

А. С. ИВАНОВ
А. Т. ПРОКАЗА

МИР МЕХАНИКИ И ТЕХНИКИ

КНИГА ДЛЯ УЧАЩИХСЯ

<http://prokaza.16mb.com>



Москва «Просвещение» 1993

ББК 22.2
И20

Иванов А. С., Проказа А. Т.

И2С

Мир механики и техники: Кн. для учащихся. — М.: Просвещение, 1993. — 223 с.: ил. — ISBN 5-09-004020-6.

В книге на многочисленных примерах рассказывается об увлекательном мире техники, основанном на механических закономерностях.

И $\frac{4306020000-480}{103(03)-93}$ 91-93

ББК 22.2

ISBN 5-09-004020-6

© Иванов А. С., Проказа А. Т., 1993

Дорогие ребята! За время обучения в школе вы получили первый, начальный круг знаний по физике и, наверное, заинтересовались ею, если держите в руках эту книгу.

Прежде чем написать ее, мы подумали: кому же ее адресовать? И решили, что есть среди старшеклассников такие любознательные юноши и девушки, которые изучают физику не только потому, что этого требуют учителя и родители, но и из-за личного интереса к этой науке. Тот, кто хочет знать по физике и технике больше, чем рассказывает учитель и дает учебник, кто хочет добраться до причин интересных событий и явлений в физическом мире природы, кого интересует роль физики в современном мире стремительного научно-технического прогресса, — пусть прочитает эту книгу.

Один девятиклассник задал нам вопрос: «Почему физику считают сейчас ведущей наукой естествознания?» Физика действительно является лидером современного естествознания и фундаментом научно-технического прогресса, а оснований для этого достаточно. Физика в большей мере, чем любая из естественных наук, расширила границы человеческого познания.

Во-первых, физика глубже других наук проникла в строение вещества, в микромир — на расстояния до 10^{-16} м, что равно диаметру сердцевинки нуклона, и одновременно дальше других наук проникла в мегамир — до расстояний $2 \cdot 10^{25}$ м, равных наибольшей удаленности от Земли видимых в телескоп галактик.

Во-вторых, именно физика дала в руки человека наиболее мощные источники энергии, чем резко увеличила власть человека над природой.

В-третьих, именно физика является сейчас теоретическим фундаментом большинства основных направлений технического прогресса и областей практического использования технических знаний.

Атомная энергетика и реактивная техника, инфракрасная и космическая техника, полупроводники и ультразвуковая техника, электронно-вычислительная техника и ускорители элементарных частиц — все перечисленное и многое другое имеет теоретической основой современную физику. Физика является теоретическим фундаментом электрификации страны.

В-четвертых, физика, ее явления и законы действуют в мире живой и неживой природы, что имеет весьма

важное значение для жизни и деятельности человеческого организма, изучения и создания оптимальных естественных условий существования человека на Земле. Человек — элемент физического мира природы. На него, как и на все объекты природы, распространяются законы физики, например законы Ньютона, закон сохранения и превращения энергии и другие. Конечно, физическими данными характеристика человека не исчерпывается, например как мыслящей личности, социальной единицы, части общества.

Важно, что значимость физики растет с научно-техническим прогрессом, с продвижением страны к гуманному, развитому обществу, отсюда возрастает и жизненная ценность физических знаний, приобретаемых учащимися в школе.

МИР ФИЗИКИ ВОКРУГ НАС



ФИЗИКА И ЧЕЛОВЕК

Впервые термин «физика» ввел в науку древнегреческий ученый Аристотель, назвав так одно из своих сочинений о природе. Слово «physis» по-гречески значит природа. В русский язык термин «физика» перенес один из основоположников отечественной науки — Михаил Васильевич Ломоносов.

В те далекие времена физика была единственной наукой о природе и включала в себя все, что было известно человеку об окружающем мире, о всех явлениях, в нем происходящих. В процессе развития знаний о природе, совершенствования средств и методов ее исследования отдельные области физики стали самостоятельными науками. Так, например, возникли: астрономия — наука о строении и движении небесных тел; геология — наука о строении Земли; биология — наука о живых организмах; химия — наука о составе и строении вещества и изменениях, происходящих в них; метеорология, или физика атмосферы, — наука об атмосферных явлениях и погоде. Позже появились и другие науки, связанные с физикой: геофизика, астрофизика, агрофизика, физическая химия и т. д.

Все, составляющее природу, включая и человека, физика называет физическим или материальным миром.

В материальном мире физике известны два вида объектов: физические тела и физические поля. То, из чего состоят физические тела, называется веществом, а то, посредством чего тела взаимодействуют друг с другом, называется полем. Например, под действием поля тяготения происходит падение тел на Землю; с помо-

щью электрических полей взаимодействуют электрические заряды.

Все в окружающем нас мире изменяется. «Все течет, все изменяется», — утверждал еще в V в. до н. э. греческий философ Гераклит Эфесский.

Одни изменения происходят медленно и даже незаметно. Например, изменения, произошедшие в видимом с Земли расположении звезд созвездия Большой Медведицы за 400 тыс. лет (рис. 1). В позиции *а*) созвездие было видимо с Земли 200 тыс. лет назад; в *б*) оно видимо в наши дни и в *в*) человечество будет видеть созвездие Большой Медведицы через 200 тыс. лет. Другие явления совершаются быстро, например удар молнии продолжается лишь сотые доли секунды.

Одни изменения происходят независимо от человека: день сменяется ночью, а ночь — днем, происходит круговорот воды в природе, смена времен года. Другие изменения происходят в результате деятельности человека: слиток металла превращается на заводе в деталь ма-

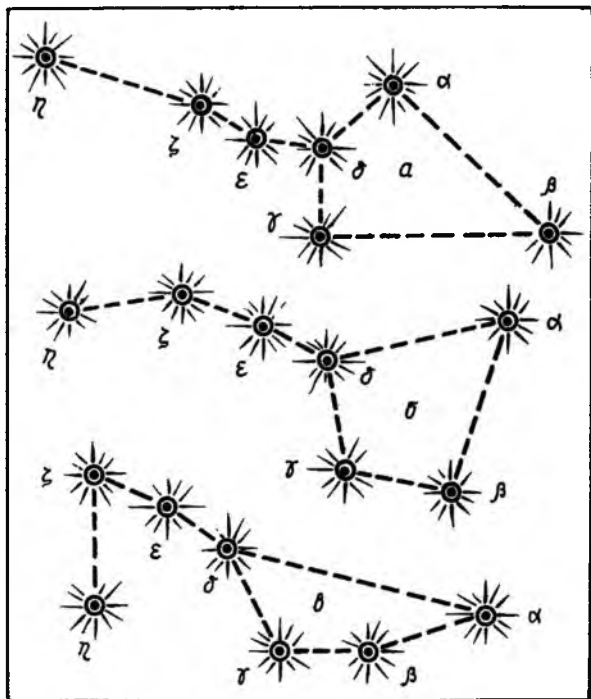


Рис. 1

шины или длинную проволоку; с помощью средств транспорта люди и грузы перемещаются на большие расстояния по земле, воде и воздуху; поток света изменяет свое направление, отражаясь от созданного человеком рефлектора автомобильной фары.

Таким образом, причиной одних изменений в окружающем нас мире является деятельность человека, других — физические явления, происходящие в природе. Но и те и другие события происходят по единым законам науки, в данном случае — по законам физики.

Изменения физических свойств, состояния или расположения физических объектов называются физическими явлениями. Физика и есть наука, изучающая механические, тепловые, электрические, магнитные и оптические явления, строение веществ и их изменения.

Все перечисленное представляет собой физические формы движения материи, которые присущи всем телам, всем материальным объектам природы.

Таким образом, физика есть наука о наиболее общих свойствах всех физических тел и полей, присущих и мельчайшим частицам вещества, и тому, что мы встречаем вокруг себя на Земле и в космосе; наука о свойствах тел, равно присущих миру живой и неживой природы, наука о явлениях как мгновенных, так и длительных.

Откуда и каким же образом человечество приобрело колоссальное количество знаний об окружающем мире, составляющих современную физику?

Человек внимательно наблюдал физические события в природе, воспроизводил сознательно возможные из них, ставя физические опыты, обдумывая, что является общим и особенным в ряде аналогичных явлений, сравнивая различные стороны явлений, проверяя выводы из наблюдений и опытов на последующих подобных явлениях.

Таким образом, природа явилась и источником физических знаний человека о ней, и средством проверки их достоверности. Физика как выражение коллективного разума человечества есть отражение в сознании людей физического мира явлений в природе. А поскольку и человек и развивающаяся природа продолжают существовать, непрерывно растет и пополняется и сокровищница знаний о ней, именуемая физикой.

В содержание физики, как и любой другой науки, входит ряд слагаемых, лишь в целом, в совокупности представляющих собой науку, а именно:

а) открытые и проверенные практикой факты, явления, процессы, например повышение электрического сопротивления металлов с температурой;

б) установленные и принятые в науке понятия, например плотность, скорость, сила;

в) открытые, проверенные и подтвержденные практикой законы, например закон Архимеда, закон Паскаля, законы Ома, законы Ньютона;

г) теории, объясняющие более или менее широкий круг физических явлений, например теория механических явлений, молекулярно-кинетическая теория строения физических тел;

д) возникшие на базе открытых и установленных фактов, связей и законов научные предположения, гипотезы, которым предстоит быть подтвержденными или отвергнутыми в ходе дальнейшего развития науки, например гипотеза о природе магнитного поля Земли;

е) общетеоретические выводы из законов и фактов науки, например признание независимости от нашего сознания существующего материального мира и возможности его изучения.

Заметим, что центральным слагаемым, основным в физике как науке являются законы физики, то, что отражает устойчивые, необходимые, существенные связи между физическими явлениями природы, т. е. закономерности природы, которым подчиняется все в ней существующее. Так, например, закону инерции или закону сохранения энергии подчиняются и живые организмы и неодушевленные предметы, и земные и космические тела, и гигантские и микроскопические.

Таким образом, законы физики есть сформулированные словесно или в математической форме утверждения, которыми характеризуются объективно существующие связи между предметами и явлениями природы.

Как и любая другая наука, физика есть не только результат, продукт человеческого познания природы, но и бесконечный процесс его, в который многие из нас в будущем внесут свой вклад.

Физика, образно говоря, представляет собой грандиозное здание знаний человека о физическом мире природы в процессе его строительства, а не завершенное сооружение, которое нам остается лишь осмотреть с экскурсоводом. Некоторые части здания уже отстроены и отделаны, они уже заселены нами. Строительство других частей завершается. Третьи существуют только в чертежах, а о создании некоторых частей этого архитек-

турного ансамбля мы пока и не догадываемся. Строительство продолжается, и вам, молодым поколениям физиков, здесь безграничное поле деятельности.

Каков смысл, какова цель изучения физики?

Есть по меньшей мере две цели этого.

Первая состоит в том, что, изучая физику, мы узнаем и правильно понимаем мир, в котором мы живем, можем объяснять физические явления природы, а также пути и методы их изучения. Знание физики позволяет нам предвидеть то, как будут протекать различные физические явления в природе, быту и технике. В этом высочайшая познавательная ценность физики как науки.

Вторая цель состоит в том, что изучение ее дает человеку знания, необходимые для рационального использования физических явлений и законов в практических целях: строительстве заводов, шахт, железных дорог, электростанций и т. д., т. е. в создании материальной базы для жизни людей, материально-технической базы будущего общества.

Д. И. Менделеев сказал однажды так: «У науки есть две конечные цели: предвидение и польза». С этим следует согласиться, и в этом неизмеримая познавательная и созидательная ценность физических знаний.

ФИЗИКА И ТЕХНИКА

Физика дала человеку мощные средства разумного использования природы. Физика — фундамент современной техники; она лежит в основе всех наиболее значимых направлений технического прогресса, в том числе таких, как:

освоение новых источников энергии и совершенствование традиционных;

создание новых конструкционных, инструментальных и строительных материалов;

разработка новых производственных технологий и совершенствование существующих;

вовлечение в производство вторичных энергетических и материальных ресурсов;

автоматизация производственных процессов; роботизация производства;

электронизация народного хозяйства, внедрение в производство и управление им электронно-вычислительной техники;

рост в оптимальных пределах единичных мощностей, повышение КПД и производительности машин; интенсификация технологических процессов производства;

стандартизация и унификация продукции;

охрана, рациональное использование, воспроизводство и приумножение естественных богатств природы, создание оптимальных естественных условий для жизни;

электрификация страны как основа всех основных направлений технического прогресса.

Таково значение физики для развития техники.

В свою очередь, для развития физики исключительно важное значение имеет развитие техники. Требования техники определяют, как правило, направления развития науки. Техника дает физике мощные средства научного исследования природы, например ускорители элементарных частиц, с помощью которых уже сделаны фундаментальные физические открытия.

Давно установлено, что если техника в значительной степени зависит от состояния науки, то в гораздо большей мере наука зависит от **состояния и потребностей** техники.

Ученые говорят, что когда у общества появляется техническая потребность, то это двигает науку вперед больше, чем десяток университетов.

МЕХАНИКА

С чего начинается физика? Наиболее простой физической формой движения материи является механическое движение. Как и любое явление, механическое движение всегда происходит где-то и когда-то, т. е. в пространстве и во времени.

Механическое движение, разновидности, законы, причины, цели и следствия его изучаются в разделе физики, именуемом механикой. Механика как часть физики есть учение о механическом движении тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними. Отсюда основной задачей механики является **изучение законов движения и равновесия физических тел и сил взаимодействия между ними.**

По содержанию изучаемого материала механика, как известно, делится на три части:

кинематику — учение о движении тел, независимо от причин, его вызывающих и изменяющих;

динамику — учение о движении тел с учетом их взаимодействия;

статику — учение о равновесии тел под действием сил.

Основоположниками механики были: Архимед (287 — 212 до н.э.), Галилео Галилей (1564 — 1642), Иоганн Кеплер (1571 — 1630), Рене Декарт (1596 — 1650), Христиан Гюйгенс (1629 — 1695), Исаак Ньютон (1642 — 1727).

Существенный вклад в развитие механики внесли и ученые, работавшие в России, и наши соотечественники: Даниил Бернулли (гидродинамика), Леонард Эйлер (механика жидкостей и газов, небесная механика, баллистика), Михаил Васильевич Остроградский (гидродинамика), Пафнутий Львович Чебышев (теория механизмов), Николай Егорович Жуковский (аэродинамика), Иван Всеволодович Мещерский (динамика тел переменной массы), Константин Эдуардович Циолковский (космическая механика), Алексей Николаевич Крылов (теория корабля, баллистика), Сергей Алексеевич Чаплыгин (газодинамика), Мстислав Всеволодович Келдыш (космическая механика) и другие.

Механика является той областью физики, с которой мы чаще, чем с другими, встречаемся в жизни. Механические явления, процессы, события окружают нас повседневно и, как правило, не требуют специальных приборов для наблюдения, они присутствуют вокруг нас «весомо, грубо, зримо».

Падение капли дождя и листа с дерева, волны на море и течение рек, движение мотоциклиста по вертикальной стене в цирке и ветер, работа всех видов транспорта и подъемных кранов, вращение Земли вокруг своей оси и обращение вокруг Солнца, плавание на воде и в воде и отдача при выстреле, стирание автомобильной шины и деформация часовой пружины, прыжок парашютиста и полет автоматической межпланетной станции — все это механические явления и процессы. Изучаются связи между механическими явлениями, зависимости между различными сторонами их, т. е. то, что мы называем механическими законами.

Многое может заинтересовать в механике. Давайте же совершим экскурсию по архитектурному ансамблю, именуемому физикой, поинтересуемся техникой, основанной на явлениях и законах механики.

?

1. И физика, и химия изучают строение веществ и их изменение. Чем же тогда эти науки отличаются одна от другой?
2. Встречаются ли в природе, быту и технике явления, содержащие одновременно и физические, и химические процессы? Если да — приведите примеры.
3. Всегда ли развитие науки опережает развитие техники? Нет ли в истории развития физики и техники примеров обратного?



КИНЕМАТИКА

КООРДИНАТЫ, ПУТЬ, ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Человек всегда осознает место своего нахождения, ведь это жизненно важно и необходимо! Очень часто действия человека зависят от окружающей обстановки, т.е. от места и времени его пребывания в определенном пункте. И заботы у человека оказываются разными в зависимости от того, отдыхает ли он летом на южном берегу Крыма или в зимнюю стужу укладывает рельсы Байкало-Амурской магистрали.

Обратите внимание на то, что места отдыха и работы вы обязательно представляете на географической карте и, по-видимому, прежде всего относительно того места, в котором вы находитесь, читая эту книгу.

На уроках физики учитель просит вас привести примеры, которые свидетельствовали бы, что положение одних тел обязательно определяется относительно других. А вы попытайтесь зафиксировать какое-либо тело безотносительно в окружающем мире. Не удастся! Тогда в ответе на вопрос учителя совершенно не обязательно перечислять примеры, приведенные в учебнике или сообщенные учителем. Положение любого из множества окружающих нас тел можно зафиксировать только выбрав ориентиры, по отношению к которым и указывается положение данного тела. Эти ориентиры называются в физике телами отсчета.

Важность необходимости фиксировать положение тела в пространстве и времени относительно ориентиров (тел отсчета) можно видеть, оценивая следующие ситуации: положение автобуса, поезда, самолета от исходного пункта движения и пункта назначения; резца токарно-винторезного станка относительно обрабатываемой детали; электрода относительно свариваемых деталей; зрите-

ля у экрана телевизора для безопасного и наиболее удобного просмотра телепередач; учителя по отношению к классу и классной доске с целью наилучшей видимости изображенного на ней; движущегося на главном конвейере автомобиля (в зависимости от его положения выполняются строго определенные сборочные операции); космического корабля «Союз» и грузового космического корабля «Прогресс» относительно орбитальной станции «Салют» и относительно Земли и т. д.

В одних случаях это положение просто учитывается, в других создается и измеряется. Так, зная, где мы находимся, путешествуя в автобусе, мы можем определить расстояние до пункта назначения; электросварщик на основании своего опыта и профессионального мастерства «чувствует» расстояние рабочего органа до соответствующего объекта; для снятия стружки строго определенной толщины необходимо точно рассчитать поперечное перемещение резца и его продольное перемещение, строго соблюдая необходимую длину проточки (здесь уже без измерений не обойтись); положение космических кораблей «Союз» и «Прогресс» в каждый момент времени может быть определено только с помощью точных расчетов на электронно-вычислительных машинах.

В зависимости от характера рассматриваемой ситуации и от постановки задачи положение тела относительно других тел может быть зафиксировано разными способами: либо с помощью координат, либо с помощью известных траекторий и пути, либо заданным перемещением.

Положение тела, как видим, играет существенную роль в быту, науке, технике и на производстве. При работе на токарно-винторезном станке положение резца фактически фиксируется с помощью координат, которые зависят от положения поперечных и продольных салазок суппорта. Износ же резца зависит от пути, который проходит режущая кромка резца относительно поверхности обрабатываемой детали. При проектировании рабочего места слесаря-сборщика для постановки колес автомобиля на главном конвейере автозавода предусмотрено, чтобы стеллаж со шпильками и гайками находился рядом, чтобы электрический гайковерт был подвешен на расстоянии вытянутой руки, т. е. все необходимое для производительной работы должно занимать определенное положение относительно слесаря-сборщика, положение которого, в свою очередь, рассчитывается относительно главного конвейера.

При решении любой жизненно важной задачи учебного, бытового или производственно-технического характера необходимо тщательно предусмотреть (рассчитать), как это положение может изменяться во время работы. Из множества вариантов выбирается оптимальный, т. е. наиболее целесообразный с учетом его положительных и отрицательных моментов. Для этого надо различать путь и перемещение. Путь — это расстояние, пройденное телом по траектории. Перемещение — направленный отрезок прямой, соединяющий начальную и конечную точки положений тела в пространстве. При прямолинейном движении в одну сторону путь и перемещение численно равны, хотя путь — скаляр, а перемещение — вектор. В любом криволинейном движении путь всегда численно больше перемещения. В частности, при движении тела по замкнутой кривой перемещение всегда равно нулю, а путь ни при каком движении тела нулю быть равен не может.

Какое из этих двух понятий важнее: путь или перемещение? В разных случаях по-разному. Например, при движении автомобиля по автостраде важнее путь: от него зависит плата за проезд, расход топлива, износ резины колесных шин. И наоборот, иногда нас интересует не путь движения, а его конечная точка. Например, не так уж важно, какой путь пройдет футбольный мяч с центра поля в ворота соперника, но важно, чтобы он побыстрее переместился именно туда.

Для того чтобы предусмотреть, как может изменяться положение тел во время работы (с течением времени), необходимо знать характер движения, т. е. его кинематические характеристики: траекторию, скорость, ускорение.

ТРАЕКТОРИЯ

Траекторией движения называется линия, соединяющая последовательно все точки пространства, через которые должно пройти, проходит или уже прошло движущееся тело. В соответствии с этим траектория называется расчетной или действительной, т. е. предполагаемой, осуществляемой или осуществленной движущимся телом.

Часто приходится решать задачу о положении тела в любой момент времени расчетным путем, т. е. рассчитывать его траекторию. В некоторых случаях реальная

траектория строго соответствует расчетной при соблюдении определенных условий, а иногда оказывается достаточно близкой к ней.

Часто действительные траектории движения точно соответствуют расчетным. Например, это относится к движению поездов по линиям железных дорог. Протяженность траектории, ее план и профиль определены уже при проектировании и сооружении железнодорожных линий, и поезда точно им следуют.

Мы часто читаем сообщения в газетах о том, что космический корабль выведен на расчетную орбиту вокруг Земли. Иногда сообщается, что космический корабль выведен на орбиту, достаточно близкую к расчетной. Орбита искусственного спутника Земли и есть траектория его движения. Для того чтобы рассчитать траекторию полета космического корабля, необходимо выполнить множество математических операций с помощью электронно-вычислительных машин.

Убедимся, что на определенном расстоянии от Земли круговая орбита ИСЗ возможна только при строго определенной скорости его движения.

Рассмотрим три случая (рис. 2), причем $v_A < v_B < v_C$

Элементарные расчеты и соответствующие построения убеждают, что круговая орбита космического корабля возможна только для тела B , имеющего строго опре-

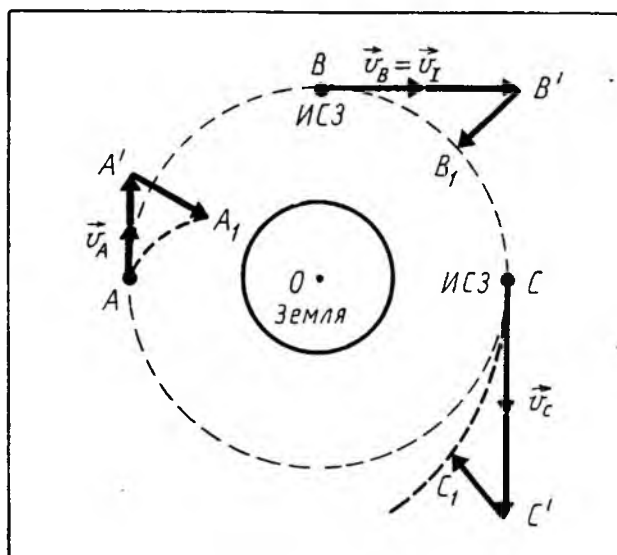


Рис. 2

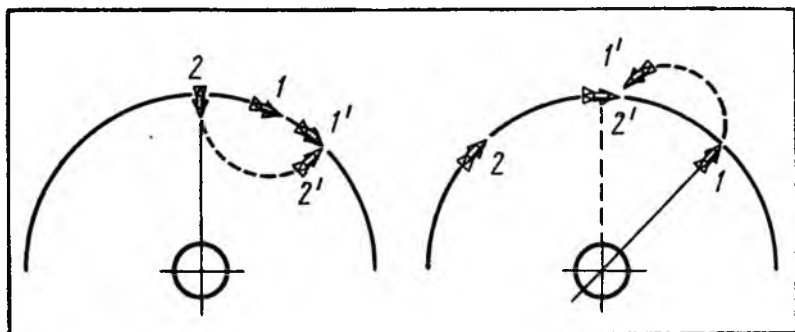


Рис. 3

деленную скорость v_B . Ее называют первой космической скоростью. Вблизи поверхности Земли $v_B = 7,9$ км/с.

В самом деле:

$$\overline{AA'} = \vec{v}_A \Delta t, \quad \overline{A'A_1} = g \frac{\Delta t^2}{2}$$

$$\overline{BB'} = \vec{v}_B \Delta t, \quad \overline{B'B} = g \frac{\Delta t^2}{2}$$

$$\overline{CC'} = \vec{v}_C \Delta t, \quad \overline{C'C} = g \frac{\Delta t^2}{2}$$

$$A'A_1 = B'B_1 = C'C = g \frac{\Delta t^2}{2}$$

$$AA' < BB' < CC', \text{ так как } v_A < v_B < v_C$$

В результате имеем: AA_1 — траектория снижения; BB_1 — круговая траектория ($v_B = v_1$) — первая космическая скорость; CC_1 — эллиптическая траектория при $v_B > v_1$.

Космический корабль может переходить с одной орбиты на другую, т.е. маневрировать. Маневры космических кораблей осуществляются с помощью бортовых реактивных двигателей. Рассмотрим возможную схему сближения космических кораблей для осуществления стыковки в случае, если они движутся по одной орбите. Характер сближения зависит от того, какой корабль будет маневрировать. Если маневрирующим будет второй корабль, то он должен нагнать первый. Маневр может осуществляться следующим образом: второй корабль ориентируется так, что ось двигателя становится направленной по радиусу орбиты (рис. 3). При этом газы из сопла выбрасываются перпендикулярно вектору орбитальной скорости в сторону выпуклости орбиты.

Маневрирующий корабль получает дополнительную скорость и начинает двигаться по дуге окружности отно-

сительно того места, где в данный момент находится первый корабль. При прохождении пути, равного половине окружности, маневрирующий возвращается на исходную орбиту в точке, где к этому моменту времени находится первый корабль. К моменту соприкосновения бортовые двигатели должны погасить дополнительную скорость так, чтобы второй корабль имел орбитальную скорость, близкую к той, что была до начала маневра. Естественно, эта скорость практически равна скорости первого корабля. Именно так и происходило маневрирование пилотируемого космического корабля «Союз-Т15» для стыковки с научно-исследовательским комплексом «Салют-7» — «Космос-1686» 6 мая 1986 г.

Если же маневр будет осуществляться первым космическим кораблем, то ситуация будет аналогична предыдущей с той только разницей, что газы из сопла бортового двигателя должны выбрасываться тоже перпендикулярно вектору орбитальной скорости, но в сторону вогнутости орбиты.

Сближение космических кораблей, находящихся на разных орбитах, осуществляется также с помощью бортовых реактивных двигателей, которые обеспечивают сначала переход какого-либо корабля на орбиту другого, а затем осуществляется сближение, рассмотренное ранее.

Переход космического корабля с орбиты на орбиту можно осуществить аналогично маневру сближения, но при этом требуется погасить дополнительную скорость раньше, т. е. при достижении необходимой орбиты. Заметим, что при этом должна изменяться и орбитальная скорость с помощью реактивных двигателей. Для осуществления этой операции должна изменяться ориентация корабля. При этом ось бортового реактивного двигателя ориентируется параллельно вектору орбитальной скорости (рис. 4).

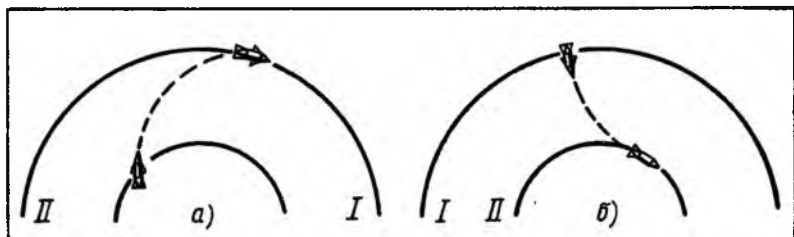


Рис. 4

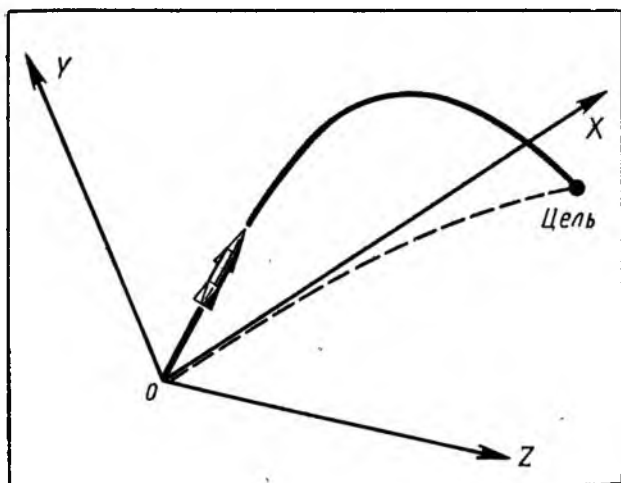


Рис. 5

Интересно обратить внимание на весьма существенное обстоятельство. Речь шла о круговой орбите космических кораблей относительно Земли. При движении космических кораблей по одной орбите их орбитальные скорости одинаковы, поэтому расстояние между кораблями оказывается неизменным и о траектории движения одного космического корабля относительно другого говорить не приходится — корабли неподвижны друг относительно друга (в системе, одна ось которой проходит через центры кораблей).

Следовательно, форма траектории рассматриваемого тела существенно зависит от выбора тела отсчета.

То, что расчетная траектория отличается от действительной, можно проиллюстрировать на примере артиллерийских стрельб.

Расчетная траектория полета ракеты (снаряда) показана на рисунке 5. Аэродинамическая форма ракет существенно влияет на их рассеивание, т. е. на степень отклонения действительной траектории от расчетной. Если выполнить достаточно большое количество выстрелов, то распределение попаданий будет соответствовать так называемому нормальному закону распределения случайных величин.

Графическим выражением этого закона будет фигура, которая в теории вероятностей называется эллипсом рассеивания (рис. 6).

Эллипс рассеивания можно уменьшить соответствующим выбором аэродинамической формы ракеты, так

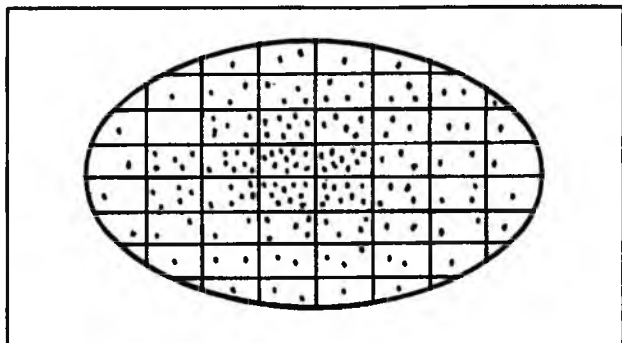


Рис. 6

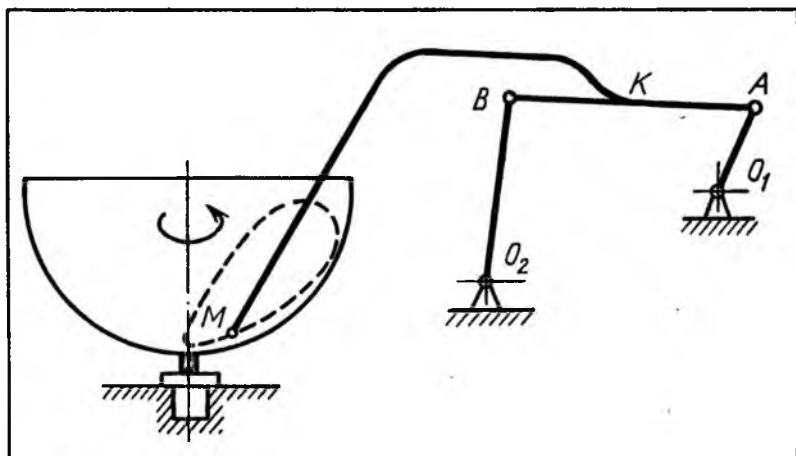


Рис. 7

как выбор аэродинамических поверхностей ракеты влияет на степень приближения действительной траектории полета ракеты (снаряда) к необходимой. Необходимая траектория полета ракеты заканчивается точным попаданием ракеты в цель.

Рассмотрим другие примеры механических движений с точки зрения формы траектории. Траектория движения поезда однозначно определяется линией железнодорожного полотна, так что в этом случае действительная траектория движения всегда совпадает с предполагаемой. При движении автомобиля по шоссе картина несколько иная. Траектория движения автомобиля тоже определяется формой автодороги, но истинная траектория может отличаться от предполагаемой, так как авто-

мобиль имеет возможность объезжать встречающиеся на его пути помехи (объезд или обгон).

Большое значение форма траектории имеет при механизации и автоматизации производственных процессов и вспомогательных работ, когда возникает необходимость с помощью механизмов воспроизводить сложное движение, которое ранее выполнялось рукой. Широкое применение воспроизведение необходимых траекторий с помощью различных механизмов получило в сельскохозяйственных машинах, в машинах пищевой промышленности, в текстильных, обувных машинах и т. д.

Как решен вопрос механизации тестомесения на хлебозаводах, показано на схеме тестомесильной машины, изображенной на рисунке 7. Конечная точка M рабочего органа KM описывает необходимую траекторию внутри вращающегося чана с размешиваемым тестом.

Заметим, что с помощью различных механизмов мы можем преобразовывать движения, видоизменять траек-

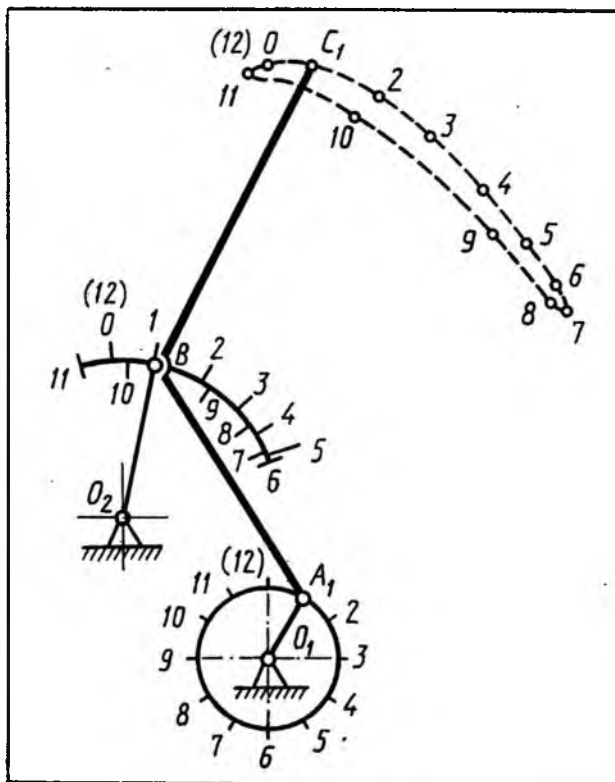


Рис. 8
21

тории движения соответствующих точек, выбирая те, которые наилучшим образом соответствуют технологическому процессу.

Например, точка B ведущего звена (кривошипа) совершает движение по окружности. Это движение легко осуществить, применив для этой цели электродвигатель. Точка же M рабочего органа должна описывать вполне определенную траекторию по условию наиболее тщательного перемешивания теста. Необходимая форма этой траектории обеспечивается применением соответствующего механизма. Выбор схемы механизма, расположение и геометрические размеры его звеньев влияют на форму траектории движения рабочей точки.

Проследите, как изменяется форма траектории точки M рабочего органа механизма нитепротягивателя швейной машины. На рисунке 8 показана необходимая траектория точки C . При изменении взаимного расположения звеньев форма траектории получается иной — штриховая линия (рис. 9). Изменения траектории мож-

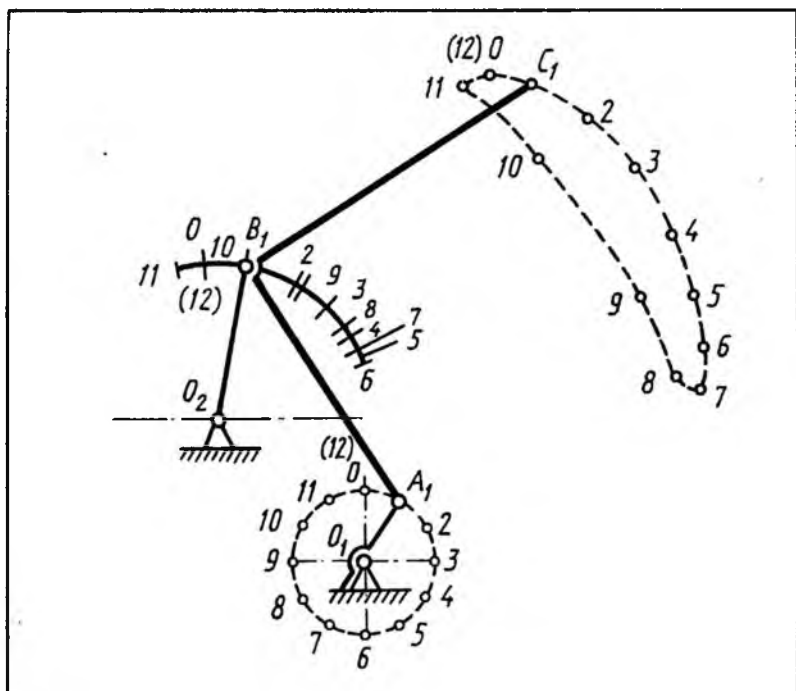


Рис. 9

но добиться и изменением геометрических размеров звеньев (рис. 10).

Механизация предусматривает выполнение механизмами основных технологических операций. Если технологический процесс полностью осуществляется механизмами и машинами, имеет место автоматизация производства. В развитии страны стоит важная задача именно комплексной механизации, автоматизации и роботизации производства. Особое внимание акцентировано на механизацию вспомогательных, подсобных и транспортных работ с целью максимального сокращения в них доли ручного труда. Бывают случаи, когда перед человеком возникает необходимость управлять траекторией движения в зависимости от возникающей ситуации и с учетом своего профессионального мастерства. Так, например, инженер-испытатель, рекордсмен по автомобильному спорту

Н. Разинчев может заставить ЗИЛ-130 с грузом общей массой 7 т делать повороты, напоминающие движения вальсирующей пары. Причем автомобиль делает не случайные, а управляемые движения. Форма траектории управляемого им автомобиля удивляла не только зрителей, но даже судей-хронометристов на трассе снежного слалома — ралли «Невские огни-72». Он сам пишет, что для непосвященных в тонкости «вальсирования» на семитонном грузовике происходившее было фантастикой.

Несмотря на большие достижения в исследовании космического пространства, ставшие для нас привычными, все-таки человек должен испытывать восхищение силой человеческого разума и профессионального мастерства, читая следующие слова:

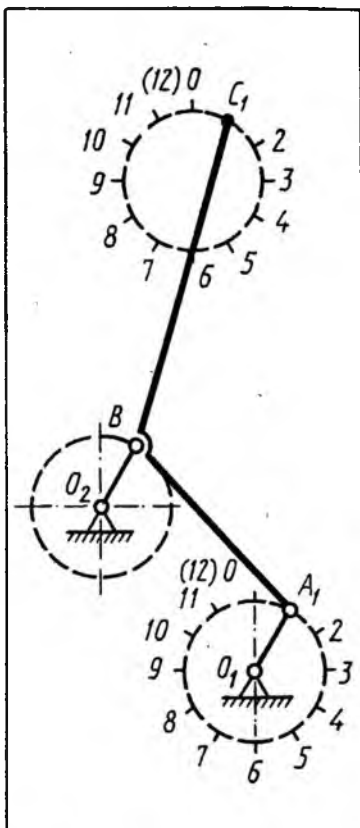


Рис. 10

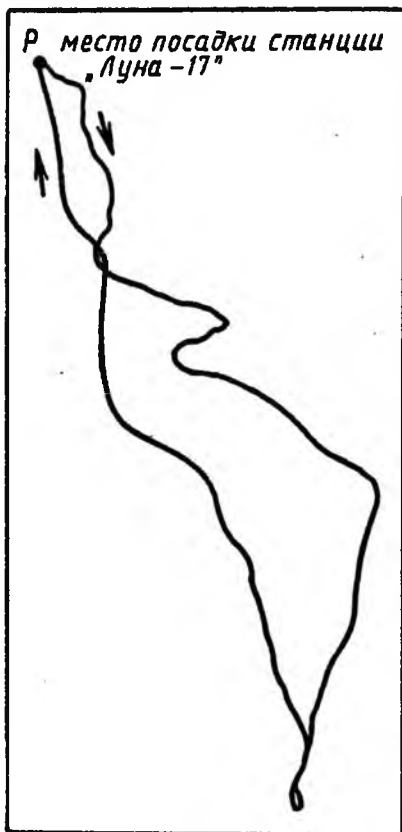


Рис. 11

ройства для дозированного по времени прямолинейного движения и выполнения поворотов на заданные углы.

Так осуществлялось управление «Луноходом-1», в результате чего траектория его движения на поверхности Луны имела вид, показанный на рисунке 11. «Луноход-1» проработал в Море дождей более десяти месяцев, прошел путь 10 540 м, передал на Землю 20 тыс. фотоснимков, исследовал физико-химические свойства лунного грунта в 500 точках. Итоговое перемещение «Лунохода-1» по отношению к Луне оказалось равным нулю, ибо он вернулся на исходную точку лунной поверхности. Измерение пройденного «Луноходом-1» пути, т. е. длины траектории его движения, осуществлялось по числу оборотов ведущих колес, каждое из которых имело индивидуальный привод. Для учета их пробуксовки

«Блок автоматики обеспечивает управление движением лунохода по радиокомандам с Земли, изменение и контроль основных параметров самоходного шасси и автоматическую работу приборов для исследования механических свойств лунного грунта. Все управление движением осуществляется с помощью пяти команд движения: «вперед», «назад», «направо», «налево», «поворот на месте» — и команды «стоп».

Это достигается с помощью логических схем, которые осуществляют набор логики движения, «запоминание» предыдущего режима работы и другие операции, воздействующие на силовые исполнительные элементы в цепи тяговых электродвигателей. Система управления движением блока автоматики шасси имеет также автоматические уст-

вносилась поправка, определяемая с помощью свободно катящегося девятого колеса, которое специальным приводом опускалось на грунт.

Вот уж поистине можно сказать, что человек, вооруженный знаниями, всесилен и всемогущ, если смог создать такое сказочное устройство. И физические основы таких знаний по автоматике вы получите уже в школьном курсе.

БЫСТРОТА, СКОРОСТЬ, ТЕМП

Все три слова вам знакомы. Всеми ими мы широко пользуемся в жизни — в бытовой разговорной речи или на производстве, в науке, например в физике или литературе, в спорте, т.е. в самых разнообразных случаях. Очевидно, что в этих словах есть что-то общее, что-то близкое по значению, по смыслу и одновременно и что-то отличающее их друг от друга.

Да, мы пользуемся этими словами для того, чтобы сравнивать в определенном отношении какие-либо родственные явления, процессы.

Быстрота есть слово разговорной речи, употребляемое в быту, литературе, а также применительно к различным явлениям человеческой практики и природы.

Например, в литературе мы можем прочесть такие строки:

Мысль **быстрее** коня лихого.

Белый сахар слаще меда —

или слова Н. В. Гоголя из «Мертвых душ»:

«И какой же русский не любит **быстрой** езды»;

в газетах о спортивных соревнованиях:

«Садчикова — самая **быстрая**».

Известно всем и выражение военных «быстрота и натиск». И в «Попутной песне» М. И. Глинки есть слова (автор Н. В. Кукольник) «И **быстрее**, шибче воли поезд мчится в чистом поле».

В быту мы говорим: «Как **быстро** плывут облака», «Как **быстро** вскипела вода в чайнике» или «Как **быстро** меняется у человека настроение». Но говорят и о **быстроте** нагрева болванки в горне кузнечного цеха, о **быстроте** обслуживания покупателя в магазине, о **быстроте** чтения книги и т. д.

Ясно, что слово «быстрота» характеризует здесь то, как мало или много времени затрачивается на что-то, на какой-то процесс, будь то преодоление расстояния, или изменения в каком-либо состоянии тела, или быстрота протекания явления природы.

Однако легко понять, что слово «быстрота» не тождественно слову «скорость». Если скоростью определяется изменение расстояния за единицу времени, то быстротой — время, необходимое на конкретный процесс.

Скорость есть научный, физический термин, означающий конкретное физическое понятие, которое используется с тем же смыслом в других науках, а также в технике. Когда идет речь о движении физического тела по траектории, скорость определяется как путь, проходимый за единицу времени. Когда речь идет об изменении положения тела в пространстве, скорость определяется как перемещение тела за единицу времени. Когда речь идет о вращательном движении, то скорость определяется как угловой путь (угол поворота) тела за единицу времени. Можно вести речь и о распространении в пространстве физического поля за единицу времени, например о скорости распространения света в той или иной оптической среде. И хотя термин «скорость» проник в разговорную речь, он, как правило, используется для характеристики различных механических перемещений — линейных или угловых.

Выбор единицы измерения скорости зависит от особенностей физических явлений или процессов.

Скорость как характеристика движения физических тел выражается в различных единицах: м/с, км/ч, м/мин, мм/мин, уз (узлах), т.е. миля/ч (в морских милях в час), об/с, об/мин, рад/с в зависимости от масштабов пространственных и временных промежутков, относящихся к конкретному движению или области измерения, и от характера движения.

Морская миля, равная 1852 м, является, как и метр, естественной единицей длины. Она равна длине угловой минуты земного меридиана. Секунда — определенная часть времени годового обращения Земли вокруг Солнца. Таким образом, взятые в основу различных единиц скоростей и м/с, и уз (узел) являются естественными единицами скоростей, ибо они являются долями реально существующих в природе объектов или событий.

Так, скорости различных наземных, речных, воздушных транспортных средств мы измеряем в км/ч; скорость движения на морях и океанах — уз, скорость кос-

мических объектов — км/с; скорость автоматической продольной и поперечной подачи при выполнении операций на токарно-винторезном станке — мм/об. О скорости и соответственно быстроте бега спринтера на стометровке мы судим по времени, затраченному на преодоление этой дистанции.

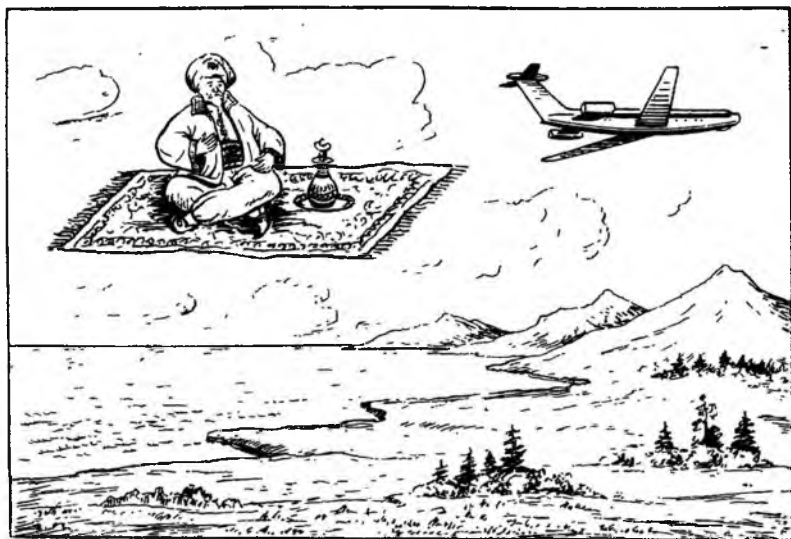
Теперь о понятии «темп». Общее между понятиями быстроты, скорости и темпа есть то, что все они связаны с событиями и явлениями по отношению ко времени, в течение которого они совершаются. Но термин «темп» используется чаще всего в оценке общественных явлений. Например, говорят о темпе роста общественного производства, выражая его прирост за год в процентах к начальному объему производства. Иногда термин «темп» используется в чисто техническом смысле. Например, темп автоматической стрельбы из пулемета, автомата или зенитного орудия. Измеряется он в таких случаях числом выстрелов, производимых из данного вида оружия в автоматическом режиме за единицу времени — одну минуту.

Вернемся к понятию скорости как имеющему прямое отношение к науке. Многие, если не все, современные естественные науки немыслимы без использования понятия скорости. Так, в физике понятие скорости является неотъемлемым в процессе познания самых различных явлений.

Механическое движение невозможно изучать, сравнивать и характеризовать, не прибегая к понятию скорости. Но мы пользуемся понятием скорости, изучая и движение молекул, говорим о скорости движения носителей электрических зарядов, о скорости распространения электромагнитных полей, скорости испарения и конденсации, нагревания и охлаждения тел.

Мы будем рассматривать здесь преимущественно скорости механического движения тел. Приведем примеры скоростей движения современных транспортных средств, попытаемся определить скорости по другим данным и, наконец, поинтересуемся скоростью распространения света.

Еще в древности, когда единственной картиной мира была мифологическая, люди в своем воображении стремились к быстрому перемещению. Не имея никакой технической возможности для воплощения своей мечты в действительность, люди вынуждены были мысленно конструировать сказочные «ковры-самолеты», пользоваться услугами «Конька-горбунка», который мог с не-



вообразимой скоростью мчат их через леса и горы, придумывать сапоги-скороходы или башмаки-самоступы и даже обращаться к волшебному слову все с той же целью: осуществлять движение со скоростью, во много раз превышающей физические возможности человека и даже хорошего коня-скакуна.

Человек часто задумывается над своим бытием, и кто знает, может, чаще всего он задумывался над тем, как повысить скорость своего движения. Во всяком случае если бы он об этом не думал, вряд ли было бы изобретено колесо, появление которого было революционным событием в истории средств и скоростей передвижения. Так качественный скачок в познавательном процессе человека обусловил скачок количественный — рост скоростей движения.

Человеческий разум позволил воплотить мечты в действительность, реальность, хотя многие столетия до создания механических средств передвижения скорости движения человека ограничивались физическими возможностями человека и животных.

В конце XIX и начале XX столетия был сделан новый качественный и количественный скачок в борьбе за скорость в результате того, что появились экипажи, которые без лошади, сами собой мчались по мостовой, обгоняя фуры и коляски, бегунов и велосипедистов. Восхищаясь большой скоростью движения первых автомо-

билей (а именно о них идет речь), прохожие восклицали: «Скорость-то какая! Лучшие рысаки не угонятся!»

Первое время рысаки, как правило, не состязались в скорости с автомобилями, а при виде последних шаркались в сторону.

И все же была возможность сравнить скорости конных экипажей и первых автомобилей. Первый автомобильный пробег по главной магистрали Москва — Петербург длился всего ... трое суток, тогда как на лошадях этот путь преодолевался в лучшем случае за неделю. Трое суток или целая неделя непрерывной езды — дело трудное, хотя расстояние, преодолеваемое при этом, не так уж велико — менее 700 км. Какова же в приведенном случае средняя скорость автомобиля?

$$\frac{700 \text{ км}}{24 \text{ ч} \cdot 3} \approx 9,7 \text{ км/ч.}$$

Однако максимально возможная скорость для автомобиля тех времен составляла до 50 км/ч.

Интересно отметить, что Россия в те годы активно участвовала в создании первых автомобилей. И не безуспешно. Так, в 1912 г. на международном авторалли по трассе Петербург — Монте-Карло протяженностью 3200 км быстрее всех был пройден этот путь гонщиком на русском автомобиле «Руссо-Балт» с двигателем мощностью 50 л.с., т. е. 36,8 кВт.

Появление автомобилей, железных дорог и локомотивов было следствием возрастающего темпа жизни, развития промышленного производства, требовавшего быстрой доставки топлива и сырья на предприятия и вывоза продукции производства. История появления механического транспорта подтверждает, что требования производства двигают науку и технику вперед быстрее, чем десяток университетов.

Здесь пора вернуться к скорости, имея в виду техническое использование этого понятия.

В транспортной технике существуют и широко используются следующие понятия скорости: конструкционная, крейсерская, или эксплуатационная, участковая и техническая, воздушная и путевая, скорость отрыва и посадочная скорость.

Конструкционной называется максимальная скорость, допускаемая конструкцией данного транспортного средства. Например, конструкционная скорость автомобиля «Жигули» — 150 км/ч; вертолета МИ-6 — 300 км/ч; самолета Ан-225 «Мечта» — 800 км/ч и т. д.

Следует заметить, что при испытаниях на скорость транспортные средства нередко превышают конструкционную скорость. Например, электровоз ВЛ-80 т развил скорость 164,8 км/ч при конструкционной 110 км/ч.

Конструкционная скорость транспортных средств всегда фиксируется в их паспортах, выставочных проспектах на них, в технических характеристиках и справочниках.

Крейсерная скорость относится к самолетам и вертолетам и представляет собой скорость наиболее экономичного по расходу топлива режима полета. Она всегда несколько ниже конструкционной. Например, для самолета Ту-144 она равнялась примерно 2300 км/ч против конструкционной 2500 км/ч. Аналогом крейсерной скорости для наземных транспортных средств, например автомобилей, является эксплуатационная скорость.

На железнодорожном и автомобильном транспорте используются также понятия технической и участковой скоростей. **Технической** называется средняя скорость движения поезда или автобуса, определяемая делением пройденного расстояния на время движения. **Участковой** называют среднюю скорость, определяемую делением пройденного расстояния на все время пребывания транспортного средства в пути следования, включая сюда и время стоянок в пути. При наличии стоянок в пути участковая скорость всегда меньше технической. При отсутствии стоянок в пути следования понятие участковой скорости излишне, так как она в этом случае равна технической.

В воздушном транспорте существенными являются понятия воздушной и путевой скорости, скорости отрыва и посадочной скорости. **Воздушной** скоростью самолета или вертолета называется скорость полета относительно воздуха. Эта скорость фиксируется в летно-технической характеристике и справочных данных о каждом типе самолета и вертолета.

Воздушная скорость полета не учитывает ветра — движения атмосферы. Однако в атмосфере не всегда царит штиль, т. е. безветрие. Как правило, бывает обратное — слабый или сильный ветер того или иного направления.

Встречный ветер будет противодействовать полету самолета, сносить его в сторону, противоположную направлению полета. Попутный ветер, наоборот, будет содействовать полету самолета.

Отсюда и возникает необходимость понятия **путевой**

скорости самолета, т. е. скорости его полета по отношению к наземным ориентирам, аэропортам вылета и назначения. Только зная путевую скорость самолета и протяженность рейса между аэропортами, мы можем определить желанное для нас время прибытия самолета в аэропорт, где мы с нетерпением ожидаем дорогого нам воздушного пассажира.

Путевую скорость самолета можно определить путем графического сложения воздушной скорости самолета и скорости ветра, если известно, под каким углом к трассе полета дует ветер.

Не менее существенными в авиационной технике являются понятия скорости отрыва и посадочной скорости самолета. Обе скорости являются яркими примерами мгновенных скоростей движения.

Скоростью **отрыва** называется скорость самолета в момент отрыва его от взлетно-посадочной полосы (ВПП) в конце разбега перед взлетом. **Посадочной** скоростью самолета называется скорость самолета при посадке в первый момент касания колесами или лыжами шасси взлетно-посадочной полосы.

Нетрудно сообразить, почему авиаконструкторы стремятся снизить и скорость отрыва, и посадочную скорость самолетов. Снижение этих скоростей позволило бы иметь в аэропортах меньшие по длине взлетно-посадочные полосы, стоимость сооружения которых доходит до 60% всех затрат на строительство аэропортов.

Однако в связи с ростом грузоподъемности и взлетной массы самолетов длина ВПП в аэропортах все-таки растет в соответствии с ростом длин разбега самолетов перед взлетом.

В науке о космосе есть тоже особые понятия скорости. Это первая, вторая и третья космические скорости. Первая, равная 7,9 км/с, есть минимальная скорость, с которой около Земли должно обращаться тело, чтобы стать ее искусственным спутником. Вторая, равная 11,2 км/с, есть минимальная скорость, позволяющая космическому телу, например автоматической межпланетной станции, покинув Землю, стать искусственным спутником Солнца. Третья, равная 16,7 км/с, есть минимальная скорость, позволяющая космическому телу навсегда выйти за пределы Солнечной планетной системы.

Первые две из названных скоростей уже достигнуты нами в процессе экспериментального исследования космоса. Первую космическую скорость могут иметь и межконтинентальные баллистические ракеты.

В физическом смысле скорость — весьма интересное понятие. В разных учебных пособиях она определяется по-разному. В одних она формулируется как отношение пути ко времени, а в других — как отношение перемещения ко времени.

Какое же из определений правильно? Правильны оба, хотя каждое из них характеризует разные явления, только в частном случае совпадающие между собой.

Когда нас интересует лишь различие между начальными и конечными координатами точки за определенный промежуток времени, речь идет о скорости перемещения тела. Когда же нас интересует, какой путь по траектории движения проходит тело за единицу времени, справедливо первое определение.

При прямолинейном движении скорость перемещения и скорость движения по траектории численно совпадают, во всех иных случаях скорость движения по траектории будет численно большей, чем скорость перемещения.

Какая же из этих скоростей важнее? На такой вопрос ответить следует так: любая из скоростей может быть более интересующей нас. Все зависит от конкретной задачи, которая при этом решается.

Поясним это на примерах.

Зенитное орудие ведет огонь по самолету. Нас интересует здесь средняя скорость перемещения снаряда к цели, а значит, и время, за которое он достигает цели. С учетом этого времени и расстояния, на которое за это время переместится самолет, определяется и направление, по которому производится выстрел. Учет перемещений в пространстве и самолета, и снаряда имеет целью то, чтобы они в одно и то же время оказались в одной точке пространства, т.е. имели одинаковые координаты в данной системе отсчета.

А вот другой пример. Вы на такси едете из Луганска в Ростов-на-Дону. Воздушная трасса Луганск — Ростов имеет протяженность 160 км, а автомобильная дорога-шоссе — 265 км. Ясно, что шоссе представляет собою кривую линию, изгибы которой на отдельных участках движения могут даже не приближать, а удалять нас от Ростова. Скорости движения на дорогах автоинспекция контролирует радаром. За превышение установленной для данного участка дороги скорости автоинспектор может остановить машину и наказать шофера. За что наказать? За превышение скорости движения по траектории или скорости перемещения из Луганска в Ростов? Ко-

нечно, за превышение скорости движения по траектории, т. е. по шоссе, ибо только ее и контролирует автоинспекция, только она, как и пройденный путь, фиксируется на спидометре автомобиля. А скорость перемещения такси к Ростову на этом участке могла быть даже равной нулю, если изгиб на дороге представлял собою дугу с центром кривизны в Ростове.

Конструкционная скорость любого транспортного средства, фиксируемая в его паспорте или проспекте, также является не скоростью перемещения, а скоростью движения по траектории.

Или еще пример. Мотоциклист на гонках совершает десять оборотов по овалному треку, после чего оказывается на месте старта. Какую же скорость он установил? Если иметь в виду скорость движения по треку, то она оказалась равной, допустим, 120 км/ч, а если иметь в виду скорость перемещения за это время, то она равна нулю, ибо мотоциклист в итоге вернулся в прежнюю точку пространства — к месту старта.

Из элементарных представлений об относительности движения, изучаемых по физике в IX классе, вы знаете, что и понятие скорости является относительным. То есть говорить о скорости в любом случае имеет смысл лишь тогда, когда ясно, с состоянием какого тела, которое считается нами неподвижным, мы сравниваем движение тела, скорость которого нас интересует.

Если на ступени лестницы эскалатора метро стоит человек, то какова его скорость? По отношению к ступени лестницы скорость равна нулю, а по отношению к платформе станции метро человек движется со скоростью движения лестницы эскалатора, равной примерно 0,9 м/с.

Выпавшая из окна вагона пассажирского поезда монета по отношению к пассажиру, уронившему ее, движется со скоростью, изменяющейся практически только по модулю, а по отношению к путевому обходчику, свидетелю события, — и по направлению.

Еще пример. Стратегический бомбардировщик управляется горючим в воздухе от самолета-танкера Ил-78. По отношению к базе, с которой он вылетел, скорость бомбардировщика может быть равна 1000 км/ч и более, а по отношению к самолету-танкеру в то же время она равна нулю, так как скорости обоих самолетов в это время обязательно должны быть равными и по модулю, и по направлению.

Напомним, что скорость как физическая величина

«работает» во всех без исключения разделах физики. В молекулярной физике — скорость, средняя и средняя квадратичная скорость движения молекул. В электричестве — скорость передачи электрического импульса, скорость носителей электрических зарядов в металлических проводниках, скорость теплового движения электронов, скорость движения ионов в электролитах. В атомной и ядерной физике — скорость обращения электронов вокруг ядра атома, скорость движения быстрых и тепловых нейтронов в ядерных реакторах и т. д.

Интересен вопрос: оказывает ли скорость движения физиологическое воздействие на организм человека и животных? Нет! Ведь мы непрерывно вместе с земным шаром мчимся со скоростью 30 км/с по орбите вокруг Солнца и просто не замечаем этой колоссальной скорости, а люди, неосведомленные в этом, даже не догадываются о том, что являются вечными путешественниками Вселенной.

Правда, если на тележке в аттракционе «американские горы» у нас на спусках захватывает дух, то это происходит не от скорости движения, а от резкого ее изменения и ощущения страха при мысли о том, как бы не перевернуться. Организм человека реагирует не на скорость, а на изменение скорости, это и понятно. Ведь организм чувствует воздействие сил; а силы необходимы не для поддержания движения, а лишь для его изменения.

Вернемся, однако, к истории развития средств и скоростей движения, к следствиям из этого в человеческой практике, в технике.

Уже в 1900 г. после стремительного старта двигателей внутреннего сгорания они были поставлены на омнибусы, развивавшие скорость до 10 — 15 км/ч. Нетрудно понять, что эти скорости были близки к конструкционным для омнибусов, так как в то время малочисленность транспортных средств в городах практически исключала заторы, простои и пробки на улицах и перекрестках.

Конструкционные скорости автомобилей и автобусов непрерывно росли, неудержимо росло число автомобилей в городах, что в мире привело к одному из парадоксов XX в.: автобус с двигателем мощностью 160 л.с. (117,8 кВт) в центре крупного города имеет среднюю скорость около 8 км/ч. Легковые автомобили, развивающие по шоссе скорости 140 — 150 км/ч, в часы «пик» в центре Парижа, Нью-Йорка, Лондона,

Рима, Стокгольма, Токио имеют среднюю скорость оксло 4 км/ч.

Современные отечественные транспортные средства имеют в зависимости от их назначения различные скорости. По автострадам легковые автомобили, например «Жигули» ВАЗ-2105, мчатся со скоростью 100 км/ч и более, имея конструкционную скорость 150 км/ч. На железнодорожном транспорте, который, как известно, является основным видом транспорта в стране, достигнуты высокие скорости движения пассажирских поездов. В дебаркадере Ленинградского вокзала в Москве мы видим огромный щит, на котором написано: «Товарищи пассажиры! Будьте осторожны на путях. Поезда по Октябрьской дороге идут со скоростью 200 км/ч».

С такой скоростью мчит нас из Москвы в Санкт-Петербург экспресс «Аврора». На шестьсот пятьдесят один километр железнодорожного пути «Аврора» имеет лишь одну двухминутную остановку на ст.Бологое.

И это не предел!

А как вы представляете себе проблему скоростного движения на железнодорожном транспорте? Создан скоростной электровоз, состав — и в путь? Дело обстоит значительно сложнее. Для перевода поездов на скоростное движение на Октябрьской дороге пришлось провести большие капитальные работы по укреплению и совершенствованию пути и сплошному ограждению всех переходов через линию. На линии уложены взамен деревянных высокопрочные железобетонные шпалы, число которых на 1 км пути увеличено с 1440 до 2200. Вместо песчаного применен хороший щебеночный балласт, уложены рельсы тяжелого типа Р-65 массой 65 кг на погонный метр с винтовым креплением к шпалам.

А вот интересная информация для размышления.

Представим себе, что к Москве приближается мчащийся из Санкт-Петербурга со скоростью 200 км/ч электропоезд ЭР-200. Есть ли в каждый момент времени какие-либо точки электропоезда, находящиеся в покое? Более того, движущиеся в обратную сторону — от Москвы к Санкт-Петербургу?

Вопрос странный, а ответ парадоксальный: да, есть!

Ведь каждое колесо вагонов электропоезда, диаметр которого по кругу катания равен 1050 мм, для предупреждения схода при движении с рельсов, имеет на ободе гребень высотой 25 мм — выступ, обращенный внутрь колеи (рис. 12). В каждый момент движения колесо имеет по кругу катания точки А, наиболее удаленные от

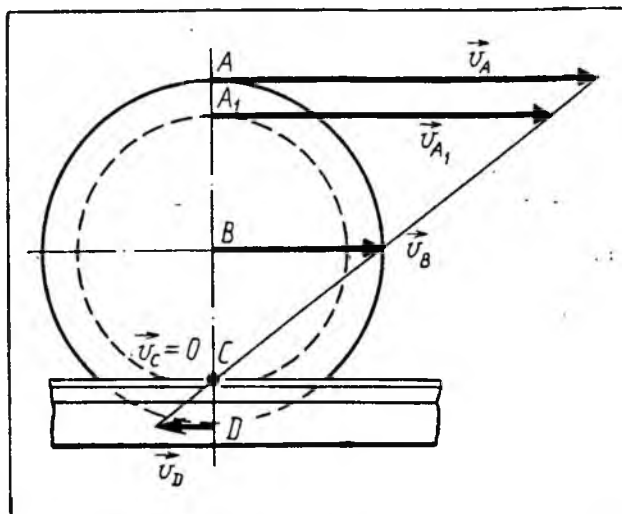


Рис. 12

рельса, точки B — в центре оси, точки C — опирающиеся на рельс и точки D , расположенные на вертикали $ABCD$ и находящиеся ниже всех остальных точек колеса. При движении поезда поворот колеса в каждый момент времени совершается вокруг точки C . Значит точки C колеса в этом положении неподвижны по отношению к рельсу, а значит, и к Москве. А точки D движутся от Москвы к Санкт-Петербургу со скоростью во столько раз меньшей скорости электропоезда, во сколько раз расстояние DC меньше радиуса колеса BC . Скорость эта равна

$$\frac{200 \cdot 25}{525} = 9,5 \text{ (км/ч)}.$$

Оказывается, в любой момент времени экспресс, летящий к Москве со скоростью 200 км/ч, имеет точки колес и неподвижные, и путешествующие в обратном направлении.

Заметим, кстати, что средняя скорость перемещения всех точек и частей электропоезда к Москве все же равна 200 км/ч, ибо если какие-то из точек в одни моменты времени имеют скорости меньше данной, то в другие моменты — больше ее. Так, например, в точке A скорость движения к Москве будет в нашем примере равна 400 км/ч.

Скорости в современной авиации допускают фантастические возможности.

Может ли время «течь в обратную сторону», т. е. из настоящего в прошлое? Может ли человек, скажем, из 1989 г. оказаться в 1988 г.? Вы скажете: конечно, нет. Однако скорости, достигнутые сейчас в авиации, и поясное время допускают такие ситуации, тем более что территория нашей страны охватывает с востока на запад 11 часовых поясов.

Допустим, наш самолет имеет уже достигнутую в авиации конструкционную скорость 2500 км/ч, или более 694 м/с. Эта скорость больше чем в 2 раза превышает линейную скорость вращения точек поверхности земного шара в широтах, лежащих в пределах территории России.

Допустим, что мы вечером 31 декабря 1992 г. сели во Владивостоке за праздничный новогодний стол, встретили Новый 1993 год и на самолете полетели на запад к друзьям в Новосибирск. Мы прилетели туда опять 31 декабря 1992 года, можем вторично встретить Новый 1993 год, а можем и в третий раз за сутки. Таким образом, мы дважды вернемся из 1993 в 1992 г.

Вот что означают скорости в современной технике.

УДИВИТЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ

Однако из всех скоростей движения в окружающем нас мире есть одна особенная и удивительная. Это скорость распространения света в вакууме, равная $3 \cdot 10^8$ м/с. В воздухе она меньше лишь на 0,03 %.

Скорость распространения света в вакууме, как установлено наукой:

во-первых, является абсолютной, т.е. она не зависит ни от движения источника света, ни от движения наблюдателя, иначе говоря одинакова в любой системе отсчета;

во-вторых, она является наибольшей скоростью передачи сигналов в природе;

в-третьих, она недостижима для движения любого физического тела в природе;

в-четвертых, она не зависит от природы и мощности источника света, от цвета света или направления его распространения;

в-пятых, в каждой из сред она постоянна и не может быть произвольно изменена — уменьшена или увеличена — никакими средствами.

Отметим весьма важное обстоятельство: скорость распространения света есть не скорость движения физического тела, а скорость распространения в пространстве физического поля, в данном случае — электромагнитного.

Объяснение всему этому вы получите при изучении физики в XI классе, однако на двух вопросах, связанных со скоростью света, мы остановимся сейчас. Это конечность, а не беспредельность, скорости распространения света и колоссальное значение этой скорости.

То, что свет не распространяется мгновенно, а имеет конечную скорость и для распространения на любое расстояние требует времени, имеет интересные следствия, о которых мы обычно не задумываемся.

Дело в том, что мы всегда видим не то, что в данный момент существует в действительности, а то, что прошло, что было ранее. Конечно, если иметь в виду взгляд на окружающие нас в быту предметы, то здесь разница во времени ничтожна. Так, движущийся на расстоянии 1 м от нас предмет, например футбольный мяч, мы видим таким и так, как это было $1/299791458$ долю секунды тому назад. А если взглянуть на звездное небо? Ведь мы никогда не увидим его таким, каким оно является в данный момент на самом деле. На небе мы одновременно видим события **разного времени**. Например, Солнце мы всегда видим таким, каким оно было 8 мин 20 с тому назад. Луну — такой, какой она была 1,3 с тому назад. Звезду Сириус — такой, какой она была 8 лет и 10 мес. тому назад, а звезду-сверхгигант Бетельгейзе — такой, какой она была около 653 лет тому назад! Мы увидим и сфотографируем ее сейчас, если даже она погасла еще за полтора столетия до открытия Америки. Парадоксально, что человек может видеть одновременно события разных времен, но это объясняется тем, сколько времени свет от разных небесных тел путешествует по Вселенной до нас, до планеты Земля.

То, что скорость распространения света колоссальна, тоже имеет интересные и весьма важные для жизни на Земле следствия. Представим себе гипотетический случай: скорость распространения света снизилась с $3 \cdot 10^8$ до 1 м/с. Что может быть следствием этого?

Например, такое. Светофор на перекрестке городских улиц дал красный сигнал, когда автомобиль, ехавший со скоростью 19 м/с, находился на расстоянии 120 м от него. Нетрудно вычислить, что шофер автомобиля не сможет остановить машину до светофора и на перекрестке возникнет аварийная ситуация.

Один из наших лучших авторов научно-фантастических произведений А. Р. Беляев в рассказе «Светопреставление» рисует впечатляющую картину того, что происходило в условиях, когда скорость света снизилась примерно до 0,002 м/с, т. е. свет преодолевал расстояние 1 м за 6 мин 58 с. Вот небольшие отрывки из рассказа, иллюстрирующие результаты чудовищного снижения скорости распространения света.

«Марамбалль взял в рот сигарету и зажег спичку. Но тут случилось нечто... повергшее его сначала в недоумение, а потом и в ужас.

Спичка зажглась с треском, как ей полагается, но Марамбалль не увидел огня, хотя слух не мог обмануть его: спичка зажглась. Раздумывая над этим непонятным явлением, он продолжал держать спичку и вдруг вскрикнул от ожога. Марамбалль бросил спичку, отдернув руку. Теперь он тер рукой обожженные пальцы и в то же время продолжал видеть свою протянутую над столом руку со спичкой. Марамбалль в ужасе откинулся на спинку кресла и наблюдал эту «третью руку», в то время как его дрожащие руки покоились уже на коленях. Он сидел так минут пять, пока новое явление не поразило его: он увидел, как вспыхнула наконец спичка в призрачной руке, как догорела и как отдернулась рука после ожога пальцев».

А что, по рассказу Беляева, творилось в это время на улицах города?

«Как будто весь мир превратился в сумасшедший дом. Отовсюду слышались крики, стоны и даже смех, не оставлявший никакого сомнения в том, что он исходил от безумного. От времени до времени с улицы через открытое окно слышался какой-то треск и новые взрывы криков и стонов. Марамбалль мельком взглянул в окно и увидел страшные картины: лежавшие на боку трамваи, обломки перевернутых автомобилей, темную кровь, разлитую по асфальту, и груды тел — мертвых и изуродованных».

В наших земных условиях гигантская скорость распространения света является «благодеянием» природы для человечества и позволяет нам видеть в своем окружении людей и обстановку практически такими и там, где они и есть на самом деле в данное время.

Однако следует заметить, что картина событий, изображенных в рассказе А. Р. Беляева «Светопреставление», требует серьезных физических замечаний.

Во-первых, со времени резкого сокращения скорос-

ти света на Земле воцарится мрак, в 375 раз более темный, чем в обычную безлунную ночь, ибо световой поток от Солнца и освещенность Земли уменьшатся во столько раз, во сколько раз снизится скорость распространения света, т.е. более чем в $125 \cdot 10^9$ раз. Лучу Солнца для достижения Земли потребуется не 500 с, а около 2 млн. лет. Даже свет с расстояния 1 км достигнет Земли через 117 ч.

Во-вторых, если Солнце как светило останется тем же, то ни о каком изменении цвета света на Земле быть не может, даже через миллионы лет. Цвет неба из голубого не превратится в оранжевый, а белые здания в синеватые, как это изображает автор.

Повсюду на Земле будет непроглядная ночь под безлунным, беззвездным небом. Свои «местные» источники света потребуются человечеству все 24 ч в сутки, но и от них свет будет распространяться не торопясь, со

скоростью $v = \frac{1}{417} \text{ м/с} = 0,0024 \text{ м/с}$.

«С МЕСТА В КАРЬЕР»

Речь пойдет уже не о скорости, а об ее изменении — ускорении.

Давайте сравним два выражения — «кто быстрее» и «кто резвее». Какое из них больше соответствует названию настоящего параграфа? По мнению авторов — второе. В самом деле, выражение «с места в карьер» было обычным во времена, когда верховая езда на лошадях была столь же обычным явлением, как сегодня езда на велосипеде или автомобиле. Это выражение означало быстрый переход из состояния покоя к скачке.

А вот резвятся дети. Более резвым считается не тот, кто быстрее бежит на большее расстояние, а тот, кто быстрее срывается с места, более резко может изменять модуль скорости, направление своего движения. Более резвый не тот, кого догнать труднее, а тот, кого труднее поймать. Быстрее срывается с места, более резко изменяет направление своего движения — и в том и в другом случае речь идет об определенном изменении скорости за короткий промежуток времени. Ведь скорость может изменяться на одну и ту же величину за разные промежутки времени!

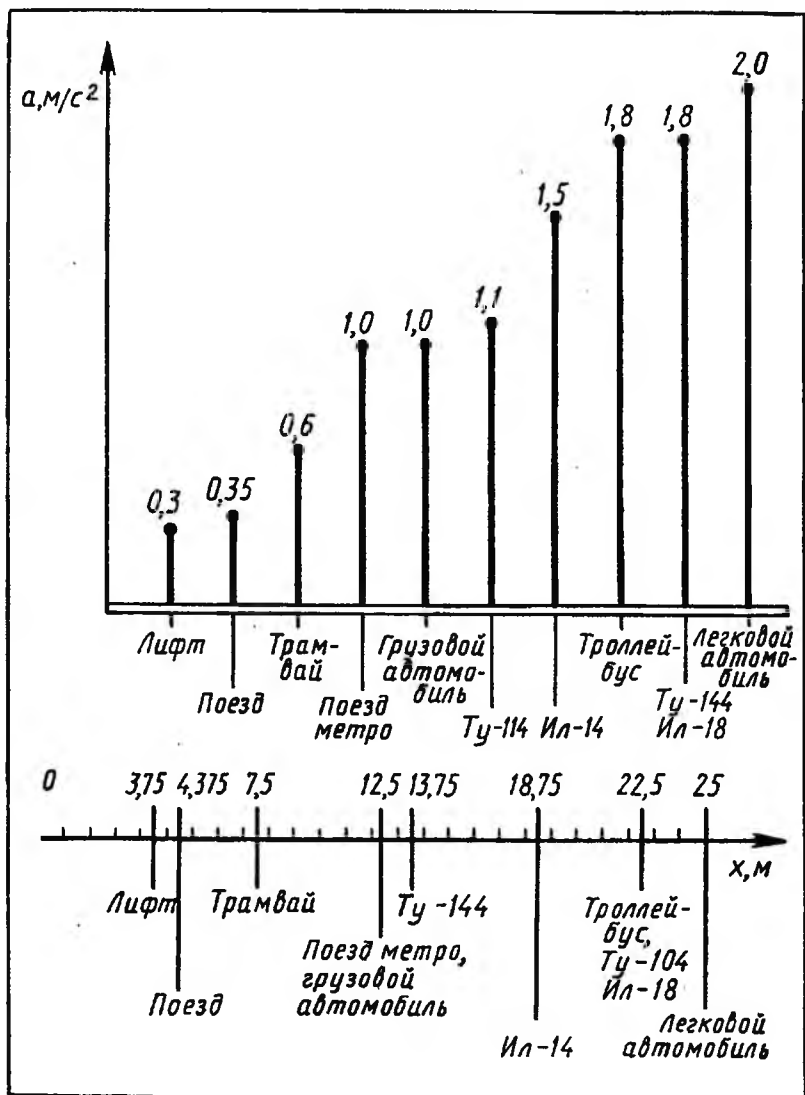


Рис. 13

Давайте сравним «резвость» легковых автомобилей. Наиболее распространенной «меркой» способности легкового автомобиля «брать с места» является время, за которое он разгоняется из состояния покоя до 80 км/ч. Итак:

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| «Волга-ГАЗ-21» — 15 с | «Жигули-ВАЗ-2101» — 12 с |
| «Волга-ГАЗ-24» — 14 с | «Запорожец-968» — 14 с |
| «Москвич-412» — 12 с | «ЗИЛ-114» — 10,5 с |

Считая условно движение автомобилей равноускоренным, подсчитайте, какие ускорения развивают легкие автомобили, и сравните полученные результаты со справочными данными (рис. 13 и 14). Можно воспользоваться справочником по физике и технике А. С. Еновича (М.: Просвещение, 1989).

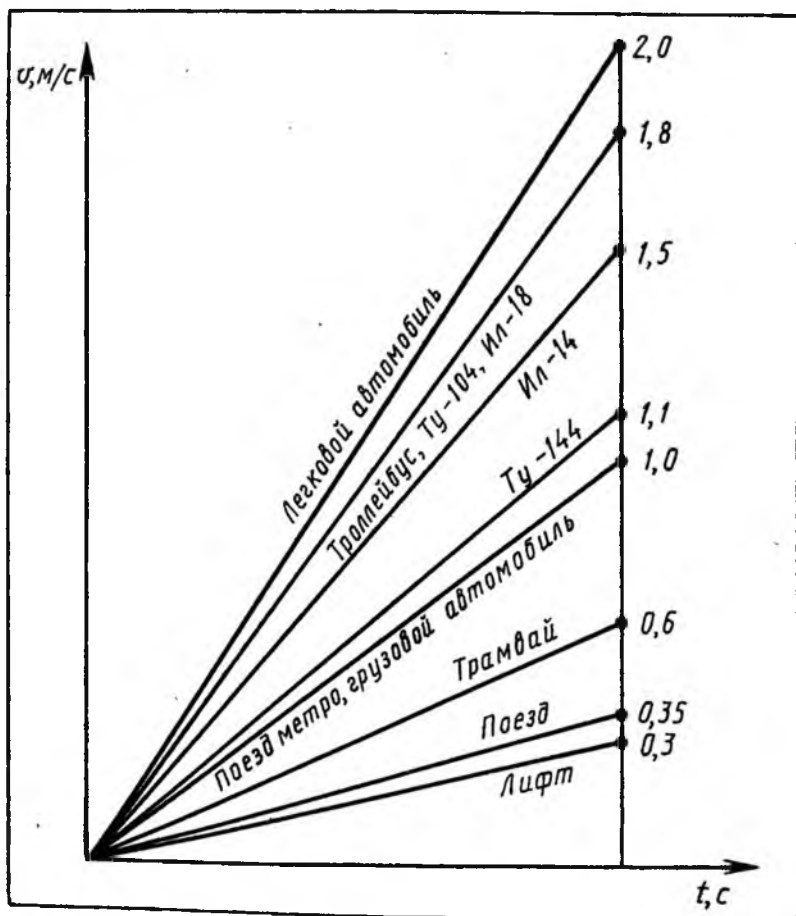


Рис. 14

НЕ ОКАЖЕТСЯ ЛИ АВТОМОБИЛЬ В ВОРОНКЕ!

По военной дороге идет автомобиль со скоростью 60 км/ч. Шофер увидел на дороге воронку от взрыва авиабомбы в момент, когда автомобиль находился на расстоянии 55 м от нее. Сможет ли он остановить машину до воронки или окажется вместе с машиной на ее дне?

Наименьшее расстояние, которое пройдет автомобиль до остановки с момента появления препятствия в поле зрения водителя, называется **дистанцией безопасности**. Это понятие имеет весьма важное значение в технике работы автомобильного транспорта и для безопасности перехода автомобильных дорог пешеходами. В дистанции безопасности различают три составные части:

а) расстояние, проходимое автомобилем с момента появления препятствия для движения в поле зрения водителя до момента приведения в действие средств торможения, т.е. время реакции водителя на препятствие. Оно колеблется у водителей в пределах от 0,5 до 1,2 с;

б) расстояние, проходимое автомобилем за время срабатывания тормозной системы, т.е. время с момента нажатия водителем на тормозную педаль до достижения тормозной системой полной силы торможения. Это время составляет от 0,3 до 0,6 с в зависимости, главным образом, от вида привода тормозов: у тормозов с гидравлическим приводом оно меньше, у тормозов с пневматическим приводом — больше;

в) расстояние, проходимое автомобилем с момента действия тормозной системы в полную силу до остановки автомобиля.

Два последних расстояния, вместе взятые, составляют **тормозной путь** автомобиля, который для каждой модели автомобиля примерно пропорционален квадрату начальной скорости автомобиля, т.е. скорости в момент приведения в действие его тормозной системы.

Исходя из изложенного мы можем узнать и судьбу водителя с автомобилем, оказавшегося в критической ситуации. Для этого надо определить дистанцию безопасности применительно к данному случаю и сравнить ее с расстоянием, с которого воронка оказалась в поле зрения водителя. Если дистанция безопасности будет меньше этого расстояния — все в порядке, в ином случае машину надо будет искать на дне воронки.

Допустим, что время реакции водителя — 0,8 с, время срабатывания тормозной системы — 0,4 с, а макси-

мальное (по модулю) ускорение, достигаемое при торможении автомобиля, равно $4,0 \text{ м/с}^2$. Тогда первое расстояние определится по формуле $s_1 = v_0 t_1$, где v_0 — начальная скорость автомобиля и t_1 — время реакции водителя. Движение автомобиля на этом участке пути будем считать равномерным, так как водитель на препятствие не среагировал.

Второе расстояние определяется так: за время срабатывания тормозной системы автомобиля сила торможения возрастет линейно от нуля до максимально возможной. Значит, также возрастет и ускорение от нуля до наибольшего значения a , а среднее значение ускорения за данный отрезок времени составит $\frac{a}{2}$. Тогда второе расстояние определится по формуле $s_2 = v_0 t_2 - \frac{a}{2} \frac{t_2^2}{2}$ или $s_2 = v_0 t_2 - \frac{a t_2^2}{4}$, где t_2 — время срабатывания тормозной системы и a — максимальное ускорение автомобиля при торможении.

Теперь попробуем определить и третье расстояние.

Скорость v , которую будет иметь автомобиль в конце второго участка движения, определится так: $v = v_0 - \frac{a}{2} t_2$ или $v = v_0 - \frac{a t_2}{2}$.

Тогда третье расстояние выразится так: $s_3 = \left(v_0 - \frac{a t_2}{2} \right) t_3 - \frac{a t_3^2}{2}$ или иначе: $s_3 = v_0 t_3 - \frac{a t_2 t_3}{2} - \frac{a t_3^2}{2}$, где t_3 — еще неизвестное нам время движения автомобиля за время действия тормозов в полную силу. Оно может быть определено следующим образом. На третьем участке пути скорость движения автомобиля уменьшается от v до нуля.

Тогда $0 = v - a t_3$ и $t_3 = \frac{v}{a}$. Но так как мы уже определили, что $v = v_0 - \frac{a t_2}{2}$, то $t_3 = \frac{v_0 - \frac{a t_2}{2}}{a}$ или $t_3 = \frac{2v_0 - a t_2}{2a}$. Учти-

вая, что ускорение a здесь всегда отрицательно, подсчитаем последовательно все три расстояния, пройденные автомобилем, выразив все величины в единицах СИ, и определим дистанцию безопасности s . Сравним ее с расстоянием s' , с которого водитель увидел воронку на дороге.

Дистанция безопасности $s = 52 \text{ м}$ и $s' = 55 \text{ м}$.

Таким образом, автомобиль остановится до воронки и все окончится благополучно. Но один вывод из задачи

надо усвоить твердо: автомобиль никогда не сможет остановиться, независимо от бдительности и квалификации водителя, даже при отличном состоянии тормозов, на расстоянии меньшем дистанции безопасности.

Поэтому никогда нельзя перебегать дорогу перед близко идущим транспортом!

И ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ И АБСОЛЮТНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Человек входит в станцию метро, становится на ступеньки эскалатора, идет по перрону станции, входит в вагон поезда метро, выходит из вагона, потом из станции метро, входит в автобус, подъезжает к своему дому, входит в подъезд, нажимает кнопку вызова лифта, заходит в лифт, поднимается на соответствующий этаж, выходит из лифта, заходит в квартиру, садится в кресло и отдыхает.

Все это время человек двигался в направлении своего места жительства. Мы говорим «двигался», а ведь он стоял на лестнице эскалатора, стоял или сидел в вагоне метро, стоял или сидел в автобусе, стоял в кабине лифта... Так двигался человек или стоял? И то и другое. Человек стоял на лестнице эскалатора, но вместе с ней двигался относительно платформы станции метро, он стоял в вагоне метро, но вместе с ним двигался относительно станции и линии метро, так же в автобусе; он стоял в лифте, но вместе с ним двигался относительно дома, он сидел дома в кресле, но двигался относительно движущегося лифта, относительно движущегося поезда метро, относительно всего, что изменяло в это время свое положение по отношению к «покоящемуся» в кресле человеку.

Любой объект окружающего нас материального мира в любой момент времени и движется (относительно одних тел), и в то же время покоится (относительно других). Движение — такое же естественное состояние любого тела, как и его покой.

Вопрос не праздный. Он имеет огромное мировоззренческое значение. Ведь считалась же Земля абсолютно покоящейся, а все небесные объекты движущимися относительно нее.

Спор о движении и покое тел оригинально выражен в стихотворении А. С. Пушкина «Движение»:

Движенья нет, сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить,
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый.
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами Солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.

Кстати, глубокая вера Галилея в то, что не Солнце вращается вокруг Земли, а наоборот, Земля вокруг Солнца и собственной оси, образно выражена в строках известного стихотворения:

В плену священной инквизиции
Томился мудрый Галилей.
Чтоб сбить еретика с позиции,
Все пытки становились злей.
«Клянись, что вздор твое ученье,
И грех тогда тебе простится!»
Мудрец в ответ, терпя мученья:
«А все-таки Земля вертится!»

Как известно, в механике есть понятия относительного, переносного и абсолютного движения точки. Речь идет о движении относительно подвижных и неподвижных систем отсчета. Движение точки в подвижной системе считается относительным, в неподвижной — абсолютным, а движение подвижной системы отсчета относительно неподвижной — переносным. Необходимо видеть относительность этой абсолютности, так как при расширении области наблюдения считавшаяся ранее неподвижной система отсчета станет подвижной по отношению к другой, которую в новых условиях можно считать неподвижной.

При решении производственно-технических задач очень часто без рационального выбора систем отсчета не обойтись.

Попытаемся определить скорость ползуна кривошипно-шатунного механизма в заданный момент времени. Ни одна из формул, известных из школьного курса физики, не может быть использована для этой цели, так как движение поршня не равнопеременное. И все же, зная материал школьного курса физики, можно решить поставленную задачу. Необходимо только разумно распорядиться имеющимися знаниями, т. е. творчески их применить.

Для нахождения мгновенной скорости ползуна при-

меним правило сложения скоростей: $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$, где \vec{v} — скорость движения тела относительно неподвижной системы координат (абсолютная скорость); \vec{v}_1 — скорость подвижной системы относительно неподвижной (переносная скорость); \vec{v}_2 — скорость тела относительно подвижной системы (относительная скорость).

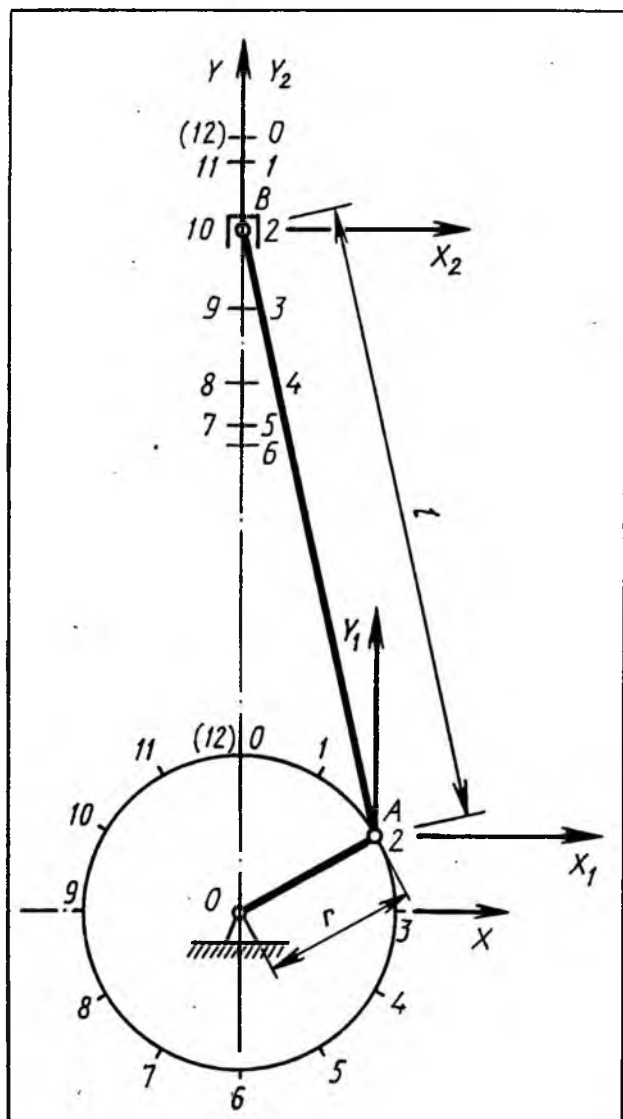


Рис. 15

В качестве подвижной удобно взять систему Ax_1y_1 , любая точка которой движется по окружности, а сама система движется поступательно (рис. 15).

Скорости всех точек движущегося поступательно тела в любой момент времени одинаковы и равны скорости точки A , которая легко определяется:

$$v_A = r \cdot \omega, \quad r = OA, \quad \omega = \frac{\pi n}{30}$$

Итак, правило сложения скоростей в нашем конкретном случае будет выглядеть так: $\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_B'$, где \vec{v}_B — скорость точки B относительно неподвижной системы; \vec{v}_A — скорость подвижной системы Ax_1y_1 относительно неподвижной OXY ; \vec{v}_B' — скорость точки B относительно подвижной системы.

Следовательно, чтобы получить скорость точки B , необходимо к вектору \vec{v}_A прибавить вектор \vec{v}_B' . Модуль и направление вектора \vec{v}_A в любой момент времени нам известны. Вектор \vec{v}_A всегда направлен по касательной к траектории точки A , т. е. перпендикулярно радиусу OA . Модуль вектора \vec{v}_B' определить аналитически очень трудно. Направление же этого вектора легко определяется. В самом деле, точка B относительно системы Ax_1y_1 движется по дуге окружности радиусом AB . Ведь расстояние

точки B от начала координат подвижной системы (точки A) остается неизменным. Положение точки B относительно Ax_1y_1 с течением времени изменяется. Единственно возможная траектория точки B относительно Ax_1y_1 — дуга окружности. Следовательно, вектор скорости точки B относительно Ax_1y_1 направлен по касательной к этой дуге, перпендикулярно радиусу AB этой дуги.

К тому же мы видим, что вектор скорости точки B относительно неподвижной системы всегда вертикален. Теперь треугольник

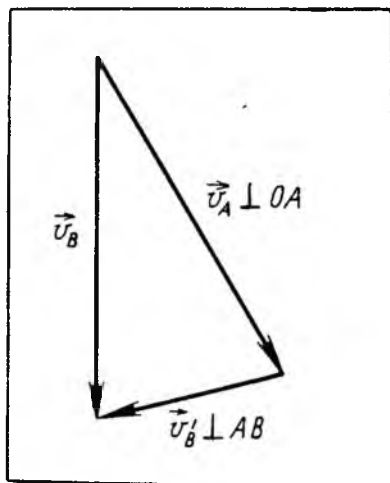


Рис. 16

скоростей легко можно построить (рис. 16). Используя масштаб скорости, определяем модуль вектора скорости точки B . Нетрудно видеть, что в любой момент времени, задаваемый углом поворота кривошипа OA , скорость точки B может быть определена аналогично.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА С «НЕОБЫЧНОЙ» ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Рассмотрим движение тела, брошенного под углом к горизонту. Сопротивление воздуха учитывать не будем, а тело примем за материальную точку. Какова ее траектория? Этот вопрос обладает неопределенностью, так как не указана система отсчета, относительно которой необходимо рассматривать движение тела. А относительно различных систем отсчета траектории тела могут быть различны. Еще раз убедимся в этом.

Будем рассматривать движение тела относительно таких систем отсчета (рис. 17):

- 1) система координат $X_1O_1Y_1$, жестко связанная с равномерно движущимся в горизонтальном направлении телом, причем $v_1 = v_{ох}$;
- 2) система координат $X_2O_2Y_2$, поступательно движу-

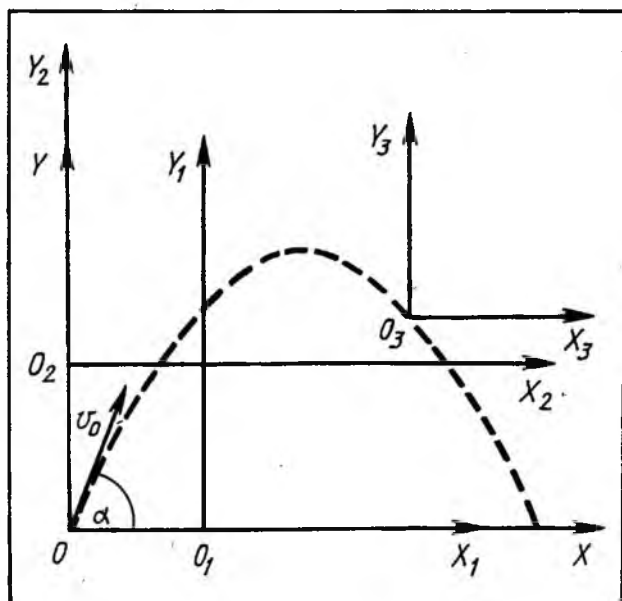


Рис. 17

щаяся вместе с брошенным вертикально вверх телом, причем $v_{oz} = v_{oy}$;

3) система координат $X_3O_3Y_3$, жестко связанная с рассматриваемым телом;

4) система координат XOY , жестко связанная с земной поверхностью, ее можно считать в данном случае неподвижной системой.

Относительно системы $X_1O_1Y_1$ тело движется вертикально вдоль оси O_1Y_1 , следовательно, его траектория представляет собой отрезок прямой, длина которого определяется так: $h = \frac{v_{oy}^2}{2g}$ или $h = \frac{(v_o \sin \alpha)^2}{2g}$. В системе

$X_2O_2Y_2$ тело движется вдоль горизонтальной оси O_2X_2 и его траектория представляет собой отрезок прямой длиной $l = v_{ox}t$, где t — время движения тела. Это время можно определить как сумму промежутков времени подъема и опускания тела. Без учета сопротивления воздуха $t_{\uparrow} = t_{\downarrow} = \frac{v_{oy}}{g}$. (Из условия $v_y = v_{oy} - gt$, когда $t = t_{\uparrow}$, то $v_y = 0$.)

Относительно системы $X_3O_3Y_3$, связанной с рассматриваемым телом, координаты тела $x_3 = 0$, $y_3 = 0$ и с течением времени не изменяются. Следовательно, в системе $X_3O_3Y_3$ тело покоится.

И наконец, при движении тела относительно неподвижной системы его координаты x и y изменяются с течением времени. О форме траектории тела можно судить по функциональному соответствию между множествами координат $\{x\}$ и $\{y\}$. Установим это соответствие:

$x = v_{ox}t$, $t = \frac{x}{v_{ox}}$, $y = v_{oy}t - \frac{gt^2}{2}$, $y = \frac{v_{ox}}{v_{ox}}x - \frac{g}{2v_{ox}^2}x^2$, уравнение траектории вида $y = -ax^2 + bx$, где $a = \frac{g}{2v_{ox}^2}$, $b = \frac{v_{oy}}{v_{ox}}$. Это

есть уравнение параболы, обращенной выпуклостью вверх. Значит, траектория тела относительно неподвижной системы XOY — парабола.

Сделаем выводы: любое тело в любой момент времени и движется (относительно одних систем отсчета), и покоится (относительно других). Форма траектории зависит от выбора системы отсчета.

Так как движение тела относительно системы $X_1O_1Y_1$ равноускоренное, то скорость в любой момент времени может быть определена: $v_1 = v_{oy} - gt$. Вектор \vec{v}_1 направлен вертикально вверх (при подъеме) или вниз (при опускании).

Относительно системы $X_2O_2Y_2$ тело движется равномерно и прямолинейно, так как $a_x = 0$. Следовательно, скорость тела не зависит от времени и в любой момент $v_2 = v_{ox}$

В системе $X_3O_3Y_3$ тело покоится, поэтому $v_3 = 0$ в любой момент времени.

Скорость тела относительно неподвижной системы XOY в любой момент времени может быть определена по теореме Пифагора, т. е. $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$. Вектор этой скорости представляет собой диагональ прямоугольника, стороны которого v_x и v_y . Этот вектор касателен к траектории тела и направлен в сторону его движения.

Теперь еще раз прочитаем название этого параграфа и задумаемся над смыслом кавычек. Обычно в повседневной жизни мы рассматриваем движение тел относительно неподвижных систем отсчета. Научный же подход предусматривает выбор систем отсчета на основе целесообразности, и далеко не всегда целесообразной оказывается неподвижная система отсчета. Мы в этом уже убедились, определяя мгновенную скорость поршня двигателя внутреннего сгорания. В самом деле, чтобы определить мгновенную скорость поршня относительно неподвижной системы отсчета (\vec{v}_B), нам понадобилось определить его скорость относительно подвижной системы $X'A'Y'$ (\vec{v}_B'). При кинематическом исследовании механизмов, составляющих вместе с машинами материальную основу механизации производства, такой переход от подвижных систем отсчета к неподвижным и наоборот является необходимым, а поэтому должен стать привычным для исследователя.

ЕЩЕ НЕМНОГО КИНЕМАТИКИ И... МАТЕМАТИКИ

Поставим себе задачу исследовать движение двух тел при таком условии. Пусть тело A , находясь на высоте $H_1 = 20$ м, начинает свободно падать с начальной скоростью $v_{01} = 0$. В момент начала движения тела A телу B , находящемуся на высоте $H_2 = 0$, была сообщена вертикально вверх начальная скорость $v_{02} = 40$ м/с, и оно начало двигаться навстречу телу A . Необходимо установить закон, по которому изменяется расстояние между ними, а также построить графики изменения ко-

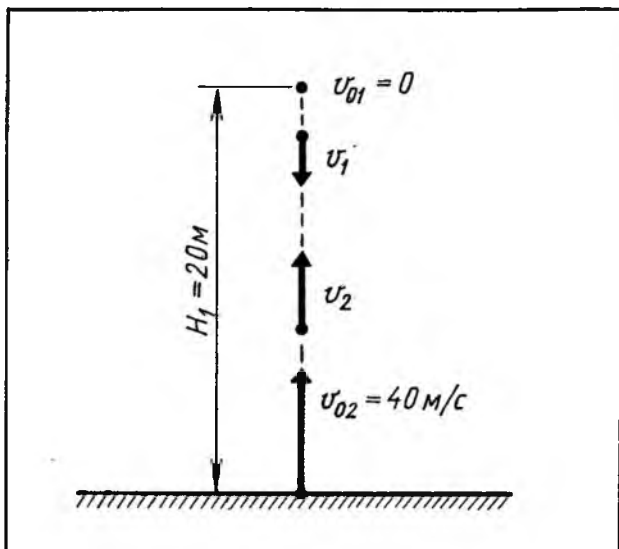


Рис. 18

ординаты, скорости и ускорения тела A в системе координат, связанной с телом B .

Ситуация, предусмотренная условием задачи, изображена на рисунке 18 в произвольный момент времени. Прежде чем строить графики изменения с течением времени расстояния между телами, а также координаты, скорости и ускорения первого тела относительно системы координат, связанной со вторым телом, определим характерные точки на графиках.

Время падения первого тела относительно неподвижной системы отсчета определим из формулы: $H_1 = \frac{1}{2}gt^2 \rightarrow t = \sqrt{\frac{2H_1}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20}{10}} = 2$ (с). Здесь и в дальнейшем ускорение свободного падения g будем считать равным 10 м/с^2 .

Время движения первого тела относительно второго равно времени движения второго тела относительно неподвижной системы отсчета, так как именно в течение этого промежутка времени положение первого тела относительно второго изменяется. Тогда $v_2 = v_{02} - gt$. В точке наивысшего подъема $v_2 = 0$ $t_{\text{под}} = t_{\text{оп}} = 4$ с. Итак, первое тело относительно второго движется 8 с. В течение 8 с расстояние между телами изменяется. По какому закону? В любой момент времени $l = |h_1 - h_2|$.

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= H_1 - \frac{1}{2}gt^2 \\ h_2 &= v_{02}t - \frac{1}{2}gt^2 \end{aligned} \right| l = \left| H_1 - \frac{1}{2}gt^2 - (v_{02}t - \frac{1}{2}gt^2) \right| = |H_1 - v_{02}t|.$$

Этот закон изменения расстояния между телами имеет место в течение двух секунд, так как именно на этом промежутке времени $h_1 = H_1 - \frac{1}{2}gt^2$. В момент времени $t = 2$ с $h_1 = 0$ и в дальнейшем расстояние между телами изменяется по закону:

$$l = |h_2' + v_2't - \frac{1}{2}gt^2|,$$

где h_2' — высота, на которой находится второе тело через 2 с; v_2' — скорость второго тела в неподвижной системе отсчета через 2 с.

В момент времени $t = 2$ с расстояние между телами $l = h_2' = v_{02}t - \frac{1}{2}gt^2 = 40 \cdot 2 - \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 2^2 = 60$ (м). Наибольшее расстояние между телами равно максимальной высоте подъема второго тела, которая легко определяется: $H_2 = \frac{v_{02}^2}{2g} = \frac{40^2}{2 \cdot 10} = 80$ (м).

Таким образом, в течение двух секунд закон изменения расстояния между телами с течением времени линейный, а затем квадратичный. В точке встречи тел $l = 0$, исходя из этого, найдем время встречи: $0 = H_1 - v_{02}t_b \rightarrow t_b = \frac{H_1}{v_{02}} = \frac{20}{40} = 0,5$ (с).

Следовательно, в течение 0,5 с расстояние между телами уменьшалось, а затем еще 1,5 с возрастало по линейному закону, т. е. первое тело относительно второго двигалось равномерно и прямолинейно со скоростью 40 м/с. Полностью график изменения расстояния между телами с течением времени показан на рисунке 19, а.

График изменения координаты первого тела относительно системы, связанной со вторым, имеет общее и особенное по сравнению с графиком изменения расстояния. Общим является то, что закон изменения координаты в течение 2 с также линейный, а остальные 6 с движения — также квадратичный. Особенность состоит в том, что координата в отличие от расстояния может быть как положительной, так и отрицательной. В нашем случае после 0,5 с движение первого тела осуществляется в области отрицательных значений координаты y , что и отражено на рисунке 19, б.

Так как движение первого тела относительно второ-

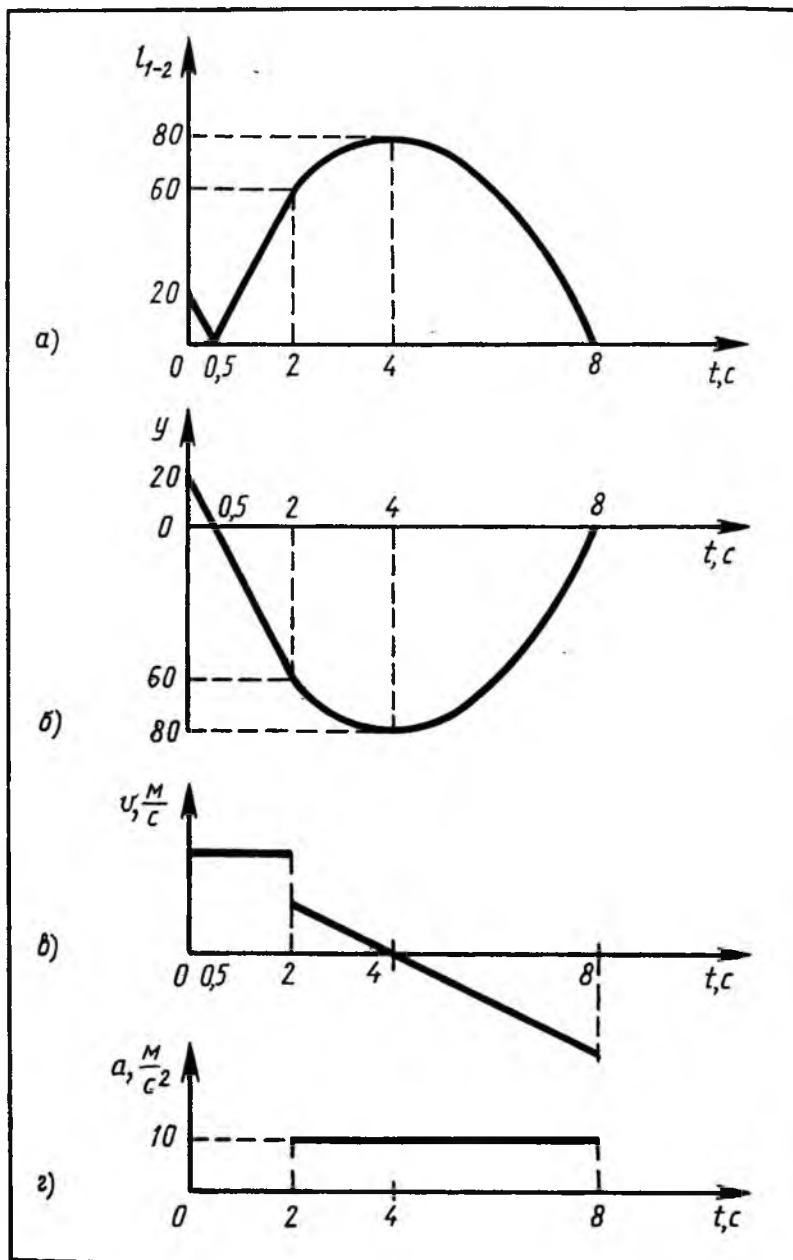


Рис. 19

го в течение 2 с равномерное и прямолинейное со скоростью 40 м/с, а затем равноускоренное, то график изменения скорости с течением времени будет иметь вид, показанный на рисунке 19, в. Первое тело двигалось вниз в течение 4 с, а затем еще 4 с двигалось вверх, приближаясь ко второму телу.

В момент приземления первого тела его скорость за очень короткий промежуток времени уменьшилась на 20 м/с (на графике в соответствии с масштабом времени учесть это не представляется возможным, поэтому график скорости в этом месте претерпевает скачок).

В момент времени $t = 4$ с второе тело достигает точки наивысшего подъема и останавливается, а так как первое тело в это время уже лежит на земле, то их относительная скорость в этот момент времени равна нулю, что и отражено на графике.

Ускорение первого тела относительно второго в течение 2 с равно нулю, так как оба тела на этом промежутке движутся с одинаковыми ускорениями ($a = g$) относительно неподвижной системы отсчета. В дальнейшем имеет место равноускоренное движение первого тела относительно второго. Это ускорение постоянно по модулю $a_{1,2} = g$ и направлено вверх (рис. 19, з).

- ?
4. Искусственные спутники Земли движутся относительно нее по эллиптическим орбитам. Чем определяются размеры больших и малых полуосей эллипсов? Как изменяется модуль скорости ИСЗ в зависимости от его положения на эллиптической траектории?
 5. ИСЗ совершают движение по круговым орбитам различных радиусов. Необходимо сравнить их скорости и периоды обращения вокруг Земли.
 6. Зависит ли форма траектории точки C механизма нитепротягивателя швейной машины (рис. 8) от угловой скорости кривошипа? От межцентрового расстояния (O_1O_2)? От длины кривошипа (O_1A_1)? От размеров и формы шатуна A_1C_1 ? Ответы необходимо обосновать.
 7. Инженер приезжает поездом на станцию к 8 часам утра. К этому времени за ним приходит машина, на которой он приезжает на завод точно к началу работы. Однажды он прибыл на станцию на час раньше обычного и, не дожидаясь машины, пошел на завод пешком. Машина встретила его в пути и привезла на завод на 10 мин раньше обычного. С какой примерно средней скоростью двигалась автомашина?
 8. Баскетболист бросает мяч в кольцо. Скорость мяча в мо-

мент броска 8 м/с и составляет с горизонтом угол 60° . С какой скоростью мяч попал в кольцо через секунду?

9. Речной трамвай прошел за некоторое время вниз и вверх по Москве-реке равные расстояния. Докажите, повлияло ли течение реки на продолжительность затраченного на это времени.

10. Если путь, пройденный «Луноходом-1» (рис. 11), разделить на промежуток времени, за который «Луноход-1» вернулся в исходную точку, то мы получим его среднюю скорость. Чем определяется разность между средней скоростью «Лунохода-1» и его действительной скоростью?

11. Прямая или обратно пропорциональная зависимость между: перемещением и временем движения при постоянной скорости; временем движения и скоростью тела, если в любом случае оно проходит один и тот же путь; перемещением и скоростью движения тела, если время движения одинаково? Изобразите эти функциональные соответствия, т. е. $s(t)$ при $v = \text{const}$, $t(v)$ при $s = \text{const}$, $s(v)$ при $t = \text{const}$, в виде графиков.

12. Определите скорости поршня кривошипно-шатунного механизма (рис. 15) относительно системы XOY (\vec{v}_B) и $X'A'Y'$ (\vec{v}_B') в моменты времени, когда кривошип OA занимает положения, соответствующие углам 0° , 90° , 180° , 270° . Начало отсчета угла поворота кривошипа — при положении поршня в верхней мертвой точке. (Угловую скорость кривошипа и его длину (OA) считать известной.)

13. Каково взаимное направление векторов скорости и ускорения поршня: в начале движения от верхней мертвой точки; при подходе к нижней мертвой точке; в начале движения от нижней мертвой точки; при подходе к верхней мертвой точке? Можно ли движение поршня считать равноускоренным? Почему?

14. Постройте графики изменения с течением времени расстояния между брошенными одновременно вертикально вверх телами с начальными скоростями $v_{01} = 20$ м/с и $v_{02} = 40$ м/с. Как будут выглядеть графики изменения координаты, скорости и ускорения первого тела относительно второго; второго относительно первого; первого и второго относительно неподвижной системы отсчета?

Приложение I

Механическое движение

Тела

Поступательное

Вращательное

Равномерное

$$\vec{v} = const$$

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$$

$$s_x = v_x t$$

$$x = x_0 + v_x t$$

Равнопеременное

$$\vec{a} = const$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$$

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$$

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$

Пере-
менное

Точки

Прямолинейное

Криволинейное

По окружности

$$\vec{a} \perp \vec{v}$$

$$v = const$$

$$a = const$$

$$v = \omega R$$

$$a = \frac{v^2}{R}$$

По параболе

$$\vec{a} = \vec{g}$$

$$v_x = const$$

$$v_y = v_{0y} - gt$$

$$x = v_x t$$

$$y = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}$$

Колесательное

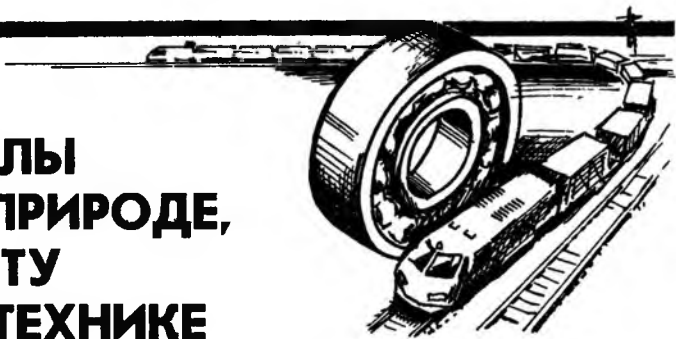
$$\vec{a} \neq const$$

$$x = X_m \cos \omega t$$

$$v_x = \omega X_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$a_x = -\omega^2 X_m \cos(\omega t + \pi)$$

СИЛЫ В ПРИРОДЕ, БЫТУ И ТЕХНИКЕ



ЧТО ЖЕ ТАКОЕ СИЛА!

Сила является одним из фундаментальных понятий механики. Как и очень многое в содержании физики, понятие силы возникло из жизни, хотя между бытовым и физическим понятиями силы есть и сходство и различие.

Дело в том, что в бытовой речи понятие «сила» имеет широкий, весьма различный смысл. С одной стороны, понятием силы характеризуют физические данные человека и животных. Говорят о силачах, каким был, например, быллинный богатырь Илья Муромец; о сильном ударе по мячу на футбольном поле; о сильной лошади как тягаче; о необычайной силе китов. Известен факт, когда 17-метровый кит потопил ударом хвоста рыболовецкую шхуну в Атлантическом океане недалеко от побережья американского штата Массачусетс. В этом случае мы имеем сходство, если не тождественность, между бытовым и физическим понятиями силы.

А вот как А. С. Пушкин в одном из стихотворений использовал понятие силы, противопоставляя его слабости в применении к событиям мира живой природы:

Орел бьет сокола, а сокол бьет гусей;
Страшатся шуки крокодила;
От тигра гибнет волк, а кошка ест мышей.
Всегда имеет верх над слабостью сила.

С другой стороны, в термин «сила» мы часто вкладываем совершенно иной смысл. Говорят, например, о силе воли или характера человека, о силе привычки и даже о силе любви. Отцу русской авиации Н. Е. Жуковскому принадлежат слова: «Человек полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу разума».

Шотландский поэт XVIII в. Роберт Бернс в стихотворении «Золотое кольцо» говорит об электрической силе любви:

Зачем надевают кольцо золотое
 На палец, когда обручаются двое? —
 Меня любопытная дева спросила.
 Не став пред вопросом в тупик,
 Ответил я так собеседнице милой:
 Владеет любовь электрической силой,
 А золото — проводник!

В одном из писем к матери профессор Н. Е. Жуковский выразил свои мысли о первом всемирном воздухоплавательном конгрессе так: «С теоретической стороны конгресс представляет не особенно важную силу».

У В. В. Маяковского в одном из стихотворений есть выражение:

Слово — полководец человеческой силы.

Во всех этих случаях понятие «сила» имеет не физическое, а физиологическое, психологическое, моральное и даже политическое содержание и смысл.

В современной физике термин «сила» в широком смысле соседствует с термином «взаимодействие». В XI классе вам будут известны четыре вида физических взаимодействий:

сильные взаимодействия — взаимодействие между нуклонами — частицами, входящими в состав атомных ядер. Их часто называют ядерными силами;

электромагнитные взаимодействия — взаимодействия между телами и частицами, обладающими электрическими зарядами;

слабые взаимодействия — взаимодействия, определяющие взаимопревращения элементарных частиц;

гравитационные взаимодействия, известные под названием сил всемирного тяготения.

Соотношения сил взаимодействия и пределы расстояний, на которых они проявляются, можно представить следующей таблицей:

Природа взаимодействий	F	Радиус действия
Гравитационные	1	∞
Слабые	10^{25}	10^{-16} м
Электромагнитные	10^{37}	∞
Сильные	10^{39}	10^{-15} м

Заметим, что перечисленные виды взаимодействий никогда не проявляются в природе «в одиночку». Всегда имеет место сочетание тех или иных взаимодействий. Например, между частицами ядра атома — нуклонами — действуют и гравитационные, и электромагнитные, и ядерные силы, хотя и не одинаково интенсивно. Например, сила отталкивания между двумя электронами, обусловленная по закону Кулона взаимодействием их зарядов, в 10^{42} раз больше силы их притяжения, обусловленной законом всемирного тяготения Ньютона.

В механике понятие силы является более ограниченным, чем в физике в целом, где наряду с механическим понятием силы широко используются и другие, не совпадающие с ним по смыслу, например сила тока, электродвижущая сила, сила звука, сила света и др.

В механике сила есть количественная мера взаимодействия тел, причина деформаций тел и ускорений, им сообщаемых.

Деформации тел являются статическим проявлением действий на них внешних сил, ибо в этом случае тела не перемещаются в целом, а лишь изменяют в какой-то мере свою форму и объем, и часть объема — положение в пространстве.

Не следует ошибочно думать, что причиной деформации является смещение молекул тела друг относительно друга. Под действием внешней силы тело деформируется, и вызванное этой силой смещение молекул тела друг относительно друга является лишь молекулярной картиной механического процесса деформации.

Ускорения тел являются динамическим проявлением действующих на них тел. Так как в природе нет абсолютно твердых тел, то деформация имеет место во всех без исключения случаях действия сил, тогда как ускорения — лишь в случаях движения тел под действием сил.

Следствием действия на тело внешней силы является: в макроскопическом плане — изменение формы и размеров тела; в микроскопическом плане — смещение частиц тела (молекул, атомов) друг относительно друга. Без действия на тело внешних сил деформация невозможна. Сила деформирует тело путем смещения его молекул друг относительно друга, причем смещение это может происходить в течение некоторого времени равномерно, без ускорений.

Силы в механике характеризуются рядом признаков. Каждая из сил имеет: соответствующую природу,

точку приложения, направление, модуль, способ воздействия на тело. Складываются силы геометрически. Уже из перечисленных признаков ясно, что сила — это векторная величина.

По своей природе, происхождению или, образно выражаясь, по своей биографии силы в механике делятся на три группы: силы тяготения, силы упругости, силы трения.

При этом последние две группы сил имеют с физической точки зрения единую электромагнитную природу.

Каким же способом могут силы действовать на тело? Механике известны три способа непосредственного действия сил на тело: давление, тяга, удар. Например, книжный шкаф давит на пол, на котором стоит; электровоз тянет поезд; молот производит удар по детали, которую он обрабатывает. Любой из указанных способов воздействия силы на тело может иметь статический или, в дополнение к нему, динамический результат. Кроме того, тела по закону всемирного тяготения притягиваются друг к другу гравитационным полем вне зависимости от того, находятся ли они в соприкосновении друг с другом или на расстоянии друг от друга.

Заметим, что любой результат действия сил на тело — и ускорение, и деформация — не зависит от природы сил, действующих в каждом случае. Но действие силы на тело зависит и от точки приложения силы к нему, и от модуля и направления действующей силы, и от площади тела, на которую она действует.

Например, если на книгу, лежащую на столе, давить карандашом горизонтально (рис. 20) и перпендикулярно к корешку, упираясь на его середину, книга будет двигаться прямолинейно. А если двигать ее, упираясь в один из концов корешка, — она будет поворачиваться.

В литературе по физике иногда утверждается, что «важна не точка приложения силы, а прямая, вдоль которой она действует. Перенос точки приложения силы вдоль линии ее действия ничего не изменяет ни в движении тела, ни в состоянии равновесия».

Такое утверждение справедливо, но лишь в единственном случае, неосуществимом в жизни, — когда мы имеем дело с абсолютно твердыми телами.

В практике, в технике, перенос точки приложения силы часто имеет весьма существенное значение.

Вот пример. Если мы хотим провести по линии железной дороги сверхтяжелый поезд, то нельзя все локомотивы ставить в голову поезда: их совместная сила тя-

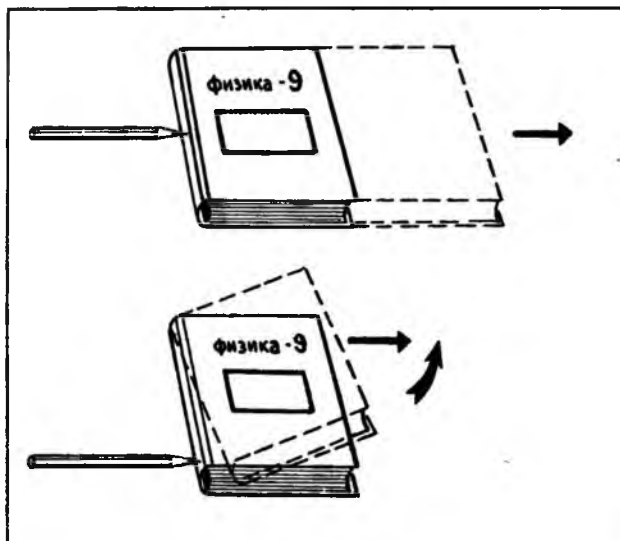


Рис. 20

ги может превзойти предел прочности сцепных приборов локомотивов и вагонов на разрыв.

По правилам технической эксплуатации железных дорог для существующей системы автосцепных приборов суммарная сила тяги локомотивов в голове поезда не должна превышать 930 кН. Если такая сила тяги для движения поезда недостаточна, то необходимое число локомотивов размещают в две-три группы по длине поезда или в его «голове» и в «хвосте». В марте 1980 г. на участке Рязань — Москва Московской железной дороги протяженностью 198 км был проведен поезд массой 10153 т (ок. 100 000 кН). Вели поезд два электровоза ВЛ-10 — один в голове, а другой в хвосте поезда.

20 февраля 1986 г. по Целинной железной дороге от Экибастуза до Целинограда на расстояние 306 км был проведен четырьмя электровозами супертяжеловесный поезд массой 43407 т.

Чтобы каждый из электровозов при движении поезда развивал примерно равную силу тяги и натяжение сцепных приборов нигде не превышало допустимое для существующей конструкции автосцепки, электровозы были размещены по длине поезда приблизительно так: первый — во главе поезда, второй — на расстоянии $1/4$ длины поезда от первого, третий — посередине поезда и последний — на расстоянии $3/4$ длины от головы поезда.

Поезд длиной около 6,5 км вез 440 вагонов с углем. Это был самый тяжеловесный поезд за всю историю развития железнодорожного транспорта на Земле. Такой же порядок размещения локомотивов в тяжеловесных поездах применяется и в зарубежных странах. Так, в 1866 г. в США на участке дороги Моррисвилль — Питсбург был проведен опытный поезд, груженный рудой, массой около 29 тыс. т ($2,84 \cdot 10^5$ кН). Поезд состоял из 8 тепловозов общей мощностью 17 296 кВт, или 23 500 л.с., и 299 вагонов. Три тепловоза находились в голове поезда и пять на расстоянии $2/3$ длины от головы поезда.

Сделаем одно полезное замечание. В случаях наличия в поезде более одного локомотива исключительно важное значение имеет синхронизация, т.е. согласование по времени их действия. Современная радиоэлектроника решает такие задачи успешно.

Для грамотного понимания смысла «силы» следует иметь в виду, что любая сила и в любом случае, образно выражаясь, «имеет два конца», т.е. всегда происходит одновременное действие сил по меньшей мере на два тела. Любая сила, действуя на тело, вызывает обратное или ответное действие сил второго тела на первое. В любом случае под действием сил находятся по меньшей мере два тела, два объекта природы.

Значит, и в природе, и в быту, и в технике всегда имеет место взаимодействие тел.

Талантливый популяризатор физики Я.И. Перельман пишет: «Каждая сила непременно имеет... два конца: один приложен к телу, на которое, мы говорим, сила действует; другой приложен к телу, которое мы называем действующим...»

Конечно, здесь подразумеваются две силы, каждая из которых имеет свою точку приложения и свой объект действия. Но этим ярко выражается та мысль, что в природе не может быть случая, чтобы под действием сил оказалось единственное тело. Тонко понимающий психологию восприятия физических явлений начинающими изучать физику Я.И. Перельман подчеркивает здесь то, о чем часто забывают. Ведь нередко одна из сторон взаимодействия, одна из действующих сил заметна, очевидна, а другая наглядно не проявляется. Действие на одно из взаимодействующих тел наблюдается «весомо, грубо, зримо», а действие на другое тело остается в тени.

Простейший случай: ударом молотка забивается в

доску гвоздь. Действие молотка на гвоздь очевидно, наблюдаемо: гвоздь входит в доску, мы достигаем поставленной цели. А действие гвоздя на молоток уходит из поля зрения как что-то побочное, в чем мы не заинтересованы, не нуждаемся и что зрительно не воспринимается: ведь на молотке даже не заметно следов от гвоздя при этих ударах. Как будто происходит только одностороннее действие, хотя всегда имеет место единство противоположных начал, как и в данном случае.

Еще пример. Предлагается задача: в стене крюк, за который закреплен один конец шнура, а за другой конец через динамометр ученик растягивает шнур силой 20 Н. В другом случае шнур с обеих сторон растягивают два ученика силой 20 Н каждый. Что покажет динамометр в первом и во втором случае?

Частенько отвечают: в первом случае 20 Н, а во втором 40 Н. Стремясь выразить равноценность сил взаимодействия, Я. И. Перельман о силах всемирного тяготения пишет так: «Каждая сила действует непременно между двумя точками, стремясь их сблизить или растолкать. Нет сил притягивающих, сил отталкивающих, а есть силы, стягивающие две точки или расталкивающие их».

Приведенное выражение о силах стягивающих и расталкивающих весьма удачно объясняет физический смысл явлений, оно выразительно утверждает, что во всех случаях проявления сил имеет место взаимодействие по крайней мере двух тел, двух объектов природы.

Интересным свойством сил любой природы является то, что они всегда встречаются по две и притом равны по модулю и противоположны по направлению.

В главе, посвященной основным законам динамики, мы рассмотрим это подробнее.

СИЛА ТЯГОТЕНИЯ, СИЛА ТЯЖЕСТИ, ВЕС

Силы тяготения являются, очевидно, первыми, с которыми мы знакомимся еще с детских лет. В физике их часто называют гравитационными (от лат. *gravitas* — тяжесть).

Значение сил тяготения в природе огромно. Они играют первостепенную роль в образовании планет, в

распределении вещества в глубинах небесных тел, определяют движение звезд, планетных систем и планет, удерживают около планет атмосферу. Без сил тяготения невозможной была бы жизнь и само существование Вселенной, а значит, и нашей Земли.

Сооружая здания и каналы, проникая в глубь Земли или в космическое пространство, конструируя корабль или шагающий экскаватор, добываясь результатов почти в любом виде спорта, человек всюду имеет дело с силой тяготения.

Великие и таинственные силы тяготения были предметом размышления выдающихся умов человечества: от Платона и Аристотеля в древнем мире до ученых эпохи Возрождения Леонардо да Винчи, Коперника, Галилея, Кеплера, от Гука и Ньютона и до нашего современника Эйнштейна.

Закон всемирного тяготения был открыт Исааком Ньютоном и опубликован в его «Математических началах натуральной философии» в 1687 г. Смысл его таков: все тела природы притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Проявление сил тяготения на Земле обычно называют «притяжением тел к Земле», что создает ложное представление об односторонности процесса. Притягивает якобы только Земля, она является активной стороной события, а любое тело на Земле является пассивной жертвой земного притяжения и лишь подчиняется действию Земли. Конечно, и Земля, и любое тело одновременно взаимно стягиваются друг с другом, независимо от огромной разницы в массах падающего тела и Земли. Дело лишь в том, что ускорения, а значит, и пути, проходимые Землей и телом навстречу друг другу, обратно пропорциональны их массам, благодаря чему нам и кажется, что Земля остается на месте, а тело падает на нее. Действительно, если на Землю, масса которой $6 \cdot 10^{24}$ кг, падает камень массой 6 кг с высоты 10 м, то до встречи с ним Земля пройдет расстояние всего в $\frac{10}{10^{24}} = 10^{-23}$ м.

Характеризуя силы тяготения, иногда утверждают, что «гравитационные силы сообщают всем телам одинаковые ускорения, в частности ускорение свободного падения, вызванное земным притяжением, одинаково для всех тел и не зависит ни от их состава, ни от их строе-

ния, ни от массы самих тел»¹. Оценивается это как «необыкновенное свойство гравитационных сил».

Это будет справедливо лишь в том единственном случае, если гравитационное стяжение тела и Земли рассматривать односторонне, как падение тела на Землю, считая последнюю неподвижной, т. е. телом отсчета, и не движущейся навстречу падающему на нее телу. Однако если иметь в виду ускорение, с которым падающее тело и Земля сближаются друг с другом, картина будет иной.

Прежде всего выясним: каким будет ускорение сближения тел, движущихся навстречу друг другу?

Рассмотрим пример. Допустим, два мотоциклиста, находившиеся на расстоянии 40 м, одновременно стали двигаться навстречу друг другу с ускорением 2 м/с² и 3 м/с². Первый мотоциклист пройдет при этом расстояние $s_1 = \frac{a_1 t^2}{2}$ и второй $s_2 = \frac{a_2 t^2}{2}$. Общее расстояние $s = s_1 + s_2 = (a_1 + a_2) \frac{t^2}{2}$. Отсюда ускорение сближения мотоциклистов будет зависеть от суммы ускорений движения

и каждого из них. А время сближения $t = \sqrt{\frac{2s}{a_1 + a_2}}$.

Если на Землю будет падать каменная глыба массой, равной массе Земли, то и Земля и глыба пройдут навстречу друг другу равные расстояния с равным ускорением. Ускорение сближения их при встрече будет равно сумме их ускорений, т. е. удвоенному земному ускорению, или двум g .

Значит, ускорение падения тел на Землю не будет зависеть от масс падающих тел, а ускорение падения Земли на тела будет возрастать с ростом массы падающих на Землю тел, и ускорение сближения падающих тел с Землей будет не постоянным, а возрастающим с ростом масс падающих на Землю тел!

Нередко при изучении сил тяготения возникает вопрос: если взаимное притяжение касается всех без исключения тел природы, то почему тела на Землю падают, а друг к другу не притягиваются? Например, на демонстрационном столе на расстоянии 0,5 м друг от друга стоят амперметр и вольтметр массой по 1 кг. Почему они не сближаются под действием сил тяготения? Для

¹ Григорьев В. И., Мякишев Г. Я. Силы в природе. — М.: Наука, 1977.

простоты представим себе, что они притягиваются только друг к другу.

Ответ прост. Сила их взаимного притяжения ничтожно мала и не в состоянии преодолеть силу трения движения приборов по столу. В законе всемирного тяготения $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$. G называется гравитационной постоянной или постоянной тяготения. Она выражает силу взаимного притяжения между двумя телами массой 1 кг каждое, находящимися на расстоянии 1 м друг от друга. Экспериментально установлено, что она равна всего лишь $6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$. Значит, наши приборы притягиваются друг к другу с силой около трех десятиллиардных долей ньютона ($3 \cdot 10^{-10} \text{Н}$), безусловно недостаточной для их сближения.

В механике при рассмотрении гравитационных сил используются различные понятия, в числе которых сила тяготения, сила тяжести, вес. Каждое из этих понятий отлично от других, и отождествлять их нельзя, хотя нередко и смешивают первое понятие со вторым, а второе с третьим.

Сила тяготения — это сила, стягивающая тела по закону всемирного тяготения.

Сила тяжести — это обусловленная законом всемирного тяготения и суточным вращением Земли сила притяжения тел к Земле.

Вес есть сила, с которой вследствие земного тяготения тело давит на опору или натягивает подвес.

Значит, между силой тяжести и весом тела есть существенная разница: сила тяжести приложена к телу и действует на тело, а вес тела, обусловленный действием на него силы тяжести, приложен к опоре или подвесу и действует на них, а не на само тело.

Для неподвижного по отношению к Земле тела вес по модулю равен силе тяжести. Однако если сила тяжести приложена к телу, то вес тела действует на опору или подвес.

Вследствие суточного вращения и формы Земли, а также неравномерности распределения массы по объему земного шара сила тяжести, как правило, меньше силы тяготения и не совпадает с ней по направлению.

Укажем на одну тонкость, связанную с определением силы тяжести в различных широтах земного шара.

Сила тяготения зависит исключительно от масс взаимодействующих тел и от расстояния между ними (рас-

стояния между центрами масс сферических тел). А сила тяжести может изменяться (а следовательно, и ускорение, ею вызываемое) из-за суточного вращения Земли, и последствия этого — сплюснутости Земли у полюсов.

Сила тяжести определяется с учетом суточного вращения Земли. Но вращающаяся Земля не является инерциальной системой отсчета, поэтому сила тяжести, строго говоря, не характеризует взаимодействие тела и Земли в Ньютонском смысле, и к ней неприменим третий закон Ньютона.

Рассмотрим такой интересный вопрос: всегда ли действует на тело сила тяжести и всегда ли тело весит?

Известно, что сила тяжести работает без отпусков и дней отдыха, непрерывно, и промежутков, перерывов в ее действии на любое тело быть не может. А так как вес тела обусловлен действием на него силы тяжести, то и весит тело, наверное, всегда? Оказывается, нет! Нам уже давно известно, хотя бы из практики экспериментального исследования космоса, понятие невесомости.

Невесомым является любое тело, которое движется только под действием сил всемирного тяготения, говорится в учебнике физики для IX класса. Невесомым по отношению к Земле является любое свободно падающее тело.

Допустим, что мы решили взвесить свободно падающее тело на пружинных или чашечных весах. Но если тело свободно падает, значит, его движение не задерживает ни опора (чаша весов), ни подвес (пружина); т. е. и то и другое падает вместе с ним, с таким же ускорением, как и это взвешиваемое при свободном падении тело. Оно в этом случае «не успевает» ни растянуть подвес, ни оказать давление на опору, которая, выражаясь образно, уходит у него из-под ног. Значит, свободно падающее тело не давит на опору и не растягивает подвес, т. е. не весит, становится невесомым, хотя сила тяготения, действуя на тело, сообщает ему ускорение, равное g .

В космическом корабле, спутнике Земли, царит невесомость, ибо он тоже свободно падает на Землю одновременно с движением по орбите. Однако Луна — тоже спутник Земли, но тела на ней обладают весом «лунным», правда, в 6 раз меньшим, чем на Земле.

В чем здесь дело? Как это объяснить? Объясняется эта парадоксальность явлений так. Когда мы говорим о невесомости, то естественно, что это явление связываем с Землей, ибо в нашем понятии все есть сила, с которой

вследствие земного тяготения тело давит на опору или натягивает подвес. На Луне тоже существует невесомость по отношению к Земле. Но Луна — не космический корабль с массой, измеряемой лишь тысячами килограммов, ничтожной по сравнению, например, с массой Земли. А Луна, как и Земля, сама является значительным источником тяготения. Ведь масса Луны составляет $7,4 \cdot 10^{22}$ кг, т. е. всего лишь в 81 раз меньше массы Земли.

На Луне нет веса, обусловленного притяжением к Земле, но есть свой лунный вес, который обусловлен взаимодействием ее собственной массы с массой любого тела, находящегося на ее поверхности. Луна меньше Земли по размеру, но в еще большей мере меньше по массе. В связи с этим лунный вес тел примерно в 6 раз меньше земного, а ускорение свободного падения на Луне составляет $1,62$ м/с², т. е. также в 6 раз меньше, чем на Земле.

В принципе, на космических кораблях — искусственных спутниках Земли — тоже есть тяготение, обусловленное их массой. Однако оно практически не проявляется и не принимается во внимание, так как неощутимо мало по следующим двум причинам. Во-первых, и это главное, масса любого космического корабля ничтожна по сравнению с массой планет, например Земли. Во-вторых, масса Земли, и тем более центр ее массы, всегда расположена по одну сторону от любого тела, находящегося на Земле или вблизи ее. А космонавты, подвижное оборудование и предметы обихода в кабине космического корабля окружены массой корабля, сосредоточенной в основном в его оболочке и устройствах, смонтированных на стенах кабины. Элементы массы корабля действуют на все находящееся в его кабине со всех сторон. Очень малые силы тяготения, обусловленные массой корабля, взаимно уравнивают друг друга или дают результирующую тяготения, практически близкую к нулю.

Заметим, что уже из формулы, выражающей зависимость сил тяготения от масс тяготеющих тел и расстояния между ними $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$, видна безграничность взаимодействия с любым телом на любом расстоянии. Отсюда ошибочны иногда встречающиеся в литературе выражения такого рода, как «космический корабль вышел из сферы тяготения Земли». Границ этой сферы нет, и выйти из нее невозможно. Очевидно, авторы в таких

случаях имеют в виду, что космический корабль пересек точку пространства, где сила притяжения к Земле была равной, например, силе притяжения к Луне и что теперь космический аппарат, двигаясь по орбите, будет «падать» не на Землю, а на нашего вечного спутника — на Луну.

И еще несколько замечаний о гравитационных силах. Во-первых, они всепроникающи. Можно загородиться от луча света, от шума, от электрического или магнитного поля, от радиоволн. Но нет никаких средств, никакого экрана от сил тяготения. Никакая среда между телами не способна ни усилить, ни ослабить тяготения между ними.

Вам, очевидно, известна фантастическая повесть Герберта Уэллса «Первые люди на Луне». Там средством путешествия на ночное светило оказался изобретенный мистером Кейвором «кейворит», который «заслонял» космический аппарат от действия сил тяготения, что позволило ему добраться до Луны. Но такое возможно лишь в фантастических повествованиях.

Во-вторых, это вопрос об открытии Ньютоном закона всемирного тяготения. Всем известны строки шуточного стихотворения о том, как Исаак Ньютон открыл закон всемирного тяготения: находясь в саду, он увидел, как падает яблоко на землю, и, озаренный этим явлением, якобы мгновенно открыл закон всемирного тяготения:

Сидел в саду сэр Ньютон,
Мышлением окутан.
Вдруг на физические интегралы
Большое яблоко упало.
Ученый муж в одно мгновенье,
Явленьем этим озарен,
Находит мировой закон
О тяготеньи.

В жизни, в истории открытия тяготения все было иначе. До XVII в. все считали, что только Земля обладает исключительным свойством притягивать к себе тела, находящиеся вблизи от ее поверхности.

Однако еще до Ньютона английский ученый Роберт Гук в трактате «Опыт доказательства вращения Земли» четко выразил мысль о том, что все тела тяготеют друг к другу, а в 1679 г. высказал идею, что сила взаимного тяготения тел обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Правда, речь шла о телах небесных.

Исаак Ньютон ряд лет изучал проблему тяготения и лишь в 1686 г. дал четкую, известную нам формулировку закона, опубликованного им в следующем году в знаменитых «Началах». Формула, выражающая закон всемирного тяготения Ньютона, точно описывает взаимодействие точечных тел и сферических тел с массой, равномерно распределенной по объему. В последнем случае мы условно считаем, что массы тел сосредоточены в их геометрических центрах. Эта формула пригодна и для вычисления сил взаимодействия между телами, размеры которых чрезвычайно малы по сравнению с расстояниями между ними, например между космическими телами. Если же тела расположены близко друг от друга и массы тел неравномерно распределены по их объему, то каждое из таких тел рассматривают как систему материальных точек, рассчитывают силы тяготения между парами этих точек, а затем производят их суммирование специальными математическими методами.

Заметим в заключение, что природа сил тяготения еще не открыта и это одна из задач деятельности будущих поколений, в том числе и вашего, юные любители физики.

Наконец, о направлении силы тяжести на Земле.

Направление силы тяжести в любой точке Земли показывает отвес. Из рисунка 21 ясно, что отвесы в раз-

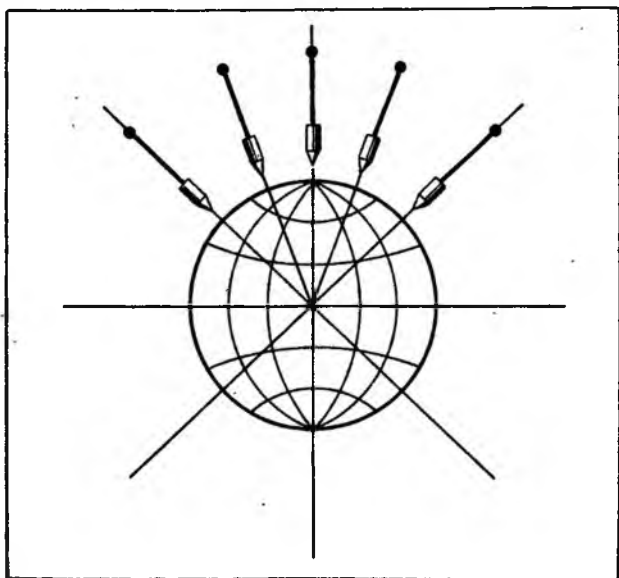


Рис. 21

ных точках земного шара не параллельны друг другу и все они направлены практически к центру Земли. В противоположных точках Земли — на полюсах — они направлены навстречу друг другу.

Ю. И. Соколовский в своей работе приводит пример суждения о земном притяжении одной школьницы: «Если бы Земля вдруг перестала притягивать, то все, живущие на ней внизу и сбоку, обязательно упали бы»¹.

Из предшествующего изложения очевидно, что для сил тяготения на Земле нет, в общепринятом представлении, ни верха, ни низа, ни боков.

И последнее. В механике мы встречаемся с силами разной природы: и с теми, что действуют на всю массу, на весь объем тел. Нетрудно сообразить, что силы тяготения являются силами объемными, в отличие от сил поверхностных, к рассмотрению которых мы и переходим.

СИЛЫ ТРЕНИЯ

С явлением трения мы знакомы с детства. В разных случаях мы говорим: «В походе не натрите ноги»; в школе — «Сотрите с доски записи».

Первые исследования трения были проведены итальянским ученым Леонардо да Винчи более 400 лет тому назад, но результаты его работы не были опубликованы. Законы трения открыли французские ученые Гильом Амонтон (1699 г.) и Шарль Огюстен Кулон (1785 г.).

Трением называется сопротивление соприкасающихся тел движению друг относительно друга. Трением сопровождается каждое механическое движение, и это обстоятельство имеет существенное следствие в современном техническом прогрессе.

Тела, перемещающиеся с трением друг относительно друга, должны **соприкасаться поверхностями** или двигаться одно в среде другого. Движения тел друг относительно друга может и не возникнуть из-за наличия трения, если движущая сила меньше максимальной силы трения покоя.

Сила трения есть сила сопротивления движению соприкасающихся тел друг относительно друга.

Трение объясняется двумя причинами: неровностями

¹ Соколовский Ю. И. Теория относительности в элементарном изложении. — М.: Наука, 1964.

ми трущихся поверхностей тел и молекулярным взаимодействием между ними. Если выйти за пределы механики, то следует сказать, что силы трения имеют электромагнитное происхождение, как и силы упругости, о которых речь пойдет позже. Известны несколько видов трения, в числе которых трение покоя, трение скольжения, трение качения, сопротивление среды. Каждая из указанных выше двух причин трения в разных случаях проявляет себя в разной мере. Например, если соприкасающиеся поверхности твердых трущихся тел имеют значительные неровности, то основная слагаемая в возникающей здесь силе трения будет обусловлена именно данным обстоятельством, т. е. неровностью, шероховатостью поверхностей трущихся тел.

Если соприкасающиеся поверхности твердых трущихся тел отлично отшлифованы и гладки, то основная слагаемая возникающей при этом силы трения будет определяться молекулярным сцеплением между трущимися поверхностями тел.

Трение в жизни человека, в природе, быту и технике выполняет двойственную роль: в одних случаях — положительную, в других — отрицательную. Очень часто трение является полезным, вследствие чего оно широко используется в быту и в технике. Так, именно трение подошв обуви о пол зданий, о дороги и землю обеспечивают возможность передвижения, хождения человека. Трение об опору — землю, дороги, рельсы, движущих колес различных видов транспорта создает возможность движения автомобилей, трамваев, троллейбусов, поездов, самоходных сельскохозяйственных машин и т. д. С помощью трения обеспечивается передача движения в самых различных, так называемых фрикционных устройствах, например в муфтах сцепления автомобилей, тракторов и тепловозов, имеющих механическую силовую передачу от двигателей к движущим осям и колесам. Трение настолько необходимо и мы настолько сжились с ним, что мир без трения показался бы нам просто фантастическим. Напомним, что сила трения скольжения определяется по известной из школьного курса физики формуле

$$F = \mu P,$$

где F — сила трения, μ — коэффициент трения, P — сила давления движущегося тела на опору.

Рассмотрим более детально процесс возникновения сил трения скольжения и покоя на стыке двух соприкасающихся тел. Если посмотреть на поверхности тел под

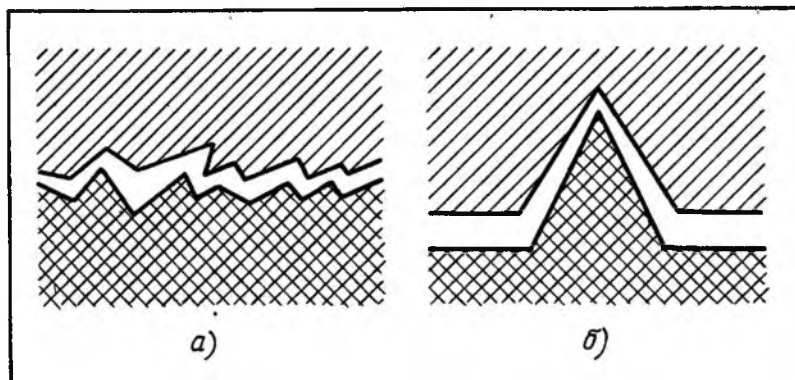


Рис. 22

микроскопом, то будут видны микронеровности, которые мы изобразим в увеличенном виде (рис. 22, а).

Рассмотрим взаимодействие соприкасающихся тел на примере одной пары неровностей (гребень и впадина) (рис. 22, б). В случае, когда сила, пытающаяся вызвать движение, отсутствует, характер взаимодействия на обоих склонах микронеровностей аналогичный. При таком характере взаимодействия все горизонтальные составляющие силы взаимодействия уравниваются друг друга, а все вертикальные просуммируются и составляют силу \vec{N} (реакция опоры) (рис. 23, а).

Иная картина взаимодействия тел получается, когда на одно из тел начинает действовать сила. В этом случае точки контакта будут преимущественно на левых по рисунку «склонах». Первое тело будет давить на второе. Интенсивность этого давления характеризуется силой \vec{R}' . Второе тело в соответствии с третьим законом Ньютона будет действовать на первое тело. Интенсивность этого действия характеризуется силой \vec{R} (реакция опоры). Силу \vec{R} можно разложить на составляющие: силу \vec{N} , направленную перпендикулярно поверхности соприкосновения тел, и силу $\vec{F}_{\text{сш}}$, направленную против действия силы \vec{F} (рис. 23, б).

После рассмотрения взаимодействия тел следует обратить внимание на два момента.

1) При взаимодействии двух тел в соответствии с третьим законом Ньютона возникают две силы \vec{R} и \vec{R}' ; силу \vec{R} для удобства ее учета при решении задач

мы раскладываем на составляющие \vec{N} и $\vec{F}_{\text{сц}}$ ($\vec{F}_{\text{тр}}$ в случае движения).

2) Силы \vec{N} и $\vec{F}_{\text{тр}}$ имеют одну и ту же природу (электромагнитное взаимодействие); иначе и быть не могло, так как это составляющие одной и той же силы \vec{R} .

Весьма важное значение в современной технике для снижения вредного влияния сил трения имеет замена

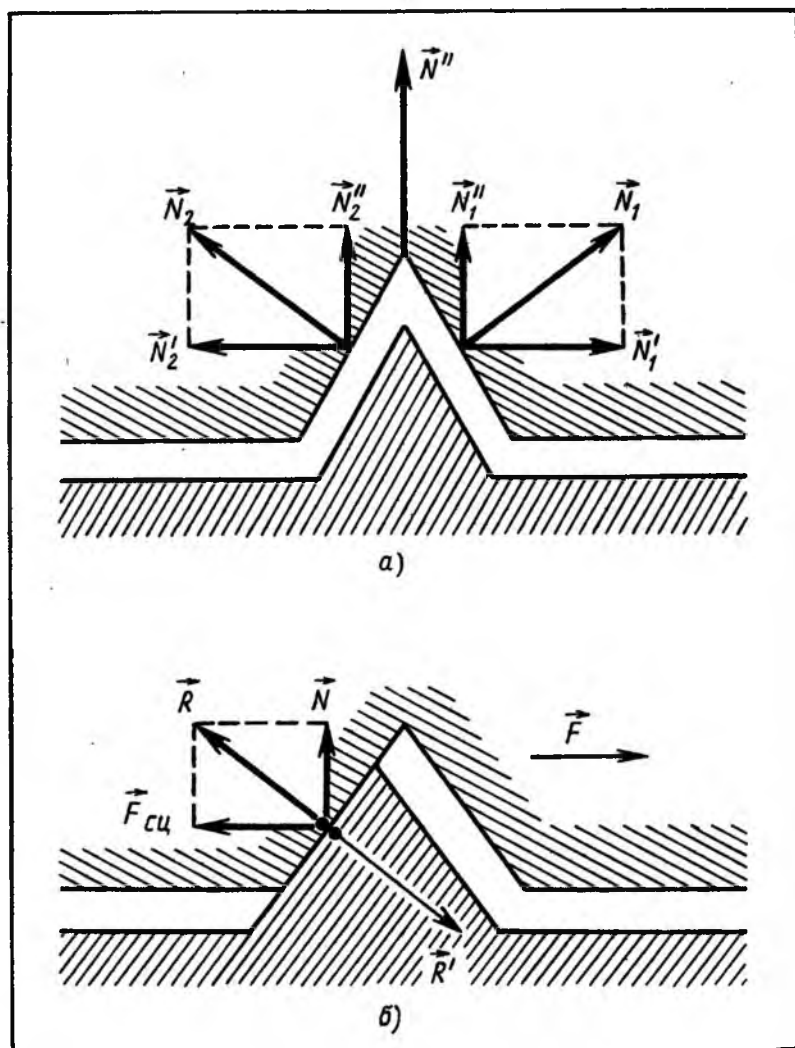


Рис. 23

трения скольжения трением качения. Сила трения качения определяется как сила, необходимая для равномерного прямолинейного качения тела по горизонтальной плоскости. Опытным установлено, что сила трения качения вычисляется по формуле:

$$F = k \frac{P}{R},$$

где F — сила трения качения; k — коэффициент трения качения; P — сила давления катящегося тела на опору и R — радиус катящегося тела.

Из практики очевидно, из формулы ясно, что чем больше радиус катящегося тела, тем меньшее препятствие оказывают ему неровности поверхности опоры.

Заметим, что коэффициент трения качения, в отличие от коэффициента трения скольжения, именованная величина и выражается в единицах длины — метрах.

Заменяется трение скольжения трением качения, в необходимых и возможных случаях, заменой подшипников скольжения на подшипники качения.

ТРЕНИЕ И СИЛА ТЯГИ ЛОКОМОТИВА

Рассмотрим, какую роль выполняет трение в образовании силы тяги локомотивов. Колесная ось электровоза соединена зубчатой передачей с тяговым электродвигателем, который и сообщает ей вращательное движение. Колеса любой оси электровоза опираются на рельсы. Бандажи (ободы) колес соприкасаются с верхними гранями головок рельсов. И поверхность бандажей колес, соприкасающаяся с рельсами, и поверхность рельсов, соприкасающаяся с колесами электровоза, хотя внешне и кажутся гладкими, однако имеют незаметные для глаз шероховатости. Вследствие шероховатости, а также и тесного контакта между колесами и рельсами возникает трение.

Допустим (рис. 24), что колесо электровоза приводится двигателем во вращение по часовой стрелке. Если бы трения между колесом и рельсом не было, тогда колесо вращалось бы на месте, ось электровоза не перемещалась вдоль полотна железной дороги, электровоз не двигался, а буксовал на месте. Буксование происходило бы и в том случае, когда сила, стремящаяся сдвинуть колесо относительно рельса, была бы больше силы трения между колесами и рельсом. Сила, с которой под действием двигателя колесо стремится сместиться отно-

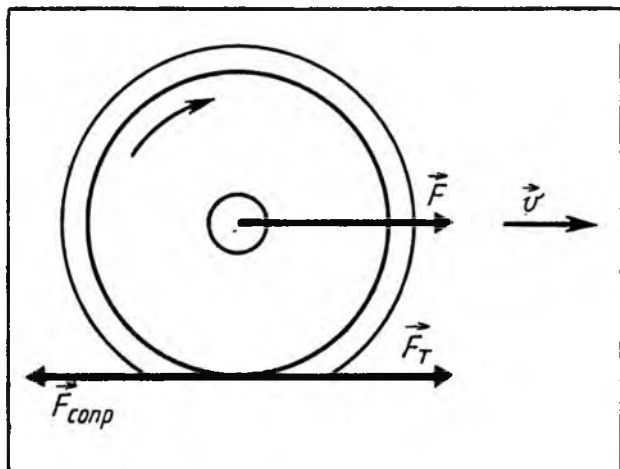


Рис. 24

сительно рельса, будет направлена в данном случае справа налево, т. е. в сторону, противоположную направлению движения тепловоза, а сила трения, препятствующая буксованию колеса, — в направлении движения электровоза.

Если же сила трения не меньше, а равна силе, стремящейся повернуть колесо, то оно будет поворачиваться вокруг неподвижной оси — контакта с рельсом — и двигать тепловоз вперед, т. е. слева направо.

Сила трения движущих колес локомотива с рельсами обуславливает и одновременно ограничивает силы, с которой локомотив может тянуть состав, и называется силой тяги локомотива по сцеплению. Эта сила является одной из важнейших характеристик локомотива и наряду с другими характеристиками задается при его проектировании.

На заре создания локомотивов у конструкторов были сомнения в том, что колеса с гладкими ободами при движении по гладким рельсам будут иметь достаточную силу тяги по сцеплению. Некоторые из них предлагали устанавливать на паровозах зубчатые колеса, соединенные с паровыми машинами, а между гладкими рельсами укладывать зубчатый рельс, сцепляясь с которым паровоз мог бы двигаться и тянуть за собой состав.

Как уже указывалось, сила тяги локомотива по сцеплению ограничивает вес поезда, который может вести локомотив. Но непрерывный рост грузооборота железных дорог приводит к росту веса грузовых поездов. Поэтому конструкторы электровозов и тепловозов стремятся

увеличить силу тяги локомотивов по сцеплению. От чего же она зависит? И наука и практика дают на это четкий ответ: сила тяги локомотива по сцеплению прямо пропорциональна коэффициенту сцепления и сцепному весу локомотива.

Коэффициентом сцепления ψ в технике железнодорожного транспорта называется коэффициент трения колес движущих осей локомотива о рельсы, а сцепным весом \bar{P}_c локомотива — вес его, приходящийся на колеса движущих осей, т. е. вес, испытываемый рельсами от давления на них колес движущих осей локомотива. Движущими осями локомотива называются оси, через которые двигатели приводят локомотив в движение.

У электровозов и тепловозов последних лет выпуска движущими являются все оси локомотивов.

Если силу тяги локомотива по сцеплению обозначить через \vec{F}_c , коэффициент сцепления ψ и сцепной вес локомотива \bar{P}_c , то связь между ними выразится следующей формулой:

$$F_c = \psi P_c$$

Естественно, что и F_c и P_c следует выражать в одних и тех же единицах, например в кН.

Из изложенного ясны и пути увеличения силы тяги локомотивов по сцеплению: следует увеличивать каждый из сомножителей правой части формулы.

А теперь поинтересуемся величинами ψ и P_c .

Прежде всего какой род трения характеризуется коэффициентом сцепления ψ ? В идеальном случае, когда локомотив ведет поезд, между колесами его движущих осей и рельсами должно иметь место трение покоя. Однако практически почти всегда возникает некоторое проскальзывание колеса относительно рельса и путь, проходимый локомотивом за один оборот колеса, оказывается несколько меньшим, чем длина окружности колеса. Разница в обычных условиях составляет миллиметры.

Численное значение коэффициента сцепления как физической величины зависит от ряда условий: например, является ли рельс сухим или влажным, чистым или посыпанным песком; с какой скоростью движется поезд; какова сила давления колеса на рельс и так далее. Рельсы стремятся содержать сухими и чистыми. Грязь и тем более масло заметно снижают коэффициент сцепления. Известен следующий курьезный исторический

факт. Когда в 1851 г. открывалась проездом царского поезда только что отстроенная Октябрьская (тогда Николаевская) железная дорога, не в меру услужливый дорожный мастер покрасил для красоты белой масляной краской рельсы на мосту через реку Веребью. Поезд, войдя на мост, остановился, так как колеса паровоза стали буксовать. Царская свита растерялась. Царь вышел из вагона. Тогда машинист, сообразив, в чем дело, предложил посыпать рельсы песком. Поезд двинулся дальше, а пройдя мост пешком, в поезд сел и испуганный Николай I.

Для повышения коэффициента сцепления рельсы в необходимых случаях — при трогании с места тяжеловесного поезда или при движении по крутым затяжным подъемам — посыпают тонким слоем мелкого, сухого и чистого песка, который подается с локомотива на рельсы пневматически, т.е. сжатым воздухом.

Практически в транспортной технике ψ вычисляется для электровозов и тепловозов при движении по сухим чистым рельсам по такой эмпирической формуле:

$$\psi = 0,25 + \frac{2}{25 + 5v}$$
 где v — числовое значение скорости, выраженной в километрах в час.

Из формулы видно, что при трогании поезда с места по чистым рельсам коэффициент сцепления для электровозов и тепловозов $\psi = 0,33$ и он убывает с ростом скорости движения поезда. Естественно, что ψ как отношение двух сил является отвлеченной величиной, не имеющей наименования.

Как мы уже знаем, для повышения силы тяги по сцеплению существенное значение имеет и сцепной вес локомотива. Он растет вследствие роста мощности локомотивов, так как постановка на них более мощных двигателей, естественно, увеличивает вес локомотивов. Но как же полотно железной дороги выдерживает все возрастающую нагрузку от все более тяжелых локомотивов? Об этом рассказано ранее, где речь шла об организации высокоскоростного движения поездов на железных дорогах. Перечисленные там меры позволили увеличить нагрузку на рельсы с 16 — 18 до 23 т на ось, или, как говорят на транспорте, на колесную пару локомотива.

И еще: магистральные локомотивы конструируют с большим числом движущих осей, например от 6 осей у электровозов серий ВЛ-23 или ЧС-2 до 8 осей у электровозов серий ВЛ-80 и ВЛ-80^г и до 12 осей у тепловозов серий 2ТЭ-109, 2ТЭ-116 и других. Сцепной вес по-

следних серий магистральных тепловозов достигает 252-256 т, а сила тяги по сцеплению при трогании с места до 77500 кгс, или 739,5 кН.

Может возникнуть вопрос: как же локомотив массой 250 т (2450 кН) может двигать состав массой 4000 — 5000 т и более, ведь трение создает сопротивление движению вагонов?

Да, но дело здесь в следующем. Сила тяги локомотива по сцеплению равна, как мы уже знаем, произведению коэффициента сцепления, доходящего до 0,33, на сцепной вес локомотива P_c . Сила сопротивления движению состава при равномерном движении поезда равна силе тяги локомотива, т. е. $F_T = fP$, $f = \frac{F_T}{P}$, где f — коэффициент сопротивления движению состава и P — сила давления состава на рельсы, равная на горизонтальном участке пути весу поезда.

Практикой эксплуатации подвижного состава железных дорог установлено, что коэффициент сопротивления движению поезда, оборудованного осевыми роликоподшипниками, составляет от 0,0025 до 0,003. Отсюда ясно, что вес состава поезда может превышать вес локомотива более чем в 50 раз.

ТОРМОЖЕНИЕ. КАК БЫСТРЕЕ ОСТАНОВИТЬ ЭКСПРЕСС!

Одним из самых распространенных применений сил трения в технике является торможение как различных средств транспорта, так и вообще всех частей машин и станков, имеющих механическое движение, прерываемое остановками.

Особое значение имеет торможение на железнодорожном транспорте, где велики движущиеся массы, значительны скорости и весьма малы коэффициенты сопротивления движению по рельсам.

Во второй главе книги уже рассматривался вопрос о дистанции безопасности, этапах торможения и тормозном пути. Вследствие перечисленных выше особенностей движения тормозные пути на железных дорогах сравнительно велики и составляют от 600 до 1200 м и более.

Для обеспечения своевременных остановок в пределах тормозного пути, поезда оборудуются мощными тор-

мозными средствами, которыми осуществляется механическое, пневматическое, электропневматическое, магниторельсовое и электрическое торможение. Особенно быстрое, а значит, и сильное торможение необходимо в условиях движения с частыми остановками, например для поездов метро и пригородных пассажирских электропоездов.

В практике железнодорожного движения бывают иногда ситуации, требующие экстренной остановки поезда, в связи с чем возникает вопрос: как быстрее остановить поезд, чтобы за время торможения он прошел до остановки наименьшее расстояние?

Представим себе такой случай. По рельсам со скоростью 120 км/ч мчится экспресс. Впереди, на неохраняемом переезде через полотно железной дороги, застрял трактор — у него заглох двигатель. Поезд во избежание аварии надо остановить как можно быстрее. Как машинист должен тормозить, чтобы поезд остановился, пройдя наименьшее расстояние?

Первая мысль — затормозить колеса вагонов поезда так, чтобы тормозные колодки заклинили их и колеса, перестав вращаться, двигались «юзом», скользя по рельсам. Однако прежде чем согласиться с таким решением, надо вспомнить о том, что коэффициент трения, а значит, и сила трения скольжения между трущимися поверхностями, зависит от скорости смещения поверхностей друг относительно друга. В пределах скоростей движения поездов, как это уже было изложено, коэффициент трения несколько снижается с ростом скорости и, наоборот, возрастает со снижением скорости. Если машинист затормозит колеса вагонов так, что они перестанут вращаться, то они начнут скользить по рельсам с большой скоростью, равной скорости поезда, и коэффициент трения, а значит, и сила торможения, не будет максимально возможным. Очевидно, лучше затормозить колеса с силой несколько меньшей той, что вызывает «юз», так, чтобы колеса вращались, имея минимальное проскальзывание по рельсам, т. е. чтобы колесо при каждом обороте проходило по рельсу чуть меньший длины его окружности путь. Так как скорость скольжения колеса по рельсу будет весьма малой, то коэффициент сцепления колеса с рельсом, а значит, и сила торможения, будет наибольшим.

Как показывает опыт, поезд в таком режиме торможения пройдет до остановки расстояние в 3 — 4 раза меньшее, чем при движении колес вагонов «юзом».

«Юз», кроме того, вреден тем, что разрушает бандажи колес и поверхности головки рельсов.

И еще одна деталь. Скорость поезда при торможении непрерывно снижается, и, чтобы в процессе торможения не возникало заклинивания колес, инструкция по торможению поездов предписывает машинистам требование постепенно «отпускать тормоза», т.е. снижать силу нажатия тормозных колодок на колеса поезда со снижением скорости его движения.

ТРЕНИЕ ПРОДОЛЖАЕТ СЛУЖБУ ТЕХНИКЕ

Из многочисленных направлений использования сил трения в технике напомним еще о трех: о передаче движений с помощью трения, об обработке материалов с помощью трения и использовании трения в механических конструкциях и орудиях труда.

Из школьного курса физики всем известны такие виды передачи движений, как зубчатая и фрикционная. К последнему виду передач относится и ременная, ибо она, как и фрикционная, работает с помощью трения.

Фрикционная передача движения осуществляется обычно с помощью двух цилиндрических или конических соприкасающихся катков, один из которых является ведущим, а другой — ведомым. Движение от ведущего к ведомому передается за счет трения между ними. Аналогично передается в автомобилях и автобусах движение от коленчатого вала через муфту сцепления карданному валу.

Ременная передача также осуществляется с помощью трения. Шкив ведущего вала вращается и вследствие трения приводит в движение охватывающий его ремень. Ремень, в свою очередь, вследствие трения вращает шкив ведомого вала. Для снижения проскальзывания ремня относительно шкивов обращенную к ним сторону поверхности ремня периодически натирают канифолью или специальной пастой. С этой же целью используют нажимные устройства для сохранения необходимой силы натяжения и большего охвата им поверхности шкивов, что увеличивает силу трения между ремнем и шкивом. В случаях, когда с помощью ременной передачи надо изменить направление вращения ведомого вала, передачу делают перекрестной.

В литературе указывается, что передаваемая мощность для цилиндрических фрикционных передач не

превышает 20 кВт; для ременных — 50 кВт; КПД фрикционных передач находится в пределах 0,80 — 0,95; ременных — 0,90 — 0,98.

Трение широко используется в технологических процессах при обработке различных материалов.

В числе производственных процессов, использующих трение, можно назвать такие, как прокат металлов, вальцовку, волочение. В связи с тем что трение всегда сопровождается затратой энергии на его преодоление, в трущихся деталях выделяется тепло. На этом основана сварка трением различных металлов. Трение служит искусству. Так, без трения смычка о струны была бы невозможна игра на скрипке или виолончели.

В связи с тем что в результате трения истираются трущиеся поверхности, оно широко используется в процессах заточки инструментов, шлифовки и полировки поверхностей металлов, стекла, алмазов, дерева и других материалов.

Трение выполняет очень важную, хотя и малозаметную, повседневную роль в быту и технике, обеспечивая скрепление различных материалов, деталей инструментов, различных устройств и сооружений. За счет трения между нитями не расплзаются ткани, удерживаются на рукоятках молотки, топоры, лопаты и другие инструменты. Болты с гайками, гвозди, шурупы, клинья скрепляют части конструкций силой трения.

ТРЕНИЕ — ВРАГ ТЕХНИКИ

Старая народная пословица гласит: «Нет худа без добра и добра без худа». Это полностью соответствует и роли трения в природе, быту и технике.

До сих пор мы рассматривали то, что дает нам трение. Давайте взглянем и на то, что оно берет от нас, чем и где трение вредно, какими путями современная техника снижает силы трения в случаях, когда трение для техники — враг.

Как уже отмечалось ранее, обязательным следствием трения являются: а) износ трущихся поверхностей различных деталей машин и сооружений; б) затрата энергии на преодоление сил трения, что снижает КПД машин, станков и других технических устройств.

Вот иллюстрация к этому. Грузовой автомобиль КамАЗ-5320, только что вышедший из ворот завода, весит $6,8 \cdot 10^3$ кгс, или $66,6 \cdot 10^3$ Н. Автомобиль имеет

множество трущихся деталей, в том числе 70 подшипников качения, 35 шестерен, десятки разных втулок. Если за счет истирания от трения рабочих деталей автомобиль потеряет лишь 1 кг своей массы, то он станет негодным. Даже восстановительный ремонт не сможет вернуть его в состояние, годное к эксплуатации. Ежегодно трение автомобильных шин о дороги уничтожает половину мирового производства каучука.

А вот как трение снижает КПД станков и механизмов. Вертикально-отделочный расточный станок типа «269», содержащий в конструкции две ременные передачи, семь плоских зубчатых и восемь конических и червячных передач, имеет КПД около 0,65. Значит, более трети мощности двигателя станка теряется на преодоление вредного трения, сопровождающего работу станка.

Другой пример. В технике не используются из-за низкого КПД, обусловленного трением, полиспасты с числом блоков, превышающим 5 — 6 пар.

Вот почему в развитии современной техники наблюдается стремление избавиться от механического движения, неизбежно сопровождаемого трением, в тех случаях, когда оно является не целью производственного процесса (транспортировка людей и грузов), а лишь средством достижения необходимой цели.

Так, например, в холодильных установках применение движущегося хладагента — фреона-12 — исключается использованием термоэлектрического охлаждения; умформеры заменяются статическими полупроводниковыми преобразователями тока, механические средства обработки металлов резанием заменяются электрическими (электроискровыми, анодно-механическими, электроконтактными, электроимпульсными и т. д.), с чем вы ознакомитесь в школе позже.

Говорят так: отсутствие трения — творчество фантастов; минимальное вредное трение — мечта инженеров. В современной технике для снижения вредного влияния трения на производственные процессы применяются следующие меры: а) для трущихся поверхностей подбираются материалы с низким коэффициентом трения между ними; б) трущиеся поверхности делают гладкими, шлифуя их до зеркального блеска; в) трение скольжения во всех возможных случаях заменяют трением качения; г) во всех необходимых случаях для трущихся деталей используют смазку.

Совокупность перечисленных мер дает существенный результат, поэтому развивается производство раз-

личных подшипников качения: шариковых, роликовых, игольчатых. Создаются эффективные смазочные масла и пасты. Проводятся огромные по объему работы по замене подшипников скольжения на подшипники качения. Заканчивается перевод всего подвижного состава железных дорог — вагонов и локомотивов — на осевые подшипники качения.

Значение этого весьма велико, ибо вследствие своих конструктивных достоинств осевые роликовые подшипники имеют много преимуществ перед подшипниками скольжения. Вот некоторые из них. Применение осевых подшипников качения для железнодорожного подвижного состава дает следующие результаты:

а) Не ухудшает условий движения поезда с места остановки с увеличением продолжительности стоянки поезда.

В подшипниках скольжения с увеличением продолжительности стоянки поезда, вследствие вытекания смазки из зазора подшипник-шейка оси, резко возрастает трение осей в подшипниках. Например, после одной минуты стоянки поезда зимой коэффициент трения в подшипниках скольжения возрастает с 0,004 до 0,008 — 0,015.

Вследствие герметичности конструкции коэффициент трения в роликовых подшипниках совершенно не изменяется в зависимости от длительности стояния поезда.

б) Резко снижает силы трения при трогании поезда с места.

Поезд, оборудованный роликоподшипниками, можно сдвинуть с места силой тяги локомотива в 8 — 10 раз меньшей, чем такой же по весу поезд на подшипниках скольжения. Это обстоятельство имеет первостепенное значение, так как исключает буксование локомотивов при трогании с места со всеми его отрицательными последствиями.

в) Снижает силы трения при развитии скорости и дальнейшем движении поезда.

Это сокращает на 10 — 12% расход топлива и электроэнергии на тягу поездов. После полного перевода всего подвижного состава железных дорог на подшипники качения мы вследствие этого будем иметь ежегодную экономию на тяге поездов более $3 \cdot 10^9$ кВт · ч электроэнергии и до $1,5 \cdot 10^6$ т первоклассного дизельного топлива.

г) Снижает расход смазки для подвижного состава.

Вследствие герметичности букс с подшипниками качения исключается загрязнение и вытекание смазки, что позволяет менять ее не чаще одного раза в год. Роликоподшипники работают на протяжении более 100 тыс. км пути без пополнения смазки.

Опытный электропоезд депо Москва Ярославской железной дороги в течение года прошел 179 000 км без пополнения смазки. При вскрытии букс оказалось, что смазка в них сохранилась полностью, совершенно не изменилась по качеству и вполне пригодна к дальнейшему использованию.

После перевода на роликовые подшипники всего подвижного состава железных дорог ежегодная экономия осевых смазочных масел составит по стране свыше 400 тыс. т.

д) Снижает расход стали на изготовление осей для колесных пар локомотивов и вагонов.

Шейки осей колесных пар локомотивов и вагонов на подшипниках скольжения подвергаются непрерывному износу от трения, оси служат поэтому ограниченный срок и требуют периодической замены.

С роликоподшипниками шейки осей подвижного состава не истираются, так как подшипник «намертво» напрессовывается на шейку оси колесной пары и поверхность внутреннего кольца подшипника не смещается относительно поверхности шейки оси.

е) Повышает безопасность, безаварийность движения поездов.

При использовании роликоподшипников исключается задиры шеек осей и появление рисок, а также самовозгорание смазки.

Четыре состава пассажирских поездов дальнего следования, пройдя за три года по 300 тыс. км, имели лишь два случая нагрева подшипников, и то по причинам, от подшипников не зависевшим. На вагонах пригородных пассажирских электропоездов есть факты безупречной работы роликоподшипников в течение 15 лет с пробегом в 2 млн. км. Минимальный срок службы роликоподшипников — 800 000 км.

Ежегодное число отцепок грузовых вагонов по неисправности букс на роликовых подшипниках в 160 раз меньше, чем на подшипниках скольжения.

ж) Позволяет поднять скорость движения поездов и удлинить участки их безостановочного пробега.

Так, скорости движения пассажирских поездов достигли 160 — 200 км/ч, а протяженность участков безо-

становочного движения грузовых поездов возросла с 80 — 100 до 350 — 400 км.

В дополнение к изложенному, переход на подшипники качения создает ежегодно экономию более 20 тыс. т цветных металлов, необходимых для подшипников скольжения.

Современная отечественная промышленность выпускает ежегодно огромное количество подшипников качения для самых различных целей — от крошечных подшипников диаметром 1,1 мм и массой 0,04 г для часов до подшипников-гигантов диаметром свыше 2,5 м и массой в 125 т для барабанов цементных печей.

В 1985 г. было произведено свыше миллиарда подшипников качения. Это гигантское число не должно удивлять нас. Ведь только для каждого автомобиля КамАЗ-5320 необходимы 116 подшипников 53 типов, а для каждого реактивного авиалайнера Ту-154 — 6800 подшипников 192 типов.

Лауреат Государственной премии Я. В. Марусов сконструировал миниатюрный шарикоподшипник такого размера, что в обычном наперстке их помещается около тысячи.

На подшипниковом заводе № 9 в г. Самаре был собран для шагающего экскаватора опорный роликовый подшипник следующих размеров и массы:

диаметр внешнего кольца — 2,3 м,

диаметр внутреннего кольца — 1,8 м,

масса каждого ролика — 12 кг,

масса подшипника в сборе — 2372,5 кг.

Сквозь такой подшипник свободно проходят автомобили «Жигули» и «Москвич».

Подшипниками качения сейчас оснащают все без исключения транспортные средства, машины, станки и установки, в работе которых имеет место механическое движение.

В тех же случаях, когда движение сопровождается трением скольжения, которое качением заменить невозможно, используется сочетание материалов трущихся поверхностей, которые друг относительно друга имеют малый коэффициент трения. Вот яркий пример.

Для вывозки в зимнее время заготовленной древесины с мест заготовок к станции железных дорог используют так называемые ледянки. Строят их так. Снег на дорогах укатывают, уплотняют, обливают водой. Для полозьев саней вдоль дороги делают колеи. Стальные полозья саней при движении по льду имеют весьма ма-

лый коэффициент трения. Поэтому по лебянкам тракторами вывозят целые поезда леса.

ТРЕНИЕ И ПОКОЙ

В учебнике физики говорится, что сила трения «возникает всякий раз, когда какое-нибудь тело движется относительно другого тела, соприкасаясь с ним».

И мы, рассматривая вопрос о трении, все время связывали его с движением. Из этого кто-нибудь может сделать ошибочный вывод о том, что трения без движения не существует. Однако это не так. Существует трение покоя, то самое, что удерживает гвозди в досках, костыли в шпалах, гайки на болтах, заставляет двигаться кирпичи вверх на наклонной ленте транспортера. Ключи, которыми мы вытаскиваем гвозди из досок, и порождены к жизни существованием сил трения, так же как и разнообразные гаечные ключи и отвертки. При отсутствии трения они были бы не нужны, как, кстати, и гвозди, и шурупы, и болты с гайками.

Когда же возникает между двумя соприкасающимися телами сила трения? В литературе по физике иногда говорится: «Сила трения возникает при непосредственном соприкосновении тел». Заметим, что непосредственное соприкосновение двух тел является только условием, но не причиной возникновения силы трения между ними.

Сила трения возникает лишь тогда, когда начинает действовать сила, стремящаяся сдвинуть или двигать одно из соприкасающихся тел по отношению к другому телу. Допустим, что на столе (рис. 25, а) лежит брусок. Есть ли сила трения между бруском и горизонтальной поверхностью стола, на котором он находится? Очевидно, нет, ибо нет сил, стремящихся сдвинуть брусок в какую-либо сторону. Тому, кто сомневается в этом, можно поставить вопрос: если сила трения здесь есть, то куда она направлена? Ответ на этот вопрос найти нельзя, так как сила трения всегда направлена в сторону, противоположную силе, стремящейся изменить взаимное расположение тел, а здесь такой силы нет.

Теперь сделаем следующее. Возьмем слабую пружину, растянем ее и одним концом сцепим с бортом стола, а другим — с бруском (рис. 25, б). Пружина будет стремиться сжаться, но брусок сдвинуться не может вследствие слабости пружины. Возникает ли теперь сила тре-

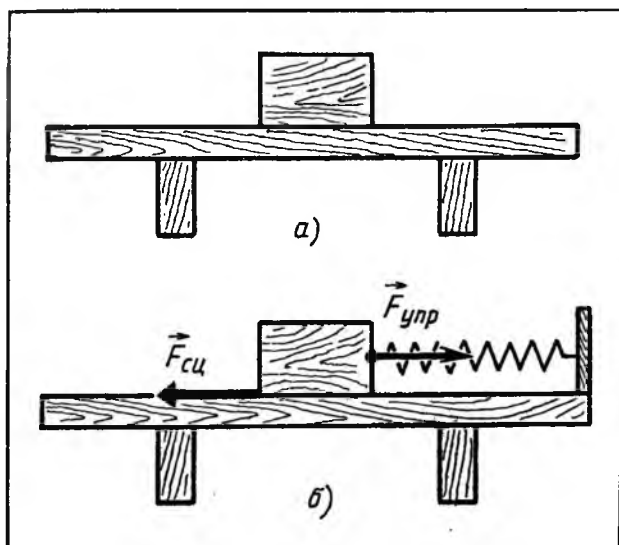


Рис. 25

ния между столом и бруском? Да. Именно сила трения, противодействуя пружине, не дает ей возможности сдвинуть брусок. Значит, сила трения может быть и между телами, покоящимися друг относительно друга. Это сила трения покоя. Можно без пружины, с помощью нити попробовать тянуть брусок по столу. Для того чтобы знать, с какой силой мы действуем на него, к бруску прикрепим динамометр. С увеличением силы тяги будет возрастать и сила трения до тех пор, пока брусок не сдвинется с места и будет двигаться. Наибольшая сила тяги, а значит, и сила трения, в момент начала движения бруска называется максимальной силой трения покоя.

В момент начала движения сила тяги возрастает, так как к силе трения покоя придется добавить силу, способную сообщить бруску ускорение и увеличить его скорость от нуля до какого-то, пусть и небольшого, значения за ничтожный промежуток времени. При дальнейшем равномерном движении бруска потребуется меньшая сила тяги, чем максимальная сила трения покоя; значит, последняя больше силы трения равномерного скольжения одного тела по поверхности другого.

Если движение бруска далее будет равномерным, прямолинейным и горизонтальным, то сила тяги будет равна силе трения скольжения, которая именно таким

образом и определяется опытным путем, например с помощью школьного трибометра.

УГОЛ ТРЕНИЯ

В современной технике имеет существенное значение еще одна физическая величина, имеющая прямое отношение к трению. Это угол трения.

Углом трения называется угол, при котором происходит равномерное скольжение тел по наклонной плоскости. На рисунке 26 угол φ есть угол трения. Если коэффициент трения обозначить μ , то

$$F_{\text{тр}} = \mu N.$$

Но $F_2 = F \cos \varphi$, тогда $F_{\text{тр}} = \mu mg \cos \varphi$, одновременно $F_1 = F \sin \varphi$, а значит, $mg \sin \varphi = \mu mg \cos \varphi$, откуда $\mu = \text{tg} \varphi$, т. е. тангенс угла трения равен коэффициенту трения.

Исходя из значения коэффициента трения, между сыпучими телами и дном платформы автомобиля-самосвала конструктору автомобиля заранее задается максимальный угол подъема платформы автомобиля при разгрузке. При этом учитывается сыпучий материал, имеющий наибольший коэффициент трения с дном платформы самосвала, из тех материалов, для перевозки которых предназначается автомобиль. Максимальный угол подъема платформы всегда несколько превышает угол трения. У некоторых из автомобилей-самосвалов он таков:

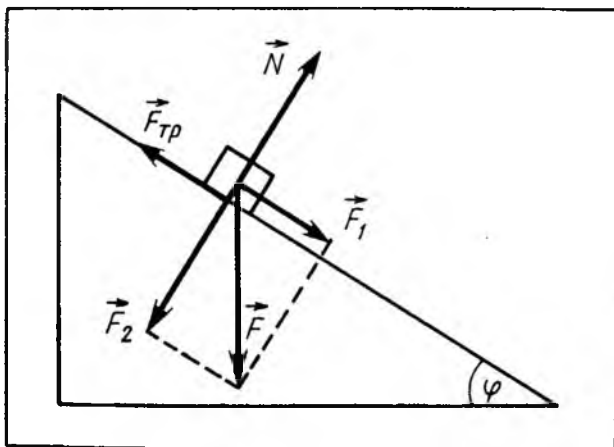


Рис. 26

ЗИЛ 585 — 48°,
ЯАЗ 210Е — 60°,

МАЗ 525 — 55°,
БелАЗ 549 — 55°.

Угол трения учитывается также в установке различных ленточных наклонных транспортеров. Здесь угол подъема ленты транспортера над горизонтом должен быть меньше угла трения, чтобы транспортируемый груз, например зерно, не ссыпался вниз, а двигался по назначению вместе с лентой транспортера.

СИЛЫ УПРУГОСТИ

Силы упругости, как и силы трения, имеют электромагнитную природу, что достаточно объяснено в учебнике по физике IX класса.

Основной вклад в изучение сил упругости сделали английский ученый Роберт Гук и французский ученый Симеон Дени Пуассон.

Как известно, между молекулами в телах существуют силы взаимодействия электромагнитного происхождения, которые наиболее значительны в твердых телах. Силы эти противодействуют изменению расстояний и взаимного расположения молекул в телах, т. е. деформациям, и называются силами упругости. Отметим, что электромагнитной природы сил упругости Гук и Пуассон еще не знали. Силы упругости возрастают с увеличением деформации тел и убывают с ее уменьшением. При увеличении расстояний между молекулами, т. е. при растяжении тела, силы упругости проявляются как силы стяжения между молекулами; при сближении молекул, т. е. при сжатии тела, — как силы расталкивания. На каком-то промежуточном расстоянии силы стяжения и силы расталкивания между молекулами тела становятся равными по модулю, являясь противоположными по направлению действия. Именно на таких расстояниях друг от друга и располагаются молекулы в твердых телах при отсутствии деформации.

Итак, **силами упругости** называются силы, возникающие при деформации тел и направленные в сторону, противоположную направлению действия внешних сил, деформирующих тело.

В некоторых учебных пособиях утверждается, что сила упругости возникает только при соприкосновении взаимодействующих тел. Такое утверждение одно-сторонне.

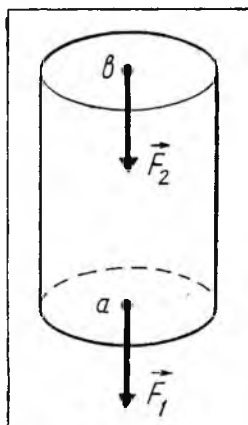


Рис. 27

Представим себе такую ситуацию. На землю свободно падает (рис. 27) вертикально расположенный длинный стержень. Весит ли он в этом случае? Нет, ибо он не растягивает никакого подвеса и не давит ни на какую опору.

Имеет ли стержень в процессе свободного падения соприкосновение с Землей? Ясно, что нет!

А теперь поставим такой вопрос: деформирован ли стержень в процессе падения силой притяжения к Земле или нет?

Если мы признаем, что во Вселенной нет абсолютно твердых тел, то все тела природы всегда деформированы действием на них любых сил, независимо от происхождения и величины последних.

Значит, и стержень при падении тоже деформирован. В самом деле, ведь конец стержня *а* ближе к Земле, чем конец стержня *в*. Значит и сила взаимодействия с Землей у них неодинакова: на конец стержня *а* действует большая по модулю сила притяжения к Земле, чем на конец *в*. А если так, то они растягивают, деформируют стержень. И кстати, чем ближе в процессе падения стержень окажется к Земле, тем большей будет разность сил, действующих на концы стержня, ибо длина стержня будет становиться все большей относительно расстояния между центрами масс концов стержня и центром массы Земли.

Значит, и стержень при падении тоже деформирован. В самом деле, ведь конец стержня *а* ближе к Земле, чем конец стержня *в*. Значит и сила взаимодействия с Землей у них неодинакова: на конец стержня *а* действует большая по модулю сила притяжения к Земле, чем на конец *в*. А если так, то они растягивают, деформируют стержень. И кстати, чем ближе в процессе падения стержень окажется к Земле, тем большей будет разность сил, действующих на концы стержня, ибо длина стержня будет становиться все большей относительно расстояния между центрами масс концов стержня и центром массы Земли.

А если все изложенное справедливо, то в свободно падающем стержне, безусловно, действуют упругие силы, стремящиеся преодолеть деформацию, укоротить стержень, растянутый земным притяжением.

Конечно, деформации падающих на Землю тел весьма малы и незаметны вследствие малости их размеров по сравнению с расстояниями от них до центра Земли, однако они всегда есть. Ведь не отрицаем же мы того, что и муха, совершившая «посадку» на стол, деформирует его: изгибает крышку стола, сжимает его ножки, хотя мы и не считаем ее желанной гостьей не из-за боязни того, что она раздавит стол, а по соображениям гигиены.

Однако нельзя считать незаметной деформацию земного шара, в частности его гидросферы, от действия

на него притяжения Солнца и Луны, выражающуюся в морских и океанских приливах и отливах. Более того, человек уже использует практически энергию приливов и отливов в энергетических целях.

Но разве Земля находится в соприкосновении с нашими дневным и ночным светилами, хотя и деформируется ими?

Конечно, когда мы говорим о состоянии тела до деформации, о «начальном состоянии» тела, мы просто не учитываем того факта, что оно уже деформировано силой тяжести, как и все тела природы. Но эти деформации крайне ничтожны и не всегда оказывают практическое влияние на техническое использование деформаций и упругих сил.

Если под воздействием деформирующей силы деформация тела происходит с постоянной скоростью, то очевидно, что и внешняя, деформирующая, сила, и сила упругости, возникающая при этом в теле, в каждый момент времени равны, хотя и противоположны по направлению, и одновременно растут с увеличением деформации.

Значит, сила упругости тоже пропорциональна деформации тела:

$$F = k\Delta l,$$

где k — коэффициент пропорциональности, именуемый коэффициентом жесткости.

Далее мы покажем, что k будет постоянной для данного материала величиной, определяемой не только свойствами материала, из которого состоит деформируемое тело, но также длиной и площадью поперечного сечения образца.

ДЕФОРМАЦИИ

Силы упругости возникают при деформациях тел, хотя практически не всегда деформации сопровождаются их возникновением. Однако поскольку причинами возникновения в телах сил упругости являются деформации, рассмотрим подробнее вопрос о деформациях.

Термин «деформация» имеет в физике несколько смысловых значений.

Деформация есть процесс изменения формы или объема тела, например растяжение резинового шнура.

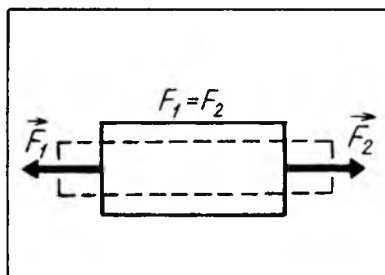


Рис. 28

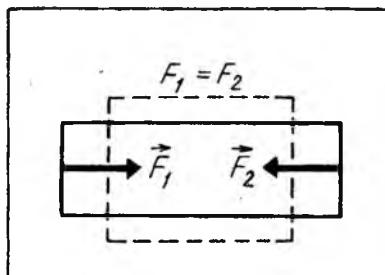


Рис. 29

Деформация есть результат изменения формы или объема тела, например остаточная деформация.

Деформация есть физическая величина, например относительная деформация.

В каждом случае надо четко представлять, какой смысл вкладывается в данный термин.

Возможность и существование деформаций являются следствием того, что в природе нет абсолютно твердых тел и понятие о последних есть лишь идеализация существующего. Существуют два рода деформаций: упругие, когда по прекращении действия на тело деформирующей его силы прежние формы и размеры тела восстанавливаются полностью; неупругие, или остаточные, когда по прекращении действия на тело деформирующей его силы тело остается деформированным.

Существование упругих деформаций является следствием того, что все твердые тела обладают, хотя и в различной мере, способностью восстанавливать свою форму по прекращении действия деформирующих их сил в результате взаимодействий между молекулами данных тел.

В природе, быту и технике мы встречаемся с различными видами деформаций: растяжением, сжатием, изгибом, кручением и сдвигом. При растяжении тело удлиняется под действием деформирующей силы в направлении ее действия, что сопровождается некоторым уменьшением его поперечного сечения (рис. 28). При сжатии тело укорачивается в направлении действия силы и несколько увеличивается в поперечных размерах (рис. 29). При изгибе тело растягивается с выпуклой стороны и сжимается с вогнутой стороны (рис. 30). При кручении тело скручивается и параллельные слои его поворачиваются на определенный угол в одном направлении друг относительно друга (рис. 31). При сдвиге парал-

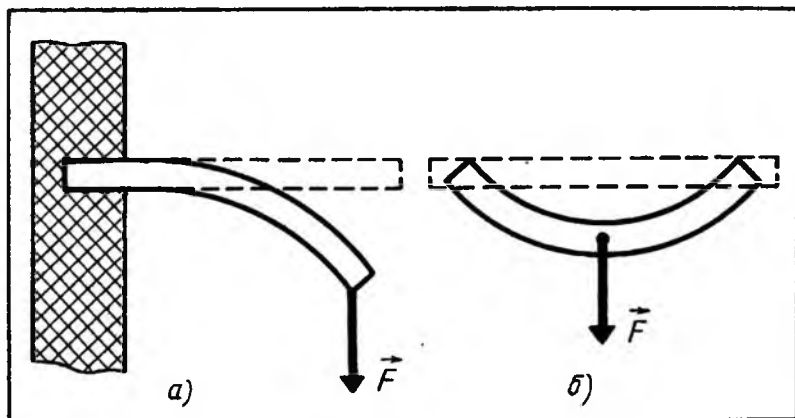


Рис. 30

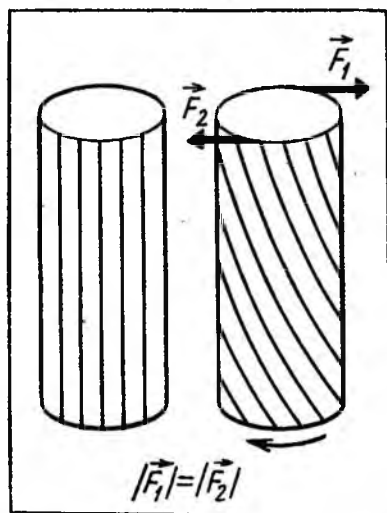


Рис. 31

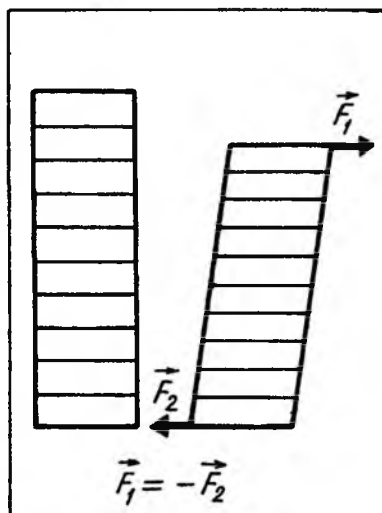


Рис. 32

лельные слои тела смещаются друг относительно друга в одном направлении (рис. 32).

Деформация любого тела может быть различной. Так, резиновый шнур мы можем, растягивая, увели-

чить по длине на $1/4$ начальной длины и даже в 1,5 раза.

От чего же зависит деформация? От действующей силы: чем больше деформирующая тело сила — тем больше деформация. Это легко показать на деформациях растяжения или сжатия резинового шнура или стержня. Но стержень одного качества может иметь различное поперечное сечение, он может быть и тонким, и толстым. Поэтому, чтобы правильно оценивать зависимость деформаций от сил, принято сравнивать с деформацией силы, приходящиеся на единицу площади поперечного сечения растягиваемого или сжимаемого тела. Величину

$\frac{F}{S}$ называют напряжением и обозначают

$$\sigma = \frac{F}{S} \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right].$$

Далее. При деформации растяжения стержня очевидно, что изменяется величина каждой единицы длины стержня. Поэтому легко понять, что при одном и том же напряжении изменение длины стержня будет тем большим, чем большей длины был взят стержень. Отсюда возникает понятие относительного удлинения, т. е. удлинения на каждую единицу начальной длины тела.

Если начальную длину тела обозначить l_0 , длину деформированного тела — l , то абсолютное удлинение $\Delta l = l - l_0$, а относительное удлинение $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0}$.

На основании изложенного для упругой деформации можно сделать вывод, найденный еще в 1660 г. Робертом Гуком:

относительная деформация пропорциональна напряжению:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F}{S},$$

где $\frac{1}{E}$ — коэффициент пропорциональности, в котором E имеет интересный физический смысл и называется модулем Юнга или модулем упругости.

Он характеризует внутреннее строение и состояние вещества.

Например, сильно нагретую медную проволоку равной силой легче растянуть, чем холодную, значит, E может зависеть от температуры тела. Очевидно, изменится E у стального стержня и от намагничивания.

Если мы представим, что $\frac{\Delta l}{l_0} = 1$, т. е. что относи-

тельное удлинение стало равным начальной длине тела, то $l = \frac{F}{ES}$ и $E = \frac{F}{S}$. Значит, модуль упругости равен напряжению, при котором относительное удлинение стало равным начальной длине тела.

Иногда закон Гука формулируют так: «Сила упругости пропорциональна удлинению пружины». Такая формулировка хотя и правильна с физической точки зрения, но нарушает историческую истину.

Роберт Гук своим законом установил не зависимость силы упругости от деформации тела, а зависимость деформации тела от внешней силы, действующей на упругое тело. Это было выражено им в следующей форме: «Величина деформации Δx пропорциональна величине внешнего, вызывающего ее усилия P . Это положение было высказано Hookc'om (1675) в форме «ut tensio, sic vis».

Именно так и определен физический смысл закона в «Кратком политехническом словаре»: «Гука закон — закон, устанавливающий прямую пропорциональность между нагрузкой и вызванной ею деформацией». «По закону, установленному Гуком, величина деформации Δl пропорциональна действующей силе F ».

Заметим, что измерить E непосредственно через удвоение длины тела практически невозможно, ибо при любом материале, за исключением резины, тело разорвется ранее удвоения его длины. Как же тогда быть? Просто вычислить E по формуле $E = \frac{Fl_0}{\Delta l S}$, используя даже малое относительное удлинение тела. Если заменить в последней формуле $\frac{l_0}{\Delta l}$ на $\frac{1}{\alpha}$ и $\frac{F}{S}$ на σ , то формула примет такой вид: $E = \frac{\sigma}{\alpha}$, т. е. модуль упругости равен отношению напряжения к относительному удлинению тела.

Если мы теперь вернемся к формуле, выражающей закон Гука, и получим из нее значение F , $\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F}{S}$, будем иметь следующее соотношение: $F = \frac{ES}{l_0} \Delta l$.

А так как $F_{\text{упр}} = -\vec{F}$, то $k = \frac{ES}{l_0}$. Значит, как уже указывалось, для каждого случая k будет постоянной величиной, независимой от приложенных к телу сил и определяемой только свойствами материала, из которого состоит тело.

На практике, например в строительстве, взяв из таблиц значение E , определяют, какого сечения необходимо взять балку, стержень или трос, чтобы он выдержал то или иное растягивающее его усилие.

Например, зная вес кабины лифта, определяют через модуль упругости сечение подъемного троса, учитывая необходимый запас прочности. Или, зная общую максимально допустимую силу тяги локомотивов во главе поезда, используя модуль упругости стали, из которой изготавливаются сцепные приборы подвижного состава железных дорог, вычисляют с учетом запаса прочности сечения элементов автосцепки. Правда, в этом случае учитывается и сопротивление материала на сжатие, так как автосцепка является ударно-тяговым устройством, заменившим собою существовавшие ранее и винтовую сцепку, и буфера подвижного состава дорог.

Мы уже дважды использовали здесь выражение «запас прочности». Что оно означает?

Наибольшее напряжение, которое устойчиво выдерживает материал на деформацию данного вида (например, растяжение или сжатие), проявляя долговечность в работе, называется **допускаемым напряжением**.

Напряжение наименьшее, при котором наступает разрыв или разрушение тела, называется **разрушающим напряжением**.

Отношение разрушающего напряжения к допускаемому и называется **запасом прочности**.

В науке, именуемой сопротивлением материалов, определены значения допускаемых и разрушающих напряжений для существующих и используемых в различных областях техники материалов.

Заметим в заключение, что деформируются всегда и деформируемое тело, и деформирующее тело, хотя часто не в одинаковой степени, в зависимости от состава структуры и состояния материалов, из которых они состоят.

СИЛА УПРУГОСТИ И ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНИКЕ

Рассмотрим теперь, какое значение в современной технике имеют силы упругости и упругие деформации. Значение их весьма велико. В расчете именно на упругие свойства материалов, а соответственно, и упругие деформации при работе рассчитываются самые разнообразные инструменты, детали любой машины и все технические сооружения.

Любой инструмент — будь то молоток, зубило, гаечный ключ, клещи, ножницы, плоскогубцы, отвертка, стамеска — испытывает при работе различные виды деформации: растяжение или сжатие, изгиб, кручение или сдвиг, а отвертка при работе испытывает одновременно деформации сжатия и кручения; клещи — растяжение и изгиб; зубило — сжатие и сдвиг; всякое движение с трением создает сдвиг.

Разве какой-либо из перечисленных инструментов мог годиться для работы, если бы после каждого случая использования он сохранял приобретенную при этом деформацию? В таком случае любой инструмент выходил бы из строя буквально за считанные минуты работы.

Правда, поскольку в природе нет абсолютно упругих материалов, т. е. таких, которые не имели бы остаточных деформаций независимо от действующих на них сил, любой инструмент со временем несколько деформируется: расплющивается пятка молотка, тупится зубило, искривляется лезвие отвертки и т. д.

Однако все инструменты при изготовлении рассчитываются на упругие деформации, исходя из чего выбирается и обрабатывается материал для них. Инструменты поэтому сохраняют рабочее состояние в течение сравнительно долгого времени, ибо остаточные деформации у них весьма малы и накапливаются лишь за большой срок их использования.

Так же обстоит дело с рабочими инструментами станков, например с фрезами, сверлами, резцами и со всеми элементами конструкций различных машин. В производственных процессах они также подвергаются разным деформациям, но служат человеку долго вследствие того, что эти деформации являются упругими.

Представим себе такое сооружение, как мост через реку на автостраде или на линии железной дороги. Если бы деформации сжатия и изгиба, приобретенные фермой моста во время прохождения по нему поезда, сохранились и после этого, то при прохождении второго поезда они возросли бы, и так после каждого поезда — пока мост не рухнул бы. Естественно, что все элементы конструкции моста при его сооружении рассчитываются на упругие деформации.

То же можно сказать о рельсах на линии железной дороги. При движении поезда рельсы сжимаются и прогибаются, а по миновании напряжения возвращаются практически к прежнему состоянию.

Однако из всего вышеизложенного об упругих де-

формациях не следует делать ошибочного вывода о том, что технике необходимы и полезны только упругие деформации и что, наоборот, деформации неупругие, пластичные и остаточные, назовите их так или иначе, технике вредны или не используются ею.

Современное производство, техника широко использует и остаточные деформации. Именно такого рода деформации и необходимы в большом разнообразии производственных процессов.

Представьте себе, что вы находитесь в кузнечно-прессовом цехе. Перед вами «падающая масса» мощного парового молота обрушивается ударами на раскаленную докрасна болванку и у вас на глазах превращает ее в вал — элемент силовой конструкции тепловоза. Что произошло бы, если бы после каждого удара молотом болванка опять приобретала прежнюю форму? Тогда молот был бы бесполезен иковка как производственный процесс была бы невозможна.

То же можно сказать и о большом числе других производственных процессов, основанных на явлениях остаточной деформации. Например, о таких процессах, как штамповка, чеканка, формовка, прокатка, клепка, волочение, гнутье, кручение, лепка и многие другие.

И наконец, последнее. По отношению к деформации все твердые тела делят на три группы: вязкие, хрупкие, пластичные.

Вязкими называют вещества, у которых при росте напряжения резко выражена область прямо пропорциональной зависимости деформации от напряжения.

Хрупкими называют вещества, у которых при росте напряжения сразу же за коротким участком пропорциональности между напряжением и деформацией наступает разрушение.

Пластичными называют вещества, у которых упругие деформации вообще практически отсутствуют.

В заключение главы о силах приведем небольшую таблицу сравнительных характеристик механических сил различной природы.

	Силы тяготения	Силы упругости	Силы трения
Физическая природа	Гравитационные	Электромагнитные	Электромагнитные
Отношение к взаимному перемещению тел	Содействуют	Противодействуют	Противодействуют

	Силы тяготения	Силы упругости	Силы трения
Действуют между телами	На расстоянии при соприкосновении	При соприкосновении	При соприкосновении
Непрерывность действия	Непрерывны	В определенных условиях	В определенных условиях
Зависимость от относительной скорости	Не зависят	Не зависят	Зависят
Направление действия	Через центры масс	Нормально к поверхности взаимодействия тел	Вдоль поверхностей соприкосновения
Поверхностные или объемные	Объемные	Объемные	Поверхностные

15. Какое давление производит на грунт фундамент Останкинской телебашни, если вес сооружения 588 000 кН, а опорная площадь фундамента 2037 м²?

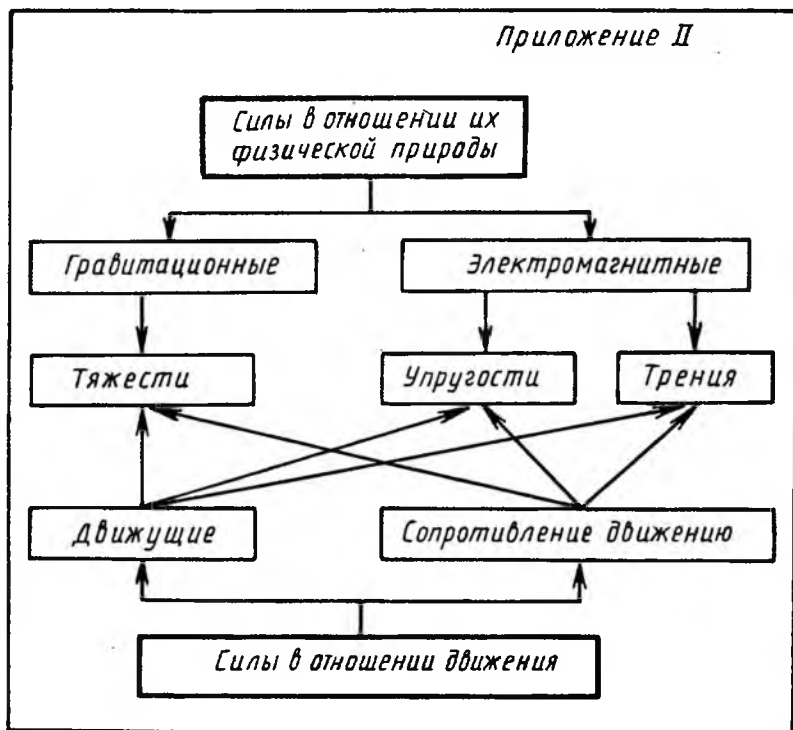
16. Атмосферное давление обусловлено весом воздуха. Как же обеспечивается нормальное давление в кабине космического корабля — спутника Земли, если воздух в кабине невесом?

17. Какого наименьшего радиуса поворот может сделать автомобиль, движущийся со скоростью 60 км/ч, при коэффициенте трения скольжения колес о дорогу, равном 0,3?

18. Электропоезд состоит из 9 вагонов, среди которых второй, пятый и восьмой являются моторными. Между какими из вагонов при движении поезда от остановки сцепные приборы работают на сжатие и между какими на растяжение? При каких условиях в таком движении сцепные приборы между некоторыми вагонами могут не испытывать деформации?

19. Машинист маневрового тепловоза выключил двигатели, подъезжая к составу, на расстоянии 16 м от него. Какова была скорость тепловоза в этот момент, если при столкновении с составом она снизилась до 0,2 м/с? Коэффициент трения считать равным 0,01.

Приложение II





ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ

ИГРА НА КРАЙНОСТЯХ. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ И СИЛЫ. КАКОВА СВЯЗЬ МЕЖДУ НИМИ!

Древнегреческий ученый Аристотель в своих многочисленных научных трактатах изложил взгляды на сущность механического движения. На основании наблюдений, систематизации и критической оценки естественнонаучных знаний своих предшественников и современников сформулировал он положения, смысл которых таков: а) без силы нет движения; б) чем больше действующая на тело сила, тем больше скорость его движения.

Можно было бы и не обращаться к этим утверждениям, тем более что их автор жил более 2300 лет тому назад. Но ведь и сегодня до изучения физики в школе эти утверждения не вызывают у нас сомнения.

Мальчик едет на велосипеде. Пока он вращает ногами педали — велосипед движется. Как только он прекращает работать ногами — велосипед постепенно останавливается. Водитель движущегося автомобиля выключает двигатель — автомобиль вскоре останавливается.

Как образно выразился один из авторов, все мы до изучения физики — маленькие аристотели.

В самом деле, на строительной площадке покоится тяжелая железобетонная колонна. Пока подъемный кран не начнет ее поднимать, она неподвижна. В школьных мастерских на стеллажах лежат инструменты. В зависимости от вида обработки вы выбираете необходимый инструмент и сообщаете ему соответствующее движение. Закончив данную технологическую операцию, вы кладе-

те инструмент на место, и он будет лежать, пока кто-то снова не возьмет и не сообщит ему движение.

При уборке классной комнаты вы переставляете стулья, ведро с водой, сообщаете швабре с тряпкой возвратно-поступательные движения. Все перечисленные предметы начинают двигаться относительно покоящихся объектов только тогда, когда вы на них воздействуете. Разве не то же самое утверждал Аристотель?

А разве не подтверждается наблюдениями второе высказывание Аристотеля? Опускающийся парашют с грузом будет иметь разную скорость в зависимости от массы груза. Более тяжелый груз на этом же парашюте будет опускаться быстрее. Это утверждение очевидное и не противоречит «здравому смыслу». Стоит ли сомневаться? Да, если это сомнение направлено на поиск истины. Формула «подвергай все сомнению» не предполагает сделать из каждого человека «Фому неверующего». Эта формула предусматривает необходимость не принимать на веру различные высказывания и положения. Она призывает вырабатывать привычку, не запоминать механически изучаемое, а осознанно осмысливать его, убеждая себя в его истинности. А если человек будет убеждать себя, то, выдвигая контрдоводы, он будет стараться их опровергнуть. Так новые знания становятся достоянием человека, его убеждениями!

Первым, кто усомнился в истинности утверждений Аристотеля, был Галилео Галилей. Следуя его рассуждениям, «поиграем на крайностях».

Пусть шар скатывается с наклонной плоскости под действием силы тяжести и продолжает движение по горизонтальной плоскости. В зависимости от степени шероховатости горизонтальной плоскости продолжительность движения шара будет изменяться. Шар будет двигаться тем дальше, чем более гладкой будет плоскость.

«Вдаваясь в крайность», предположим, что плоскость можно сделать идеально гладкой и безграничной. Тогда движение шара по ней будет бесконечно долгим. Но ведь в направлении движения по идеально гладкой горизонтальной поверхности никакие силы не действуют! Таким образом, первое положение Аристотеля оказывается неверным.

Галилей на основе физических опытов и выводов из них впервые в физике в 1632 г. открыл инертность как свойство физических тел, т. е. способность их сохранять состояние покоя или движения без действия на них внешних сил.

В высказывание Аристотеля «без силы нет движения», кроме понятия движения, входит понятие силы. Ответ на поставленный вопрос становится очевидным, когда мы приходим к выводу, что Аристотель учитывал действие на тело только сил движущих и не учитывал сил сопротивления.

Усомнимся в истинности второго тезиса Аристотеля. Теперь доказать его несостоятельность довольно легко. Однако до Галилея этого никто не сделал, а родоначальнику экспериментальной физики, как гласит легенда, пришлось неоднократно подниматься с шарами на Пизанскую башню, оставляя у ее подножия своих учеников. Их заключение о том, что и тяжелые и легкие шары падают одновременно, он тоже неоднократно проверял и убеждался в правильности результатов.

Что заставило Галилея проверять, казалось бы, очевидное утверждение Аристотеля? Ведь действительно, чем с большей силой мы будем действовать на тележку, тем большую скорость мы ей сообщим. А разве наблюдения не подтверждают тот факт, что воздушный шарик опускается медленней, чем шар металлический? Значит, тяжелые тела падают быстрее легких!

А Галилей рассуждал так: более тяжелое тело падает быстрее легкого, а что будет, если их соединить? Тогда легкое будет тормозить тяжелое, а тяжелое ускорять легкое, и вместе они должны падать с промежуточной скоростью. Однако два тела вместе составят третье, которое будет тяжелее каждого из них. Значит, оно должно падать со скоростью большей, чем скорость и первого и второго тела. Получены выводы, взаимно исключающие друг друга. Галилей вынужден был поставить эксперимент. Результат был неожиданным: тяжелые и легкие шары падали одновременно. Простой и эффектный опыт с трубкой Ньютона, продемонстрированный учителем на уроке, достаточно красноречив: и дробинка, и пробка, и птичье перышко при отсутствии сил сопротивления воздуха падают в трубке одновременно.

Законы свободного падения тел, т. е. движения тел из состояния покоя под действием силы тяжести, были установлены Галилеем экспериментально. В его распоряжении не было установок, позволяющих создавать вакуум и исключать влияние силы сопротивления воздуха. Необходимо было подбирать тела таких размеров и форм, чтобы влияние силы сопротивления было незначительным, а «вдаваясь в крайность», делать выводы для случаев, когда сила сопротивления отсутствует вообще.

Итак, если сопротивление воздуха отсутствует, то:

а) тела, одновременно начавшие падать с одной и той же высоты, одновременно и приземляются;

б) скорость тел по мере их падения непрерывно возрастает, так что в каждый момент времени их скорости равны;

в) увеличение скорости каждого тела за единицу времени происходит на одно и то же значение, т. е. тела падают с одинаковыми ускорениями.

Таким образом, если Аристотель не учитывал действие на движущееся тело сил сопротивления независимо от этих сил, то Галилей изучал движение тел при условии, что силы сопротивления по сравнению с движущими пренебрежимо малы.

На основе многочисленных опытов Галилея установлены следующие законы свободного падения тел:

1. Свободное падение тел есть движение тел из состояния покоя под действием силы тяжести.

2. Свободное падение тел есть равноускоренное движение. Ускорение свободного падения равно $9,8 \text{ м/с}^2$.

3. Путь, проходимый свободно падающим телом в первую секунду падения, численно равен половине ускорения.

4. Скорость свободно падающего тела пропорциональна времени падения.

5. Пути, проходимые свободно падающим телом, пропорциональны квадратам времени падения.

6. Пути, проходимые свободно падающим телом в последовательные равные промежутки времени, пропорциональны ряду последовательных нечетных чисел.

Позже было установлено значение нормального ускорения свободного падения $9,80665 \text{ м/с}$ и то, что ускорение зависит от географической широты места на Земле и от неравномерного распределения массы в объеме земного шара.

Первым, кто поставил и решил задачу о движении тела под действием всех сил (движущих и сил сопротивления), был Исаак Ньютон.

Ньютон, систематизировав научные знания своих предшественников и современников, в том числе Галилея, Декарта и других, ввел понятие массы тела, создал новый математический аппарат (дифференциальное и интегральное исчисления), провел многочисленные опыты и вычисления и сформулировал знаменитые законы движения, опубликованные им в 1687 г. в работе «Математические начала натуральной философии».

2000 ЛЕТ СПУСТЯ...

Из трех законов движения первым является закон инерции, который Ньютон сформулировал так: «Любое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока не принуждается приложенными силами изменить это состояние».

При этом безразлично, отсутствовали внешние силы, действующие на тело, ранее или они были, но их равнодействующая равнялась нулю. Заметим, что при таких же условиях тело может равномерно вращаться вокруг любой из возможных осей.

Иногда в сознании изучающих механику смешиваются два понятия: инертность и инерция. Но они различны. **Инертность** есть всеобщее свойство физических тел сохранять покой, равномерное прямолинейное движение или вращение вокруг любой из свободных осей. А **инерция** — есть явление сохранения скорости движения тела после прекращения действия на него движущих сил, т. е. проявление инертности как свойства физических тел.

И еще. Нередко на вопрос: «Приведите примеры движения по инерции» — учащийся говорит: «Движение автомобиля перед остановкой с выключенным двигателем». Это неверно, ибо движение по инерции есть равномерное, а не замедленное движение. В данном случае происходит движение вследствие инертности и действия сил сопротивления движению, а не по инерции.

Движением по инерции можно назвать любое равномерное прямолинейное движение, например движение того же автомобиля с постоянной скоростью. Ибо в этом случае равнодействующая всех сил, действующих на него, равна нулю: сила тяги двигателя равна силам сопротивления движению, а сила тяжести — силе реакции дороги как опоры.

Перейдем ко второму закону Ньютона.

Скорость пропорциональна приложенной силе (Аристотель).

Ускорение пропорционально приложенной силе (Ньютон).

Сами по себе высказывания, сформулированные великими мыслителями с интервалом времени порядка 2000 лет, соответствуют реальной действительности. Но научная ценность этих высказываний различна. Зависимость между силой и ускорением прямо пропорциональная.

Связь же между силой и скоростью очень сложная. В самом деле, при действии сил сопротивления, но без учета их изменения, имеем:

1) чем больше движущая сила, тем больше скорость движения тела;

2) при неизменной движущей силе скорость тела возрастает с течением времени;

3) при возрастании движущей силы скорость растет не беспрельдно, наступает установившееся движение, т. е. движение с постоянной скоростью;

4) при постоянной движущей силе скорость также растет до некоторого момента времени, а в дальнейшем остается неизменной, хотя сила по-прежнему действует.

Количество пунктов увеличится, если рассматривать движение другого тела под действием этих же сил.

Вот почему закон движения Ньютона представляет большую научную ценность:

1) ускорение одного и того же тела прямо пропорционально равнодействующей всех сил, к нему приложенных;

2) ускорения разных тел под действием одной и той же равнодействующей обратно пропорциональны массам этих тел.

Математически обе закономерности записываются

так: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

По выражению выдающегося физика XX в. Альберта Эйнштейна, «это — фундамент всей механики и, пожалуй, всей теоретической физики».

Со времени установления Ньютоном основного закона движения (закона пропорциональности силы и ускорения) прошло почти три столетия. За это время закон множество раз проверялся в различных условиях, и всякий раз полученные результаты подтверждали его истинность.

С учетом второго закона Ньютона проектировались и создавались самые разнообразные механизмы и машины, различные механические устройства и сооружения, велись расчеты движения земных и небесных объектов.

Работоспособность созданных технических устройств, соответствие реальных движений расчетным — убедительное, яркое подтверждение правильности и значимости второго закона Ньютона. И сегодня второй закон Ньютона находит применение при проектировании и создании самых современных, самых новейших механических систем. И все же, сколь ни широка область

применения при проектировании и создании механических систем закона движения Ньютона, применимость его имеет границы.

В начале XX в. Альберт Эйнштейн, столь высоко ценивший закон движения Ньютона, своей гениальной мыслью «прикоснулся» к формуле $\vec{F} = m\vec{a}$. В результате этого «прикосновения» выяснилось, что масса тела, являющаяся мерой его инертных свойств, не является постоянной, а возрастает с ростом скорости. Правда, это изменение массы становится существенным при скоростях движения, близких к скорости света. Это означает, что одна и та же сила одному и тому же телу сообщает разные ускорения в зависимости от того, с какой скоростью это тело движется. В ускорителях элементарные частицы разгоняются до таких скоростей, когда возрастание их масс нельзя не учитывать.

И все же область применения закона движения Ньютона огромна. Это становится очевидным, если учесть, что даже вторая космическая скорость (11,2 км/с) является «маленькой» скоростью по сравнению со скоростью света и возрастание массы при такой скорости является настолько ничтожным, что практически в расчетах движения космических объектов не учитывается.

МОЖНО ЛИ РАЗДЕЛИТЬ НЕРАЗДЕЛИМОЕ!

Сэр Исаак Ньютон «почти божественной силой своего ума», как написано на его могильной плите в Вестминстерском аббатстве в Лондоне, в своей знаменитой книге «Математические начала натуральной философии» сформулировал основные законы механики: закон инерции, закон пропорциональности силы и ускорения, закон равенства действия и противодействия.

В такой последовательности один за другим эти законы и изучаются в школьном курсе физики. Если глубоко и всесторонне проанализировать физическую ситуацию, осмыслить содержание каждого из трех законов, то можно прийти к выводу об их нераздельности.

В самом деле, закон движения $\vec{F} = m\vec{a}$ выполняется относительно инерциальных систем отсчета, существование которых следует из закона инерции. Без знания и понимания третьего закона Ньютона невозможно раскрыть содержание левой части равенства, выражающего второй закон.

Таким образом, три закона Ньютона составляют основу механики и в этом смысле являются неразделимыми.

Велосипедист после разгона движется накатом. При этом говорят, что он движется вследствие инертности. Является ли эта ситуация подтверждением первого закона Ньютона? Да! А второго? Да! А третьего? Да!

В самом деле, при достижении определенной скорости велосипедист перестает крутить педали. Эта скорость при отсутствии воздействия со стороны других тел сохранялась бы, т. е. велосипедист двигался бы с постоянной скоростью в соответствии с первым законом Ньютона.

Однако силы, действующие на велосипед и велосипедиста в это время, не уравниваются. И сила сопротивления воздуха, и сила трения об асфальт направлены в сторону, противоположную движению, вследствие чего скорость уменьшается с течением времени в строгом соответствии со вторым законом Ньютона. Ну, а где же иллюстрация третьего закона? Третий закон мы уже использовали, рассматривая взаимодействие велосипедиста с воздухом и с покрытием дороги. На частицы воздуха велосипедист воздействует, и сила этого воздействия направлена в сторону движения. В то же время частицы воздуха воздействуют на велосипедиста, и сила этого воздействия направлена в противоположную сторону. Аналогична ситуация взаимодействия велосипедиста с асфальтом.

Иногда без достаточного анализа приводятся примеры:

1) движение автомобиля с работающим двигателем и включенной передачей иллюстрирует второй закон Ньютона;

2) движение автомобиля накатом с выключенной передачей является движением вследствие инертности и, следовательно, иллюстрирует закон инерции.

Однако тщательный анализ ситуации позволяет сделать вывод о том, что оба примера могут иллюстрировать первый, второй и третий законы Ньютона.

Первое движение может осуществляться и с постоянной скоростью (при равенстве сил движущих и сил сопротивления), и с ускорением, когда движущие силы больше сил сопротивления. Ну, а наличие и направление действия всех сил без рассмотрения характера взаимодействия автомобиля с другими телами (воздухом и покрытием дороги), т. е. без применения третьего закона

Ньютона, установить, конечно же, невозможно. Аналогичную картину имеем при тщательном анализе физической ситуации второго примера.

ПОДРОБНЕЕ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Рассмотрим взаимодействие вообще и взаимодействие в механике, дополнив этим то, что изложено на с. 59.

В окружающем нас физическом мире происходит следующее. Пневматический молот ударяет по заготовке, которая деформируется, сам же молот практически сохраняет прежнюю свою форму; резец взаимодействует с обрабатываемой деталью, снимая с нее стружку, сам же резец почти не изменяется; нож разрезает буханку хлеба на части, сам же не разделяет части буханки; клюшка взаимодействует с шайбой, посылая ее в ворота, сама же «предпочитает» оставаться в руках хоккеиста; автомобиль взаимодействует с прицепом, «заставляя» его следовать за ним, сам же «на поводку» у прицепа никогда не идет.

Перечисленные примеры свидетельствуют о том, что при взаимодействии двух тел результат действия первого тела на второе оказывается не таким, как результат действия второго тела на первое. Нет ли здесь противоречия с третьим законом Ньютона, согласно которому тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой, равными по модулю и противоположными по знаку? Нет, третий закон Ньютона выполняется и в перечисленных выше случаях. В том-то и дело, что одинаковые по модулю силы действуют и на «холодный» массивный боек пневматического молота, и на горячую «мягкую» заготовку; на режущую кромку резца, изготовленную из твердого сплава, и на заготовку из «мягкой» стали; на твердый нож и на мягкую буханку хлеба; на клюшку и на шайбу; на автомобиль и на прицеп.

Стоит только взять два совершенно одинаковых тела, находящихся первоначально в одинаковых состояниях, как сразу можно заметить, что действие первого тела на второе совершенно тождественно действию второго тела на первое. Действие первого тела на второе, независимо от их свойств, всегда аналогично действию второго тела на первое, т. е. тела действуют друг на друга одинаково интенсивно, с одинаковыми по модулю силами.

Результат же действия оказывается различным из-за различия механических свойств взаимодействующих тел и различия их взаимодействия с другими телами.

Так, клюшка, взаимодействуя с шайбой, взаимодействует еще и с руками человека, а шайба, взаимодействуя с клюшкой, непосредственно с руками хоккеиста не взаимодействует, но зато взаимодействует со льдом. Очевидно, что это является определяющей причиной того, что шайба скользит по льду в ворота, а клюшка остается в руках у хоккеиста, хотя сила, действовавшая на шайбу со стороны клюшки, равна силе, действовавшей на клюшку со стороны шайбы.

Дальнейшее рассмотрение этого взаимодействия позволяет достаточно ясно представить себе его сущность. Если взять в руки шайбу и толкнуть ею клюшку, лежащую на льду, то теперь клюшка будет скользить по льду, а шайба останется в руках хоккеиста. При условии равенства сил взаимодействия в первом и во втором случае клюшка все-таки не будет скользить в направлении ворот с той же скоростью. Это подтверждает мысль о том, что результат взаимодействия зависит не только от характера взаимодействия с другими телами, но и от механических свойств взаимодействующих тел. Так, шайба и клюшка имеют разные массы как меры инертности тел при их поступательном движении. И клюшка вдобавок связана с массой хоккеиста, держащего ее в руках.

На основании рассмотренного взаимодействия мы можем с уверенностью сказать, что и прицеп действует на автомобиль с такой же силой, с какой автомобиль действует на прицеп. Почему же «главную скрипку» играет автомобиль?

Ответ на этот вопрос ясен: потому что характеры взаимодействий автомобиля и прицепа с другими телами (дорогой) различны. Каковы же эти взаимодействия?

ЕЩЕ НЕМНОГО О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Один девятиклассник, рассматривая автомобиль «Жигули», слышал, как его владелец делился с группой водителей-любителей своими недоумениями.

Он и его сослуживец покупали «Жигули» в автоматаине одновременно, из одной партии. Поначалу, как и следовало ожидать, автомобили обладали одинаковыми техническими возможностями, в частности их скоростные и стартовые данные совпадали. В последнее же вре-

мя автомобиль рассказчика не поспевает за автомобилем сослуживца, он менее резво стартует и «на полном дросселе», т. е. при развитии двигателем наибольшей мощности, реализует скорость, которая меньше конструкционной.

Ни один из советов водителей-любителей рассказчик не принял, так как все, что они советовали, было уже сделано: неоднократно проверено техническое состояние двигателя, муфты сцепления, узлов трансмиссии.

Услышав все это, девятиклассник задумался. Он имел представление об устройстве автомобиля, знал принцип работы двигателя внутреннего сгорания из курса физики восьмого класса, интересовался принципиальной схемой передачи движения от коленчатого вала к ведущим колесам автомобиля. Ему захотелось в деталях представить разгон автомобиля. Он взял карандаш и бумагу, сел за письменный стол и начал рассуждать.

Колеса автомобиля взаимодействуют с дорогой. Силы, действующие на колеса, являются внешними (по отношению к автомобилю), и поэтому от их величины и направления зависит характер движения. По-видимому, взаимодействия ведущих и ведомых колес с дорогой не должны быть тождественными.

Ученик рассуждал так. К ведущему колесу приложен вращающий момент. Вращение передается от коленчатого вала двигателя через муфту сцепления, коробку перемены передач, карданную передачу, главную передачу и полуоси. Предположим, что дорога идеально гладкая. Тогда независимо от интенсивности вращения колеса силы трения не возникают (колесо буксует) и поступательное движение автомобиля возникнуть не может. Ученик начертил схему действия сил (рис. 33, а).

В случае шероховатой поверхности ведущее колесо пытается сдвинуть покрытие дороги по направлению вращения на участке контакта, т. е. действует на дорогу с силой \vec{F}_1' .

Взаимодействие тел тщательно изучалось. В результате обобщения многочисленных экспериментальных данных сформулирован закон взаимодействия тел, т. е. третий закон Ньютона. Согласно этому закону, дорога действует на ведущее колесо так, что сила $\vec{F}_1 = -\vec{F}_1'$ и направлена в сторону поступательного движения. Она-то и обеспечивает движение автомобиля (рис. 33, б).

Если техническое состояние двигателя, трансмиссии

и протекторов ведущих колес нормальное, то причина отставания автомобиля рассказчика от автомобиля его сослуживца должна быть в другом.

И ученик задумался над силами сопротивления. Он рассуждал дальше. Сила сопротивления воздуха зависит от формы автомобиля и скорости его движения. Форма автомобилей одинакова. При большой скорости движение сопротивления воздуха больше, но ведь скорость автомобиля рассказчика меньше (он жалуется на то, что не поспевает за сослуживцем!). Значит, сопротивление воздуха не является причиной отставания.

Какие же еще взаимодействия являются существенными для движения автомобиля? И ученик стал рассматривать взаимодействие ведомых колес с дорогой. Решая задачи по физике, он привык анализировать результат, варьируя данными, допуская мысленные изменения физических условий и делая вывод о характере изменения исследуемой величины. Не изменил он своему принципу и на этот раз. Он продолжал рассуждать, «играя на крайностях».

К ведомому колесу вращающий момент со стороны трансмиссии не приложен. Ось ведомого колеса связана с подвеской, а следовательно, с кузовом автомобиля. Таким образом, в случае движения автомобиля к оси ве-

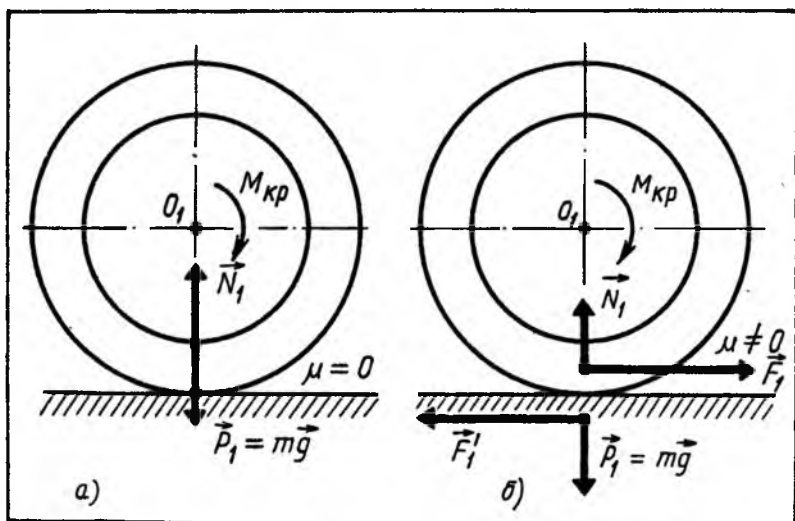


Рис. 33

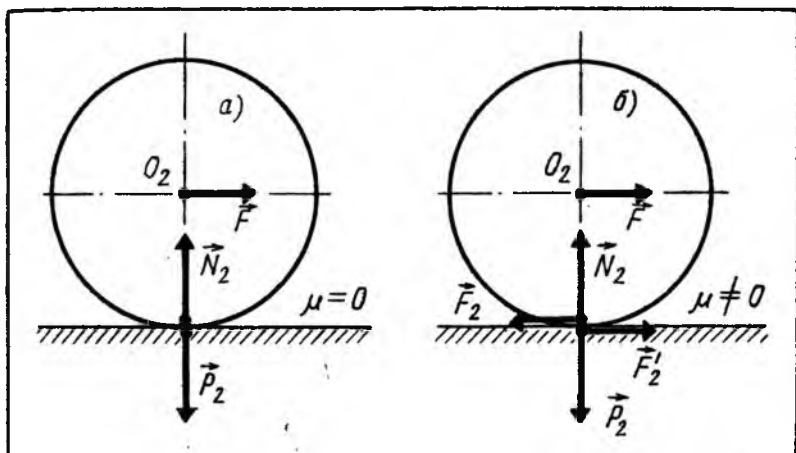


Рис. 34

мого колеса приложена сила, направленная в сторону движения. По идеально гладкой поверхности колесо скользило бы поступательно, не вращаясь («ползло бы юзом»). Двигаясь так по шероховатой поверхности, оно сдвигало бы ее в сторону движения. Поверхность дороги в соответствии с третьим законом Ньютона действует на колесо в обратном направлении, тем и обеспечивается его вращение (рис. 34).

Сила \vec{F}_2 направлена против движения автомобиля, и она оказывает существенное влияние на изменение его скорости.

От чего же зависит модуль силы F_2 ? Сила \vec{F}_2 необходима для обеспечения вращения ведомого колеса. Если она равна нулю (абсолютно гладкая поверхность), колесо скользит по поверхности, не вращаясь. Очевидно, чем меньше силы трения в оси колеса, тем меньше будет и сила \vec{F}_2 . В самом деле, при равномерном вращении имеет место равенство моментов $F_2 R = F_{\text{тр}} r$ (рис. 35). Так как радиусы оси и колеса практически неизменны, то F_2 тем меньше, чем меньше силы трения на поверхности оси ведомого колеса. Силы трения на оси зависят от технического состояния подшипников и наличия необходимой смазки. При недостаточной смазке силы трения на оси возрастают. В связи с этим возрастает сила F_2 , которая является силой трения покоя и по-

этому может изменяться от нуля до наибольшего значения, -приблизительно равного силе трения скольжения.

При возрастании F_2 разность между F и F_2 уменьшается, а следовательно, уменьшается и ускорение автомобиля.

Придя к такому выводу, ученик посоветовал владельцу «Жигулей» проверить техническое состояние передних колес. Тот с иронией заметил, что сходжение и развал колес он проверял совместно со своими коллегами. Тогда ученик отпарировал: «Если бы техническое состояние колес проверял специалист на станции технического обслуживания, то он обязательно проверил бы наличие смазки в подшипниках осей передних колес».

Водитель-любитель подумал, что эту проверку он как раз ни разу и не осуществлял. А через некоторое время владелец «Жигулей» рассказывал друзьям-автолюбителям о мальчике, который здорово понимает толк в автомобилях. Но не сказал главного — что лучше автомобиля девятиклассник знал «Физику-9», и в частности третий закон Ньютона.

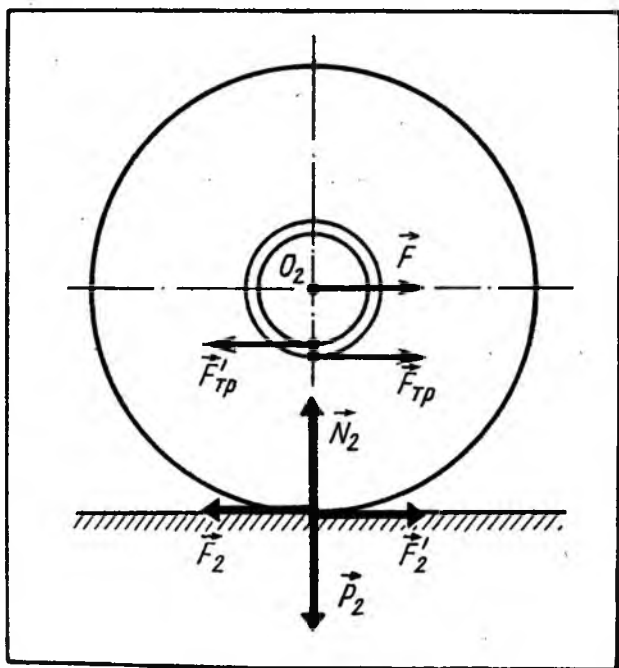


Рис. 35

20. Сравните время подъема и опускания тела, брошенного вертикально вверх, если при движении на тело действует сила сопротивления воздуха.
21. При движении тела на него действует постоянная сила тяги и пропорциональная скорости сила сопротивления воздуха. Как при этом изменяется скорость тела? Ответ обосновать.
22. Можно ли установить, какие силы действовали на тело известной массы, если его ускорение было также известно? Почему?
23. Автомобиль «Волга» массой 1835 кг едет по асфальтированному шоссе со скоростью 60 км/ч. Выключая сцепление, он проходит до остановки 300 м, а используя торможение, 20 м. Вычислите коэффициент трения при свободном качении и силу торможения автомобиля.
24. На покоящуюся платформу массой m_2 попадает горизонтально летящий со скоростью v_0 диск массой m_1 и начинает скользить по платформе с трением (μ) до остановки относительно платформы. Считая, что платформа находится на идеально гладкой поверхности, определите скорость платформы в момент остановки диска, а также время скольжения диска по платформе.
25. Используя условие предыдущей задачи, изобразите на схеме, выпишите попарно силы в соответствии с третьим законом Ньютона и укажите их природу.
26. При подъеме кабины лифта его скорость в течение 2 с возрастает линейно до 5 м/с, затем в течение 8 с остается постоянной и, наконец, в течение 1 с уменьшается до нуля. Масса кабины 480 кг. Определите силы натяжения каната, с помощью которого поднимается лифт.
27. Стол строгального станка массой 700 кг, на котором находится обрабатываемая деталь массой 300 кг, имеет скорость хода 0,5 м/с. Время разгона до этой скорости составляет 0,5 с. Определите силу, необходимую для разгона и для дальнейшего равномерного движения стола, если коэффициент трения 0,14.
28. Грузная вагонетка массой 700 кг опускается по канатной железной дороге с углом наклона 30° , имея скорость 1,6 м/с. Определите силу натяжения каната при равномерном спуске и при остановке вагонетки, если время торможения равно 4 с, а коэффициент сопротивления 0,01. При торможении вагонетка движется равнозамедленно.
29. Поезд без локомотива имеет массу 2000 т. Двигаясь по горизонтальному пути равноускоренно, он через минуту после начала движения имеет скорость 54 км/ч. Определите силу натяжения сцепного прибора между локомотивом и составом, если сила трения равна 0,005 веса поезда. Является ли сила натяжения сцепного прибора движущей или силой сопротивления?

Законы взаимодействия тел

Гравитационное



$$\vec{F}_{1-2} = -\vec{F}_{2-1}$$

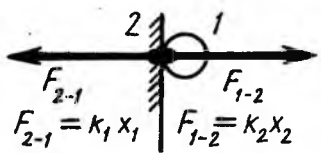
$$F_{1-2} = F_{2-1} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$F = G \frac{M}{R^2} m$$

$$F_T = mg$$

Электромагнитное

Упругое

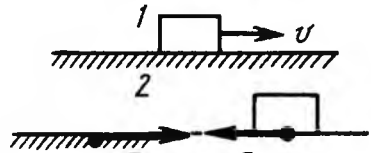


$$F_{2-1} = k_1 x_1 \quad F_{1-2} = k_2 x_2$$

$$F_{1-2} = F_{2-1} = kx$$

$$F_x = -kx$$

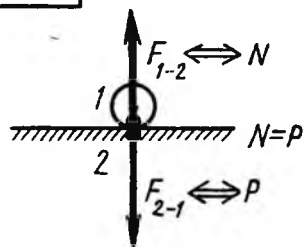
Трение



$$F_{2-1} = \mu P$$

$$F_{1-2} = \mu N$$

$$F_{Тр} = \mu N$$



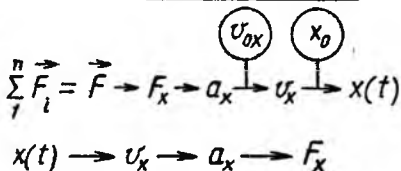
Законы Ньютона - ядро механики

→ I ИСО $\vec{F}=0 \Rightarrow \vec{v} = const$

→ II $\vec{F} \neq 0 \Rightarrow \vec{v} \neq const \rightarrow \vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$

1) $\vec{a} \sim \vec{F}$
 2) $a \sim \frac{1}{m}$ $\Rightarrow \vec{a} = \frac{F}{m} \Rightarrow \boxed{\vec{F} = m\vec{a} \quad \vec{F} \uparrow \uparrow \vec{a}}$

→ III $\vec{F}_{1-2} = -\vec{F}_{2-1}$



ния движению по отношению к локомотиву? А по отношению к составу?

30. Масса есть мера инертности тел. Выбег автомобиля обусловлен его инертностью. Зависит ли длина выбега автомобиля от его массы? Почему?

31. Электропоезд и автодрезина движутся с равными скоростями и имеют равные коэффициенты сопротивления движению. Докажите, что после выключения двигателей и электропоезд, и автодрезина пройдут до остановки равные расстояния.

32. Можно ли все случаи проявления механических сил в технике разделить на три группы: как соответствующие первому, второму или третьему законам Ньютона?

33. Как объяснить с позиций третьего закона Ньютона события, изложенные в стихотворении А. С. Пушкина «Сила и слабость», приведенном на с. 58 главы «Силы в природе, быту и технике»?



ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ И СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНИКА

ПОЛЕТ ФАНТАЗИИ И ПОЛЕТ В КОСМОС

Закон сохранения количества движения, или, как его еще называют, закон сохранения импульса, является одной из теоретических основ движения тел типа ракеты, а значит и одной из физических основ космической механики — движения искусственных спутников Земли (ИСЗ), космических кораблей и автоматических межпланетных станций (АМС).

Обращая свой взор в небо, предполагая о существовании далеких миров, человек создавал в своем воображении фантастические картины межпланетных и межзвездных путешествий.

Мысли о проникновении человека в космическое пространство совсем недавно считались нереальными, а с точки зрения священнослужителей — вздорными, еретическими. И все же полет в космос стал реальностью потому, что ему предшествовал и, по-видимому, сопровождал его полет фантазии. Когда человек фантазировал, придумывал ковры-самолеты, он тем самым в мыслях воссоздавал желаемое. Не будучи вооруженным необходимыми знаниями, не видя реальных путей для осуществления своей мечты, человек часто обращался к сверхъестественным силам, которые могли обеспечить межзвездные путешествия.

Но уже мысли о том, что ни Земля, ни Солнце не являются центром Вселенной, что у Вселенной вообще

нет центра, так как число миров в ней бесконечно, что другие миры также обитаемы, как и Земля, никак фантастическими назвать нельзя. Здесь человек не обращался к сверхъестественным силам, а опирался исключительно на силу разума. И в знак того, что Джордано Бруно (а именно о нем идет речь) принял смерть за истину, через триста лет после его смерти на пьедестале памятника были высечены слова: «Джордано Бруно — от века, который он предвидел». Джордано Бруно был сожжен инквизиторами заживо. У его ног в костре пылали написанные им книги. Джордано Бруно не строил проектов проникновения в космос, он только думал о нем.

А вот Николай Иванович Кибальчич, сидя в тюрьме по политическим мотивам за причастность к убийству царя Александра II, незадолго до казни закончил проект проникновения человека во Вселенную. «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 встречу тогда смерть, зная, что моя идея не погибнет вместе со мной, а будет существовать среди человечества, для которого я готов был пожертвовать своей жизнью. Поэтому я умоляю тех ученых, которые будут рассматривать мой проект, отнестись к нему как можно серьезнее и добросовестнее и дать мне на него ответ как можно скорее...» Кибальчич ждал решения. Он не мог знать, что конверт... распечатывают только через 37 лет, что только в 1916 г. узнают о нем ученые. Николай Иванович Кибальчич дал описание, чертежи и расчеты своего проекта, а это уже на грани мечты и реальности.

Обратите внимание: не упрощенное ли это схематическое описание современной ракетной установки?

Кибальчич писал: «На платформе, где должны располагаться воздухоплаватели, на прочных опорах крепится большой цилиндр с сужающимся отверстием в нижней части. В цилиндре должна быть установлена спрессованная пороховая свеча. От ее сгорания газы, накапливаемые в цилиндре, с силой будут вырываться в нижнее отверстие и, оказывая давление на верхнее дно цилиндра, будут поднимать всю установку вместе с воздухоплавателями» (рис. 36).

Демонстрацию реактивного движения можно осуще-

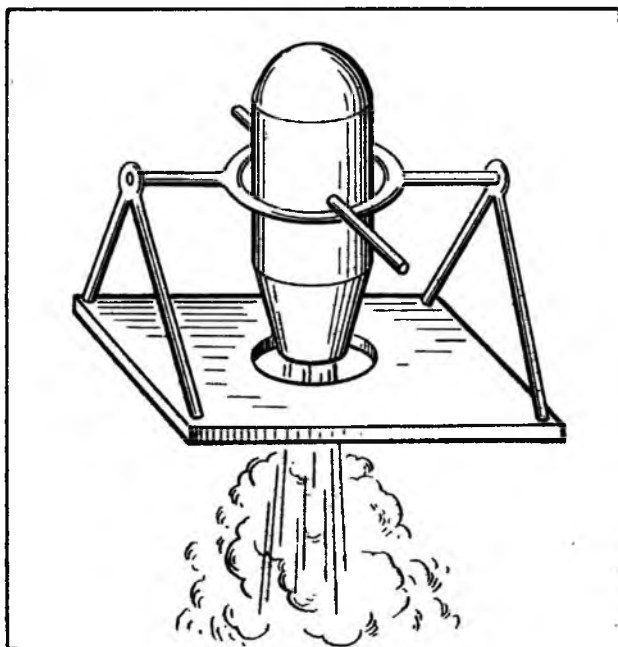


Рис. 36

ствить в комнате. Если надуть детский шарик и, не завязывая его, отпустить, не сообщая ему начальной скорости, то он сам приходит в движение по мере вытекания из него воздуха.

Современная ракета, выводящая на орбиту искусственный спутник Земли, не отличается от воздушного шарика по принципу действия. Вот только ее масса составляет несколько тонн; газы выбрасываются под давлением, которое реализуется в результате сгорания топлива (жидкий кислород + керосин); оболочка из высокопрочных жаростойких материалов; скорость истечения газов и их масса позволяют сообщать ракете большие скорости.

Согласно закону сохранения количества движения чем больше скорость истечения газов и чем больше их масса (секундный расход), тем больше скорость поступательного движения ракеты. То обстоятельство, что скорость движения ракеты зависит от скорости истечения газов (продуктов сгорания), а значит, и от секундного расхода массы, легко понять.

Вспомним опыт, демонстрация которого осуществлялась на уроке физики в VIII классе, когда изучалась

тема «Работа газа и пара при расширении» (рис. 37, а). До тех пор пока пробирка закрыта пробкой, тележка неподвижна. По мере подогревания давление пара в пробирке увеличивается (рис. 37, б). Сила давления на пробку и на стенки пробирки возрастает. После того как пробка вылетит «мгновенно», мы имеем такую ситуацию (рис. 37, в).

Сила, приводящая установку в движение: $F = p \frac{\pi d^2}{4}$.

Ясно, что чем больше давление пара, тем больше сила F , ускорение тележки и ее скорость. Но ведь от давления пара зависит и скорость его истечения. Теперь становится очевидным, что чем больше скорость истечения пара (газа), тем больше скорость движения реактивного устройства.

При движении тел постоянной массы без воздействия внешних сил их скорость не изменяется. В этом можно убедиться, выполнив соответствующие эксперименты или на основании анализа закона движения.

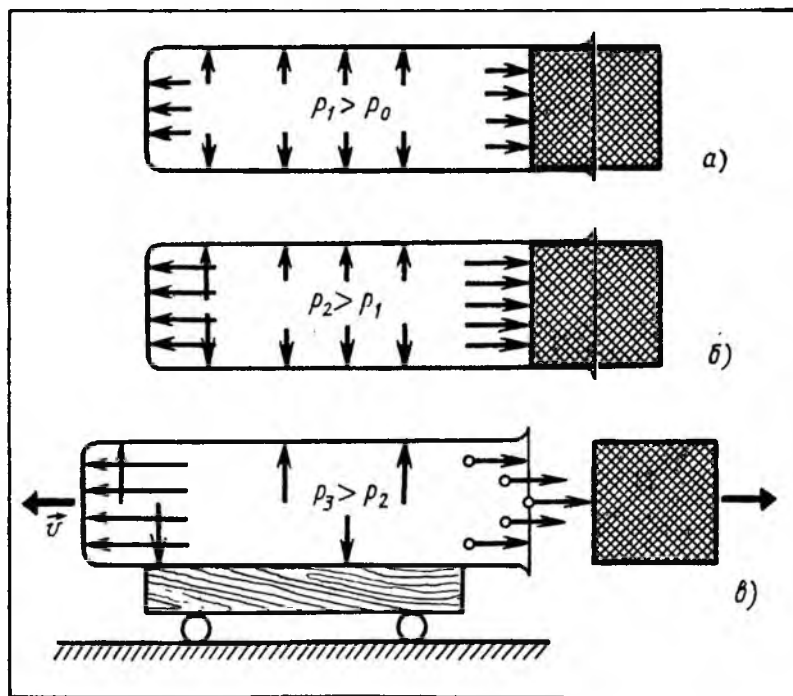


Рис. 37

В самом деле, $\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = m \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$; $\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$.
 Но если $\vec{F} = 0$, то $m\Delta\vec{v} = 0$ или $\Delta(m\vec{v}) = 0$, т. е. $m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = 0$,
 $m\vec{v}_2 = m\vec{v}_1$ ($\vec{v}_2 = \vec{v}_1$).

При таких же внешних физических условиях скорость тел переменной массы изменяется.

Количество движения тела по-прежнему сохраняется, а скорость возрастает при условии уменьшения массы из-за выброса продуктов сгорания. Если обозначить массу ракеты M_0 в начальный момент времени, а ее скорость в этот же момент через \vec{v}_0 , то в любой последующий момент времени скорость ракеты будет зависеть от секундного расхода топлива: $M_0\vec{v}_0 = m\vec{v}$, $\vec{v} = \frac{M_0}{m}\vec{v}_0$, m по мере сгорания топлива и истечения продуктов сгорания убывает, поэтому \vec{v} возрастает.

РЕАКТИВНАЯ ТЕХНИКА И КОСМОНАВТИКА

История реактивной техники и космонавтики неизменно связана с именами наших великих соотечественников К. Э. Циолковского и С. П. Королева.

Практической космонавтике более 35 лет. Время меняет темп жизни, каждая эпоха характеризуется определенными научными открытиями и их практическим использованием.

Современное состояние космонавтики, когда на орбитальных станциях в длительных космических полетах работают космонавты, когда по маршруту Земля — орбитальная станция курсируют пилотируемые и автоматические пассажирские и грузовые транспортные корабли, содержание работ, которые выполняют космонавты, позволяет говорить об исключительном народно-хозяйственном и научном значении практического освоения космоса.

Объективный и тщательный контроль за состоянием земной атмосферы возможен только из космоса. Искусственные спутники связи, космическая метеослужба, космическая геологоразведка и многое другое уже сейчас решают важные государственные вопросы и задачи.

Заметим, что из космоса впервые получены сведения о величине нефтяных пятен в океане, о том, как редуют джунгли в Амазонии, о загрязнении озера Байкал, об интенсивном наступлении пустынь на леса и степи.

А ведь еще в 30-е годы Сергей Павлович Королев писал: «На днях в одном журнале мне прямо сказали: «Мы избегаем печатать материал по ракетному делу, так как все это лунные фантазии...» И мне большого труда стоило убедить, что это не так, что ракеты — это оборона и наука». В то же время были и ученые, считавшие идеи К. Э. Циолковского бредовыми, а полет в космос — абсурдом. Страстно увлеченный своим делом, которое он всю жизнь считал делом государственным, С. П. Королев убеждал не только и не столько словами, сколько практическими делами. В то время двигатель ОР-1 (опытный ракетный первый) Фридриха Артуровича Цандера развивал силу тяги 1,42 Н. Это было начало истории победоносного шествия реактивных двигателей на летательных аппаратах. Уже в 1933 г. в присутствии всех специалистов группы исследования реактивного движения (ГИРД) состоялись запуски реактивных двигателей на жидком топливе. Сила тяги составила сначала 274,5 Н, затем 372 Н, а через месяц при давлении в камере сгорания 13 атм сила тяги составила 520 Н.

А вот технические данные трехступенчатой ракеты-носителя космического корабля «Восток»:

— суммарная мощность двигательных установок $15 \cdot 10^6$ кВт;

— тяга одного двигателя 1 000 000 Н;

— число двигателей 6;

— давление в камерах сгорания 5 — 6 МПа.

Космический корабль «Восток» был выведен на орбиту ИСЗ 12 апреля 1961 г. с первым космонавтом мира Юрием Гагариным на борту.

ПОЧЕМУ ИХ ИМЕНА СТОЯТ РЯДОМ?

Мы уже упоминали имя Николая Ивановича Кибальчича, уроженца Черниговской губернии, сына священника, не захотевшего продолжать дело своего отца, учившегося сначала в Петербургском институте путей сообщения, а затем в Медико-хирургической академии. Но ни инженером, ни врачом Н. И. Кибальчич не стал, он стал революционером. Вскоре после его казни молодой человек, всего на четыре года моложе Н. И. Кибальчича, принял от него эстафету покорения воздушного океана и космического пространства.

Константин Эдуардович Циолковский не был знаком с Н. И. Кибальчичем, однако их можно считать

родными братьями хотя бы потому, что оба они были верными сынами России, и потому, что оба были одержимы и проникнуты идеей освоения космического пространства. Великий труженик русской науки и техники К. Э. Циолковский является основоположником ракетодинамики. Он первый начал разрабатывать проекты летательных аппаратов для исследования мировых пространств.

Иван Всеволодович Мещерский (1859 — 1935) родился на два года позже К. Э. Циолковского. О его материальном положении и отношении к учебе в Архангельской гимназии можно судить по документу, из которого видно, что педагогический совет гимназии, учитывая блестящие успехи и «недостаточное состояние» юноши, освобождал его от платы за обучение и поддерживал небольшой стипендией. Так получил образование один из крупнейших русских механиков, посвятивший всю свою творческую деятельность созданию основ механики тел переменной массы. Теоретические исследования по механике тел переменной массы, сыгравшие столь значительную роль в развитии ракетостроения, поставили его имя в одном почетном ряду имен покорителей космоса.

А вот Фридрих Артурович Цандер всю свою жизнь посвятил практической реализации идеи осуществления космических полетов. Он создал школу теории и конструирования реактивных двигателей, воспитал много талантливых последователей этого важного дела. Были ученые, считавшие космические полеты абсурдными. Ф. А. Цандера сжигала страсть к космическим полетам:

«Сегодня, в пятницу, здесь, в столовой, в шесть часов вечера состоится лекция: «Мы полетим на Марс».

Лекцию читает инженер Ф. Цандер. Демонстрируется модель межпланетного корабля. Вход свободный. Ревком».

Он не дожидаясь до дня запуска ракеты с его реактивным двигателем ДР-2, проложившей первую космическую трассу.

Неоценимый по значимости вклад в развитие космонавтики в нашей стране внес академик Мстислав Всеволодович Келдыш.

«Выдающийся ученый современности», «Ученый космической эры» — так были озаглавлены статьи в газетах о М. В. Келдыше. Вступление человечества в эру освоения космоса поставило перед учеными новые задачи, требовавшие немедленной разработки, мобилизации

всего накопленного наукой опыта. Без теоретического фундамента, заложенного в предыдущие годы, не был бы возможен генеральный прорыв в космос, впервые осуществленный нашей страной 4 октября 1957 г.

Титаническая мечта требовала гигантских усилий для своего воплощения. В развитие советской космической науки и техники М. В. Келдыш внес выдающийся вклад. Он возглавил решающий участок работ по изучению и освоению космоса. Выявление новых научных и технических задач, новых горизонтов в исследовании космического пространства, Луны, планет Солнечной системы, развитие космической техники, формирование комплексных научно-технических программ, разработка принципиально новой научной аппаратуры, динамики и управления полетом, вопросы организации и управления полетом — вот это далеко не полный круг деятельности М. В. Келдыша.

Восемнадцатый Международный конгрессе по астронавтике утвердил день 4 октября 1957 г. началом космической эры. Первый спутник «говорил по-русски». «Нью-Йорк тайме» писала: «Этот конкретный символ будущего освобождения человека из-под власти сил, приковывающих его к Земле, создан и запущен советскими учеными и техническими специалистами. Все на Земле должны быть благодарны им. Это подвиг, которым может гордиться все человечество».

В то время не называли имя дважды Героя Социалистического Труда, академика, Главного конструктора космических кораблей Сергея Павловича Королева. Сегодня о нем знает каждый.

М. В. Келдыш, умевший по достоинству оценивать людей, сказал о нем: «С именем С. П. Королева навсегда будет связано одно из величайших завоеваний науки и техники всех времен — открытие эры освоения человечеством космического пространства». Сам же выдающийся ученый и гениальный конструктор С. П. Королев, размышляя о первых космических стартах, писал: «С чего началось это большое и сложное дело? Некоторые, отвечая на этот вопрос, вспоминают о вековой мечте человека взлететь над Землей, покорить воздушный океан, разгадать тайны далеких звезд. Другие связывают эти мечты с изумительными по своей гениальности работами К. Э. Циолковского, в которых фантастика сочеталась с научными обоснованиями. Третьи исходят из практических работ наших ученых и техников, создавших первые летательные аппараты, первые ракетные

двигатели и т. д. Не будем спорить, кто из них стоял ближе к истине. На наш взгляд, все это звенья единой цепи, единого замысла о покорении космоса, воплощенного в жизнь всем советским народом.

Создание огромных, весом в десятки тонн, межпланетных кораблей с экипажем, состоящим из нескольких человек, позволит осуществить длительные (около двух-трех лет) космические полеты. А далее... Впрочем, сейчас трудно предаваться мечтам, ибо бывает и так, что жизнь опережает мечту. Ясно лишь одно: космонавтика имеет безграничное будущее и ее перспективы беспредельны, как сама Вселенная».

ЗАКОННАЯ ГОРДОСТЬ

Все началось 4 октября 1957 г. для многих неожиданно, так как координаты запуска первого ИСЗ предполагались на другом материке.

Масса «Спутника-1» была 83,6 кг. Запущенный в феврале 1958 г. первый американский спутник имел массу всего лишь 8,3 кг.

Первый наш разведчик Вселенной производил измерение плотности атмосферы, собрал первые данные о распространении волн в атмосфере. Были проверены экспериментально теоретические расчеты и технические решения, положенные в основу проектирования ракет и спутников. За первым спутником последовал второй с собакой Лайкой на борту, а затем и другие ИСЗ.

На «Спутнике-2» (3 ноября 1957 г., 508,3 кг), о самочувствии Лайки сообщали два радиопередатчика, телеметрическая система, программированное устройство, функционировали приборы для исследования излучения Солнца и космических лучей, системы регенерации и терморегулирования поддерживали в кабине необходимые жизненные условия. Это было начало космической биологии.

«Спутник-3» (15 мая 1958 г., 1327 кг) дал данные о давлении и составе верхней атмосферы, концентрации заряженных частиц, космических лучей, магнитном и электрическом полях, метеорных частицах. Был открыт внешний радиационный пояс Земли. Впервые для энергоснабжения приборов использовались и солнечные батареи.

4 января 1959 г. впервые было «преодолено» земное

тяготение. Первая лунная ракета «Мечта» сообщила летательному аппарату «Луна-1» массой 361,3 кг вторую космическую скорость (11,2 км/с). Пролетев возле Луны и сообщив ценную информацию, она стала первым искусственным спутником Солнца. Были решены сложные технические задачи, получены новые данные о радиационном поле Земли и космического пространства.

14 сентября 1959 г. на Луну в окрестность кратера Архимеда, восточнее Моря Ясности, был доставлен вымпел нашей Родины. Приборы «Луны-2» сообщили, что у Луны нет магнитного поля, отсутствуют радиационные пояса, ионизированная оболочка чрезвычайно разряжена. Это было началом систематического исследования Луны.

7 октября 1959 г. «Луна-3» сфотографировала Луну с близкого расстояния, а также ее обратную сторону. Впервые осуществлялось изучение Луны с борта ее искусственного спутника. Впервые был составлен лунный глобус.

Полет «Луны-1», «Луны-2», «Луны-3» осуществлялся по схеме: управление с Земли путем непрерывного набора требуемой скорости с последующим инерциальным «пассивным» полетом. Полеты следующих летательных аппаратов типа «Луна» отрабатывали схему: вывод станции ракетой-носителем на орбиту ИСЗ, старт с этой орбиты в строго заданный момент времени, набор второй космической скорости, коррекция траектории подлета к Луне, гашение скорости тормозными двигателями, обеспечение мягкого прилунения.

Стартовав 31 января 1966 г., «Луна-9» массой 1583 кг впервые осуществила мягкую посадку на Луну. Была отвергнута гипотеза о существовании пылевого покрова на поверхности Луны.

Сентябрь 1970 г. С помощью «Луны-16» впервые был взят и доставлен на Землю лунный грунт. Автоматические устройства на лунной поверхности опустили буровой станок, буровой механизм сработал, заборное устройство собрало лунную породу, упаковало в специальный контейнер, который был доставлен на Землю.

17 ноября 1970 г. на Луне была проложена первая колея «Луноходом-1» массой 756 кг. Он сошел по трапу летательного аппарата, совершившего мягкую посадку на Луну, покорно выполнил все команды с Земли, которая наблюдала за ним и окрестностями с помощью телекамер. Управление «Луноходом-1» осуществлялось из Центра дальней космической связи экипажем из 5 чело-

век: командир, водитель, бортиженер, штурман, оператор направленной антенны.

Многие космические полеты подготавливались и экспериментально отработывались семейством «Зондов». Они впервые решили важную задачу управляемого спуска аппарата, совершающего дальний космический рейс. Впервые именно «Зонды» проложили космическую трассу Земля — Луна — Земля.

12 апреля 1961 г. впервые советский человек Юрий Алексеевич Гагарин на космическом корабле «Восток» массой 4730 кг совершил космический рейс.

Потом были другие «Востоки».

А 12 октября 1964 г. началась эпоха «Восходов», которые по сравнению с «Востоками» имели новые кабины, позволяющие космонавтам впервые осуществлять полеты без скафандров, новое приборное оборудование, улучшенные условия обзора, улучшенные системы мягкой посадки: скорость приземления практически доводилась до нуля.

В марте 1965 г. впервые человек вышел в открытый космос. Алексей Леонов летел в космосе рядом с космическим кораблем «Восход-2» со скоростью 28 000 км/ч.

Потом талантливыми головами и золотыми руками было вызвано к жизни новое поколение космических кораблей — «Союзы». На «Союзах» осуществлялось широкое маневрирование, ручная стыковка, была создана первая в мире экспериментальная космическая станция, впервые осуществлен переход из корабля в корабль. На «Союзах» началось осуществление технологических операций.

На орбитах начали функционировать и нести свою научную вахту орбитальные научные станции типа «Салют». Стыковку с ними осуществляют космические корабли семейства «Союз», технические возможности которых позволяют изменять высоту орбиты, осуществлять поиск другого корабля, сближаться с ним и причаливать. «Союзы» обрели полную свободу в космосе, так как могут осуществить автономный полет без участия наземного командно-измерительного комплекса.

Следует отметить, что в 1969 г. в исследовании космоса произошло событие, сопоставимое по значимости с первым полетом в космос Ю. А. Гагарина. Американский космический корабль «Аполлон-11» достиг Луны, и двое американских астронавтов 21 июля 1969 г. высадились на ее поверхность. Нил Армстронг оказался первым гостем с Земли на нашем вечном спутнике. Астро-

навты пробыли на Луне несколько часов и благополучно вернулись на Землю. На ионосферной лаборатории «Янтарь-1» впервые был апробирован в условиях реального космического полета газовый плазменно-ионный двигатель.

Спутники типа «Молния» проложили радиомост Земля — космос — Земля. Дальний Восток стал близким, так как радиосигналы по маршруту Москва — спутник — Владивосток пробегают за 0,03 с.

1975 год в истории космических исследований был отмечен выдающимся свершением — совместным полетом в космосе советского корабля «Союз» и корабля США «Аполлон».

С 1975 г. функционирует новый вид космического ретранслятора для цветных телепередач — спутник «Радуга». Спутники серии «Космос» и «Метеор» (орбитальные синоптики) позволяют получать обзор погоды очень оперативно на огромных территориях. «Метеоры» информировали о ледовой обстановке в устьях рек Обь и Лена, о прохождении облачных вихрей в Кулундинской степи, об ураганах и циклонах. «Метеор» дал сведения о тропическом циклоне на пути следования теплохода «В. Маяковский», буксировавшего огромные грузы. Теплоход изменил свой курс. Дизель-электроход «Обь» был зажат мощными льдами в Северном Ледовитом океане. По снимкам, сделанным из космоса, был составлен маршрут и график движения судна.

2 ноября 1978 г. успешно завершён очень длительный в истории космонавтики (140 сут) пилотируемый полет. Космонавты Владимир Коваленок и Александр Иванченков успешно приземлились в 180 км юго-восточнее г. Джезказгана. За время работы их на борту орбитального комплекса «Салют-6» — «Союз» — «Прогресс» выполнена широкая программа научно-технических и медико-биологических экспериментов, проведены исследования природных ресурсов и изучение природной среды. Выполнены эксперименты по космическому материаловедению (свыше 50 технологических экспериментов). За время функционирования станции «Салют-6» на ней работали две длительные экспедиции, осуществили посещение четыре экспедиции. Осуществлено десять стыковок шести пилотируемых и четырех грузовых космических кораблей, одна перестыковка, два выхода космонавтов в открытый космос.

И наконец 25 декабря 1978 г. точно в расчетное время ударные датчики, установленные на борту специ-

ального спускаемого аппарата станции «Венера-11», передали на Землю весть: «Есть касание поверхности». Это произошло через четверо суток после того, как подобный спуск совершила «Венера-12».

Специалисты высоко оценивают баллистическое качество десанта: аппараты опустились в расчетных квадратах — в восьмистах километрах друг от друга. Чтобы с такой точностью совершить посадку, нужно было ввести аппараты в атмосферу Венеры по узкому коридору шириной всего два-три десятка километров. На фоне 70 млн. км, отделяющих сейчас Венеру от Земли, эта полоска выглядит нитью диаметром в человеческий волос.

Первый в мире космический полет, первый в мире космонавт, первый в мире выход в открытый космос, первые в мире «прикосновения» к другим небесным объектам и многое другое первое в мире в деле практического освоения космоса принадлежит нашей Родине.

В активе нашей космонавтики годичное пребывание на орбите и плодотворная научно-исследовательская деятельность с очередным выходом в открытый космос. Длительная космическая командировка на станцию «Мир» закончилась для Владимира Титова и Мусы Манарова успешно. Они благополучно вернулись на родную Землю.

Отметим еще одно выдающееся событие в исследовании космоса. 15 ноября 1988 г. орбитальный корабль многоразового использования «Буран», выведенный в космос уникальной ракетной системой «Энергия», выполнил двухвитковый полет по орбите вокруг Земли и приземлился на посадочную полосу космодрома Байконур длиной 5 км и шириной 80 м. Впервые в мире посадка корабля многоразового использования осуществлена в автоматическом режиме.

?

34. Используя условие задачи 24, решите ее на основе закона сохранения импульса системы диск — платформа.

35. Какую установившуюся скорость может обеспечить ракетаноситель космического корабля «Восток»? Необходимые данные приведены в тексте одного из параграфов этого раздела.

36. Автосамосвал поднимает кузов при включенном стояночном тормозе. Изменится ли механическое состояние автосамосвала, если производить разгрузку в незаторможенном состоянии? Почему?

37. Буксирный теплоход массой 600 т приобрел скорость 1,5 м/с, после чего натянулся буксирный канат и баржа мас-

сой 400 т тронулась вслед за теплоходом. Найдите общую скорость теплохода и баржи, считая, что движущая сила и сила сопротивления воды уравниваются.

38. Ствол орудия весит 110 кН. Масса снаряда 54 кг. Скорость снаряда у дульного среза равна 900 м/с. Определите начальную скорость свободного отката ствола орудия в момент вылета снаряда.

39. Группа вагонов массой 210 т, двигаясь с сортировочной горки со скоростью 12 км/ч, столкнулась с двумя цистернами массой 140 т, двигавшимися в том же направлении со скоростью 3 км/ч. Какова скорость их совместного движения после сцепления?

40. Автомобиль «Волга» движется по подъему протяженностью 40 м и высотой 13,7 м. Какую силу тяги развивает двигатель, если масса автомобиля с пассажирами 1600 кг? Сила сопротивления движению 313,6 Н. Как влияет крутизна уклона на силу тяги двигателя, необходимую автомобилю?

Закон сохранения импульса

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$$

$$\vec{F}_{1-2} = -\vec{F}_{2-1}$$

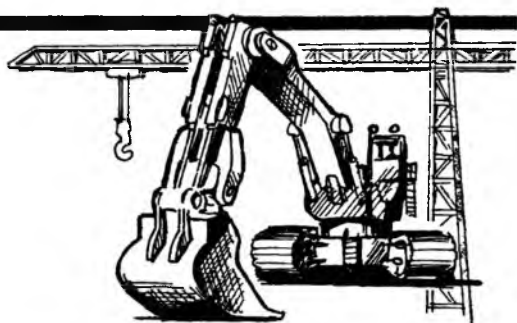
$$m_1\vec{v}_1 - m_1\vec{v}_{01} = -(m_2\vec{v}_2 - m_2\vec{v}_{02})$$

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02}$$

Обобщение

Замкнутые системы

$$\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const$$



РАБОТА, ЭНЕРГИЯ, МОЩНОСТЬ

ЧТО ТАКОЕ РАБОТА!

Бытовые представления о работе отличаются от механического понятия работы. В быту говорят, например, что человек работает, т. е. совершает работу, если он даже неподвижно читает учебник. Ясно, что механической работы здесь нет. Есть лишь работа умственная, представляющая собой мозговую деятельность человека.

Термин «работа» в современном смысле этого слова в физику ввел французский ученый Жан Виктор Понселе в 1826 г.

Известно, что работа есть изменение формы движения материи, рассматриваемое с его количественной стороны. И это так, ибо в ряде случаев работа сопровождается переходом механической энергии в другую форму, например в теплоту. Механическое движение нигде и никогда не может произвести работу хотя бы на одну миллионную часть джоуля, если оно не будет уничтожено как таковое, если оно не превратится в какую-нибудь другую форму движения. Механическая работа понимается нами как действие силы, производящее перемещение тела или части его.

Значит, для совершения работы необходимы три условия: а) действие силы; б) движение тела под действием силы; в) неперпендикулярность вектора силы к вектору скорости тела.

Совершает ли работу спортсмен, держащий неподвижно в руках гири? Механической работы нет: есть действие мускульной силы человека, удерживающего в руках гири, но нет перемещения гирь. Да, но спортсмен устает с течением времени, даже стоя с ними неподвиж-

но. Но совершает он не механическую, а физиологическую работу.

Представим себе другой случай: тело движется по инерции при отсутствии действия на него внешних сил. Здесь также не будет механической работы, ибо есть движение, но нет сил, его обуславливающих или изменяющих. А движение по инерции, прямолинейное и равномерное, так же как и покой тела, в силах не нуждается.

Представим себе третий случай: ИСЗ обращается вокруг Земли по круговой орбите. Он испытывает силу притяжения к Земле, но эта сила, будучи нормальной к вектору скорости спутника в любой точке орбиты, не совершает работы.

Известно, что работа постоянной, т. е. неизменной по модулю и направлению, силы равна произведению величин: силы и перемещения тела, умноженному на косинус угла между векторами силы и перемещения:

$$A = F s \cos \alpha.$$

Нетрудно догадаться, что, когда угол α не равен нулю, на тело часто действует одновременно с данной силой F еще какая-то сила, не позволяющая телу двигаться по направлению действия данной силы.

Вот пример (рис. 38). По реке навстречу быстрому течению движется судно. В помощь двигателю судна, приводящему его в движение с силой F_1 , судно тянет с силой F_2 движущийся вдоль берега трактор-тягач. Между

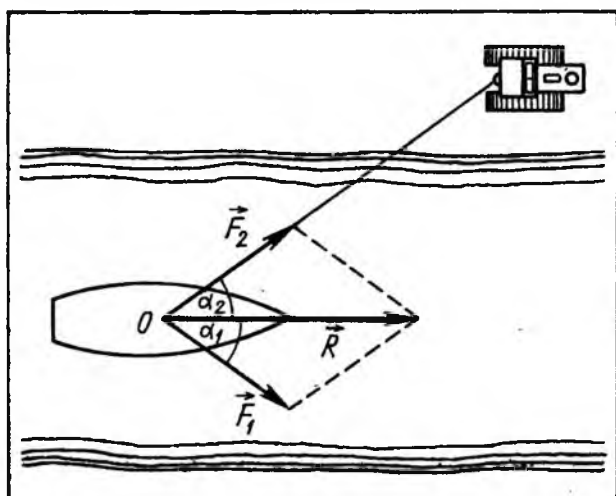


Рис. 38

направлением троса, через который осуществляется тяга трактором, и направлением судна по фарватеру реки угол α_2 . Почему же судно не движется по направлению тяги его тросом?

Судно, чтобы не сесть на мель и тем более не уткнуться носом в берег реки, должно двигаться вдоль реки по проложенному фарватеру, по которому фактически и движется. Чем же объясняется такое направление движения судна? Тем, что руль судна поставлен в такое положение, при котором тяга двигателя обеспечивает силу движения под углом к фарватеру.

Происходит сложение сил: тяги двигателя судна F_1 и тяги трактора F_2 по известному всем правилу параллелограмма сил. Их равнодействующая R и заставляет судно двигаться именно по фарватеру реки. Если под действием данных сил судно проходит расстояние s , то работа перемещения судна выразится так: $A = F_1 s \cos \alpha_1 + F_2 s \cos \alpha_2$. А так как $R = F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2$, то $A = R s$.

Давайте проанализируем теперь формулу работы. Как изменяется она при изменении угла α ? Если угол α равен нулю, то $\cos \alpha$ равен единице, и формула работы будет выглядеть так:

$$A = F s.$$

Пример: работа локомотива по перемещению поезда. Сила тяги локомотива направлена в сторону движения поезда.

Если угол $\alpha = 90^\circ$, то $\cos \alpha = 0$, и в нуль обращается вся работа силы, если она направлена нормально к направлению движения тела. Работа силы $A = 0$.

Пример: работа, совершаемая силой тяжести при горизонтальном перемещении корабля в океане.

Если угол $\alpha = 180^\circ$, то $\cos \alpha = -1$. Работа силы будет отрицательной: $A = -F s$.

Пример: работа сил сопротивления движению автобуса.

Работа сил сопротивления будет отрицательной всегда, когда угол больше 90° и меньше 270° . Ибо если разложить силу \vec{F} на две составляющие, одна из которых будет направлена нормально к направлению движения тела \vec{F}_1 , а другая — по траектории движения, то вторая \vec{F}_2 всегда будет направлена в сторону, противоположную движению.

При угле $\alpha = 270^\circ$ работа силы по перемещению тела, так же как и при угле $\alpha = 90^\circ$, будет равна нулю.

Рассмотрим теперь случай, когда в результате движения тела его перемещение оказалось равным нулю. Например, мотоциклист по кругу или овалному треку делает один оборот, возвращаясь к исходной точке движения. Для простоты примем силу тяги двигателя мотоцикла постоянной по модулю. Ясно, что перемещение мотоцикла в этом случае будет равно нулю. А как определить работу, безусловно совершенную двигателем мотоцикла? Она будет равна произведению силы тяги двигателя мотоцикла на длину окружности или овалного трека, пройденного мотоциклом.

Значит, в некоторых случаях, когда тело под действием постоянной по модулю силы движется по кривой в соответствии с направлением действия силы на каждом участке пути, работа измеряется произведением силы на путь, пройденный телом по траектории движения.

В КАКИХ ЖЕ ЕДИНИЦАХ РАБОТА ИЗМЕРЯЕТСЯ!

Из школьного курса физики известно, в каких единицах измеряется работа. За единицу работы в Международной системе единиц принят джоуль — работа, совершаемая силой в 1 Н на пути, равном 1 м.

Однако вы встречаетесь с тем, что, например, работа транспорта по перевозке грузов измеряется в совершенно иных единицах, чем в физике, а именно — тонна-километрах перевезенных грузов. Это есть работа по перевозке груза массой 1 т на расстояние 1 км. Это эксплуатационно-техническая, но не физическая единица.

Как же сравнить тонна-километр с единицами работы, известными из курса физики, например джоулем?

Давайте разберемся. Перевозки грузов наземным транспортом совершаются, можно считать, в горизонтальном направлении, ибо начальные и конечные пункты передвижения грузов находятся почти на одной высоте над уровнем моря. Кроме того, в обе стороны каждой дороги грузы перевозятся практически равные по массе, хотя и различаются по видам. Поэтому перевозки грузов требуют лишь преодоления сил сопротивления движению, а не подъема их, связанного с работой против силы тяжести.

Значит работа по перевозке грузов $A = Fs$ или $A = fPs$, где f — коэффициент сопротивления движению. Для железных дорог его можно считать равным 0,003.

Отсюда $A = 0,003 \cdot 1000 \cdot 1000 = 3 \cdot 10^3$ (кгс · м). Или, имея в виду, что $1 \text{ кгс} = 9,8 \text{ Н}$, 1 тонна-километр перевозки грузов равен $29,4 \cdot 10^3$ Дж.

Необходимость пояснить такую внесистемную с точки зрения физики единицу работы, как тонна-километр, диктуется двумя соображениями.

Во-первых, надо же понимать физический смысл важных технико-экономических терминов.

Во-вторых, правильное понимание современных технико-экономических терминов требуют: политехническое образование, знание основ научно-технического прогресса в России, экономическая грамотность молодежи. Тем более что транспорт является одной из основных сфер материального производства.

При перевозке грузов автотранспортом коэффициент сопротивления движению увеличивается и резко колеблется в зависимости от профиля, характера покрытия дороги и его состояния. Так, коэффициенты трения скольжения шин автомобиля по асфальту составляют:

для сухого асфальта — $0,50 - 0,70$,

для мокрого асфальта — $0,35 - 0,45$.

Значит, для автомобильного, как и других видов транспорта, соотношение между тонна-километрами и джоулями будет иным, в соответствии с величиной f — коэффициентом сопротивления движению.

Еще один вопрос об измерении работы. Можно ли, подняв ядро весом в 10 Н на 1 м , совершить работу более десяти джоулей? Да, можно, если на этой высоте ядро будет иметь скорость, а значит, и кинетическую энергию одновременно с потенциальной, обусловленной подъемом ядра вверх на 1 м .

Этот вопрос хорошо рассмотрен в книге Я. И. Перельмана «Занимательная механика».

ПОД УКЛОН И НА ПОДЪЕМ

При определении работы, производимой транспортом, мы для простоты считали все движения горизонтальными. Это практически верно — именно так и подсчитывается работа по перевозке грузов всеми видами транспорта, иначе и подсчитать ее невозможно. Но, строго говоря, на дорогах всегда есть уклоны и подъемы. Уклоном или подъемом называют один и тот же негоризонтальный участок пути в зависимости от того, в каком направлении рассматривается движение.

При уклоне или подъеме различают l — длину, h — разность высот или уровней начала и конца подъема или уклона, b — заложение, т. е. проекцию длины уклона на горизонтальную плоскость и крутизну i уклона или подъема, определяемую отношением разности высот к заложению:

$$i = \frac{h}{b}$$

Длину и разность высот начала и конца участка пути выражают в метрах, а крутизну — в промиллях, т. е. тысячных долях единицы, изображаемых так: ‰. На линиях железных дорог подъемы очень невелики по крутизне и составляют $2^\circ - 3^\circ$ или до $i = 0,030$; на автодорогах они бывают гораздо круче и обычно измеряются в градусах. Например, на Сурамском перевале Закавказской железной дороги крутизна составляет 0,0298, т. е. почти 30 м вверх на 1 км пути.

Подъемы и уклоны существуют на всем протяжении речных судоходных линий, ибо вода в любой реке потому и течет, что на разной высоте находятся ее исток и устье. Например, уровень воды в реке Волге на протяжении 3688 км течения от ее истока у озера Селигер до устья — Каспийского моря — падает на 256 м. Уровень воды в р. Ангаре на 1853 км течения от ее истока из озера Байкал до устья — реки Енисей — падает на 378 м. А на Нарыне — главной реке Кыргызстана, протяженность которой всего 600 км, перепад высоты от истока до устья составляет 2000 м! Это понятно, ведь Нарын не равнинная, а горная река.

Поэтому при перемещении груза на 1000 км вверх

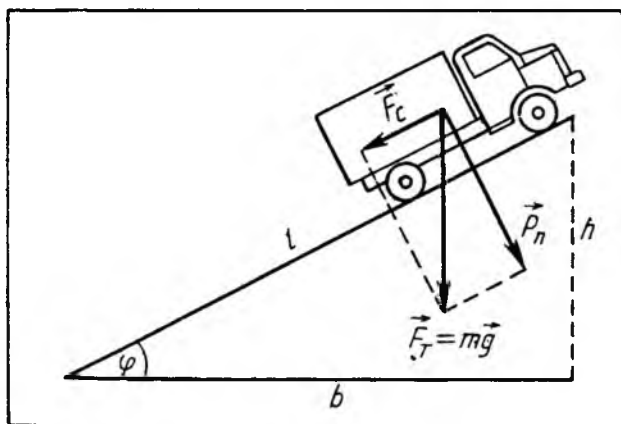


Рис. 39

по реке Волге его одновременно поднимают на 70 м, а при перемещении на такие же расстояния вверх по реке Ангаре — на 204 м. Обратное происходит при движении по течению рек.

Подъемы и уклоны на дорогах оказывают существенное влияние на работу транспорта. Рассмотрим такую задачу.

Автомобиль весом 80 кН движется равномерно сначала по горизонтальному участку дороги 40 м, а затем такое же расстояние на подъем крутизной 10° . Какую работу совершит двигатель автомобиля на первом и втором участке пути, если коэффициент сопротивления движению 0,02?

Работа на первом участке пути будет равна

$$A_1 = fNs, A_1 = 0,02 \cdot 80000 \cdot 40 = 64 \text{ (кДж)}.$$

Изобразим теперь (рис. 39) автомобиль на подъеме, иначе говоря, на наклонной плоскости.

Здесь двигатель автомобиля не только будет преодолевать сопротивление движению сил трения, но и работать против силы тяжести, поднимая автомобиль вверх. Из рисунка 40 видно, что на подъеме на автомобиль будет действовать скатывающая сила $F_{\text{ск}} = F_T \cdot h = F_T \cdot \sin \varphi$. Значит, теперь для сохранения скорости движения сила тяги двигателя должна быть равна $F = fN + F_T \cdot \sin \varphi$. И работа двигателя на преодоление подъема будет равной

$$A_2 = fNs + F_T \cdot \sin \varphi \cdot s.$$

Из таблицы тригонометрических величин находим, что $\sin 10^\circ = 0,1736$.

Подставляя в формулу работы численные значения всех величин, находим, что $A_2 = 0,02 \cdot 80000 \cdot 40 + 80000 \cdot 0,1736 \cdot 40 = 619,52 \text{ (кДж)}$, $A_2 = 619,52 \text{ кДж}$.

Как видим, даже при не очень крутом подъеме на равных расстояниях движения и сила тяги двигателя, и совершенная им работа выросли более чем в 2 раза.

Автомобили при движении на подъем из-за большего сопротивления движению (силы трения плюс силы тяжести) вынуждены обычно снижать скорость движения.

На железных дорогах, где поезда имеют вес, в сотни раз превышающий вес автомобиля, преодоление подъемов на линиях — серьезная задача, которая решается следующими мерами:

при строительстве железнодорожных линий стремятся расположить их горизонтально, т. е. без подъемов и

уклонов, для чего на линиях создают различные искусственные сооружения: путепроводы, эстакады, насыпи, выемки и тоннели, а максимальные подъемы, допускаемые на магистральных линиях, не превышают, как правило, по крутизне 2° , т. е. 0,035;

в процессе реконструкции железнодорожных линий, где это возможно и целесообразно, их профили смягчаются, т. е. снижается крутизна подъемов и уклонов;

в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации железных дорог страны при строительстве новых железнодорожных линий не допускаются крутые и затяжные, т. е. имеющие большую протяженность, подъемы;

создаются все более мощные локомотивы — электровозы и тепловозы, способные по силе тяги обеспечивать даже тяжеловесным грузовым поездам движение на существующих линиях с высокими скоростями. Это повышает пропускную и провозную способность железных дорог.

Поясним, что пропускная способность любого участка дороги определяется числом поездов, пропускаемых в обе стороны участка в сутки. Провозная же способность определяется количеством грузов, провозимых по участку дороги в сутки. Она возрастает и с частотой движения поездов на участке, и с увеличением веса поездов.

Преодоление действия силы тяжести имеет место и в работе воздушного транспорта. Так, дополнительной силы тяги двигателей самолетов и вертолетов, а значит, и работы требует их взлет и набор высоты по сравнению с горизонтальным полетом. Поэтому при взлете и наборе высоты двигатели воздушных кораблей работают на максимальном, фиксированном, взлетном режиме.

КАК РАБОТАЕТ БАШЕННЫЙ КРАН!

В богатом арсенале машин, механизмов и технических сооружений весьма заметное место в производстве занимают подъемно-транспортные устройства, работа которых состоит, главным образом, в преодолении силы тяжести. К ним относятся различные башенные, порталные, козловые, мостовые и другие краны, лифты, шахтные и другие подъемники, домкраты, наклонные транспортеры, подвесные канатные дороги, фуникулеры, а также другие аналогичные устройства.

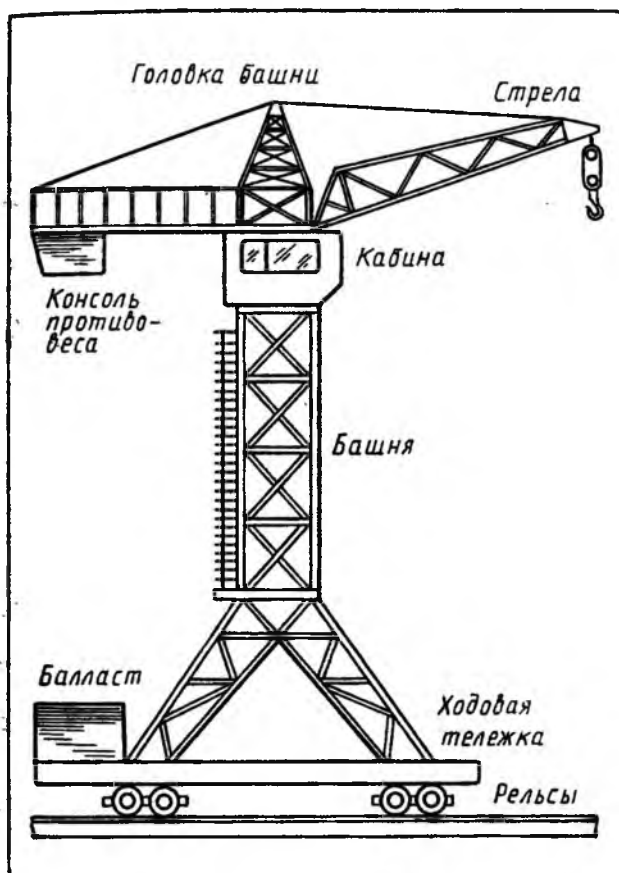


Рис. 40

Рассмотрим в качестве примера, как работает против силы тяжести башенный подъемный кран (рис. 40), наиболее частый гость на строительных площадках.

Как обеспечивается краном подъем груза, перенос его и опускание на место доставки? Какие силы при этом действуют? Какая работа совершается?

Допустим, что нам необходимо поднять бетонную плиту весом $P = 2 \text{ кН}$ на высоту $h = 12 \text{ м}$ на уровень четвертого этажа строящегося здания. Плита находится в покое. Первое, что надо будет сделать при подъеме плиты, — это сообщить ей ускоренное движение вверх и поднять ее скорость от 0 до 1 м/с. Для равномерного подъема плиты достаточно было бы силы, равной ее силе тяжести F_T , а для того, чтобы одновременно с этим сообщить ей ускорение a_1 , необходима дополнительная

сила $F_1 = ma_1$. Значит, в начале подъема до развития скорости 1 м/с на плиту надо действовать силой, большей ее силы тяжести, а именно с силой $F_T + F_1$. После этого движение плиты до конца подъема будет равномерным под действием силы, равной F_T .

Перед достижением высшей точки подъема, допустим, 13 м, сила, действующая на плиту, должна быть снижена, чтобы сообщить плите отрицательное ускорение и обеспечить остановку в высшей точке подъема. Среднюю силу, действующую на плиту в течение всего времени подъема, можно считать почти точно равной силе тяжести плиты, т. е. 2 кН. Соответственно с этим работа A крана по подъему плиты будет равна $A_1 = F_T h_1 = 2000 \text{ Н} \cdot 13 \text{ м} = 26000 \text{ Дж} = 26 \text{ кДж}$.

Теперь для расположения плиты над местом установки стрелу крана надо повернуть, допустим, на 180° . При повороте стрелы плита опишет полуокружность с радиусом, равным расстоянию от оси стрелы до точки подвеса плиты. Сила натяжения троса при этом будет действовать на плиту, но работы против силы тяжести кран совершать не будет, так как движение плиты будет происходить в горизонтальной плоскости, а сила тяжести и натяжения троса будут действовать нормально к горизонту, т. е. вертикально. Конечно, поворот стрелы крана потребует работы, но это уже работа не против силы тяжести, а против сил трения, о чем пойдет разговор ниже.

Последний этап работы крана с плитой — это опускание ее на место установки, допустим, на $h_2 = 1 \text{ м}$ вниз.

В начале операции надо опять вывести плиту из состояния покоя и сообщить вертикальную скорость движения вниз порядка 1 м/с. Затем большую часть расстояния опускать ее равномерно. Наконец, перед достижением нижней точки — замедленно, чтобы при соприкосновении с опорой плита имела скорость, равную нулю.

Опираясь на ранее изложенное, нетрудно сообразить, что в начале спуска плиты сила, с которой трос крана должен удерживать ее, должна быть несколько меньше F_T . Затем, при равномерном движении вниз, — равна F_T и в конце движения несколько больше F_T . В среднем силу действия троса на плиту и здесь можно считать равной F_T , а работа при этом

$$A_2 = F_T h_2 \quad A_2 = 2000 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 2000 \text{ Дж} = 2 \text{ кДж}.$$

А разве совершал в этом случае кран работу против

силы тяжести? Ведь плита-то не поднималась краном, а двигалась вниз!

А все же кран работал против силы тяжести; он «удерживал» плиту от ускоренного падения вниз под действием силы тяжести. Имели место оба условия, необходимые для производства работ, действовала сила, удерживавшая плиту на тросе, изменялось в пространстве положение точки приложения силы.

Оказывается, можно совершать работу против силы тяжести и не поднимая, а опуская груз.

А теперь самостоятельно попробуйте разобраться в следующей ситуации. На трос подъемного крана подвешен за крюк груз весом 4 кН. С какой силой будет растягиваться трос, если груз: а) неподвижен; б) равномерно опускается; в) опускается с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$; г) опускается с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$; д) равномерно поднимается; е) поднимается с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$; ж) поднимается с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$?

НА ЧТО ЗАТРАЧИВАЕТСЯ РАБОТА. КПД

В связи с тем, что мы говорили о работе подъемного крана, возник еще один интересный вопрос. На работу машин мы расходует топливо или электроэнергию. На что же они расходуются? На то ли полезное дело, для которого машины создаются и работают? Или на что-то еще? Ответ на этот весьма важный для современной техники вопрос вы получили еще в VII классе.

Во всех, даже самых совершенных машинах лишь часть расходуемой ими энергии превращается в полезную работу, а остальная — на преодоление различных вредных сопротивлений. Как известно, отношение полезной работы ко всей затраченной называют коэффициентом полезного действия. Вспомним формулу: $\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}}$, где η — коэффициент полезного действия; $A_{\text{п}}$ — полезная работа; $A_{\text{з}}$ — работа затраченная.

Наука и техника стремятся повысить КПД машин и механизмов.

Если учесть наличие вредных сопротивлений в работе подъемного крана, то окажется, что и для равномерного подъема груза потребуется работа, превышающая несколько его вес, умноженный на высоту подъема.

Какими же путями современная техника борется за повышение КПД машин, механизмов и технических

установок, если ограничиваться только механическими средствами? Пути различны, укажем два. Один из них — снижение сопротивления трения путем замены в машинах и сооружениях подшипников скольжения на подшипники качения, о чем уже говорилось. Другой путь — снижение материалоемкости, в частности металлоемкости конструкций и машин.

В этом направлении делается многое. Например, вес тепловозов на единицу их мощности снизился со времени начала их массового выпуска почти в 4 раза с 1298 Н/л.с. до 325 Н/л.с.

Если турбины волжских гидроэлектростанций Самарской и Волгоградской весят 108 Н на 1 кВт мощности, то турбины построенной позже Красноярской ГЭС — лишь 26 Н/кВт, т. е. меньше в 4 раза.

Снижается так называемый «коэффициент тары», т. е. отношение тары к грузоподъемности различных единиц подвижного состава железных дорог. Например, у четырехосных полувагонов и цистерн он равен 0,37, а у восьмиосных полувагонов и цистерн — 0,34. Масса цельнометаллических пассажирских вагонов с более 60 т снижена до 51 т.

Автомобиль ЗИЛ-130 «похудел» на 300 кг.

В этом смысле самым лучшим видом грузового транспорта является трубопроводный. Единственный вид транспорта в стране, где тара не транспортируется вместе с грузом.

Естественно, что транспортировка нефтепродуктов по трубопроводам превышает КПД процесса по сравнению с перевозкой их по железной дороге или морским путем, ибо здесь не производится работа по перемещению тары, т. е. самой нити и устройств трубопроводов. Если при перевозке нефтепродуктов в восьмиосных железнодорожных цистернах на перевозку самих цистерн — тары — затрачивается 25,6% всей производимой работы, на танкерах типа «Крым» — 17,6%, то здесь аналогичная работа равна нулю.

МОЩНОСТЬ

Равная работа может быть произведена за разное по продолжительности время. Например, лошадь вспашет 40 га за 50 дней, а трактор — за день. Электрический шагающий экскаватор за одни сутки совершает работу, которую землекоп выполняет несколько лет.

С ростом техники и объема производства нам приходится за равные отрезки времени выполнять все большие объемы работ. Вот почему сейчас одним из важных, основных направлений технического прогресса является систематический рост единичной мощности и производительности машин.

В школьном курсе физики мы встречались с понятиями КПД и мощности, а понятия производительности машины там не было. Быть может, термин «производительность» и не имеет отношения к физике, механике?

Производительность машины имеет прямое отношение к физическому, а значит, и механическому понятию мощности. Производительность — понятие аналогичное, хотя и не тождественное понятию мощности. Производительность машины есть мощность, выраженная не в единицах работы за единицу времени, а в единицах конкретной продукции за единицу времени.

Вот пример. Производительность электрического шагающего экскаватора ЭШ 100/100, т. е. экскаватора с длиной стрелы 100 м и объемом ковша 100 м³, составляет $16 \cdot 10^6$ м³ угля в год.

Ясно, что за каждый цикл экскавации, за переработку каждого кубометра угля, производится определенная работа. За время выполнения всей работы взят год. Таким образом, и здесь можно вести речь о работе за единицу времени, о мощности независимо от того, что здесь механическая работа заменена конкретной продукцией производства, а за единицу времени избран год, а не секунда. Если в изложенном случае мощность своеобразно выражена через производительность, то в современной технике встречается и противоположное, когда мощностью называют нечто, совершенно не соответствующее механическому понятию мощности. Например, в горной технике есть понятие «мощность горного пласта», которая измеряется в метрах и отвечает техническому понятию толщины слоя угольного пласта.

Как уже известно, в механике за единицу мощности принимается в а т т, соответствующий работе 1 джоуль за 1 секунду. Кроме того, есть единицы, производные от ватта, — киловатт — 10^3 Вт и мегаватт — 10^6 Вт. Однако современная техника пока не отказалась от такой единицы мощности, как лошадиная сила. При необходимости перевода мощности из лошадиных сил в ватты используются соотношения:

$$1 \text{ л.с.} = 736 \text{ Вт или } 1 \text{ л.с.} = 0,736 \text{ кВт.}$$

До сих пор в лошадиных силах измеряется в технике мощность двигателей внутреннего сгорания тепловозов, мотовозов, двигателей дизель-поездов, автодрезин, автомотрисс, двигателей автомобилей, тракторов, тягачей, танков, самоходных установок, судовых и корабельных, авиационных и ракетных двигателей.

Заметим, что лошадиная сила — л.с. — и как единица мощности, и по названию неудачна.

В самом деле, почему за единицу мощности взято 75 кгс · м/с, а не 50 или 90? Разве единицу мощности по смыслу можно назвать силой? Разве мощность для лошади всегда постоянная величина? Сравните обыкновенную беспородную лошадку с тяжеловозом или орловским рысаком — и убедитесь в обратном. По весьма ненадежным подсчетам даже «средняя» лошадь обладает мощностью лишь в 0,6 — 0,7 л.с.

Нельзя считать равноценными и сравнивать механические лошадиные силы с мощностью живых лошадей, даже с учетом коэффициента 0,6. В самом деле, разве могут даже 100 лошадей, впряженных в автомобиль «Жигули», сообщить ему скорость 80 км/ч, хотя общая мощность их и будет равной мощности двигателя автомобиля — 60 л.с.?

Не говоря уже о другом, нельзя согласовать усилия лошадей по времени. Опыт показывает, например, что 8 лошадей, впряженных в повозку, развивают мощность, равную лишь 3,8 мощности одной лошади. Справедлива все же французская поговорка, гласящая, что «сто зайцев не заменят одного слона». Не следует забывать еще об одном обстоятельстве — что мощность может быть и кратковременной, и длительно развиваемой. Я. И. Перельман в уже упоминавшейся «Занимательной физике» приводит такой пример: «На хорошем, ровном шоссе автомобиль в 10 л.с. безусловно предпочтительнее повозки, запряженной двумя живыми лошадьми. Но на песчаной дороге такой автомобиль будет беспомощно увязать, между тем как пара лошадей, способных при нужде развивать мощность в 1,5 и более л.с., благополучно справляется с препятствиями в пути». Добавим, что эти две лошади без особого напряжения могут вытащить из песка и наш застрявший автомобиль, даже с неработающим двигателем.

В современной технике есть понятия конструкционной мощности и мощности, развиваемой машиной в какое-то время, в каких-то условиях. Конструкционной мощностью, которую нередко называют просто мощнос-

тью, называется максимально допустимая, предельная мощность машин, обусловленная ее конструкцией. Во всех справочниках, в паспортах машин, в проспектах на экспонаты выставок всегда указывается именно конструкционная мощность как постоянная, строго фиксированная характеристика машин.

Например, мощность двигателя автомобиля ГАЗ-24 «Волга» — 98 л.с., мощность восьми двигателей электровоза ВЛ-80 — 6320 кВт; мощность Красноярской ГЭС — $6 \cdot 10^6$ кВт, Саяно-Шушенской ГЭС — $6,4 \cdot 10^6$ кВт.

Мощность, фактически развиваемая в каждом конкретном случае машиной или агрегатом, например тяговым двигателем троллейбуса, может изменяться от нуля до конструкционной мощности.

В технике хотя и редко, но имеют место случаи, когда машина в период опытной эксплуатации устойчиво превышает конструкционную мощность. В таких случаях изменяют паспортные характеристики на фактически установленные. Например, для волжских гидростанций Самарской и Волгоградской изготовлены гидротурбины мощностью 105 000 кВт. Фактически в опытной эксплуатации они показали мощность, несколько превысившую 115 000 кВт. В паспорта турбин и в фирменные знаки на турбинах внесли новое значение мощности, а именно 115 000 кВт, с которой они и работают.

МОЩНОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МАШИН

Остановимся еще раз на росте в современной технике единичной мощности, КПД и производительности машин на примерах таких машин, которые необходимы нам для выполнения механической работы.

Для угольной промышленности и горнорудных работ, для гидротехнического и промышленного строительства нам с каждым годом требуется все большее количество и все более мощных автомобилей — самосвалов. Но какой смысл наращивать мощность, грузоподъемность и производительность машин? Оказывается, смысл есть, и большой.

Автосамосвал ЗИЛ-585 грузоподъемностью 3,5 т с карбюраторным двигателем имеет мощность 90 л.с., автосамосвал МАЗ-525 с дизельным двигателем — мощность 300 л.с., самосвал БелАЗ 549 с двигателем ди-

зеля — мощность 850 л.с. и грузоподъемность 75 т. Сделаем сравнение первой машины с последней, имея в виду, что рабочие скорости у них практически одинаковы.

Мощность машины возросла примерно в 9,4 раза, а пропорционально мощности и расход горючего во столько же раз. Грузоподъемность, а пропорционально ей и количество перевозимого груза (угля, руды) возросли в 21,4 раза. Это при том же расходе горючего. Причем дизельные двигатели экономичнее карбюраторных, а дизтопливо дешевле бензина. Учтем и следующее: для одной машины БелАЗ-549 необходимы шофер и помощник, а для двадцати одной машины ЗИЛ-585 необходимо минимум 21 человек. Фронт работ для 21 машины ЗИЛ-585 необходим по меньшей мере в 15 раз больший, чем для одной БелАЗ-549.

Уже изложенных преимуществ мощной машины перед менее мощными достаточно без продолжения сравнения в организационно-техническом плане. КПД мощной машины значительно выше, чем менее мощной. В настоящее время создан автомобиль БелАЗ-Э7521 грузоподъемностью 180 т, собственной массой 120 т, мощностью двигателя 2300 л.с., т. е. свыше 1690 кВт, и скоростью 50 км/ч. Впечатляют и размеры машины. Длина самосвала 14 м, ширина 8 м и высота 6 м. А в конструкторских бюро проектируются еще более мощные машины с грузоподъемностью 230 — 240 т.

Пример из другой области производства. Паровая турбина мощностью 5000 кВт расходует в сутки 90 т каменного угля, или 18 кг на 1 кВт мощности, а турбина мощностью 300 тыс. кВт — лишь 8 кг на 1 кВт мощности. Значит — и здесь с ростом мощности растет КПД машин.

Приведем в заключение сведения о наиболее мощных машинах из разных областей техники и их характеристиках.

Однажды один наш приятель спросил нас: «С каким, по вашему мнению, КПД работает двигатель автомобиля «Волга?» Мы ответили, что, очевидно, с КПД, равным 0,18 — 0,19. «Ошибаетесь, друзья, — ответил он. — У моей «Волги» мощность двигателя 98 л.с., а контрольный расход бензина на 100 км пути по паспорту — 9 литров». Я подсчитал КПД, получается более 50%. Пришлось указать другу на его ошибку. Дело в том, что контрольный расход горючего определяется из расчета, что средняя мощность, развиваемая при этом двигателем легкового автомобиля, будет составлять 35%

конструкционной мощности. Значит, 9 литров бензина на 100 км «Волге» достаточно лишь при развитии ею 0,35 конструкционной мощности. Это всем автомобилистам надо иметь в виду.

ЭНЕРГИЯ

Что такое энергия, вам известно из курса физики VII класса. Тогда вы узнали, что энергия есть мера возможности совершить работу. Известно, что энергия является той общей мерой различных форм движущейся материи, величина которой остается неизменной при любых взаимных ее превращениях.

В физику термин «энергия» ввел в 1807 г. английский физик Томас Юнг.

Энергии присущи следующие признаки. Это, во-первых, единая мера различных форм движения материи; во-вторых, сохранение ее при всех превращениях из одного вида в другой.

Тела, обладающие энергией, способны совершать механическую работу, и наоборот — за счет механической работы тел можно получить энергию. Например, обладающая потенциальной энергией «падающая масса» копра совершает работу забивки свай, и наоборот — механическая работа подъема вверх «падающей массы» копра переходит в потенциальную энергию этой «падающей массы».

Таким образом, механическая работа и энергия эквивалентны. Измеряется энергия в тех же единицах, что и работа, а именно — в джоулях, килоджоулях, килограмм-метрах.

Когда речь идет о механической энергии, имеются в виду две ее формы: энергия потенциальная и энергия кинетическая, или соответственно энергия взаимного расположения тел и энергия движения.

Характеризуя тела с энергетической точки зрения, можно говорить о «механическом состоянии тела», а поскольку энергетические возможности тела определяются его положением по отношению к другим телам и скоростью по отношению к ним, механическое состояние тела и определяют его координатами и скоростью.

Поинтересуемся потенциальной энергией. Мы уже знаем, что это энергия взаимного расположения тел или частей тела, обусловлена она взаимным притяжением тел по закону всемирного тяготения или упругостью де-

формированного или сжатого тела, к примеру сжатой пружины, газа под давлением. Значит, говоря о потенциальной энергии, мы всегда при этом должны иметь в виду как минимум два тела или две части тела, о взаимном расположении и взаимодействии которых и может идти речь.

Вследствие относительно небольших масс, которыми обладают окружающие нас тела, мы не ощущаем притяжения к ним, ибо оно измеряется сотыми долями ньютона, и не говорим о потенциальной энергии по отношению к ним.

Мы хорошо знаем, что все притягивается к Земле, и потому потенциальную энергию поднятых над Землей тел относим именно к Земле. Кстати, абсолютно не нарушая физического смысла, мы с равным успехом можем говорить о потенциальной энергии земного шара по отношению к поднятому над ним телу.

Кинетическая энергия обусловлена скоростью движения тела и измеряется половиной произведения массы тела на квадрат его скорости, т. е. $E_k = \frac{mv^2}{2}$.

Отсюда ясно, что кинетическая энергия одного и того же движущегося тела в разных системах отсчета будет различной, ибо скорость любого тела в различных системах отсчета может быть неодинаковой.

В книге В. Н. Внукова «Физика и оборона страны» есть глава с оригинальным названием: «Можно ли рукой поймать пулю и погибнуть от неподвижной пули?» В ней как раз рассматривается вопрос об относительности скорости пули и ее кинетической энергии. Если скорости самолета и летящей рядом с ним параллельным курсом пули одинаковы или близки по модулю, то взять пулю руками пилот может без каких-либо опасений.

Кинетическая энергия в механических процессах может переходить в потенциальную, и наоборот, тело, обладающее энергией, может совершать механическую работу деформации, перемещения и даже разрушения тел, например молот дробит камень, превращая его в щебенку. Известен шуточный диалог двух охотников: «Ну как бьет твоё новое ружьё?» — «Отлично. Вчера со стены упало — пять горшков разбило!» Чисто физическое событие: ружьё, находясь на какой-то высоте над горшками, обладало потенциальной энергией, которая затем превратилась при падении в кинетическую, и ружьё, обладающее ею, совершило механическую работу разрушения горшков.

Ясно, что тела могут одновременно обладать и потенциальной, и кинетической энергией. Например, летящий самолет обладает потенциальной энергией, обусловленной его весом и высотой полета над Землей. Он обладает и кинетической энергией, обусловленной его массой и скоростью полета. При определенных данных высоты и скорости полета кинетическая и потенциальная энергия могут стать равными.

ГОЛУБОЙ УГОЛЬ

Энергия имеет первостепенное значение в развитии экономики, науки и культуры, и область хозяйства, производящая энергию, — энергетика — является ключевой областью народного хозяйства.

Весьма существенным и все возрастающим по удельному весу является производство электроэнергии за счет механических источников — энергии текущей и падающей воды, т. е. гидроэнергии рек, а также энергии морских приливов и отливов.

Гораздо большее количество энергии, чем реки, несут над территорией нашей страны ветры. По оценке профессора Н. В. Красовского, они могут давать нам до 18 триллионов кВт · ч энергии в год. Однако на пути практического использования этих исполинских энергетических возможностей много технических трудностей. В числе их — неравномерность и непостоянство ветров: резкое снижение скорости воздушных потоков, а значит, их энергии по мере снижения их уровня над Землей, вынуждающее ставить ветровые колеса как можно выше над ее поверхностью; не решены многие конструкционные задачи, возникающие в связи с этим.

В силу изложенного энергия ветра используется у нас в стране пока мало. Очень ценными оказались ветроэлектрические станции — ВЭС — на полярных станциях в арктическом бассейне и в Антарктиде. Там устойчивые ветры обеспечивают сравнительно бесперебойное снабжение полярников электрическим светом и теплом.

Как можно рассчитать и определить мощность ветродвигателя?

Кинетическая энергия воздушного потока E_k , проходящего через поверхность, ометаемую ветровым колесом (рис. 41), $E_k = \frac{mv^2}{2}$, где m — масса воздушного потока; v — скорость воздушного потока.

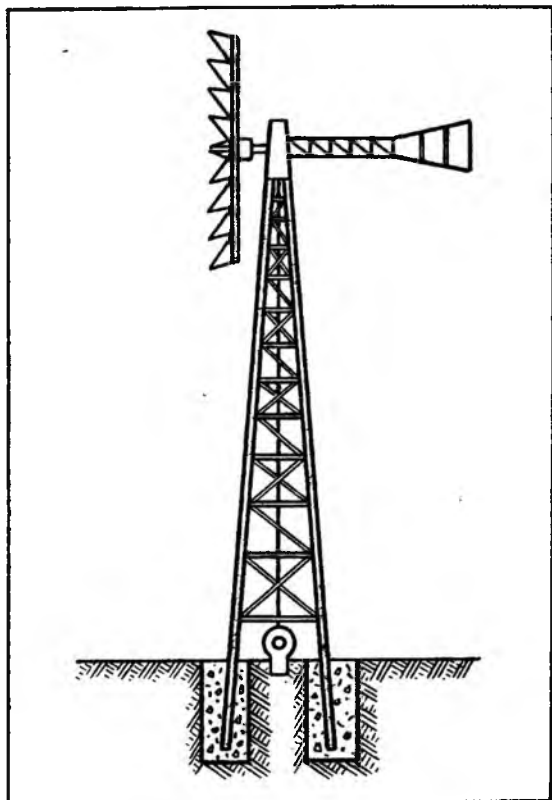


Рис. 41

А мощность воздушного потока равна кинетической энергии потока, проходящего через поверхность за единицу времени:

$$N = \frac{mv^2}{2t}.$$

Масса воздуха, составляющего воздушный поток, проходящий через ометаемую ветровым колесом площадь за единицу времени, равна $\frac{m}{t} = \rho \frac{V}{t}$, где V — объем воздушного потока, т. е. плотность воздуха ρ , умноженная на объем воздушного потока V , протекающего за единицу времени.

Объем воздушного потока равен $V = Sl$, т. е. произведению площади поперечного сечения потока S на длину l , а в единицу времени $\frac{V}{t} = \frac{Sl}{t} = Sv$, т. е. произведению объема воздушного потока на его скорость.

Площадь поперечного сечения потока S равна

$$S = \pi r^2,$$

где r — радиус площади круга, ометаемого лопастями ветрового колеса. Отсюда, сделав элементарные подстановки в формулу $N = \frac{mv^2}{2t}$, получим: $N = \frac{\pi}{2} \rho r^2 v^3$.

А если учесть КПД двигателя η , то в итоге формула мощности ветрового колеса будет выглядеть так:

$$N = \frac{\pi}{2} \rho r^2 v^3 \eta.$$

Если мы хотим получить результат в единицах СИ, т. е. мощность потока в ваттах, все остальные физические единицы должны быть соответственно выражены: ρ — кг/м³; r — м; v — м/с, η — отвлеченное число, коэффициент полезного действия двигателя. Теоретически возможным КПД считается 0,6, практически осуществимым пока 0,35.

Исходя из изложенного, можно зависимость мощности от скорости ветра для ветроколес разного диаметра выразить так: мощность ветроколеса возрастает с ростом диаметра колеса и скорости ветра, приводящего его в движение.

В Балаклаве (Крым) был установлен ветродвигатель Центрального гидроаэродинамического института — ЦАГИ — с диаметром ветрового колеса 30 м. На месте древней Генуэзской сторожевой башни была воздвигнута металлическая ферма, на которой были установлены трехлопастные ветродвигатели.

Пользуясь приведенной формулой расчета мощности ветродвигателя, приняв за плотность воздуха $\rho = 1,22$ кг/м³, легко определить, что при скорости ветра 10 м/с Балаклавский ветродвигатель развивал полезную мощность порядка 150 кВт.

Чтобы ветроколеса вращались с наибольшей скоростью, отдавая максимальную мощность, они всегда поворачиваются против ветра специальным устройством — виндрозами.

Одной из основных трудностей эксплуатации ветросиловых установок является непостоянство ветра по скорости, вызывающее неравномерность вращения ветрового колеса. В лучших ветродвигателях удается снизить колебания их хода в пределах 2,5 — 1,5% от средней скорости вращения.

Обычно на валу ветрового колеса устанавливается электрический генератор, превращающий механическую

энергию вращения ветроколеса в электрическую. Генераторы оборудуют устройствами стабилизации напряжения, на которое рассчитана электросеть, питаемая от силовой установки.

Если энергия, вырабатываемая ветроэлектростанцией — ВЭС, не в любое время суток может быть использована, то на ВЭС устанавливаются аккумуляторные батареи большой емкости, позволяющие использовать эту энергию в другое время, когда из-за слабости ветра ветродвигатель не сможет работать.

Основной вклад в теоретическую разработку и создание конструкций ветродвигателей на основе трудов Н. Е. Жуковского внесли его ученики — В. Н. Ветчинкин, Г. Х. Сабинин, Н. В. Красовский.

Интересна последняя работа Г. Х. Сабинина. Это миниатюрная, портативная ветроэлектростанция мощностью 120 Вт. Она имеет двухлопастный ветродвигатель диаметром 2 м, на валу которого укреплен электрический генератор. ВЭС устанавливается на обычном высоком столбе. Работать двигатель начинает при скорости ветра 3,5 м/с, а полную мощность развивает при скорости ветра 8 м/с. Станция имеет аккумуляторную батарею, которая заряжается во время работы двигателя. Центробежный регулятор установки автоматически изменяет угол атаки лопастей ветродвигателя и обеспечивает равномерность его вращения, поэтому ВЭС не опасен даже ураганный ветер. Аккумуляторная батарея и электрический генератор включены через реле обратного тока, как это делается в пассажирских вагонах поездов, автомобилях, на самолетах. В результате чего генератор заряжает аккумуляторную батарею, но аккумуляторная батарея не может превратить электрогенератор в ветродвигатель, как это обычно и имеет место в схемах с реле обратного тока.

41. Электровоз ВЛ-10, идя резервом, т. е. без состава, расходует на пути 1 км электроэнергию 4 кВт · ч. Каков коэффициент сопротивления движению электровоза, если масса его равна 184 т?

42. Электropоезд ЭР-1 весом 4900 кН, развивая мощность 4500 кВт, расходует на разгон от остановки до скорости 54 км/ч 25 кВт · ч электроэнергии. КПД двигателей 0,88. Определите: а) время, в течение которого достигается эта скорость; б) на каком расстоянии она достигается; в) среднее ускорение движения; г) среднюю силу тяги двигателей; д) средний коэффициент сопротивления движению. Объясните, почему условие за-

дачи требует нахождения именно средних значений большинства из искомым физических величин.

43. Математический маятник массой m и длиной l отведен в сторону до горизонтального положения и отпущен. С какой силой будет натягиваться нить маятника в момент прохождения им положения равновесия?

44. Шахтный подъемник весит 2,5 кН. С каким ускорением движется он в момент, когда сила натяжения тросов, удерживающих подъемник, равна 2 кН? Поднимается или опускается в этот момент подъемник?

45. Какую работу совершает двигатель автомобиля-самосвала при разгрузке, если вес платформы автомобиля с грузом 111,7 кН, длина платформы 4,37 м, а угол наклона ее к горизонту 60° ? Какая мощность развивается при этом, если подъем платформы совершается за 20 с?

46. Учебный самолет для взлета должен иметь скорость 108 км/ч. Разбег совершается 12 с. Масса самолета 2000 кг. Средний коэффициент сопротивления разбегу равен 0,050. Определите мощность двигателя, развивающуюся при разбеге.

47. Электровоз ВЛ-85, развивая мощность 9640 кВт, осуществляет силу тяги 482 кН. На какое расстояние он может провести поезд за 40 мин? Каков коэффициент сопротивления движению, если масса поезда 12 300 т?

Закон сохранения энергии

$$F_x = m a_x$$

$$a_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2 S_x}$$

$$F_x S_x = \frac{m v_x^2}{2} - \frac{m v_{0x}^2}{2}$$

$$S_x = S \rightarrow$$

$$F_x = F \cos \alpha \rightarrow$$

$$F \cdot S \cdot \cos \alpha = \Delta \left(\frac{m v^2}{2} \right)$$

$$A = \Delta E_K$$

$$A = mg(h_1 - h_2)$$

$$A = F_{cp}(x_1 - x_2)$$

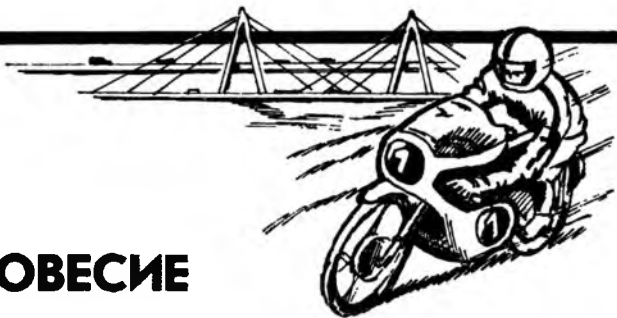
$$A = -(mgh_2 - mgh_1)$$

$$A = - \left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} \right)$$

$$A = -(E_{p2} - E_{p1})$$

$$-\Delta E_p = A = \Delta E_K$$

Консервативные системы
 $E = \text{const}$



РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ И СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНИКА

РАВНОВЕСИЕ, ПОКОЙ И ДВИЖЕНИЕ

Всякие конструкции, любые сооружения должны быть достаточно прочными (не разрушаться под действием нагрузки), достаточно жесткими (деформации не должны нарушать нормальную эксплуатацию сооружений) и достаточно устойчивыми (не опрокидываться в самых различных физических ситуациях).

Какие бы сооружения не строились — телевизионные башни, железнодорожные мосты, плотины гидроэлектростанций, арочные покрытия дебаркадеров вокзалов, своды дворцов спорта, высотные здания, мачты линий электропередач и т. д., — все они рассчитываются на прочность, жесткость и устойчивость.

В учении о равновесии мы рассмотрим общие положения, позволяющие на основании школьных знаний по механике понять, как решается проблема создания технических сооружений.

В реальных физических ситуациях, в технических задачах чаще всего бывает так, что данная деталь или элемент конструкции существенно взаимодействует не с одним, а одновременно с несколькими телами. Значит, и сил, на него действующих, будет несколько. Было установлено, что сила есть величина векторная, а все векторные величины складываются геометрически. Может оказаться, что геометрическая сумма всех сил, действующих на данное тело, будет равна нулю. Тогда будет равно нулю и ускорение тела. Такая ситуация рассматривалась при выяснении физической сущности первого закона Ньютона. Там обращалось внимание на то, что

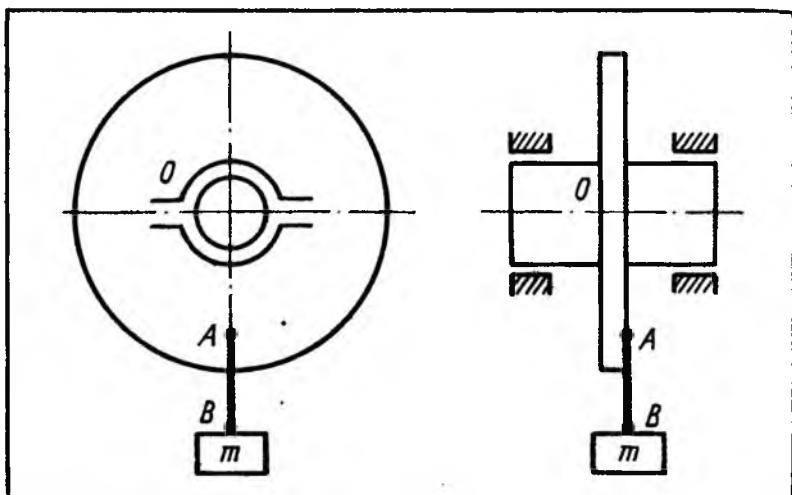


Рис. 42

силы, действующие на тело, взаимно уравниваются. Это как раз и означает, что их геометрическая сумма равна нулю. В таком случае тело либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.

Исследуем более тщательно физическую ситуацию, когда тело будет покоиться. Рассмотрим несколько примеров. Выводы, к которым мы придем, могут быть очень просто проверены экспериментально.

На ось насажен диск так, что может свободно на ней вращаться (рис. 42). Подвесим груз в точке A , находящейся ниже оси, на вертикальном радиусе. Рассмотрим существенные взаимодействия диска с другими телами (рис. 43). Его взаимодействие с земным шаром характеризует сила тяжести, взаимодействие с нитью — сила упругости T_1 ; взаимодействие с осью — сила упругости N . На груз, подвешенный к нити, действуют сила тяжести G_2 (взаимодействия груза с земным шаром) и сила натяжения нити T_2 (сила упругости). На нить действует сила T_1' (взаимодействия с маховиком) и сила T_2' (взаимодействия с грузом). На ось действует сила давления P (взаимодействия с маховиком) и силы N_1 и N_2 (взаимодействия с подшипниками). На подшипники действуют силы давления P_1 и P_2 (взаимодействия с осью).

Каждое из рассмотренных тел находится в состоянии равновесия под действием сил, показанных на рисунке 43. Все силы в соответствии с третьим законом Ньютона можно рассмотреть попарно:

($\vec{G}_1 = -\vec{G}_1'$ приложена к центру земного шара); ($\vec{T}_1 = -\vec{T}_1'$); ($\vec{T}_2 = -\vec{T}_2'$); ($\vec{G}_2 = -\vec{G}_2'$ приложена к центру земного шара); ($\vec{N} = -\vec{P}$); ($\vec{N}_1 = -\vec{P}_1$); ($\vec{N}_2 = -\vec{P}_2$).

Заметим, что силы, составляющие соответствующую пару по третьему закону Ньютона, приложены к разным телам.

Так как имеет место равновесие всех рассмотренных тел, то:

$$\begin{aligned} \vec{N}_1 + \vec{G}_1 + \vec{T}_1 &= 0, & \vec{T}_1' + \vec{T}_2' &= 0, \\ \vec{T}_2 + \vec{G}_2 &= 0, & \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{P} + \vec{G}_3 &= 0. \end{aligned}$$

Подшипники, в свою очередь, взаимодействуют со станиной. Силы этого взаимодействия не показаны.

Изменим ситуацию. Прикрепим нить к точке D и подвесим к ней груз. Равновесие нарушится (рис. 44).

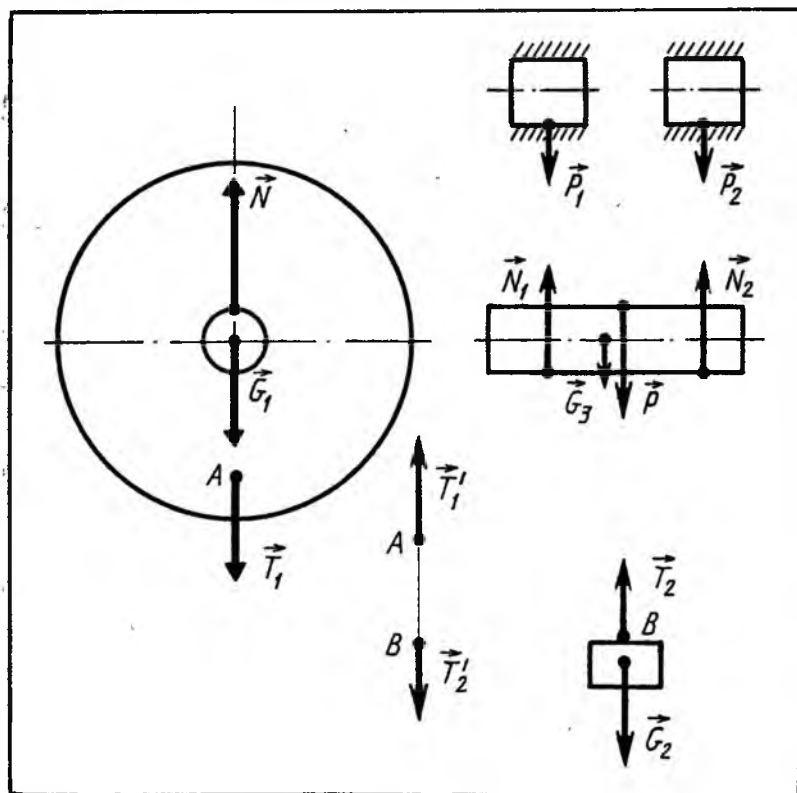


Рис. 43

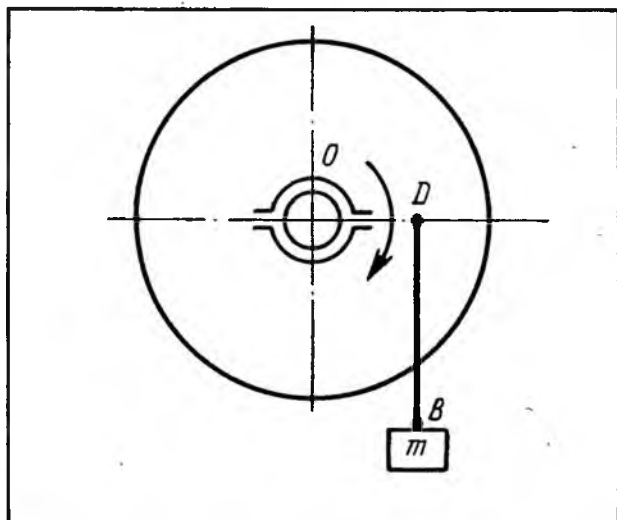


Рис. 44

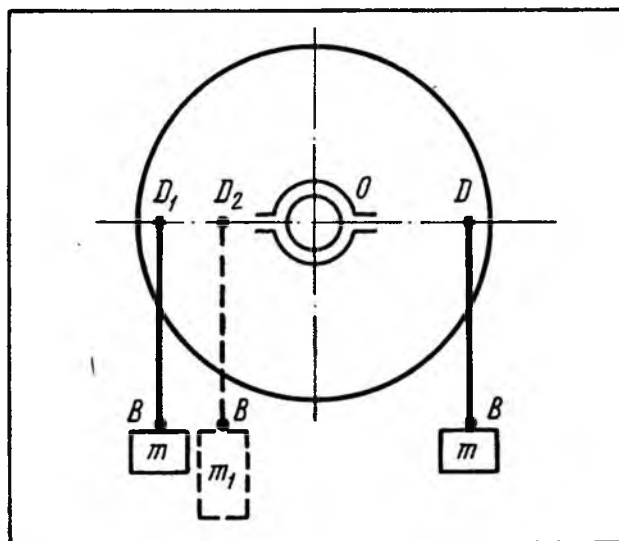


Рис. 45

Действие силы на маховик изменилось, так как точка приложения силы стала другой. Система снова будет находиться в равновесии, когда точка D займет положение на вертикальном диаметре ниже оси вращения.

Можно ли добиться равновесия в случае, если груз подвешен в точке D , находящейся на горизонтальном

диаметре? Очевидно, можно. Для этого необходимо с противоположной стороны подвесить такой груз на таком же расстоянии (рис. 45).

Эксперимент убеждает, что равновесия можно добиться и с помощью другого груза. Если использовать груз большей массы, то точка его приложения приблизится к оси вращения. Груз меньшей массы должен быть прикреплен к точке, более удаленной от оси вращения.

Все это говорит о том, что вращение тела характеризует момент силы (произведение силы на ее плечо — кратчайшее расстояние от линии действия силы до оси вращения). А для равновесия тела необходимо, чтобы:

1) геометрическая сумма всех сил, действующих на тело, была равна нулю;

2) сумма моментов всех сил, действующих по ходу часовой стрелки, должна равняться сумме моментов всех сил, действующих против хода часовой стрелки.

Эти положения взяты в основу расчетов всех статических конструкций и сооружений.

УСТОЙЧИВОСТЬ

Обратимся к физической ситуации, изображенной на рисунке 46.

Если проявить настойчивость и терпение, то можно

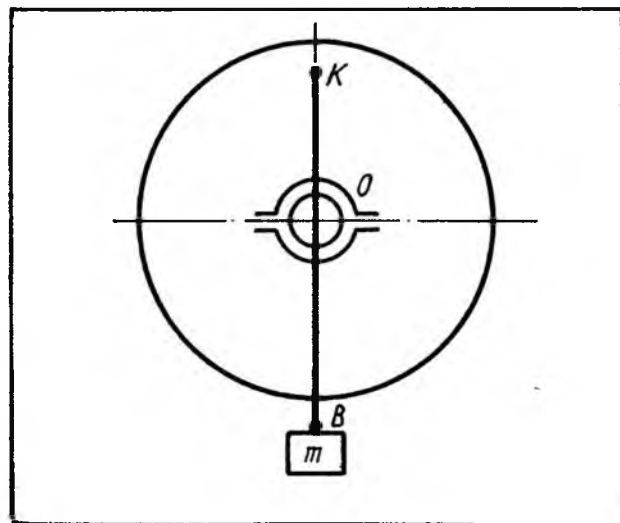


Рис. 46

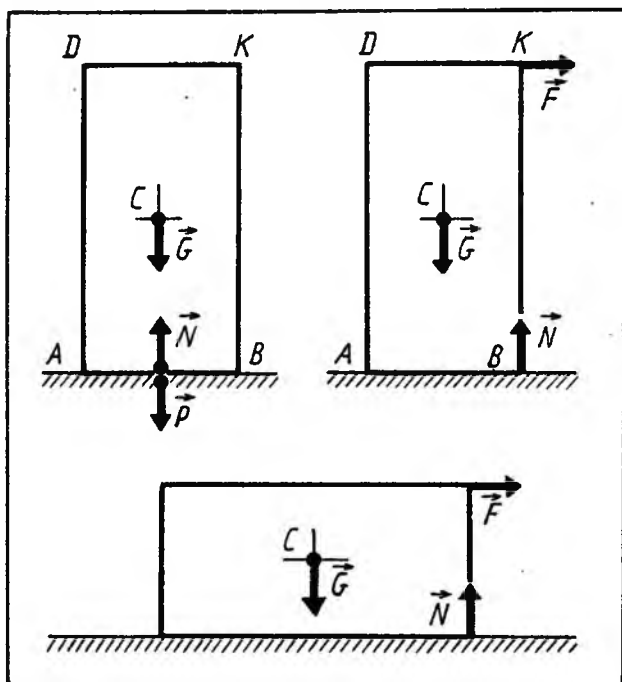


Рис. 47

добиться равновесия системы и в том случае, когда точка крепления нити груза будет находиться строго на вертикальном радиусе выше оси (точка K) (рис. 46).

Однако очевидно, что условия равновесия механической системы в первом (рис. 42) и последнем случае (рис. 46) не тождественны, хотя оба условия равновесия, сформулированные нами в предыдущем параграфе, выполняются.

При креплении нити груза на вертикальном радиусе, ниже оси маховика, система находится в устойчивом равновесии. При отклонении от этого положения равновесия она самопроизвольно возвращается в исходное положение. При креплении нити груза на вертикальном радиусе выше оси маховика система находится в неустойчивом равновесии, так как, нарушив его, она самопроизвольно вернуться в исходное состояние не может. Однако механическая система, не возвращаясь в исходное положение, стремится занять такое положение, когда она будет устойчива.

Если же маховик хорошо отцентрован и сбалансирован, то без воздействия груза он будет находиться в

равновесии в том положении, в каком мы его оставили. Такое положение равновесия называется безразличным.

Для статических конструкций и сооружений важно не только, чтобы они находились в состоянии равновесия, но и чтобы равновесие это было устойчивым.

Жизненный опыт, наблюдения и эксперименты убеждают нас в том, что в обоих случаях механические системы могут находиться в состоянии устойчивого равновесия, однако степень устойчивости равновесия их может быть неодинаковой.

Рассмотрим два примера. Тело в форме параллелепипеда находится в состоянии устойчивого равновесия. Сначала оно лежит на горизонтальной плоскости гранью AB (рис. 47), а затем другой гранью.

Тело взаимодействует с земным шаром и опорной горизонтальной плоскостью. Взаимодействие с земным шаром характеризуется силами тяжести. Сила \vec{G} приложена в центре масс параллелепипеда, сила \vec{G}' приложена к центру земного шара. Взаимодействие с опорой характеризуется силами \vec{N} и \vec{P} . Сила \vec{N} приложена к параллелепипеду и называется реакцией опоры, а сила \vec{P} приложена к горизонтальной плоскости и называется весом параллелепипеда.

Итак, на параллелепипед действуют две силы — \vec{G} и \vec{N} .

По рисунку видно, что выполняются оба условия равновесия и параллелепипед находится в покое (если первоначально он не двигался).

Подойдем теперь на параллелепипед в горизонтальном направлении, т. е. приложим силу \vec{F} в точке K . При определенном модуле силы F параллелепипед начнет опрокидываться относительно точки B . Ясно (эксперимент это убедительно подтверждает), что сила F во втором случае будет значительно большей.

Вывести параллелепипед из состояния устойчивого равновесия во втором случае значительно труднее, т. е. состояние равновесия во втором случае более устойчивое. А во сколько раз? Это можно подсчитать. Назовем момент силы F относительно точки B опрокидывающим моментом, а момент силы G относительно точки B — удерживающим. Чем больше будет удерживающий момент по сравнению с опрокидывающим, тем устойчивее будет тело. Коэффициент, показывающий, во сколько раз удерживающий момент больше опрокидывающего, называется коэффициентом устойчивости.

Из сравнения двух положений устойчивого равновесия параллелепипеда ясно, что во втором случае удерживающий момент больше, а опрокидывающий (при том же модуле силы F) — меньше. Значит, коэффициент устойчивости во втором случае значительно выше. При учете геометрических размеров тела, его массы и модуля силы F подсчитать коэффициент устойчивости не составит труда, а число $n = \frac{k_2}{k_1}$ покажет, во сколько раз второе состояние более устойчиво.

РАВНОВЕСИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ В МЕХАНИЗМАХ И СООРУЖЕНИЯХ

При решении задач на равновесие и устойчивость реальных конструкций и сооружений всегда упрощают их расчетные схемы. В этой упрощенной расчетной схеме отражаются только основные, в данном отношении, свойства, а второстепенные отбрасываются. Физическая ситуация подвергается тщательному анализу, вычленяются существенные взаимодействия, исходя из условий эксплуатации конструкций и сооружений. На схеме объекта изображают действующие силы — это и есть расчетная схема.

Составим расчетную схему бетонной плотины. Для решения вопроса об устойчивости плотины (невозможности ее опрокидывания под напором воды верхнего бьефа) существенными являются геометрические размеры плотины, ее форма и высота уровней воды в верхнем и нижнем бьефе.

Будем считать для простоты, что плотина прямоугольного сечения высотой H и шириной d (рис. 48). Слева от плотины — верхний бьеф, справа — нижний, уровни воды в которых соответственно H_1 и H_2 . Это и есть упрощенная схема сооружения.

Другие конструкционные особенности данного сооружения, за исключением профиля плотины, для решения вопроса об устойчивости не являются столь важными, а поэтому не учитываются и в расчетной схеме не отображаются.

Схема сооружения должна быть дополнена схемой расстановки сил. Она делается на основе анализа физической ситуации взаимодействия плотины с другими объектами. При этом учитывать необходимо снова только существенные взаимодействия.

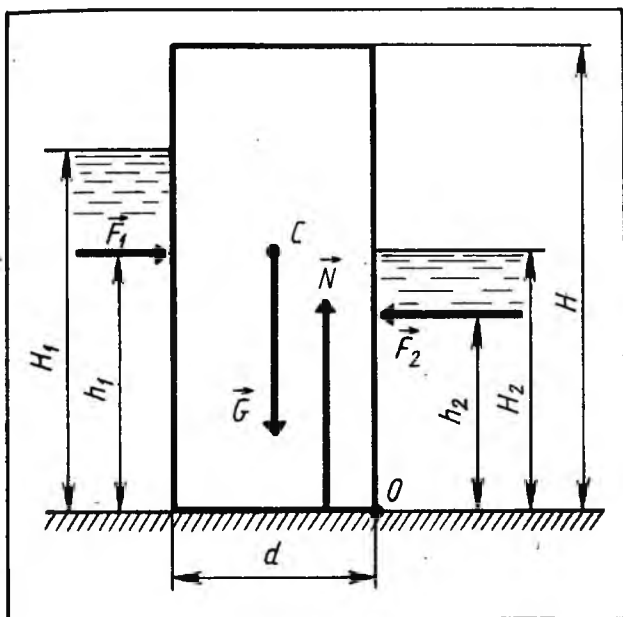


Рис. 48

Плотина взаимодействует с земным шаром (сила \vec{G}), с дном реки (сила \vec{N}), с водой верхнего бьефа (сила \vec{F}_1) и водой нижнего бьефа (сила \vec{F}_2). Сила \vec{G} приложена в центре массы плотины и направлена вниз. Сила \vec{N} немного смещена вправо от вертикали, проходящей через центр массы (в пределе при опрокидывании плотины относительно точки O сила \vec{N} приложена в точке O). Сила \vec{F}_1 действует горизонтально и приложена немного ниже (можно рассчитать, на сколько) средней глубины верхнего бьефа. Она представляет собой силу давления воды ($F = pS$, где p — давление воды, S — площадь передней стенки плотины, на которую вода давит). Давление воды p увеличивается с глубиной, поэтому точка приложения результирующей силы давления смещается вниз. Сила \vec{F}_2 действует горизонтально влево, ее точка приложения определяется аналогично точке приложения силы \vec{F}_1 .

Совокупность схемы сооружения и схемы действующих сил и представляет собой расчетную схему. По этой схеме сразу видно, что опрокидывающий момент создает

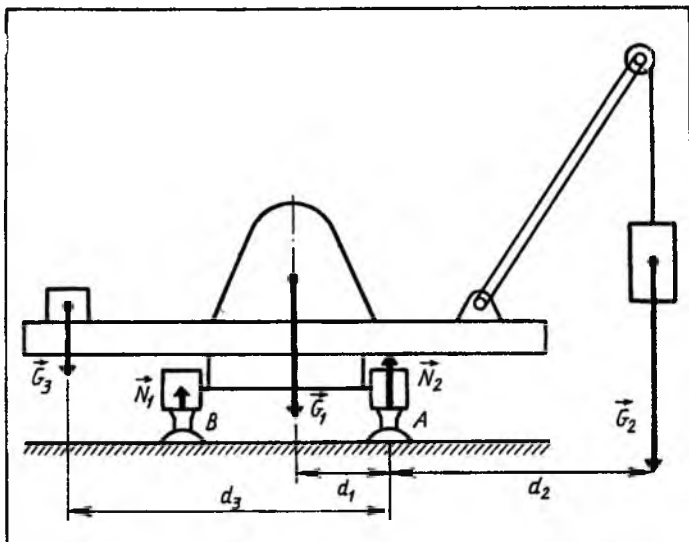


Рис. 49

сила \vec{F}_1 , а удерживающий — силы \vec{G} и \vec{F}_2 . Опрокидывающий момент силы \vec{F}_1 зависит от высоты уровня воды в верхнем бьефе плотины. Удерживающий момент силы \vec{F}_2 зависит от высоты уровня воды в нижнем бьефе. Удерживающий момент силы \vec{G} зависит как от массы плотины, так и от ее ширины. Чем больше ширина плотины, тем больше удерживающий момент силы \vec{G} .

Понятно, что из этих соображений можно рассчитать, какой должна быть ширина плотины при необходимом коэффициенте устойчивости.

Следует заметить, однако, что практически плотины гидростанций имеют в поперечном сечении профиль не прямоугольника, а усеченной пирамиды, ширина основания которой в десятки раз больше ширины верхней грани плотины. Так, ширина основания плотины Нурекской ГЭС на р. Вахше составляет 1,5 км.

Другой пример. Составить расчетную схему для определения массы противовеса нагруженного крана, обеспечивая заданный коэффициент устойчивости k (рис. 49).

На схеме крана выдерживаются геометрические размеры, имеющие существенное отношение к решению

вопроса об устойчивости. Предполагаемое опрокидывание возможно под действием груза \vec{G}_2 относительно точки А (правого рельса).

Геометрические размеры, показанные на рисунке 49, являются существенными.

Конструкционные особенности крана для решения вопроса об его устойчивости являются несущественными.

На устойчивость крана влияют следующие силы: сила тяжести крана \vec{G}_1 (без груза и противовеса), сила тяжести груза \vec{G}_2 , сила тяжести противовеса \vec{G}_3 . В предельном устойчивом положении сила \vec{N}_2 имеет максимальное значение, а сила \vec{N}_1 равна нулю (начало отрыва левого колеса от рельса).

Таким образом, учтены все существенные взаимодействия. Схема крана дополнена схемой расстановки сил. Это и есть расчетная схема, по которой можно определить, какой должна быть сила \vec{G}_3 : ($G_3 = m_3g$; $m_3 = \frac{G_3}{g}$), чтобы был выдержан данный коэффициент устойчивости k .

Опрокидывающий момент относительно точки А создается силой тяжести груза \vec{G}_2 :

$$M_{\text{опр}} = G_2 d_2$$

Момент силы \vec{N}_2 относительно точки А равен нулю, так как нет плеча. Удерживающий момент $M_{\text{уд}} = G_1 d_1 + G_3 d_3$.

Сила \vec{N}_1 в предельном состоянии равна нулю. Значит,

$$k = \frac{M_{\text{уд}}}{M_{\text{опр}}} = \frac{G_1 d_1 + G_3 d_3}{G_2 d_2}, \quad k G_2 d_2 = G_1 d_1 + G_3 d_3, \quad G_3 = \frac{k G_2 d_2 - G_1 d_1}{d_3}$$

Из анализа условий эксплуатации крана следует, что груз \vec{G}_3 должен быть таким и расположен на таком расстоянии, чтобы кран был устойчивым и в нагруженном состоянии, т. е. когда он не поднимает груз ($\vec{G}_2 = 0$).

Проверка на устойчивость крана теперь должна быть выполнена относительно точки В. Расчетная схема при данной физической ситуации немного изменится, так как изменится схема расстановки сил (сила $\vec{G}_2 = 0$), а схема крана, конечно же, остается прежней.

Из рассмотренных примеров видно, что знания ме-

ханики являются необходимыми для решения многих производственно-технических задач.

РАВНОВЕСИЕ И СИЛЫ ТРЕНИЯ

Во многих производственно-технических задачах вопросы равновесия тел решаются с учетом трения. Мы уже говорили о том, что при движении одного тела по поверхности другого имеют место силы трения скольжения. Если взаимного перемещения тел нет, а на тело действует сила, пытающаяся вызвать движение, то на него будет действовать и сила трения покоя. Легко видеть, что сила трения покоя зависит от силы, пытающейся вызвать движение.

Рассмотрим равновесие тел с учетом сил сцепления.

С помощью колодочного тормоза удерживается груз, подвешенный к тросу, перекинутому через неподвижный блок (рис. 50). Колодка тормоза с помощью

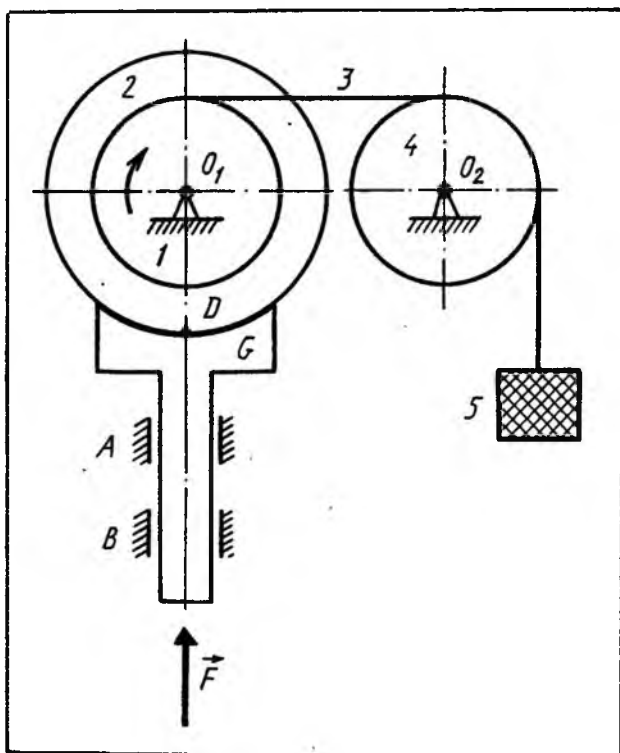


Рис. 50

осевого усилия \vec{F} прижимается к тормозному барабану. В отсутствие тормоза барабан вращался бы в направлении стрелки под действием в конечном счете силы тяжести груза \vec{G} .

Сила трения зависит от модуля силы N , которая, в свою очередь, зависит от модуля действующей силы F . Ясно, что при определенном модуле силы F сила трения может затормозить механическую систему и удерживать ее в состоянии равновесия.

Рассмотрим равновесие трех элементов данной механической системы.

Равновесие блока 4 обеспечивается равенством сил \vec{G} и \vec{T} (сила тяжести груза — \vec{G} , сила натяжения троса — \vec{T}). Равновесие шкива 1, жестко связанного с тормозным барабаном 2, обеспечивается определенным соотношением сил \vec{T} и $\vec{F}_{\text{сц}}$ по условию равенства их моментов относительно точки O_1 . Сила $\vec{F}_{\text{сц}}$ будет во

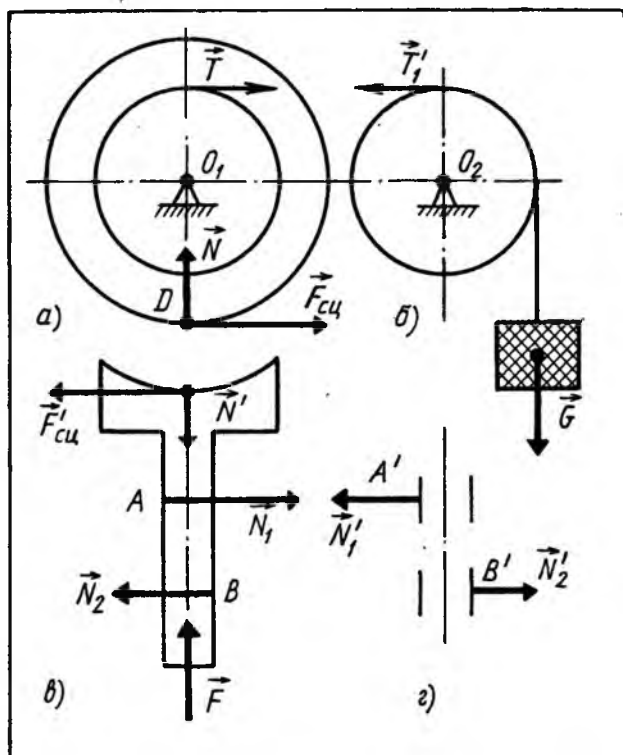


Рис. 51

столько раз меньше силы натяжения троса T , во сколько раз радиус тормозного барабана больше радиуса приводного шкива (рис. 51).

Равновесие штанги колодочного тормоза обеспечивается следующими соотношениями: $F = N'$, $N_1 = N_2 + F_{\text{сц}}'$, $N_2 \cdot AB = F_{\text{сц}}' \cdot AD$ (или $N_1 \cdot AB = F_{\text{сц}}' \cdot BD$).

Направление сил \vec{N}_1 и \vec{N}_2 легко установить, рассмотрев характер взаимодействия штанги колодочного тормоза с подшипниками.

Сопоставляя равенства $N_2 \cdot AB = F_{\text{сц}}' \cdot AD$ и $N_1 \cdot AB = F_{\text{сц}}' \cdot BD$, можно сделать вывод, что $N_1 > N_2$. Достаточно второе равенство разделить на первое, и мы узнаем, во сколько раз $N_1 > N_2$.

Знания законов статики помогут нам переконструировать механическую систему с целью уменьшения действующей силы F . При этом технические возможности механической системы останутся прежними (рис. 52). Здесь при решении этой практической задачи использовано знание знаменитого правила рычага, известного вам еще из курса физики VII класса.

Рассмотренные примеры помогут самостоятельно составить расчетную схему для определения необходимого давления сжатого воздуха в тормозном цилиндре мощного рудничного электровоза (рис. 53). Это давление определяется из условия равновесия рычага OA при затормаживании колеса.

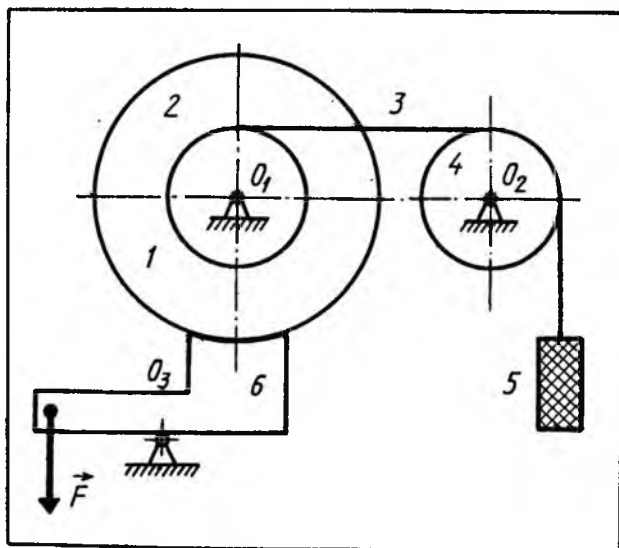


Рис. 52

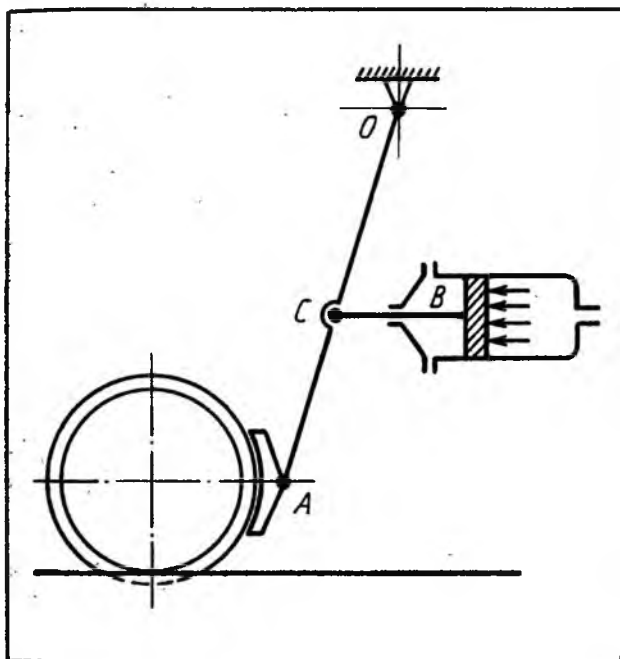


Рис. 53

А вот еще одна расчетная схема (рис. 54). Вертикальная колонна литейного крана верхним концом опирается на подшипник, а нижним — на подпятник. В этой ситуации положение груза (тележки с вагонеткой) относительно точек A и B изменяется. Поэтому расчет должен выполняться на худшие условия. Ясно, что если будет обеспечена работоспособность конструкции при наибольшем удалении тележки от AB , то при других положениях устойчивость системы будет иметь место.

Бывает и так, что возникает необходимость моделировать динамические ситуации, заменяя их статическими.

Для определения силы тяги автомобиля используется стенд с беговыми барабанами и динамометром (рис. 55). С помощью тормозного устройства (гидравлического или электрического тормоза) создают определенное сопротивление вращению беговых барабанов. Динамометр с помощью троса крепится к автомобилю и стойке. Он и показывает силу тяги автомобиля. Скорость движения автомобиля, соответствующую данной силе тяги, рассчитывают по числу оборотов ведущих колес, которое замеряется специальным прибором — тахометром.

А вот установка для определения силы сопротивления воздуха при различных скоростях движения автомобиля (рис. 56). Здесь также моделируется динамическая ситуация на основе относительности механического движения. Сила лобового сопротивления зависит от модуля скорости и не зависит от того, автомобиль ли движется относительно неподвижного воздуха или воздух движется относительно неподвижного автомобиля. Ясно, что в этом случае автомобиль нельзя считать материальной точкой, а форма его оказывает существенное влияние на модуль силы сопротивления.

Скорость движения автомобиля определяется анемометром 5. Анемометр — это прибор, с помощью которого измеряют скорость воздушного потока. Различные скорости воздуха в аэродинамической трубе 2 создаются с помощью вентилятора 4, который приводится во вращение электродвигателем 3. Число оборотов вентилятора регулируется. При большом напоре воздуха подвешенный автомобиль отклонится по направлению скорости воздушного потока. По углу отклонения нитей подвеса можно определить силу сопротивления движению. Одна-

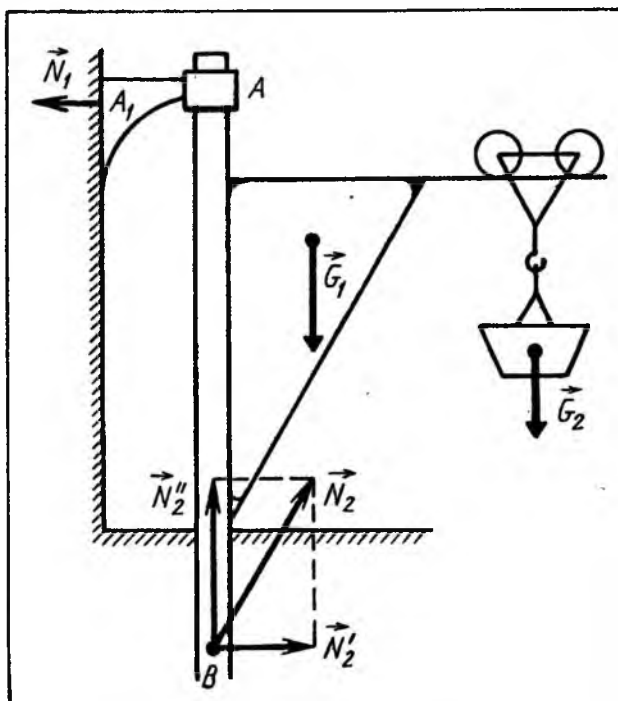


Рис. 54

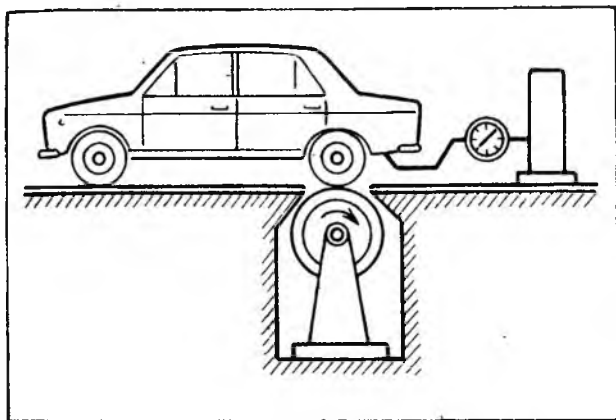


Рис. 55

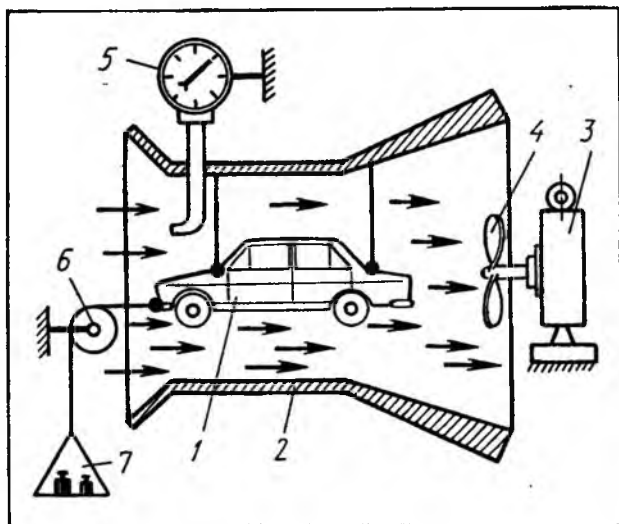


Рис. 56

ко проще ее определить так: добавить на тарелку 7 необходимое число гирь, чтобы нити подвеса снова заняли вертикальное положение. Тогда сила сопротивления и будет равна силе тяжести гирь, помещенных на тарелку.

?

48. Прямоугольный щит AB ирригационного канала может вращаться относительно оси O (рис. 57). При уровне воды, не превышающем допустимого, щит закрыт. Если уровень воды повысится и станет больше допустимого, щит поворачивается вокруг оси и открывает канал. Пренебрегая трением и весом

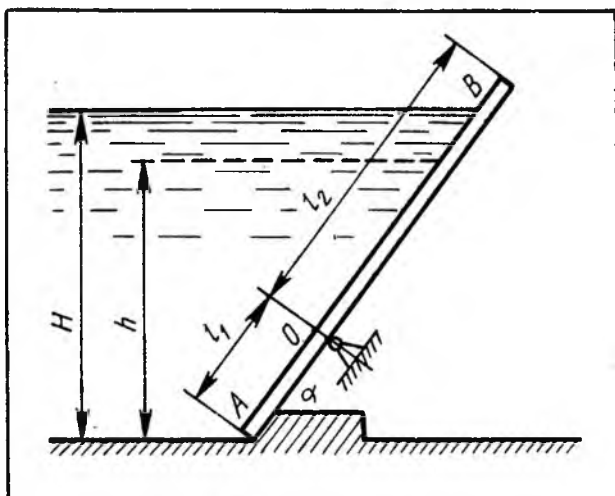


Рис. 57

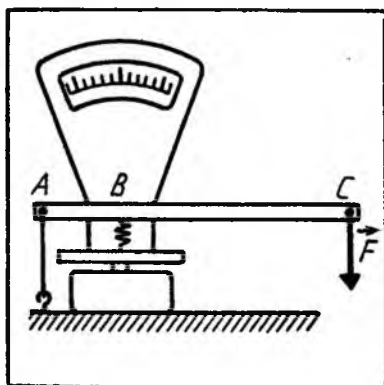


Рис. 58

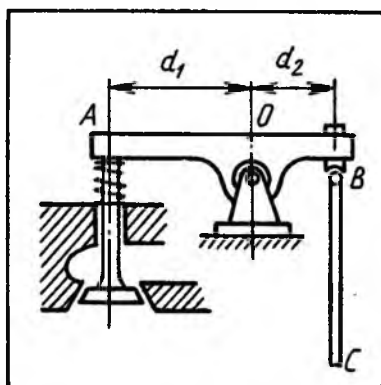


Рис. 59

щита, определите высоту уровня воды, при котором открывается щит.

49. Определите наибольший угол наклона ленты транспортера для подъема мешков с зерном, если максимальный коэффициент трения покоя мешковины о ленту транспортера равен 0,6.

50. Определите силу, действующую на рычаг в точке C (рис. 58), приспособления для проверки упругости клапанных пружин, если весы показывают 20 Н, а геометрические размеры составляют $AB = 150$ мм, $BC = 450$ мм. Весом рычага AC пренебречь.

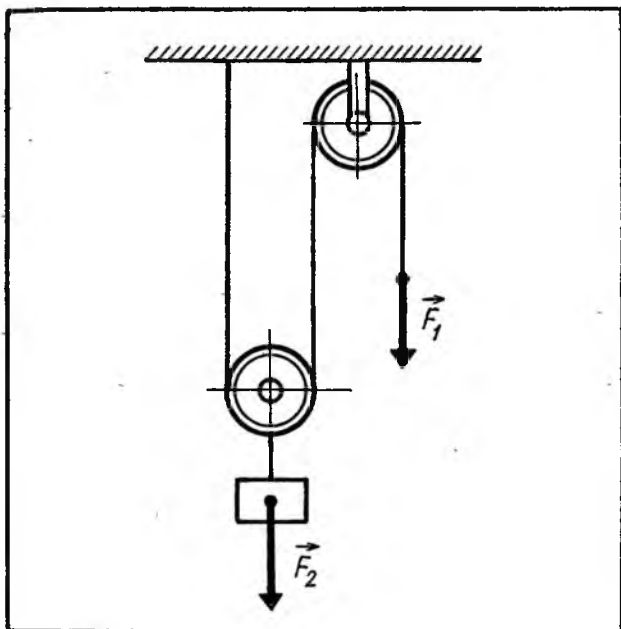


Рис. 60

51. Определите силу, с которой штанга BC (рис. 59) действует на коромысло, если на клапан двигателя действует сила со стороны коромысла, равная 700 Н . Размеры коромысла $OA = d_1 = 7\text{ см}$; $OB = d_2 = 4\text{ см}$.
52. Сравните приложенную силу F_1 с силой тяжести F_2 равномерно поднимаемых с помощью различных блоков грузов (рис. 60). Останется ли это соотношение неизменным при равноускоренном подъеме грузов?
53. Какова крутизна уклона, если поезд проходит его равномерно с выключенными тяговыми электродвигателями тепловоза? Коэффициент сопротивления движению поезда $0,004$.
54. Масса порожнего автомобиля ЗИЛ-150 3900 кг . На заднюю ось опираются 2100 кг общей массы. Масса нагруженного автомобиля 8050 кг , из которых 2085 кг приходится на переднюю ось. На какое расстояние и куда по длине автомобиля смещается центр его тяжести вследствие загрузки? База автомобиля 4 м .

Условия равновесия

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^n F_{ix} = 0$$

$$\sum_{i=1}^n F_{iy} = 0$$

$$M = \sum_{i=1}^n M_i = 0$$

$$\left(\sum M_i = \sum M_i \right)$$



МЕХАНИКА В СОВРЕМЕННОЙ АЭРО- И ГИДРОТЕХНИКЕ

ВЕТЕР В ЛИЦО. ОБТЕКАЕМОСТЬ

«Прокатить с ветерком?» — спрашивает мотоциклист своего приятеля. Но как же можно почувствовать ветерок в солнечный безветренный день? Дело в том, что при быстром движении в безветренную погоду ощущается то же, что и стоя на месте при ветре. Что здесь движется: человек по отношению к воздуху или воздух по отношению к человеку — безразлично, чем еще раз подтверждается относительность движения.

Ведь поведение вновь созданного самолета или автомобиля на больших скоростях проверяется в аэродинамических трубах, где воздух с ураганной скоростью обдувает неподвижно закрепленный самолет или автомобиль.

Важно следующее. Любой опыт показывает, что воздух — атмосфера — оказывает сопротивление движению и оно возрастает с ростом скорости движения. Конечно, при ходьбе и даже при беге оно или незаметно, или малозаметно. Но представьте себе автомобиль «Волга», который, развивая мощность 50 л.с., или 36,8 кВт, идет со скоростью 110 км/ч. Как распределяется развиваемая двигателем мощность на преодоление сил сопротивления движению? Эксперимент показал, что при этом:

5 л.с. (3,68 кВт), или 10% мощности, расходуется на преодоление сил трения в машине;

20 л.с. (14,72 кВт), или 40% мощности, расходуется на преодоление сопротивления дороги;

25 л.с. (18,4 кВт), или 50% мощности, расходуется на преодоление сопротивления воздуха.

А при движении автомобиля с предельно допустимой скоростью, равной 145 км/ч, свыше 70% сожженного бензина идет на преодоление сопротивления воздуха.

Как установлено, сила сопротивления среды движению в ней выражается следующим образом: $F_c = k\rho S_0 v^2$, где F_c — сила сопротивления среды; k — коэффициент сопротивления, зависящий от формы движущегося в среде тела; ρ — плотность среды; S_0 — площадь поперечного сечения контура тела в направлении, нормальном к направлению движения, или, как иногда ее называют, миделевое сечение; v — скорость движения тела относительно среды.

Заметим, что при скоростях, равных или близких к скорости звука (331,5 м/с), сопротивление атмосферы движению тел в ней пропорционально не квадрату, а кубу скорости движения. И наоборот, при скоростях порядка нескольких метров в секунду сопротивление среды пропорционально первой степени скорости движения.

В настоящее время, в период бурного научно-технического прогресса, одним из его направлений является интенсификация производственных процессов, а это связано, наряду с другими их характеристиками, с ростом скоростей, в том числе и в транспортной технике.

Каким же путем добиться повышения скорости движения автомобиля, поезда, корабля, самолета?

Изменить произвольно плотность среды воздуха или воды невозможно. Остается возможность изменения коэффициента сопротивления движению k , который зависит от формы тела, а иногда и снижения S_0 миделевого сечения. Отсюда и рождается понятие «обтекаемой формы», или обтекаемости, т. е. такой формы тела, при которой сопротивление внешней среды движущемуся в ней телу становится минимально возможным. Такой формой, как известно из школьного курса физики, является каплеобразная.

У современных легковых автомобилей как имеющих более высокие конструкционные скорости, чем у грузовых машин, стремление конструкторов к их обтекаемости выражено достаточно ясно. Обтекаемую форму имеет кузов машины, лишенный острых углов, у которого фары утоплены в крылья, сделан обтекаемый капот, спрятано в багажник запасное колесо.

Ярко выраженную обтекаемую форму имеют гоночные автомобили. За счет мощности двигателей и обтека-

емости, т. е. совершенства аэродинамических форм, они достигают огромных скоростей. Так, 23 ноября 1970 г. на Бонневильском солончаковом плато в американском штате Юта гонщик США Гарри Габелич на автомобиле с реактивным двигателем «Блю Флейм» — «Синее пламя» — достиг на дистанции 1 км средней скорости 1014,294 км/ч, поставив этим мировой рекорд скорости на автомобиле. Более того, это первый в истории случай, когда наземный экипаж (автомобиль), управляемый рукой человека, преодолел тысячекилометровый рекорд скорости. В декабре 1979 г. на соляном плато в штате Юта американский гонщик Стен Барретт на автомобиле «Гонг» с реактивным двигателем мощностью 48 000 л.с. (35 300 кВт) достиг скорости 1031 км/ч, т. е. более 286 м/с.

Сравните этот результат с рекордом, поставленным на первых автогонках мира в 1894 г. Он составил тогда 20,5 км/ч!

Интересны некоторые данные машины «Блю Флейм». Масса машины — 2994 кг, длина — 11,61 м и сила тяги двигателя — 5890 кгс, или 57,72 кН.

У самолетов идея обтекаемости выражена еще сильнее. Обтекаемую форму имеет фюзеляж самолета, крылья, хвостовое оперение. Шасси в полете убирается, чем резко снижается миделевое сечение самолета. Установлено, что не убирающееся в полете шасси создает 20 — 25% общего сопротивления атмосфере полету самолета. Все заклепки и швы на фюзеляже и крыльях «зализаны», т. е. не имеют углублений или выступов над их поверхностью. У винтовых самолетов на валах винтов спереди поставлены обтекатели, именуемые коками.

Для снижения сопротивления воздуха винт двигателя многомоторного самолета, прекратившего работу в полете, ставят в так называемое флюгерное положение, при котором лопасти винта устанавливаются ребром в направлении полета.

Растут скорости пассажирского движения на железнодорожном транспорте. Экспресс «Аврора» на линии Санкт-Петербург — Москва ходит со скоростью 160 км/ч. Электровозы ЧС-200 мощностью 8400 кВт ходят по линии Санкт-Петербург — Москва со скоростью 200 км/ч (55,6 м/с). С такой же скоростью по той же линии курсируют пассажирские электропоезда ЭР-200. Поезда-экспрессы расстояние 651 км между Москвой и Санкт-Петербургом проходят всего за 3,5 ч.

Еще большую скорость — свыше 254 км/ч — развила

в 1972 г. в экспериментальных пробегах на Приднепровской железной дороге автомотриса с двумя турбореактивными двигателями, отработавшими свой срок (моторесурс) на самолете Як-40. Большая скорость была ограничена качеством пути.

При таких скоростях, а они продолжают расти, внешние очертания поезда весьма существенны для движения. Вот факты.

Обтекаемая форма лобовой части локомотива по сравнению с плоской при скорости 180 км/ч экономит 150 л.с., или 110,4 кВт мощности локомотива.

Закрытие межвагонных пространств гибкими ширмами при скорости 200 км/ч экономит 500 л.с., или 386 кВт мощности локомотива. И наоборот, любые углубления и выступы на поверхности вагонов поезда требуют дополнительных мощностей из-за усиления сопротивления воздуха при движении.

Так, утопление оконных проемов на 20—25 мм от внешней поверхности стен вагонов при скорости 200 км/ч требует дополнительной мощности локомотива до 5 л.с., или 3,68 кВт, на каждый вагон поезда.

Дело в том, что утопление, или, иначе говоря, углубление, оконного проема вызывает завихрение воздуха, препятствующее движению вагона, а следующий за ним выступ также оказывает дополнительное аэродинамическое сопротивление движению.

Преодоление воздушного сопротивления работающего пантографа электровоза при скорости 200 км/ч требует 120 л.с., т. е. 88,3 кВт мощности локомотива. При скорости 160 км/ч сопротивление атмосферы составляет уже 45% всего сопротивления движению, а при скорости 200 км/ч оно возрастает до 70% общего сопротивления движению поезда.

Яркий пример зависимости скорости движения от k и S_0 являют собою суда на подводных крыльях. Они, как известно, имеют более высокие скорости, чем суда, погруженные в воду по ватерлинию.

Крылья судов такие же по профилю, как крыло и лопасть винта самолета, и разложение гидродинамической силы сопротивления движению в воде аналогично разложению аэродинамической силы на крыле самолета. При движении в воде на крыльях возникает подъемная сила, как и на крыле самолета. Она поднимает корпус судна из воды. При этом резко снижается сопротивление воды движению судна. Но об этом позже.

ПОЧЕМУ САМОЛЕТ СПОСОБЕН ЛЕТАТЬ?

Как объяснить, что самолет, будучи аппаратом тяжелее воздуха, все-таки устойчиво держится в воздухе, летает, а не падает камнем на землю?

На крыле, или, как его называют, «несущей плоскости», самолета при его движении возникает подъемная сила, растущая со скоростью движения самолета. Она объясняется двумя причинами: а) несимметричностью профиля крыла; б) наличием положительного угла атаки крыла.

Представим себе для простоты, что самолет (рис. 61) летит горизонтально, равномерно и прямолинейно. В этом случае на него действуют следующие четыре силы:

а) Сила тяги винта или реактивного потока. То, что она движет самолет вперед, ясно из третьего закона Ньютона: винт самолета отбрасывает воздух назад, а сам винт и самолет вместе с ним перемещаются вперед, или реактивный поток продуктов сгорания топлива вырывается из сопла двигателя назад, а самолет движется вперед.

б) Сила сопротивления воздуха движению самолета, направленная навстречу полету самолета. Так как самолет движется равномерно, эта сила должна быть равной силе тяги двигателя, а равнодействующая двух данных сил должна быть равна нулю.

в) Сила тяжести, действующая вертикально вниз и стремящаяся прижать самолет к земле. Она равна по модулю весу самолета.

г) Подъемная сила крыла, направленная вертикально вверх и противостоящая силе тяжести. Так как самолет движется горизонтально, она равна весу самолета.

Возникновение подъемной силы на крыле при движении самолета объясняется, как мы уже сказали ранее, несимметричностью (асимметричностью) профиля крыла (рис. 62), у которого верхняя поверхность выпуклая, а нижняя, в отличие от верхней, — плоская.

Упрощенно возникновение подъемной силы, обусловленное несимметричностью крыла, можно представить так.

Если обойти по контуру крыла от *A* до *B* сверху, то это расстояние будет больше, чем если пройти от *A* к *B* снизу. Из курса физики вам уже известен принцип неразрывности струи жидкости или газа. Струя воздуха, набегая на переднюю грань крыла *A*, раздваивается:

часть воздушной струи будет обтекать поверхность крыла сверху, а часть снизу, и у задней кромки крыла B потоки воздуха объединятся. Очевидно, что за одно и то же время верхняя часть струи воздуха должна пройти большее расстояние, чем нижняя, чтобы слиться с ней по принципу неразрывности у задней кромки крыла.

Значит, скорость верхней части струи воздуха относительно крыла будет большей, чем нижней. А по закону Бернулли давление жидкости или газа больше там, где скорость меньшая, и меньше там, где скорость бóльшая. Отсюда очевидно, что возникает разность давлений, а значит, и сил давлений на крыло: снизу сила давления на крыло больше, чем сверху. Эта разность сил давлений и дает нам равнодействующую, направленную вертикально вверх и называемую подъемной силой крыла.

Разность давлений на крыло как будто бы и невелика — $2 \cdot 10^3$ Па — $2,5 \cdot 10^3$ Па, но, учитывая площадь крыла, подъемная сила оказывается сопоставимой с весом самолета.

Заметим, что в дополнение к несущей плоскости (крылу) самолета подъемная сила, конечно, значительно меньшая по величине, чем на крыле, возникает вследствие формы фюзеляжа и хвостового оперения самолета.

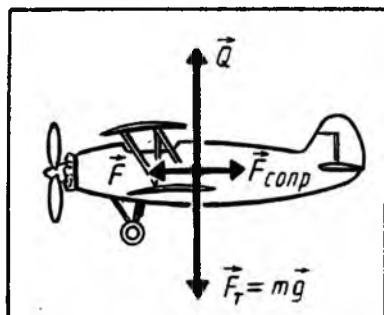


Рис. 61

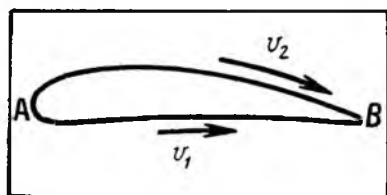


Рис. 62

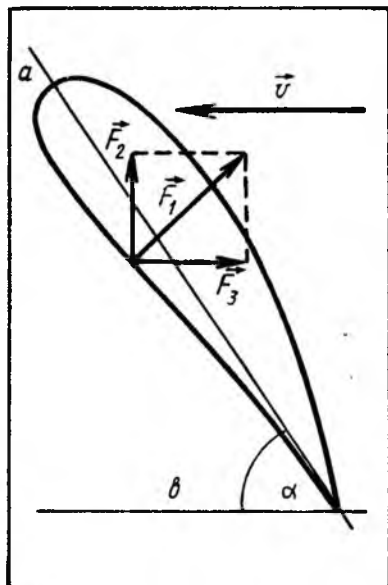


Рис. 63

Хвостовое оперение самолета не только поддерживает в полете хвостовую часть самолета, но и содействует ему совершать эволюцию в воздухе: изменять высоту и направление полета, т. е. осуществлять повороты в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Рост разницы давлений на крыле с ростом скорости самолета легко прослеживается на простом факте разбега самолета при взлете перед отрывом от взлетно-посадочной полосы — ВПП, или, как говорят, от земли. При разбеге самолет движется ускоренно, и по мере роста его скорости возрастает подъемная сила. Отрыв от взлетно-посадочной полосы происходит при достижении самолетом скорости отрыва, в момент, когда подъемная сила начинает превышать вес самолета. Скорость отрыва является одной из важных летно-технических характеристик самолета наряду с другими характеристиками, такими, как вес, грузоподъемность, конструкционная скорость, потолок, дальность полета, длина разбега и пробега, посадочная скорость, и задается конструктору при создании самолета.

Вернемся ко второй причине возникновения подъемной силы на крыле самолета.

Вообще говоря, подъемной силы крыла, обусловленной асимметричностью его профиля, самолету недостаточно. Более того, у самолетов некоторых типов, особенно в боевой авиации, крыло является симметричным или асимметричность его крайне незначительна и явно недостаточна для поддержки самолета в воздухе.

Как же такие самолеты носятся в воздухе да еще забираются на большие высоты?

Наконец, совсем удивительный факт: самолет с асимметричным профилем крыла, демонстрируя фигуры высшего пилотажа, летит горизонтально в перевернутом положении — вверх шасси, или, как называют это в народе, «вверх ногами». Как же самолет в таком полете держится в воздухе? Ведь асимметричность крыла при таком положении самолета создает силу, направленную вниз, прижимающую самолет к земле вместе с силой тяжести, действующей на самолет.

Объясняется это тем, что крыло самолета при подъеме и в горизонтальном полете всегда имеет положительный угол атаки (рис. 63). Углом атаки называют угол α между хордой крыла и направлением полета самолета, а хордой крыла называют прямую, соединяющую переднюю и заднюю кромки крыла.

Набегающий поток воздуха давит на крыло самолета

та с силой \vec{F}_1 , нормальной к нему, как и любая сила давления. Эта сила разлагается на две составляющие: силу лобового сопротивления \vec{F}_3 и подъемную силу \vec{F}_2 . Эта последняя действует на крыло любого самолета как дополняющая подъемную силу, обусловленную асимметричностью крыла, или единственная подъемная сила, обеспечивающая полет самолета с симметричным крылом. В частности, в том случае, когда самолет летит «вверх ногами», его хвост заметно зависает и получается достаточный угол атаки, чтобы удержать самолет в воздухе.

Несколько ранее мы перечислили некоторые из летно-технических характеристик самолетов. Часть из них, очевидно, требует пояснения.

Длина разбега — расстояние, проходимое самолетом от старта до точки отрыва от ВПП.

Потолок — максимальная высота, на которой самолет может совершать равномерный горизонтальный полет.

Посадочная скорость — скорость самолета в момент касания колесами-шасси ВПП при посадке.

Длина пробега — расстояние, проходимое самолетом при посадке от момента контакта с ВПП до остановки самолета.

В современной авиационной технике перед конструкторами ставятся задачи повышения конструкционной скорости самолетов и снижения, если это возможно, скорости отрыва и посадочной скорости самолета, а отсюда меньшей длины разбега и пробега. Последнее избавляет нас от необходимости строить протяженные ВПП, требующие больших затрат на их сооружение и поддержание в рабочем состоянии. Заметим, что сооружение ВПП требует до 60% всех затрат на сооружение аэропорта.

Однако рост взлетного веса самолетов требует увеличения длин ВПП, так же как и роста уже названных скоростей отрыва и посадочных скоростей. Вот почему для сокращения длины разбега перед взлетом на самолеты, например типа Ан-24, ставятся дополнительные двигатели, работающие при взлете. Они же помогают самолету быстрее набрать заданную высоту, или, выражаясь авиационным языком, эшалан полета.

Для сокращения длины пробега при посадке тяжелых самолетов часто используются различные тормозные средства, например тормозные лыжи, к нижней поверхности которых прикрепляют слой рифленой синтетической резины. При торможении гидравлический механизм опускает их и прижимает к поверхности взлетно-посадочной полосы, чем усиливает торможение самолета.

та. Применяются тормозные парашюты, закрепленные в хвостовой части самолета, а также реверсирование винтов у турбовинтовых самолетов, т. е. постановка лопастей винтов в положение, создающее тягу в направлении, обратном движению самолета.

Боевые самолеты корабельной авиации с той же целью совершают посадку на палубу по направлению движения авианосного корабля.

АЭРОДИНАМИКА И РЕАКТИВНАЯ ТЕХНИКА

Как объяснить то, что современная авиация почти вся стала реактивной?

Развитие техники требовало и требует совершенствования авиации, повышения летно-технических данных самолетов и вертолетов, в частности роста скоростей и высоты полета.

Но с ростом скоростей самолета возрастает и сопротивление атмосферы его движению. При скоростях, близких к скорости звука, т. е. к 1200 км/ч, сопротивление воздуха становится пропорциональным кубу скорости: при увеличении скорости полета самолета вдвое сопротивление воздуха возрастает в 2^3 , т. е. в 8 раз. Значит, для равномерного движения самолета и сила тяги двигателя должна возрасти в 8 раз. Но мощность N выражается произведением силы тяги на скорость, а скорость тоже возрастает в 2 раза. В итоге мощность двигателей самолета для удвоения его скорости должна возрасти в $2 \cdot 8 = 16$ раз.

Однако с увеличением мощности двигателей и числа их на самолете возрастает его вес. Более того, количество горючего для такого самолета требуется не равное с прежним, а в 8 раз большее, что также утяжеляет самолет и требует увеличения размера его крыла. В результате рост веса и миделевого сечения самолета сводит на нет постановку большего числа и более мощных двигателей. Вот почему поршневые самолеты, т. е. самолеты с двигателями внутреннего сгорания, оказались не в состоянии летать со скоростями около 800 км/ч, а официальный рекорд скорости для самолета с поршневым двигателем — 755 км/ч — так и остался непревзойденным.

Вместе с тем мощность поршневого двигателя падает с ростом высоты полета. Чем выше — тем реже воздух, тем меньшее количество окислителя — кислорода воздуха — поступает в двигатель при каждом ходе порш-

ня. Требуется на самолет ставить компрессор, который тоже увеличивает вес самолета.

Все изложенные и другие технические соображения заставили авиацию перейти от поршневых к реактивным двигателям. Сбылось научное предвидение Константина Эдуардовича Циолковского, высказанное им в 1930 г. в работе «Реактивный аэроплан», о том, что «за эрой аэропланов винтовых должна следовать эра аэропланов реактивных или аэропланов стратосферы».

Предсказание К. Э. Циолковского сбылось довольно скоро. Уже в феврале 1940 г. советский летчик В. К. Федоров испытывает первый в мире самолет СК-9 с реактивным двигателем конструкции В. П. Глушко. А 15 мая 1942 г. летчик-испытатель Г. Я. Бахчиванджи поднял в небо над землей первый в мире реактивный истребитель БИ конструкции В. Ф. Болховитинова с жидкостным реактивным двигателем.

Современный реактивный авиационный двигатель сравнительно прост в устройстве, легок, экономичен, и коэффициент полезного действия его не убывает, а возрастает с ростом потолка и скорости полета самолета.

Сравним реактивный турбокомпрессорный двигатель, устройство и принцип работы которого известны вам из школьного курса физики, с поршневым авиационным двигателем внутреннего сгорания.

Турбореактивный двигатель, обеспечивающий самолету силу тяги в 2000 кгс (19,6 кН) и скорость 1000 км/ч, имеет вес 700 кгс, или 6860 Н, и расходует в час 2 т керосина, а для достижения таких же результатов поршневой двигатель должен был бы иметь вес в 4000 кгс (39 200 Н) и расходовать за час 2,5 т бензина.

Значит, мы можем поставить на самолет очень мощный, но легкий двигатель, могущий резко улучшить летно-технические характеристики самолета. Так и получилось. Если на поршневом самолете рекорд скорости остановился на 755 км/ч, то сейчас уже есть самолеты, развивающие скорость 4000 км/ч. Если рекорд высоты на поршневом самолете составил 14 575 м, то на серийном самолете типа Е-66 летчик-испытатель Г. К. Мосолов достиг рекордной высоты 34 714 м!

А в сентябре 1977 г. наш летчик-испытатель А. Федотов на реактивном самолете Е-266 М конструкторского бюро А. И. Микояна поставил два мировых рекорда: достиг высоты 37 650 м, а с грузом массой 2000 кг поднялся на высоту 37 080 м. Экспериментальные реактивные самолеты поднимались на высоту свыше 40 км над землей.

Наверное, вы знаете, что есть два вида реактивных самолетов: турбовинтовые и турбореактивные. Что у них общего и различного? Общее то, что у самолетов и того и другого вида реактивные двигатели. А различие состоит в том, что у турбореактивного самолета тяга обеспечивается непосредственно реактивными потоками продуктов сгорания топлива. У самолетов же турбовинтовых тяга реактивного потока приводит во вращение винт самолета через газовую турбину и редуктор.

Отметим, что по развитию реактивной авиационной техники наша страна занимает ведущее место в мире. Проиллюстрируем это хотя бы двумя из многих фактов.

Из 1085 различных мировых авиационных рекордов, официально регистрируемых ФАИ — Международной авиационной федерацией, 478, или свыше 44%, принадлежит нашей стране.

А вот интересное событие в сфере авиации, подтверждающее то же. В сентябре 1957 г. только что вышедший из трассы Аэрофлота самолет Ту-104А совершил перелет из Москвы в Нью-Йорк и обратно. Это был первый в истории перелет через Атлантический океан пассажирского реактивного самолета. Самолет летел через Лондон — Кефлавик (Исландия) — Гусбей (Канада) и был принят в США на военном аэродроме Макгайр в 180 км южнее Нью-Йорка. Таким образом, Атлантический океан был впервые в истории реактивной авиации пересечен именно нашим гражданским реактивным самолетом.

В Лондонском аэропорту самолет вызвал всеобщее восхищение. «Советские самолеты превосходят все!» — писала «Дейли экспресс». «Запад не видел ничего подобного», — заявил английский маршал авиации Жубер де ла Ферт.

В Макгайре все американские авиаспециалисты, познакомившиеся с самолетом, в том числе известный конструктор самолетов и вертолетов И. Сикорский, дали Ту-104А наивысшую оценку. Один из высших офицеров ВВС США Ренеджер, осмотрев самолет, сказал: «Очень хороший самолет. Его нельзя сравнить ни с одним существующим в мире. Это все равно что пересечь с лошади на автомобиль».

Двигатели Ту-104А развивали такую мощность (свыше 75 000 л. с., или 55 200 кВт), что равных им не было в то время ни в одной стране мира ни в военно-воздушных силах, ни тем более в гражданской авиации. Кстати говоря, расстояние от Макгайра до Гусбея Ту-104А

прошел на высоте 13 500 м со средней скоростью 1 070 км/ч, т. е. равной звуковой.

Но, как говорят, «ничто не вечно под луной». Прославленный мировыми авиационными рекордами Ту-104А уже снят с производства и эксплуатации и 13 ноября 1986 г. совершил в г. Ульяновске последнюю в своей авиационной жизни посадку. Появились еще более совершенные самолеты, например Ан-225 «Мрия» — «Мечта» — самый мощный в мире.

Отметим еще три весьма интересных события. В сентябре 1988 г. на Британской международной авиационной выставке в Фарнборо летчик-испытатель Анатолий Квочур на истребителе МиГ-29 впервые в истории авиации выполнил новую фигуру высшего пилотажа «колокол». Самолет остановился и завис вертикально в воздухе с последующим скольжением на хвост. Это вызвало фурор среди зрителей. А в июне 1989 г. на авиакосмическом салоне в Бурже (Франция) наш летчик-испытатель Виктор Пугачев на самолете-перехватчике Су-27 впервые в истории авиации выполнил новую фигуру высшего пилотажа — движение самолета с углом атаки в 120° , практически вперед двигателями, находящимися в хвостовой части самолета. Родилась перед восхищенными зрителями новая фигура высшего пилотажа — «кобра Пугачева». Наконец, в августе 1989 г. выполнил успешный полет первый в мире самолет Ту-155 на криогенном топливе — сжиженном природном газе.

СЮРПРИЗЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Теперь, когда мы воскресили в памяти закон Бернулли, рассмотрим еще одну ситуацию, возникающую на основании этого закона, а именно — что происходит при встречном движении двух поездов, следующих по расположенным рядом параллельным путям (рис. 64).

Давление воздуха на боковые стенки вагонов в межпоездном пространстве $a-a$ становится заметно меньшим давления на внешние боковые стенки вагонов, так как скорости поездов относительно внешних слоев воздуха будут вдвое меньше относительной скорости поездов. Силы давления воздуха в итоге стремятся сблизить поезда друг с другом, создавая опрокидывающий эффект. Силы аэродинамического взаимодействия между поездами возрастают прямо пропорционально квадрату относительной скорости движения поездов.

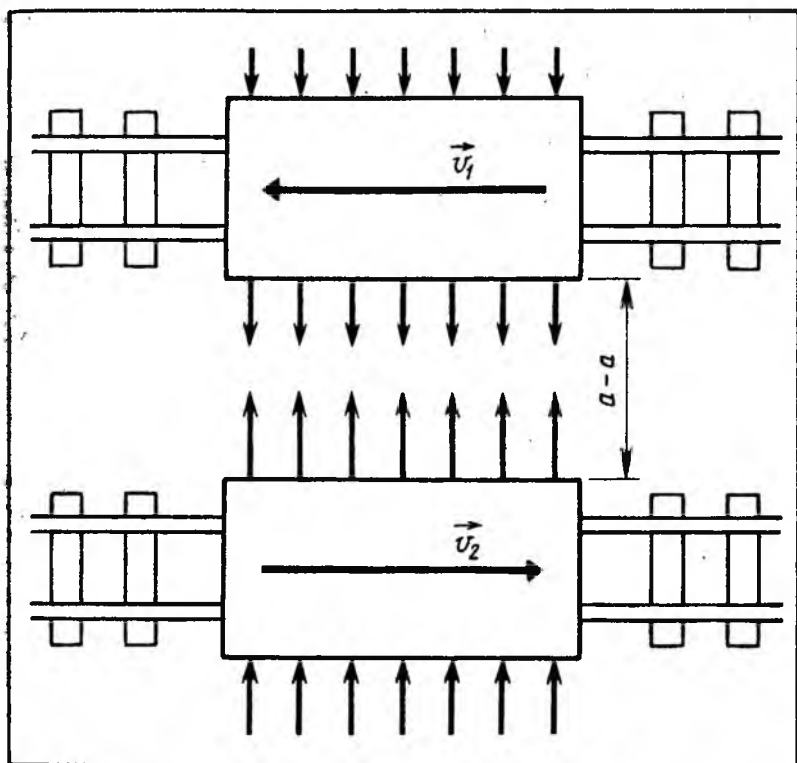


Рис. 64

С этим приходится считаться, ибо при встрече высокоскоростных поездов с относительной скоростью $320 \text{ км/ч} = 160 \text{ км/ч} + 160 \text{ км/ч}$ на боковую поверхность вагона, обращенную к встречному поезду, на уровне середины окон уменьшение давления составит до 1800 Па . При относительной скорости 400 км/ч и расстоянии между осями параллельных путей $4,1 \text{ м}$ аэродинамическая поперечная сила достигает $4 - 4,5 \text{ тыс. кгс}$, или 44 кН , на каждый вагон. Приходится или ограничивать скорости поездов, или увеличивать расстояние между осями параллельных путей.

На вступительных экзаменах в вуз по физике одна абитуриентка решала задачу: «Из пушки выпущен снаряд под углом 30° к горизонту со скоростью 1000 м/с . На каком расстоянии от орудия снаряд упадет на Землю? Соппротивлением воздуха пренебречь».

После того как задача была решена, абитуриентке был задан вопрос: «Почему в задаче требуется пренеб-

речь сопротивлением воздуха?» Она ответила: «Оно не столь велико, чтобы его учитывать. Мы в решении задач часто пренебрегаем чем-то, если это несущественно».

Пришлось объяснить ей, что она ошибается. В большинстве задач такого рода делаются оговорки, что «трение не учитывать». Но происходит это по простой причине: мы не можем учесть сопротивление воздуха, ибо оно, как мы установили, зависит и от размеров тела, и от его формы, и от того, как оно летит — меняет ли свое положение к направлению движения (например, кувыркаясь или нет), и, наконец, от скорости движения.

Что же касается того, заметно ли влияет сопротивление воздуха на полет снаряда или пули, то, скажем прямо, оно влияет, и очень сильно. Рассмотрим такой пример.

Выпустим из винтовки со скоростью 830 м/с трассирующую пулю под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту. По идее, в безвоздушном пространстве пуля, выпущенная под таким углом к горизонту, должна пройти наибольшее расстояние. Зафиксируем с помощью кинокамеры или иным путем фактическую траекторию трассирующей пули и место ее падения. Дальность полета окажется равной примерно 3,5 км. А теперь рассчитаем, какое расстояние должна была бы пройти пуля при отсутствии сопротивления атмосферы, по известной формуле $l = \frac{v^2}{g} \sin 2\alpha$. Оно окажется равным примерно 68,9 км. Разница огромная: 3,5 км и 68,9 км!

Огнестрельное оружие потому и делают нарезным, чтобы увеличить дальность полета пули и снарядов. Проходя по стволу винтовки или орудия, пуля и снаряд приобретают вращательное движение вдоль продольной оси с большой скоростью — до 3600 об/с — и в полете не кувыркаются, сохраняя ось вращения в направлении полета, что обеспечивает в этих условиях наименьшее сопротивление воздуха и наибольшую дальность полета.

У такого вида огнестрельного оружия, как миномет, ствол гладкий, т. е. не имеет нарезки, но устойчивость полета мин обеспечивается наличием у них хвостового оперения.

В первую мировую войну стрельба немцев на расстоянии 120 км по Парижу была осуществлена так. Ствол длинноствольной пушки «Большой Берты» был направлен под углом 52° к горизонту. Снаряд большую часть траектории проходил в стратосфере, достигая высоты до 40 км над Землей, где атмосфера крайне редка,

плотность воздуха весьма мала и сопротивление воздуха ничтожно.

Однако заметим, что даже на высотах более 1000 км над Землей атмосфера еще есть. На движение искусственных спутников Земли и космических кораблей, скорость которых значительно выше, чем артиллерийских снарядов, и составляет порядка 8 км/с, она оказывает влияние. Вращаясь вокруг Земли, спутники испытывают тормозящее влияние атмосферы, теряют скорость и, постепенно снижаясь к Земле, попадают во все более плотные слои воздуха, нагреваются от трения с атмосферой и прекращают свое существование, сгорая в ней. Поэтому если предусматривается возвращение спутника на Землю, то это делается одновременно с использованием соответствующего режима полета (снижения скорости) и средств, обеспечивающих «мягкую» посадку на поверхность Земли.

КОГДА СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА «РАБОТАЕТ»

Народная мудрость гласит: нет худа без добра. Если в некоторых рассмотренных здесь случаях сопротивление воздуха мешало решению ряда задач, то ведь в иных случаях происходит обратное. Именно сопротивление воздуха движению в нем открыло возможность создания и использования такого средства снижения скорости движения, как парашют.

Идея создания парашюта принадлежит Леонардо да Винчи, великому итальянскому ученому и художнику. Он впервые описал его в XV в. Первый прыжок с примитивным парашютом был совершен в 1617 г. Фаустом Веранчио. В 1783 г. французский физик Ленорман на изготовленном им тоже примитивном парашюте совершил демонстрационный спуск с башни парижской обсерватории Монпелье. Изобретателем близкого к современному парашюта является Г. Е. Котельников.

Если парашют Ленормана представлял собою конус из ткани, оклеенный бумагой, к которому на бечевках была прикреплена корзинка из ивовых прутьев, то первый ранцевый парашют, который в 1911 г. устроил Г. Е. Котельников, имел форму полусферы, стропы от которой клямкам были разделены на две группы. Сам парашют помещался в ранце. Купол парашюта имел небольшое полярное отверстие для выхода вытесненного

из купола воздуха. Парашютист мог покинуть самолет и лишь потом раскрыть парашют. Парашют Котельникова стал реальным прообразом современных парашютов во всех странах мира.

Современный обычный парашют имеет купол площадью 52 м^2 , а запасной парашют — 35 м^2 . Первый обеспечивает снижение скорости падения парашютиста в воздухе до $3 - 4 \text{ м/с}$, а запасной — до $5 - 7 \text{ м/с}$. Для сбрасывания грузов используются парашюты, снижающие скорость спуска до 8 м/с . Раскрывается парашют за $2 - 2,5 \text{ с}$.

При падении парашютиста парашют принимает форму полусферы, обращенной вогнутой стороной вниз, т. е. навстречу набегающему потоку воздуха. Экспериментально установлено, что при этом воздух оказывает парашюту максимальное сопротивление.

Возьмем несколько тел равного миделевого сечения, но различных по форме (рис. 65). Направим на каждое из них поток воздуха, равный скорости. Сопротивление потоку со стороны тела, имеющего обтекаемую форму 1, обращенную выпуклостью навстречу потоку, примем за единицу. Тогда сопротивление потоку обтекаемого тела 2, обращенного острием к потоку, будет равно трем; сопротивление сферы 3 — шести; сопротивление полусферы, обращенной выпуклой стороной к потоку 4, — восьми; сопротивление плоской круглой шайбы 5 — девятнадцати, а сопротивление полусферы, обращенной вогнутой стороной к потоку 6, — двадцати четырем.

Каким же будет падение парашютиста по скорости? Есть два вида спуска с парашютом: прыжок обычный и прыжок затяжной.

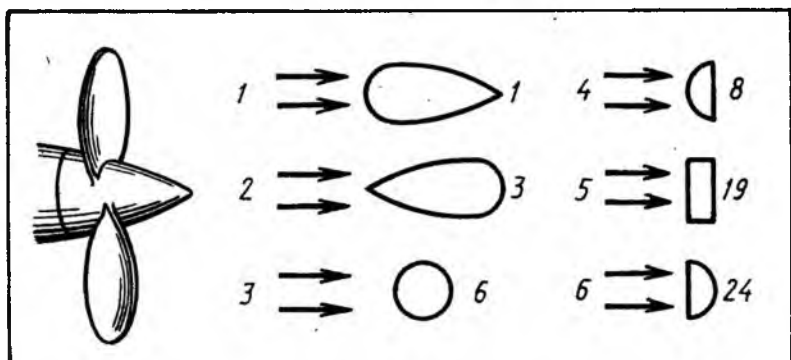


Рис. 65

В первом случае движение по этапам будет следующим. Сразу же при прыжке раскрывается парашют, но движение будет ускоренным, и ускорение будет непрерывно убывать по мере роста скорости падения парашютиста. Дело в том, что сила тяжести парашютиста с парашютом останется на протяжении всего падения постоянной, а сопротивление воздуха будет непрерывно возрастать пропорционально скорости падения. В момент, когда сила сопротивления воздуха станет равной силе тяжести, ускорение снизится до нуля и движение станет равномерным со скоростью порядка 3 — 4 м/с. С такой скоростью и встречается парашютист с землей.

В случае затяжного прыжка происходит следующее. С момента прыжка парашютиста до раскрытия парашюта движение является ускоренным, хотя ускорение движения от $9,8 \text{ м/с}^2$ до нуля убывает медленнее, чем в случае прыжка с раскрытым парашютом.

Сила сопротивления и сила тяжести сравниваются при более высокой скорости падения, зависящей от того, с какой высоты совершен прыжок. Так, при прыжке с высоты 1000 м максимальная скорость падения — 50 м/с, при прыжке с высоты 10 000 м — 81 м/с.

В небольших пределах эти скорости могут колебаться в зависимости от веса парашютиста. Далее, до раскрытия парашюта, падение парашютиста будет равномерным со скоростью, зависящей от начальной высоты падения.

С момента раскрытия парашюта сопротивление падению резко возрастает и начинается замедленное движение с отрицательным ускорением, непрерывно убывающим до нуля. В момент, когда сила сопротивления уменьшается до силы тяжести, вновь начинается равномерное снижение парашютиста, но теперь уже со скоростью 3 — 4 м/с, достаточно малой, чтобы «мягко» встретиться с землей.

Отметим, что при спусках с нераскрытым парашютом среднее ускорение парашютиста никогда не будет равным g и в этом случае оно не превысит половины g . Отсюда и продолжительность спуска будет значительно большей, чем при свободном падении. Например, в мае 1961 г. из вертолета Ми-4 с высоты 320 м выпал Г. Ощепков, один из состава экипажа, он, к счастью, почти не пострадал, но падал вместо 8,1 с в 1,5 раза дольше — 12 с. Другой пример: прыжок из стратосферы с раскрытым парашютом с высоты 14 835 м мастера

спорта Н. И. Долгова продолжался 25 мин вместо 55 с при свободном падении.

Парашюты широко применяются не только при прыжках с самолетов и вертолетов. На парашютах в период Великой Отечественной войны наши маленькие По-2 подвешивали «люстры» при ночных бомбежках переднего края противника для более точной «обработки» его.

Парашюты используются при спусках космических аппаратов на Землю. Так, 12 апреля 1961 г. летчик-космонавт Ю. А. Гагарин использовал парашют при спуске на Землю на последнем этапе снижения космического корабля «Восток» при возвращении из первого в истории человечества космического полета по орбите спутника Земли.

На трех больших парашютах приводнился в Тихом океане отсек экипажа при возвращении с Луны «Аполлона-11» с американской командой в составе Нила Армстронга, Эдвина Олдрина и Майкла Коллинза 24 июля 1969 г.

Как уже упоминалось, тормозные парашюты часто используются при посадке самолетов для снижения длины пробега. На парашютах возвращается на Землю исследовательская аппаратура запускаемых в стратосферу метеорологических шаров-зондов. На парашютах нередко сбрасывают геологам почву и продовольствие в недоступных для посадки воздушных аппаратов местах.

ИЗ ИСТОРИИ АВИАЦИИ

Наблюдая мир живой природы, стремительные полеты птиц, человек давно стал мечтать о возможности летать по воздуху. Известно предание, гласящее, что Петр I в день закладки Петропавловской крепости сказал своему соратнику и помощнику князю Александру Меншикову: «Не мы, а наши правнуки будут летать по воздуху, аки птицы».

Оставляя в стороне многих предшественников, делавших попытки летать, используя силу мускулов, мы вернемся к пионерам авиации, к тем, кто создавал первые самолеты и положил начало осуществлению дерзновенной мечты человечества — летать, как птицы, и даже быстрее птиц и выше птиц.

Один из основателей современной аэродинамики Н. Е. Жуковский на вопрос о том, почему же оказались

неудачными все попытки летать на крыльях, приводимых в движение человеком, отвечал: «Человек полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу разума». Этому и следовали пионеры авиации.

Изобретателем первого в мире самолета был офицер русского военно-морского флота А. Ф. Можайский. 20 июля 1882 г. на военном поле в Красном Селе под Петербургом состоялся первый в истории человечества полет человека на аппарате тяжелее воздуха — самолете А. Ф. Можайского. Пилотом самолета был друг и помощник А. Ф. Можайского первый летчик мира механик И. Н. Голубев.

Самолет имел все основные части, присущие современным самолетам: фюзеляж — деревянную лодку, двигатель — паровую поршневую машину, три четырехлопастных винта, прямоугольное крыло, хвостовое оперение — рули поворота и высоты и колесное шасси.

Самолет пролетел по воздуху расстояние около 300 м и благополучно приземлился. К сожалению, царское правительство России не оценило исторического события и результатов работы А. Ф. Можайского, не оказало ему поддержки и материальной помощи для совершенствования самолета и организации его производства в России.

В 1897 г. был совершен полет во Франции на самолете, построенном Клеманом Адером. Самолет пролетел около 300 м, но при спуске разбился.

В 1898 г. большой самолет построил американец Хайрем Максим. Но, поднявшись после разбега в воздух, самолет накренился набок и упал, так как не обладал устойчивостью в воздухе.

В 1903 г. американцы братья Уилбур и Орвил Райт совершили несколько коротких полетов на самолете собственной конструкции. Самолет развивал скорость порядка 20 км/ч. 17 декабря 1903 г. состоялся первый полет самолета с бензиновым двигателем братьев Райт. Самолет пролетел расстояние 260 м за 59 с, т. е. развил скорость 4,4 м/с, или 15,9 км/ч.

Затем появились самолеты англичанина Арчдикона, французов де Лягранжа и Брелио, а также многих других.

В 1912 г. в России на Русско-Балтийском вагонном заводе в Петербурге был построен первый в мире многомоторный самолет «Русский витязь». Самолет имел четыре двигателя по 100 л.с. каждый. В салоне самолета размещалось восемь человек, кабина пилота была закрытой. На этом самолете была продемонстрирована

возможность полета с одним неработающим двигателем. В 1913 г. «Русский витязь» поставил рекорд продолжительности полета, пролетев до посадки 1 ч 04 мин.

Затем, в 1913 г., появились у нас еще более мощные самолеты «Илья Муромец» и «Святогор». Мощность четырех двигателей «Ильи Муромца» составляла 600 л.с., скорость полета 100 км/ч. Несколько позже создан самолет «Илья Муромец Е», который имел уже скорость 135 км/ч, потолок 4000 м, поднимал груз массой 2,5 т, в том числе 7 человек экипажа, 800 кг бомб. Самолет имел на вооружении 7 пулеметов.

Как уже было отмечено ранее, основоположником нашей отечественной аэродинамики был Н. Е. Жуковский. В 1905 г. Н. Е. Жуковский в работе «О присоединенных вихрях» дал формулу для расчета подъемной силы крыла, являющуюся основой всех аэродинамических расчетов самолета, дал ряд основополагающих работ по аэродинамике, признанных и используемых во всех странах мира. В частности, он автор расчета сил, действующих на крыло; профиля крыла, который так и называют по его имени «профиль НЕЖ»; теории воздушного винта.

Ученик Н. Е. Жуковского С. А. Чаплыгин успешно продолжил работы своего учителя. Он написал работу «О газовых струях», положив начало газовой динамике больших скоростей.

Центром научно-технических авиационных исследований в нашей стране является всемирно известный ЦАГИ — Центральный аэрогидродинамический институт, созданный Н. Е. Жуковским и А. Н. Туполевым, и ставший позже крупнейшим, мирового значения центром авиационной науки.

Исключительный вклад в развитие авиационной техники внесли выдающиеся конструкторы и авиационные деятели: А. Н. Туполев, А. С. Яковлев, С. В. Ильюшин, В. М. Петляков, С. А. Лавочкин, А. И. Микоян, М. И. Гуревич, О. К. Антонов, В. Я. Климов, А. А. Микулин, А. Д. Шведов, Н. Н. Поликарпов, А. А. Архангельский, П. О. Сухой, М. Л. Миль, Н. И. Камов.

Самый большой в мире самолет Ан-124 «Руслан» создан в конструкторском бюро О. К. Антонова. Самолет имеет: 4 двигателя с силой тяги по 225,4 кН, или 23 000 кг, крейсерскую скорость 800 — 850 км/ч, поднимает ввысь 170 тонн груза; имеет максимальную дальность полета 16 500 км, а с грузом 150 т — 4500 км; раз-

меры — длина 65 м и размах крыла 73 м. Экипаж самолета — 6 человек.

«Руслан» поставил целую серию мировых авиационных рекордов. Отметим два из них — абсолютный рекорд грузоподъемности и абсолютный рекорд дальности полета по замкнутому маршруту, ранее поставленные авиаторами США.

В декабре 1984 г. на самолете США С-5А «Гелакси» был установлен мировой рекорд грузоподъемности самолета. Груз массой 110 461 кг был поднят на высоту 2000 м.

В июле 1985 г. на самолете Ан-124 «Руслан» был поднят груз массой 171 219 кг на высоту 10 750 м.

В 1962 г. на реактивном бомбардировщике США Б-52 Н «Стратофортресс» был поставлен абсолютный мировой рекорд дальности полета по замкнутому маршруту. Он продержался четверть века. А в мае 1987 г. был побит экипажем заслуженного летчика-испытателя Владимира Терского, который на самолете Ан-124 «Руслан» за 25 ч 30 мин летного времени прошел по замкнутому маршруту 20 151 км.

Но Ан-124 «Руслан» недолго был самым большим воздушным кораблем в мире. В том же ОКБ им. О. К. Антонова уже создан под руководством конструктора П. Балабуева новый, еще более мощный воздушный гигант, уже упоминавшийся Ан-225 «Мрия» («Мечта»).

Ан-225 имеет 6 мощных турбореактивных двигателей, может принять на борт груз массой 250 т. Общая взлетная масса самолета около 600 т, скорость 700 — 850 км/ч. Самолет способен перевезти груз массой 250 т на расстояние более 4000 км со скоростью 800 км/ч. 21 декабря 1988 г. Ан-225 совершил первый успешный испытательный полет.

Теперь о самом мощном в мире вертолете МИ-26. Он поднимает груз массой 20 т. В салоне его свободно размещаются два мощных грузовых автомобиля. Создан вертолет в конструкторском бюро М. Л. Миля.

Старейший и талантливейший создатель самолетов академик А. Н. Туполев, кроме колоссальных знаний и огромного опыта, обладал изумительной интуицией, инженерным чутьем, тем самым, о котором академик А. Н. Крылов говорил: «Инженер должен верить своему глазу больше, чем любой формуле».

Способность А. Н. Туполева оценивать на взгляд и каждую деталь, и конструкцию в целом изумительна.

Вот о каком случае¹ известно от профессора Г. Х. Озерова.

В 1926 г. в Севастополе Г. Х. Озеров проводил испытания первого нашего торпедного катера, построенного по проекту А. Н. Туполева. При испытаниях катер недодавал против запроектированной скорости около 15 км/ч. Все попытки инженеров, производящих испытание, разгадать причину такого снижения скорости не привели ни к чему. Тогда профессор Озеров дал тревожную телеграмму Туполеву с просьбой выехать в Севастополь. Андрей Николаевич немедленно явился на место испытаний, осмотрел катер и со спокойной своей улыбкой распорядился снять винт. Когда это было исполнено, он взял молоток, поколотил им винтовую поверхность и, оценив на глаз результаты операции, велел поставить винт на место. Катер не только наверстал недостающие 15 км, но и дал лишних 10 км/ч в час против запроектированной скорости. После этого торпедоносцы вошли в серийное производство.

Если у колыбели авиации человек мечтал летать, как птица, то прошла лишь четверть века, как человек в быстроте превзошел самую стремительную из птиц — сокола-сапсана.

Уже в 1920 г. был зарегистрирован рекорд скорости на самолете, составляющий 320 км/ч, а ведь сокол-сапсан не развивает и 315 км/ч. Соколы на самолетах превзошли в скорости соколов из мира птиц.

ПО ВОДЕ НА КРЫЛЬЯХ

Однажды из затона Горьковского завода «Красное Сормово» стремительно вынеслось на Волгу необычное судно. С невиданной для речных судов скоростью оно помчалось по могучей русской реке, словно летя над нею. Это совершало пробный рейс первое в нашей стране судно на подводных крыльях — теплоход «Ракета». Так в 1957 г. было положено начало в СССР строительству и развитию речного и морского судостроения теплоходов на подводных крыльях. Крыло «профиля НЕЖ» нашло новое интересное и плодотворное применение.

Идея создания судна на подводных крыльях воз-

¹ Гумилевский Л. И. Русские инженеры. — М.: Молодая гвардия, 1953.



Рис. 66

ника у русского подданного Шарля де Ламберта, позже, в 1891 г., покинувшего Россию и запатентовавшего свое изобретение за рубежом.

Первые суда на подводных крыльях — небольшие экспериментальные катера с водоизмещением менее 2 т — были построены в 1906 — 1907 гг. в Италии.

Теоретическое обоснование идеи судна на подводных крыльях дали академики М. В. Келдыш, М. А. Лаврентьев, инженер А. Н. Владимиров, а конструктором первых судов явился творческий коллектив под руководством доктора технических наук Ростислава Евгеньевича Алексева.

Наличие крыльев у судна (рис. 66) дает в принципе тот же результат, как и у самолета. На крыльях судна, как уже упоминалось, возникает подъемная сила, которая при достижении им некоторой скорости выталкивает вверх корпус судна из воды. При этом резко снижается сопротивление воды движению в ней судна, ибо теперь корпус его находится над водой, а крыльям, имеющим малые размеры и отличную обтекаемость, вода оказывает весьма малое сопротивление. Вследствие изложенного судно на подводных крыльях, в отличие от «бескрылых», или, как их называют в технике, водоизмещающих судов, развивают очень большие скорости — до 60 — 90 км/ч, или от 16,7 до 25 м/с. Ведь на преодоление сопротивления воды движению корпуса судна и расходуется основная часть мощности силовой установки теплохода, а здесь корпус поднимается над водой.

Иногда спрашивают: «А почему у судов крылья так малы по сравнению с крыльями самолета?» Объясняется это так. Как и у самолета, подъемная сила крыла судна зависит от скорости его движения в воде, площади крыла, коэффициента подъемной силы, определяемого фор-

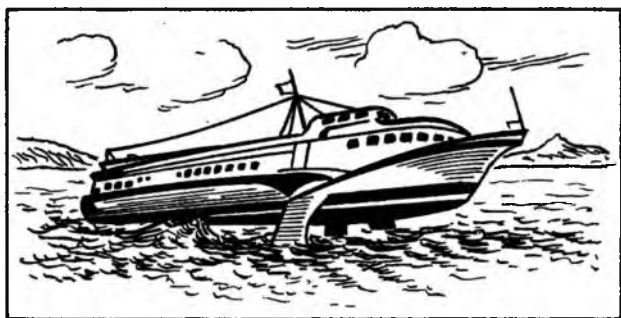


Рис. 67

мой и углом атаки крыла, а также от плотности среды, в которой происходит движение. Вода плотнее воздуха почти в 820 раз, и это создает при движении в ней большую подъемную силу при относительно меньшей скорости и малых размерах крыльев.

Установлено, что при равной скорости равная подъемная сила на подводном крыле судна возникает при площади его примерно в 100 раз меньшей, чем площадь крыла самолета.

После того как «Ракета» успешно слетала в Москву, началось серийное строительство СПК — судов на подводных крыльях, в том числе таких, как «Метеор» (рис. 67), «Комета», «Спутник», морской катер «Невка», газотурбоход «Буревестник» и другие.

Все это комфортабельные скоростные суда. Вследствие того, что при движении корпуса крылатых судов выходят из воды, сопротивление движению оказывают лишь крылья, часть валопроводов и рули, суда вызывают лишь незначительное волнение на воде и могут, не снижая скорости, двигаться по каналам и другим искусственным водоемам.

Россия — одно из ведущих государств по производству и эксплуатации судов на подводных крыльях. Они отлично зарекомендовали себя во многих странах мира, в числе которых Болгария, Великобритания, Италия, Польша, Румыния, США, Германия и другие.

В стране освоено производство судов с автоматически управляемыми подводными крыльями. Первым из таких судов стал газотурбоход «Тайфун». Изменение положения закрылок носового и кормового крыльев в зависимости от уровня волнений резко снижает бортовую и килевую качку судна и улучшает комфортабельность плавания.

НАД ЗЕМЛЕЙ И ВОДОЙ ПО ВОЗДУХУ

В 1927 г. К. Э. Циолковский в своей работе «Сопротивление воздуха и скорый поезд» выдвинул идею использования воздушной подушки для движения поезда. Он писал: «Не нужно, конечно, колес и смазки... Является возможность получить огромные скорости... Моторами накачивается воздух, который распространяется в узкой щели между дном вагона и дорогой. Он поднимает поезд на несколько миллиметров и вырывается по краям основания вагона. Последний уже не трется о полотно, а висит на тонком слое воздуха и испытывает только совершенно незначительное воздушное трение, как летающий предмет».

Идея, впервые выдвинутая К. Э. Циолковским, нашла сейчас конкретное техническое воплощение в судах на воздушной подушке (СВП). В 50-х годах студент одного из московских вузов Геннадий Туркин сконструировал модель судна-амфибии, которое двигалось над землей и над водой.

Конструкция судна на воздушной подушке такова. Судно имеет плоское днище. Двигатель судна приводит во вращение вентилятор, нагнетающий воздух под основание судна, окруженное со всех сторон своеобразным куполом. Под машиной образуется избыточное давление, поднимающее машину в воздух. Часть нагнетаемого вентиляторами воздуха направляется в обращенные назад сопла, через которые он вырывается и по принципу реактивного движения двигает судно вперед. Поскольку воздушная подушка распределяет вес машины на всю площадь основания, давление воздуха на дорогу или водную поверхность составляет весьма малую величину, в пределах 700 — 1500 Н/м². Это в 200 раз меньше давления на дорогу колес автомобиля и в 20 раз меньше давления на почву трактора.

Крайне малое трение позволяет развивать таким судам большие скорости. В 1962 г. у нас было построено пассажирское судно «Нева», затем аппарат «Вихрь», затем был построен и практически эксплуатируется «Зарница» — пассажирский теплоход на воздушной подушке. Судно перевозит пассажиров на местных линиях по малым рекам.

«Зарница» имеет дизельный двигатель мощностью 250 л.с., или 184 кВт, и водометный движитель, расположенный в кормовой части судна. Воздушную подушку создает центробежный вентилятор, подающий под кор-

пус судна 7,4 м³ воздуха в секунду. Водоизмещение судна — 15 т; длина — 22,3 м, ширина — 4 м; площадь воздушной подушки — 65 м²; давление воздуха под судном — 216 кгс/м², или 1120 Н/м². Осадка судна на плаву — 0,6 м; при ходе на воздушной подушке — 0,4 м. Судно имеет скорость 34 км/ч и может проходить без пополнения запаса топлива до 500 км. «Зарница» рассчитана на 48 пассажирских мест, а экипаж составляет всего 2 человека. Судно имеет систему вентиляции и отопления, автомобильный транзисторный приемник и громкоговорящее устройство.

В Англии инженер Коккерел сконструировал судно на воздушной подушке с авиационным двигателем мощностью 435 л.с. (330 кВт). При массе около 4 т судно развивает скорость 60 км/ч и успешно пересекает Ла-Манш.

В 1967 г. на Сормовском заводе в Горьком было построено крупное судно на воздушной подушке «Сормович». Судно имеет двигатель мощностью 1800 л.с. (1325 кВт), скорость 100 км/ч и 50 пассажирских мест. Речной экспресс на воздушной подушке совершает теперь регулярные рейсы по Волге на линии Нижний Новгород (Горький) — Чебоксары и летом и зимой. Ни ветер, ни снегопады его не останавливают.

В 1976 г. было создано судно на воздушной подушке (СВП) типа «Рассвет». Судно предназначено для перевозки 80 пассажиров со скоростью свыше 40 км/ч на морских курортных линиях Кавказа, Крыма, Прибалтики.

В московском ЦКБ «Нептун» под руководством главного конструктора А. С. Кудрявцева создано и успешно испытано новое судно на воздушной подушке — катер «Гепард». На катере двигатель мощностью 115 л.с. (86,4 кВт) от грузового автомобиля «ГАЗ-53», два толкающих воздушных винта и ножи-рули для изменения направления движения, изящная пассажирская кабина на 5 человек. «Гепард» свободно двигается надо льдом водоемов, по заснеженным полям, зимой и летом по речушкам, по тундре и непроходимым топям, развивая скорость до 70 км/ч. Весьма маневрен — свободно разворачивается на месте на 180°, надежен, экономичен по расходу горючего, прост в управлении. «Гепард» может доставлять в труднодоступные пункты почту, продукты, врачей и даже быть пассажирским такси в отдаленных уголках страны.

Сейчас у нас в стране создаются новые СВП большей мощности, скорости, пассажировместительности и комфорта.

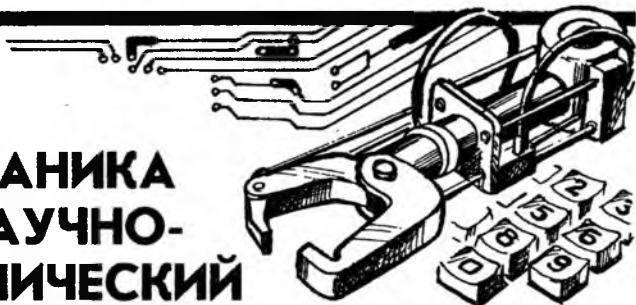
55. Подводная лодка идет под водой со скоростью 35 узлов. Каково сопротивление воды движению лодки, если двигатели при этом развивают мощность 160 000 кВт? Какую мощность должны развивать двигатели при скорости подлодки 20 узлов, если сопротивление воды прямо пропорционально квадрату скорости? Узел — 1,852 км/ч.

56. Какую силу тяги развивает двигатель автомобиля ЗИЛ-117 мощностью 300 л.с. (220,8 кВт) при движении со скоростью 180 км/ч? Какая часть мощности двигателя обеспечивает преодоление сопротивления атмосферы, если коэффициент лобового сопротивления автомобиля $k = 0,25$, миделевое сечение автомобиля $S_0 = 2,4 \text{ м}^2$, а плотность воздуха $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$? При какой скорости автомобиля половину расхода горючего будет поглощать сопротивление атмосферы?

57. Из формулы, определяющей силу сопротивления движению тел в среде $F_c = k\rho S_0 v^2$, определите наименование k , имея ввиду, что все физические величины в ней выражены в единицах СИ.

58. С какой скоростью перемещается горючий газ по газопроводу, если под давлением 75 атм за год в нем перекачивается $32 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ газа? Диаметр нити газопровода 1420 мм.

МЕХАНИКА И НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС И ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ НЬЮТОНА

Неискушенному в науке и технике человеку может показаться, что сейчас, когда бурно развиваются радиоэлектроника, атомная техника и кибернетика, о механике забыли. Однако это не так. Научно-технический прогресс, с одной стороны, требует, а с другой — содействует дальнейшему развитию механики твердых, жидких и газообразных тел и даже механики плазмы.

Имеют ли отношение к научно-техническому прогрессу законы динамики Ньютона, «фундамент всей механики», по выражению А. Эйнштейна?

Для ответа на поставленный вопрос вполне достаточно сослаться на авторитетное мнение видного ученого академика Л. И. Седова: «Все достижения в современной технике, авиации, в ракетной технике, в морском деле и вообще в промышленности основаны на использовании и приложении результатов и методов ньютоновской механики».

В любой отрасли промышленного и сельскохозяйственного производства, в строительстве и на транспорте и в других сферах человеческой деятельности имеются различные машины, приборы и устройства механического действия. Для их создания (проектирования, изготовления) и эксплуатации нужны квалифицированные рабочие-механики, техники-механики и инженеры-механики. Слово «механики» говорит о специфике и направленности их профессиональной деятельности. Откроем справочники профессии среднетехнического и инженерно-технического уровней — всюду можно встретить груп-

ны профессий отделения и факультеты механического профиля. На транспорте, в легкой и пищевой промышленности, в сельском хозяйстве и тяжелой промышленности, в часовой и химической промышленности, при разработке космических аппаратов и медицинских приборов специалисты-механики вносят свой существенный вклад в создание, усовершенствование и эксплуатацию механических устройств.

Принцип действия механического устройства должен быть таким, чтобы с высокой точностью выполнялись необходимые технологические операции. Тенденция развития общественного производства такова, что все больше и больше операций выполняется механизмами и машинами, а функция человека сводится к управлению и контролю. Управлять и контролировать действие механических устройств можно только имея необходимые знания, прежде всего знания физических основ механики.

Любой прибор, любое механическое устройство в материале создает рабочий. В наше время, в век научно-технического прогресса, роль рабочего, для которого решающим оказывается «мысль плюс рука», существенно влияет и на темпы научно-технического прогресса. Очень часто бывает так, что по штатному расписанию рабочий является слесарем, а по характеру своей профессиональной деятельности — слесарем-механиком-конструктором.

Это при изготовлении и испытаниях, а при эксплуатации?

Шагающий экскаватор сегодня обслуживают четыре человека. У машиниста есть три помощника: смазчик регулярно следит за техническим состоянием трущихся сочленений и своевременно их смазывает; первый помощник отвечает за электрооборудование; второй помощник — за механическую часть. Механическая часть очень сложная, а помощник машиниста, заметьте, за нее отвечает.

Представление о машинных агрегатах и динамических процессах, протекающих при их работе, знание методов кинематического и динамического расчетов при создании таких и подобных машин крайне необходимы.

Механика и законы Ньютона, лежащие в основе ее, составляют научную базу одного из направлений научно-технического прогресса; а именно комплексной механизации и автоматизации производственных процессов в промышленном и сельскохозяйственном производстве.

Каждая деталь механического устройства подлежит расчету. При расчете учитываются все действующие на деталь силы, которые выявляются при рассмотрении взаимодействия данной детали с другими, т. е. на основании третьего закона Ньютона.

Форма шатуна двигателя и характер изменений площади его поперечного сечения по длине шатуна не подбирается методом проб и ошибок. Здесь имеет место строгий расчет, в основе которого лежат законы Ньютона. Свойства материала, из которого должна быть изготовлена та или иная деталь, также диктуются расчетом.

Раздел технической механики, который решает эти вопросы, называется сопротивлением материалов.

Очень часто при расчетах реальные тела приходится заменять их физическими моделями, в которых несущественные для решения данной задачи их свойства и характеристики не учитываются. Это упрощает решение многих физико-технических задач.

МЕХАНИКА ИДЕТ В НОГУ С ЖИЗНЬЮ

Невозможно, конечно, перечислить и тем более рассмотреть все основные аспекты роли и достижений механики в современном техническом прогрессе. Поэтому мы коснемся лишь некоторых его сторон, и то лишь в пределах, допускаемых объемом данной книги.

В любой сфере производственной деятельности мы встречаемся с преобразованием форм энергии, а как известно, есть лишь два способа преобразования ее — это теплота и механическая работа. Отсюда следует, что с механическими явлениями, механической работой и законами механики мы встречаемся на каждом шагу.

В промышленности, строительстве, сельском хозяйстве, транспорте и связи, оборонной технике и других сферах деятельности человека растут такие механические характеристики производственных материалов и технологических процессов, как скорость, ускорение, сила, давление, твердость, прочность и другие.

На основе прежде всего законов механики и ее положений создаются, например, мощные самоходные морские подъемные краны, такие, как «Черноморец» грузоподъемностью 100 т или «Богатырь» грузоподъемностью 300 т. В стране построен сверхмощный морской кран «Витязь», грузоподъемность стрелы которого 1600 т, железнодорожные транспортеры грузоподъемнос-

тью до 480 т, имеющие 32 оси и длину около 60 м. Строятся и супертанкеры, например супертанкер водоизмещением 370 тыс. т, имеющий длину 344 м и мощность 37-тыс. л.с., или 27,2 кВт.

Ни в одном из перечисленных примеров нельзя было обойтись без знания и использования различных механических явлений и законов. Более того, в ряде случаев необходимо было произвести исследования, что внесло вклад в механику как науку или в ее дочерние науки, такие, как сопротивление материалов или теория механизмов и машин.

Прежде чем приступить к ознакомлению с тем, как используется и развивается механика в научно-техническом прогрессе, нужно отметить одно весьма важное обстоятельство.

Механическое движение в современной технике используется в двух направлениях: или как **цель производства**, например перемещение в пространстве людей и грузов различными видами транспорта, доставка ракетами ИСЗ на соответствующие орбиты; или как **средство достижения цели**, например движение резца, сверла, фрезы при обработке металла резанием или вращение ротора умформера, т. е. механического преобразователя электрического тока.

Когда механическое движение является целью производственного процесса, техника стремится совершенствовать его. Когда же оно является лишь средством достижения цели, техника стремится избежать его, заменив оборудование производственного процесса таким, которое не требует механического движения. Примеры этого уже приводились в соответствующей главе о трении.

О ГИДРОСТАТИКЕ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ

Широко используются в современной технике теоретические основы таких разделов механики, как гидростатика и гидродинамика.

В самых разнообразных машинах и сооружениях используются гидравлические устройства, т. е. устройства, действующие на основе закона Паскаля о передаче внешнего давления, производимого на жидкость во все стороны с равной силой.

Миллионы автомобилей оборудованы гидравлическими тормозами. Десятки и сотни тысяч экскаваторов,

бульдозеров, кранов, погрузчиков, подъемников, самосвалов и других машин оборудованы гидравлическим приводом.

В огромных количествах используются гидравлические домкраты и гидропрессы в самых различных целях — от напрессовки на вагонные колесные пары бандажей до подъема ферм разводных мостов для пропуска судов на реках.

На основе закона Архимеда и других законов механики развивается судостроение и кораблестроение. Стремительно растут размеры и водоизмещение судов, особенно танкеров.

У нас в стране строится, а частью уже построена серия супертанкеров (рис. 68) водоизмещением 181 200 т. Среди них «Крым», «Кубань», «Кавказ», «Кузбасс», «Кривбасс». Их характеризуют высокий уровень механизации, отличные мореходные качества, совершенство навигационного оборудования. Вот, например, данные супертанкера «Кавказ». Водоизмещение 182 тыс. т, длина корпуса 195 м. Высота с жилой надстройкой 45 м, мощность главных машин 30 тыс. л.с. (22 тыс. кВт), скорость 16 узлов, каждый из трех якорей весит 18 т. Три насоса-гиганта за час перекачивают 10,5 тыс. т нефти. Перевозка нефтепродуктов на танкерах данной серии в 1,8 раза экономичнее, чем на танкерах типа «Рихард Зорге» водоизмещением 49 500 т.

Заметим, что рост водоизмещения судов за последние годы является весьма быстрым. Так, на верфи Сент-Назере (Франция) спущен на воду крупнейший в мире танкер водоизмещением 554 тыс. т!

Ярким выражением прогресса в кораблестроении явилось создание атомного ледокольного флота, имею-

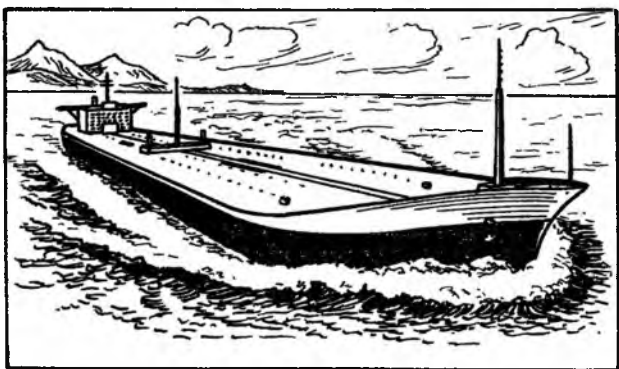


Рис. 68

щего особо важное значение для нашей страны, арктическое полярное побережье которой простирается на десятки тысяч километров.

Интересное сравнение. Если пассажирскому лайнеру, чтобы пройти по Атлантике из Европы в Америку, требуется 5 тыс. т дизельного топлива, то атомный ледокол «Сибирь» израсходовал бы на это лишь 2 кг ядерного горючего.

Иногда спрашивают: почему именно ледокольный флот мы первым вооружили атомными энергетическими установками?

Объясняется это следующими основными соображениями.

Во-первых, атомные ледоколы имеют практически неограниченную автономность плавания. На экономичном режиме работы реакторов ледокол может без перезарядки реакторов обойти вокруг земного шара 8 — 10 раз. Ледоколы с иными энергетическими установками через каждые 1,5 месяца работы вынуждены оставлять караваны судов и возвращаться в порты для пополнения запасов горючего.

Атомная энергетическая установка ледокола имеет биологическую защиту (вода, бетон, броня). При первом выходе в Арктику ледокол «Ленин» вдоль берегов Норвегии «конвоировали» суда и самолеты НАТО, исследовавшие уровень радиоактивной интенсивности воздуха и воды на трассе корабля. После чего в западной печати было опубликовано сообщение о безопасности корабля и возможности его захода в любой порт мира.

Атомные ледоколы сохраняют в работе постоянство водоизмещения, а значит, и посадки, обеспечивающее наилучшие ледокольные качества кораблей, ибо при этом практически не изменяется вес корабля. В отличие от атомных ледоколов, ледоколы с иными энергетическими установками при сжигании в процессе работы сотен и тысяч тонн топлива всплывают, уменьшая осадку, и этим резко ухудшают свои ледокольные качества.

Атомные ледоколы, не имеющие на борту тысяч тонн топлива, имеют за счет резерва в весе более мощные атомные энергетические установки, чем установки ледоколов других типов, а поэтому успешно атакуют льды в 4 — 5 раз большей толщины, чем ледоколы с иными энергетическими установками.

Вследствие большой мощности атомные ледоколы уже удвоили продолжительность арктической навигации, а сейчас решается задача сделать навигацию по Север-

ному морскому пути круглогодовой, освоив высокоширотные, а значит, и менее протяженные трассы для проводки судов.

Атомный ледокол «Ленин» во время выхода на арктические трассы был самым мощным в мире и в 2 раза превосходил по мощности крупнейший американский ледокол «Глетчер», а сейчас атомоходы «Сибирь» и «Россия» превзошли его по всем техническим показателям.

Вот сравнительные данные атомных ледоколов «Ленин» и «Россия».

	Год постройки	Водоизмещение, м	Мощность машин, л.с.	Скорость, уз	Длина, м	Ширина, м
«Ленин»*	1959	16 000	44 000	18	134,1	27,6
«Россия»	1985	23 460	75 000	21	148	30

* Первый в мире атомный ледокол «Ленин» поставлен на вечную стоянку в Мурманске.

Уже сейчас можно привести не один пример, иллюстрирующий выдающиеся мореходные ледокольные качества наших атомных ледоколов.

Выдающийся исторический подвиг совершил атомный ледокол «Арктика». 17 августа 1977 г. он в активном плавании достиг Северного полюса — географической вершины земного шара. Сбылась мечта отважного мореплвателя вице-адмирала С. О. Макарова, который еще в 1897 г. в лекции «К северному полюсу напролом!» утверждал возможность на мощном ледоколе достичь Северного полюса.

Атомный ледокол «Сибирь» первым своим рейсом начал освоение высокоширотных трасс в Арктике с целью сделать Северный морской путь круглогодовой трассой для судов и кораблей нашей Родины. Атомный ледокольный флот продолжает расти. Уже работает в Арктике новый мощный атомный ледокол «Россия». В Санкт-Петербурге на Балтийском судостроительном заводе планируется строительство нового атомного богатыря — ледокола «Урал». Годы эксплуатации атомного ледокольного флота России в суровых условиях Арктики, когда ледоколы сжимались тяжелыми льдами, кренились в штормы на 20 — 25 градусов, с полного хода

ударялись о паковые льды, показали отличные ледокольные качества и механическую прочность корпусов кораблей.

ДАВЛЕНИЕ ВЫСОКОЕ И НИЗКОЕ

В самых различных областях современной техники мы сталкиваемся с понятием механического давления и задачами получения высоких давлений или, наоборот, снижения давлений, производимых на те или иные опоры, а часто поддержания давления в пределах определенных границ.

Например, в производстве искусственных алмазов мы имеем дело с давлениями порядка 1500 — 3000 атм., или $14,7 \cdot 10^6$ — $29,4 \cdot 10^6$ Па. В Японии (г. Осака) на специальной установке достигнуто давление 2 млн. атм., или $19,6 \cdot 10^{10}$ Па, а в вакуумной камере современного ускорителя заряженных частиц давление составляет от 10^{-4} Па до 10^{-6} Па.

Прежде всего с проблемой давления мы встречаемся в технике транспорта. Наши пути и дороги должны надежно выдерживать давление различных транспортных экипажей. К этому ведут два пути. Во-первых, укрепление поверхности дорог, а во-вторых, ограничение веса транспортных средств и распределение его на большую площадь опоры.

Автомобильные дороги укрепляют, создавая им твердое покрытие, например асфальтовое или бетонное. Последнее широко используется на взлетно-посадочных полосах аэропортов и аэродромов.

Рельсовые пути укрепляются применением более массивных рельсов, у которых достаточно широка верхняя грань головки рельса, с соответствующим совершенствованием всего верхнего строения пути, о чем уже говорилось ранее.

Давление, производимое подвижным составом железных дорог на рельсы, не превосходит 23 т на ось, или, считая площадь соприкосновения колеса с рельсом равной $0,5 \text{ см}^2$, достигает $22,5 \cdot 10^5$ кПа.

С целью того чтобы давление на рельсы не превышало нормы, тяжелые железнодорожные транспортеры делают многоосными. Так, например, транспортер грузоподъемностью 480 т опирается на 32 оси.

Колеса легковых автомобилей оказывают на дорогу давление 300 кПа. Грузовые автомобили с целью сниже-

ния давления на дорогу делают многоосными с колесами большого диаметра.

Трактора, которые работают не на дорогах, а на рыхлых почвах, также имеют колеса большого диаметра или ставятся на гусеницы.

Важен учет давления, производимого на грунт, высотными сооружениями. В связи с этим для таких сооружений делают фундаменты с большой площадью опоры. Так, Останкинская телебашня, общий вес которой 55 тыс. т, опирается на фундамент площадью 2037 м² (примерно 30% площади нормального футбольного поля), а из общего веса почти половину — 25 тыс. т — составляет вес фундамента.

НА ГУСЕНИЧНОМ ХОДУ И ПО СНЕГУ

Идея гусеничных движителей и первое ее осуществление принадлежит талантливому русскому изобретателю Ф. А. Блинову. В 1879 г. он изобрел повозку на гусеничном ходу и получил на нее патент «Привилегию на особого устройства вагон с бесконечными рельсами для перевозки грузов по шоссейным и проселочным дорогам». А в 1888 г. Ф. А. Блинов построил первый в мире гусеничный трактор с двумя паровыми машинами, каждая из которых приводила в движение одну из гусениц.

Гусеничный ход стал широко распространяться и сейчас используется на тракторах, тягачах, некоторых сельскохозяйственных машинах, броневых машинах, танках и самоходных артиллерийских установках.

Очень большое значение имеют транспортные средства, создаваемые для движения по бездорожью в труднодоступных районах крайнего Севера, и особенно на наших полярных арктических и антарктических станциях, где дорогами являются ледяные торосы и глубокий снег. В Антарктиде наши полярные станции имеют такие транспортные средства, как снегоходы «Пингвин» и «Харьковчанка».

Снегоход «Харьковчанка» имеет дизельный двигатель мощностью 1000 л.с. (736 кВт) и запас горючего на 1500 км. При массе 35 т он имеет гусеницы шириной 1 м, что позволяет ему преодолевать снежную целину, ледяные торосы, крутые склоны до 30° даже при сильных встречных ветрах. Снегоход имеет теплую кабину площадью 26 м² с мощной отопительной системой, со

специальной герметической обшивкой, позволяющей работать в нем при морозах свыше -70°C .

В кабине есть спальные места, радиорубка, рабочая комната, кухня, сушилка, гардероб, санузел. Размеры машины таковы: длина 8,5 м, ширина 3,5 м, высота 4,2 м. Максимальная скорость 30 км/ч. В задней части снегохода — лебедка для самовытягивания и 100-метровый трос. Снегоход может тянуть за собой прицеп массой 70 т. Проваливаясь в полынью, снегоход не тонет, так как обладает плавучестью и сам с помощью гусениц может выйти на лед.

В тех исключительных случаях, когда появляется необходимость перевозки очень тяжелых, крупногабаритных сооружений, всегда пользуются транспортерами на гусеничном ходу. Именно так от места сборки на стартовую позицию мыса Канаверал доставлялись ракеты «Сатурн-V» для выполнения американской программы «Аполлон». Масса комплекса ракеты была равна 2943 т, высота — 109 м, диаметр — 10 м.

Интересна роль давления в мире животных, в их борьбе за существование. Заяц, производя давление 1200 Н/м^2 , легко убегает от волка по рыхлому снегу, но не спасается от него на насте, так как давление, производимое волком, — $11\,800\text{ Н/м}^2$ — наст выдерживает. Россомаха, производя давление 2160 Н/м^2 , может загнать по рыхлому снегу лося до изнеможения, так как он, производя давление $49\,000\text{ Н/м}^2$, проваливается в рыхлый снег. Россомаха оказывает наименьшее давление на опору из всех хищников массой более 1 кг. Образно выражаясь, охотники говорят так: россомаха лепит свои следы, не погружаясь в толщу снега.

АВТОМАТЫ ЗАМЕНЯЮТ ЧЕЛОВЕКА

В современных условиях развитие науки и техники все в большей степени подчиняется решению важнейших проблем дальнейшего прогресса общества. В частности, предусмотрено на основе использования достижений науки и техники развивать производство и обеспечить широкое применение автоматических манипуляторов — промышленных роботов, встроенных систем автоматического управления с использованием микропроцессоров и микроЭВМ, создавать автоматизированные цехи и заводы.

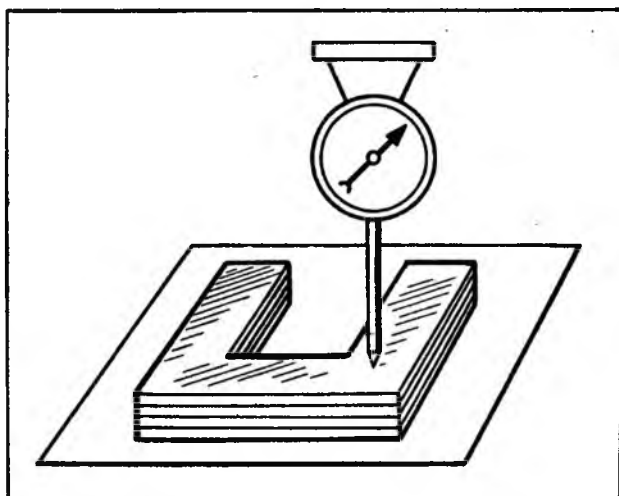


Рис. 69

Промышленный робот — это автономно функционирующая машина-автомат, предназначенная для того, чтобы воспроизводить некоторые функции движения и умственные функции человека во время выполнения основных и вспомогательных производственных операций без непосредственного участия человека. Промышленные роботы своими «механическими руками» способны обслуживать металлорежущие станки, выполнять дополнительные операции возле механического конвейера по перемещению деталей, их распределению, упаковке и т. д.

Робот-контролер выполняет необходимые многочисленные контрольные измерения при изготовлении деталей; робот-водитель садится за руль автомобиля во время его испытаний на полигоне Волжского автомобильного завода; роботы-сборщики работают у автоматических линий часового завода в Сестрорецке, они изготавливают детали и собирают некоторые узлы часов из таких маленьких деталей, что руками человека сделать это очень трудно. Уже созданы или проектируются роботы-шахтеры, роботы-электросварщики, роботы-прессы, роботы-каменщики, роботы-подводники, роботы-пожарники, роботы-космонавты...

Конечно, нетрудно сообразить, что ни один автоматический манипулятор не может выполнить те или иные производственные операции без исполнительных органов, которые, как правило, представляют собой механические устройства. Робот у станка или конвейера, безу-

словно, должен согласовывать свои действия с работой всего технического оборудования в соответствии с требованиями технологического процесса. Действия его «рук», их повороты точно рассчитаны, в каждый момент времени их положение относительно других объектов не может быть произвольным. По всей вероятности, создать автоматический манипулятор без знания физики не представляется возможным.

Для определенного представления читателей о том, как разум человека, его знания помогают в освобождении от монотонного, а потому утомительного труда, рассмотрим некоторый вполне вероятный с точки зрения возможности использования в производственных условиях пример. Представим себе, что необходимо на протяжении всей рабочей смены выполнять контрольные измерения толщины П-образных сердечников трансформаторов с помощью индикатора часового типа (рис. 69). Эта операция не требует больших затрат физических усилий, но она является монотонной, требует постоянного внимания и зрительного напряжения, а по-

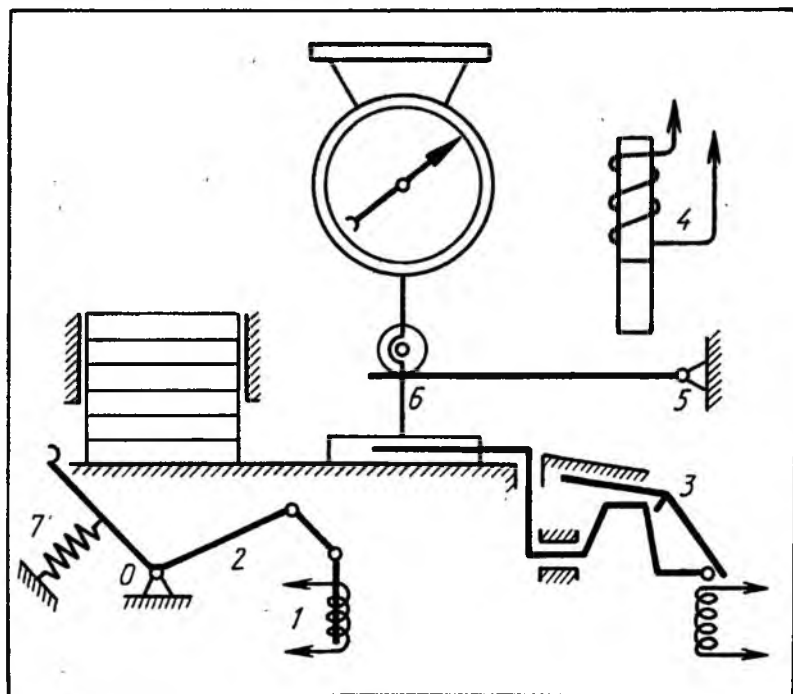


Рис. 70

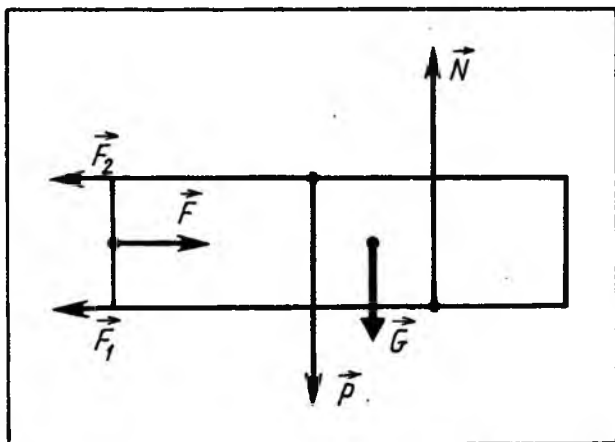


Рис. 71

тому быстро приводит к усталости контролера. Как же освободить человека от выполнения такого малоквалифицированного и монотонного труда?

Знания, полученные на уроках физики в VII, VIII и IX классах, могут помочь в создании механических «рук», которые будут четко в необходимые моменты времени передвигать сердечники, опускать ножку индикатора, поднимать ее после измерения и распределять сердечники в соответствии с результатами измерений. В самом деле, правило рычага известно еще из курса физики VII класса, принцип действия электромагнита — VIII, кинематические схемы механизмов изучались на уроках труда VIII и IX классов. Этих знаний достаточно для того, чтобы предложить, например, такое простейшее автоматическое устройство (рис. 70).

Если включить источник тока, который питает обмотку электромагнита 1, то рычаг 2 притянется и повернется по ходу часовой стрелки на некоторый угол вокруг точки O. Второе плечо рычага передвинет один пакет сердцевины трансформатора как раз на такое расстояние, чтобы он оказался под ножкой 3 индикатора. В этот же момент разомкнется цепь обмотки электромагнита 4, поэтому стержень 5 вместе с ножкой индикатора опустится. Стрелка индикатора зафиксирует определенную толщину пакета. Если эта толщина соответствует техническим требованиям, то сила тока в обмотке электромагнита 1 возрастет, рычаг притянется еще больше и его второе плечо передвинет в том же направлении проверенный сердечник. Если же толщина пакета не отве-

чает техническим требованиям, сработает аналогичное электромагнитное устройство 6 и передвинет пакет в перпендикулярном направлении. В любом случае после проверки толщины пакета должен включиться электромагнит 4 и притянуть стержень 5, т. е. поднять ножку индикатора перед перемещением пакета.

Нетрудно, к тому же необходимо и очень интересно предусмотреть согласование действий всех механизмов и электромагнитов для автоматического действия всей установки.

Конечно, все здесь необходимо рассчитать: и силу тока в обмотках электромагнитов, от которой зависит сила механического действия, и силу упругости пружины 7, которая возвращает рычаг в исходное положение ($F_x = -kx$), и силы трения на поверхности пакетов сердцевин, и время действия каждой силы, и соотношение между ними. Даже ваши школьные знания позволяют установить соотношение сил, которое действует на пакет, например, в начале его движения (рис. 71). Здесь: G — сила тяжести пакета ($G = mg$), P — вес верхних пакетов ($P = nmg$), N — сила реакции опоры ($N = P + G$), F_1 — сила трения нижней грани пакета об опору ($F_1 = \mu N$), F_2 — сила трения верхней грани пакета ($F_2 = \mu P$), F — сила действия рычага на пакет.

Для того чтобы пакет начал двигаться, необходимо условие $F > F_1 + F_2$. При достижении определенной скорости соотношение может быть таким: $F = F_1$, а при приближении к контрольному месту $F < F_1$ с целью, чтобы пакет остановился как раз над ножкой индикатора.

Итак, теперь вы убедились в том, что, во-первых, для решения важных производственно-технических проблем необходимы знания физики, а во-вторых, наличие знаний не ведет автоматически к умениям творческого их использования. Необходимо постоянно предпринимать попытки и проявлять настойчивость в использовании своих знаний для решения как учебных задач, так и жизненно важных технических проблем. И тогда радость творческого труда всегда будет с вами!

приложение VIII

Механизация производства

Механизмы

- шарнирно-рычажные
- зубчатые
- кулачковые
- шаговые
- фрикционные

Машины

- энергетические
- технологические
- транспортные
- транспортирующие

СОДЕРЖАНИЕ

Юному физики	3
Мир физики вокруг нас	5
Физика и человек	—
Физика и техника	9
Механика	10
Кинематика	13
Координаты, путь, перемещение	—
Траектория	15
Быстрота, скорость, темп	25
Удивительная скорость	37
«С места в карьер»	40
Не окажется ли автомобиль в воронке?	43
И относительность и абсолютность движения	45
Движение тела с «необычной» точки зрения	49
Еще немного кинематики и... математики	51
Силы в природе, быту и технике	58
Что же такое сила?	—
Сила тяготения, сила тяжести, вес	64
Сила трения	72
Трение и сила тяги локомотива	76
Торможение. Как быстрее остановить экспресс?	80
Трение продолжает службу технике	82

Трение — враг техники	83
Трение и покой	88
Угол трения	90
Силы упругости	91
Деформации	93
Сила упругости и деформации в технике	98
Основные законы динамики	103
Игра на крайностях. Механическое движение и силы. Какова связь между ними?	—
2000 лет спустя	107
Можно ли разделить неразделимое?	109
Подробнее о взаимодействии	111
Еще немного о взаимодействии	112
Закон сохранения количества движения и современная техника	120
Полет фантазии и полет в космос	—
Реактивная техника и космонавтика	124
Почему их имена стоят рядом?	125
Законная гордость	128
Работа, энергия, мощность	135
Что такое работа?	—
В каких же единицах работа измеряется?	138
Под уклон и на подъем	139
Как работает башенный кран?	142
На что затрачивается работа. КПД	145
Мощность	146
Мощность и производительность машин	149
Энергия	151
Голубой уголь	153
Равновесие тел и современная техника	159
Равновесие, покой и движение	—
Устойчивость	163
Равновесие и устойчивость в механизмах и сооружениях	166
Равновесие и силы трения	170

Механика в современной аэро- и гидро-технике	179
Ветер в лицо. Обтекаемость	—
Почему самолет способен летать?	183
Аэродинамика и реактивная техника	187
Сюрпризы сопротивления воздуха	190
Когда сопротивление воздуха «работает»	193
Из истории авиации	196
По воде на крыльях	200
Над землей и водой по воздуху	203
 Механика и научно-технический прогресс	206
Научно-технический прогресс и законы динамики Ньютона	—
Механика идет в ногу с жизнью	208
О гидростатике в современной технике	209
Давление высокое и низкое	213
На гусеничном ходу и по снегу	214
Автоматы заменяют человека	215

Учебное издание

**Иванов Александр Сергеевич
Проказа Александр Тихонович**

МИР МЕХАНИКИ И ТЕХНИКИ

Зав. редакцией *Н. В. Хрусталь*

Редактор *Т. П. Каткова*

Оператор *Т. Ю. Федорова*

Младшие редакторы *Т. Н. Ключева, Т. Ю. Федорова*

Художественный редактор *В. Н. Алексеев*

Художники *И. Г. Черняк, О. М. Шмелев*

Технический редактор *И. Е. Пасхина*

Корректор *Л. Г. Новожилова*

ИБ № 14045

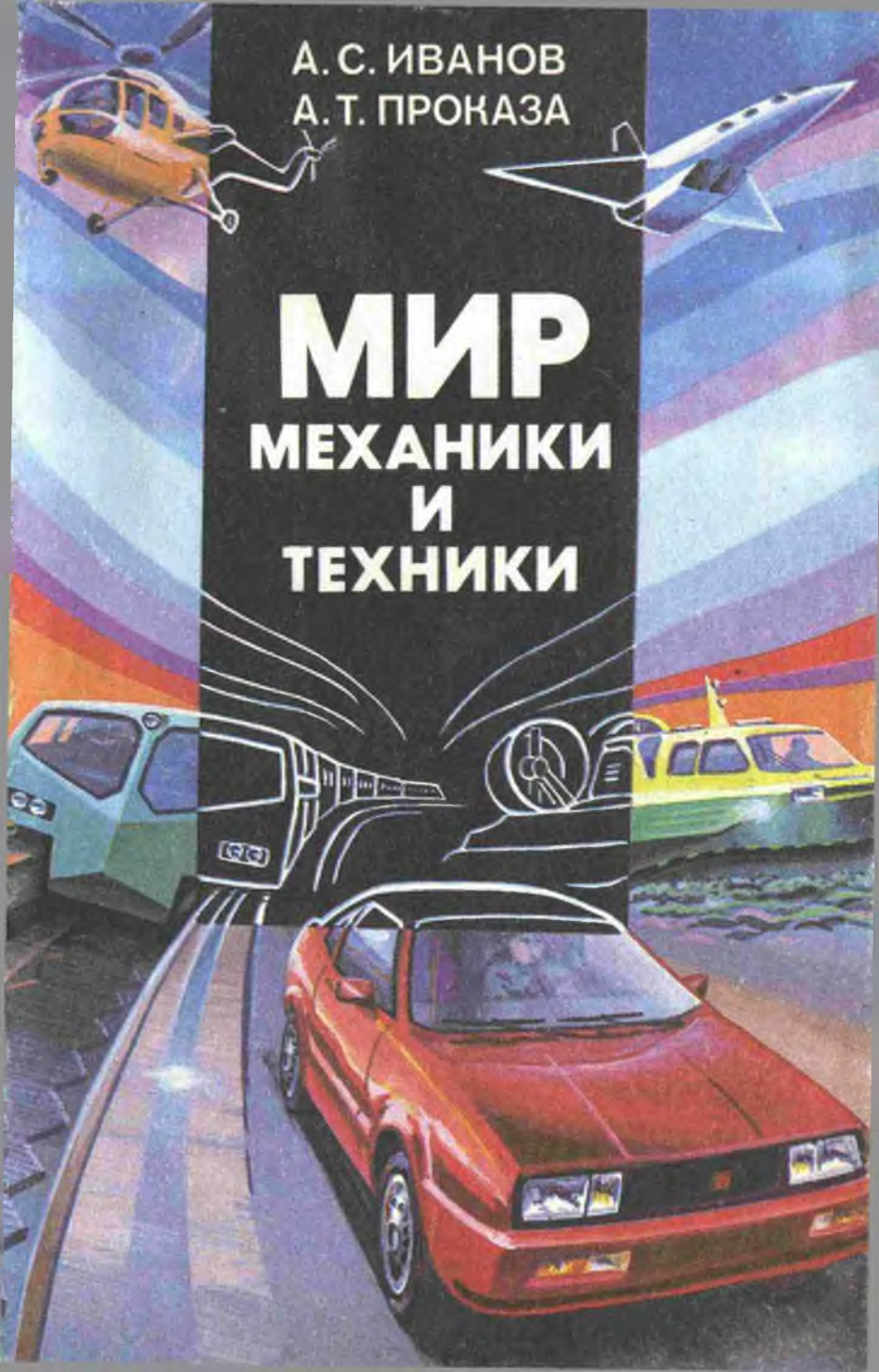
Набор и верстка выполнены в издательстве «Просвещение» на компьютерной технике с использованием редакционно-издательской системы Wave4™ Bestinfo, Inc., гарнитуры из библиотеки цифровых шрифтов PageType™. Диапозитивы изготовлены в издательстве «Просвещение» на фото пленке совместного производства АО Фототех и издательства «Просвещение».

Подписано к печати 08.06.93. Формат 84 × 108^{1/32}. Бумага типографская № 2. Гарнитура Таймс. Печать высокая. Усл. печ. л. 11,76. Усл. кр.-отт. 12,60. Уч. изд. л. 11,85. Тираж 292 000 экз. Заказ № 1874. Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Министерства печати и информации Российской Федерации. 127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Областная ордена «Знак почета» типография им. Смирнова, 214000, г. Смоленск, проспект им. Ю. Гагарина, 2.

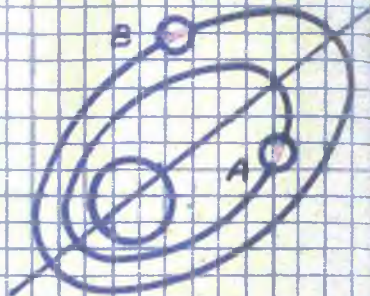
А. С. ИВАНОВ
А. Т. ПРОКАЗА

МИР МЕХАНИКИ И ТЕХНИКИ





Траектория

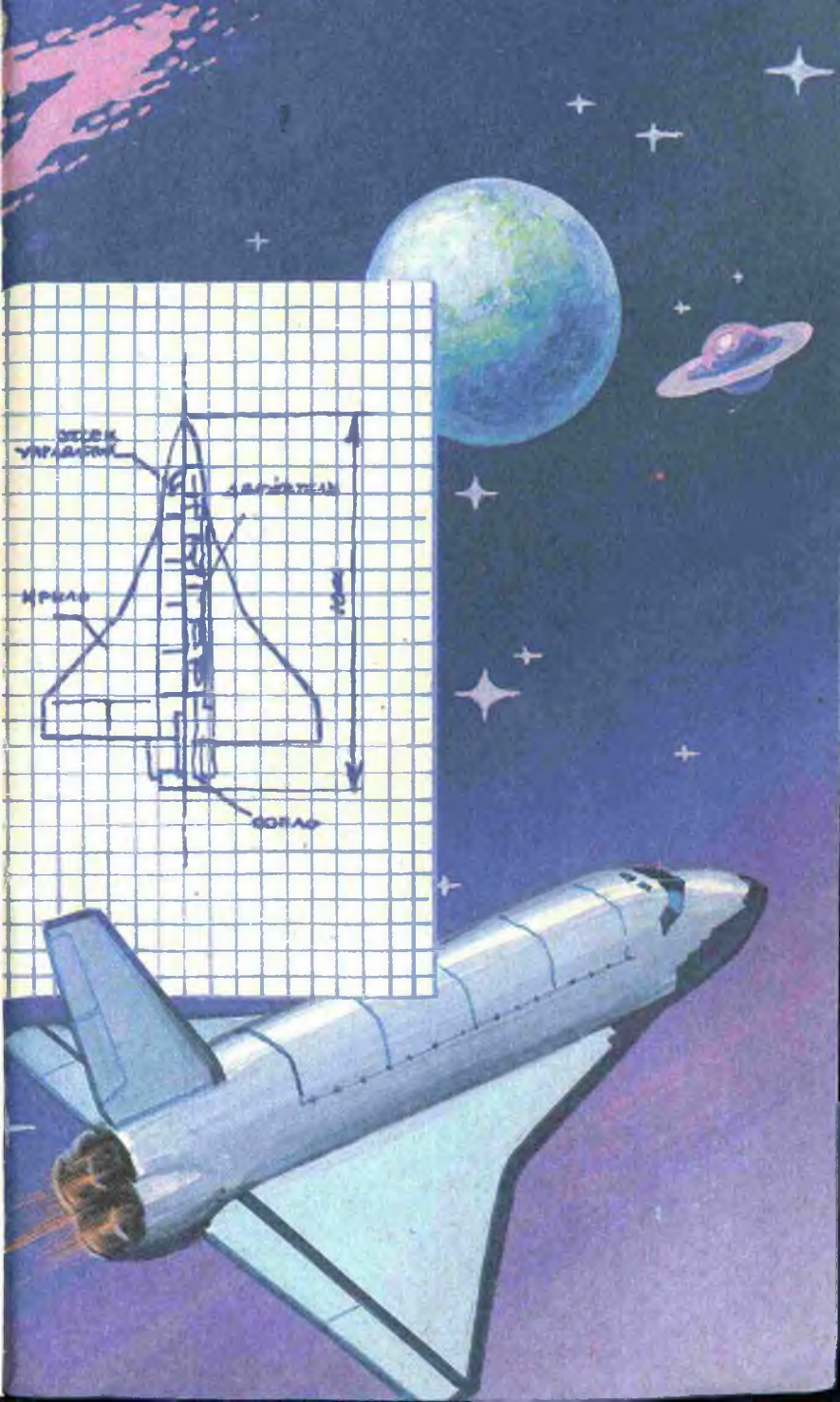


Орбита

A-1811

B-2711





СТЕЖ
УПАКОВКА

САМОЛЕТ

КОРПУС

КОРПУС

8.2

