следовательно, параметр α , входящий в формулу линейного закона изменения массы, представляет собой секундный расход массы, отнесенной к начальной массе ракеты. Мы будем называть α удельным секундным расходом массы.

Ускорение движущейся ракеты, обусловленное постоянной реактивной силой, будет величиной переменной, так как масса ракеты уменьшается с течением времени. Обозначая ускорение, обусловленное реактивной силой, через a_r , будем иметь при линейном законе изменения массы

$$a_r = \frac{\Phi}{M} = \frac{\alpha M_0 V_e}{M_0 (1 - \alpha t)} = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha t}. \quad (\text{A}-12)$$

При показательном законе изменения массы и соблюдении гипотезы Циолковского о постоянстве относительной скорости реактивная сила пропорциональна массе ракеты в данный момент времени. В самом деле,

$$\Phi = - \frac{dM}{dt} V_e = \alpha M_0 e^{-\alpha t} V_e = \alpha M V_e.$$

Ускорение, обусловленное реактивной силой, будет

$$a_r = \frac{\Phi}{M} = \alpha V_e = \text{const}. \quad (\text{A}-13)$$

Таким образом, если относительная скорость отбрасываемых частиц постоянна, то *показательный закон изменения массы соответствует постоянному ускорению, сообщаемому реактивной силой.*

Отношение ускорения, сообщаемого реактивной силой, к ускорению силы тяжести мы называем перегрузкой, обусловленной действием реактивной силы. Очевидно, при показательном законе изменения массы перегрузка

$$n = \frac{a_r}{g} = \frac{\alpha V_e}{g} = \text{const}. \quad (\text{A}-14)$$

Так как при показательном законе изменения массы секундный расход $m_s = dV_e$ то

$$\alpha = \frac{(-dM/dt)}{M} = \frac{m_s}{M}$$

характеризует отношение секундного расхода к массе ракеты в данный момент времени.

Если нам известен закон изменения массы, т. е. функция $f(t)$, то исходя из формулы (А—10) мы можем найти закон движения центра масс ракеты $L=L(t)$ в конечном виде.

В самом деле, если $f(t) = t^{-\alpha t}$, то:

$$L = L_0 + v_0 t + \frac{1}{2} \alpha V_e t^2. \quad (\text{А—15})$$

Если $f = 1 - \alpha t$, то

$$L = L_0 + v_0 t + \frac{V_e}{\alpha} [(1 - \alpha t) \ln(1 - \alpha t) + \alpha t]. \quad (\text{А—16})$$

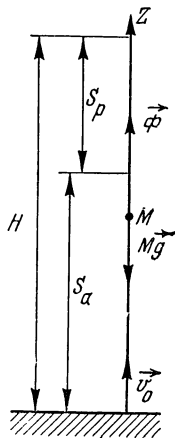


Рис. 25

3. *Вторая задача Циолковского.* Пусть ракета движется поступательно по вертикали вверх в однородном поле силы тяжести и начальная скорость центра масс ракеты равна v_0 . Требуется определить закон изменения скорости и расстояния (высоты) ракеты в зависимости от времени при различных законах изменения

массы и найти максимальную высоту подъема ракеты. Пусть относительная скорость истекающих частиц постоянна по величине и направлена по вертикали вниз.

Допустим, что прямая, по которой движется центр масс ракеты, есть ось OZ (рис. 25). Проектируя векторное уравнение (А—1) на ось OZ , получим

$$M \frac{dv}{dt} = -Mg - V_e \frac{dM}{dt}, \quad (\text{А—17})$$

или

$$\frac{dv}{dt} = -g - V_e \frac{d}{dt} \ln f. \quad (\text{А—18})$$

При условии $V_e = \text{const}$ уравнение удобно написать так

$$\frac{d}{dt}(v + V_e \ln f) = -g. \quad (\text{A}-19)$$

Интегрируя, получим

$$v + V_e \ln f = -gt + C_1, \quad (\text{A}-20)$$

где C_1 — постоянная интегриации.

Приняв во внимание начальные условия: $v = v_0$ и $f = 1$ при $t = 0$, будем иметь

$$v = v_0 - gt + V_e \ln \frac{M_0}{M}. \quad (\text{A}-21)$$

Для того чтобы найти закон движения, проинтегрируем (A-21). При $L_0 = 0$ будем иметь

$$L = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 - \frac{1}{2} V_e \int_0^t (\ln f) dt. \quad (\text{A}-22)$$

Следовательно,

$$L = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 + \frac{1}{2} \alpha V_e t^2, \quad (\text{A}-23)$$

если $f = e^{-\alpha t}$, и

$$L = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 + \frac{V_e}{\alpha} [(1 - \alpha t) \ln(1 - \alpha t) + \alpha t], \quad (\text{A}-24)$$

если $f = 1 - \alpha t$.

Определим максимальную высоту подъема центра масс ракеты для случая, когда $f = e^{-\alpha t}$. Так как при $v = 0$ $L = L_{\text{max}} = H$, то из формулы (A-21) следует, что

$$v_0 - gt + \alpha V_e t = 0,$$

откуда

$$t = \frac{v_0}{g - \alpha V_e}. \quad (\text{A}-25)$$

Положительные значения t будут иметь место при условии, что $g > \alpha V_e$ или при $\alpha < g/V_e$. Чтобы понять смысл требования $\alpha < g/V_e$, рассмотрим случай относительного равновесия ракеты в поле силы тяжести. В этом случае

$$Mg = - \frac{dM}{dt} V_e, \quad (\text{A—26})$$

откуда

$$M = M_0 e^{\frac{g}{V_e} t}.$$

Таким образом, случаю относительного равновесия ракеты соответствует $\alpha = g/V_e$. Если $\alpha > g/V_e$, то реактивная сила больше силы тяжести; если же $\alpha < g/V_e$, то реактивная сила меньше силы тяжести. Из формулы (A—23) ясно, что при $\alpha V_e < g$ ракета будет совершать движение в однородном поле тяготения с ускорением, равным $(g - \alpha V_e)$.

Подставляя время t из формулы (A—25) в (A—23), находим максимальную высоту подъема (предполагаем, что процесс горения происходит на всей траектории полета ракеты до точки, где $v=0$):

$$H = \frac{v_0^2}{2(g - \alpha V_e)}. \quad (\text{A—27})$$

Формулы (A—23) и (A—27) будут аналогичны хорошо известным в механике формулам для равнопеременного движения, если положить ускорение точки, равным $a_1 = g - \alpha V_e$.

При линейном законе изменения массы имеем

$$v = v_0 - gt - V_e \ln(1 - \alpha t).$$

Если на всем участке полета до $v=0$, ускорение, обусловленное реактивной силой, меньше ускорения силы тяжести, то время движения определится (графически) из уравнения

$$v_0 - gt - V_e \ln(1 - \alpha t) = 0,$$

а максимальную высоту подъема можно найти при помощи формулы (A—24).

§ 2. Оптимальные режимы движения в задачах Циолковского

Рассмотренные в § 1 простейшие случаи прямолинейного движения ракеты позволяют дать новую постановку одного класса задач, которые мы будем называть

задачами на отыскание оптимальных режимов движения. Как видно из формул (А—10), (А—21) и (А—22), основные характеристики движения ракеты $v=v(t)$, $L=L(t)$ зависят от вида функции $f(t)$, характеризующей закон изменения массы ракеты или режим работы реактивного двигателя. При различных законах изменения массы закон изменения скорости v и закон изменения расстояния L будут, вообще говоря, различными. Возможность влиять на характеристики движения ракеты изменением вида функции $f(t)$ является принципиально новым фактором теории движения тел переменной массы. Если класс функций $f(t)$ задан с точностью до параметра α , как это имеет место в простейших законах $M=M_0(1-\alpha t)$, $M=M_0e^{-\alpha t}$, то характеристики движения ракеты будут изменяться в зависимости от параметра α .

Пусть задан запас массы (запас топлива) $M_T=M_0-M_\kappa$, где M_κ — масса ракеты без топлива (масса пустой ракеты, включающая массу корпуса, массу сухого двигателя, массу приборов управления и массу полезного груза). Участок полета при наличии изменения массы является активным, участок полета при постоянной массе — пассивным. Из решения первой задачи Циолковского (уравнение А—21) мы можем найти следующую формулу для скорости центра масс ракеты в конце активного участка полета:

$$v_1 = v_0 + V_e \ln \frac{M_0}{M} = v_0 - V_e \ln f_\kappa. \quad (\text{А—28})$$

Из (А—28) следует, что скорость v_1 не зависит от вида функции $f(t)$, а зависит только от количества отброшенной массы M_T (или конечного значения относительной массы f_κ). Этот результат можно было предвидеть из качественных соображений, так как в пространстве без действия внешних сил (свободном пространстве, по Циолковскому) при $V_e=\text{const}$ количество движения, получаемое ракетой массой M_κ , не зависит от закона расходования имеющегося запаса массы. В частности, скорость v_1 не изменится, если весь запас массы M_T отбросить мгновенно в момент $t=0$. Случай мгновенного отбрасывания имеющегося запаса массы будем называть мгновенным сжиганием топлива. Явление мгновенного сжигания данного запаса массы аналогично явле-

нию удара в задачах классической механики. Роль ударной силы для точки переменной массы при мгновенном сжигании играет реакция, возникающая при отбрасывании массы в момент контактного взаимодействия масс M_κ и M_τ .

Длина активного участка в первой задаче Циолковского зависит от принятого закона изменения массы. При мгновенном сжигании имеющегося запаса массы длина активного участка будет, очевидно, равна нулю. При показательном законе изменения массы из (А — 10) имеем

$$L = L_0 + v_0 t + \frac{1}{2} \alpha V_e t^2.$$

Пусть $M_\kappa = M_0 e^{-\alpha t_1}$ и $f_\kappa = e^{-\alpha t_1}$ в конце активного участка (при $t = t_1$ и $L = L_1$), тогда

$$L_1 = L_0 + v_0 t_1 + \frac{1}{2} \alpha V_e t_1^2. \quad (\text{А} - 29)$$

Так как f_κ задано, то

$$\ln \frac{1}{f_\kappa} = \alpha t_1 = \text{const} = \mu \quad (\text{А} - 30)$$

и, следовательно,

$$t_1 = \mu / \alpha.$$

Исключая t_1 из формулы (29), получим

$$L_1 = L_0 + \frac{v_0 \mu}{\alpha} + \frac{\mu^2 V_e}{2\alpha}. \quad (\text{А} - 31)$$

Случай мгновенного сгорания соответствует $t_1 = 0$, т. е. $\alpha = \infty$. Тогда из (А — 31) получим $L = L_0$. Если считать, что $\alpha \rightarrow 0$, что будет соответствовать бесконечно малому секундному расходу топлива, то $L_1 \rightarrow \infty$. Скорость V_1 в конце активного участка полета не зависит от α и на основании формул (А — 28) и (А — 30) будет

$$v_1 = v_0 + \mu V_e. \quad (\text{А} - 32)$$

Определим максимальную высоту подъема центра масс ракеты, движущейся по вертикали вверх в однородном поле силы тяжести. Примем для наглядности рас-

суждений $M = M_0 e^{-\alpha t}$. Если запас массы задан, то, используя формулы (А—23) и (А—30), получим следующую формулу для длины активного участка полета:

$$L_a = \frac{v_0 \mu}{\alpha} - \frac{1}{2} \frac{g \mu^2}{\alpha^2} + \frac{1}{2} \frac{\mu^2 V_e}{\alpha}. \quad (\text{А—33})$$

Длина пассивного участка определится по формуле

$$L_p = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{(v_0 - g t_1 + \alpha V_e t_1)^2}{2g} = \frac{\left[(v_0 + \mu V_e) - \frac{g \mu}{\alpha} \right]^2}{2g}$$

Таким образом, полная высота подъема ракеты будет

$$H = L_a + L_p = \frac{v_0 \mu}{\alpha} - \frac{1}{2} \frac{g \mu^2}{\alpha^2} + \frac{1}{2} \frac{\mu^2 V_e}{\alpha} + \frac{\left[(v_0 + \mu V_e) - \frac{g \mu}{\alpha} \right]^2}{2g} \quad (\text{А—34})$$

При заданной начальной скорости v_0 , заданном запасе топлива $M_T = M_0 - M_K$ (т. е. заданном μ) и скорости V_e высота подъема H является функцией удельного расхода массы α .

Определим, при каком значении α высота подъема центра масс ракеты будет максимальной. Режим изменения массы, т. е. режим работы двигателя, при котором обеспечивается достижение максимальной высоты подъема при заданном запасе топлива, будем называть оптимальным. Для определения характеристик оптимального режима исследуем функцию $H(\alpha)$. Дифференцируя H по α и приравнявая производную нулю, получим

$$-\frac{v_0 \mu}{\alpha^2} + \frac{\mu^2}{2} \left(\frac{2g}{\alpha^3} - \frac{V_e}{\alpha^2} \right) + \frac{\mu}{\alpha^2} \left[v_0 + (\alpha V_e - g) \frac{\mu}{\alpha} \right] = 0.$$

Приводя подобные члены, легко найдем, что значение α , соответствующее экстремальному значению H , определится из уравнения

$$\frac{1}{2} \frac{\mu^2 V_e}{\alpha^2} = 0. \quad (\text{А—35})$$

Так как

$$\frac{d^2 H}{d\alpha^2} < 0,$$

то из соотношения (А—35) следует, что *максимальная высота подъема ракеты будет при $\alpha = \infty$* . Значение $\alpha = \infty$ соответствует мгновенному сгоранию имеющегося запаса топлива. Максимальная высота подъема будет в этом случае

$$H_{\max} = \frac{(v_0 + \mu V_e)^2}{2g} = \frac{V_z^2}{2g}, \quad (\text{А—36})$$

где V_z — скорость ракеты, определяемая по формуле Циолковского.

Таким образом, в однородном поле силы тяжести в тех случаях, когда силами сопротивления можно пренебречь, для достижения максимальной высоты подъема практически выгодно как можно быстрее сжигать заданный запас топлива.

В некоторых случаях может, однако, потребоваться относительно малый удельный расход горючего для того, чтобы ракета (или находящиеся в ней приборы) не имела больших перегрузок (ускорений), обусловленных реактивной силой. Для этих случаев мы поставим несколько видоизмененную экстремальную задачу: найти, при каких значениях α активный участок L_α будет наибольшим.

Формула (А—33) определяет L_α в функции α . Дифференцируя L_α по α и приравнявая производную нулю, получим

$$-\frac{v_0\mu}{\alpha} - \frac{\mu^2 V_e}{2\alpha^2} - \frac{\mu^2 g}{\alpha^2} = 0,$$

откуда

$$\alpha = \frac{2\mu g}{2v_0 + \mu V_e}. \quad (\text{А—37})$$

В частном случае, при $v_0 = 0$

$$\alpha = 2g/V_e. \quad (\text{А—38})$$

Легко проверить, вычисляя вторую производную L_α по α , что при значении α , определяемом формулой (А—38), соответствующий активный участок полета будет максимальным.

Интересно отметить, что оптимальный режим при $v_0 = 0$ реализуется тогда, когда ускорение, сообщаемое

реактивной силой, в два раза больше ускорения силы тяжести. Скорость ракеты в конце активного участка определяется по формуле

$$v_1 = \mu V_e - \frac{g\mu}{\alpha}.$$

Подставляя значение α , вычисленное по формуле (А—38), получим

$$v_1 = \frac{1}{2} \mu V_e. \quad (\text{А—39})$$

Теперь можно подсчитать полную высоту подъема H при режиме работы двигателя, обеспечивающем максимальный активный участок. Длина активного участка L_a при α , определяемом формулой (А—37), будет

$$L_a^{\max} = \frac{(2v_0 + \mu V_e)^2}{8g}.$$

Так как $V_1 = 1/2 \mu V_e$, то полная высота подъема ракеты будет

$$H = L_a^{\max} + L_p = \frac{(2v_0 + \mu V_e)^2}{8g} + \frac{\mu^2 V_e^2}{8g}. \quad (\text{А—40})$$

В частном случае, когда $v_0 = 0$,

$$H = \frac{\mu^2 V_e^2}{4g} = \frac{V_z^2}{4g}. \quad (\text{А—41})$$

Сравнивая (А—41) и (А—36), мы видим, что при мгновенном отбрасывании данного запаса массы высота подъема в два раза больше, чем при медленном сгорании топлива, когда мы желаем реализовать максимальный активный участок полета ракеты.

Интересно выяснить, насколько велика будет потеря в высоте подъема ΔH при изменении удельных расходов массы. Пусть $v_0 = 0$. Найдем H в функции α , считая μ и V_e заданными. Имеем

$$L_a = (\alpha V_e - g) \frac{t_1^2}{2}, \quad L_p = \frac{v_1^2}{2g}, \quad v_1 = (\alpha V_e - g) t_1.$$

Так как $t_1 = \mu/\alpha$, то, полагая $\alpha = ng/V_e$, где n — перегрузка, обусловленная реактивной силой, получим

$$H = \frac{\mu^2 V_e^2}{2g} \frac{n-1}{n}. \quad (\text{A-42})$$

При $n=1$ имеет место относительное равновесие, при $n=2$ ускорение, сообщаемое реактивной силой, будет равно $2g$ и т. д.; значение $n=\infty$ соответствует мгновенному отбрасыванию имеющегося запаса массы.

Таким образом,

$$H_n = H_\infty \frac{n-1}{n},$$

или

$$\frac{H_n}{H_\infty} = \frac{n-1}{n}. \quad (\text{A-43})$$

Из формулы (A-43) следует, что при $n=4$ потеря высоты равна 25%, а при $n=50$ — всего 2%.

Очевидно, что с увеличением n уменьшается время сгорания заданного запаса массы ($M_0 - M_k$). Из формулы $\alpha t_1 = \mu$ получим

$$t_1 = \frac{\mu}{\alpha} = \frac{\mu V_e}{ng}.$$

Если ввести в рассмотрение время T сгорания топлива при относительном равновесии ракеты (перегрузка $n=1$), то получим $t_1 = T/n$, что и дает закон изменения времени сгорания в зависимости от перегрузки, обусловленной реактивной силой.

Аналогичные выводы можно получить и для линейного закона изменения массы, когда $f(t) = 1 - \alpha t$. Что касается оптимального режима, обеспечивающего при заданном запасае массы максимальную скорость точки в конце активного участка, то из общемеханических соображений можно утверждать, что он реализуется при мгновенном сжигании имеющегося запаса массы. В самом деле, при мгновенном сжигании (мгновенном отбрасывании массы) реактивная сила аналогична силе удара, и за время действия этой силы влиянием конечных сил (например, силы тяжести) можно пренебречь. Иначе говоря, за бесконечно малый промежуток времени уменьшение скорости, обусловливаемое действием силы тяжести, будет также бесконечно мало.

Отметим в заключение, что формулой Циолковского (А—7) можно пользоваться для приближенных оценок динамических характеристик полета ракет и в тех случаях, когда аэродинамическая сила сопротивления невелика по сравнению с реактивной силой. Такие случаи бывают обычно на активном участке полета пороховых ракет, для которых перегрузки, обусловленные реактивной силой, достигают 100—120, а сила лобового сопротивления редко превосходит $2Mg$. Если рассмотреть траектории центра масс на активном участке полета пороховых ракет «Катюша», то легко заметить, что они мало отличаются от прямой; это указывает на сравнительно малое влияние силы тяжести (а также аэродинамических сил) по сравнению с реактивной силой. Поэтому скорость ракеты «Катюша» в конце активного участка можно достаточно точно определить по формуле Циолковского (ошибка не превосходит 5—6%).

Приложение Б

Прямолинейные движения многоступенчатой ракеты

§ 1. Формула Циолковского для многоступенчатых ракет

Формулу Циолковского можно использовать для анализа летных характеристик многоступенчатых ракет.

Так как при выводе формулы Циолковского не учитывалось влияние силы тяжести и силы сопротивления среды, то приводимые в последующем результаты являются результатами первого приближения. Учет влияния однородного поля силы тяжести на летные характеристики многоступенчатых ракет не представляет каких-либо принципиальных трудностей, так как уравнение Мещерского легко интегрируется и в этом случае ¹.

Учет влияния сил сопротивления вносит существенные трудности; исходное уравнение Мещерского становится нелинейным, и, по-видимому, аналитическое реше-

¹ См.: А. Миеле. Механика полета, т. I. Теория траекторий полета. М., «Наука», 1965, стр. 368—377.

ние можно получить только для оптимальных режимов программирования тяги последовательных составляющих ракет («субракет»), входящих в многоступенчатую ракету. Эта задача еще ждет своего исследователя.

Научная разработка теории полета многоступенчатых ракет принадлежит Циолковскому, который в ряде своих статей, начиная с 1926 г., определял летные характеристики таких летательных аппаратов. На основании приведенных в работах Циолковского описаний можно утверждать, что он предлагал два типа многоступенчатых ракет, или ракетных поездов¹.

Первый тип ракетного поезда подобен железнодорожному, когда паровоз толкает состав сзади. Мы называем теперь такой поезд ракет многоступенчатой ракетой с последовательным отделением ступеней (рис. 26). Представим себе, например, три ракеты, соединенные последовательно, одна за другой. Такой ракетный поезд толкается сначала нижней (хвостовой) ракетой. После сжигания топлива хвостовой ракеты она отделяется от поезда и падает на Землю. Далее начинает работать двигатель второй (средней) ступени, которая для поезда из оставшихся двух ракет является толкающей. После полного использования топлива второй ступени она также отделяется, а у последней, третьей ракеты начинает работать двигатель, и она достигает цели путешествия (полета).

О втором типе составной (многоступенчатой) ракеты, названном Циолковским эскадрилей ракет, говорилось в гл. V (стр. 115).

Рассмотрим далее теорию полета многоступенчатой ракеты типа ракетного поезда Циолковского. Основные расчетные формулы приобретают симметричный вид, если воспользоваться рациональными обозначениями, данными в статье М. Фертрегта².

Разделим многоступенчатую ракету на субракеты и ступени, как показано на рис. 27. Масса M_1 первой субракеты состоит из массы полезного груза M_0 , массы конструкции первой ступени m_{1k} и массы топлива первой ступени m_{1r} , так что

$$M_1 = M_0 + m_{1k} + m_{1r};$$

Для второй субракеты массой M_2 первая субракета

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 298—327 и 420—435.

² М. Vertregt. Calculation of Step-Rockets.— Journal of the British In-

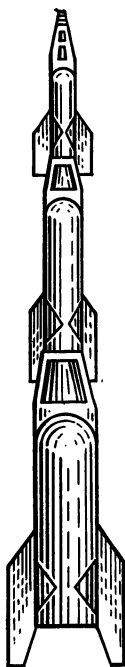


Рис. 26. Макет трехступенчатой ракеты с последовательным отделением ступеней

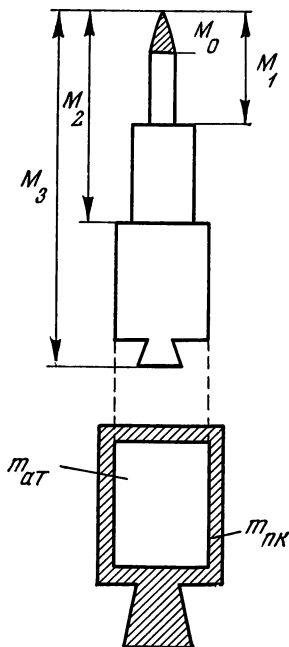


Рис. 27. Схема многоступенчатой ракеты

является полезным грузом. Если масса конструкции второй ступени будет $m_{2к}$, а масса топлива $m_{2т}$, то очевидно,

$$M_2 = M_1 + m_{2к} + m_{2т};$$

аналогично,

$$M_3 = M_2 + m_{3к} + m_{3т},$$

.....

$$M_n = M_{n-1} + m_{нк} + m_{нт}.$$

terplanetary Society, 1955, v. 14, N 1. Есть русский перевод: М. Ферретт. Основы космонавтики. М., «Просвещение», 1969; гл. 8-я этой книги посвящена многоступенчатым ракетам.

определим эти коэффициенты следующим образом:

$$\frac{M_0}{M_1} = \pi_1 = \frac{1}{\rho_1}; \quad \frac{M_1}{M_2} = \pi_2 = \frac{1}{\rho_2},$$

$$\dots$$

$$\dots$$

где π_1 — коэффициент полезной весовой отдачи первой субракеты; ρ_1 — число килограммов веса первой субракеты, необходимое для сообщения килограмму полезного груза заданной скорости v_1 ,

$$\frac{M_{n-1}}{M_n} = \pi_n = \frac{1}{\rho_n},$$

где π_n — коэффициент полезной весовой отдачи n -й субракеты. Важным безразмерным коэффициентом, характеризующим полезную весовую отдачу всей n -й ступенчатой ракеты, будет

$$\pi_0 = \frac{M_0}{M_n} = \frac{1}{\rho_0},$$

где M_0 — масса полезного груза; M_n — стартовая масса n -ступенчатой ракеты; ρ_0 — число килограммов стартового веса, необходимое для сообщения килограмму полезного груза заданной скорости v_1 .

Легко понять, что

$$\frac{M_0}{M_n} = \frac{M_0}{M_1} \frac{M_1}{M_2} \dots \frac{M_{n-1}}{M_n} = \pi_1 \pi_2 \dots \pi_n \quad (\text{Б—2})$$

и, следовательно,

$$\pi_0 = \frac{M_0}{M_n} = \pi_1 \pi_2 \dots \pi_n, \quad (\text{Б—3})$$

а

$$\rho_0 = \rho_1 \rho_2 \dots \rho_n. \quad (\text{Б—4})$$

Безразмерные коэффициенты s_1, s_2, \dots, s_n (структурные коэффициенты), характеризующие конструктивное совершенство последовательных субракет, определим так:

$$s_1 = \frac{m_{1k} + m_{1r}}{m_{1k}} = 1 + \frac{m_{1r}}{m_{1k}} = 1 + Z_1,$$

$$s_2 = \frac{m_{2k} + m_{2r}}{m_{2k}} = 1 + Z_2,$$

.....

где m_{1k} — масса конструкции первой субракеты, а m_{1r} — масса топлива, находящегося в емкостях первой субракеты; Z_1 — число Циолковского для первой субракеты,

$$s_n = \frac{m_{nk} + m_{nr}}{m_{nk}} = 1 + Z_n,$$

где Z_n — число Циолковского для n -й субракеты.

Число Циолковского Z_v для v -й субракеты определяет число килограммов топлива, заливаемого в баки v -й субракеты, на один килограмм «сухого» веса (или килограмм конструкции) ракеты.

Кроме того, введем безразмерные коэффициенты r_1, r_2, \dots, r_n , характеризующие отношения масс в субракетах и позволяющие при заданных V_1, V_2, \dots, V_n находить приращения скорости, даваемые последовательными субракетами. Определим эти коэффициенты так:

$$r_n = \frac{M_n}{M_n - m_{nr}}, \dots; \quad r_1 = \frac{M_1}{M_1 - m_{1r}}.$$

Установим одно полезное соотношение между введенными безразмерными коэффициентами.

По определению, для субракеты какого-либо номера v

$$\pi_v = \frac{M_{v-1}}{M_v}, \quad 1 - \pi_v = 1 - \frac{M_{v-1}}{M_v} = \frac{m_{vk} + m_{vr}}{M_v}; \quad (\text{Б—5})$$

$$s_v = \frac{m_{vk} + m_{vr}}{m_{vk}} = 1 + Z_v; \quad (\text{Б—6})$$

$$r_v = \frac{M_v}{M_v - m_{vr}}, \quad \frac{1}{r_v} = 1 - \frac{m_{vr}}{M_v}. \quad (\text{Б—7})$$

Легко понять, что

$$(1 - \pi_v) = \frac{m_{vk} + m_{vr}}{M_v} \frac{m_{vk}}{m_{vk}} = s_v \frac{m_{vk}}{M_v},$$

или

$$\frac{1 - \pi_v}{s_v} = \frac{m_{vk}}{M_v}. \quad (\text{Б—8})$$

Вычитая из (Б—7) соотношение (Б—8), имеем

$$\frac{1}{r_v} - \frac{(1 - \pi_v)}{s_v} = 1 - \frac{m_{vk} + m_{vr}}{M_v} = 1 - \frac{M_v - M_{v-1}}{M_v} = \pi_v,$$

или

$$\frac{1}{r_v} = \frac{1}{s_v} + \pi_v \left(1 - \frac{1}{s_v}\right). \quad (\text{Б—9})$$

Разрешая (Б—9) относительно π_v , получим

$$\pi_v = \frac{(s_v - r_v)}{r_v (s_v - 1)} \quad (\text{Б—10})$$

или

$$\pi_v = \frac{1 + Z_v - r_v}{r_v Z_v}. \quad (\text{Б—11})$$

Полезную весовую отдачу n -ступенчатой ракеты можно записать через безразмерные коэффициенты в следующем виде:

$$\pi_0 = \frac{M_0}{M_n} = (\pi_1 \cdot \pi_2 \dots \pi_n) = \frac{(s_1 - r_1) \dots (s_n - r_n)}{(r_1 \dots r_n) (s_1 - 1) \dots (s_n - 1)}, \quad (\text{Б—12})$$

или

$$\pi_0 = \frac{1}{p_0} = \frac{(1 + Z_1 - r_1) \dots (1 + Z_n - r_n)}{(r_1 \cdot r_2 \dots r_n) (Z_1 \cdot Z_2 \dots Z_n)}. \quad (\text{Б—13})$$

Скорость полезного груза M_0 на основании формулы (Б—1) можно записать в форме

$$v_1 = \sum_{v=1}^n V_v \ln r_v = V_1 \ln r_1 + V_2 \ln r_2 + \dots + V_n \ln r_n. \quad (\text{Б—14})$$

Сформулируем следующую экстремальную задачу. Пусть задано число ступеней ракеты n , скорость v_1 , которую нужно сообщить полезному грузу, и известны числа Циолковского Z_1, Z_2, \dots, Z_n , характеризующие конструктивное совершенство последовательных субракет; требуется определить r_1, r_2, \dots, r_n таким образом, чтобы стартовый вес (стартовая масса) был минимальным. Очевидно, если масса полезного груза M_0 задана и необходимо обеспечить минимум M_n , то отношение $\pi_0 = M_0/M_n$ должно быть максимальным. Таким образом, мы должны найти условия экстремума функции n -переменных $\pi_0 = \pi_0(r_1, r_2, \dots, r_n)$ при дополнительном условии (Б—14), дающем одно соотношение между переменными r_1, r_2, \dots, r_n . Для упрощения последующих вычислений заметим, что

$$\max(\pi_0) = \max(\pi_1 \cdot \pi_2 \dots \pi_n).$$

Но отыскание $\max(\pi_1 \cdot \pi_2 \dots \pi_n)$ эквивалентно отысканию $\max[\ln(\pi_1 \cdot \pi_2 \dots \pi_n)]$, поэтому в дальнейшем мы будем искать максимальное значение

$$y = \ln \pi_0 = \ln(\pi_1 \cdot \pi_2 \dots \pi_n) = \sum_{v=1}^n \ln \pi_v. \quad (\text{Б—15})$$

При дополнительном условии

$$\varphi = v_1 - \sum_{v=1}^n V_v \ln r_v = 0. \quad (\text{Б—16})$$

Для решения этой экстремальной задачи воспользуемся методом Лагранжа. Умножим (Б—16) на неопределенный (пока) множитель Лагранжа λ и образуем новую функцию

$$U = y - \lambda \varphi = \sum_{v=1}^n \ln \pi_v - \lambda \left(v_1 - \sum_{v=1}^n V_v \ln r_v \right). \quad (\text{Б—17})$$

Тогда условия экстремума $y = \ln \pi_0$ будут иметь вид

$$\frac{\partial U}{\partial r_1} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial r_2} = 0, \quad \dots, \quad \frac{\partial U}{\partial r_n} = 0. \quad (\text{Б—18})$$

¹ Математическую теорию экстремума функций многих переменных см., например, в кн.: Г. М. Фихтенгольц, Курс дифференциального и интегрального исчисления, т. 1. М., ГИТТЛ, 1949, стр. 533—536.

Вычислим частную производную $\partial U/\partial r_v$ и приравняем ее нулю.

Учитывая формулу (Б—13) и дифференцируя (Б—17) получим

$$\frac{\partial U}{\partial r_v} = \frac{1}{\pi_v} \frac{\partial \pi_v}{\partial r_v} + \lambda V_v \frac{1}{r_v} = -\frac{s_v}{r_v(s_v - r_v)} + \frac{\lambda V_v}{r_v} = 0,$$

откуда

$$\frac{1}{\lambda V_v} = \frac{s_v - r_v}{s_v} = 1 - \frac{r_v}{s_v}$$

и, следовательно,

$$\left(1 - \frac{1}{\lambda V_v}\right) s_v = r_v, \quad (\text{Б—19})$$

где $v=1, 2, \dots, n$.

Формула (Б—19) дает оптимальное распределение масс последовательных субракет, если λ известно. Для определения λ подставим (Б—19) в (Б—14)

$$v_1 = \sum_{v=1}^n V_v \left[\ln s_v + \ln \left(1 - \frac{1}{\lambda V_v}\right) \right]. \quad (\text{Б—20})$$

В уравнении (Б—20) величины $v_1, s_1, \dots, s_n, V_1, \dots, V_n$ заданы, следовательно, это уравнение с одним неизвестным. Рассмотрим решение уравнения (Б—20) для так называемой *однородной многоступенчатой ракеты*, у которой

$$s_1 = s_2 = \dots = s_n = s; \quad V_1 = V_2 = \dots = V_n = V.$$

Из (Б—20) имеем

$$v_1 = nV \left[\ln s + \ln \left(1 - \frac{1}{\lambda V}\right) \right],$$

или

$$\frac{v_1}{nV} - \ln s = \ln \left(1 - \frac{1}{\lambda V}\right).$$

Так как

$$\frac{v_1}{nV} - \ln s = \ln e^{v_1/nV} - \ln s = \ln \frac{e^{v_1/nV}}{s},$$

то

$$1 - \frac{1}{\lambda V} = \frac{e^{v_1/nV}}{s}. \quad (\text{Б—21})$$

Разрешая (Б—21) относительно $1/\lambda$, получим

$$\frac{1}{\lambda} = V \left(1 - \frac{e^{v_1/nV}}{s} \right). \quad (\text{Б—22})$$

По формуле (Б—19) получаем

$$r_v = s_v \frac{e^{v_1/nV}}{s} = e^{v_1/nV}, \quad (\text{Б—23})$$

т. е. все r_v одинаковы, а, следовательно, приращения скорости полезного груза, обусловленные работой реактивных двигателей последовательных субракет, будут в этом случае также одинаковы. При одинаковых $s_v = s$ и $r_v = r$ ($v = 1, 2, \dots, n$) будут одинаковы π_v ($v = 1, 2, \dots, n$). Положим в этом частном случае $\pi_v = \pi = 1/\rho$, тогда

$$\begin{aligned} M_1 &= \rho M_0, \\ M_2 &= \rho M_1 = \rho^2 M_0, \\ &\dots \dots \dots \\ M_n &= \rho M_{n-1} = \rho^n M_0. \end{aligned} \quad (\text{Б—24})$$

Таким образом, у оптимальной однородной многоступенчатой ракеты веса последовательных субракет (при отсчете их от полезного груза) растут в геометрической прогрессии, а приращения скоростей от последовательных субракет одинаковы и равны (v_1/n).

Рассмотрим для иллюстрации один пример¹.

Четырехступенчатая ракета должна иметь следующие характеристики:

$$v_1 = 9 \text{ км/сек}; V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V = 2,4 \text{ км/сек};$$

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r; s_1 = s_2 = s_3 = s_4 = s = 4,7.$$

Требуется определить необходимый минимальный стартовый вес ракеты, зная, что полезная нагрузка $M_0 g$ равна 1 т.

Из формулы (Б—14)

$$v_1 = V \ln(r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4) = V \ln r^4 = V \ln R$$

¹ M. Vertregt. Calculation of Step-Rockets.— Journal of the British Interplanetary Society, 1955 v. 14, N 1, p. 25.

и, следовательно,

$$R = r^4 = e^{v_1/V} = e^{9/2,4} = 42,5.$$

Из формулы (Б—12)

$$\pi_0 = \frac{1}{R} \frac{(s-r)^4}{(s-1)^4} = \frac{1}{\rho_0}.$$

Зная, что $r^4 = R$ и, следовательно, $r = \sqrt[4]{R}$, легко находим

$$\rho_0 = R \frac{(s-1)^4}{(s-\sqrt[4]{R})^4} = 42,5 \cdot \frac{(4,7-1)^4}{(4,7-\sqrt[4]{42,5})^4} = 372.$$

Таким образом, стартовый вес ракеты $M_n g = 372 M_0 g = 372 \text{ т}$.

§ 2. Сравнительный анализ характеристик одно-, двух- и трехступенчатых ракет

Рассмотрим основные характеристики оптимальных двух- и трехступенчатых ракет и сравним их с характеристиками одноступенчатой ракеты. При сравнении будем предполагать, что коэффициенты конструктивного совершенства

$$S_v = \frac{m_{vk} + m_{vr}}{m_{vk}} = \frac{\text{общая масса (вес) ступени}}{\text{сухой вес ступени}}$$

одинаковы для всех ступеней. Это предположение несколько улучшает конструкции двух- и трехступенчатых ракет по сравнению с одноступенчатой, так как обеспечение надежного соединения и разделения ступеней у двух- и трехступенчатой ракеты требует некоторого увеличения сухого веса ступени или веса полезной нагрузки для субракет.

Кроме того, допустим, что скорости истечения V_v , или, что то же самое, удельные импульсы

$$I_{уд}^v = \frac{V_v}{g} = \text{const} = I_{уд}$$

также одинаковы для всех ступеней (и всех сравниваемых ракет). Это предположение несколько ухудшает (при вертикальном полете с поверхности Земли) характеристики первой и второй ступеней двух- и трехступенчатой

ракет, так как при подъеме на высоту, как правило, удельные импульсы реактивных двигателей увеличиваются.

Для всех сравниваемых ракет полезные нагрузки будем считать одинаковыми; коэффициенты r_v , определяющие отношения масс в субракетах, также одинаковы (условие оптимальности).

Напишем расчетные формулы.

а) *Одноступенчатая ракета* (см. формулу Циолковского):

$$v_1 = V \ln r = gI_{уд} \ln r, \quad (\text{Б—25})$$

где $r = \frac{M_1}{M_1 - m_{1r}}$. Так как $\pi_0 = M_0/M$ предполагается заданным, а на основании формулы (Б—9)

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{s} + \pi_0 \left(1 - \frac{1}{s}\right), \quad (\text{Б—26})$$

то, очевидно, зная π_0 и s , мы найдем v_1 для заданного $I_{уд}$. На основании формул (Б—25) и (Б—26) мы можем построить графики $v_1 = v_1(\pi_0)$ или $\pi_0 = \pi_0(v_1)$ при заданных s и $I_{уд}$.

б) *Двухступенчатая ракета* — см. формулы (Б—12) и (Б—14). Скорость в конце активного участка

$$v_1 = V_1 \ln r_1 + V_2 \ln r_2 = 2V \ln r = 2gI_{уд} \ln r. \quad (\text{Б—27})$$

Для оптимальной двухступенчатой ракеты

$$\pi_0 = \frac{1}{r^2} \frac{(s-r)^2}{(s-1)^2},$$

или

$$\sqrt{\pi_0} = \frac{1}{r} \frac{s-r}{s-1}. \quad (\text{Б—28})$$

Зная коэффициенты r и s , а также $I_{уд}$, на основании формул (Б—27) и (Б—28) мы можем построить графики $v_1 = v_1(\pi_0)$ или $\pi_0 = 1/\rho_0 = \pi_0(v_1)$ для двухступенчатой ракеты.

в) *Трехступенчатая ракета* — см. формулы (Б—12) и (Б—14). Формула для скорости в конце активного участка имеет вид

$$v_1 = 3gI_{уд} \ln r. \quad (\text{Б—29})$$

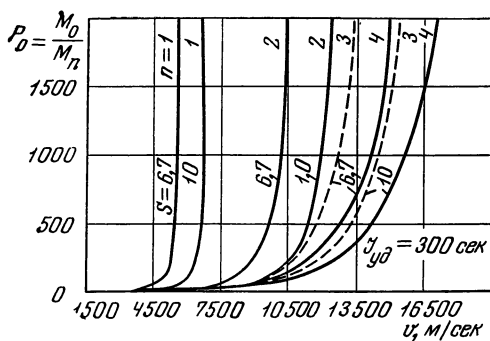


Рис. 28. Зависимость безразмерного полезного груза от скорости для ступенчатых ракет при $I_{уд} = 300$ сек

Величина π_0 для трехступенчатой ракеты будет

$$\pi_0 = \frac{1}{r^3} \frac{(s-r)^3}{(s-1)^3},$$

или

$$\sqrt[3]{\pi_0} = \frac{1}{r} \frac{s-r}{s-1}. \quad (\text{Б—30})$$

При известных r и s мы можем на основании формул (Б—29) и (Б—30) построить графики $\pi_0 = \pi_0(v_1)$ для трехступенчатой ракеты.

На рис. 28 даны графики $1/\pi_0 = p_0 = p_0(v_1)$ для семейства ракет с одной, двумя, тремя и четырьмя ступенями при условии, что $I_{уд} = 300$ сек., а структурный коэффициент s для субракет равен 10 (сплошные линии) и 6,7 (пунктирные линии).

Если структурный коэффициент $s = 10$ (что соответствует весьма совершенным конструкциям ракет), то можно построить графики $p_0 = p_0(v_1)$ для одно-, двух-, трех- и четырехступенчатых ракет при различных значениях $I_{уд}$. На рис. 29 даны два семейства кривых $p_0 = p_0(v_1)$ для $I_{уд} = 300$ сек. и $I_{уд} = 400$ сек.

Из приведенных на рис. 28 и 29 зависимостей следует, что чем большую конечную скорость нужно сообщить полезному грузу, тем большее число ступеней должна иметь ракета. С увеличением $I_{уд}$ область доступных скоростей для ракет существенно расширяется.

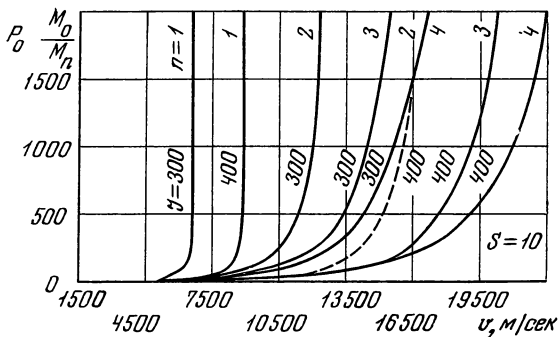


Рис. 29. Зависимость безразмерного полезного груза от скорости для ступенчатых ракет с различной удельной тягой при $S=10$

В заключение заметим, что условие оптимальности для однородной многоступенчатой ракеты в форме (Б—24) сохраняется и при прямолинейном движении в однородном поле тяготения. Существенные результаты получены здесь Л. М. Воробьевым¹.

Приложение В

Закономерности движения искусственных спутников Земли и оптимальные траектории баллистических ракет

1. Для изучения движения какого-либо искусственно-го спутника Земли необходимо знать силы, действующие на этот спутник в полете. Если траектория спутника располагается на высотах порядка среднего радиуса Земли (около 6400 км), то единственной силой, определяющей закономерности движения спутника, будет сила притяжения к центру Земли. В этом случае Землю можно рассматривать как притягивающий центр («материальную точку»), масса которого разна массе Земли; искусствен-

¹ Л. М. Воробьев. К теории полета ракет. М., «Машинностроение», 1970.

ный спутник будет второй материальной точкой, масса которой равна массе спутника. Влияние сил сопротивления, обусловленных частицами космического пространства, ничтожно; влияние неравномерности в распределении масс по объему земного «шара» (точнее, геоида) также будет несущественным. В этом наиболее простом варианте задача об изучении движения спутника есть классическая задача небесной механики, решение которой было хорошо обследовано еще в XVII—XIX столетиях. Приведем здесь основные расчеты.

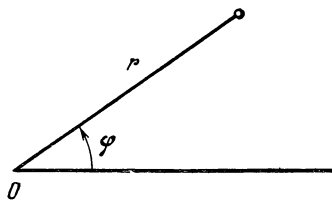


Рис. 30. Полярные координаты (r, φ) спутника

Если движущийся спутник массы m находится на расстоянии r от центра Земли, то в гравитационном поле Земли

$$F = k \frac{mM}{r^2}, \quad (\text{В-1})$$

где F — сила притяжения («центральная» сила); M — масса Земли; k — постоянная тяготения, равная $6,673 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{сек}^2$.

Как было показано на стр. 127,

$$kM = g_0 R^2;$$

следовательно, выражение для силы, действующей на спутник, можно написать в виде

$$F = mg_0 \frac{R^2}{r^2} = mg_0 \frac{R^2}{(R + H)^2}, \quad (\text{В-2})$$

где H — высота спутника над поверхностью Земли, а R — радиус Земли.

Найдем дифференциальное уравнение траектории точки, движущейся под действием центральной силы. Положение точки (центра масс спутника) будем определять полярными координатами r, φ (рис. 30). Если ограничиться случаем притягивающей силы, то на основании теоремы об изменении кинетической энергии материаль-

ной точки можно написать

$$d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = -f(r) r \vec{\delta} d\vec{r} = -f(r) dr,$$

или

$$\frac{1}{2} m \frac{d}{d\varphi} (v^2) = -f(r) \frac{dr}{d\varphi}, \quad (\text{B-3})$$

где $f(r)$ — величина притягивающей силы.

Квадрат модуля скорости в полярных координатах определяется по формуле

$$v^2 = \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2. \quad (\text{B-4})$$

При движении точки в поле центральной силы имеет место закон постоянства секторной скорости (закон площадей), а следовательно,

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} = C_1,$$

где C_1 — постоянная площадей, откуда

$$dt = r^2 d\varphi / C_1.$$

Подставляя dt в формулу (B-4), получим

$$v^2 = \frac{C_1^2}{r^4} \left(\frac{dr}{d\varphi}\right)^2 + \frac{C_1^2}{r^2}.$$

Введем новую переменную $u = \frac{1}{r}$; тогда

$$\frac{C_1^2}{r^4} \left(\frac{dr}{d\varphi}\right)^2 = C_1^2 \left(\frac{du}{d\varphi}\right)^2, \quad \frac{C_1^2}{r^2} = C_1^2 u^2, \quad v^2 = C_1^2 \left[\left(\frac{du}{d\varphi}\right)^2 + u^2 \right]. \quad (\text{B-5})$$

Подставляя (B-5) в (B-3), выполняя дифференцирование и сокращая на $\frac{\partial u}{\partial \varphi}$, получим

$$mu^2 C_1^2 \left[\frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u \right] = f(r). \quad (\text{B-6})$$

На основании формулы (B-2) $f(r) = mg_0 R^2 u^2$, а следовательно, соотношение (B-6) примет вид

$$\frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u = \frac{g_0 R^2}{C_1^2}. \quad (\text{B-7})$$

В небесной механике уравнение (В—6) называют формулой Бинэ (*Binet*) в честь французского астронома, впервые его получившего. Уравнение (В—7) есть *линейное* дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Общее решение имеет вид

$$\begin{aligned} u &= \frac{g_0 R^2}{C_1^2} + A \cos(\varphi - \varphi_0) = \\ &= \frac{g_0 R^2}{C_1^2} \left[1 + \frac{AC_1^2}{g_0 R^2} \cos(\varphi - \varphi_0) \right]. \end{aligned} \quad (\text{В—8})$$

Полагая для краткости письма

$$\frac{C_1^2}{g_0 R^2} = p, \quad \frac{AC_1^2}{g_0 R^2} = e,$$

(В—8) можно написать в виде

$$u = \frac{1}{r} = \frac{1}{p} [1 + e \cos(\varphi - \varphi_0)],$$

или

$$r = \frac{p}{1 + e \cos(\varphi - \varphi_0)}. \quad (\text{В—9})$$

Уравнение (В—9) есть *уравнение конического сечения в полярных координатах*; начало координат совпадает с одним из фокусов конического сечения. Величину e называют эксцентриситетом конического сечения, а p — параметром. Величины p , e , φ_0 определяются величиной и направлением скорости спутника в момент выведения его на орбиту, а также значением радиуса $r=r_1$ в этот момент времени. Расчетные формулы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} C_1 &= \left(r^2 \frac{d\varphi}{dt} \right)_{t=0} = r_1 v_0 \cos \alpha, \\ p &= \frac{v_0^2 r_1^2 \cos^2 \alpha}{g_0 R^2}, \\ e &= \sqrt{\left(\frac{p}{r_1} - 1 \right)^2 + \frac{p^2}{r_1^2} \operatorname{tg}^2 \alpha}, \\ \operatorname{tg} \varphi_0 &= \frac{p \operatorname{tg} \alpha}{r_1 - p}. \end{aligned} \quad (\text{В—10})$$

Для наглядности дальнейших вычислений допустим, что атмосфера отсутствует и старт спутника происходит с поверхности Земли под углом α к касательной к дуге большого круга. В этом случае p , e и $\operatorname{tg} \varphi_0$ можно представить в более простом виде, так как $r_1 = R$. Из (В—10) тогда следует, что

$$p = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha}{g_0},$$

$$e = \sqrt{1 + \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha}{g_0^2 R^2} (v_0^2 - 2g_0 R)}, \quad (\text{В—11})$$

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha}{g_0 R - v_0^2 \cos^2 \alpha} \operatorname{tg} \alpha.$$

Вид конического сечения (В—9) зависит от величины эксцентриситета e_0 .

Если $e < 1$, т. е. $v_0^2 < 2g_0 R$, то траектория спутника — эллипс, если $e = 1$, т. е. $v_0^2 = 2g_0 R$, то траектория — парабола, если $e > 1$, т. е. $v_0^2 > 2g_0 R$, то траектория — гипербола.

Скорость $v_2 = \sqrt{2g_0 R} = 11,2$ км/сек называется *второй космической скоростью* (иногда — параболической скоростью).

Из (В—11) следует, что при $\alpha = 0^\circ$ угол $\varphi_0 = 0^\circ$, и в этом случае диаметр Земли будет осью симметрии траектории. Если материальная точка движется в центральном гравитационном поле Земли по окружности радиуса R , то ее центростремительное ускорение равно $\frac{v_1^2}{R}$, где v_1 — скорость точки. На поверхности Земли центростремительное ускорение равно g_0 , следовательно, $\frac{v_1^2}{R} = g_0$, откуда

$$v_1 = \sqrt{g_0 R} = 7912 \text{ м/сек.}$$

Так как первая космическая скорость при $H=0$ равна $v_1 = \sqrt{g_0 R}$, то

$$v_2 = \sqrt{2} v_1.$$

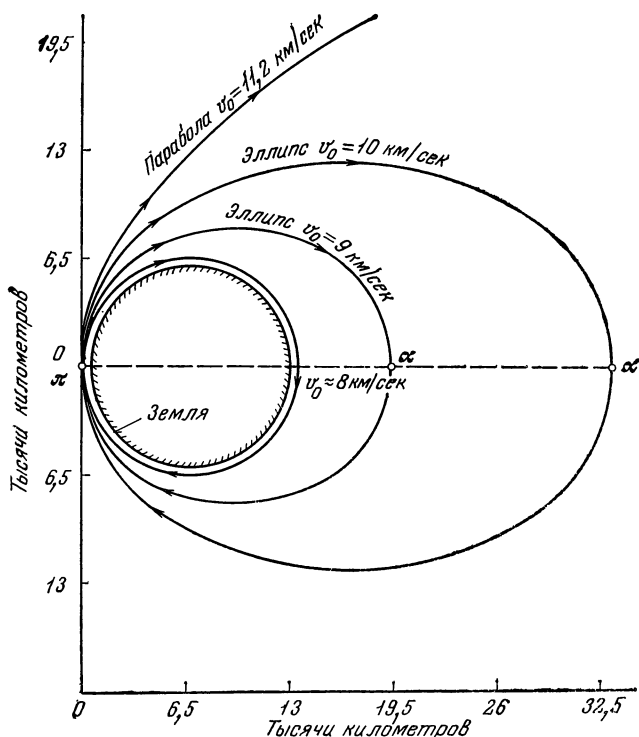


Рис. 31. O — точка выхода полезного груза на орбиту; v_0 — скорость, получаемая полезным грузом в точке O

Аналогичное соотношение будет справедливо и при $H \neq 0$, т. е.

$$(v_2)_{\text{на высоте } H} = \sqrt{2} (v_1)_{\text{на высоте } H}.$$

Отметим, что окружность и эллипс — замкнутые кривые, парабола и гипербола — незамкнутые.

Так как при $\alpha = 0^\circ$ угол $\varphi_0 = 0^\circ$, то в этом случае диаметр Земли будет одним из главных диаметров конического сечения (осью симметрии траектории). Если $v_0 < \sqrt{g_0 R}$, то эллипс будет касаться поверхности Земли изнутри (при старте с поверхности Земли, при условии, что вся масса Земли сосредоточена в ее центре); при $v_0 >$

$v_0 > v_1$, эллиптическая траектория будет охватывать Землю (рис. 31); если $v_0 = v_1$ траекторией спутника будет окружность радиуса R . Если высота спутника, движущегося по окружности, охватывающей экватор, равна 35 810 км, то угловая скорость радиуса — вектора \vec{r}_1 , следящего за спутником, будет равна угловой скорости экваториального радиуса Земли, и, следовательно, спутник не будет смещаться относительно наблюдателя, находящегося на поверхности Земли (на экваторе, где радиус — вектор \vec{r}_1 пересекает поверхность Земли).

2. При изучении движения в центральном поле тяготения Земли часто пользуются интегралом энергии и интегралом площадей. Эти интегралы для центральных (в частности, ньютоновских) гравитационных сил хорошо известны из курса теоретической механики.

Получим интеграл энергии, полагая для краткости $kM = g_0 R^2 = \mu$. Все вычисления будем проводить для спутника единичной массы.

Если мы переместим точку единичной массы на расстояние dr в направлении от центра масс земного шара M , то элементарная работа гравитационной силы

$$dA = \frac{\mu}{r^2} dr.$$

Если спутник переместить из точки (r_1) в точку (r_2) , то работа силы на этом перемещении

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu}{r^2} dr = -\mu \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right).$$

Если $r_2 \rightarrow \infty$, то

$$A = \frac{\mu}{r_1} = U,$$

где U — потенциальная функция или потенциал.

Потенциальная энергия $V = -U$, т. е. $V = -\mu/r_1$.

Точка единичной массы, имеющая скорость v , обладает кинетической энергией $T_1 = \frac{v^2}{2}$.

На основании закона сохранения энергии будем иметь (для произвольного r)

$$E = T_1 + V = \frac{v^2}{2} - \frac{\mu}{r} = \text{const} = h_1,$$

или

$$v^2 - \frac{2\mu}{r} = h,$$

где $h = 2h_1$.

Если спутник находится в перигее, то $r = r_\pi$, $v = v_\pi$ и

$$h = v_\pi^2 - \frac{2\mu}{r_\pi}. \quad (\text{В-12})$$

Зная из (В-9) $r = r(\varphi)$, легко находим

$$r_\pi = \frac{p}{1+e} = a(1-e),$$

$$v_\pi = \sqrt{\frac{\mu}{p}}(1+e);$$

следовательно,

$$h = \frac{\mu}{p}(1+e)^2 - \frac{2\mu}{r_\pi} = -\frac{\mu}{r_\pi}(1-e) \quad (\text{В-13})$$

или (см. табл. В-1) $h = -\mu/a$, где a — большая полуось эллиптической орбиты.

На основании (В-13) и интеграла энергии можно установить связь между $h = -\mu/a$, v^2 и длиной главной полуоси орбиты спутника в следующем виде:

$$v^2 = \mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right). \quad (\text{В-14})$$

Учитывая (В-14), определим полную энергию спутника:

$$E = T_1 + V = \frac{v^2}{2} - \frac{\mu}{r} = -\frac{\mu}{2a}. \quad (\text{В-15})$$

Из формулы (В-15) имеем следующий вывод: полная механическая энергия E не зависит от радиуса r , поэтому в перигее потенциальная энергия минимальна, а кинетическая энергия (следовательно, и скорость v) максимальна.

В апогее — картина обратная. Чем больше эксцентриситет e , тем большее изменение составных частей ме-

ханической энергии будет иметь место. Из закона площадей следует, что

$$(r^2\dot{\varphi})_{\pi} = (r^2\dot{\varphi})_{\alpha}, \quad (\text{В—16})$$

или

$$(rv)_{\pi} = (rv)_{\alpha},$$

т. е.

$$r_{\pi}v_{\pi} = r_{\alpha}v_{\alpha}. \quad (\text{В—17})$$

Формулу (В — 17) часто называют правилом рычага, так как если v_{π} и v_{α} заменить соответствующими силами, а большую ось эллипса считать абсолютно жесткой и закрепленной в центре масс M , то (В—17) будет условием равновесия такого рычага.

Можно показать, что формула для эксцентриситета конического сечения при заданных E , C_1 , μ принимает вид

$$e = \left(\frac{2EC_1^2 + \mu}{\mu^2} \right)^{1/2} = \left(1 + \frac{2EC_1^2}{\mu^2} \right)^{1/2}, \quad (\text{В—18})$$

и тогда будет справедливо следующее утверждение: если $E < 0$, то $e < 1$, и траекторией спутника будет эллипс; если $E = 0$, то $e = 1$, и траектория — парабола; если $E > 0$, то $e > 1$, и траектория — гипербола.

Таким образом, тип траектории спутника зависит только от E и не зависит от C_1 .

В частном случае, когда $C_1 = 0$, траекторией спутника будет прямая линия.

Приведем для справок следующую таблицу (В — 1), дающую основные соотношения между параметрами эллиптической орбиты¹.

Приведем еще ряд соотношений для определения параметра эллиптической траектории p :

$$\begin{aligned} p &= \frac{b^2}{a} = a(1 - e^2) = r_{\alpha}(1 - e) = r_{\pi}(1 + e) = \\ &= \frac{2r_{\alpha}r_{\pi}}{r_{\alpha} + r_{\pi}} = \frac{2b^2r_{\alpha}}{r_{\alpha}^2 + b^2} = 2r_{\alpha} - \frac{r_{\alpha}^2}{a} = 2r_{\pi} - \frac{r_{\pi}^2}{a}. \end{aligned} \quad (\text{В—19})$$

¹ См. сб.: «Научные проблемы искусственных спутников». М., ИЛ. 1959, стр 74—75, Мы даем ограниченное число пар задаваемых параметров.

Таблица (В-1)
Искомые параметры эллиптической орбиты

Определяющие пары параметров	Большая полуось a	Малая полуось b	Апогейное расстояние r_a	Перигейное расстояние r_n	Эксцентриситет e
a, b	—	—	$a + \sqrt{a^2 - b^2}$	$a - \sqrt{a^2 - b^2}$	$\sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$
a, r_a	—	$\sqrt{2r_a a - r_a^2}$	—	$2a - r_a$	$\frac{r_a - a}{a}$
a, r_n	—	$\sqrt{2r_n a - r_n^2}$	$2a - r_n$	—	$\frac{a - r_n}{a}$
a, e	—	$(\sqrt{1 - e^2}) a$	$(1 + e) a$	$(1 - e) a$	—
b, r_a	$\frac{1}{2} \frac{(b^2 + r_a^2)}{r_a}$	—	—	$\frac{b^2}{r_a}$	$\frac{r_a^2 - b^2}{r_a^2 + b^2}$
b, r_n	$\frac{1}{2} \frac{(b^2 + r_n^2)}{r_n}$	—	$\frac{b^2}{r_n}$	—	$\frac{b^2 - r_n^2}{b^2 - r_n^2}$
b, e	$\frac{b}{\sqrt{1 - e^2}}$	—	$b \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}$	$b \sqrt{\frac{1-e}{1+e}}$	—
r_a, r_n	$\frac{1}{2} (r_a + r_n)$	$\sqrt{r_a r_n}$	—	—	$\frac{r_a - r_n}{r_a + r_n}$
r_a, e	$\frac{r_a}{1+e}$	$r_a \sqrt{\frac{1-e}{1+e}}$	—	$\frac{r_a (1-e)}{1+e}$	—
r_n, e	$\frac{r_n}{1-e}$	$r_n \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}$	$r_n \frac{1+e}{1-e}$	—	—

3. Исследование движения материальной точки в ньютоновском поле тяготения соответствует приближенной постановке задачи о движении искусственного спутника Земли в реальных условиях. В теории гравитационного потенциала доказано, что при любой геометрической форме притягивающего тела и при любом распределении его плотности внешняя точка при достаточно боль-

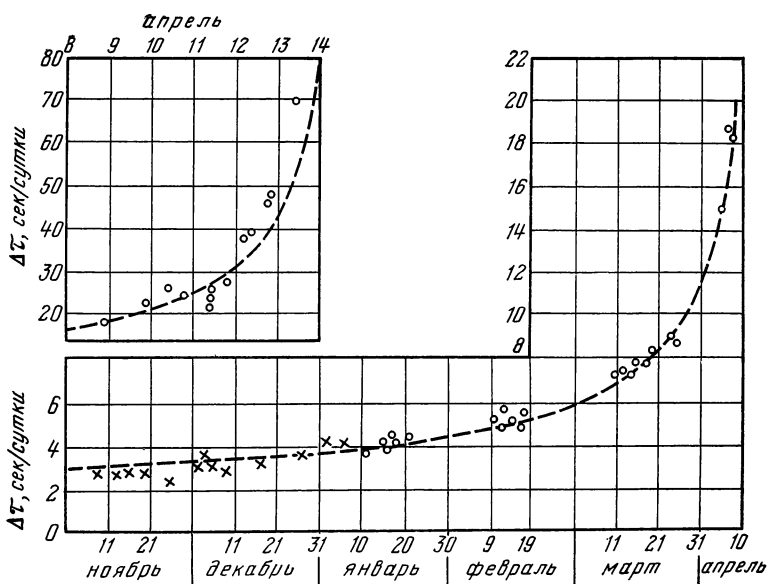


Рис. 32. Изменение периода обращения спутника 2 (СССР) между 3 ноября 1957 г. и 14 апреля 1958 г.

— — — теория; \times данные прямых наблюдений; \circ данные наблюдений, обработанные статистическим методом; ΔT — уменьшение периода обращения спутника (в секундах за сутки)

шом удалении от тела будет притягиваться по закону Ньютона, причем вся масса притягивающего тела будет как бы сосредоточенной в его центре масс. Поэтому можно утверждать, что движение достаточно «высоких» спутников Земли описывается приближенной теорией тем точнее, чем больше $(R+H)$. Но для «близких» спутников Земли эллиптические орбиты эволюционируют под действием ряда относительно малых возмущающих сил, действующих на спутник. Основные возмущения орбиты спутника обусловлены:

— несферичностью Земли (Земля — не шар, плотность которого есть функция только расстояния от его центра, а *геоид*, геометрическая форма которого ближе к эллипсоиду вращения, полуоси меридиана которого, по Красовскому, равны соответственно $a = 6\,378\,245$ м и $b = 6\,356\,860$ м);

— неоднородностью массы земной коры (приводящей к неоднородности гравитационного поля);

— аэродинамическим сопротивлением корпуса спутника, которое еще оказывает влияние на траекторию до высот полета 650—750 км. На высотах $H \geq 800$ км сила сопротивления становится пренебрежимо малой. При высотах полета $H \leq 160$ —170 км спутник не может сделать хотя бы один виток вокруг Земли. На рис. 32 показано изменение периода обращения спутника 2 (СССР) между 3 ноября 1957 г. и 14 апреля 1958 г.

При $H \geq 200$ км время существования спутника определяется плотностью атмосферы, которая изменяется весьма в широких пределах. Так, в дни спокойного Солнца плотность атмосферы иногда бывает в 2—3 раза меньше, чем в дни максимумов солнечных пятен (годы неспокойного Солнца). Если траектория спутника — эллипс, то максимальное торможение будет около перигея. Приведем для иллюстрации следующие два примера (английский журнал «Flight» от 27 июля 1967 г.): если $H_{\pi} = 1053$ км, $H_{\alpha} = 1083$ км, то период обращения спутника $T = 106,6$ мин., а время существования $\tau = 1000$ лет; если $H_{\pi} = 3788$ км, $H_{\alpha} = 3993$ км, $T = 172,66$ мин., то время существования $\tau = 100\,000$ лет.

При первом космическом рейсе Ю. А. Гагарина 12 апреля 1961 г. $H_{\pi} = 181$ км, $H_{\alpha} = 327$ км, период обращения 89,1 мин. Орбита первого пилотируемого корабля была выбрана так, что время его существования (при отказе тормозного двигателя) не превысило бы 10 суток. Все средства жизнеобеспечения были рассчитаны на 10 суток¹; но всем известно, что полет Ю. А. Гагарина прошел строго в соответствии с намеченным (экспериментально проверенным) планом и все системы сработали нормально (без отказов).

Объясним чисто качественно влияние несферичности фигуры Земли на долговременные полеты искусственных спутников Земли. Как показывают строгие вычисления (достаточно громоздкие, к сожалению), влияние реального гравитационного поля Земли проявляется в двух эффектах. Первый эффект связан со смещением точки

¹ Год полета Ю. А. Гагарина близок к году неспокойного Солнца, и плотность атмосферы была выше средней.

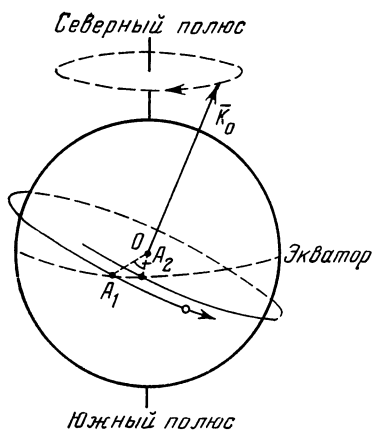


Рис. 33

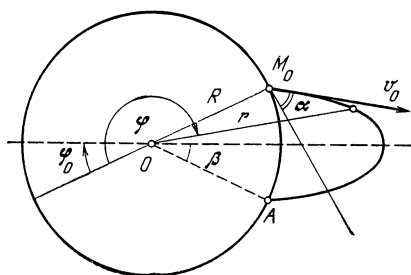


Рис. 34

перигея относительно поверхности Земли. Для пояснения сути дела мы сошлемся на одну задачу из лекций Н. Е. Жуковского, прочитанных в Московском университете¹. Эту задачу Жуковский называет «задачей Ньютона» и формулирует ее в следующем виде: «Определить центральную силу, которую надо прибавить к силе притяжения Солнца для того, чтобы орбита планеты, не меняя своего вида, вращалась вокруг Солнца». Решение, приведенное Н. Е. Жуковским, дает добавочную центральную силу, величина которой обратно пропорциональна кубу расстояния планеты от центра Солнца.

Для относительно «высоких» спутников Земли ($H \geq 800$ км) влияние аэродинамических сил пренебрежимо мало, и можно утверждать, что эллиптическая орбита спутника будет вращаться около оси, перпендикулярной к ее плоскости (движение перигея орбиты). Основанием (чисто качественным) является выражение для гравитационного потенциала Земли, который содержит слагаемые с высшими степенями $R+H=r$. С точностью до $1/r^3$ выражение для потенциала обычно представляют

¹ Н. Е. Жуковский. Полн. собр. соч. Лекции, вып. 5. М.—Л., Обorongиз, 1939, стр. 395—397

в виде

$$U(r) = \frac{k_1}{R} \left[\frac{R}{r} + I \left(\frac{1}{3} - \sin^2 \theta \right) \frac{R^3}{r^3} \right], \quad (\text{В-20})$$

где k_1 и I — постоянные величины, а θ — географическая широта.

Так как форма Земли близка к эллипсоиду вращения, то имеется второй заметный эффект, обусловленный гравитационным полем Земли, — смещение линии узлов (две соседние линии узлов обозначены на рис. 54 через OA_1 и OA_2). Этот эффект аналогичен прецессии вектора кинетического момента спутника \vec{K}_0 (рис. 33) ¹.

В некоторых работах для относительного близких спутников Земли учитываются благодаря использованию электронных вычислительных машин силы притяжения Солнца, Луны и планет; асимметрия Земли (отклонение геоида от эллипсоида вращения); вращательное движение спутника и даже электромагнитные поля и релятивистские эффекты (в рамках специальной теории относительности). Однако, как было указано, наиболее существенными источникам возмущений орбит «близких» спутников являются сжатие Земли и аэродинамические силы.

4. Оптимальные эллиптические траектории.

Если $v_0 < \sqrt{2g_0 R}$, то траекторией материальной точки будет эллипс. В этом случае, не нарушая общности рассуждений, можно выбрать угол φ_0 так, чтобы он соответствовал половине угловой дальности полета точки. Положим $\varphi_0 = \beta = D/2R$, где D — дальность полета, отсчитываемая по дуге радиуса R (рис. 34). Формулу (В-11) можно написать тогда в виде

$$v_0^2 = v_1^2 \frac{\sin \beta}{\cos \alpha \sin(\alpha + \beta)} = \frac{v_1^2 \sin \frac{D}{2R}}{\cos \alpha \sin \left(\alpha + \frac{D}{2R} \right)}. \quad (\text{В-21})$$

Легко видеть, что соотношение (В-21) связывает три величины: дальность полета точки D , угол началь-

¹ Рис. 54 заимствован из статьи В. Т. Томсона, опубликованной в «Journal of the British Interplanetary Society», 1959, № 3-4, стр. 87.

ной скорости с горизонтом α и величину начальной скорости v_0 . Если дальность полета D задана, то естественно поставить следующую экстремальную задачу: определить оптимальный угол α , для которого заданная дальность полета D достигается при минимальной начальной скорости.

Из формулы (В — 21) ясно, что v_0 будет минимальна, если величина $Y = \cos \alpha \sin (\alpha + \beta)$ достигает максимума.

Условие экстремума Y можно написать в виде

$$\frac{dY}{d\alpha} = -\sin \alpha \sin (\alpha + \beta) + \cos \alpha \cos (\alpha + \beta) = 0,$$

или

$$\cos (2\alpha + \beta) = 0. \quad (\text{В} - 22)$$

Из условия (В — 22) имеем

$$2\alpha_{\text{opt}} + \beta = \pi/2,$$

или

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} = \frac{\pi}{4} - \frac{D}{4R}, \quad (\text{В} - 23)$$

т. е. оптимальный угол бросания, обеспечивающий заданную дальность полета точки при минимальной начальной скорости, равен $\pi/4$ минус четвертая часть угловой дальности полета. Если дальность полета мала по сравнению с радиусом Земли, то $\alpha_{\text{opt}} = \pi/4$, что совпадает с хорошо известным результатом теории стрельбы на малые дистанции. Величину относительной ошибки ε можно оценить следующим образом.

Из (В — 23) имеем

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{D}{\pi R} \right) = \frac{\pi}{4} (1 - \varepsilon),$$

где

$$\varepsilon = \frac{D}{\pi R} \cong \frac{D}{20\,000}.$$

Если дальность стрельбы $D \leq 20$ км, то

$$\varepsilon \leq \frac{20}{20\,000} = \frac{1}{1000},$$

и, следовательно, ошибка в оптимальном угле (который при стрельбе на эти дистанции считается равным 45°) будет меньше (или равна) $0,1\%$.

Так как $(d^2Y/d\alpha^2) < 0$, то при найденном значении α_{opt} будет иметь место максимум Y и минимум v_0 .

Определим теперь, пользуясь формулами (В — 21 и В — 23), величину минимальной начальной скорости, обеспечивающей заданную дальность полета точки

$$v_0^2 = v_1^2 \frac{\sin \beta}{\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2}\right)} = \frac{2v_1^2 \sin \beta}{\sin \frac{\pi}{2} + \sin \beta},$$

или

$$v_0^2 = v_2^2 \frac{\sin \beta}{1 + \sin \beta}, \quad (\text{В—24})$$

где $v_2 = v_1 \sqrt{2}$ — вторая космическая скорость.

Следует отметить, что при сделанных допущениях из уравнения (В — 9) легко найти наибольшее удаление точки (центра масс ракеты) от центра Земли (апогей) и наименьшее расстояние (перигей). В самом деле, точка апогея получится для эллиптической траектории при $\varphi = \varphi_0 + \pi = \beta + \pi$, и, следовательно,

$$r_\alpha = \frac{p}{1 - e} = \frac{a(1 - e^2)}{1 - e} = a(1 + e).$$

Точка перигея будет при $\varphi = \varphi_0 = \beta$, и, следовательно,

$$r_\pi = \frac{p}{1 + e} = a(1 - e).$$

Наибольшее удаление точки от поверхности Земли

$$H = r_\alpha - R = a(1 + e) - R. \quad (\text{В—25})$$

5. *Уравнение Кеплера.* Для определения положения центра масс ракеты на траектории (орбите) в функции времени воспользуемся интегралом площадей в форме $r^2 \dot{\varphi} = C_1$ и уравнением траектории (В — 9).

Введем новую переменную $\theta = \varphi - \varphi_0$; в небесной механике Θ называют истинной аномалией. Тогда

$$r^2 \dot{\varphi} = r^2 \dot{\Theta} = C_1, \quad r = \frac{p}{1 + e \cos \Theta},$$

откуда

$$dt = \frac{r^2 d\Theta}{C_1} = \frac{p^2}{C_1} \frac{d\Theta}{(1 + e \cos \Theta)^2};$$

интегрируя, получим

$$t - t_0 = \frac{p^2}{C_1} \int_0^{\Theta} \frac{d\Theta}{(1 + e \cos \Theta)^2},$$

где t_0 — момент прохождения перигея.

Полагая

$$\operatorname{tg} \frac{E}{2} = k\psi = k \operatorname{tg} \frac{\Theta}{2},$$

где $k = \sqrt{\frac{1-e}{1+e}}$, будем иметь

$$\cos \Theta = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\Theta}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\Theta}{2}} = \frac{1 - \psi^2}{1 + \psi^2},$$

$$d\psi = \frac{d\Theta}{2 \cos^2 \frac{\Theta}{2}} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\Theta}{2}}{2} d\Theta = \frac{1}{2} (1 + \psi^2) d\Theta.$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta}{(1 + e \cos \Theta)^2} &= \frac{2d\psi}{(1 + \psi^2) \left[1 + e \frac{1 - \psi^2}{1 + \psi^2} \right]^2} = \\ &= \frac{2(1 + \psi^2) d\psi}{(1 + e)^2 \left[1 + \frac{1-e}{1+e} \psi^2 \right]^2} = \\ &= \frac{\frac{1}{k} \left[1 + \frac{1}{k^2} \operatorname{tg}^2 \frac{E}{2} \right] dE}{(1 - e^2) \cos^2 \frac{E}{2} \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{E}{2} \right)} = \\ &= \frac{1}{k^3} \frac{1}{(1 + e)^3} (1 - e \cos E) dE = \\ &= \frac{1}{(1 - e^2)^{3/2}} (1 - e \cos E) dE. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$t - t_0 = \frac{p^2}{C_1(1-e^2)^{3/2}} \int_0^E (1 - e \cos E) dE.$$

Выполняя интегрирование в правой части и полагая

$$\lambda = \frac{C_1(1-e^2)^{3/2}}{p^2},$$

окончательно получим

$$E - e \sin E = \lambda (t - t_0) = A_m. \quad (\text{В-26})$$

Уравнение (В-26) называется уравнением Кеплера: E называют эксцентрической аномалией, а A_m — средней аномалией. Связь эксцентрической аномалии с истинной аномалией вытекает из принятой при вычислении интеграла замены переменных, а именно:

$$\operatorname{tg} \frac{E}{2} = \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \operatorname{tg} \frac{\Theta}{2}. \quad (\text{В-27})$$

Все три угла Θ , E , A_m отсчитываются в направлении движения материальной точки (т. е. от перигея).

Вычислим постоянную λ

$$\lambda = \frac{C_1(1-e^2)^{3/2}}{p^2} = \frac{C_1(1-e^2)^{3/2}}{a^2(1-e^2)^2} = \frac{C_1}{a(a\sqrt{1-e^2})} = \frac{C_1}{ab};$$

при движении по эллипсу время обращения можно определить как частное от деления площади эллипса на секторную скорость, т. е.

$$T = \frac{\pi ab}{C_{1/2}} = \frac{2\pi ab}{C_1},$$

следовательно,

$$\lambda = \frac{C_1}{ab} = \frac{2\pi}{T}. \quad (\text{В-28})$$

Таким образом, уравнение Кеплера можно представить в следующем виде:

$$A_m = E - e \sin E = \frac{2\pi}{T} (t - t_0). \quad (\text{В-29})$$

Для практических задач весьма важно иметь выражение эксцентрисической аномалии в виде явной функции времени. К сожалению, такую зависимость $E = E(t)$ можно найти только приближенно¹.

6. Расчетные формулы для оптимальных траекторий.

Используя полученные результаты, можно написать простые расчетные формулы для определения элементов оптимальных эллиптических траекторий при различных дальностях полета. Эти формулы будут следующими: половина угловой дальности

$$\beta = D/2R;$$

необходимая начальная скорость

$$v_0 = v_2 \sqrt{\frac{\sin \beta}{1 + \sin \beta}};$$

оптимальный угол возвышения

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2};$$

максимальная высота траектории над поверхностью Земли

$$H = a(1+e) - R;$$

время полета по траектории

$$T_{\text{полета}} = T - \frac{2}{\lambda} (E_1 - e \sin E_1) = \frac{T}{\pi} [\pi - E_1 + e \sin E_1],$$

где T — время обращения по данному эллипсу, а

$$\text{tg} \frac{E_1}{2} = \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \text{ctg} \frac{\beta}{2}.$$

Выполняя элементарные преобразования, можно получить более компактные и удобные для вычислений формулы, определяющие элементы оптимальных эллиптических траекторий. Преобразуем прежде всего вторую из формул (В — 10) для эксцентриситета эллипса, зная, что для оптимальной эллиптической траектории

¹ См., например: Г. Краузе. Движение спутника по эллиптической орбите.— В сб.: «Об искусственном спутнике Земли». М., Оборонгиз, 1959, стр. 72—74.

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}, \quad \rho = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha_{\text{opt}}}{g_0}, \quad \sin \varphi_0 = \sin \beta.$$

Будем иметь

$$e = \frac{\frac{\rho}{R} \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha}{g_0 R \sin \beta}.$$

Но для оптимальной эллиптической траектории формула (В—21) дает

$$\frac{v_0^2}{g_0 R} = \frac{\sin \beta}{\cos \alpha \sin (\alpha + \beta)},$$

следовательно,

$$\begin{aligned} e &= \frac{\sin \beta \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha}{\sin \alpha \sin \beta \sin (\alpha + \beta)} = \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)} = \\ &= \frac{\sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} \right)} = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) = \operatorname{tg} \alpha_{\text{opt}}. \end{aligned} \quad (\text{В—30})$$

Найдем большую полуось оптимального эллипса

$$\rho = a(1 - e^2) = \frac{Re \sin \beta}{\operatorname{tg} \alpha},$$

откуда

$$\begin{aligned} a &= \frac{Re \sin \beta}{(1 - e^2) \operatorname{tg} \alpha} = \frac{R \operatorname{tg} \alpha \sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha \right)}{(1 - \operatorname{tg}^2 \alpha) \operatorname{tg} \alpha} = R \cos^2 \alpha = \\ &= R \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right). \end{aligned} \quad (\text{В—31})$$

Так как в перигее истинная аномалия $\varphi - \varphi_0 = \varphi - \beta = 0$, то из уравнения (В—9) следует, что радиус перигея r_π будет определяться по формуле

$$\begin{aligned} r_\pi &= \frac{\rho}{1 + e} = \frac{b^2}{a(1 + e)} = \frac{a^2(1 - e^2)}{a(1 + e)} = a(1 - e) = \\ &= \sqrt{2}R \sin \frac{\beta}{2} \cos \alpha = \sqrt{2}R \sin \frac{\beta}{2} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right). \end{aligned} \quad (\text{В—32})$$

Радиус апогея r_a можно найти из (В—9) при $\varphi = \beta = \pi$:

$$r_a = \frac{p}{1-e} = a(1+e) = \sqrt{2}R \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right) \cos \frac{\beta}{2}. \quad (\text{В—33})$$

Малая полуось оптимального эллипса равна

$$\beta = \sqrt{r_a r_\pi} = R \sqrt{\sin \beta} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right). \quad (\text{В—34})$$

Максимальная высота подъема точки над поверхностью Земли равна

$$H = r_a - R = \sqrt{2}R \sin \frac{\beta}{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right). \quad (\text{В—35})$$

Фокальное расстояние можно найти из следующей формулы:

$$2c = 2\sqrt{a^2 - b^2} = 2ae = R \cos \beta. \quad (\text{В—36})$$

Формулы (В—30—36) позволяют при помощи таблиц тригонометрических функций сравнительно просто определять все характерные параметры оптимальных эллиптических траекторий, если угловая дальность стрельбы $2\beta = D/R$ задана.

Время полета по части эллипса, находящейся вне Земли, можно подсчитать по формуле

$$T_{\text{полета}} = \frac{T}{\pi} (\pi - E_1 + e \sin E_1),$$

где

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g_0}} \cos^3 \alpha = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g_0}} \cos^3 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right).$$

В самом деле, из третьего закона Кеплера мы получим

$$\frac{T^2}{T_{\text{спутн.}}^2} = \frac{a^3}{R^3},$$

где

$$T_{\text{спутн.}} = \frac{2\pi R}{v_1} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g_0}};$$

следовательно,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g_0}} \sqrt{\frac{a^3}{R^3}}.$$

Учитывая, что a можно найти по формуле (В—31), получаем

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g_0}} \cos^3 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right). \quad (\text{В—37})$$

В табл. (В—2) приведены результаты вычислений для различных дальностей стрельбы (до 20 000 км).

Таблица (В—2)

Дальность стрельбы $D = 2\beta R$, км	$\alpha_{\text{opt}} = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}$	Необходимая начальная скорость, v_0 , м/сек	Максимальная высота подъема над поверхностью Земли H , км	Время полета по траектории T полета
1 113	42°30'	3168	266	8 мин. 23 сек.
2 226	40°00'	4304	505	12 » 28 »
3 340	37°30'	5074	717	15 » 57 »
4 453	35°00'	5649	898	19 » 08 »
5 566	32°30'	6099	1 049	22 » 06 »
6 679	30°00'	6460	1 167	24 » 54 »
7 793	27°30'	6755	1 253	27 » 39 »
8 906	25°00'	6999	1 304	29 » 58 »
10 019	22°30'	7201	1 321	32 » 14 »
11 132	20°00'	7369	1 304	34 » 17 »
12 246	17°30'	7508	1 253	36 » 07 »
14 472	12°30'	7715	1 049	39 » 06 »
15 585	10°00'	7788	898	40 » 13 »
17 812	5°00'	7882	505	41 » 43 »
18 925	2°30'	7904	266	42 » 05 »
20 038	0°00'	7912	0	42 » 13 »

Докажем, что если начальная скорость больше оптимальной, то можно обеспечить попадание в цель, реализуя две эллиптические траектории: настильную (начальный угол $\alpha_1 < \alpha_{\text{opt}}$) и навесную (начальный угол $\alpha_2 > \alpha_{\text{opt}}$).

Для доказательства будем считать, что в формуле (В—21) v_0 и β фиксированы; тогда можно заметить, что формула (В—21) остается инвариантной, если при

изменении α не изменяется величина

$$Y = \cos\alpha \sin(\alpha + \beta).$$

При $\alpha = \alpha_1$

$$Y = Y_1 = \cos\alpha_1 \sin(\alpha_1 + \beta),$$

а при $\alpha = \alpha_2$

$$Y = Y_2 = \cos\alpha_2 \sin(\alpha_2 + \beta).$$

Положим, что

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - (\alpha_1 + \beta);$$

тогда $Y_1 = Y_2$. Таким образом, при

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \beta$$

формула (В—21), определяющая в неявном виде дальность β через v_0 и α , остается в силе, подставляем ли мы в нее угол α_1 или угол $\alpha_2 = \pi/2 - (\alpha_1 + \beta)$. Следовательно, при углах α_1 и $\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - (\alpha_1 + \beta)$ дальность полета будет одинаковой.

Отметим, что по аналогии с теоремой о параболе безопасности для семейства параболических траекторий (при малых дальностях стрельбы) можно доказать, что огибающей семейства эллиптических траекторий, проходящих через некоторую точку на поверхности Земли (при $v_0 = \text{const}$ и переменном α), будет эллипс, который можно называть эллипсом безопасности¹.

7. Влияние малых изменений начальных данных (v_0 , α) на дальность полета². Будем исходить из формулы (В—21) для семейства эллиптических траекторий, согласно которой

$$v_0^2 = v_1^2 \frac{\sin \beta}{\cos \alpha \sin(\alpha + \beta)}.$$

¹ Доказательство впервые было дано профессором Московского университета Б. К. Млодзеевским в статье «Об огибающей орбит при ньютоновском притяжении» (Матем. сборник, т. 13. М., 1886).

² См.: А. А. Космодемьянский. О рассеивании эллиптических траекторий 1955. В дальнейшем эта работа была напечатана в виде отдельной брошюры «Две задачи динамики криволинейного движения точки» (М., изд. ВВИА им. Жуковского, 1961).

Выясним, как будет изменяться дальность полета $D = 2\beta R$ при малых изменениях начальной скорости v_0 и начального угла бросания α . Пусть начальная скорость изменилась на δv_0 , а начальный угол бросания — на $\delta\alpha$. Пользуясь формулой (В — 21), найдем изменение угловой дальности $\delta\beta$. Ограничимся рамками линейной теории, т. е. будем считать δv_0 , $\delta\alpha$, $\delta\beta$ малыми настолько, что квадратами и произведениями этих приращений можно пренебречь. Возьмем полные дифференциалы от правой и левой частей (В — 21).

$$2v_0 \delta v_0 = \frac{v_1^2 \cos \beta \delta\beta \cos \alpha \sin(\alpha + \beta)}{\cos^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta)} - \frac{v_1^2 \sin \beta [\cos \alpha \cos(\alpha + \beta)(\delta\alpha + \delta\beta) - \sin \alpha \sin(\alpha + \beta) \delta\alpha]}{\cos^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta)}.$$

После упрощения имеем

$$2v_0 \delta v_0 = v_1^2 \frac{\sin \alpha \cos \alpha \cdot \delta\beta}{\cos^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta)} - v_1^2 \frac{\sin \beta \cos(2\alpha + \beta) \delta\alpha}{\cos^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta)}. \quad (\text{В—38})$$

Разрешая (В — 38) относительно $\delta\beta$, получим

$$\delta\beta = \frac{2v_0 \cos^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta)}{v_1^2 \sin \alpha \cos \alpha} \delta v_0 + \frac{\sin \beta \cos(2\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cos \alpha} \delta\alpha,$$

откуда изменение дальности

$$\delta D = \frac{4Rv_0 \cos^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta)}{v_1^2 \sin \alpha \cos \alpha} \delta v_0 + \frac{2R \sin \beta \cos(2\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cos \alpha} \delta\alpha. \quad (\text{В—39})$$

Так как из (В — 21) следует, что

$$\frac{\cos \alpha \sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta} = \frac{v_1^2}{v_0^2},$$

то (В — 39) можно представить в следующей форме:

$$\delta D = \frac{8Rv_1^2 \sin^2 \beta \delta v_0}{v_0^2 \sin 2\alpha} + \frac{4R \sin \beta \cos(2\alpha + \beta)}{\sin 2\alpha} \delta\alpha. \quad (\text{В—40})$$

Для оптимальных эллиптических траекторий $\cos(2\alpha + \beta) = 0$, $\sin 2\alpha = \cos \beta$,

и рассеивание по дальности будет определяться следующей формулой:

$$\delta D_{\text{opt}} = \frac{8Rv_1^2 \sin^2 \beta}{v_0^3 \cos \beta} \delta v_0. \quad (\text{В—41})$$

Некоторые вычисления по формуле (В—41) приведены в табл. (В—3).

Т а б л и ц а (В — 3)

β	D_j км	v_0 , м/сек	δv_0 , м/сек	δD_{opt} , км
30	1 680	6 400	1	3,4
40	8 900	7 000	1	5,0
45	10 000	7 200	1	6,0
75	16 700	7 840	1	20,0

Важно отметить, что с увеличением дальности одна и та же ошибка в начальной скорости приводит к резкому возрастанию рассеивания по дальности.

П р и л о ж е н и е Г

Решение задачи о вертикальном подъеме одноступенчатой ракеты методами вариационного исчисления¹

...Творить — это суд суровый,

Суд над самим собой

Г. И б с е н

1. Изучая движение материальных тел под действием сил, можно выделить интересный класс задач динамики, характерных тем, что некоторые из действующих сил могут быть запрограммированы и реализованы

¹ Мы приводим здесь краткое изложение одного из подходов к решению задачи Циолковского с учетом всех основных сил (реактивная, аэродинамическое сопротивление и гравитационная).

на движущихся летательных аппаратах человеком-пилотом (или автопилотом). Часть сил, приложенных к движущемуся аппарату, конечно, определена (детерминирована) природой, а часть может изменяться в широких пределах по некоторым законам, заложенным в конструкцию летательного аппарата. Так, при изучении движения ракеты в поле тяготения Земли гравитационная сила вполне детерминирована (она подчиняется закону тяготения Ньютона), а реактивная сила может изменяться и регулироваться как по величине, так и по направлению. Каждому закону регулирования реактивной силы будет соответствовать некоторый закон движения ракеты. В современной ракетодинамике и динамике самолета такие задачи часто называют задачами с управляющими (или свободными) функциями. Если все управляющие функции заданы и, следовательно, сделаны определенными все действующие силы, то мы будем иметь дело с обычной задачей теоретической механики: найти закон движения аппарата, если действующие на него силы известны. Но выбор (задание) свободных функций можно подчинить некоторым достаточно общим и широким условиям оптимальности (экстремальности) и производить определение динамических характеристик для этих классов оптимальных движений. Метод проб или сравнений, лежащий в основе классических вариационных принципов, применим и здесь, но варьируется выбор управляющих функций, а не траекторий в пространстве конфигураций. Каждому выбору свободных функций можно привести в соответствие «траекторию» системы в фазовом пространстве. Задачи такого рода имеют большой практический интерес в динамике полета ракет и самолетов, а также в теории автоматического регулирования.

Для исследования оптимальных движений механических систем со свободными (или управляемыми, регулируемыми) функциями имеются мощные математические методы, составляющие в наши дни основу вариационного исчисления, или, более широко, функционального анализа. Создание реальной конструкции (ракеты, самолета, вертолета или других летательных аппаратов) тесно связано с изучением экстремальных свойств функций многих переменных и функционалов. Мудрый Леонард Эйлер писал в одной из своих работ:

«...Так как все явления природы следуют какому-нибудь закону максимума или минимума, то нет никакого сомнения, что и для кривых линий, которые описывают брошенные тела, если на них действуют какие-нибудь силы, имеет место какое-то свойство максимума или минимума»¹.

Анализ содержания научных статей по динамике полета, опубликованных за последние 20—30 лет, убеждает нас в том, что методы вариационного исчисления не только позволяют выделить из бесконечного разнообразия возможных движений, определяемых дифференциальными уравнениями механики, более узкие классы движений, для которых некоторые (обычно интегральные) характеристики будут оптимальными; в ряде случаев они дают возможность детального аналитического исследования, так как для экстремальных режимов уравнения движения часто интегрируются в конечном виде. «Опорные» аналитические решения для оптимальных движений можно находить и в тех случаях, когда системы исходных уравнений являются нелинейными. Как эмпирический факт можно отметить, что для классов оптимальных движений нелинейные дифференциальные уравнения становятся более податливыми и в большом числе задач допускают интеграцию в квадратурах. Семейства аналитических решений нелинейных уравнений механики в конечном виде, по-видимому, тесно связаны с условиями оптимальности и играют в задачах динамики ракет и самолетов роль невозмущенных движений, аналогичных кеплеровым движениям в задачах небесной механики.

Практическая ценность теоретически найденных оптимальных режимов (т. е. экстремальных программ изменения свободных функций) движения летательных аппаратов состоит в выявлении таких идеальных параметров конструкций, при которых имеющиеся запасы топлива (запасы энергии) реализуются наилучшим образом.

2. В качестве конкретного примера применения в ракетодинамике вариационных методов исследования рассмотрим задачу о вертикальном подъеме одноступенчатой ракеты.

¹ Л. Эйлер. Метод нахождения кривых линий, обладающих свойствами максимума либо минимума. М., ГТИ, 1934, стр. 573—574. Первое издание этой работы появилось в 1744 г. в Женеве.

пенчатой ракеты, учитывая переменную по высоте силу тяжести, силу лобового сопротивления и реактивную силу. Дифференциальное уравнение движения ракеты можно в этом случае написать в виде

$$M \frac{dv}{dt} = -Mg(z) - Q_1(v, z) - \frac{dM}{dt} V_e(z), \quad (\Gamma-1)$$

В уравнении ($\Gamma-1$) M — масса ракеты в момент t на высоте z (отсчитываемой от поверхности Земли), Q_1 — сила лобового сопротивления ракеты, зависящей от скорости полета и высоты z , V_e — эффективная относительная скорость истечения продуктов горения из сопла реактивного двигателя (которую в соответствии с гипотезой Циолковского мы будем считать постоянной); а

$$g(z) = g_0 \frac{R^2}{(R+z)^2},$$

где R — радиус Земли, а g_0 — гравитационное ускорение на поверхности Земли.

Уравнение ($\Gamma-1$) нелинейно, и его можно проинтегрировать приближенно численными методами. Анализ динамических закономерностей прямолинейного движения ракеты численными методами достаточно громоздок, особенно в тех случаях, когда требуется выяснить влияние различных параметров (конструктивных, атмосферных и др.) на изменение летных характеристик ракеты. Количество необходимых расчетов столь велико, что только применение электронных вычислительных машин позволяет их выполнять в ограниченные промежутки времени.

Мы предпримем здесь попытку аналитического исследования уравнения ($\Gamma-1$) методами вариационного исчисления. Методы вариационного исчисления позволяют найти аналитически решения для некоторых классов оптимальных движений реактивных летательных аппаратов.

Первая формулировка вариационной задачи для прямолинейного поступательного движения ракеты по вертикали вверх в поле тяготения и атмосфере Земли принадлежит Годдарду (США), который, однако, не дал ее удовлетворительного решения. Некоторый прогресс в решении задачи Годдарда был сделан немецким механиком Гамелем, который строго математически формулировал проблему и указал некоторые общие свойства

искового решения. В небольшой заметке Гамеля¹ не указан прием для получения интегралов уравнения ($G-1$).

Позднее задачу Годдарда детально исследовали Тзян и Эванс², а также Лейтман³.

Более простое решение задачи Годдарда дали советские ученые А. А. Космодемьянский⁴ и Д. Е. Охоцимский⁵.

Следует указать, что в последние 15—17 лет в научно-технических журналах за рубежом появилось большое число работ по исследованию оптимальных режимов движения ракет методами вариационного исчисления. Это направление научных изысканий по ракетодинамике мы считаем наиболее прогрессивным и адекватным физической сущности проблемы. Наиболее интересными исследованиями иностранных ученых по динамике ракет мы считаем работы Гиббса⁶, Лаудена⁷, Чикола и Миэля⁸ и ряда других авторов.

Полученные в этих исследованиях результаты были найдены в СССР на 5—7 лет раньше А. А. Космодемьянским, Д. Е. Охоцимским, Р. Е. Соркиным, П. Е. Эльясбергом, Т. М. Энеевым, Л. М. Воробьевым, А. И. Зенкиным, Б. И. Рабиновичем, В. А. Егоровым и другими авторами; но работы советских ученых опубликованы в

¹ G. Hamel. Über eine mit dem Probleme der Rakete zusammenhängende Aufgabe der Variationrechnung.—ZAMM, 1927, Bd. 7, s. 451.

² H. S. Tsien, R. C. Evans. Optimum Thrust Programming for a Sounding Rocket.—Journal of the American Rocket Society, Sept. 1951, v. 21, p. 99—107.

³ G. Leitmann. A Calculus of Variations Solution of Goddard's Problem.—Astronautica Acta, 1956, v. II, fasc. 2, p. 55—62.

⁴ А. А. Космодемьянский. Механика тел переменной массы (теория реактивного движения), ч. 1. Изд. ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1947, стр. 67—88.

⁵ Д. Е. Охоцимский. К теории движения ракет. ПММ, 1946, т. X, вып. 2.

⁶ A. R. Gibbs. Optimum Burning Programm for Horizontal Flight. Journal of Amer. Rocket Society, July—August 1952, v. 22, p. 206—212.

⁷ D. F. Lawden. Optimal Programming of Rocket Thrust Direction. Astronautica Acta, 1955, v. 1, fasc. 1, p. 41—56.

⁸ P. Cicola, A. Miele. Generalized Theory of the Optimum Thrust Programming for the Level Flight of a Rocket-Powered Aircraft.

В этой статье имеется библиография основных иностранных работ по применению методов вариационного исчисления к исследованию оптимальных режимов движения самолетов и ракет.

различных подписных изданиях и отчетах и поэтому были в те годы известны узкому кругу специалистов.

Рассмотрим последовательно развитие идей об оптимальных режимах набора высоты одноступенчатой ракетой.

3. Определение возможности оптимального режима полета (работа Годдарда¹). При исследовании решений уравнения (Г—1) Годдард делает следующие упрощающие предположения. Ускорение силы тяжести g полагается постоянным и равным его значению на поверхности Земли; относительная эффективная скорость V_e также считается постоянной. В последующих вычислениях мы положим $M = M_0 f(t)$, где M_0 — начальная масса, а $f(t)$ — функция, определяющая режим работы реактивного двигателя, или, так как $V_e = \text{const}$, программу (закон) изменения величины реактивной силы. При $t=0$, т. е. в начале движения, $M = M_0$, $f = 1$; при $t = t_1$, т. е. в конце активного участка, $M = M_k$ и $f = f_k$, где M_k — масса ракеты без топлива. Полагая $\frac{Q_1}{M_0} = X$, можно написать уравнение (Г—1) в виде

$$f \frac{dv}{dt} = -fg - X - \frac{df}{dt} V_e. \quad (\Gamma-2)$$

Характеристические свойства движения ракеты, определяемого уравнением (Г—2), будут зависеть не только от внешних сил, но и от закона изменения массы, т. е. от вида функции, определяющей режим работы реактивного двигателя. Если бы было возможно для достаточно широкого класса внешних сил проинтегрировать уравнение (Г—2), то скорость v и пройденное расстояние L были бы определены в зависимости от коэффициентов уравнения (Г—2), т. е. в общем виде

$$v = v(t, f, f', C_1), \quad L = L(t, f, f', C_1, C_2),$$

где C_1, C_2 — произвольные постоянные интегриации.

Таким образом, v и L — функционалы. Естественно поэтому для изучения оптимальных режимов движения ракеты, при которых некоторые характеристики движе-

¹ R. Goddard. Method of Reaching Extreme Altitudes, Smithsonian Miscellaneous Collection. Washington, 1919, v. 71, N 2.

ния (как, например, пройденное расстояние, время подъема на заданную высоту, работа сил сопротивления и т. п.) становятся экстремальными, применить хорошо разработанный математический аппарат вариационного исчисления. Физическая природа формулированной задачи дает нам достаточно оснований для применения именно вариационных методов.

История развития научных методов изучения прямолинейных движений реактивных аппаратов показывает на логическую неизбежность применения методов вариационного исчисления, наиболее адекватных механической сущности изучаемой задачи.

При исследовании уравнения (Г — 2) Годдард имел целью найти минимум массы, необходимой для того, чтобы поднять на заданную высоту определенный полезный груз. Доказательство существования такого минимума массы вытекает из следующих физических соображений: «...если на какой-нибудь промежуточной высоте скорость подъема чрезмерно велика, то сопротивление воздуха, зависящее от квадрата скорости, также будет очень велико. С другой стороны, если скорость подъема будет очень мала, то потребная реактивная тяга должна преодолевать притяжение Земли слишком долго. В обоих случаях необходимая масса топлива получается чрезмерно большой». «Очевидно, — пишет Годдард, — что скорость подъема должна иметь значение, соответствующее каждому месту по высоте»¹. Следовательно, в данной задаче необходимо неизвестную функцию $v=v(L)$ определить так, чтобы потребный для подъема на данную высоту запас массы был минимальным. Годдард полагал, что формулированная им задача не может быть решена точно, и предложил весьма сомнительный способ ее приближенного решения.

Годдард первый отметил, что с математической точки зрения поставленная задача может быть формулирована как задача вариационного исчисления; но он ошибочно утверждал, что такого рода вариационная задача будет неразрешима. В своей работе 1919 г. (см. сноску на стр. 255) Годдард предложил грубый приближенный метод определения оптимального режима, требующий

¹ Н. А. Рынин. Теория реактивного движения. Ленингр. ин-т инж. путей сообщения. Отд. оттиск из сборника института, вып. 101. Л., 1929.

больших вычислений. Годдард считал сформулированную качественно задачу вариационного исчисления неразрешимой и, проведя существенные упрощения уравнения (Г—2), исследовал его методами численного анализа. Ему удалось повторить некоторые из результатов Циолковского (например, получить формулу Циолковского и определить, что при $Q_1=0$ оптимальный режим соответствует мгновенному сгоранию топлива), но принципиально новых открытий работа 1919 г. не содержит.

3. *Оптимальный режим движения, обеспечивающий максимальную высоту подъема ракеты.* Как мы уже указывали, наиболее естественными и адекватными механической сущности проблемы определения оптимальных режимов движения ракет являются методы вариационного исчисления. Этими методами количественные характеристики оптимальных (в том или ином смысле) движений определяются достаточно просто и математически вполне строго.

Формулируем задачу об определении количественных характеристик оптимального режима прямолинейного движения центра масс ракеты в следующем виде: найти закон изменения массы ракеты (закон программирования реактивной силы), при котором пройденный путь (высота подъема ракеты)

$$L = \int_0^L dL = \int_0^T v dt \quad (\Gamma-3)$$

будет максимальным. В формуле (Г—3) T — полное время движения ракеты на пути L .

Скорость v под знаком интеграла в (Г—3) должна удовлетворять на активном участке полета дифференциальному уравнению движения (Г—1)

$$f \frac{dv}{dt} = -fg - X - V_e \frac{df}{dt},$$

а на пассивном участке — дифференциальному уравнению движения точки постоянной массы $M_k = M_0 - M_T$ (M_0 — начальная масса ракеты; M_T — масса отброшенных за время T частиц):

$$M_k \frac{dv}{dt} = -M_k g - X_1. \quad (\Gamma-4)$$

Следовательно, на пассивном участке траектории полета должно иметь место дифференциальное уравнение

$$f_k \frac{dv}{dt} = -f_{kg}(z) - X(v, z). \quad (\Gamma-5)$$

Таким образом, задача определения характеристических свойств оптимального режима прямолинейного поступательного движения ракеты сводится к изучению экстремума интеграла ($\Gamma-3$) при выполнении дополнительных требований ($\Gamma-1, \Gamma-5$), налагаемых на функцию v на участках интегрирования. Эти дополнительные дифференциальные соотношения называют уравнениями неголономных связей. Следовательно, задача о нахождении максимальной высоты подъема ракеты L_{\max} эквивалентна математической задаче об экстремуме интеграла при дополнительных неголономных связях. Класс задач такого рода известен в вариационном исчислении под названием задач на условный экстремум интегралов, когда за семейство допустимых линий принимаются кривые, удовлетворяющие в промежутке интегрирования некоторой системе дифференциальных уравнений. Метод решения таких задач устанавливается следующей теоремой Лагранжа: «Для нахождения функций, дающих экстремум интегралу

$$\int_{x_0}^{x_1} F(x, y_1, \dots, y_n; y'_1, \dots, y'_n) dx$$

при условиях

$$\Phi_\sigma(x, y_1, \dots, y_n; y'_1, \dots, y'_n) = 0$$

(где $\sigma = 1, 2, \dots, s; s < n$), составляют вспомогательную функцию

$$F^* = F + \sum_{\sigma=1} \lambda_\sigma \Phi_\sigma. \quad (\Gamma-6)$$

Искомые функции $y_\nu(x)$ вместе с $\lambda_\sigma(x)$ должны удовлетворять уравнениям Эйлера для функции F^*

$$\frac{d}{dx} \frac{\partial F^*}{\partial y'_\nu} - \frac{\partial F^*}{\partial y_\nu} = 0 \quad (\nu = 1, 2, \dots, n). \quad (\Gamma-7)$$

Система n дифференциальных уравнений (7) содержит $(n+s)$ неизвестных функций $y_1, \dots, y_n, \lambda_1, \dots, \lambda_s$. Присоединяя к ним s уравнений неголономных связей, получим систему $(n+s)$ дифференциальных уравнений с $(n+s)$ неизвестными функциями¹.

Для решения поставленной задачи ракетодинамики можно несколько упростить вычисления, исходя из следующих соображений. Будем считать, что на всем пути L , проходимом ракетой, происходит изменение массы, но секундный расход массы на активном участке будет величиной конечной, а на пассивном участке — величиной бесконечно малой. Иначе говоря, функция (df/dt) , которая в реальных задачах является функцией разрывной на интервале $0 \leq t \leq T$, заменяется, достаточно близкой непрерывной функцией.

Можно построить последовательность непрерывных функций, такую, что предел этой последовательности будет как угодно близко подходить к данной разрывной функции и экстремум интеграла ($\Gamma-3$), найденный для предельной функции последовательности, не будет отличаться от экстремума для разрывной функции².

С точки зрения свойств экстремального движения это означает, что дифференциальное уравнение ($\Gamma-5$) не будет налагать на функцию каких-либо неприемлемых (особых) условий. На пассивном участке траектории ракеты может быть в начале движения любая скорость и любое конечное значение функции $f_n > 0$. Эти соображения позволяют уменьшить число дифференциальных связей и изучить экстремум интеграла только при неголономных связях вида ($\Gamma-2$). Уравнение связи ($\Gamma-2$) целесообразно преобразовать к новой независимой переменной z . Тогда, зная что

$$\frac{df}{dt} = v \frac{df}{dz}, \quad \frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dz},$$

будем иметь

$$fv \frac{dv}{dz} + fg + X(v, z) + vV_e \frac{df}{dz} = 0. \quad (\Gamma-8)$$

¹ В. И. Смирнов. Вариационное исчисление. Л., КУБУ, 1933, стр. 44.

² Эта идея была обоснована впервые членом-корреспондентом АН СССР Т. М. Энеевым.

Так как в рассматриваемой задаче верхний предел интеграла (Г—3) переменный, то кроме вариации вспомогательной функции F^* , которая будет в данной задаче иметь вид

$$F^* = 1 + \lambda(fvv' + fg + X + vV_e f'), \quad (\text{Г—9})$$

где

$$v' = \frac{dv}{dz}, \quad f' = \frac{df}{dz},$$

нужно учесть дополнительные слагаемые, получающиеся при вычислении полной вариации для интеграла с переменным верхним пределом.

Зная функцию $F^* = F^*(z, v, v', f, f')$, напишем уравнения Эйлера

$$\frac{d}{dz} \frac{\partial F^*}{\partial v'} - \frac{\partial F^*}{\partial v} = 0, \quad \frac{d}{dz} \frac{\partial F^*}{\partial f'} - \frac{\partial F^*}{\partial f} = 0; \quad (\text{Г—10})$$

вычисляя производные, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^*}{\partial v'} &= \lambda f v, \quad \frac{\partial F^*}{\partial f'} = \lambda v V_e; \\ \frac{\partial F^*}{\partial v} &= \lambda \left(f v' + \frac{\partial X}{\partial v} + V_e f' \right), \\ \frac{\partial F^*}{\partial f} &= \lambda (v v' + g). \end{aligned} \quad (\text{Г—11})$$

Подставляя (Г—11) в уравнения Эйлера (Г—10), будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} (\lambda f v) - \lambda \left(f v' + \frac{\partial X}{\partial v} + V_e f' \right) &= 0, \\ \frac{d}{dz} (\lambda v V_e) - \lambda (v v' + g) &= 0, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} f v \frac{d\lambda}{dz} + \lambda \left(v f' - \frac{\partial X}{\partial v} - V_e f' \right) &= 0, \\ V_e v \frac{d\lambda}{dz} + \lambda (V_e v' - v v' - g) &= 0. \end{aligned} \quad (\text{Г—12})$$

Присоединяя к (Г—12) уравнение связи (Г—8), мы получим три уравнения относительно трех неизвестных функций λ, f, v . Умножая первое из уравнений (Г—12)

на V_e , а второе на f и производя вычитание, получим

$$vV_e f' - V_e^2 f' - V_e \frac{\partial X}{\partial v} = fV_e v' - fvv' - fg,$$

или

$$\frac{f'}{f} (v - V_e) - \frac{\partial X / \partial v}{f} = v' \left(1 - \frac{v}{V_e} \right) - \frac{g}{V_e}. \quad (\Gamma-13)$$

Из уравнения связи (Г—8) имеем

$$\frac{f'}{f} = - \left(\frac{X}{fvV_e} + \frac{g}{vV_e} + \frac{v'}{V_e} \right). \quad (\Gamma-14)$$

Подставляя (Г—14) в (Г—13), легко находим

$$(v - V_e) \frac{X}{fvV_e} + \frac{\partial X / \partial v}{f} = \frac{g}{v},$$

откуда

$$\frac{1}{f} \left[\frac{(v - V_e) X + vV_e \frac{\partial X}{\partial v}}{vV_e} \right] = \frac{g}{v},$$

или

$$f = \frac{vX - V_e X + vV_e \frac{\partial X}{\partial v}}{gV_e}. \quad (\Gamma-15)$$

Полагая $X_1 = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2$, где C_x есть функция скорости v , а плотность воздуха ρ есть функция z , мы можем преобразовать соотношение (Г—15) к следующему виду:

$$f = \frac{C_x \rho S v^2 (v - V_e) + \rho S V_e v^2 \left(2C_x + \frac{\partial C_x}{\partial v} v \right)}{2M_0 g V_e},$$

или

$$\frac{M}{M_0} = f = \frac{C_x \rho S v^2 (v + V_e) + \frac{\partial C_x}{\partial v} (\rho S V_e v^3)}{2M_0 g V_e}. \quad (\Gamma-16)$$

Соотношение (Г—16) показывает нам, что при оптимальном режиме движения между массой ракеты, ее скоростью и координатой z , определяющей положение

ракеты на траектории, существует вполне определенная зависимость.

Пренебрегая изменением ускорения силы тяжести с высотой, т. е. полагая $g = g_0 = \text{const}$, уравнение (Г—16) можно написать в виде

$$M = fM_0 = \frac{\rho S v^2 \left[C_x (v + V_e) + \frac{\partial C_x}{\partial v} v V_e \right]}{2g_0 V_e}. \quad (\text{Г—17})$$

Для квадратического закона сопротивления имеем

$$Mg_0 = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2 \left(1 + \frac{v}{V_e} \right). \quad (\text{Г—18})$$

Для линейного закона сопротивления, т. е. для случая, когда $X_1 = k_1 v$, непосредственно из основной формулы (Г—15) получаем¹

$$f = k_1 v^2 / g V_e. \quad (\text{Г—19})$$

Таким образом, исследование уравнений Эйлера (Г—10) показывает, что если для ракеты известен закон сопротивления среды, то при оптимальном режиме ее движения каждой высоте соответствует вполне определенная скорость полета, удовлетворяющая соотношению (Г—17).

На рис. 35 даны кривые, определяющие зависимость между f и v для случая однородной атмосферы при линейном и квадратическом законах сопротивления.

При построении кривых $f = f(v)$ мы преобразовали формулы (Г—19) и (Г—18) следующим образом. Полагая $k_1 = \text{const}$, $g = \text{const}$ и $V_e = \text{const}$, имеем из (Г—19)

$$f = \frac{k_1}{g V_e} = \text{const} \cdot v^2.$$

Так как $f = 1$ при $v = v_0$, то $\text{const} = \frac{1}{v_0^2}$. Таким образом,

при линейном законе сопротивления

$$f = v^2 / v_0^2.$$

¹ См.: А. А. Космодемьянский. Экстремальные задачи для точки переменной массы.— Докл. АН СССР, 1946, т. LIII, вып. I.

Точное решение для квадратического закона сопротивления (Г—18) при $C_x = \text{const}$, $g = \text{const}$, $\rho = \text{const}$ можно преобразовать так:

$$f = \frac{C_x \rho s}{2M_0 g} \left(1 + \frac{v}{V_e}\right) v^2 = \text{const} \left(1 + \frac{v}{V_e}\right) v^2.$$

Зная, что $v = v_0$ при $f = 1$, находим

$$\text{const} = \frac{1}{v_0^2 \left(1 + \frac{v_0}{V_e}\right)},$$

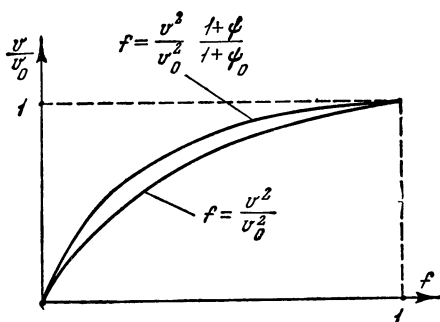


Рис. 35

и получаем расчетную формулу (рис. 35):

$$f = \frac{v^2}{v_0^2} \frac{1 + \psi}{1 + \psi_0},$$

где

$$\psi = \frac{v}{V_e}, \quad \psi_0 = \frac{v_0}{V_e}$$

(мы приняли $v_0 = 600$ м/сек, $V_e = 2400$ м/сек).

4. *Простейшая вариационная задача для однородной атмосферы.* Покажем, что определение оптимального режима движения центра масс ракеты в однородном поле тяготения и в однородной атмосфере можно свести к простейшей задаче вариационного исчисления. В самом деле, путь L , проходимый центром масс ракеты по заданной прямолинейной траектории, можно предста-

вить в виде следующего интеграла:

$$L = \int_{v_0}^0 v dt. \quad (\Gamma-20)$$

Уравнение движения ракеты ($\Gamma-1$) для случая однородной атмосферы и однородного поля тяготения будет

$$f \frac{dv}{dt} = -fg - X(v) - \frac{df}{dt} V_e. \quad (\Gamma-21)$$

Преобразуем это уравнение, принимая скорость v за новую независимую переменную¹, тогда ($\Gamma-21$) можно написать в виде

$$\left(f + V_e \frac{df}{dv}\right) \frac{dv}{dt} = -(fg + X),$$

откуда

$$dt = - \frac{(f + f'V_e) dv}{fg + X}. \quad (\Gamma-22)$$

Пользуясь соотношением ($\Gamma-22$), путь L , проходимый ракетой до полной остановки, можно выразить следующим функционалом:

$$L = \int_0^{v_0} \frac{(f + f'V_e) v dv}{fg + X}, \quad (\Gamma-23)$$

где $f' = df/dv$.

Функция $f(v)$, дающая экстремум функционалу ($\Gamma-23$), должна удовлетворять уравнению Эйлера

$$\frac{d}{dv} \frac{\partial F}{\partial f'} - \frac{\partial F}{\partial f} = 0,$$

где

$$F = \frac{(f + f'V_e) v}{fg + X}.$$

¹ В декабре 1944 г. в Московском университете на научной конференции, посвященной современным проблемам науки, автор этой книги выступал с докладом «Основные проблемы динамики точки переменной массы». В прениях по докладу академик А. Ю. Ишлинский отметил целесообразность введения переменной v вместо t при изучении экстремальных задач прямолинейных движений и показал, что для однородной атмосферы эта задача сводится к простейшей задаче вариационного исчисления.

Простые вычисления дают

$$\frac{\partial F}{\partial f'} = \frac{vV_e}{fg + X}, \quad \frac{\partial F}{\partial f} = \frac{v(fg + X) - gv(f + f'V_e)}{(fg + X)^2},$$

$$\frac{d}{dv} \frac{\partial F}{\partial f'} = \frac{V_e(fg + X) - vV_e \left(f'g + \frac{\partial X}{\partial v} \right)}{(fg + X)^2}.$$

Таким образом, условие экстремума функционала (Г—23) можно написать в виде

$$\frac{V_e(fg + X) - vV_e \left(f'g + \frac{\partial X}{\partial v} \right)}{(fg + X)^2} - \frac{v(fg + X) - gv(f + f'V_e)}{(fg + X)^2} = 0.$$

Так как $(fg + X)^2 \neq 0$, то необходимое условие экстремума интеграла (Г—23) после очевидных преобразований можно написать так:

$$vX - V_e X - fgV_e + vV_e \frac{\partial X}{\partial v} = 0,$$

откуда

$$f = \frac{(v - V_e)X + vV_e \frac{\partial X}{\partial v}}{gV_e}. \quad (\text{Г—24})$$

Это соотношение¹ совпадает с формулой (Г—15) и, очевидно, является ее частным случаем при $g = \text{const}$ и $X = X(v)$.

Зная закон изменения массы $f = f(v)$ из соотношения (Г—24), можно проинтегрировать уравнение (Г—22):

$$t = \int_0^{v_0} \frac{(f + f'V_e)v \, dv}{fg + X(v)}. \quad (\text{Г—25})$$

Из соотношения (Г—25) найдем $t = t(v)$. Два параметрических уравнения

$$f = f(v) \text{ и } t = t(v) \quad (\text{Г—26})$$

определяют закон изменения массы ракеты в функции времени или закон программирования тяги реактивного двигателя.

¹ См.: А. А. Космодемьянский. Экстремальные задачи для точки переменной массы.— Докл. АН СССР, 1946, т. LIII, вып. 1.

5. Аналитическое исследование оптимальных движений ракеты в однородной атмосфере. Исследуем более подробно характеристики оптимальных движений ракеты в однородной атмосфере, пользуясь доказанными выше результатами. Для того чтобы наиболее полно уяснить все особенности метода и не перегружать изложение громоздкими вычислениями, ограничимся случаями линейного и квадратического законов сопротивления.

Для линейного закона сопротивления, когда $X_1 = \kappa_1 v$, уравнение экстремали будет

$$f = kv^2/gV_e, \quad (\Gamma-27)$$

где

$$k = k_1/M_0.$$

Подставляя (Г—27) в основное уравнение движения, будем иметь

$$\frac{kv^2}{gV_e} \frac{dv}{dt} = -\frac{kv^2}{V_e} - kv - \frac{2kv}{g} \frac{dv}{dt},$$

откуда

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{(v + V_e)g}{v + 2V_e}. \quad (\Gamma-28)$$

Разделяя переменные и интегрируя, получим

$$v = v_0 - gt + V_e \ln \frac{v_0 + V_e}{v + V_e}. \quad (\Gamma-29)$$

Уравнения (Г—27) и (Г—28) определяют закон изменения массы ракеты, т. е. режим работы реактивного двигателя. Необходимая начальная скорость ракеты, при которой движение будет оптимальным начиная с момента $t=0$, определится из уравнения

$$kv_0^2/gV_e = 1,$$

откуда

$$v_0 = \sqrt{gV_e/k}.$$

Полагая, что $g=10$ м/сек, $V_e=2560$ м/сек и $k=0,04$, легко находим

$$v_0 = \sqrt{25 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 560} = 800 \text{ м/сек.}$$

На активном участке полета движение точки будет замедленным, причем на основании уравнения (Г—28) замедление определяется формулой

$$\frac{dv}{dt} = -g \frac{1 + \frac{v}{V_e}}{2 + \frac{v}{V_e}}. \quad (\text{Г—30})$$

Чтобы найти закон движения точки, преобразуем уравнение Мещерского к переменной z и найдем сначала путь L в функции скорости v .

Из уравнения движения ракеты (Г—8)

$$dL = dz = -\frac{vf \, dv + vV_e \, df}{fg + X}$$

или, так как

$$df = \frac{2kv \, dv}{gV_e}, \quad \text{а} \quad X = kv,$$

то

$$dL = \frac{(v^2 + 2vV_e) \, dv}{g(v + V_e)}. \quad (\text{Г—31})$$

Интегрируя (Г—31), получим закон изменения пути L в функции скорости v в следующем виде (мы считаем, что $L=0$ при $v=v_0$):

$$L = \frac{1}{g} \left[V_e(v_0 - v) + \frac{v_0^2 - v^2}{2} - V_e^2 \ln \frac{v_0 + V_e}{v + V_e} \right]. \quad (\text{Г—32})$$

Соотношения (Г—32) и (Г—29) определяют в параметрическом виде закон оптимального движения ракеты в однородной атмосфере. Для вычислений $L=L(t)$ удобно в (Г—32) исключить слагаемое с логарифмом. Из (Г—29) имеем

$$(v - v_0) V_e + gV_e t = V_e^2 \ln \frac{v_0 + V_e}{v + V_e} \quad (\text{Г—33})$$

и, следовательно,

$$L = \frac{1}{g} \left[\frac{(v_0^2 - v^2)}{2} - gV_e t \right]. \quad (\text{Г—34})$$

Из соотношения (Г—27) можно получить еще одно заключение, весьма полезное для понимания свойств оптимального движения. В самом деле, (Г—27) можно написать в виде

$$Mg = (k_1 v) \frac{v}{V_e},$$

или

$$Mg/X_1 = v/V_e. \quad (\text{Г—35})$$

Таким образом, отношение силы тяжести (веса) ракеты к силе сопротивления среды при оптимальном режиме движения имеет вполне определенное значение, зависящее от отношения скорости движения ракеты к скорости истечения частиц.

Для квадратического закона сопротивления уравнение экстремали будет иметь вид

$$f = \frac{kv^2}{gV_e} (v + V_e). \quad (\text{Г—36})$$

На активном участке траектории движение будет замедленным, причем

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{g(v^2 + 2vV_e)}{v^2 + 4vV_e + 2V_e^2}. \quad (\text{Г—37})$$

Разделяя в (Г—37) переменные и интегрируя, найдем закон изменения скорости в функции времени

$$v = v_0 - gt + V_e \ln \frac{v_0^2 + 2v_0V_e}{v^2 + 2vV_e}. \quad (\text{Г—38})$$

Уравнения (Г—36) и (Г—38) определяют закон изменения массы на активном участке полета ракеты в функции времени t .

Для того чтобы движение ракеты было оптимальным с момента $t=0$, необходимо выбрать начальную скорость так, чтобы удовлетворялось уравнение

$$\frac{kv_0^2}{g} \left(1 + \frac{v_0}{V_e} \right) = 1.$$

Так как для квадратического закона сопротивления силу сопротивления можно представить в виде

$$X_1 = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2,$$

где C_x — постоянный коэффициент, зависящий от формы тела, ρ — плотность среды, S — характерная площадь, то, очевидно,

$$k = \frac{k_1}{M_0} = \frac{C_x \rho S}{2M_0}. \quad (\Gamma-39)$$

Следовательно, начальная скорость точки будет определяться уравнением

$$v_0^2 \left(1 + \frac{v_0}{V_e} \right) = \frac{2M_0 g}{C_x \rho S}. \quad (\Gamma-40)$$

Для приближенных расчетов при $v_0 \leq V_e$ можно пренебрегать величиной v_0/V_e по сравнению с единицей; тогда необходимая начальная скорость будет определяться по формуле

$$v_0 = \sqrt{\frac{2M_0 g}{C_x \rho S}}. \quad (\Gamma-41)$$

Формула (Г—40) и приближенная формула (Г—41) убеждают нас в том, что при хороших аэродинамических формах ракеты необходимые начальные скорости очень велики.

Пусть например, $M_0 g = 20\,000$ кг, $\rho = 1/8$ кг·сек²/м⁴, $S = 2$ м², $C_x = 0,39$, $V_e = 2000$ м/сек, тогда из (Г—40) имеем $v_0 \cong 640$ м/сек.

Из формулы (Г—36) легко найти отношение веса ракеты к силе сопротивления среды на активном участке оптимальной траектории. Будем иметь

$$\frac{Mg}{X_1} = 1 + \frac{v}{V_e}. \quad (\Gamma-42)$$

Формула (Г—42) показывает, что отношение силы веса к силе сопротивления среды для оптимального режима зависит от скорости полета ракеты. При малых скоростях можно с достаточной для практики точностью считать, что при оптимальном режиме сила сопротивления равна весу ракеты, т. е. пользоваться формулой Оберта. Но в тех задачах техники, где скорости движения

ракеты приближаются к скорости отбрасываемых частиц (или превосходят их), формула Оберта будет давать значительную ошибку, и в этих случаях выявляются все преимущества более строгого решения.

Определим на основании полученных формул отношение начального значения реактивной тяги к начальному весу ракеты.

Будем иметь.

$$\Phi_0 = -M_0 V_e \left(\frac{df}{dt} \right)_0 = -M_0 V_e \left(\frac{df}{dv} \right) \left(\frac{dv}{dt} \right)_0.$$

Определяя $(df/dv)_0$ из формулы (Г—36) и подставляя $(dv/dt)_0$ из (Г—37), получим

$$\Phi_0 = M_0 V_e \frac{kv_0^2 \left(3 + \frac{2V_e}{v_0} \right) g (v_0^2 + 2v_0 V_e)}{g V_e (v_0^2 + 4v_0 V_e + 2V_e^2)}. \quad (\text{Г—43})$$

Кроме того, из формулы (Г—36) при $v=v_0$ и $f=1$ следует, что

$$\frac{kv_0^2}{g V_e} = \frac{1}{v_0 + V_e},$$

и, следовательно, из (Г—43) будем иметь

$$\frac{\Phi_0}{M_0 g} = \frac{V_e \left(3 + \frac{2V_e}{v_0} \right) (v_0^2 + 2v_0 V_e)}{(v_0 + V_e) (v_0^2 + 4v_0 V_e + 2V_e^2)},$$

или

$$\frac{\Phi_0}{M_0 g} = \frac{2 \left(1 + \frac{v_0}{2V_e} \right) \left(1 + \frac{3v_0}{2V_e} \right)}{\left(1 - \frac{v_0}{V_e} \right) \left(1 + \frac{2v_0}{V_e} + \frac{v_0^2}{2V_e^2} \right)}. \quad (\text{Г—44})$$

Если начальная скорость ракеты достаточно мала по сравнению с эффективной скоростью истечения V_e , то, пренебрегая (v_0/V_e) по сравнению с единицей, мы получим из (Г—44), что $\Phi/M_0 g = 2$.

При увеличении начальной скорости отношение начальной реактивной силы к начальному весу уменьша-

ется и при $v_0 = V_e$

$$\Phi_0/M_0g = 15/14.$$

Чтобы найти закон движения ракеты, определим высоту в функции скорости. Так как $dv/dt = v dv/dz$, то из (Г—37) будем иметь

$$dH = dz = - \frac{(v^2 + 4vV_e + 2V_e^2) v dv}{g (v^2 + 2V_e)},$$

или

$$dH = - \frac{1}{g} \left[v dv + 2V_e dv - 2V_e^2 \frac{dv}{v + 2V_e} \right]. \quad (\text{Г—45})$$

Интегрируя (Г—45), легко находим

$$H = - \frac{1}{g} \left[\frac{v^2}{2} + 2vV_e - 2V_e^2 \ln(v + 2V_e) \right] + C_1,$$

где C_1 — постоянная интегрирования.

Будем считать, что $v = v_0$ при $H = 0$, тогда

$$C_1 = \frac{1}{g} [v_0^2 + 2v_0V_e - 2V_e^2 \ln(v_0 + 2V_e)].$$

Таким образом,

$$H = \frac{1}{g} \left[\frac{(v_0^2 - v^2)}{2} + 2V_e(v_0 - v) - 2V_e^2 \ln \frac{v_0 + 2V_e}{v + 2V_e} \right]. \quad (\text{Г—46})$$

Соотношения (Г—46) и (Г—38) определяют закон оптимального движения центра масс ракеты на активном участке траектории.

Если положить $X_1 = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2$ и считать C_x функцией скорости, то из уравнения экстремали будем иметь

$$2Mg = \rho S v^2 \left[C_x \left(1 + \frac{v}{V_e} \right) + v \frac{dC_x}{dv} \right],$$

откуда

$$v^2 = \frac{2Mg}{\rho S \left[C_x \left(1 + \frac{v}{V_e} \right) + v \frac{dC_x}{dv} \right]}. \quad (\text{Г—47})$$

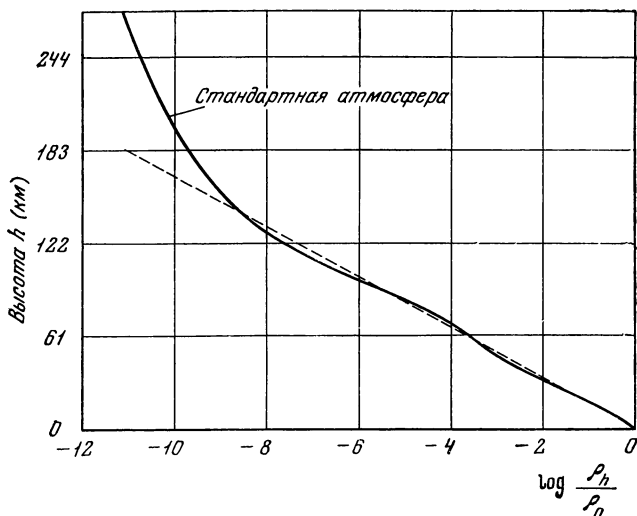


Рис. 36. Сравнение показательного закона изменения плотности воздуха со стандартной атмосферой (по американским данным)

6. *Оптимальные режимы движения в неоднородной атмосфере.* Для движения в неоднородной атмосфере (g будем считать постоянным) вычисления усложняются, однако определение всех элементов движения можно свести к квадратурам, если принять достаточно простой закон убывания плотности воздуха с высотой. В задачах современной баллистики и в теории реактивного движения наибольшее распространение (и, надо отметить, наилучшее согласие с наблюдениями) имеют два закона изменения плотности воздуха в функции высоты: степенной и показательный. Мы напишем показательный закон в виде

$$\rho = \rho_0 e^{-\beta H}, \quad (\Gamma-48)$$

причем β будем считать величиной постоянной (рис. 36).

Показательный закон ($\Gamma-48$) дает точные значения плотности для различных высот, если температура воздуха с высотой не изменяется.

По данным современных метеорологических наблюдений, в диапазоне высот от 11 до 25 км температуру воздуха можно считать постоянной, равной $-56,5^\circ\text{C}$. В тро-

посфере и на высотах, больших 25 км, температура воздуха существенно изменяется с высотой. Поэтому вычисления, проводимые ниже, имеют приближенный характер, так как формула (Г—48) может интерполировать реальные значения плотности с достаточной для предварительных расчетов точностью только в ограниченном интервале изменений высоты полета.

Итак, проведем исследование вертикального подъема ракеты в неоднородной атмосфере при следующих упрощающих предположениях:

$$\rho = \rho_0 e^{-\beta H}, \quad \beta = \text{const}; \quad C_x = \text{const}; \quad V_e = \text{const}, \\ g = \text{const}.$$

Из решения вариационной задачи при сделанных предположениях имеем

$$f = \frac{C_x \rho_0 e^{-\beta H} S v^2}{g V_e} (v + V_e) = \lambda_1 e^{-\beta H} v^2 (v + V_e), \quad (\text{Г—49})$$

где

$$\lambda_1 = \frac{C_x \rho_0 S}{g V_e} = \text{const}. \quad (\text{Г—50})$$

Подставляя (Г—49) в уравнение движения ракеты, мы легко находим величину ускорения центра масс ракеты

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{\beta v V_e (v + V_e) - g(v + 2V_e)}{v^2 + 4vV_e + 2V_e^2}, \quad (\text{Г—51})$$

откуда

$$t = \int_{v_0}^v \frac{v}{v [\beta v V_e (v + V_e) - g(v + 2V_e)]} dv. \quad (\text{Г—52})$$

Соотношения (Г—49) и (Г—52) определяют нам характеристику режима изменения массы при оптимальном движении. Так как

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dH} = v \frac{dv}{dz},$$

то, очевидно,

$$z = H = \int_{v_0}^v \frac{(v^2 + 4vV_e + 2V_e^2) dv}{\beta v V_e (v + V_e) - g (v + 2V_e)}. \quad (\Gamma-53)$$

Соотношения (Г—52) и (Г—53) определяют закон движения центра масс ракеты на активном участке траектории.

Интересно отметить, что в среде с переменной плотностью движение ракеты при оптимальном режиме может быть ускоренным или замедленным в зависимости от знака числителя формулы (Г—51), в то время как в среде с постоянной плотностью ускорение при движении по экстремали всегда отрицательно. Этот результат можно понять, если воспользоваться выводами Приложения А. В самом деле, если плотность среды постоянна, то с уменьшением массы ракеты роль силы сопротивления среды все время возрастает, а это должно приводить к постепенному уменьшению секундных расходов массы. Если же плотность среды переменна и убывает с набором высоты, то вполне возможны такие режимы движения, при которых роль силы сопротивления среды в общем балансе сил будет уменьшаться; следовательно, для этих типов движений секундные расходы массы будут возрастать (стремясь к бесконечности при $\rho \rightarrow 0$), и оптимальное движение ракеты будет ускоренным¹.

¹ Детали вычислений см.: Б. А. Алексеев. Оптимальное программирование тяги реактивного двигателя при движении летательного аппарата по заданной траектории.— Труды ВВИА им. Жуковского, 1962, № 961.

Приложение Д

Образ идеального ученого-мыслителя по взглядам К. Э. Циолковского¹

Была ему звездная книга ясна,
И с ним говорила морская волна.

Е. А. Баратынский

1. Цель данного очерка совершенно практическая. Автор хотел бы, анализируя высказывания Константина Эдуардовича, выявить черты настоящего ученого. Мысли Циолковского о творческом научном труде подтверждаются всем ходом развития мировой науки и в ряде случаев почти дословно совпадают с высказываниями крупнейших ученых — современников К. Э. Циолковского. Главная задача преподавателя высшей школы — попытаться исследовать, возможно ли предугадать в данном молодом студенте будущую славу страны. Диагностика одаренных ученых — вот что занимает автора этой книги многие годы.

Исследованиями, проведенными в последние 10 лет в «науке о науке» (или «науковедении»), установлено, что число людей, посвятивших себя научному труду, растет в передовых странах мира по закону геометрической прогрессии и удваивается (в среднем по всем специальностям) через каждые 10—12 лет (для СССР период удвоения в послевоенные годы составляет в среднем примерно 10 лет). Если учесть, что население нашей страны за период 60—70 лет удваивается, то при сохранении этого темпа роста число ученых увеличится через 70 лет в 128 раз; это означает, что больше половины населения будет заниматься научными исследованиями и подготовкой научных кадров. Поэтому важнейшей государственной проблемой является создание методики отбора одаренных людей в науку и, конечно, создание в наших научных учреждениях такого интеллектуального климата, при котором обеспечивается высокий коэффициент полезного действия творческих работников.

¹ В основу данной статьи положен доклад автора 15 сентября 1970 г. в г. Калуге на пятых чтениях К. Э. Циолковского. Более полное изложение этого доклада дано в сборнике «История и методология естественных наук», № 14 (Изд-во МГУ, 1974).

Но чтобы правильно осуществлять диагностику при отборе будущих ученых, необходимо определить основные черты настоящего ученого, или хотя бы эскизно выявить свойства разума и характера человека, способного создавать новые направления научно-технического прогресса нашей страны. Рисуя образ идеального ученого, мы будем широко пользоваться высказываниями Константина Эдуардовича (опубликованными и рукописными) об основных чертах творчески мыслящих личностей, которых он называет «двигателями прогресса».

2. В процессе работы над этим очерком автор прочел ряд монографий и книг крупнейших ученых (главным образом физиков) XIX и XX столетий, посвященных вопросам психологии научно-технического творчества, в которых имеются яркие высказывания творцов науки об определяющих чертах личности ученого, его характере, эмоциях и увлечениях¹. Весьма примечательно, что почти все крупные творческие личности, рисуя идеал ученого, сходятся в главном и формулировки определяющих характеристических особенностей настоящего ученого отличаются лишь манерой изложения, а не по существу. Я буду приводить в этом очерке большей частью высказывания К. Э. Циолковского и Альберта Эйнштейна, но повторяю, что имеется редкое единодушие у всех упомянутых мной ученых.

В 1928 г. Константин Эдуардович издал в Калуге небольшую брошюру под названием «Двигатели прогресса», где он утверждал: «Двигатели прогресса — это люди, ведущие все человечество и все живое к счастью, радости и познанию» (стр. 12).

Циолковский намечал ряд категорий двигателей прогресса,

— в их числе люди, организующие человечество в одно целое;

¹ Вот некоторые из них:

А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. IV. М., «Наука», 1967.

Луи де Бройль. По тропам науки. М., ИЛ, 1962.

Герман Гессе. Игра в бисер. М., «Художественная литература», 1969.

Р. Фейнман. Характер физических законов. М., «Мир», 1968.

«Нильс Бор» (жизнь и творчество). Сб. статей. М., «Наука», 1967.

— изобретатели машин, улучшающие производимые продукты, сокращающие работу и делающие ее более легкой;

— изобретатели машин по использованию сил природы;

— люди, открывающие законы природы, раскрывающие тайны Вселенной, свойства материи, объясняющие космос, как сложный автомат, сам производящий свое совершенство.

Константин Эдуардович считал, что отмеченные категории «наиболее драгоценны» для человечества. Последняя категория — это большинство официальных ученых и преподавателей высшей школы. Она характеризуется Циолковским так: «К двигателям прогресса относятся и люди, восприимчивые к великим открытиям, сделанным другими, усваивающие их и распространяющие их в массе»¹.

Для сопоставления приведем высказывания Альберта Эйнштейна из его статьи, написанной «К 200-летию со дня смерти Исаака Ньютона»². Он утверждал, что среди людей, которыми мы восхищаемся и которых почитаем, можно более или менее отчетливо различать следующие типы:

— люди, чья духовная деятельность обеспечила, улучшила и обогатила жизнь целых поколений людей... Это изобретатели и целители, чья деятельность протекает в области медицины, техники, социальной и экономической организации,

— люди, способствующие подъему человечества в целом на новую ступень переживаний, созерцания, нравственного бытия и сознания и тем самым указывающие смысл жизни... К их числу относятся великие художники, создатели этических канонов и мыслители (курсив мой. — А. К.). Это, по Эйнштейну, «высший» тип.

Поразительно, что два корифея науки, жившие в совершенно различных социально-экономических условиях, утверждают о высшем типе ученого по существу одно и то же.

И для Циолковского и для Эйнштейна *высшим типом ученого является мыслитель*. И Циолковский и Эйнш-

¹ К. Э. Циолковский. Двигатели прогресса, изд. автора. Калуга, 1928, стр. 12.

² А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. IV, стр. 89.

тейн, несомненно, относили себя именно к этой высшей категории мыслителей.

В самом деле, обратимся, например, к научно-фантастической повести Циолковского «Вне Земли»¹. Главными героями повести, «единственной отрадой которых была наука», являются: Галилей, Гельмгольц, Ньютон, Лаплас, Франклин и Иванов. Иванов — это наверняка сам Циолковский и по идеям (область ракетодинамики и космонавтики), и по манере изложения мыслей. Вот краткая характеристика Циолковского самому себе: «Иванов был большой фантазер, хотя и с огромными познаниями; он больше всех был мыслителем (курсив мой. — А. К.) и чаще других возбуждал те странные вопросы, один из которых (о космической ракете. — А. К.) уже обсуждался нашим обществом».

А. Эйнштейн в ряде своих высказываний неоднократно подчеркивал следующее качество настоящего ученого: «Главное в жизни человека моего склада заключается в том, что он думает и как он думает». В письме Максу Борну Эйнштейн утверждал: «Что должен делать каждый человек — это давать пример чистоты и иметь мужество серьезно сохранить этические убеждения в обществе циников. С давних пор я стремлюсь поступать таким образом — с переменным успехом»². Эйнштейн считал, что моральные качества ученого имеют большее значение «для данного поколения и всего хода истории»³, чем чисто интеллектуальные достижения. Идеал настоящего деятеля науки для Эйнштейна — это *мыслитель*, поднимающий человечество (продвигающий человечество хоть немного вперед — по Циолковскому) на более высокую ступень познания законов природы. «Высшим долгом физиков, — писал Эйнштейн, — является поиск тех общих элементарных законов, из которых путем чистой дедукции можно получить картину мира»⁴.

Конечно, в современном мире, где имеются группы государств с различным общественным устройством, различным социальным составом, различными идеологиями и различными представлениями об идеальном творце

¹ К. Э. Циолковский. Путь к звездам. М., Изд-во АН СССР, 1960.

² См.: Б. Г. Кузнецов. Эйнштейн. М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 88.

³ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. IV, стр. 270 и 193.

⁴ Там же. стр. 40.

науки, весьма важно мировоззрение мыслителя, его отношение к философским течениям и высказываниям. Мы думаем, что настоящий ученый должен быть тенденциозным (партийным) материалистом. Как писал Ленин, «материализм включает в себя, так сказать, партийность, обязывая при всякой оценке события прямо и открыто становиться на точку зрения определенной общественной группы»¹.

Для ученых наших дней, являющихся свидетелями и участниками напряженной идеологической борьбы двух систем, мы напомним замечательные слова В. И. Ленина из его статьи «О значении воинствующего материализма», написанной для журнала «Под Знаменем Марксизма». «Без солидного философского обоснования никакие естественные науки, никакой материализм не может выдержать борьбы против натиска буржуазных идей и восстановления буржуазного мирозерцания. Чтобы выдержать эту борьбу и провести ее до конца с полным успехом, естествовед должен быть современным материалистом, сознательным сторонником того материализма, который представлен Марксом, то есть должен быть диалектическим материалистом»².

Несомненно, борьба идеологий в области естественных (и, конечно, любых других) наук будет приводить к победе материалистов, владеющих диалектическим методом только при условии (непрерывном!), что ученый глубоко владеет своей специальностью, своей областью научных исканий.

Для молодых научных работников диалектический материализм — не только важнейший элемент современной культуры, но и верный помощник в выборе направления конкретных естественнонаучных исследований.

3. Остановимся кратко на мотивах научного творчества. Истинные мотивы есть внутренняя правда ученого, и нередко эти мотивы бывают спрятаны столь глубоко (а иногда столь правдоподобно замаскированы), что не видны даже весьма проницательному наблюдателю. Зачем тружусь? — важнейший вопрос для ученого, и ответ на него часто определяет производительность и качество труда научного работника. Глубокая убежденность творческой личности в необходимости и полезности ее дея-

¹ В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 1, стр. 419.

² В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 45, стр. 29—30.

тельности для прогресса науки, процветания промышленности, благосостояния народа, могущества Родины способствует формированию основ социалистической интеллектуальной нравственности. Коммунистическая партия нашей страны высоко ценит творческий труд во всех областях науки, культуры, промышленности и сельского хозяйства.

К сожалению, и в СССР¹ имеется категория научных работников, для которых выбор профессии ученого определен сугубо эгоистическими мотивами.

Эту категорию людей А. Эйнштейн называет утилитаристами (или прагматистами). Они выбрали научную профессиональную деятельность, поскольку это выгодно. По наблюдениям автора, деятели науки — прагматисты, достигая предельной высоты (т. е. получая ученую степень кандидата или доктора наук), обычно перестают интересоваться трудными животрепещущими проблемами науки, переключая все внимание на быт, алминистрирование и легкий дополнительный заработок.

Но мыслители, т. е. высший ранг ученых, руководствуются совершенно другими нравственными идеалами. Эта категория ученых творит для родины, человечества, для грядущих поколений. Для счастья людей. Почитайте переписку знаменитого философа и мыслителя Д. Дидро с художником-скульптором Фальконе (автором памятника Петру I в Петербурге), посвященную главным образом мотивам научного и художественного творчества, и вы поймете, сколь тонкий и многогранный этот вопрос.

Дидро остроумно, строго логично, содержательно показывает, каким существенным стимулом для творчества является стремление ученого или художника жить в веках, стремление продолжать жить после того, как кладбищенские черви не оставят от него ничего. Позвольте — чуть-чуть из Дидро:

«Животное существует лишь в данный момент — за пределами его оно ничего не видит. Человек живет в прошлом, настоящем и будущем: в прошлом — чтобы просвещаться... в будущем — чтобы сделать его славным для себя и для своих близких»².

¹ См., например: «Литературная газета», 5 июня 1974 г.

² Д. Дидро. Собр. соч., т. IX. М.—Л., «Художественная литература», 1940, стр. 339.

В человеческой природе заложено стремление мечтать, строить планы и прогнозы, жить для людей своими делами и после своей смерти.

Помните у Пушкина гордое, гордое:

Нет, весь я не умру — душа в заветной лире

Мой прах переживет и тленья убежит.

Стремление увековечить свое имя — величаво. «Оно естественно у великого человека; это часть его достоинства, которою он не может пренебрегать, не свидетельствуя этим своего грубого презрения к роду человеческому», — пишет Дидро¹. «Уверенность, что грядущие века будут интересоваться также и мною, что потомство причислит меня к тем, кто *прославил свой век*, была бы мне, признаюсь, несравненно приятнее, чем все прижизненное уважение, чем все теперешние похвалы», — утверждает Дидро². «После нас хоть потоп», — поговорка людей, проявляющих интерес только к собственной выгоде и полное безразличие к тому, что будет потом.

Дидро пишет, что «никогда не произнесет ее ни великий монарх, ни достойный министр, ни добрый отец. Самой низкой и самой презренной нацией была бы та, где сделали бы эту поговорку *постоянным правилом поведения*»³.

Циолковский хотел жить в грядущем. Он считал творческую работу «первоисточником всего» и был внутренне убежден, что будет жить в грядущем. «Основной мотив моей жизни: сделать что-нибудь полезное для людей, не прожить даром жизнь, *продвинуть человечество хоть немного вперед* (курсив мой. — А. К.). Вот почему я интересовался тем, что не давало мне ни хлеба, ни силы, но я надеюсь, что мои работы, может быть, скоро, а может быть, в отдаленном будущем — дадут обеществу горы хлеба и бездну могущества»⁴.

Циолковский отчетливо понимал значение своих основных работ для научно-технического прогресса. Он видел «обольстительные и важные перспективы» разви-

¹ Д. Дидро. Собр. соч., т. IX, стр. 256.

² Там же, стр. 292.

³ Там же, стр. 339.

⁴ К. Э. Циолковский. Первая модель чисто металлического аэростата из волнистого железа. Калуга, 1913, стр. 1.

тия ракетной техники и космонавтики. Он знал, что экспериментальная аэродинамика — совершенно необходимый элемент успешного развития авиации воздухоплавания. Еще на рубеже XIX и XX столетий он писал, что «это дело великое, чрезвычайно великое, как океан»¹. Он открыл человечеству надежный путь овладения космосом и межпланетными путешествиями разработкой теории многоступенчатых ракет, дал эскизы конструкции реактивного аэроплана и утверждал, что «за эрой аэропланов винтовых должна следовать эра аэропланов реактивных или аэропланов стратосферы»²; он предвосхитил своими работами идею создания средств транспорта на воздушной подушке.

И все это для людей, для человечества, для будущих поколений. Он считает свои работы важнейшим делом творческой жизни. «Важно всегда было и будет только то, что нужно для блага *не одного человека, но всех людей*», — говорил Л. Н. Толстой.

В некоторых работах Константин Эдуардович выступает как провидец будущего, способный указать людям строго научные пути к всеобщему счастью. Как мы отмечали, в своей брошюре «Монизм Вселенной» он писал, обращаясь к людям нашей планеты: «В мои годы умирают, и я боюсь, что вы уйдете из этой жизни с горестью в сердце, не узнав от меня (из чистого источника знания), что вас ожидает непрерывная радость... Я хочу привести вас в восторг от созерцания Вселенной, от ожидающей всех судьбы, от чудесной истории прошедшего и будущего каждого атома. Это увеличит ваше здоровье, удлинит жизнь и даст силу терпеть превратности судьбы»³.

Циолковского чрезвычайно огорчало равнодушие и непонимание современников. Он ясно осознавал, что находится в первых рядах зачинателей великого, и ему хотелось иметь армию учеников и последователей. В письме А. И. Ивановскому (июль 1928 г.) Константин Эдуардович писал: «Как ужасно *делать великое* и быть непонятым... Вот хоть работа: «Образование солнечных систем»;

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. I, стр. 200.

² К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. II, стр. 338.

³ К. Э. Циолковский. Монизм Вселенной. Изд. автора. Калуга, 1925, стр. 1.

ее никто не разобрал. Как же должно терзаться мое сердце от одного этого»¹.

Итак, для ученых типа мыслителей главным мотивом творчества, определяющей движущей силой, является забота о счастье людей, убежденность в том, что указываемые ими пути развития науки и техники двигают все человечество хоть немного вперед — к лучшему.

4. Хочется привести некоторые высказывания о психологическом состоянии ученого перед рождением новой идеи. Это состояние совершенно четко определяется всеми крупными деятелями науки XIX и XX столетий как состояние внутреннего горения («тайного жара» — по выражению Александра Блока), влюбленности в данную проблему, а иногда это есть состояние таинственности и самопогружения. Вот некоторые тому свидетельства:

У Циолковского: «Всю жизнь я пылал в огне моих идей. Все же остальное я считал чересчур незначительным»².

«Характер у меня вообще, с самого детства скверный, горячий, несдержанный. А тут глухота, бедность, унижение, сердечная неудовлетворенность и вместе с тем пылкое, страстное до безумия стремление к истине, к науке, к благу человечества, стремление быть полезным... полное, ради этого, пренебрежение средними человеческими обязанностями. На последний план я ставил благо семьи и близких. Все для высокого»³.

Мы убеждены, что рождению крупной, новые пути открывающей идеи непременно предшествует долгий терпеливый труд. Именно систематический труд и создает в организме человека благоприятные условия для возникновения новой мысли. Создать творческое самочувствие искусственным путем (возбуждающими средствами) невозможно.

В письме в редакцию журнала «Природа и люди» (от 8 сентября 1913 г.) Циолковский так характеризует прожитую часть жизни: «Пробыл учителем 33 года и теперь им состою. Жизнь и силы поглощались трудом ради куска хлеба, а на *высшие стремления* оставалось мало времени и еще меньше энергии (Константин

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

² Там же.

³ Там же.

Эдуардович хотел бы *все* отдать науке. — А. К.). Учительский труд мой оплачивался и оплачивается скудно, но я его все-таки любил и люблю. *Жизнь несла мне много горестей, и только душа, кипящая радостным миром идей, помогла мне их перенести* (курсив мой. — А. К.). Самое дорогое, что занимало меня всю жизнь, еще не высказано мной в печати»¹.

В письме в совет Общества изучения природы Калужского края (от 12 октября 1919 г.) Константин Эдуардович писал: «Прежде всего и *выше всего* — мои незаконченные работы. Если еще мне суждено существовать, то все свои силы я должен употребить на то, что я считаю, может быть, по заблуждению, *безмерно важным для человечества* и что я еще не высказал. Покамест я этого не высказал, я *буду страдать*».

А вот слова Альберта Эйнштейна: «...Душевное состояние, способствующее такому труду...» (труду настойчивому, терпеливому, угадывающему «предустановленную гармонию» динамических процессов) «...подобно религиозности² или влюбленности: ежедневное старание происходит не из какого-то намерения или программы, а из непосредственной потребности». Эйнштейн утверждал, что эти чувства являются сильнейшей и благороднейшей из пружин научного исследования³. Человек настолько разумен, что он может открыть законы природы. Высшей задачей физики *Эйнштейн считает* — именно *открытие для человечества* наиболее общих элементарных законов, из которых можно было бы логически вывести картину мира. Мыслитель открывает идею, или систему идей, которые позволяют «по возможности просто связать воедино наблюдавшиеся факты».

И приведем еще одно свидетельство — высказывание современного американского физика Р. Фейнмана. «Моя идея казалась мне настолько логичной и настолько изящной, что я *влюбился в нее без памяти*» (курсив мой. — А. К.)⁴.

¹ Невысказанное в печати — это наверняка социологические и философские работы К. Э. Циолковского (Собр. соч., т. V).

² Под религиозностью Эйнштейн понимает веру ученого в существование всеобщих и простых законов природы и веру в их познаваемость.

³ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. IV, стр. 41, 171.

⁴ Р. Фейнман. Характер физических законов, стр. 196.

5. Приведем ряд соображений о том, как происходит в точных естественных науках обработка (дедукция, строгие логические доказательства) возникшей новой идеи.

Для определенности проследим, например, формирование доказательств в ракетодинамике. Для формально логического «строгого» доказательства мы имеем условные математические языки. В ходе исторического развития эти языки вбирали в себя логику реальных динамических процессов, т. е. логику отношений и взаимную связь последовательных явлений в ходе реальных процессов.

В. И. Ленин писал в «Философских тетрадах», что «практика человека, миллиарды раз повторяясь, закрепляется в сознании человека фигурами логики»¹.

Допустим, что мы решаем траекторную задачу о полете космического корабля на Марс. Логически и математически исследуем особенности и закономерности полета. Для решения можно использовать три способа:

— аналитический (т. е. набор формул, дающих искомого решение);

— численный (т. е. набор таблиц, позволяющий выяснить «биографию» центра масс космического корабля от старта на Земле до мягкой посадки на Марсе);

— графический (набор номограмм, графиков, чертежей, позволяющих знать «все» о формулированной траекторной задаче).

Существует *неоднозначность* в логике доказательств и, как все хорошо знают, даже простую школьную задачу можно решить многими способами.

Один из крупных французских ученых-механиков Пуансо (1777—1859), давший блестящее геометрическое решение задачи о движении твердого тела около неподвижной точки, подчеркивал в своей работе следующую замечательную мысль.

«Ни в коем случае нельзя считать, что наука закончена, если ее удалось свести к аналитическим формулам. Ничто не освобождает нас от *изучения явлений в самих себе* (в их сущности) и от необходимости дать себе отчет в тех идеях, которые являются объектом наших спекуляций. Если иной раз только вычисление мо-

¹ В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 198, стр. 29.

жет привести нас к новой истине, то все же не надо из этого заключать, что разуму больше нечего делать; наоборот надо понимать, что аналитическим путем открытая истина, конечно, *не зависит от тех искусственных приемов*, при помощи которых мы к ней пришли. Безусловно, должно существовать какое-то очень простое доказательство этой истины. Это-то и должно составлять главный объект и конечный результат точной науки»¹.

В истории механики известны крупные ученые, исключительно хорошо владевшие аналитическим методом исследования. Наиболее яркий пример в русской науке — С. А. Чаплыгин (1869—1942). Для Чаплыгина последовательность аналитических записей (диалоги формул и преобразований), по-видимому, была тем же, чем и нотная запись развертывающейся мелодии для музыканта. Рассказывают, что, когда хороший дирижер листаает партитуру оперы, для него звучит оркестр, и он слышит голоса поющих. Нам кажется, что наборы аналитических записей для Чаплыгина давали всю красочность и диалектичность реально протекающих (в природе или технике) динамических процессов.

Великий русский ученый-механик профессор Московского университета и Московского высшего технического училища Н. Е. Жуковский (1847—1921) предпочитал и пропагандировал геометрический метод исследования. Он мыслил образами, как поэт. Ему весьма импонировала мысль Пуансо об обязанности ученого *изучать явления в самих себе*. Жуковский утверждал: «...Можно говорить, что математическая истина только тогда должна считаться вполне обработанной, когда *она может быть объяснена всякому из публики, желающему ее усвоить*» (курсив мой. — А. К.)².

Образный поэтический стиль мышления и изложения характерен и для К. Э. Циолковского. Возникшую новую мысль он доказывает самыми простыми математическими средствами. «Элементарность изложения некоторых моих трудов составляет особенное их достоинство»³,

¹ L. Poinsot. Theorie nouvelle de la rotation d'un corps. Paris, 1834, p. 80 (перевод А. П. Минакова). См. также: Journal de Liouville, 1851, t. XVI.

² Н. Е. Жуковский. Полн. собр. соч., т. IX. М., ОНТИ, 1937, стр. 186.

³ Архив АН СССР, ф. 555, оп. 2, д. 17.

пишет он в своей автобиографии. Константин Эдуардович хорошо понимает, что среди одаренных экземпляров человеческой породы могут быть люди, не владеющие методами математического исследования, но ясно видящие в своем сознании всю цепочку бегущего в реальном динамического процесса и потому способные к великим открытиям и изобретениям. В письме к юным техникам Ленинграда (от 16 февраля 1933 г.) Циолковский утверждает, что «могут быть люди совершенно невежественные в науках, но великие техники и двигатели прогресса. Это подтверждает история изобретений и открытий»¹.

· Нам хотелось бы подтвердить эту мысль Циолковского историей создания многих выдающихся русских храмов и общественных зданий, являющихся шедеврами мировой архитектуры. Руководители строительством (архитекторы) многих сооружений (знаменитые храмы Суздаля и Владимира, Московский Кремль и др.) наверняка не знали приемов и методов высшей математики, начертательной геометрии и сопротивления материалов, но интуитивно понимали диалектическую логику реальных процессов.

Циолковский писал в одной из неопубликованных работ: «Математика есть, главным образом, точное суждение. Но это суждение может выражаться и без обычных математических формул. Гениальный человек и при незнании математики есть математик в высшем смысле этого слова»².

Характеризуя свою манеру творческой научной работы, Циолковский писал (в письме начальнику РНИИ т. Клейменову И. Т. от 29 марта 1934 г.): «Меня считают теоретиком. Это правда, но не полная. Я в самом деле всю жизнь вычислял, но мне приходилось производить и множество опытов... Я сильно отстал в тонкостях математических и других наук, *но я имею то, что надо: творческую силу и способность быстрой оценки всяких новых выводов*» (выделено мной.— А. К.).

Вероятно, все согласятся с тем, что для человечества важнее иметь новое открытие, нежели получить его

¹ Там же.

² К. Э. Циолковский. Этика или естественные основы нравственности, 1902—1903 (Архив АН СССР, ф. 555, д. 372, оп. 1, стр. 21).

строгое математическое объяснение. И Циолковский прав, когда он пишет: «Не надо забывать, что один двигатель прогресса... стоит больше чем 10 академий и 1000 профессоров. Невежливо же тыкать Райтам, что они велосипедные мастера, или Фарадею, что он не знает порядочно арифметики»¹.

6. В заключение сформулируем основные черты личности идеального ученого, ученого-мыслителя.

I. Хорошая память. В голове ученого в клеточках мозга, как на магнитной ленте, должны быть записаны основные характеристики многих динамических процессов. Без склада в памяти старых идей научная работа невозможна. Предпочтительно иметь в голове «записи» из различных областей знаний, так как в наши дни (это отмечалось многими) очень часто мысли, пролагающие новые пути в науке, возникают при изучении явлений на стыке двух-трех вполне сформировавшихся областей знания.

II. Умение сосредоточиться, умение размышлять в уединении.

Мыслители, т. е. наиболее ценная категория ученых, по Эйнштейну: «Люди странные, замкнутые, *уединенные*»².

К. Э. Циолковский в письме Г. И. Солодкову (от 23 сентября 1932 г.) утверждает (как бы подытоживая свой более чем 50-летний творческий труд): «Не забывайте, что для успешности моей работы нужен покой и *уединение*».

Знаменитый французский физик Луи де Бройль пишет в своей книге «По тропам науки»:

«В теоретической области наиболее существенно, как мне кажется, именно *индивидуальное усилие, зачастую в уединении*. Величайшие открытия в этой области были сделаны смелыми умами в уединении. Так было по крайней мере в прошлом, но мне кажется, есть все основания думать, что так будет и в будущем»³.

И, наконец, наш великий А. С. Пушкин так характеризует творческий процесс:

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

² А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. IV, стр. 39.

³ Луи де Бройль. По тропам науки, стр. 223.

И забываю мир, и в сладкой тишине
Я сладко усыплен моим воображеньем,
И пробуждается поэзия во мне:
Душа стесняется лирическим волненьем,
Трепещет, и звучит, и ищет, как во сне,
Излиться, наконец, свободным проявленьем,
И тут ко мне идет незримый рой гостей,
Знакомцы давние, плоды мечты моей ¹.

III. Научная фантазия (часто говорят: научная догадка, научная интуиция). Величайшую ценность научной фантазии в творческом процессе неоднократно подчеркивал В. И. Ленин: «Напрасно думают, что она (фантазия.— А. К.) нужна только поэту. Это глупый предрассудок! Даже в математике она нужна, даже открытие дифференциального и интегрального исчисления невозможно было бы без фантазии. Фантазия есть качество величайшей ценности» ². Научная фантазия — это рождение новых мыслей, установление взаимосвязей между элементами различных процессов. А. Эйнштейн называет научную фантазию *созидательной* фантазией, ибо именно она выдвигает для последующего логического анализа догадки, гипотезы, новые мысли. «Наука, по существу, рациональная в своих основах и по своим методам, может осуществлять свои наиболее замечательные завоевания лишь путем опасных внезапных скачков ума, когда *появляются способности*, освобожденные от тяжелых оков строгого рассуждения, которые называют *воображением, интуицией, остроумием*», — писал Луи де Бройль ³. В статье «О науке» Альберт Эйнштейн утверждал: «Я верю в интуицию и вдохновение... Воображение (фантазия.— А. К.) важнее знания, ибо знание ограничено, воображение же охватывает все на свете, стимулирует прогресс и является источником его эволюции. Строго говоря, воображение — это реальный фактор в научном исследовании» ⁴.

IV. Интеллектуальная независимость, т. е. самостоятельность научного размышления без оглядки на автори-

¹ Из стихотворения «Осень» (1833 г.). А. С. Пушкин. Полн. собр. соч. М., «Художественная литература», 1936.

² В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 45, стр. 125.

³ Луи де Бройль. По тропам науки, стр. 233.

⁴ А. Эйнштейн. Собр. научных трудов, стр. 142.

теты, без боязни: «...что станет говорить княгиня Марья Алексевна!» А. Эйнштейн писал в статье «Свобода и наука», что «интеллектуальная независимость для ученого-исследователя является самой насущной необходимостью»¹. Интеллектуальная независимость должна сосуществовать с полной внутренней свободой². «Развитие науки и теоретическая деятельность разума в целом требуют еще одной разновидности свободы, которую можно было бы охарактеризовать как внутреннюю свободу. Это свобода разума, заключающаяся в независимости мышления от ограничений, налагаемых авторитетами и социальными предрассудками, а также от шаблонных рассуждений и привычек вообще. Подобная внутренняя свобода — редкий дар природы (курсив мой. — А. К.) и весьма желательная цель для каждого индивидуума»³. В письме в Социалистическую академию общественных наук (от 29 марта 1918 г.) Циолковский утверждал: «Дарования и условия их проявления так разнообразны, что нужно допускать свободу самоопределения не только для наций, но иногда и для отдельного лица».

В. Увлеченность (лучше — страстность, еще лучше — одержимость) и бесконечная энергия. Уже на склоне дней в письме от 15 июня 1932 г. Циолковский писал: «Желаю успеха и удивляюсь энергии и увлечению. Без них невозможно ничто великое».

Приведем хорошо известные слова великого русского ученого и мыслителя И. П. Павлова, который писал молодежи: «Помните, что наука требует от человека всей его жизни. И если у вас было бы две жизни, то и их бы не хватило вам. *Большого напряжения и великой страсти требует наука от человека* (выделено мной. — А. К.). Будьте страстны в вашей работе и в ваших исканиях»⁴.

¹ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, стр. 239.

² ...«Дорогою свободной
Иди, куда влечет тебя свободный ум,
Усовершенствуя плоды любимых дум,
Не требуя наград за подвиг благородный», —
утверждает А. С. Пушкин в стихотворении «Поэту» (1830).

³ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, стр. 241.

⁴ И. П. Павлов. Избранные произведения. М., Госполитиздат, 1951, стр. 51.

VI. Настойчивость (сильная непреклонная воля). И опять наиболее убедительный пример — это научное творчество Константина Эдуардовича. Более 40 лет он разрабатывал теорию реактивного движения и основы космонавтики, не имея признания официальной русской науки. Его поддерживали одиночки. Приведем еще одно из малоизвестных свидетельств удивительной настойчивости Циолковского в отношении публикации своих работ. Он понимал, что оригинален во многом и что именно эта оригинальность и своеобразная манера изложения мешают публикации и пониманию его работ. Вот строки из его письма Я. И. Перельману, где он называет следующие причины, мешающие признанию его работ:

«I. Не по обычаю написаны, нет исторического обозрения предмета, авторитетных ссылок, указаний на литературу и прочее.

II. Краткость, нагромождение идей и чисел. От этого трудная читаемость.

III. Работы основаны на моих личных открытиях и вычислениях, никем не проверенных и не принятых наукой.

IV. Явное игнорирование громких и известных гипотез, которые я считаю сомнительными.

VII. Отвращение к смешению русского с латинским (обозначение величин русскими буквами) ¹.

Он понимает все. Но не уступает ни на йоту. Он настаивал на своем неотъемлемом праве подлинного ученого — быть содержательным и оригинальным — до конца жизни.

Мы начали данное приложение (Д) с постановки очень важной педагогической проблемы воспитания новой научной смены. Для педагогов всех рангов весьма существенным является вопрос о «механизме» возникновения новых идей, новых связей между динамическими процессами, новых образов и новых закономерностей в наблюдаемых явлениях природы и техники.

Изучение опыта преподавания мастеров своего дела, анализ прогрессивной научно-педагогической литературы, вышедшей как в нашей стране, так и за рубежом, показывают, что преподающие могут формировать и совершенствовать творческие задатки как в средней, так и

¹ К. Э. Циолковский. Собр. соч., т. V.

в высшей школе. «Давайте учить догадываться», — пишет известный ученый и педагог Д. Пойя¹.

Нам хочется, хотя бы схематически, охарактеризовать идеал умного, обаятельного преподавателя, способного разбудить и совершенствовать творческие склонности своих учеников:

он знает, что владеть думами молодого поколения, можно только показывая красоту и действенность человеческой мысли;

он любит своего слушателя и потому старательно и систематически (от лекции к лекции, из года в год) совершенствует форму изложения;

он стремится сделать лекцию содержательной, высокоинформативной и захватывающей (пленяющей);

он читает тенденциозно и партийно;

он окрашивает все научные открытия (закономерности) своей индивидуальностью, своим восприятием явлений;

он непрестанно размышляет о дальнейшем развитии отечественной науки и культуры, формируя средствами воспитания достойных строителей нового общества;

он читает (рассказывает) так, что содержание любой лекции каждый раз является для него волнующим научным открытием, и он окрылен процессом передачи учащимся его внутренней правды, его культуры (его личности);

он регулярно «вылавливает» способных одаренных молодых людей (его учеников), настойчиво и последовательно направляя их к самостоятельной творческой деятельности. Его девиз «учеба плюс творчество»;

он является нравственным идеалом, идеалом гражданина своей Родины для своих учеников, и они считают его настоящим человеком, старшим товарищем (иногда другом и даже вторым отцом), у которого стоит учиться.

Приведем еще совершенно краткую характеристику идеального учителя, данную писателем Г. Гессе: «он (учитель. — А. К.) личным примером, призывом, строгим своим долготерпением, обаянием своим и силой характера выявил в большей части своих учеников и развил то лучшее, на что они бывали способны»².

¹ Д. Пойя. Математика и правдоподобные рассуждения. М., «Промсвещение», 1957, стр. 423.

² Г. Гессе. Игра в бисер, стр. 242.

Мы закончим очерк чудесной мыслью великого философа Людвиг Фейербаха, который писал: «Что есть истинно человеческого в человеке? Разум, воля и сердце. Совершенный человек обладает силой мышления, силой воли и силой чувства. Сила мышления есть свет познания, сила воли — энергия характера, сила чувства — любовь. Разум, любовь и сила воли — это совершенства. В воле, мышлении и чувстве заключается *высшая*, абсолютная сущность человека, как такового, и цель его существования. Человек существует, чтобы познавать, любить и хотеть»¹.

Идеальный ученый-мыслитель отличается от совершенного (по Фейербаху) человека лишь тем, что у него и разум, и воля, и сердце сфокусированы на предмете исследования, на изысканиях нового.

Константин Эдуардович — великий нравственный идеал подлинного ученого-мыслителя для нашей молодежи. Циолковский — гениальная личность! Этот человек дал русской и мировой науке столько оригинальных, новые пути пролагающих мыслей и открытий, что имя его долговечно в истории цивилизации.

¹ Л. Фейербах. Избранные философские произведения, т. II. М., Госполитиздат, 1955, стр. 31—32.

Оглавление

От автора	5
Введение	7
Глава I	
Первые шаги в науке	16
Глава II	
Работы по аэронавтике и экспериментальной аэродинамике	31
Глава III	
Работы по теории реактивного движения	46
Глава IV	
Из истории авиации и ракетной техники в России	67
Глава V	
Ракеты для космических полетов и скорый поезд на «воздушной подушке», предложенные К. Э. Циолковским	105
Глава VI	
Новая наука — ракетодинамика	123
Глава VII	
Работы по теории межпланетных путешествий	142
Глава VIII	
Знаменитый деятель науки	168
Приложения	197
Приложение A	
Прямолинейные движения одноступенчатой ракеты	197

Приложение Б	
Прямолинейные движения многоступенчатой ракеты . . .	213
Приложение В	
Закономерности движения искусственных спутников Земли и оптимальные траектории баллистических ракет	226
Приложение Г	
Решение задачи о вертикальном подъеме одноступенчатой ракеты методами вариационного исчисления . . .	250
Приложение Д	
Образ идеального ученого-мыслителя по взглядам К. Э. Циолковского	275

Аркадий Александрович Космодемьянский
К. Э. Циолковский

*Утверждено к печати редколлегией серии
научно-популярных изданий АН СССР*

Редактор *Л. В. Глики*
Художник *С. А. Данилов*
Художественный редактор *Т. П. Поленова*
Технический редактор *Е. Н. Евтянова*
Корректор *Л. И. Харитонова*

Сдано в набор 3/VII 1975 г. Подписано к печати 17/II 1976 г.
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 1.
Усл. печ. л. 15,54. Уч.-изд. л. 14,7. Тираж 62 000 экз.
Т-03448. Тип. зак. 4609. Цена в переплете 1 р.,
в обложке 93 коп.

Издательство «Наука».
103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография издательства «Наука»,
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
239	19 св.	источникам	источниками
246	13 сн.	тракторий	траекторий
285	1 сн.	198, стр. 29.	29, стр. 198.

А. А. Космодемьянский