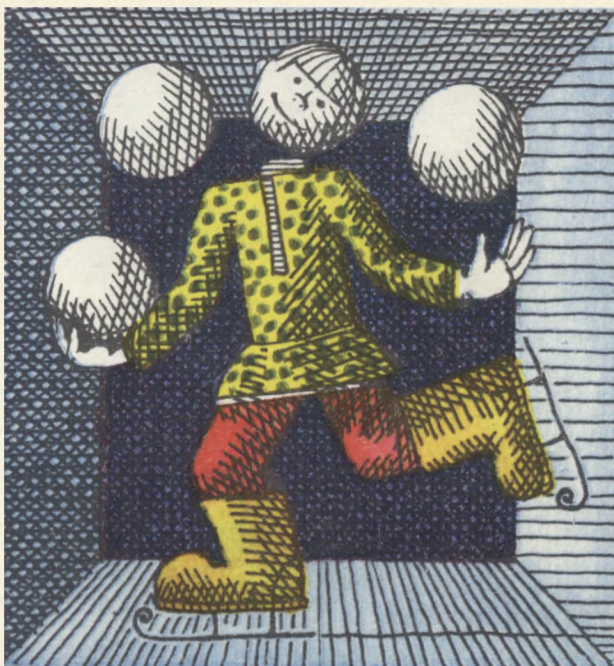




БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •
выпуск 57

А.А. СИЛИН

ТРЕНИЕ И МЫ

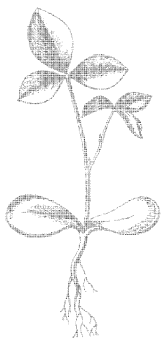




БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •
выпуск 57

А.А. СИЛИН

ТРЕНИЕ И МЫ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1987

ББК 22.25
С36
УДК 531.221(023)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Академик Ю. А. Осипьян (председатель), академик
А. Н. Колмогоров (заместитель председателя), профессор

Л. Г. Асламазов (заместитель председателя), кандидат физ.-
мат. наук А. И. Буздин (ученый секретарь), член-корреспондент
АН СССР А. А. Абрикосов, академик А. С. Боровик-Романов,
академик Б. К. Вайнштейн, заслуженный учитель РСФСР
Б. В. Воздвиженский, академик В. Л. Гинзбург, академик
Ю. В. Гуляев, академик А. П. Ершов, профессор С. П. Капица,
академик А. Б. Мигдал, академик С. П. Новиков, академик
АПН СССР В. Г. Разумовский, академик Р. З. Сагдеев,
профессор Я. А. Смородинский, академик С. Л. Соболев,
член-корреспондент АН СССР Д. К. Фаддеев.

Ответственный редактор выпуска А. И. Буздин.

Силин А. А.

С36 Трение и мы.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.
лит., 1987.— 192 с. (Б-чка «Квант». Вып. 57.)
35 к., 150 000 экз.

В популярной форме и со многими историческими примерами
рассказано о том, как человек научился преодолевать трение на суше,
в воде и в воздухе и умело использовать его в технике. Раскрыта роль
учения о трении в становлении важнейших понятий физики. Читатель
узнает также много интересного о загадках и секретах трения, часть
которых не раскрыта и до сих пор.

Для школьников, студентов, преподавателей.

С 1704060000—032
053(02)-87 161-86

ББК 22.25

© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1987

ПРЕДИСЛОВИЕ

Герой очередного выпуска «Библиотечки «Квант» — широко распространенное и необычайно разнообразное по своей природе физическое явление, известное в естествознании и технике под общим названием — трение. Сразу же отметим его многоликость и оригинальность.

Во-первых, трение никогда не проявляет себя самостоятельно, подобно, например, движению электрических зарядов или гравитационному притяжению тел. По фундаментальным физическим причинам это скорее удивительно навязчивый, почти неизбежный спутник множества окружающих нас явлений и в первую очередь такого важного, как перемещение тел в сопротивляющейся среде. Вспомним, что наше существование связано так или иначе с движением по земле, воздуху и воде. Поэтому трение тайно или явно присутствует повсюду, накладывая свой особый отпечаток буквально на все виды нашей жизнедеятельности и играя при этом иногда полезную, а иногда и вредную, даже роковую роль.

Характерно, что трение всегда пытается помешать любому перемещению тела относительно среды. Это, с одной стороны, поразительным образом помогает человеку передвигаться по суше, воде и воздуху со все нарастающей скоростью, а с другой, вынуждает его расплачиваться за такие перемещения все более чудовищными расходами энергии и топлива. Как и почему это происходит, читатель узнает из книги.

Во-вторых, трение всегда сопровождается выделением тепла. На заре нашей цивилизации такое счастливое обстоятельство позволило людям сделать одно из величайших изобретений: научиться добывать огонь. В нашем веке это же явление успешно используется в технике для сварки трением. В то же время нагрев при трении о воздух превратился сейчас в настоящий кошмар для инженеров и конструкторов, занятых созданием сверхскоростных самолетов и космических кораблей. Отсюда исключительная актуальность проблем трения для новейшего машиностроения.

И наконец, изнашивание машин и оборудования — это, безусловно, самое разорительное и, увы, во многих случаях пока

неизбежное порождение трения, ущерб от которого только в нашей стране исчисляется астрономической суммой — десятками миллиардов рублей в год. Такова цена и значимость проблемы трения в народном хозяйстве страны в целом.

Неудивительно, что любой крупный практический успех в использовании трения или, наоборот, в уменьшении его как при перевозке грузов, так и в самих машинах всегда сопровождался революционными изменениями в технике. Из множества примеров, приведенных по этому поводу в книге, выделим древнее изобретение колеса и использование уже в наше время совершенно новых типов смазок и подшипников.

С другой стороны, исключительная занимательность и прямая связь задач трения с физикой и наукой вообще постоянно приковывали к этим задачам внимание самых выдающихся естествоиспытателей всех времен, начиная от Аристотеля и кончая крупнейшими современными учеными. В итоге совсем не случайно теоретические и прикладные вопросы трения стали, в определенном смысле, важным элементом нашей жизни и культуры. Это подчеркивается самим названием книги и доказывается ее содержанием.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность профессору А. П. Островскому за помощь, оказанную в процессе работы над книгой.

ТАИНСТВЕННЫЙ ЗНАКОМЕЦ

Эта книга о трении — явлении, сопровождающем нас с детства буквально на каждом шагу, а потому ставшим таким привычным и незаметным.

Возьмем монету и потрем ею о шершавую поверхность. Мы отчетливо ощутим сопротивление — это и есть сила трения. Если тереть побыстрее, монета начнет нагреваться, напомнив нам о том, что при трении выделяется тепло, — факт, известный еще человеку каменного века, — ведь именно таким способом люди впервые научились добывать огонь. Снова потрем о ту же поверхность, но уже не монетой, а школьным ластиком, и сопротивление резко возрастет. Это также не вызовет особого удивления: всякий знает, что, кроме скользких предметов, норовящих выскочить из рук, есть резина, которая в отличие от других материалов не скользит, а потому с успехом идет на подметки для обуви.

Любое механическое устройство — от детского велосипеда до самого сложнейшего космического корабля — нуждается в смазке, позволяющей резко ослабить трение ... Ну, вот, пожалуй, и все, что известно о трении не только школьникам, но и подавляющему большинству взрослых. Спрашивается, что же тут интересного и зачем нужна целая книжка?

Читатель будет, наверное, удивлен, если мы скажем, что с трением на протяжении веков и тысячелетий было связано немало сложных физических загадок и парадоксов, часть которых не решена и доныне. Изучением причин трения и природы этого явления занимались в разные времена и эпохи самые выдающиеся естествоиспытатели: Аристотель, Леонардо да Винчи, Галилей, Ньютон, Эйлер, Джоуль и многие другие. Достаточно вспомнить, что трение — один из важнейших видов сопротивления движению, а, например, механическое движение с самого зарождения философии, а гораздо позднее — и естествознания, было едва ли не главным предметом размышлений и опыта. Поэтому без преувеличения можно сказать, что древняя тайна механического движения, раскрытая только в XVII веке, в эпоху становления классической физики, неразрывно связана с отчетливым пониманием истинной роли трения. Еще два века спустя опыты, позволившие установить механический эквивалент теплоты, послужили решающим подтверждением закона сохранения энергии — фундамента современной физики.

И все же больше всего задач, во многом определяющих развитие нашей цивилизации и связанных так или иначе с трением, с незапамятных времен ставила перед человеком практи-

ка, т.е. сама жизнь. Люди отчетливо ощущали трение, перетаскивая волоком гигантские, весящие десятки тонн каменные глыбы, необходимые для сооружения древних могильников и святилищ. Первые катки с успехом использовались, например, для перетаскивания тяжелейших статуй богов в Мессопотамии, а также для строительства Стоунхеджа — гигантской обсерватории — святилища, построенного на территории современной Англии почти четыре тысячи лет тому назад.

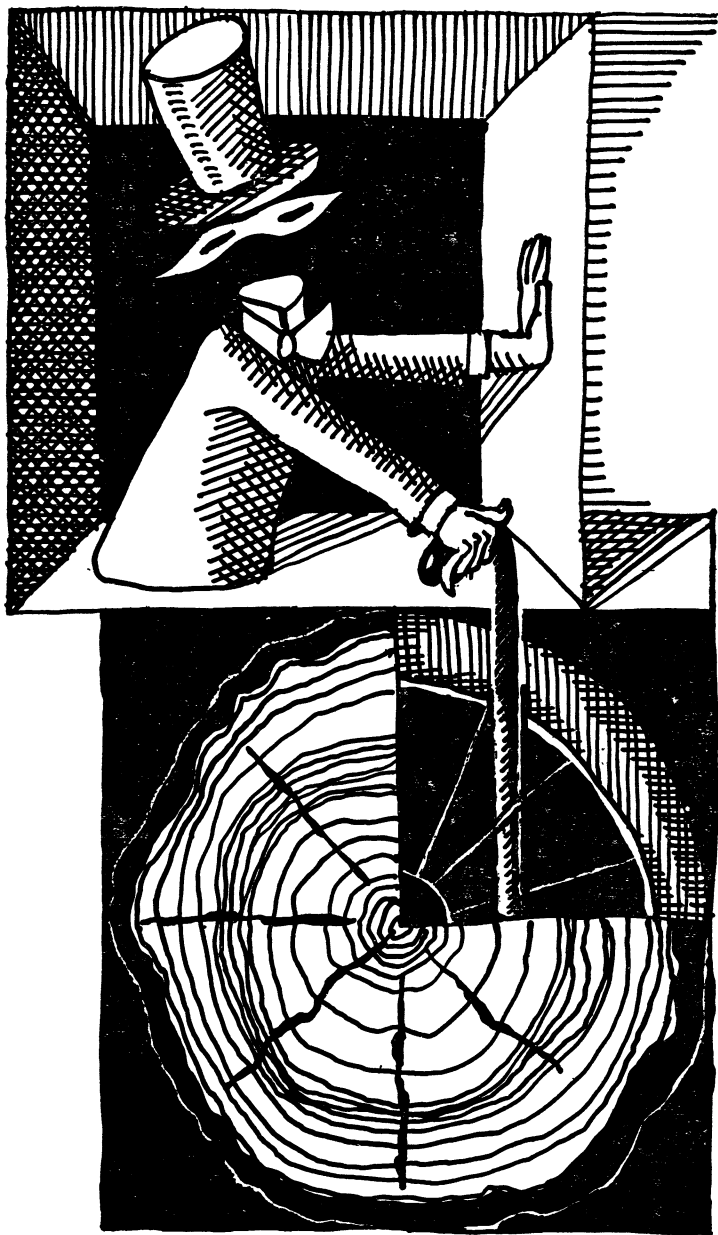
Примерно в третьем тысячелетии до нашей эры в Шумере и районе Кавказа появились громоздкие и неуклюжие повозки на колесах, в которые вначале впрягали волов, а позднее лошадей, ослов и других животных. В еще более ранние времена увлекаемые ветром и течением бревна, не тонущие даже под большим грузом, навели на мысль о плотах, которые породили первые примитивные суда, приводимые в движение веслами и парусом. Стало ясно, что изнуряющего трения на суше можно избежать, заменяя дорогостоящие и малоэффективные сухопутные перевозки по бездорожью речными, а затем и морскими.

Проблемы трения настойчиво напоминали о себе и в самых примитивных механизмах, изобретенных в древности. В дошедших до нас опорах колодезных воротов времен бронзового века (V век до н.э.) обнаружены следы оливкового масла, которое помогало ослабить трение и избавляло наших пращуров от неприятного скрипа.

Так, шаг за шагом, человек научился успешно бороться с трением доступными и привычными способами, передаваемыми из поколения в поколение и дожившими до нашей эпохи.

Но трение — не только тормоз для движения. Это еще и главная причина изнашивания технических устройств — проблема, с которой человек столкнулся также на самой заре цивилизации. При раскопках одного из древнейших шумерских городов, Урука, обнаружены остатки массивных деревянных колес, которым 4,5 тыс. лет. Колеса обиты медными гвоздями с очевидной целью — защитить обод от быстрого изнашивания. Два с половиной тысячелетия спустя древние римляне сберегали таким же образом подошвы обуви, используя, однако, уже железные гвозди. Железо применялось римлянами и для изготовления подков, защищавших от изнашивания копыта лошадей.

Настоящую сенсацию произвели деревянные плуги, обнаруженные при раскопках в северо-западных областях Европы и относящиеся к доколумбовским временам, т.е. к XIV—XV векам. Оказалось, что лемехи и отвалы этих орудий были защи-



щены от изнашивания вполне современным методом — укреплением рабочих поверхностей мелкими камешками, обладающими высокой твердостью.

И в нашу эпоху борьба с изнашиванием технических устройств — важнейшая инженерная проблема, успешное решение которой позволило бы сэкономить десятки миллионов тонн стали, миллионы тонн цветных металлов, резко сократить выпуск многих машин и запасных частей к ним, уменьшить в несколько раз объем ремонтных работ. Неудивительно, что сейчас проблемами повышения износостойкости машин и оборудования только у нас в стране занимаются десятки крупных научно-исследовательских организаций.

Упомянутое стирание подошв — нагляднейший пример изнашивания, хорошо знакомый всем с детства. В наше время человек все меньше ходит пешком и все больше пользуется транспортом, в частности автомобилем. В итоге изнашиваются уже не только подметки, но и несметное, исчисляемое многими миллиардами штук в год количество резиновых шин, — сущее бедствие современной цивилизации. Но и это — далеко не самый драматический пример потерь, связанных с трением. Покоряя природу и преобразуя окружающий мир, люди неизбежно сталкиваются с двумя главными проблемами изнашивания. И обе они — следствие прямого взаимодействия машин с твердым веществом.

Это, во-первых, проблема, связанная с обработкой почвы сельскохозяйственными орудиями, выемкой грунтов, с которыми имеют дело строители дорог, рытьем тоннелей и, наконец, прохождением горных пород при бурении нефтяных и газовых скважин, а также сооружений шахт для добычи угля и других полезных ископаемых. Во-вторых, это обработка металлов и прочих материалов на многочисленных станках. Естественно, что изнашиванию подвергаются в первую очередь резцы, сверла и другие исполнительные органы машин. Только в одной стране — Соединенных Штатах Америки — потери от изнашивания оборудования и инструмента исчисляются десятками миллиардов долларов в год.

Огромный урон приносят и последствия трения в самих машинах. Коварство этого вида изнашивания состоит в том, что даже совсем малые, неуловимые на глаз изменения размеров и формы деталей, вызванные износом, приводят к вибрациям и биениям в машинах, порче систем уплотнения и другим вредным и опасным последствиям, нарушающим нормальную работу, снижающим ее качество и создающим угрозу аварии. Из-за этого ничтожный, казалось бы, износ требует сплошь и рядом замены всей детали. А это не только удорожает и за-

трудняет использование машин, но и приводит к «омертвлению» целых гор ценных материалов.

Являясь неперменным спутником трения, изнашивание зависит от него довольно сложным и неоднозначным образом. Если трение меняется в сравнительно узких пределах, то темп изнашивания может при этом возрасти или уменьшиться порою в десятки, а то и сотни раз даже при незначительных, казалось бы, колебаниях и капризах внешней среды, например при повышенных влажности или температуре. Это свидетельствует о том, что трение и изнашивание хотя и сопутствуют друг другу, но физически — разные явления, имеющие свои особые законы и механизмы.

Тем не менее, разобравшись в секретах трения, значительно легче понять, как и за счет чего происходит постепенное стирание поверхностей. А это, в свою очередь, помогает человеку найти или изобрести успешные средства защиты от изнашивания. Здесь мы и подошли к важной мысли: познание процессов трения есть одновременно крупный и совершенно необходимый шаг в деле борьбы с изнашиванием — этим злейшим врагом современной инженерии.

До поры до времени не задумывались о загадочных свойствах трения, например, о том, почему трение о воду во много раз меньше, чем о сушу, и отчего примитивные деревянные катки, подложенные под тяжелый груз, позволяют, как по волшебству, обходиться десятками грузчиков там, где при обычном волокне надрывались бы сотни, а то и тысячи людей. С другой стороны, древние египтяне, воздвигавшие невиданные по размерам пирамиды из тщательно обработанных прямоугольных глыб, наверняка знали, что сопротивление при перетаскивании таких глыб не зависит от того, лежат ли они плашмя, покоятся на боковой грани или стоят «на попа». Причина этого явления мало кого интересовала до тех пор, пока французский ученый Гильом Амонтон не возвел его в конце XVII века (1699 г.) в ранг закона природы, носящего теперь его имя.

Именно этот закон, подкрепленный столетие спустя опытами другого француза — выдающегося ученого Шарля Кулона, позволил объяснить таинственное ослабление тяги у первых паровозов даже при пологих подъемах в гору. Тем не менее физический смысл закона Амонтона — Кулона остается не вполне ясным и в наше время.

А вот и еще одна загадка. Прошло уже полтора века с момента установления механического эквивалента теплоты, позволяющего точно соотнести работу на преодоление трения выделившейся при этом теплоте. Но каким образом происходит

превращение механической энергии в теплоту при трении? Исчерпывающего ответа на этот вопрос нет и до сих пор.

Отметим, наконец, и важную роль трения в становлении учения об электричестве. Даже само слово «электрон» происходит от греческого названия янтаря, на котором при трении наводится отрицательный заряд, т.е. возникает избыток электронов. В классических опытах Бенжамена Франклина трение служило простейшим способом перераспределения электричества в твердых телах. Наконец, вплоть до открытия Майклом Фарадеем явления индукции магнитным полем тока в проводнике трение служило единственным средством превращения механической энергии в электрическую.

В то же время необходимо помнить, что трение как явление, при всей его важности, никогда не существует само по себе. Оно всегда вторично, и поэтому его скорее можно назвать спутником или, если угодно, своеобразной тенью самых разных явлений, будь то прохождение электрического тока по проводнику, скольжение саней по снегу или движение самолета и ракеты в среде, оказывающей сопротивление. Таким образом, трение есть скорее некоторое реальное ограничение, накладываемое на идеальную физическую модель явления. В еще более широком смысле трение выражает необратимость процессов и событий, происходящих в окружающем нас мире.

Вот почему кажущееся нам столь заурядным явление трения — не только важный, но и интересный феномен, по-прежнему хранящий в себе немало тайн и вполне достойный более близкого знакомства. Подробный рассказ об этом явлении мы начнем с того, как гениальные идеи и решающие опыты великих ученых-мыслителей, принадлежащих к разным историческим эпохам, повлияли на развитие представления о трении.

ЭСТАФЕТА ТИТАНОВ

Уже на немногих примерах мы убедились в огромной значимости трения для решения самых актуальных проблем инженерии. Но представления о трении имеют и свою поучительную историю, истоки которой ведут к представлениям о мире, сложившимся у мыслителей Древней Греции. В центре внимания философов находились тогда не практические задачи, а самые общие проблемы, касающиеся причин движения и превращений в природе, что нашло отражение в механике Аристотеля — выдающегося мыслителя античного мира.

Как мы хорошо знаем, чтобы привести в движение какое-нибудь тело, надо приложить к нему внешнюю силу. Причем если эта сила будет недостаточной, то сдвинуть тело нам не удастся — мы заставим тело двигаться, лишь когда внешняя сила превысит максимальное значение силы трения. Чем меньше трение, тем меньше сила, приводящая в движение тело. Согласно же учению Аристотеля, для поддержания движения в любом случае, даже и в отсутствие трения, была бы необходима вполне определенная сила.

Учение древнего мудреца убедительно объясняло движение лошади с тяжелой поклажей. В самом деле, стоит животному остановиться, как сразу прекращается и движение повозки. Для удвоенного груза, согласно Аристотелю, требуется уже две лошади и наоборот: разгрузив упряжку, мы можем с легким сердцем погнать животное рысью. Но, увы, эта же теория не могла столь просто и наглядно описать другие очевидные факты: бросание камня или полет выпущенной из лука стрелы.

Великий итальянский ученый эпохи Возрождения Галилео Галилей, живший почти два тысячелетия спустя после Аристотеля, четко сформулировал закон инерции. Согласно этому закону, если на тело не действуют никакие силы, оно находится в покое или движется прямолинейно и равномерно сколь угодно долгое время.

Пиза, Падуа, Флоренция ... С названиями этих старинных итальянских городов связаны выдающиеся открытия Галилея в области механики, астрономии, оптики на рубеже XVI и XVII веков. Модель движения тел стала с этого времени совсем иной. Получив кратковременный толчок извне, тело при отсутствии трения должно вечно двигаться по инерции с постоянной скоростью. Иными словами, такое движение без трения, раз начавшись, не требовало уже никакой дополнительной силы!

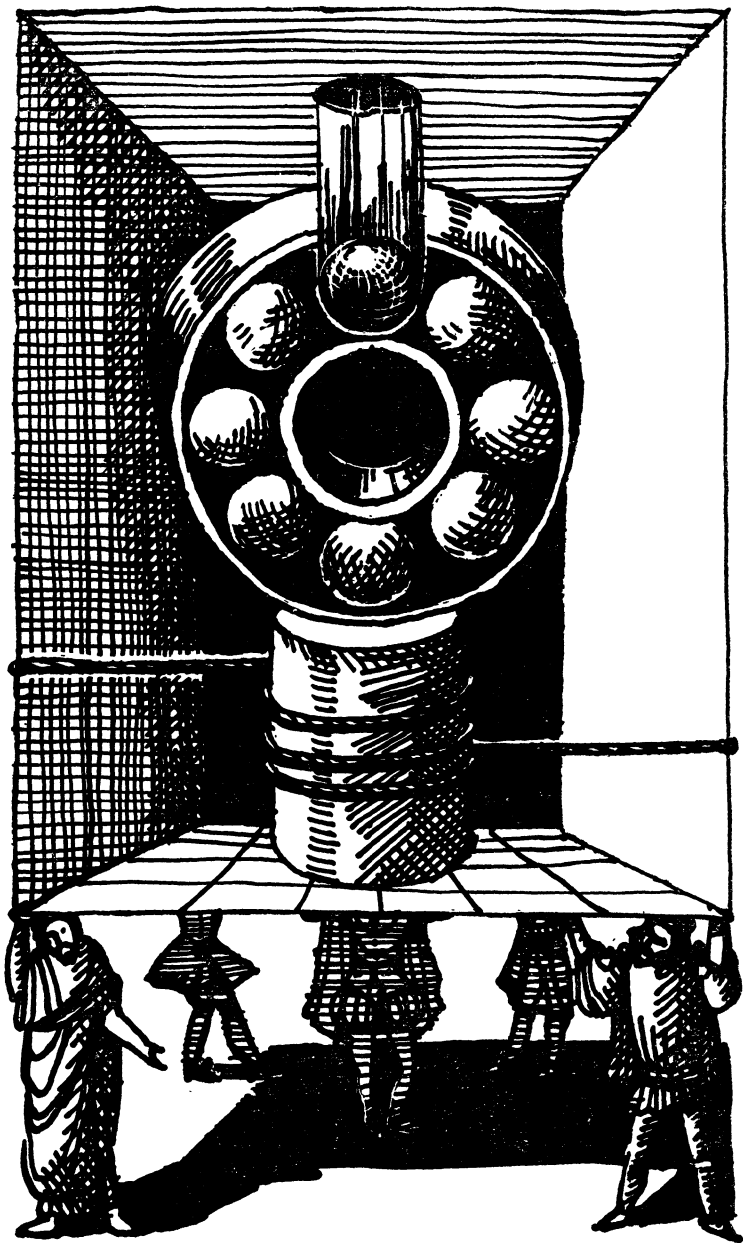
При длительном действии силы тело должно разгоняться до все большей скорости, пока не прекратится действие силы. Механика Галилея отлично объяснила не только полет стрелы или пушечного ядра, но и такое значительно более сложное движение, как разгон пороховой ракеты, изобретенной когда-то в Китае и попавшей в средневековую Европу при посредничестве арабов. Вспомним, что лошадь с тяжелой поклажей движется медленно и равномерно, т.е. инерция груза никак не проявляется, и вся тяга лошади затрачивается на преодоление трения. Остановка лошади из-за действия силы трения приводит к почти немедленной остановке повозки, как и считали Аристотель и Галилей.

Казалось бы, всё ясно. Но здесь мы сталкиваемся с таким важным понятием, как мощность, которое оказывается на поверку далеко не простым. Мощность — это энергия или работа, совершаемая в единицу времени. Но какой все-таки смысл скрыт, скажем, в понятии «мощность автомобиля»? Более мощные машины способны перевозить больший груз и ездить быстрее, — скажете вы. Верно, но ...

Земные автомобили, мощностью которых мы интересуемся, мчатся в плотной окружающей среде, сопротивление которой сильно зависит от скорости их перемещения. И это прекрасно понимал Галилей. «При движении в сопротивляющейся среде, — писал он, — по мере возрастания скорости падающее тело встречает постоянно возрастающее сопротивление, вследствие чего происходит постоянное уменьшение ускорения, и наконец сопротивление достигает такой величины, что ускорения не будет и тело будет продолжать двигаться равномерно». Поэтому предельному случаю и соответствует мощность автомобиля, которая ограничивается трением, возникающим при движении.

Раздумья о возможности движения тел без всякого трения, т.е. в пустоте под действием постоянной силы, и привели Галилея к идее инерции.

Открыв определяющую роль трения при механическом движении, Галилей следовал традиции, завещанной древними мыслителями. Совсем иным путем пришел к проблеме трения великий Леонардо да Винчи, живший и творивший в тех же местах, что и Галилей, но примерно на столетие раньше. Непревзойденный рисовальщик Леонардо придавал исключительное значение рисунку, в том числе и техническому, считая, что именно в нем выражается цельность и самая суть конструкторского замысла, недостижимые при словесном описании. Поэтому его уникальные по содержанию и богатству идей рукописи, или «кодексы», насыщены прекрасными рисунками и обстоятельными пояснениями к ним.



Инженерное воображение Леонардо, запечатленное в его рукописном наследии, поистине безгранично: почти без преувеличения можно сказать, что он изобрел все, что связано с исследованием механических и гидравлических, а в ряде случаев и оптических устройств.

Один из богатейших городов Италии того времени — Милан славился своими оружейниками и мастерами по обработке металлов, а его властелины уделяли особое внимание военному делу. В 1482 г. Леонардо, живший в то время во Флоренции, предложил свои услуги в качестве инженера миланскому герцогу Лодовико Моро, ведущему войну с Венецианской республикой. Неудивительно поэтому, что флорентиец делал главный упор на свои познания в секретах изготовления военных орудий, упоминая при этом о легких пушках — бомбардах, которые «кидают мелкие камни, словно буря, и наводят своим дымом великий страх на неприятеля», а также о крытых повозках, явно смахивающих на современные танки: «Также устрою я крытые повозки, безопасные и неприступные, для которых, когда врежутся со своей артиллерией в ряды неприятеля, нет такого множества войска, которого они не сломили бы. А за ними невредимо и беспрепятственно сможет следовать пехота». Леонардо не забывает и о способах наведения легких и крепких переносных мостов, не боящихся пожара и столь необходимых в военном деле, об изготовлении различных осадных орудий и инструментов, постройке тайных извилистых ходов под землей, позволяющих застать противника врасплох, и т. д. Перед нами почти уникальная для изобретателя способность представлять различные инженерные задачи, как сейчас говорят, системно, т. е. во взаимосвязи со множеством сопутствующих проблем.

Не менее поразительна способность Леонардо видеть в машине реальное сооружение, испытывающее значительное трение и подверженное деформации, изнашиванию и старению.

Ни с чем не сравнимый вклад Леонардо в борьбу с трением был осознан лишь недавно, когда в Мадридской национальной библиотеке были случайно обнаружены две его неизвестные рукописи, названные «Мадридским кодексом». Одна из них начинается с вывода о бессмысленности вечного двигателя. «Стремление создать вечное колесо — источник вечного движения — можно назвать одним из бесполезных заблуждений человека, — писал Леонардо. — На протяжении многих столетий все, кто занимался вопросами гидравлики, военными машинами и прочим, тратили много времени и денег на поиски вечного двигателя. Но с ними происходило то же, что и с алхимиками: всегда находилась какая-нибудь мелочь, которая якобы мешала

успеху опыта. Моя небольшая работа принесет им пользу: им не придется больше спасаться бегством от королей и правителей, не выполнив своих обещаний». Последняя фраза знаменательна: она опровергает заблуждение, что Леонардо писал якобы лишь для себя и не интересовался популяризацией и освоением собственных идей.

Столь же поверхностно мнение о Леонардо как о гениальном самоучке, не получившем систематического образования. Правильнее было бы считать, что оторванной от практики схоластики средневековых университетов Леонардо противопоставил собственный, невиданный в то время метод обучения естествознанию и техническим наукам, основанный на специально поставленных опытах. «Моя цель состоит в том, чтобы представить сначала эксперимент, а затем доказать посредством рассуждения, почему данный эксперимент должен привести к этому результату, и не какому-либо другому ... И этот опыт пусть будет произведен много раз, так чтобы какой-нибудь случай не помешал этому доказательству или не исказил его». В этих немногих и четких словах Леонардо ясно виден новый гениальный метод познания природы, провозглашенный лишь целое столетие спустя великим английским философом Ф. Бэконом и реализованный практически Галилеем.

Особый интерес для нас представляют опыты Леонардо по трению. На сохранившихся рисунках, сопровождаемых, как обычно, детальными объяснениями, мы замечаем простые и остроумные устройства, позволяющие определить силу трения при сдвигании с места и скольжении плоского тела по плоскости, а также момент сопротивления в подшипнике. Своим утверждением: «каждое тяжелое тело порождает сопротивление трения, равное четверти веса этого тела» Леонардо, чуть ли не впервые со времен Архимеда, формулирует физический закон, открытый им опытным путем.

Переходя к способам снижения трения в машинах, Леонардо уделяет особое внимание использованию круглых тел. Многочисленные рисунки позволяют считать великого итальянца изобретателем как шарикового, так и роликового подшипников. «Я не вижу большой разницы между ними, — размышляет Леонардо, — исключая ту, что шарики могут вращаться во всех направлениях, а ролики — только в одном. Но если во время движения шарики и ролики соприкасаются, движение будет более медленным, так как при их касании сила трения будет действовать в противоположном направлении». В сохранившихся набросках можно усмотреть и способ, предлагаемый Леонардо для разделения тел качения, основанный на использовании так называемого сепаратора.

Верный своему принципу всестороннего подхода к инженерной задаче, Леонардо находит пути снижения трения и изнашивания в машинах, которые были открыты лишь много лет спустя в разных странах и разными изобретателями. Например, предложенный Леонардо рецепт смазочного металлического сплава оказался близким по составу подшипниковому материалу, запатентованному американцем А. Бэббитом лишь в 1839 г., а сложнейшая глобоидальная передача, детально изобретенная на одном из рисунков величайшего из инженеров, была изобретена заново лишь два с половиной века спустя. «Чем больше колес в вашем механизме, — учил Леонардо, — тем больше в нем зубчатых зацеплений ... тем выше трение и, следовательно, больше силы будет потеряно двигателем».

Увы, эта очевидная теперь истина оставалась неизвестной еще многим поколениям механиков. Об этом красноречиво свидетельствует рисунок XVII века, где изображен человек, который, играючи, вырывает с корнем огромное дерево. Турбинка, на которую он старательно дует, соединена с мощной системой блоков и зубчатых передач, способных и впрямь увеличивать силу дуновения в огромное число раз, если бы... не трение, против которого и предостерегал мудрый Леонардо.

Открытие принципа инерции позволило поставить на прочную научную основу измерение сил трения. Наиболее простой прием состоял в том, чтобы сделать процессы скольжения или качения равномерными. Ведь при этом, как мы помним, сила сопротивления движению в точности равна силе трения. Осуществить такое равномерное движение можно, используя простейшие приспособления: каток, веревку и гири. Именно таким путем, начиная с Леонардо, шли все последующие исследователи трения.

В 1699 г., т. е. спустя почти два века, Гильом Амонтон направил во Французскую академию наук письмо, в котором впервые был сформулирован в математическом виде закон о прямой пропорциональности между силой N , прижимающей одно тело к другому, и силой трения F :

$$F = \mu N, \quad (1)$$

где μ — коэффициент пропорциональности, названный коэффициентом трения.

Отметим, что постоянство отношения F/N было установлено еще Леонардо да Винчи, который путем измерения нашел его равным $1/4$ для всех материалов. Ничего не зная об этом Г. Амонтон подтвердил вывод великого итальянца собственными опытами с медью, железом, свинцом и деревом, по-

лучив во всех случаях для μ значение, равное $\frac{1}{3}$. Теперь мы знаем, что коэффициент трения непостоянен и зависит от свойств двух соприкасающихся материалов, так называемой пары трения. Тем не менее и вывод Амонтона находит простое объяснение: все испытанные им материалы специально смазывались жиром, поэтому различия в коэффициенте трения выравнивались. Необычна для того времени практическая направленность исследований Г. Амонтона. «Теперь, установив в достаточной мере природу трения и его законы, остается только сказать кое-что о правилах, по которым оно может быть сведено к расчету, дабы знать, каково трение в самых сложных машинах», — так писал один из пионеров науки о трении. И оказался прав: закон Амонтона дожил до нашего времени и стал основой при расчете и решении множества инженерных задач. Но прежде чем рассказать о них, заметим, что этот закон при его видимой простоте таит в себе секрет, не разгаданный и до сих пор.

Ясно, например, что два кирпича, поставленные друг на друга, создают силу трения, ровно в два раза большую, чем один. Но вот что удивительно: не имеет никакого значения, как лежат кирпичи — друг на друге или рядом — суммарная сила трения, действующая на оба кирпича, остается без изменения. Больше того, вы можете класть их плашмя, на бок, ставить «на попа» — во всех случаях общая величина трения будет одинаковой! Это кажется странным. Так и напрашивается вывод, что сила трения должна быть пропорциональна площади соприкосновения тел. В самом деле, приклеив, например, те же кирпичи к столу по трем разным по площади граням, мы получим не одно, а целых три значения сопротивления отрыва, строго пропорциональные площади контакта.

Дальнейший шаг был сделан знаменитым механиком и математиком XVIII века Леонардом Эйлером. Швейцарец по происхождению, Эйлер уже в двадцатилетнем возрасте проявил выдающиеся способности и был по рекомендации Д. Бернулли назначен адъюнктом (помощником профессора) по математике в Петербургскую академию наук, где прошла большая часть его необычайно богатой творческой жизни. Уже в первом мемуаре по механике машин, вышедшем в 1747 г., Эйлер предložил новый подход к механическим устройствам, заложив основы новой технической науки — динамики машин.

Так, механические устройства, впервые со времен Леонардо да Винчи, стали рассматриваться в движении, а их поведение — анализироваться математически на основе принципов новой механики. В мемуаре «О машинах вообще» Эйлер особо выделяет в качестве одного из трех основных вопросов о силе трения.

Из школьного курса физики мы знаем, что время свободного падения тела с высоты h равно $\sqrt{2h/g}$, где g — ускорение свободного падения на Земле. А сколько времени тело будет падать с той же высоты, но по наклонной плоскости? Из опыта катания с горок мы знаем, что более пологая горка позволяет катиться дольше. Это же знал и Галилей, который исследовал свободное падение тел не путем сбрасывания их с покосившейся от старости Пизанской башни (так утверждает легенда), а с помощью наклонного желоба, по которому скатывали чугунные шары. Время «падения» теперь значительно растягивалось, что позволяло выдающемуся естествоиспытателю, не имевшему совершенных часов, снизить ошибку в измерении времени до минимума.

А если тело при этом не катится, а скользит, т. е. испытывает значительное трение? Рассмотрев этот случай, Л. Эйлер получил формулу для времени соскальзывания, в которую входил коэффициент трения. Так родился новый способ измерения трения скольжения с помощью... часов. Из этой же формулы следовало, однако, что при уменьшении угла наклона и сближения значений $\operatorname{tg} \alpha$ и μ время соскальзывания t обращалось в бесконечность. Опыт же однозначно показывал, что соскальзывание, раз начавшись, происходит затем довольно быстро. Впервые отметив этот эффект, Эйлер дал ему простое и убедительное толкование: сопротивление началу движения (или сила трения покоя) всегда заметно больше, чем сила трения скольжения. Простой и наглядный способ убедиться в этом дает опыт с палкой, края которой покоятся на указательных пальцах наших рук. Постепенно сдвигая пальцы, мы заставляем палку скользить попеременно, то по одному, то по другому из них. И всякий раз начало скольжения требует заметного снижения нагрузки на соответствующий палец.

Открытие Эйлера уже в его время имело важное практическое значение: оно помогало рассчитать условия начала и последующего движения гигантской по тем временам массы морского судна при спуске его на воду.

Не менее известно и другое достижение Эйлера — знаменитая формула, позволяющая рассчитать действие гениально простого приспособления для усиления трения, состоящего всего-навсего из каната или троса, намотанного на круглую неподвижную опору — кнехт. Благодаря этому устройству даже ребенок может удерживать на швартове целый корабль.

Вспомним сначала эффект, возникающий при перебрасывании через плечо веревки, с помощью которой тянут груз: возникающая из-за трения сила натяжения веревки имеет вертикальную составляющую, которая, с одной стороны, уменьшает

силу давления груза, а с другой стороны, увеличивает силу давления подошв тянущего груз человека на землю и помогает преодолеть ... силу трения.

Нечто подобное возникает и в данном случае. Пренебрежем трением и рассмотрим участок каната, растянутого силой T и отклоняемого упором (кнехтом) на малый угол $\Delta\alpha$ (рис. 1). Мы видим, что при этом со стороны упора на рассматриваемый участок каната должна действовать сила реакции опоры $N = T\Delta\alpha$ (угол $\Delta\alpha$ измеряется в радианах и считается малым, в результате чего мы пренебрегаем различием между

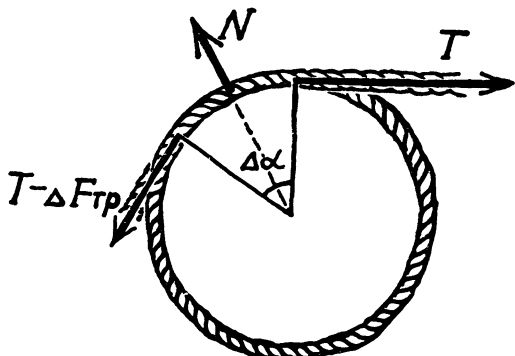


Рис. 1

$\Delta\alpha$ и $\sin\Delta\alpha$). При наличии трения канат будет неподвижен и в том случае, когда силы натяжения слева и справа от участка $\Delta\alpha$ немного отличаются. Проскальзывание каната начнется, если уменьшение его натяжения на участке $\Delta\alpha$ сравняется с силой трения покоя $\Delta F_{\text{тр}} = \mu N = \mu T\Delta\alpha$. Следовательно, изменение натяжения каната равно $\Delta T = -\mu T\Delta\alpha$ и пропорционально натяжению T .

В физике часто встречаются ситуации, когда изменение какой-либо величины пропорционально самой величине. Вспомним, например, явление радиоактивного распада: уменьшение числа радиоактивных ядер в единицу времени пропорционально их числу. Другим примером может служить разряд конденсатора через резистор. Уменьшение заряда на конденсаторе пропорционально току, проходящему через резистор, который, в свою очередь, пропорционален заряду конденсатора. Во всех этих случаях действует экспоненциальный закон изменения соответствующих величин. Такая зависимость получается и в нашем случае для изменения натяжения каната. Как было впервые показано Эйлером, натяжение каната T уменьшается

в зависимости от угла α охвата опоры канатом по закону

$$T = T_0 e^{-\mu\alpha},$$

где число $e = 2,71828 \dots$ — основание натуральных логарифмов, T_0 — начальное натяжение каната, а угол α (измеряемый в радианах) связан с числом оборотов n каната вокруг кнехта простым соотношением $\alpha = 2\pi n$. Если одного оборота достаточно, чтобы уменьшить натяжение каната в k раз:

$$T_0/T_1 = e^{2\pi\mu} = k,$$

то в результате n оборотов натяжение ослабнет в k^n раз:

$$\frac{T_0}{T_n} = \frac{T_0}{T_1} \frac{T_1}{T_2} \dots \frac{T_{n-1}}{T_n} = k^n = e^{2\pi\mu n}.$$

Отметим еще раз, что речь идет о минимальном натяжении каната, когда вот-вот начнется его скольжение.

При коэффициенте трения $\mu = 0,3$ один оборот каната вокруг кнехта уменьшает силу его натяжения почти в семь раз, а если сделать два оборота, то натяжение ослабнет примерно в сорок раз.

С ростом числа оборотов натяжение каната благодаря трению становится все меньше и меньше и постепенно сходит на нет. Получается (обратите на это внимание!), что отмеченный Эйлером эффект зависит не просто от площади контакта, а от изменения начального направления каната, задаваемого упором и определяемого углом охвата α : чем больше угол охвата, тем значительнее прирост трения.

Выходит, что для создания трения хитроумно используется сила натяжения троса: при достаточно большом α все усилие натяжения трансформируется в силу трения! Столь важные для практики соотношения были получены Эйлером «на кончике пера», т.е. чисто математически, исходя из самых общих принципов механики. Для дальнейшего движения вперед необходимы были специальные опыты, позволяющие не только распознать скрытые свойства трения, но и дать инженерам-практикам количественные оценки этого явления. Такая задача впервые была выполнена известным французским ученым и военным инженером Шарлем Кулоном, который по праву считается основоположником науки о трении.

Работая в качестве инженера на военных верфях порта Рошфор на западном побережье Франции, Кулон подчинил все исследования трения решению конкретных практических задач. Измерительные устройства и приспособления, использованные Кулоном, при всей их простоте отличались высоким качеством исполнения, а методы измерения — надежностью и точностью,

в которых без труда угадывался будущий выдающийся физик-экспериментатор.

Прежде всего Кулон решил проверить справедливость закона своего соотечественника Амонтона и в результате многочисленных опытов пришел к более общей зависимости:

$$F = \mu N + A, \quad (2)$$

называемой теперь законом Амонтона — Кулона. Нетрудно видеть, что, полностью подтвердив простое соотношение между силой трения F и внешней силой N , Кулон прозорливо обнаружил и новое, причем довольно тонкое обстоятельство — способность тел к слипанию и созданию тем самым сопротивления проскальзыванию, не зависящего от N . Такой новый закон послужил важным стимулом к поискам возможных механизмов трения, сочетающих в себе как зацепление неровностей, так и действие поверхностных атомно-молекулярных сил.

Вторым важным выводом Кулона следует считать своего рода «понижение в должности» основного понятия — коэффициента трения. Вместо универсальной константы коэффициент трения превратился в результате тщательной проверки опытом всего лишь в инженерную характеристику, зависящую от материалов пары трения, шероховатости поверхностей, влажности окружающей среды и даже времени предварительного контакта тел. Именно Кулону мы обязаны отчетливым пониманием того, что трение — результат одновременного действия множества явлений и поэтому не предсказуемый теоретически, хотя вполне определяемый на практике.

Трение качения Кулон исследовал с помощью деревянных цилиндров, катящихся по полозьям из того же дерева, — картина, довольно типичная для судоверфи его времени. Итогом этих занятий послужила дожившая до наших дней формула для сопротивления качению

$$F_k = \lambda N/R, \quad (3)$$

где R — радиус цилиндра, а λ — коэффициент трения качения, имеющий размерность длины. Любопытно, что здесь, по-видимому, интуитивно, Кулон использовал представление о качении как о предельном случае применения рычага с очень большим соотношением плеч, равным λ/R . Такая гипотеза остроумна, однако, как мы увидим ниже, не позволяет ответить на вопрос об источнике потерь энергии при качении.

Впрочем, подобного вопроса во времена Кулона просто не существовало. Задача заключалась в том, чтобы правильно рассчитать силу трения, поскольку именно от нее зависело число «тяговых» рабочих или лошадей. Механика и теплота во

времена Кулона все еще оставались совершенно отдельными областями физики. Поэтому объяснение причины трения, этого чисто механического, как тогда считали, явления, не выходило за рамки механики. Вот почему Кулон вслед за Амонтоном считал, что трение связано с подъемом и спуском одного тела по неровностям другого.

Эта гипотеза, недостаточная для понимания трения, отлично работает при объяснении затрат энергии при ходьбе. Почему при езде на велосипеде мы, в похожих условиях, устаем куда меньше, чем шагая по дороге? Дело в том, что при посадке в седло наш центр масс находится на постоянном расстоянии от горизонтали, а при ходьбе он с каждым шагом перемещается вверх и вниз, на что затрачивается значительная энергия. Этого стараются избежать при спортивной ходьбе, когда скоходы вынуждены двигаться крупными шагами.

Решая мореходную задачу, связанную с определением момента трения компасной стрелки, Кулон изобрел новый, особо чувствительный способ измерения трения, ставший с тех пор классическим. Речь идет о методе затухающих колебаний, амплитуда которых, согласно закону Амонтона — Кулона, уменьшается во времени строго линейно. Применение этого метода в наше время позволяет измерить коэффициент трения качения с чувствительностью до одной десятиллионной доли!

Результаты опытов по трению были обобщены Кулоном в мемуаре «Теория простых машин с учетом трения их частей и жесткости канатов». Эта работа, опубликованная в Париже в 1781 г., получила признание крупнейших ученых и была отмечена двойной премией Французской академии наук. Это случилось за несколько лет до того, как были установлены законы электростатики и магнетизма — достижения, принесшие Кулону звание академика и мировое признание. Интересно, что законы электромагнетизма были открыты ученым с помощью необычайно чувствительного прибора — крутильных весов, изобретенного им при изучении трения компасной стрелки об острие.

Исследования Кулона завершали «механический» этап в исследовании трения, исчерпавший все то, что связано с проявлением трения как силы сопротивления движению. Дальнейшее развитие учения о трении стало возможным благодаря фундаментальным успехам в области учения о теплоте и физики поверхностных явлений. Достижения великих естествоиспытателей и инженеров, о которых мы рассказали, вплотную подвели ученых к следующему важнейшему рубежу — осознанию трения как явления превращения механической энергии в теплоту в соответствии с фундаментальными законами физики, установленными лишь в середине прошлого века.

ОТКУДА ЖЕ БЕРЕТСЯ ТЕПЛОТА?

Издавна известно, что при трении выделяется тепло. Но сколько тепла? После изобретения кремниевоегнива, а затем и серных спичек вопрос этот не представлял практического интереса, поскольку техника средневековья была «тихоходной», основанной, если исключить пришедшие из тьмы веков водяные и ветряные мельницы, на ручном труде работников и физической силе лошадей. Тепла при трении по этой причине выделялось мало, и перегрев деталей был довольно редкой неприятностью, случавшейся обычно из-за плохой смазки колесных втулок конных экипажей, вынужденных по той или иной причине мчаться иногда с большой скоростью.

О том, что теплота, выделявшаяся при трении металлов, способна довести до кипения воду, знал итальянский физик Д. Бальяни, сообщивший об этом поразительном факте самому Галилею еще в 1614 г. Однако письмо это пролежало в безызвестности больше двух веков.

Подлинный интерес ученых к выделению теплоты при трении стал проследиваться лишь к концу XVII века благодаря все более настойчивым попыткам физиков выяснить природу теплоты. Согласно тогдашним представлениям всякое тело считалось наполненным или пропитанным невесомым флюидом — теплородом, способным при случае проникать в другое тело, нагревая его и превращая затем в жидкое или газообразное состояние. Поскольку запас теплорода в теле конечен, то ограниченным должен быть и фрикционный нагрев, возникающий, как полагали ученые, благодаря обмену трущихся тел запасом теплорода.

Подобное мнение о природе теплоты не разделялось многими крупнейшими учеными, в том числе М. В. Ломоносовым, объяснившим нагрев интенсивными колебаниями мельчайших частиц материи. Однако первым, кто понял, что выделение теплоты при трении есть прямой результат подведения к трущимся телам механической энергии, был Б. Томпсон — талантливый и предприимчивый североамериканский офицер, эмигрировавший еще в молодости в Европу и вошедший в историю науки под именем графа Румфорда.

Открытие, или, если угодно, озарение, пришло, как это нередко бывает, из практики. В технике средневековья сверление (по-старинному «верчение») стволов было одним из самых трудоемких и ответственных этапов изготовления пушек. В описании пушечного двора XVI века, составленном Анисимом Ради-

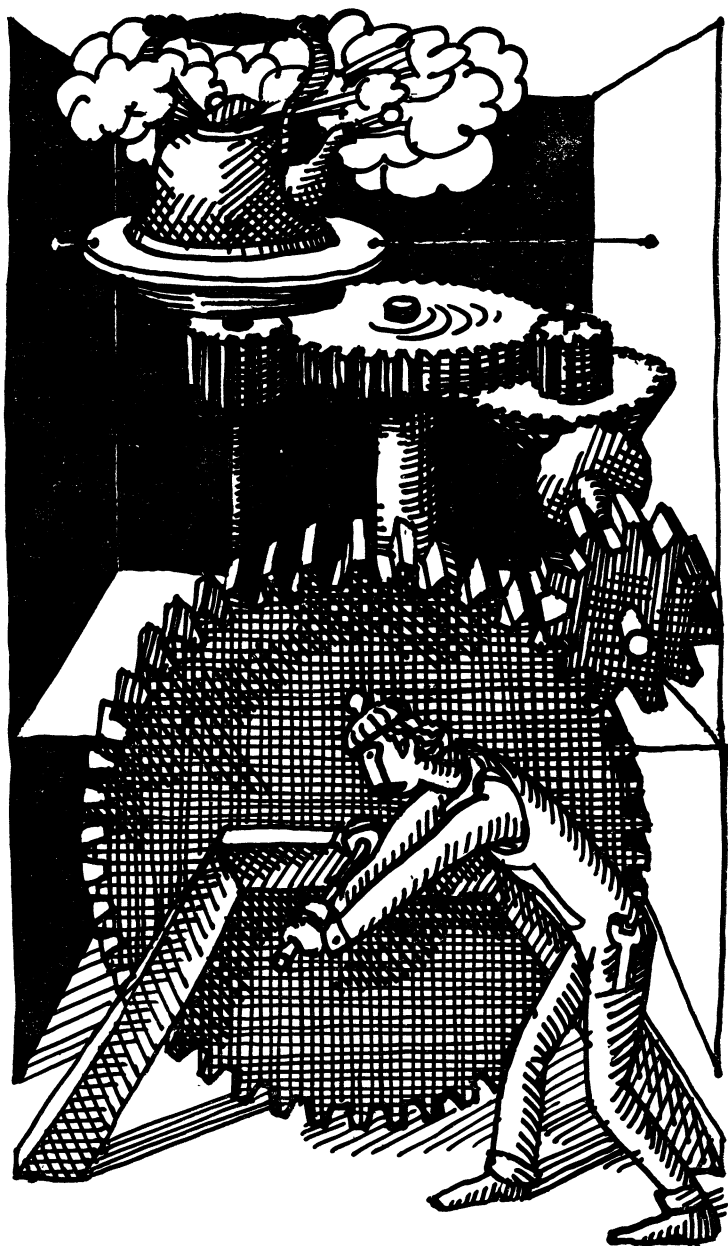
шевским — умелым пушечным мастером и учеником самого Андрея Чохова, говорится о необходимости «строить снасть и буравы посреди пушечного сарая и утвердить то над ними сквозь мост чтоб большие пушки вертети». Вряд ли кто-нибудь предполагал, что именно эта старинная и хорошо знакомая ремесленному люду операция позволит со временем разрешить сложнейшую загадку природы.

Румфорд, состоявший в качестве инженера на службе короля Баварии и наблюдавший за сверлением пушечных стволов в Мюнхенском арсенале, пришел к выводу, что интенсивное выделение теплоты — естественное следствие самого технологического процесса, связанного с сильным трением сверла о болванку. Иными словами, он понял, что теплота рождается самым трением в практически неограниченном количестве. Для проверки своей гипотезы пытливый исследователь использовал тупое сверло, получив в присутствии многочисленных свидетелей еще более сильный нагрев.

«Трудно было описать удивление и изумление, выраженное зрителями, — отмечал Румфорд, — при виде, как столь большое количество воды нагревалось и даже было доведено до кипения без всякого огня ... Поскольку установка, применявшаяся в этом опыте, легко могла бы приводиться во вращение силой одной лошади ..., можно рассчитать, сколь большое количество тепла может быть произведено исключительно с помощью надлежащего механического устройства силою одной лошади, без огня, без света, без горения или химического разложения ... Размышляя по этому поводу, мы не должны забывать того самого замечательного обстоятельства, что источник тепла, производимого в этих опытах с помощью трения, оказывался, очевидно, неисчислимым!» Теория теплорода получила сокрушительный удар.

Прекрасно понимая значимость своего открытия, ученый сделал в 1798 г. доклад в английском Королевском обществе, который произвел большое впечатление, хотя и не убедил некоторых скептиков. Даже в наиболее полном и авторитетном курсе физики известного французского ученого Ж. Био, вышедшем 30 лет спустя после этого доклада, утверждалось, что причина возникновения теплоты при трении все еще не известна.

Решение этого вопроса стало возможно лишь к середине прошлого века, когда 28-летний немецкий врач Р. Майер и 25-летний владелец лондонского пивоваренного завода Д. Джоуль выдвинули почти одновременно принцип сохранения энергии при ее переходе из одной формы в другую. Количество теплоты, выделившейся при трении, — утверждали они, — строго равно работе, затраченной при этом на преодоле-



ние сопротивления движению. «Если мы будем, например, тереть две металлические пластинки друг о друга, — рассуждал Р. Майер, — то мы будем наблюдать, как исчезнет движение и, наоборот, возникнет тепло, и вопрос теперь может быть только в том, является ли движение причиной тепла».

Далее, подчеркивая обратимость перехода в строгой пропорции механической энергии в теплоту, молодой ученый утверждал, что «локомотив с его поездом может быть сравнен с перегонным аппаратом; тепло, разведенное под котлом, превращается в движение, а таковое снова осаждается на осях колес в качестве тепла». Рассчитанный Майером механический эквивалент теплоты оказался близким по значению экспериментальному результату, полученному позже методом Джоуля, в основе которого было положено трение лопастного устройства о воду. Однако истинная значимость этих работ выяснилась лишь после того, как Г. Гельмгольц распространил полученные результаты на все известные в то время виды движения, сформулировав закон сохранения ранее не известной физикам универсальной величины — энергии, являющейся вместе с понятием материи краеугольным камнем современной физики.

Несколько позже Р. Клаузиусом были заложены основы механической теории теплоты и введено необычное понятие энтропии, вызвавшее сначала сильное противодействие у физиков. Смысл этого таинственного понятия был раскрыт выдающимся австрийским ученым Л. Больцманом, который показал, что энтропия — всего лишь мера неорганизованности или беспорядка.

Например, квартира, в которой мы живем, имеет малую энтропию, если она хорошо прибрана и, наоборот, — большую энтропию, если в ней царит неразбериха и хаос. Но почему, спрашивается, уборка квартиры сопряжена с затратой немалых трудов, в то время как беспорядок всегда возникает с удивительной легкостью и как бы сам собой? Ответ Больцмана был гениально прост: вариантов хаоса всегда несоизмеримо больше, чем путей к порядку. Поэтому любая случайность или небрежность с огромной вероятностью способствуют хаосу, в то время как «бесплатное» достижение порядка практически невероятно и требует приложения сознательных усилий.

Итак, состояние любой системы и вообще всякого дела, пущенного на самотек, неумолимо становится все более хаотичным, т. е. их энтропия непрерывно растет. В этом и заключается важнейшее следствие второго начала термодинамики — одного из наиболее общих законов природы. Трение как рассеяние в теплоту механической энергии служит наиболее

распространенным проявлением такой всеобщей склонности природных явлений к росту энтропии. С этой точки зрения трение представляется естественным и чуть ли не обязательным, а потому и трудноустранимым побочным эффектом. С другой стороны, органическая связь этого явления со степенью упорядоченности, или энтропией, системы, прямо вытекающая из второго начала термодинамики, позволила со временем совершенно по-новому и с большим оптимизмом взглянуть на перспективы борьбы с трением и изнашиванием.

Так, уже ко второй половине прошлого века учение о трении не только вплотную приблизилось по своему содержанию к традиционным областям физики — механике и теплоте, но и послужило связующим звеном между ними, что привело к открытию важнейших физических законов.

«Трение, — писал Ф. Энгельс, — является тормозом для движения масс, и в течение столетий оно рассматривалось как нечто уничтожающее движение масс, т. е. уничтожающее кинетическую энергию. Теперь мы знаем, что трение и удар являются двумя формами превращения кинетической энергии в молекулярную энергию, в теплоту ... Таким образом, трение и удар приводят от движения масс, предмета механики, к молекулярному движению, предмету физики» *).

Но какими же способами осуществляются подобные превращения? В истории учения о трении, как, впрочем, почти в любой области науки, есть эпизоды, прошедшие незаметно и не оставившие особой памяти у современников, но оказавшиеся много лет спустя ключевыми для развития определенной отрасли знания. К числу таких событий, бесспорно, относится открытие английским ученым Д. Деагулье явления когезии, или слипаемости, кусков свинца, сделанное им в период 1724—1734 гг.

Сын французского священника-протестанта Д. Деагулье еще в раннем детстве был тайно вывезен в Англию спрятанным, по семейному преданию, в корабельной бочке. Произошло это вскоре после отмены королем Франции Людовиком XIV Нантского эдикта (1685 г.), предоставлявшего гугенотам определенные права. Завершив образование в Оксфорде, молодой ученый переехал в Лондон. Там он приобрел известность не только как лектор по натуральной философии — так в то время называли физику, но и как искусный экспериментатор. Официальным признанием заслуг Деагулье явилось избрание его членом Королевского общества.

*) Энгельс Ф. Диалектика природы. — М.: Госполитиздат, 1946. — С. 79.

Опыты с «намертво» слипшимися образцами свинца были необычайно наглядны. «Легче поднять большинство тел с земли, нежели разбить их на куски», — утверждал ученый в своем курсе лекций. Такая сила, соединяющая части тела, оказывается куда прочнее, чем их земное притяжение. Эта сила, какова бы ни была ее природа, называется притяжением когезии. Оно велико, когда тела касаются друг друга, но очень быстро уменьшается, когда части, находившиеся до этого в контакте, разнимаются. Даже самый малый промежуток между ними приводит к тому, что притяжение становится почти неощутимым. Позднее словом «когезия» стали обозначать только слипание одинаковых материалов, а для общей характеристики явления был придуман термин «адгезия».

По имевшимся в то время представлениям явление адгезии как обязательного свойства всех твердых тел ниоткуда не следовало. Лишь микроскопическая теория строения вещества выявила особое положение атомов и молекул на поверхности тел: они всегда имеют меньшее число соседей, чем положено, и жаждут восстановить справедливость, вступив в контакт с атомом или молекулой другого тела. Отметим, забегая вперед, что роль адгезии стала очевидной лишь в нашем веке, когда ученые вплотную взялись за решение главной загадки трения: каким образом механическая энергия, подводимая к фрикционной паре, превращается в теплоту?

Популярная к началу XIX века гипотеза о подъеме тел по неровностям, высказанная еще Амонтоном, не соответствовала новым представлениям, связанным с превращением механической «силы» в теплоту. Неудивительно, что шотландец Д. Лесли, уже знакомый, по-видимому, с докладом Румфорда в Королевском обществе, выдвинул гипотезу о тепловыделении при трении за счет смятия бугорков на поверхностях контакта. Это остроумное представление дожило до наших дней и успешно используется при описании трения металлов. Кому не известно, что алюминиевая проволока, быстро согнутая и разогнутая несколько раз, заметно нагревается в месте перегиба? Но способность большинства металлов к многократной пластической деформации ограничена. Они постепенно твердеют (та же алюминиевая проволока ломается) и в теплоту в результате превращается совсем мизерная энергия. Получалось, что трение металлов в этом случае должно постепенно стремиться к нулю, чего, увы, никогда не наблюдалось.

Были и другие факты, несовместимые с теорией смятия бугорков, например переход жесткого цилиндра от скольжения по плоскости к качению. Потери на трение после такого перехода исчезающе малы, хотя число сминаемых неровностей

остается точно таким же, как и при скольжении. Да, здесь было над чем поломать голову!

Будучи хорошим физиком, Лесли отрицал какую-либо роль адгезии при трении, справедливо полагая, что притяжение, открытое Деагулье, направлено перпендикулярно плоскости скольжения и поэтому никак не в состоянии повлиять на трение. В самом деле, сильное притяжение к Земле нисколько не мешает Луне двигаться по орбите без всякого трения. Подобное соображение разделялось позднее и многими другими крупными специалистами.

Адгезионная модель трения обрела физическую основу только в конце прошлого века, когда Л. Бриллюэн, опираясь на совершенно новые представления о строении вещества, указал на возможность рассеяния энергии в теплоту при последовательном разрыве и образовании адгезионных связей. Иначе говоря, при скольжении происходит непрерывный *обмен связей*. Тепловыделение при подобном обмене неизбежно, так как силовые поля вокруг молекул по-разному реагируют на сжатие и растяжение, в отличие, скажем, от обычных пружин.

Трение, согласно такой гипотезе, есть результат интенсивного обмена адгезионных связей при скольжении одного тела по другому. «Когда два тела перемещаются относительно друг друга, — писал Д. Томлинсон, — непрерывно осуществляется обмен пар молекул, несущих нагрузку. Теория предполагает, что когда две молекулы вступают в контакт (т.е. входят в поле отталкивания) и затем расходятся, теряется энергия, что и считается трением». Идея рассеяния энергии при микроскопическом обмене адгезионных связей была развита позднее в той или иной форме в работах советских ученых В. Кузнецова, Б. Дерягина, Г. Бартенева и др.

Тем не менее, главным образом благодаря трудам Ф. Боудена и Д. Тейбора в Англии и И. Крагельского в Советском Союзе, стали учитывать не только зацепление и смятие неровностей на контакте, но и прилипание их друг к другу. Так были объединены два долгое время казавшиеся вполне самостоятельными объяснения загадки трения, уходящие к самым истокам учения. Правда, и здесь мнения специалистов разделились: английские исследователи считали, что ведущую роль играет сопротивление адгезионных «мостиков» на срез, в то время как И. Крагельский полагал, что не менее важна и роль зацепления и вдавливания друг в друга неровностей.

Отметим в заключение, что общепринятой теории превращения механической энергии в теплоту в результате трения твердых тел на сегодня не существует.

ПОЧЕМУ МЫ ХОДИМ?

А теперь мы приглашаем вас в путь, дорогой читатель, и для начала по ровной асфальтовой дорожке. Шагаем легко и свободно, и ... сразу наш первый и, возможно, довольно странный вопрос: а почему, собственно, мы движемся вперед? За счет переступания ног? Верно, но вот заковыка: стоит шагнуть с асфальта, скажем, на мокрую глину, как ноги начинают скользить и наша поступь становится уже не такой уверенной. А если впереди гладкий лед? Тогда дело совсем плохо. Скользко! И мы можем продвигаться вперед разве только комическими мелкими шажками, подобно Чарли Чаплину.

Ясно, что для нормальной ходьбы нужно, прежде всего, чтобы ноги, твердо опираясь на дорогу, не скользили. Но почему они вдруг начинают скользить и чем мокрая глина уступает асфальту, а лед — и того хуже?

Чтобы разобраться в этих не таких уж простых вопросах, давайте пока прекратим нашу прогулку и займемся опытами. Положим на тот же асфальт некий предмет, например самый обычный кирпич, и будем пытаться сдвинуть его с места веревочкой, измеряя силу сопротивления прибором или гириями.

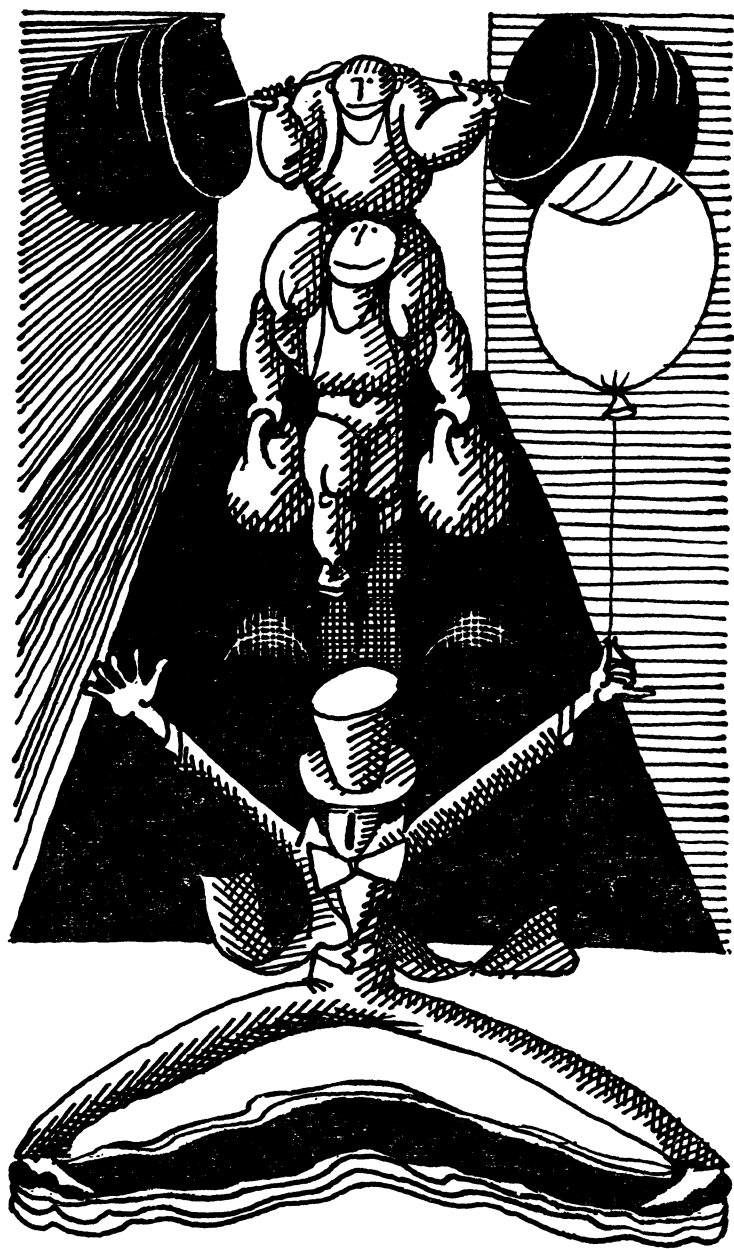
Постепенно увеличивая силу тяги, мы дождемся момента, когда наш кирпич рывком тронется с места. Фиксируя необходимое для этого усилие и повторяя опыт несколько раз, убедимся: кирпич сдвигается с места примерно при одном и том же значении силы.

Теперь положим два кирпича друг на друга и повторим первый опыт. Усилие страгивания явно возрастет. Снова повторим опыт, но уже не с двумя, а, скажем, с пятью кирпичами. Результаты всех опытов представим на графике, где по горизонтальной оси отложим вес груза (число кирпичей), а по вертикальной силу трения покоя.

Мы получим интересный результат: все точки лягут на одну прямую, проходящую через начало координат. Это означает, что сила трения покоя прямо пропорциональна весу груза. Мы знаем, что прямая может быть описана тангенсом угла наклона, т. е. $\operatorname{tg} \alpha$. Это число, которое есть не что иное, как отношение силы трения покоя (сопротивления страгиванию) к весу груза, мы назовем коэффициентом трения покоя μ_n :

$$\mu_n = \frac{\text{сила трения покоя}}{\text{вес груза}} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

Продолжаем теперь наш опыт уже не на асфальте, а на мокрой глине и гладком льду. Обобщив все полученные ре-



зультаты, мы заметим следующее. Прямая пропорциональность между силой трения покоя и весом груза сохраняется и для мокрой глины, и для льда. Однако наклон прямой в опытах с глиной оказывается заметно меньше, чем в опытах с асфальтом, а для льда — и того меньше.

Это будет означать, что коэффициент трения покоя μ_n , не меняясь с увеличением груза, зависит от материала дорожки. Например, у мокрой глины коэффициент трения покоя меньше, чем у асфальта, а у гладкого льда меньше, чем у мокрой глины.

Вооружившись этими знаниями, мы можем ответить на ряд вопросов. Мы движемся вперед потому, что последовательно отталкиваемся от дорожки то одной, то другой ногой, благодаря силе трения. По асфальту идти легче, чем по мокрой глине или льду, потому что коэффициент трения покоя μ_n в этом случае намного больше. Ступая по мокрой глине и особенно по льду, мы уже не можем отталкиваться от дорожки с прежней силой, поскольку ограничены низким значением μ_n , от которого прямо зависит сила толчка. Всякая попытка выйти за этот предел приводит только к неприятному проскальзыванию ног. Отсюда и походка Чарли Чаплина.

Наш вывод мы можем распространить на более сложный случай: прогулку с младшим братишкой, которого мы тянем на буксире в санках. Какую силу тяги мы можем развить? Ответ готов. Сила тяги по снегу равна нашему весу P , умноженному на коэффициент трения покоя для наших подошв:

$$T = \mu_n P. \quad (2)$$

Например, при собственном весе $P = 500$ Н и $\mu_n = 0,3$ мы можем развить тягу до 150 Н. А больше? По-видимому, ничего не выйдет: нельзя же изменить собственный вес!

Но вот в санки еще подсади дети, тащить стало тяжело, ноги начинают проскальзывать. Инстинктивно перебрасываешь веревку через плечо, все-таки не так режет ... Но что это? Проскальзывание прекратилось! Неужели нарушился закон?

Нет, все происходит по-прежнему в рамках этого закона. Перекинув веревку через плечо, вы увеличили угол тяги с нуля до некоторого значения β . Разложив силу тяги T , направленную вдоль веревки, на две составляющие, мы помимо горизонтальной составляющей — движущей силы — получили вертикальную составляющую, направленную вниз, т. е. в ту же сторону, что и вес нашего тела. Это значит, что влекомый нами груз сам прижимает нас к дороге, повышая тем самым силу тяги. К тому же при этом уменьшается и сила давления груза на дорогу — а значит, его легче тянуть. То же происходит, ког-

да вы тащите бревно, водрузив один его конец себе на плечо. Наша тяговая способность возрастает на величину $\Delta T = \mu_n T \sin \beta$. Приняв в предыдущем примере $\beta = 30^\circ$, получим прирост $\Delta T = 22,5$ Н, т. е. рост предельной силы тяги на 15%. Продолжим нашу прогулку. Тропинка постепенно забирает в гору. Опыт подсказывает, что поскользнуться здесь куда вероятнее, чем на ровной дороге. Теперь мы уже знаем почему: при наклоне тропинки сила давления на грунт ослабевает пропорционально $\cos \beta$, и на первый взгляд мы можем обобщить закон (1), записав его в виде

$$T = \mu_n P \cos \beta. \quad (2)$$

При $\beta = 0$, т. е. для горизонтальной дорожки, мы получаем выражение (1), а при небольшом угле β — уменьшение силы трения покоя, что и подтверждается опытом. Казалось бы, все в порядке. Увы, опыты с большими уклонами (большими β) показывают, что проскальзывание наступает намного раньше, чем предсказывает (2). Ну конечно! Учтя ослабление силы давления на грунт, мы совсем забыли о составляющей веса, направленной вдоль дороги и равной $P \sin \beta$.

Совершенно ясно, что эта составляющая не только не помогает, а наоборот, тянет нас вниз. Отсюда мы получаем хорошо подтверждаемую опытом зависимость максимального толчка при ходьбе от угла наклона плоскости к горизонтали в виде

$$T = P (\mu_n \cos \beta - \sin \beta). \quad (3)$$

Легко убедиться, что при $\beta = 0$ этот закон приводит к выражению (1). Он также почти тождествен (2). Однако с ростом угла наклона сила трения покоя уменьшается и возникает проскальзывание, о чем прекрасно осведомлены бывалые туристы и альпинисты.

Школьникам полезно знать, что самые простые задачи, связанные с рассмотрением сил трения, нередко таят в себе «подводные камни». Рассмотрим, например, систему из двух симметричных опор с шарниром в точке А, удерживающих только за счет трения вес P (рис. 2). Чему равна сила трения в каждой опоре? Пусть μ_n — коэффициент трения покоя опор. По

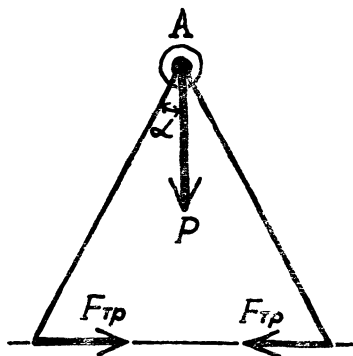


Рис. 2

закону (1), как мы уже знаем, сила трения, действующая на опору, равна $\mu_n P/2$, поскольку на каждую из опор приходится половина нагрузки. С другой стороны, разлагая силу реакции в опоре по известному правилу, находим, что ее горизонтальная составляющая равна $\operatorname{tg} \alpha \cdot P/2$. Но позвольте, по третьему закону Ньютона обе силы должны быть равны по модулю! Мы же получили для них совершенно разные значения. В чем же дело?

Вспомним, что $\mu_n P/2$ — это *максимальная* сила трения покоя. В то же время для удержания системы в равновесии достаточно лишь *части* этой силы, строго равной по модулю $\operatorname{tg} \alpha \cdot P/2$. Ведь во всех рассмотренных выше примерах нормальной ходьбы имело место как раз частичное использование силы трения покоя, не допускающее проскальзывания. Таким образом, противоречие снимается. В общем же случае условие равновесия нашей системы, как легко видеть,

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \mu_n. \quad (4)$$

Это уже некий сюрприз. Получается, что при заданном μ_n равновесие возможно далеко не всегда; при достаточно большом угле α система безнадежно «расползется» при любой нагрузке и даже под собственным весом! Именно это обстоятельство эффективно используют конькобежцы-фигуристы. Стоит спортсмену, до этого вполне надежно державшемуся на льду, сильно раздвинуть ноги, как он легко переходит в положение «шпагат». Полученное физическое условие известно всем инженерам, поскольку оно обладает большой общностью. Именно оно определяет, одолеет ли данный подъем пешеход или, например, какой-либо колесный транспорт. При этом инженерный смысл параметра μ_n оказывается очень широким — это коэффициент проскальзывания по грунту не только наших ботинок, но и ведущих колес автомобиля и тепловоза.

А кому из ребят, коловших дрова, не приходилось мучительно долго вызволять топор, намертво застрявший в полене. Теперь и здесь нам все понятно. Угол поперечного сечения топора мал. Это-то, как следует из нашего условия, и позволяет силами трения надежно удерживать его в плену. По этой же причине специально предназначенные для колки дров колуны имеют в сечении значительно больший угол, чем топоры. Отметим, наконец, многочисленные случаи заклинивания и застревания различных деталей и инструментов в чуть больших по размерам щелях и отверстиях. Здесь работает все то же условие своеобразного «конуса трения»: при достаточно малых углах перекоса трение начинает проявляться тем сильнее, чем энергичнее усилие, направленное на освобождение застрявшей детали.

Рассмотрим теперь случай, с которым почти наверняка сталкивался любой из читателей. Представим, что к стенке прислонена лестница (рис. 3). При каких условиях человек на этой лестнице застрахован от падения? При учете трения в точках опоры A и B задача статически неопределенна. Допустить трение только в точке A нельзя, поскольку необходимую для этого реакцию опоры R_A нечем уравновесить. Будем считать, что все трение сосредоточено в точке B и характеризуется коэффициентом μ_n ; пренебрежем также весом лестницы.

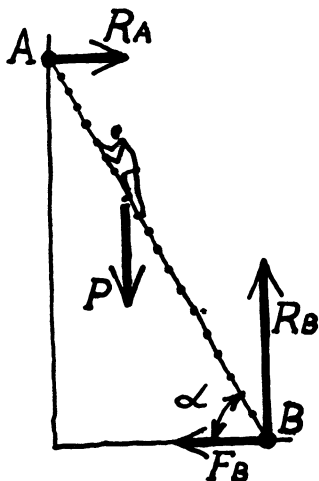


Рис. 3

Сила трения F_B уравновешивает только реакцию опоры R_A и поэтому равна ей. Эта реакция, в свою очередь, легко находится из условия равенства нулю моментов всех сил относительно точки B : $R_A = \varepsilon P / \operatorname{tg} \alpha$, где ε — относительная высота подъема человека по лестнице. Таким образом, по мере подъема R_A растет пропорционально ε , а вместе с ней растет и сила трения F_B . Но по закону (1) рост F_B ограничен максимально возможным значением $\mu_n P$ (когда $R_B = P$). В результате находим довольно любопытное условие устойчивости лестницы:

$$\varepsilon < \mu_n \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

Сравнивая его с (4), мы видим, что здесь, помимо $\operatorname{tg} \alpha$, присутствует еще и параметр ε , от которого зависит наша безопасность. Оказывается, что устойчивое положение лестницы в начале подъема, когда ε мало, отнюдь не гарантирует нас от куда более опасного падения с большей высоты! Ясно, что соскальзывание лестницы будет исключено полностью лишь при

$$1 < \mu_n \operatorname{tg} \alpha. \quad (6)$$

Например, при $\mu_n = 0,25$ неравенству (6) соответствует тангенс угла наклона лестницы $\operatorname{tg} \alpha \geq 4$.

А как подстраховать человека, взбирающегося по лестнице? Для этого страхующему проще всего встать на ее нижнюю ступеньку. Тогда полная безопасность, как легко проверить, соблюдается на всей лестнице.

Наша прогулка привела к довольно неожиданному результату. Передвижение по твердой поверхности земли осуществляется нами за счет неподвижного контакта между нашей обувью и дорогой. При этом сопротивление проскальзыванию, возникающее при таком контакте, не только чрезвычайно полезно, но и необходимо для ходьбы, а также статического равновесия сооружений и, как мы увидим дальше, множества других важных явлений и процессов, заполняющих нашу жизнь. И тем не менее мы не дошли пока до главной темы нашей книги — трения движущихся тел. К этой теме мы и приступим в следующей главе.

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

Корабль сходит со стапелей, поршень движется в цилиндре, санки стремительно несутся с горы ... Во всех этих случаях мы имеем дело с трением скольжения, проявляющимся, прежде всего, как сила сопротивления относительному перемещению тел, находящихся в контакте.

Скажем сразу, что физическая природа таких сил необычайно сложна и многообразна. Но нас пока интересует сам факт их появления и многочисленные последствия, к которым это приводит. Поэтому вернемся снова к нашим опытам, прерванным на самом интересном месте. В самом деле, что же, собственно, происходит после начала движения? Переход от трения покоя к трению скольжения отнюдь не гладок: происходит явный скачок, после которого движение тела с постоянной скоростью сопровождается постоянным сопротивлением этому перемещению. При этом практически всегда сила трения скольжения $F_{ск}$ оказывается заметно меньше силы трения покоя $F_{п}$, т. е. соблюдается условие

$$F_{ск} < F_{п}. \quad (1)$$

Отметим это очень важное, как мы увидим дальше, обстоятельство и исследуем трение скольжения так же, как мы изучали раньше трение покоя. Мы получим такой же конечный результат: сила трения прямо пропорциональна весу трущегося предмета, и придем к уже известному закону Амонтона.

Парадоксальность этого закона, о которой мы говорили выше (сила трения не зависит от площади контакта тел), стала на долгие годы предметом оживленных споров между учеными. И сейчас не на все вопросы получены ответы, хотя ряд соображений представляется довольно убедительным.

Дело в том, что касание твердых тел происходит не по всей поверхности, а в отдельных пятнах, или «очагах», контакта. Суммарная (фактическая) площадь таких очагов $S_{ф}$ обычно очень мала и составляет весьма малую часть от номинальной площади $S_{н}$.

Однако если $S_{н}$ всегда задана, то $S_{ф}$, как показывает опыт, растет с увеличением веса груза P . Стоит теперь предположить, что этот рост прямо пропорционален P , как парадокс закона Амонтона разрешается — сила трения прямо пропорциональна фактической площади контакта, которая, в свою очередь, линейно растет с ростом груза. Ставя кирпич на различные грани, мы во всех случаях сохраняем постоянной $S_{ф}$, которая зависит только от веса кирпича P . Отсюда и постоянство трения.

Увы! Легко обнаруживается, что S_f растет пропорционально P далеко не всегда. Типичный пример — стальной шарик, прижимаемый к жесткой плите. Площадь кругового пятна контакта увеличивается здесь, как показывают теория и эксперимент, заметно медленнее, чем прижимающая сила, а закон Амонтона по-прежнему соблюдается! Разумеется, если шарик не катится, а скользит по плоскости.

Только в нашем веке стало ясно, что тупик, в который зашли ученые, объясняется слишком упрощенным подходом к явлению трения. Накопилось много фактов в пользу того, что трение — результат тонких микроскопических процессов, прямо связанных с атомно-молекулярным строением вещества.

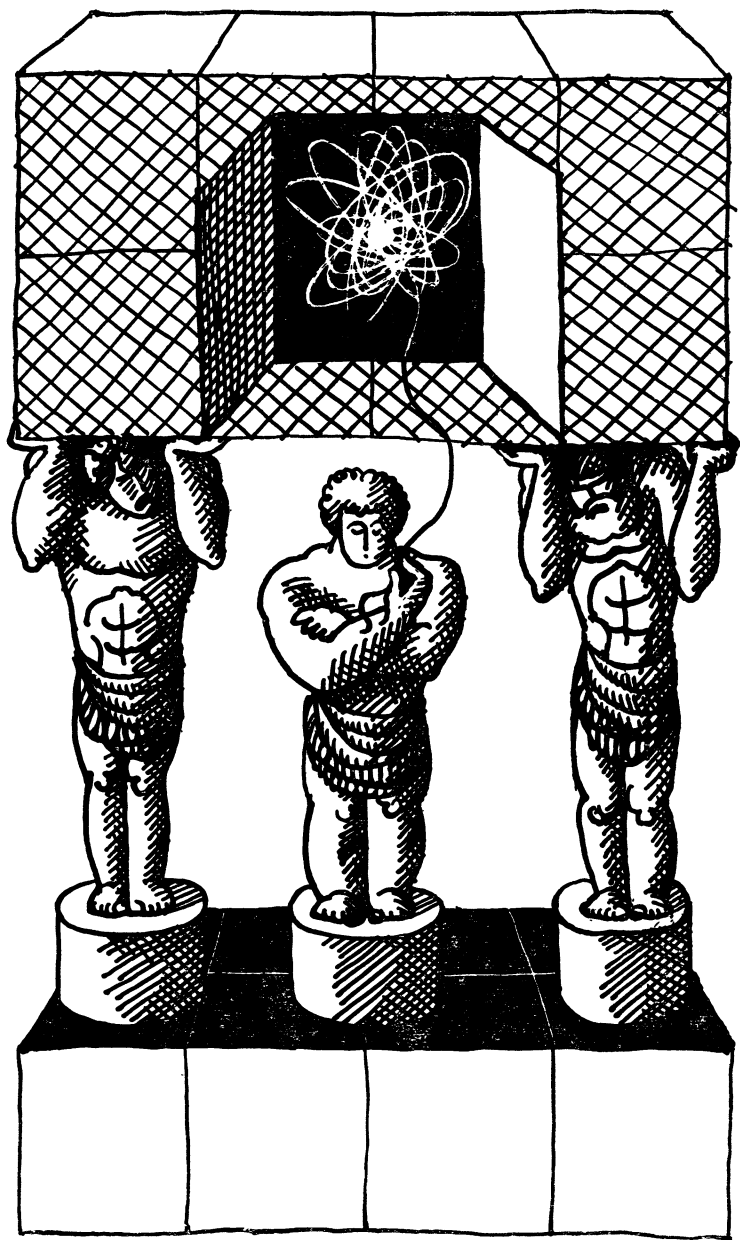
В 1929 г. английский физик Д. Томлинсон высказал смелую гипотезу о том, что атомы, расположенные на поверхности твердого тела и первыми воспринимающие нагрузку при взаимодействии с такими же атомами другого тела, работают по принципу «да — нет»: каждый из них или держит груз q , подобно древнегреческой кариатиде, или не работает вообще. Характерная величина q , названная постоянной Томлинсона, определяется особенностями строения кристаллической решетки материала. С ростом нагрузки автоматически вступают в строй новые «кариатиды», число которых оказывается строго пропорциональным нагрузке.

Так исчезает старое представление о сплошном и огромном, по сравнению с атомом, очаге контакта с максимальным давлением в центре. Вместо него возникает модель из множества сравнимых с атомом «пятен» контакта, каждое из которых воспринимает одинаковую внешнюю силу.

Из гипотезы Томлинсона сразу следует закон Амонтона. В итоге парадокс этого закона разрешается переосмыслением на основе атомно-молекулярных представлений такого простого и очевидного, казалось бы, понятия, как площадь фактического касания твердых тел.

Сейчас уже не существует сомнений, что в основе трения лежат сложные микроскопические явления. Вполне вероятно, что закон Амонтона служит как раз естественным проявлением этой тонкой природы трения. Если это так, то и учение о трении приобретет в ближайшем будущем свою «микроскопическую» базу.

А пока ... Сопутствуя чуть ли не всем физическим явлениям, окружающим нас, трение, как это и предвидел Амонтон, настойчиво требует от инженеров и ученых особого внимания и строгого количественного учета, позволяя одновременно глубже проникнуть в самую суть реальных процессов. Даже наиболее простые случаи движения тел, находящихся во взаи-



модействии с другими телами или с окружающей средой, становятся непонятными или вообще необъяснимыми без своего рода поправок на трение.

Совсем по-иному выглядят задачи, где начальная энергия, например механическая, может превращаться из одной формы в другую. Вспомним, что при колебании обычного маятника его кинетическая энергия превращается в потенциальную и наоборот. Если трение в подшипнике отсутствует, то к. п. д. такого превращения равен 100%, т. е. маятник может колебаться «вечно». А вот при наличии трения часть механической энергии станет неизбежно рассеиваться в теплоту, что приведет в конце концов к остановке маятника. Получается, что превращение кинетической энергии в потенциальную (или наоборот) отнюдь не эквивалентно переходу ее в теплоту.

Но, собственно, почему же? Разве не можем мы с помощью специального устройства собрать теплоту, выделившуюся в подшипнике, и использовать ее вновь для раскачки маятника? Да, можем, но увы, лишь частично. И помешает нам не плохая конструкция нашего устройства (она может быть идеальной), а всемогущее второе начало термодинамики. Именно из этого фундаментального физического закона следует, что в работу можно превратить только часть имеющегося запаса теплоты, и тут уже ничто не поможет...

Рассмотрим в связи с этим другой пример, взятый из небесной механики. Ничто, казалось бы, не мешает нашей спутнице Луне вечно обращаться по инерции вокруг Земли. Ведь кругом — космический вакуум и никакого трения, вроде, быть не может. Но Луна все-таки теряет постепенно кинетическую энергию, исподволь сужая орбиту и приближаясь к нам. Энергия эта затрачивается на возбуждение в наших земных океанах мощных приливных волн, вину за которые Луна делит вместе с Солнцем. Позвольте, а куда же все-таки девается эта немалая энергия? Она также рассеивается в теплоту: ведь вода при своем течении обладает вязкостью, т. е. внутренним трением.

Снова представим себе, что мы хотим повернуть процесс вспять, т. е., постепенно накапливая и возвращая Луне потерянную энергию, заставить ее столь же медленно переходить на все более дальнюю орбиту. Увы, сделать это только за счет энергии, рассеянной в теплоту, невозможно, как и в случае с маятником: второе начало столь же несокрушимо станет на нашем пути.

Выходит ... поразительная вещь: реальные события и явления, окружающие нас, вопреки формулам классической механики не симметричны во времени: они необратимы, т. е. имеют вполне определенное прошлое и будущее, четко отличающиеся

друг от друга. Иными словами, время в нашем мире «летит» не только равномерно, но и направленно, подобно некой стреле. И что удивительно: средством прямого выражения необратимости происходящего служат во множестве случаев процессы трения! Очень хорошо сказал об этом французский ученый А. Пуанкаре: «Во всех случаях трение служит образцом, которому подражают разнообразнейшие необратимые явления ...»

А вот вам задача на сообразительность. Выше мы говорили о потерях на трение в маятнике. Н. Е. Жуковский предложил свести эти потери к минимуму парадоксальным методом: привести ось маятника в быстрое вращение. Опыты подтвердили, что трение при этом, действительно, резко уменьшилось. Спрашивается, почему? В самом деле, по закону Амонтона трение скольжения не зависит от скорости, нагрузка же на подшипник маятника остается в обоих случаях постоянной.

Разгадка парадокса в том, что маятник в крайних положениях на какое-то время замирает. Это означает, что мы периодически (два раза за цикл) имеем дело не только со скольжением, но и с трением покоя. А коэффициент трения покоя, как мы уже знаем, заметно выше, чем коэффициент трения скольжения. Остроумие и изящество метода Жуковского в том, что при быстром вращении шип оси маятника не останавливается ни на мгновение. Он всегда скользит! При этом, конечно, меняется в очень ограниченных пределах скорость скольжения, но это, как мы уже тоже знаем, не столь важно.

Рассмотрим в заключение еще одну задачу, которая может поставить школьника в тупик. Закон сохранения импульса, согласно которому импульс неуничтожим, иллюстрируют обычно с помощью лобового столкновения пары шаров или, еще лучше, тележек, катящихся по рельсам. Мы тоже воспользуемся такой тележкой, но только одной. Наша тележка массой m имела начальную скорость v и скользила по рельсам с коэффициентом трения μ , пока не остановилась. Спрашивается, куда же делся ее импульс? Оказывается, что этот импульс никуда не пропал, а передался ... Земле с помощью силы трения.

Посмотрим теперь, как наши теоретические знания работают на практике. Выше мы рассмотрели примеры с санками, не коснувшись, однако, самого интересного вопроса: почему санки, и не только они, а и большие сани, знаменитые дровни и розвальни, воспетые Пушкиным, почему все они так легко скользят по снегу? Потому что у снега меньше коэффициент трения, — скажете вы. Да, но ведь снег не лед, и ваши подметки не скользят по снегу, когда вы тащите санки! Так в чем же дело?

Прежде чем ответить на вопрос, вспомним еще одну особенность саней, знакомую когда-то любому извозчику: сани трудно стронуть с места. Все это обусловлено особым механизмом смазочного действия снега и льда. Механизм этот довольно прост: теплота, выделяемая при трении, превращает лед и снег в воду как раз в местах их фактического контакта с полозом, т. е. там, где и происходит трение. Этому способствует малая теплопроводность полоза, который поэтому лучше готовить из дерева. В момент страгивания саней, естественно, никакой теплоты не выделяется, поэтому нет и смазывания.

Любопытно, что именно это обстоятельство остроумно используется в другом выдающемся изобретении — лыжах. При горизонтальном движении и подъеме в гору лыжник должен периодически отталкиваться от, казалось бы, очень скользкой снежной дорожки. Вывод состоит в том, что в момент отталкивания лыжа неподвижна относительно лыжни, поэтому смазки нет и толчок в полном соответствии с законом Амонтона получается достаточно сильным. И только на мокром снегу возникает хорошо знакомая всем лыжникам «отдача».

Надо сказать, что главной причиной низкого трения при скольжении по снегу и льду долгое время ошибочно считали расплавление льда при сильном сжатии. Именно этим объясняли, например, срыв горных лавин при постепенном накоплении снежных масс. Такой взгляд был раз и навсегда опровергнут знаменитым американским физиком Р. Вудом с помощью остроумного опыта. В цилиндр со льдом сверху был помещен свинцовый шар. При сильном сжатии содержимого цилиндра тяжелый шар должен был бы оказаться на дне сосуда. Но ничего подобного не произошло.

Считается, что «цивилизация лыж» возникла в Скандинавии примерно три тысячелетия тому назад. Описывая жителей Крайнего Севера, древние римляне упоминают о сказочных чудовищах с одной огромной ногой, которой они якобы прикрываются от непогоды и на которой бегают по снегу с невероятной быстротой. В действительности лапландцы скользили по снегу на одной широкой и длинной лыже, а второй — узкой и короткой — отталкивались. Лыжные палки появились уже почти в наше время. Даже знаменитый полярный исследователь Ф. Нансен, пересекший на лыжах Гренландию в 1883 г., пользовался еще лишь одной палкой.

При катании на коньках лыжный метод отталкивания уже не подходит, и конькобежец использует для толчка другой прием: разворачивает конек под углом к направлению движения и ставит его на острое ребро, заставляя врезаться в лед.

А нельзя ли придумать для санного или колесного транспорта более мощный способ тяги? Уже в нашем столетии в северных районах и полярных экспедициях получили распространение аэросани, а в самые последние годы — мотосани, — снежные мотоциклы, завоевавшие популярность в СССР, Северной Канаде и на Аляске.

Что ж, достойная, в духе времени замена давно изживших себя собачьих упряжек, скажет читатель. Но ... не спешите с выводами. Вот что пишет по этому поводу известный французский путешественник и знаток Севера Пьер Маньян: «Снегоход в отличие от собаки не в силах разгадать, что под снегом тонкий лед, который вот-вот проломится; снегоход не помогает своему водителю найти потерянную колею, не почует издали медведя, не выследит дичь, спасая порой от голодной смерти, не заметит у полыньи тюленя, не будет безропотно сносить лишения и подвергаться опасностям». Вот вам и передовая техника! И все же сам Маньян предпочитает покорять царство льдов не на собаках, а с помощью даровой силы ветра, что не без успеха практиковали в свое время тот же Ф. Нансен и Р. Скотт.

Вот в каких романтических тонах рисует стремительную поступь своего парусного ледовоза сам изобретатель: «Когда он взбирается на пригорок, мачты слегка кренятся, парус чуть опускается, бег замедляется; лыжи, оставляющие после себя три борозды, чуть приподнимаются ... Слегка поворачиваю штурвал; парус на секунду замирает, потом меняет свой наклон с изящной медлительностью морской птицы, и буер описывает большую дугу, прежде чем вернуться к отправной точке ... Порой из-под полозьев летят искры, когда они наезжают на торчащие из-под снега камни. Время от времени раздается треск ..., но буер продолжает двигаться вперед».

Преодолев на своей ледовой яхте по торосам и айсбергам сотни километров и покорив Северный магнитный полюс, неутомимый француз мечтает о следующем, не менее дерзком шаге: сооружении колесного буера для покорения пустынь Ирана!

Поучительно, что архаические и, казалось бы, давно исчерпавшие себя приемы борьбы с трением обретают со временем иной смысл и возрождаются вновь на базе более глубоких знаний и более совершенных материалов.

Итак, трение скольжения — широко распространенный естественный процесс, без которого мы не можем сделать ни шагу в буквальном и переносном смысле. Но исчерпывается ли им все разнообразие явлений при касании тел с их взаимным перемещением? Конечно, нет. В этом мы убедимся в главе 6.

ДА ЗДРАВСТВУЕТ КОЛЕСО!

Давайте теперь прогуляемся по центру любого большого города. Потоки автомобилей все уверенней заполняют улицы, бесцеремонно оттесняя пешеходов на узкие тротуары. Это с добродушной тревогой отметили еще полвека назад писатели-сатирики И. Ильф и Е. Петров. С тех пор наша страна стала одной из великих автомобильных держав. Но не только автомобили замечаем мы на улицах. Здесь и автобусы, и троллейбусы, и трамваи ... Да и типов самих автомашин столько, что и не упомянуть.

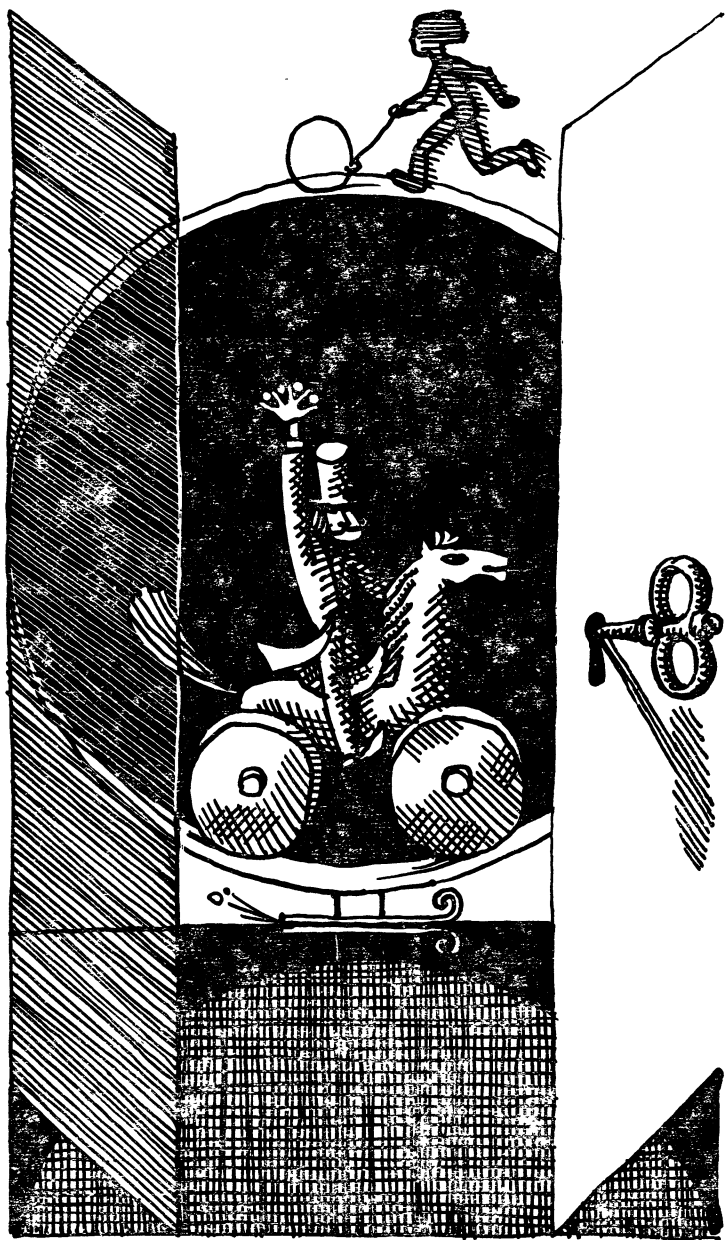
Но вот что любопытно: все эти виды транспорта, которые перевозят во всем мире по суше несметные количества груза и миллиарды людей, имеют общее свойство — все они движутся на колесах, и это столь обычно, что не вызывает никаких вопросов. Колесо и колесо — эка невидаль. Да что там автомашины — обычные сумки-авоськи и те катятся на колесиках: везешь и не чувствуешь. Словом, движение на колесах стало совершенно неотъемлемой чертой нашей цивилизации.

Ясно, что колесо — самое простое, самое распространенное и, возможно, самое эффективное средство борьбы с трением при движении на суше. В то же время колесо — безусловно, одно из самых выдающихся изобретений человека, пришедшее к нам из глубин тысячелетий. Поэтому богатейшая история колеса тесно связана с другими великими изобретениями и изобилует интересными приключениями.

Прежде всего, любопытно проследить историю рождения колеса, которая в свою очередь неразрывно связана с изобретением и использованием другого великого достижения древних — рычага.

Широко используемое человеком еще на самой заре цивилизации гениальное по простоте устройство — рычаг — считается по праву одним из самых выдающихся изобретений всех времен. Наряду с этим удивительная способность рычага резко увеличивать силу человека долгое время слыла загадочной и даже мистической. У древних греков рычаг не зря был символом технического прогресса. Крылатое изречение Архимеда о возможности сдвинуть Землю с помощью гигантского рычага и достаточно крепкой точки опоры было, по существу, пророческим осознанием безграничного могущества человека, овладевшего техникой.

Казалось бы, что об этом простейшем орудии давно уже известно все. Тем не менее рычаг обладает одним очень важным свойством, которое обычно упускают из виду. Речь идет о спо-



способности рычага нейтрализовать потери на трение даже в тех случаях, когда они значительны. Иными словами, трение в точке опоры рычага практически не играет никакой роли. Столь поразительное обстоятельство объясняется тем, что в самом рычаге-орудии скрыт еще один рычаг, малым плечом которого служит радиус поворотной оси. Этот второй рычаг и позволяет свести на нет трение в опоре.

Рассмотрим обычный рычаг с коротким плечом a и длинным плечом ϵa , где $\epsilon > 1$, поворачивающийся на оси радиусом r .

Нетрудно видеть, что рабочий момент длинного плеча рычага $Q\epsilon a$, где Q — сила, приложенная к длинному плечу, должен уравновесить момент короткого плеча, а также и момент силы трения на оси. По закону Амонтона сила трения на оси $\mu Q(1 + \epsilon)$, а значит, момент силы трения равен $\mu Q(1 + \epsilon)r$. При повороте рычага на угол $\Delta\alpha$ мы совершаем работу $A = Q\epsilon a\Delta\alpha$, а работа силы трения по модулю будет равна $A_{тр} = \mu Q(1 + \epsilon)r\Delta\alpha$. Таким образом, полезной окажется лишь работа $A - A_{тр}$ и механический к. п. д. рычага η_p , который определяется как отношение полезной и совершенной работ, равен

$$\eta_p = \frac{A - A_{тр}}{A} = 1 - \frac{A_{тр}}{A} = 1 - \frac{\mu(1 + \epsilon)}{\epsilon} \frac{r}{a}. \quad (1)$$

Величина $(1 + \epsilon)/\epsilon$ лишь немного превышает единицу, в то же время $r\mu/a$ на несколько порядков меньше единицы. Таким образом, механический к. п. д. рычага оказывается весьма высоким. Например, при $\epsilon = 4$, $r/a = 0,05$ и $\mu = 0,25$ (довольно плохая смазка) $\eta_p = 98,4\%$, т. е. составляет почти сто процентов!

Счастливая возможность достижения большого к. п. д. рычага сыграла выдающуюся роль в развитии техники, позволив резко ограничить или практически исключить трение по крайней мере в трех важнейших изобретениях древности, в основу которых был положен рычаг: колесе, гребном весле и механических весах. И во всех этих совершенно не похожих друг на друга устройствах полезный эффект достигался одинаковым способом: радиус оси, на которой поворачивался тот или иной рычаг, будь то обод колеса, валец весла или же коромысло весов, выбирался достаточно малым по сравнению с размерами всего устройства.

Поглядим, как работает древнейшее устройство, использующее рычаг. Это всем известный колодезный ворот, который и сейчас еще можно встретить в деревнях. Вращать такой ворот с полным ведром на конце веревки куда легче, чем вытягивать ведро. Почему? Мы используем рычаг с соотношением плеч L/R , где L — плечо рукоятки и R — радиус ворота. Обычно

$LR = 5$. Это значит, что усилие, необходимое для вращения ворота, во столько же раз меньше веса ведра.

Рассмотрим теперь систему контргруза, широко применяемую в домовых лифтах, принцип работы которых поучителен и имеет прямое отношение к нашей теме. Как поднимать груз весом Q на высоту h ? Простейший способ состоит в использовании электродвигателя с лебедкой. Поднимая груз, мы затрачиваем работу Qh . При спуске груза приходится затрачивать точно такую же (по модулю) работу: ведь спускать груз надо медленно, чтобы он не разбился. Применим такой прием. Подвесим к двум концам троса два кресла-подъемника и перекинем трос через блок. Представьте, что вы хотите подняться вверх, а ваш приятель примерно того же веса — наоборот, опуститься вниз. Сидя в креслах, вы уравниваете друг друга, и лифт — ни с места. Но стоит одному из вас начать легонько перебирать веревку, вертикально натянутую рядом, как вы перещеголяете даже барона Мюнхгаузена: не только без особых усилий поднимете наверх себя, но и попутно спустите вниз своего приятеля!

Энергия, которую вы при этом затратите, будет расходоваться только на преодоление трения в блоке, и ее относительная доля будет равна $2\mu r_n/R_{бл}$, где $r_n/R_{бл}$ — отношения радиусов подшипника и блока («внутренний рычаг»), а μ — коэффициент трения в подшипнике. Приняв $r_n/R_{бл} = 0,05$ и $\mu = 0,01$, получим потери на трение всего в десятую долю процента. У нас почти идеальный подъемник, работающий практически без затраты энергии!

Правда, необходимость одновременного подъема и спуска — большое неудобство. Но кто нам мешает заменить второе кресло контргрузом! В итоге мы получим прекрасный ручной лифт, который впервые был применен столетие назад в невиданных тогда новинках — небоскребах, построенных в американском городе Чикаго после опустошительного пожара. С изобретением электродвигателей лифты получили машинный привод, благополучно доживший до нашего времени.

При всем остроумии система контргруза, по мнению многих специалистов, изжила себя. Сейчас на повестке дня — маленькая «революция» в лифтовом хозяйстве: переход на кабины с гидроподъемником в виде телескопической трубы, куда под давлением подается жидкость. Достоинство такой системы — бесшумность и плавность работы, а главное — надежность и полная безопасность. Однако, хотя такой лифт работает почти без трения, он требует дополнительного расхода энергии не только на подъем, но и на спуск кабины. Ведь при обратном ходе эта энергия будет неизбежно переходить

в теплоту в результате разогрева жидкости, тормозящей спуск кабины... Но продолжим наш рассказ о колесе.

Использование качения требовало изготовления по возможности круглых и одинаковых по диаметру катков, которые к тому же должны были обладать отменной жесткостью. Кроме того, применение их было бы невозможно без предварительной расчистки, выравнивания и укрепления трассы. Все это послужило предпосылками для выдающегося технического достижения древнего мира — перехода к колесному транспорту.

Сейчас твердо установлено, что человек ездит на колесах по крайней мере пять тысячелетий. Об этом свидетельствуют многочисленные находки древнейших колесных повозок в курганах к югу от Главного Кавказского хребта, относящиеся к 3000—2500 гг. до н. э. Возможно, что именно отсюда, из долин Куры и Аракса, колесо проникло не только на юг в Месопотамию, но и на север — в украинские степи и Западную Европу. А еще более вероятно, что колесо было изобретено независимо в ряде районов Европы и Азии примерно за три-четыре тысячелетия до н. э.

Придумать колесо не так-то легко. В высоко развитой цивилизации ацтеков и майя, возникшей в начале нашей эры на территории современной Мексики и Центральной Америки и просуществовавшей вплоть до XVI века, колесного транспорта не было вообще. Между тем оба эти народа широко использовали катки и отличные мощные камнем дороги для доставки из каменоломен многотонных глыб для постройки дворцов и святыщ.

Древнейшее из известных изображений повозок с двумя парами колес принадлежит шумерам и относится примерно к 3500 г. до н. э. Захоронения с двуколками и телегами (2700—2500 гг. до н. э.) обнаружены при раскопках древнейших шумерских городов Урука и Ура, а также города Сузы — столицы древнего Элама. В Индии колесные повозки появились, как считают, в 2500, а в Китае — в 1500 г. до н. э.

По размерам экипажи древних были близки к современным рыночным тележкам. Сбитые из двух полушайб деревянные колеса диаметром около полуметра свободно насаживались на ось длиной около метра. Ширина сидений не превышала 45 см. Задняя часть повозок была полукруглой и укреплялась медной обшивкой.

Попробуем оценить преимущества колесного транспорта перед волокушами, используя то, что мы уже знаем. При общей нагрузке на полозья P сопротивление волокуш движению составит $P\mu$, где μ — коэффициент трения скольжения о дорогу. Поставив тот же груз на колеса, мы получим для сопротивле-

ния движению величину $R\mu_{\text{под}} \cdot r_{\text{под}}/R_{\text{об}}$. Здесь (обратите на это особое внимание!) $\mu_{\text{под}}$ — коэффициент трения в подшипнике скольжения, которые еще в древние времена смазывались дегтем и животным жиром. Улавливаете разницу? Скольжение о дорогу заменено с помощью колеса скольжением в подшипнике, который можно заранее сделать гладким и затем смазать! И второй чудесный дар колеса: малое отношение $r_{\text{под}}/R_{\text{об}}$, т. е. применение эффекта рычага в рычаге путем уменьшения радиуса подшипника по сравнению с радиусом обода, о чем мы уже говорили выше.

Оба способа снижения трения в повозках были хорошо известны нашим далеким предкам. Об этом свидетельствуют дошедшие до нас остатки древних колес, сохранившие на осях следы смазки, а также многочисленные изображения повозок и колесниц античной эпохи. Благодаря этому мы можем оценить технические возможности древних. С учетом несовершенства колес и плохого качества дорог потери на трение в примитивных телегах были всего в 3–6 раз меньше, чем в волокушах и саях, перетаскиваемых по земле. Однако даже такие цифры можно рассматривать как выдающуюся победу техники того времени над трением.

Дальнейший прогресс колесного транспорта определялся усовершенствованием конструкции колес, улучшением качества дорог и переходом на более мощную тягу. Повозки с массивными, сбитыми из двух-трех деревянных частей колесами, появившиеся в III тысячелетии до н. э. на Кавказе и в Месопотамии, просуществовали не один десяток веков.

Знания, накопленные о тележном колесе в течение тысячелетий, удачно обобщил известный итальянский деятель эпохи Возрождения Д. Альберти (XV век). «Если колесо вращается на толстой оси, — рассуждает ученый, — то оно будет катиться труднее, если на тонкой — ось не выдержит тяжести. Если наружный охват колеса небольшой, то оно застревает в земле, если широкий — шатается из стороны в сторону, а если нужно повернуть вправо или влево, — повинуется с трудом. Если втулка слишком свободна, то... она соскакивает, а если чересчур плотна, — делается неподатливой. Промежуток между осью и втулкой должен быть скользким. Ролики и колеса делают из вяза и морского дуба, оси — из остролиста и кизила или, еще лучше, из железа; втулки же лучше всего изготавливать из меди, сплавленной с одной третьей частью олова.» Последнее замечание особенно интересно, поскольку речь идет об одном из первых подшипниковых материалов.

Важнейшим условием развития колесного транспорта явилось строительство мощных дорог. Древнейшая из таких до-

рог, относящаяся примерно к 1200 г. до н. э., обнаружена при раскопках столицы хеттов Хатушаш, находившейся на территории современной Турции.

Прокладка целой сети мощных трасс была начата ассирийскими царями не позже XI века до н. э. и продолжена персами. Государственная сеть дорог была необходима для развития торговли с другими странами, переброски войск, а также для связи между провинциями. Полководцы Александра Македонского, используя дороги, построенные персами, смогли значительно усовершенствовать осадную тактику. Отметим изобретение грозных осадных башен на колесах — гелепол, предназначенных для штурма городов-крепостей. Башни, имевшие собственные метательные орудия, подкатывались скрытыми внутри войнами прямо к крепостным стенам по бревенчатым настилам. В решающий момент из башни на стены опускался навесной мост, по которому осаждавшие устремлялись на штурм.

Выдающуюся роль в развитии колесного транспорта древних сыграло использование лошадей. По имеющимся данным, лошадь впервые была приручена в степях Украины в V—IV тысячелетии до н. э. Оттуда одомашненная лошадь распространилась на Дунай, в Иран и Месопотамию, где использовалась для перевозки легких грузов. Это объяснялось тем, что главным элементом древней упряжки оставалось ярмо, рассчитанное на быков. При больших нагрузках ярмо душило лошадь, тяга которой из-за этого, а также из-за отсутствия подков использовалась всего на одну треть. Несмотря на это, лошадь в упряжке заменяла, как считалось, десять рабов.

Отсутствие хомута и металлических подков не лишало, однако, лошадей их важнейшего преимущества — скорости. Именно это позволило сначала шумерам (XXIV—XXI века до н. э.), а значительно позднее хеттам и ассирийцам использовать лошадей в страшном по тем временам оружии — боевых колесницах с лучниками.

Колеса таких колесниц-одноколок имели массивный обод, четыре спицы и ступицу с отверстиями для посадки на неподвижную ось. Последующее усовершенствование колеса состояло в набивке на деревянный обод металлического (по-видимому, медного) обруча и увеличении числа спиц до 6—8. В 1700 г. до н. э. колесницы стали известны египтянам, широкое распространение они получили также в армиях древней Индии.

Крупнопородные лошади, способные двигаться с вооруженными всадниками на спине, появились в Месопотамии лишь в I тысячелетии до н. э. Это позволило ассирийским царям в IX—VII веках до н. э. впервые создать новый род

войск — конницу, способную быстро атаковать и преследовать неприятеля, что сыграло важную роль при покорении Урарту, Вавилона, Израильского царства и в победах над Египтом. Карфагенские полководцы Гамилькар и Ганнибал имели первоклассную кавалерию, использующую отличных берберийских коней. Но чтобы удерживаться на спине лошади на марше, и особенно в бою, нужны были специальные средства, изобретенные, по-видимому, скифами и гуннами. Мы имеем в виду «скифское седло», стремяна, уздечку и шпоры. Металлические подковы, закрепляемые на копытах лошадей железными гвоздями, проникли в средневековую Европу, по-видимому, от римлян, которые, кстати, широко использовали гвозди и для предохранения подошв обуви от изнашивания, о чем мы уже упоминали в главе 1. В средние века тяжелая кавалерия, состоявшая из закованных в железо рыцарей, сидевших на мощных конях и атаковавших в сомкнутом строю, стала решающим родом войск во всех армиях.

Считается, что современная упряжь с мягким хомутом, охватывающим грудь лошади, и оглоблями была изобретена в Средней Азии вместе с железными подковами и получила распространение в Европе лишь в XIII веке. Благодаря этим приспособлениям расходы на сухопутные перевозки сократились со времен Римской империи примерно в три раза.

При массе животного около 500 кг и коэффициенте трения подков 0,35 тяга достигала 1750 Н. Это в семь раз превышало максимальную тяговую способность человека. При этом лошадь могла двигаться с грузом гораздо быстрее человека. Кроме того, стала возможной конная пахота плугом.

Любопытно, насколько наши оценки близки к мнению современников. Выдающийся знаток вопроса Д. Деагулье утверждал, что лошадиная сила соответствует силе пяти англичан или семи французов, употреблявших в пищу в начале XVIII века значительно меньше мяса, чем англичане.

Наибольшие трудности с перевозкой тяжести возникли в военном деле в связи с непрерывно возрастающей, начиная с XIV века, ролью артиллерии. Французский король Карл VIII (XV век) впервые поставил бронзовые, стреляющие чугунными ядрами пушки на колесные лафеты, перевозимые большим числом лошадей. До этого, например в итальянской армии, пушки перетаскивались волами. Затем уже римский император Карл V (XVI век) ввел передки, превратив орудие на марше в четырехколесную повозку. Такую повозку лошади могли тянуть даже галопом.

Во время гражданской войны в Англии (середина XVII века) лучшая из имевшихся пушек — кулеврина — могла вести при-

цельный огонь на расстоянии 360 м. Для перевозки по хорошей дороге только одного такого орудия, весившего свыше двух тонн, требовалось 50 солдат или 8 лошадей. На плохих дорогах число людей и лошадей увеличивалось. Неудивительно, что общий прогресс артиллерии был связан в первую очередь с уменьшением веса орудий. В результате большинство армий в наполеоновскую эпоху было вооружено относительно легкими пушками.

Так, по крайней мере пять тысячелетий тому назад, цепь гениальных технических находок, в основе которых лежал рычаг и его предельный случай — каток, привела к созданию свободно катящегося колеса — одному из самых выдающихся изобретений всех времен, ознаменовавшему новую эпоху в борьбе человека с трением.

ЗАГАДКА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

«Круглое — кати» — гласит народная мудрость. И правда, кому не известно, что катить круглое тело куда легче, чем волочить его или, скажем, тащить на себе. Используемый с незапамятных времен эффект качения сначала нашел сознательное применение в катках для перетаскивания тяжестей, а затем и в двух гениальных изобретениях: колесе и подшипнике качения.

По сведениям выдающегося римского архитектора и инженера Витрувия (I век до н. э.) подшипники качения на деревянных роликах успешно применялись в осадных машинах армии Александра Македонского — величайшего из полководцев древности.

Уже в наше время на дне осушенного озера в окрестностях Рима были найдены шариковые и роликовые пяты, используемые, как оказалось, на древнеримских судах почти две тысячи лет назад. Любопытно, что шарики в этих уникальных находках были выполнены из бронзы, а конические деревянные ролики выточены, по-видимому, на токарном станке. По другим данным роликовые подшипники, применяемые в ступицах тележных колес, были известны и древним кельтам, жившим на территории современной Англии.

Использование качения в технике и быту сейчас настолько привычно, что мало кто из неспециалистов задумывается о природе этого удивительного и во многом таинственного явления. Действительно, а почему же все-таки катить круглое тело несоизмеримо легче, чем волочить его по той же дороге?! Сразу скажем, что история этого вопроса насчитывает не одну сотню лет и полна любопытных приключений.

Использование при волочении груза круглых катков, изготовляемых из стволов дерева, по-видимому, также старо, как и изобретение рычага. Тесная связь примитивного перекачивания с рычагом отчетливо видна из следующего рассуждения.

Представим себе большой куб весом P . Для равномерного скольжения его по горизонтали необходимо, согласно закону Амонтона, усилие, равное μP , где μ — коэффициент трения. Усилие прикладывается в горизонтальной плоскости, неудобной для грузчика. Попробуем теперь перекачивать куб, используя рычаг второго рода с соотношением плеч в момент отрыва куба, равным двум. Усилие прикладывается на этот раз вертикально, что сподручно грузчику, поскольку ноги не скользят. Такое кантование куба удобно, хотя и не дает экономии

в энергии, поскольку связано с дополнительной работой: подъемом и медленным опусканием центра масс куба.

Заменим теперь куб правильным n -гранником, описанным вокруг цилиндра радиусом R . Перекатывание такого многогранника сильно облегчается, так как соотношение плеч рычага пропорционально n/π , т. е. неуклонно растет с ростом n . Столь же быстро сокращаются потери, связанные с вертикальными перемещениями центра масс при перекачивании многогранника. В итоге получим для силы сопротивления качению n -гранника выражение

$$F_k = \frac{\pi}{4n} P = \frac{a}{8R} P, \quad (1)$$

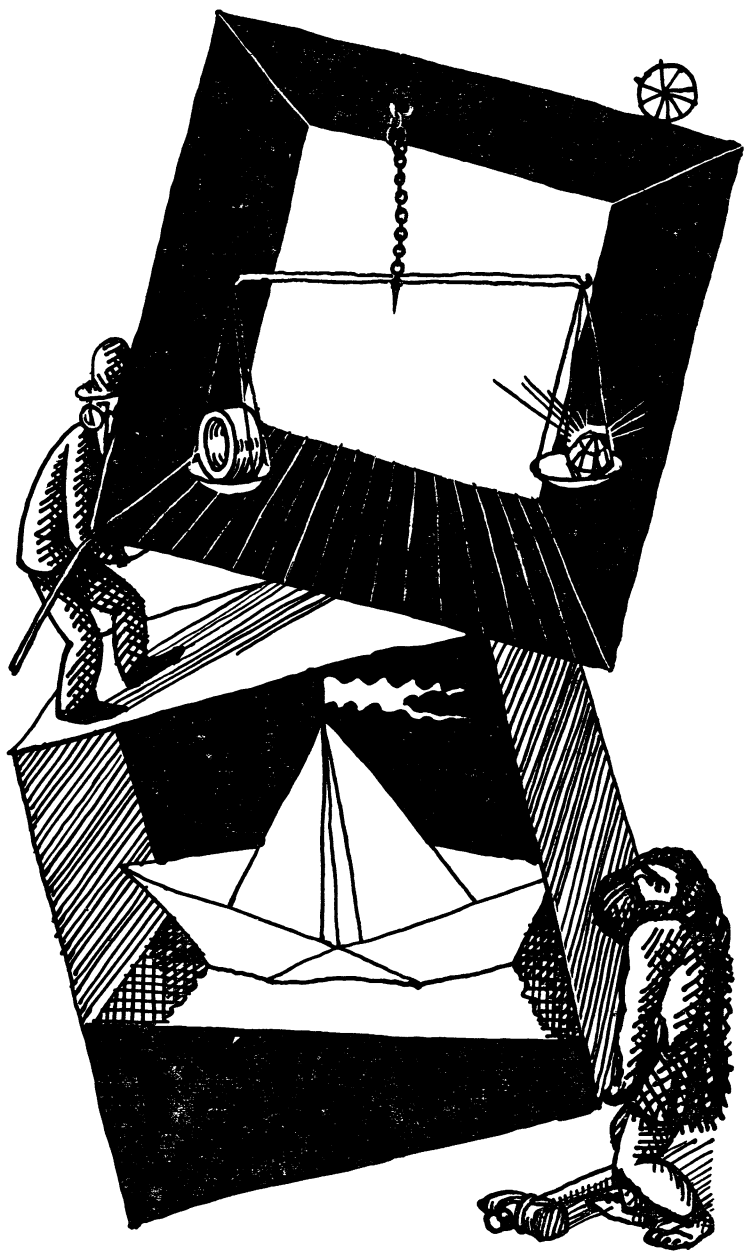
где $a = 2\pi R/n$ — ширина грани. Заметим, что мы полагаем число граней n большим и при этом можно считать $\sin \frac{\pi}{n} \approx \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} \approx \frac{\pi}{n}$. Это простое соотношение весьма любопытно, так как в него входит отношение длин плеч a/R , указывающее на явную связь перекачивания многогранника с действием рычага. Тем не менее из этого же выражения следует, что переход к чистому качению (n очень велико) означает полное устранение трения. Действительно, ведь работа по вертикальному перемещению центра масс катка становится равной нулю. Между тем потери энергии при качении, как показывает опыт, хотя и малы, но вполне ощутимы. Так в чем же дело?

Леонардо да Винчи был, по-видимому, первым, кто увидел в качении необычайно эффективное и универсальное средство снижения трения, а вместе с ним и износа в машинах. Об этом свидетельствуют его удивительные изобретения подшипников качения и зубчатых передач, а также сопутствующие им рассуждения. Тем не менее первое количественное соотношение для равномерного трения качения было установлено Шарлем Кулоном лишь три века спустя.

Согласно Кулону сила трения качения цилиндра весом P равна

$$F_k = \frac{\lambda}{R} P, \quad (2)$$

где R — радиус цилиндра, а λ — коэффициент трения качения, имеющий размерность длины. Физический смысл этой величины нам уже знаком: это полуширина площадки касания катка с дорожкой. Мы видим здесь полную аналогию с выражением (1), согласно которому единственной причиной потерь при перекачивании служат вертикальные перемещения центра масс многогранника. Но при переходе к круглым телам,



с которыми экспериментировал Кулон, таких перемещений уже нет, хотя сопротивление качению наблюдалось в опытах вполне отчетливо. Поэтому природа трения качения так и осталась неясной.

Наибольшее несоответствие между теорией и опытом наблюдалось, когда тело качения или «дорожка» трения были выполнены из материалов с плохими упругими свойствами. Такие материалы при деформировании рассеивают некоторую энергию в виде теплоты. Подобное явление называют упругим гистерезисом.

Считая это явление основным, Д. Тейбор (1955 г.) вывел соотношения, которые дают совсем иную зависимость сопротивления качению от радиуса и веса катящегося тела по сравнению с выражением (2).

Особенно хорошее совпадение с опытом получалось для таких материалов, как резина, дерево и отчасти чугун, в котором потери на упругий гистерезис намного выше, чем у стали. Так получила объяснение давно известная инженерам польза от замены деревянных рельсов чугунными, а затем и стальными. Изящным подтверждением теории служит и следующий опыт. По наклонной плоскости одновременно скатываются резиновый и стальной цилиндры с одинаковыми радиусами и моментами инерции. Стальной цилиндр явно вырывается вперед.

Но можно ли считать потери на упругий гистерезис исчерпывающим объяснением сопротивления качению? По-видимому, нет. Рассмотрим, например, самый обычный случай, когда жесткий цилиндр катится по столь же жесткой поверхности. Хорошим аналогом такой ситуации служит качение гладкого стального «кругляша» по отполированной мраморной плите. Оба тела в данном случае обладают почти идеальной упругостью. Поэтому сопротивление качению должно быть чрезвычайно малым, что и наблюдается фактически.

Представим далее, что кругляш не катится, а скользит по той же плите. В этом случае, как показывает опыт, $\mu = 0,3$, т. е. на несколько порядков больше, чем при качении. Основной причиной сопротивления скольжению в данном случае служит обмен адгезионных связей на площадке контакта. Учитывая, что в обоих случаях энергия и число этих связей одинаковы, мы приходим к поразительной загадке: благодаря чему адгезионное взаимодействие при качении оказывается на несколько порядков слабее, чем при скольжении?

Любопытно, что очень долгое время сама постановка этого вопроса казалась странной. Совершенно непостижимым образом ученые сосредоточили свое внимание на «мухе» — мизерных потерях при качении, упорно не желая видеть «слона»:

практическое исчезновение трения при переходе в равных условиях от скольжения к качению. Точные измерения, проведенные в лаборатории автора, показали, что потери на трение при таком переходе уменьшаются примерно в сто тысяч раз. Спрашивается, куда же и почему исчезает трение?

Ответа на этот, казалось бы, простой и естественный вопрос не было по причине, которая нам сейчас представляется необоснованной. Ученые упорно считали, что скольжение и качение — это два самостоятельных и не сводимых друг к другу вида контактного взаимодействия. Поэтому оба явления изучались порознь без всякой связи друг с другом. Надо сказать, что подобный метод был вообще типичным для науки периода накопления и классификации фактов.

Чтобы понять, в чем тут дело, нужно было взглянуть на оба явления с единой позиции, но это-то как раз долго не приходило никому в голову. Человеком, которому посчастливилось наконец раскрыть эту тайну, был уже знакомый нам Д. Томлинсон. Рассматривая оба основных вида трения как результат обмена адгезионных связей, этот ученый впервые понял простой факт: при скольжении адгезионные связи на контакте обмениваются одновременно, т. е. все разом, а при качении — последовательно и притом весьма малыми порциями. В этом и заключалась разгадка.

Для большей наглядности представим, что к столу приклеена лента. Клей создает в данном случае подчеркнуто сильные адгезионные связи. Попробуем сорвать ленту, потянув ее вдоль стола. Ничего не получится. Мы рискуем лишь порвать ленту. Но стоит легонько потянуть ее за край вверх, как она начнет постепенно отставать от стола и мы без труда добьемся своего. Понятно теперь в чем дело? Ну, конечно! При скольжении все связи рвутся одновременно, а при качении — последовательно одна за другой.

Не менее наглядный пример — длинная ковровая дорожка. Сдвинуть ее вдоль сразу невозможно. Но стоит заложить на ней складку и легким движением прогнать эту складку по всей длине, как дорожка сдвинется точно по волшебству. Пусть размер адгезионной связи ρ , а длина площадки контакта a . Тогда потери на трение при переходе от скольжения к качению должны уменьшиться в a/ρ раз. Учитывая, что ρ сравнимо по величине с диаметром атома или постоянной кристаллической решетки, отношение a/ρ измеряется многими порядками, что и наблюдается на практике.

Все эти рассуждения означают, что адгезионный эффект при качении, как правило, пренебрежимо мал и как будто бы выключается при переходе от скольжения к качению. В этом, соб-

ственно, и состоит секрет «трения второго рода», как принято до сих пор именовать качение. Правда, с уменьшением радиуса катящегося тела до достаточно малых значений влияние адгезии должно возрасти.

Многих интересует вопрос: почему, несмотря на столь явные преимущества, качение не используется природой при «конструировании» живых существ путем естественного отбора? При этом ссылаются обычно на отсутствие у животных и насекомых каких-либо двигательных органов, хотя бы отдаленно напоминающих колесо. Иными словами, предполагается, что качение можно реализовать только круглыми телами. Но так ли это? Возьмем колесо с множеством спиц и отбросим обод. Легко убедиться, что получившееся звездообразное тело катится не хуже обычного колеса. Тут же всплывает в памяти известное выражение «ходить колесом». И впрямь, аналогия с катящейся «звездой» полная. Вся разница в том, что у кувыркающегося акробата всего четыре «спицы»: две руки и две ноги. Но позвольте, а чем, собственно, отличается «хождение колесом» от обычной ходьбы. В принципе — ничем. Правда, при хождении человек и животные немного сгибают ноги, вызывая этим потери на вертикальные перемещения своего центра масс, чего при обычном качении нет. Но в наиболее быстром, спортивном стиле ходьбы ноги спортсмена почти не сгибаются.

А хождение на ходулях и вовсе не что иное, как копия катящейся «звезды». Разница лишь в том, что при хождении «спицы», то бишь ноги, не закреплены жестко во втулке и перемещаются относительно друг друга на определенный угол. Мы пришли к неожиданному выводу: качение можно осуществить не только круглыми телами, но и с помощью специальных устройств произвольной формы, содержащих опоры («ноги»), которые могут переступать в определенной последовательности. При этом число «ног» может быть сколь угодно велико, т. е., например, движение сороконожки является качением в той же, если не в большей мере, что и движение пешехода. Больше того, к качению с известными оговорками можно отнести также типы передвижения, наблюдаемые у червей, змей и других пресмыкающихся.

Отсюда следует, что вопреки сложившемуся мнению качение, или, точнее, очень похожие на него по методу минимизации затрачиваемой энергии способы передвижения, широко распространено в живой природе. Иными словами, качение характеризуется чрезвычайно медленным темпом обмена адгезионных связей. Для различных видов хождения и ползания этот темп также может меняться в широких пределах.

Вторым признаком качения можно считать то, что разрыв и образование новых адгезионных связей происходят в направлении, перпендикулярном плоскости контакта. В какой степени это влияет на интенсивность рассеяния энергии, остается пока неясным.

Названными признаками качения обладают и другие, более сложные виды взаимодействия тел. Например, при хождении стопа отрывается примерно перпендикулярно дороге. Остается только удивляться природе, создавшей такие надежные и экономичные системы для передвижения живых существ по суше. Добавим к этому, что перемещение с помощью ног имеет и гигантское преимущество перед обычным качением: оно не требует гладкой дороги и позволяет одолевать препятствия, сравнимые с размером ноги.

Другое дело, что на практике качение в той или иной степени сочетается со скольжением. Недаром задники наших ботинок изнашиваются обычно по краям, где проскальзывание при ходьбе максимально. Определенная энергия расходуется также и на перемещение самих двигательных органов живых существ.

Дальнейшим развитием идеи качения в технике служит хорошо знакомый всем гусеничный ход, при котором интенсивность обмена адгезионных связей замедляется еще на несколько порядков по сравнению с качением цилиндров.

Отметим в заключение, что физическая сущность качения все еще мало изучена. Перед учеными стоят серьезные технические трудности, связанные с реализацией чистого качения в достаточно стерильных условиях. При этом усилия и энергия, обусловленные потерями на трение качения, столь малы, что для надежного определения их потребовалась разработка специальных и очень тонких методов измерений.

НОВАЯ «ПРОФЕССИЯ» КОЛЕСА

Первые паровозы, появившиеся в начале прошлого века в Англии, озаменовали собой невиданную революцию в транспорте. Впервые в истории цивилизации экипажи приводились в движение не животными, а машиной, возможностью которой определялись теперь самим человеком, а не природой! Такой скачок покажется еще более поразительным, если вспомнить, что паровоз тянет вагоны совсем не так, как лошадь телегу. В самом деле, лошадь при этом шагает, т. е. последовательно переступает ногами, в то время как паровоз плавно катится на колесах. Мы уже знаем, что тяга лошади ограничивается сопротивлением ее подков проскальзыванию по дороге, ну, а тяга паровоза? Тем же проскальзыванием, или пробуксовкой, колес по рельсам, — скажем мы теперь и будем правы. Только вот додуматься до этой гениально простой идеи оказалось более полутора веков назад не так-то легко.

Вспомним, что на протяжении пяти тысячелетий колесо служило лишь средством снижения трения о дорогу. Теперь же, шутка ли сказать, почти такое же колесо должно тянуть груз и тем сильнее, чем выше его трение о ту же дорогу! Неслыханность и видимая нелепость такого решения привели к тому, что первые паровозы пытались сделать в виде механических лошадей, т. е. шагающими. И даже, когда идея ходового колеса все-таки возобладала, посчитали, что гладкий обод не способен создать необходимую тягу по такому же гладкому рельсу. Поэтому пробовали зубчатые колеса или даже ... гвозди, торчавшие из обода ходового колеса и впивающиеся в доски, уложенные вдоль рельсов.

Между тем искомая тяга T легко вычислялась из приведенного нами выше простого и изящного выражения, прямо следовавшего из давно известного к тому времени закона Амонтона. Напишем его в виде

$$T \leq P(\mu \cos \alpha - \sin \alpha), \quad (1)$$

где P — вес паровоза, μ — коэффициент трения при пробуксовке и α — угол наклона рельсов. Разрешение парадокса трения состояло в том, что при нормальной тяге паровоза, т. е. в отсутствие пробуксовки, потери на трение катящегося колеса о рельс по-прежнему ничтожно малы, хотя тяга определяется довольно высоким значением μ . Для горизонтальных рельсов $\alpha = 0$, а тяга максимальна и равна $T = P\mu$. Иными словами, ходовое колесо способно отталкиваться от рельса практически без потерь на трение, подобно тому, как это делает нога животного или чело-



века. Мы уже знаем, что такая аналогия не случайна и отражает глубокое родство между качением и хождением.

Из приведенной формулы следовал еще один первостепенный для инженеров вывод: с ростом наклона рельсов тяга паровоза быстро падает и исчезает совсем, когда $\operatorname{tg} \alpha = \mu$. Учитывая, что при трении стального колеса по рельсу μ не превышает 0,3, легко найдем, что уже при угле наклона 6° паровоз способен тянуть вместо трех всего два вагона. Вот почему минимально возможный уклон полотна стал с самого начала характерной чертой и необходимым требованием при прокладке железных дорог.

При конной тяге на рельсы передавался только вес перевозимого груза, который равномерно распределялся между вагонами. Неудивительно, что первые рельсы были деревянными. Они применялись на горных разработках в Германии еще в конце XV века. Три века спустя на смену им пришли чугунные рельсы, обладавшие не только более высокой износостойкостью, но и значительно меньшим сопротивлением качению. Такие рельсы позволяли одной лошади тянуть по горизонтали четыре-пять груженных вагонеток. Это считалось вполне рентабельным, пока в эпоху наполеоновских войн в Западной Европе не подскочили цены на овес. С другой стороны, добыча каменного угля в Англии достигла к 1800 г. почти 10 млн. т в год. В этих условиях куда более выгодным становился паровоз, работающий на каменном угле и способный вести более тяжелый груз намного быстрее лошади. Но тяга паровоза, как видно из формулы, оказывалась прямо пропорциональной его весу. Отсюда сразу возникла новая важная задача изготовления прочных рельсов, способных выдерживать тяжелые локомотивы.

Переход на машинную тягу с тяжелым (5—6 т) паровозом потребовал создания усиленных чугунных или железных рельсов, укрепляемых на особых каменных опорах. Проблема рельсов усугублялась отсутствием пружинных стале, необходимых для изготовления рессор. Рельсы оказывались беззащитными перед толчками и ударами, неизбежно возникающими на многочисленных стыках. Ведь длина отдельного рельса не превышала в то время нескольких метров. И, наконец, огромная масса всего поезда в сочетании с большой скоростью движения не позволяла прибегнуть при прокладке путей к крутым поворотам для объезда препятствий, будь то гора, овраг или болото.

Необходимость строгого выполнения этих требований прекрасно понимал гениальный строитель первых паровозов и железных дорог Д. Стефенсон, выдвинувший два основных прин-

ципа прокладки железнодорожных путей. Во-первых, необходимо всячески стремиться приблизить профиль полотна к горизонтальному и прямолинейному. Во-вторых, следует максимально усилить сам рельсовый путь и его основание, приспособив их к тяжелым паровозам с большим сцепным весом.

Эти очевидные сейчас требования наводили ужас на предпринимателей, так как сильно повышали стоимость строительства. Так, при сооружении железной дороги Манчестер—Ливерпуль, одной из первых в мире, протяженностью всего в 50 км необходимо было пробить в скалистом грунте тоннель длиной в 2,4 км, сделать глубокий проход в скале, соорудить более 60 мостов и виадуков и, наконец, уложить рельсы через торфяные болота на участке около 10 км.

По настоянию Д. Стефенсона на половине дороги уложили не чугунные, а более прочные рельсы из железного проката двутаврового сечения, цена которых более чем вдвое превышала чугунные. Добавим, что снижение динамических нагрузок на рельсы было осуществлено Д. Стефенсоном с помощью «паровой подвески». Оси паровоза были подвешены на поршнях, плавающих в цилиндрах, заполненных паром из котла.

Строительство дороги, законченное в 1830 г., обошлось в неслыханную по тем временам сумму — 774 тыс. фунтов стерлингов. Но подрядчики были вынуждены идти на такие расходы. Ведь строительство шоссейных дорог началось в Англии и Шотландии лишь в первой четверти XIX века и основной грузооборот между промышленными центрами в Британии осуществлялся через каналы, прорытые задолго до этого. Суда по каналам тащили лошади. Расстояние в 50 км преодолевалось в лучшем случае за трое суток. В зимнее время эта своеобразная «навигация» прекращалась вообще. В итоге хлопок из Нью-Йорка в Ливерпуль шел на парусниках через Атлантический океан 21 день, а из Ливерпуля в Манчестер нередко попадал месяца полтора спустя, хотя оба города разделяло каких-то 30 миль.

В этих условиях возможности железной дороги были поистине революционными. Достаточно сказать, что победившая в специально устроенных состязаниях паровозов «Ракета» Д. Стефенсона при массе в 4 т везла втрое больший груз со средней скоростью 24 км/ч. Этот паровоз был относительно легкий и имел всего одну пару ведущих колес.

Для повышения тяги в распоряжении инженеров имелся остроумный конструкторский прием, прямо вытекавший из того же закона трения Амонтона и состоявший в значительном увеличении веса паровоза без повышения удельной нагрузки на

рельсы. Для этого необходимо было увеличить соответственно дополнительному весу паровоза число пар его ведущих колес. Ведь тяга зависит от общего веса паровоза, который, следовательно, может быть как угодно рассредоточен. В дальнейшем именно эта возможность позволила наращивать мощность паровозов и веса составов без значительного изменения железнодорожного полотна.

Сразу после первых успехов новый вид транспорта стал объектом бешеных и невиданных по размерам биржевых спекуляций. К 1838 г. в Англии было построено 800 км железнодорожных путей, а спустя всего 10 лет — уже 8000 км. В России паровозы отечественного производства появились в 1833—1835 гг. Но первая в нашей стране Царскосельская железная дорога, открытая в 1836 г., обслуживалась иностранными локомотивами. В 1851 г. была закончена самая длинная по тем временам и почти идеально прямая железнодорожная магистраль, связавшая Петербург с Москвой.

О темпах роста сети железных дорог во второй половине прошлого века красноречиво говорят следующие цифры: за период с 1850 по 1900 гг. она увеличилась в Великобритании в 3 раза, в Германии в 9 раз, во Франции в 13, а в России более чем в 100 раз. Постепенно сеть железных дорог охватила практически все развитые капиталистические страны и превратилась к концу XIX века в основной вид сухопутного транспорта, соответствующий бурно развивающейся промышленности. Полностью было оценено и огромное военное значение железнодорожного транспорта.

Железные дороги — по остроумному замечанию великого немецкого поэта Г. Гейне — «убили пространство». И одержали выдающуюся победу над трением — добавим мы.

И все же скоростные возможности рельсового транспорта раскрылись по-настоящему лишь во второй половине нашего века. В 1964 г. в Японии была введена в эксплуатацию линия «Новая Токайдо», связавшая Токио с крупнейшим индустриальным комплексом Осака. На этой скоростной магистрали, представляющей почти идеальную прямую длиной в 556 км, потребовалось соорудить уже 3 тысячи мостов, 114 км эстакад и 66 тоннелей, что позволило в итоге довести среднюю скорость суперэкспрессов до 200 км/ч при максимальном ходе 256 км/ч. Быстро подтвердившаяся рентабельность такого дорогого решения послужила толчком к сооружению в Японии целой сети трасс для сверхскоростных поездов. Завершение в 1985 г. последнего этапа строительства превратило Страну восходящего солнца в единый урбанизированный комплекс.

В настоящее время считается, что человек может ехать в стремительно летящем вагоне и глядеть в окно, не утомляясь, не более 4—5 часов, что при средней скорости 200 км/ч соответственно ограничивает длину скоростных трасс. Для дальнейшего роста темпа перевозок необходимо вообще отказаться от колес, что предлагал сделать в свое время еще К. Циолковский. В книге «Сопротивление воздуха и скорый поезд», изданной в 1927 г., изобретатель прозорливо указывал на то, что «трение поезда почти уничтожается избытком давления воздуха между полом вагона и плотно прилегающим к нему железнодорожным полотном. Необходима работа для накачивания воздуха ... Она невелика, между тем как подъемная сила поезда может быть громадной ... Не нужно, конечно, колес и смазки». Иными словами, был предложен самоход на воздушной подушке — идея, удачно и широко реализованная в наше время в водном транспорте. На «железнодорожном» поприще успехи такого способа передвижения пока более скромны, хотя опыты в этом направлении ведутся сейчас в США, Японии и ряде западноевропейских стран.

Наиболее перспективно использование в данном случае линейных электродвигателей переменного тока. Статор такого двигателя развернут в плоскую ленту по всей трассе на сотни километров, что позволяет бегущему по нему электрическому полю увлекать за собой ротор — вагон — со скоростью самолета. Такой остроумный двигатель бесшумен и к тому же легко может работать в тормозном режиме. Но увы, остается еще неприятный рев и вибрация от насосов и двигателей, создающих воздушную подушку.

Постойте, а нужна ли она вообще? Ведь при скорости в сотни километров в час аэродинамическая сила, создаваемая встречным потоком воздуха, вполне достаточна для удержания вагонов над рельсами в подвешенном состоянии. Верно, но сначала нужен еще разгон до необходимой скорости, т. е. некое подобие разбега и взлета самолета. Для этого можно использовать поистине сказочный метод борьбы с трением — магнитную подвеску, навеянную в какой-то мере легендами о гробе пророка Магомета, свободно парящем в воздухе. Осуществить такую подвеску можно за счет сверхпроводящих магнитов, обладающих при скромных размерах огромной силой. Правда, для этого нужны, в свою очередь, целые ванны с жидким гелием, защищенные от окружающего мира надежной теплоизоляцией: ведь температура жидкого гелия всего 4 К. Все это не так-то просто. Кроме того, пока мало известно, какое действие способны оказать на пассажиров сильные магнитные поля.

Так или иначе, ясно одно: наш старый друг колесо имеет свой инженерный потолок рентабельности где-то при скоростях не более 350—400 км/ч. Это не означает, конечно, что при большей скорости передвижения колеса технически неприемлемы. Современные автомобильные монстры, сконструированные специально для мировых рекордов и снабженные реактивными двигателями и крыльями, прижимающими их к дороге, способны мчаться по идеально ровному дну высохшего соленого озера со скоростями, значительно превышающими 1000 км/ч. Но это уже не технический прогресс, а скорее почти безумное расточительство в азартной, подогреваемой шумной рекламой и «дельцами от спорта» игре, где ставкой является сама жизнь гонщика, как бы заживо погребенного в самом эпицентре «ревущего ада».

В то же время технически оправданный полный или хотя бы частичный отказ от колес позволяет наземному транспорту не только преодолеть почти фантастический тысячекилометровый рубеж, но и осуществить этот скоростной скачок со вполне умеренными затратами и с максимальными удобствами для пассажиров. Об этом мы еще поговорим позже.

ПЕРПЕТУУМ МОБИЛЕ ВОЗМОЖЕН?!

Борьба за снижение трения во все более хитроумных механических устройствах, придуманных человеком, началась намного позднее, чем на дорогах, где потери на трение были особенно мучительны. Уже в простейших механизмах и машинах трение возникает прежде всего в подвижных сочленениях деталей, к которым относятся, в первую очередь, подшипники, зубчатые передачи и шарниры.

Такие узлы трения родились вместе с древнейшими машинами и продолжают оставаться неотъемлемой частью механических систем. И это не случайно: именно узлы трения обеспечивают подачу к исполнительному органу машины необходимой мощности, допуская при этом только рациональные, предусмотренные конструктором взаимные перемещения всех сопряженных деталей.

Но «то, что движет движимое, должно непременно его касаться». Это пронизательно подметил еще Д. Кардано — знаменитый итальянский механик и медик эпохи Возрождения. Получается, что трение практически неизбежно в любых механических устройствах, хотя оно и проявляется по-разному в зависимости от нагруженности узлов, быстроты их действия и множества других причин.

Казалось бы, что примитивная и работающая к тому же с большим запасом техника древних не требовала от ее создателей особого внимания к решению задач, связанных с трением. Однако дошедшие до нас факты свидетельствуют скорее об обратном. Уже в античную эпоху в распоряжении инженеров находились такие важнейшие средства для снижения трения в самих механизмах, как сменный металлический подшипник скольжения, смазываемый жиром или оливковым маслом, и даже подшипник качения.

Тем не менее истинная роль потерь на трение внутри машин, имеющих цепь подвижных сочленений, оставалась непонятной даже в эпоху позднего средневековья. Простая мысль, что рост числа последовательно соединенных узлов в *арифметической* прогрессии приводит к увеличению потерь на трение в *геометрической* прогрессии, никому не приходила тогда в голову.

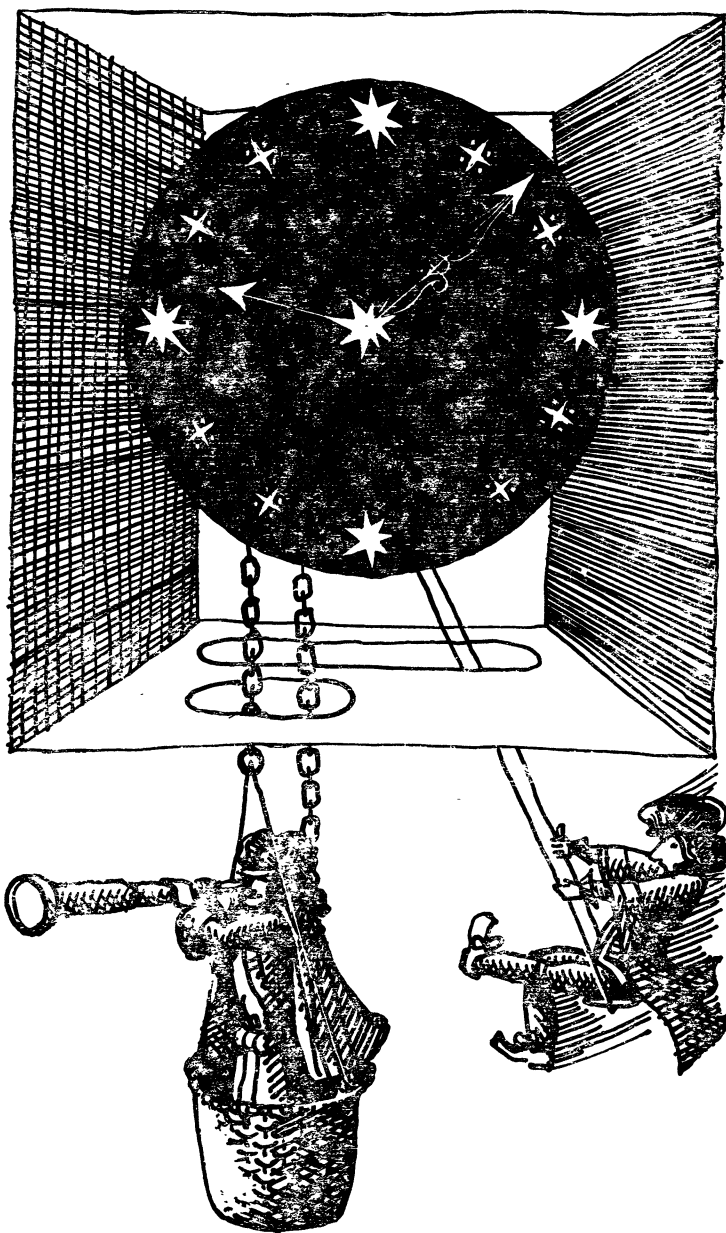
Значение узлов трения в машиностроении можно проследить на примере самых распространенных из них — подшипников и зубчатых передач, появившихся вместе с первыми осями, валами и древнейшими механизмами и оставшихся неизменными спутниками машин. Надо сказать, что широкая популяр-

ность именно этих узлов трения объяснялась чуть ли не обязательным использованием в подавляющем большинстве механических устройств, созданных человеком, вращательного движения, которого мы почти не находим в живой природе. Там самым распространенным и чуть ли не единственным типом узлов трения служит сустав, близкий по своим функциям к шарниру. В чем же здесь дело? Весь тысячелетний опыт, накопленный человеком, казалось бы, неопровержимо доказывал легкость получения, передачи и преобразования именно вращательного движения, не говоря уже об эффективности его применения в технике.

То, что это далеко не так, выяснилось, когда конструкторы стали создавать сначала простейшие манипуляторы, а затем все более сложные роботы. Эти устройства отличаются, как и живые существа, значительной подвижностью, или, как говорят инженеры, большим числом степеней свободы, исполнительных органов. В этих условиях вращательное движение в качестве первичного источника энергии или вообще неприменимо, или требует использования весьма сложной и громоздкой системы механических узлов. Из-за этого создатели роботехники вводят там, где можно, гидравлические и пневматические системы. Природа же решает эту задачу с помощью поразительного по своим возможностям источника поступательного движения — мышцы, искусственное создание которой — пока дело будущего. Таким образом, вращательное движение вполне устраивало создателей простых машин, исполнительные органы которых (сверло, резец, водяное колесо, жернов) имели единственную степень свободы, чаще всего вращались, споро выполняя сверление отверстий, обточку круглых деталей, подъем воды, помол зерна и другие полезные операции.

Использование вращательного движения началось, вероятно, с простейших устройств для добывания огня трением и изобретения колодезного ворота, гончарного круга и сверлильного станка, а промышленное получение — с постройки водяных и — значительно позднее — ветряных мельниц. Очень древний способ получения вращательного движения используется до сих пор в стенных часах с гирями.

Древнейшими подпятниками были, по-видимому, обнаруженные археологами цилиндрические углубления в каменных порогах жилищ наших предков, где медленно поворачивались на деревянных шипах массивные двери. Такие устройства были известны по крайней мере шесть-семь тысячелетий назад в Двуречье и Центральной Европе. Спустя еще несколько десятков веков дверные опоры имели уже медные или бронзовые вкладыши и смазывались жиром, предотвращавшим скрип.



Первыми в истории подшипниками считаются ременные петли, поддерживавшие оси допотопных шумерских повозок. Подшипники со сменными металлическими вкладышами были хорошо известны в Древней Греции, где они применялись в колесных воротах и мельницах. Роликовые подшипники из дерева, выточенные, по-видимому, на токарном станке, использовались, по свидетельству древнеримского архитектора и инженера Витрувия (I век до н. э.) еще в осадных орудиях Александра Македонского.

Любопытно, что в средние века все эти гениальные технические находки были забыты. В многочисленных европейских мельницах той поры применялись весьма неказистые опоры из дерева и камня, смазываемые жиром. Оба основных типа подшипников качения были изобретены и детально описаны в это время заново Леонардо да Винчи. Но час этого замечательного изобретения не пробил и на сей раз. Его пришлось ждать еще четыре столетия!

Различные типы зубчатых передач, позволяющих изменять скорость и направление вращения, а также регулировать передаваемое усилие, нашли распространение в горном деле, а также в мельницах и башенных часах. То, что зубья изнашиваются от взаимного проскальзывания, также не прошло мимо всевидящего Леонардо. Тем не менее и здесь ход истории не обнаружил особой прыти: профилирование зубьев для снижения трения и увеличения ресурса зубчатых передач стали применять лишь два столетия спустя, опираясь уже на теоретические расчеты. Первые зуборезные станки появились в Швеции и Англии примерно в середине XVIII века. Здесь мы сталкиваемся с характерным для развития технологии явлением: даже выдающиеся изобретения становятся общественным достоянием лишь после того, как острая необходимость в них подкреплена выгодой их применения.

Перечислив основные способы снижения трения внутри машин, доставшиеся нам в наследство от древнего мира, отметим любопытный фактор, который, безусловно, привлекал к этой проблеме профессиональное внимание механиков и инженеров на протяжении столетий. Речь идет о пресловутой погоне за призраком «вечного двигателя», считающегося в наши дни синонимом мошенничества и технического невежества. В самом деле, получение работы из ничего явно противоречит закону сохранения энергии.

Но в многочисленных дошедших до нас описаниях различных перпетуум мобиле отчетливо проглядывает и нечто иное: способность раз запущенной «машины» к вечному движению по инерции. Уже сам факт длительного вращения какой-

либо системы без посторонней помощи производил когда-то потрясающее впечатление на государственных деятелей и богатых меценатов, готовых щедро раскошелиться и пойти на все для обладания подобным чудом.

Исторически достоверен, например, интерес именно к такому «вечному двигателю», так называемому колесу Орфериуса, проявленный Петром Великим. Показанное специально посланному за границу императором И. Шумахеру довольно большое колесо сутками вращалось равномерно в наглухо закрытом, как уверял изобретатель, помещении*). Подобные системы правильнее было бы назвать «вечно движущимися» и в их создании, как это известно еще со времен Галилея, нет ничего невозможного. Препятствием здесь служит только трение, проявляющееся в самых различных видах. Устранение трения позволило бы реализовать многие проекты «вечно движущихся» механизмов. Вот почему созданию «перпетуум мобиле» отдали дань не только фанатики и мошенники, но и по-настоящему одаренные изобретатели.

Проще всего устранить трение с помощью качения. Неудивительно поэтому обилие проектов и действующих моделей «вечного двигателя» с использованием свободно катящихся шаров, создающих не только технический, но и благоприятный для обманщиков психологический эффект. Именно на таком принципе были основаны не нуждающиеся в заводе часы итальянского механика Д. Кампани, проданные им ландграфу Карлу Гессенскому в 1700 г. Этот изящно оформленный «вечный двигатель» работал, казалось, с помощью двух шаров, которые поочередно скатывались по наклонным посеребренным желобам и столь же поочередно возвращались в исходное положение особым механизмом. На самом деле все это было искусным обманом, поскольку истинным источником движения служили, как выяснилось, три скрытых пружины.

Оставив в стороне хитроумные и мастерски замаскированные устройства для тайного питания подобных «вечных двигателей», отметим некоторые действительные достижения в борьбе с трением, связанные так или иначе с бесчисленными попытками талантливых умельцев реализовать чудо вечного движения. К таким успехам можно отнести, в первую очередь, стремление к изготовлению трущихся деталей с особой точностью, применение самодельных подшипников качения, использование для смазки специально очищенных растительных масел и др.

*) Фактически же «перпетуум мобиле» двигался спрятанными поблизости людьми — членами семьи изобретателя и его служанкой.

В знаменитых и поистине вечных часах выдающегося английского часовщика XVIII века Д. Кокса, сохранившихся до нашего времени, периодическая подзаводка осуществляется автоматически за счет движения значительной массы ртути в ртутном манометре, остроумно соединенном с механизмом часов. При этом рассчитанная на века долговечность узлов трения достигается не только подшипниками из драгоценных камней, не нуждающимися в смазке, но и герметизацией механизма с помощью пыленепроницаемого стеклянного колпака.

И все же главным результатом отчаянных и бесплодных, казалось бы, усилий энтузиастов всех мастей было доказательство принципиальной невозможности вечного двигателя, подкрепленное громадным практическим опытом и приведшее в итоге к открытию закона сохранения энергии. О решающей роли такого опыта свидетельствует официальный отказ Французской академии наук рассматривать какие бы то ни было проекты вечных двигателей, принятый в 1775 г., т. е. за три четверти века до открытия закона сохранения энергии. Приведем любопытную мотивировку этого решения, имеющую прямое отношение к нашей теме. «Построение перпетуум мобиле абсолютно невозможно. Если бы даже трение и сопротивление среды в течение длительного времени не смогли уничтожить двигательной силы, то эта сила могла бы произвести только эффект, равный причине ... Если бы можно было пренебречь трением и сопротивлением среды, то тело, которое приведено в движение, могло бы оставаться в движении, но не оказывать воздействие на другие тела, и перпетуум мобиле, который получился бы в этом гипотетическом случае (что в природе невозможно), был бы абсолютно бесполезен ...»

Особая проблема трения возникла в связи с выдающимся событием в истории техники — изобретением в XVII веке маятниковых часов. Способность маятника обеспечивать постоянную частоту колебаний (синхронность) при малых амплитудах была открыта Галилеем. Ему же принадлежит идея использования этого свойства маятника в часах. Но вот беда: колебания маятника из-за трения в его опоре довольно быстро затухают. Поэтому для автоматического хода часов к маятнику необходимо подводить энергию. Прямое использование для этой цели гири, применявшихся в башенных часах за много столетий до открытия удивительного свойства маятника, не годилось. Загвоздка состояла в том, чтобы раскачивать маятник, не нарушая строгой размерности его колебаний. Эта труднейшая задача была впервые решена во второй половине XVII века великим голландским ученым Х. Гюйгенсом, которого называют также гениальнейшим часовщиком всех времен.

В наше время системы саморегулирования создаются с помощью электроники. Триста лет назад в распоряжении Гюйгенса были лишь механические средства, которыми он и воспользовался с виртуозностью гения. Задача была решена путем изобретения так называемого анкерного хода. Идея устройства состояла в том, чтобы синхронизировать раскачивающиеся маятник толчки с его колебаниями и одновременно ограничить амплитуду этих колебаний, дабы маятник не пошел вразнос.

При колебании маятника один зуб анкера освобождает, а другой, наоборот, удерживает ходовое колесо. При этом маятник получает периодические толчки, возмещающие потери на трение. В то же время его амплитуда не может превысить заданного небольшого предела. Толчок получается всякий раз, когда ходовое колесо, освободившись от одного из зубьев якоря, бьет с определенной силой по другому зубу. Толчок передается маятнику в определенную сторону в момент прохождения его через положение равновесия. В итоге частота толчков равна частоте колебаний маятника.

Идея анкерного хода использована и в другом выдающемся изобретении Х. Гюйгенса — баланси́ре, впервые описанном им в 1675 г. Заменяющий маятник баланси́рный регулятор состоит из закрепленного на опорах колеса с тяжелым ободом — балансом и соединенной с ним спиралью Архимеда («волоском»). Балансир, как и маятник, обладает собственной, не зависящей от амплитуды частотой колебаний и в соединении с анкерным ходом обеспечивает длительное и равномерное движение часового механизма.

Принципиальное преимущество баланси́ра — независимость частоты его колебаний от величины и направления силы тяжести. Это означает, что часы с баланси́ром сохраняют равномерность хода в любом положении. Их, например, можно применить на кораблях в качестве хронометров, необходимых для определения долготы. Метод точного определения долготы с помощью хронометра оставался в морской навигации, наряду с методом лунных таблиц, основным вплоть до изобретения радио и радара. В наше время ручные часы с баланси́ром использовались космонавтами и астронавтами в условиях невесомости и перегрузок, а также во время пребывания на Луне.

Мы рассказали только об одной проблеме трения, связанной с часами. Но часы, как и вообще все механические системы, имеют множество подшипников и других узлов трения, как правило, миниатюрных. Потери на трение в них в абсолютных величинах кажутся мизерными. Вспомним, однако, что энергоемкость часовых пружин также достаточно мала, а вся их энергия, тем не менее, расходуется на трение внутри

механизма. Поэтому максимальное снижение трения в часовых и других прецизионных механизмах остается важной задачей.

Использование в часах осевых опор и анкерных вкладышей (палет), выполненных из граната, агата и других драгоценных камней, известно по крайней мере с XVIII века, когда генуэзские мастера научились сверлить микроскопические отверстия в твердом драгоценном камне рубине. Затем это искусство из Ломбардии неведомым путем перешло в Англию, где оно тщательно охранялось. Некто Малле перепродал секрет женеvским часовщикам, которые бережно передавали его из поколения в поколение, пока в середине прошлого века эта тайна не стала, наконец, общим достоянием. Любопытно, что помимо рубина и сапфира в особо дорогих и точных часах применялись алмазы.

Лишь в наше время все эти камни вытеснены искусственными рубинами, которые чище по составу и лучше по качеству. А как же отверстия? Их можно «сверлить» теперь лазерным лучом в деталях с массой в десятки и сотые доли грамма, обеспечивая диаметр канала от 50 до 100 мкм. Благодаря большой твердости эти минералы прекрасно поддаются полировке. Кроме того, они хорошо держат жидкую смазку. Искусственный рубин не окисляет и не разлагает часовое масло. Поэтому подшипники, подпятники и вкладыши такого типа обеспечивают минимальное трение и отличаются высокой износостойкостью. Очень ответственной деталью узла трения является «импульсный» камень, передающий энергию от анкерной вилки к балансу. Рабочая поверхность импульсного камня подвергается тщательной полировке.

Сверхминиатюрные часовые подшипники качения были запатентованы в США уже в нашем веке. Такой подшипник содержит всего пять шариков диаметром 0,67 мм. Тысяча таких шариков весит всего один грамм. Они так легки, что удерживаются на поверхности воды, а десять тысяч (!) их может уместиться в обыкновенном наперстке.

НА ТРЕНИЕ РАБОТАЕТ... ЖИДКОСТЬ!

Рассказывая о хитроумных достижениях древних, мы не упомянули еще об одном радикальном способе борьбы с трением, сыгравшем выдающуюся роль в развитии нашей цивилизации. Речь идет об использовании водного транспорта, где дорогой служит водная гладь, будь то река, озеро, море или океан.

«Океаны не разделяли ранние цивилизации, а соединяли их», — справедливо отметил знаменитый норвежский исследователь и путешественник Тур Хейердал. Решимся утверждать, что важную роль в этом деле сыграли два благоприятных обстоятельства: малое трение о воду и возможность использования даровой парусной тяги.

Правда, плоскодонные суда древнего мира не выдерживали шторма, плавали только днем и не имели мощного парусного вооружения, передвигаясь в основном на веслах. Скорость таких посудин была раза в три выше скорости лошади, везущей груз по плохой дороге. Более мореходные суда, малые по размеру, но способные нести большую нагрузку и плавать в штормовую погоду благодаря острому тяжелому килю, зародились в Северном море. Такие суда успешно использовались легендарными норманнами в набегах на западноевропейские страны и даже в походах к берегам Гренландии и Северной Америки (X век).

Дальнейшие усовершенствования в конструкцию европейских судов были внесены арабами и затем итальянцами и португальцами в эпоху великих географических открытий. Именно небольшие парусные суда позволили освоить моря и значительную часть Мирового океана, свободную ото льда, осуществить географические открытия и доказать, что Земля ограничена и действительно имеет форму шара. Последующее обживание суши также осуществлялось проникновением лодок и небольших судов во внутренние районы материков. Например, основные маршруты первооткрывателей современной территории США (XVI—XVIII века) связаны с рекой Миссисипи — Миссури и ее притоками, а также с Великими озерами. То же можно сказать и об освоении Сибири русскими землепроходцами XVII века, генеральный маршрут которых проходил с рек Таз или Кеть к Енисею, а с него через Верхнюю Тунгуску и Ангарау выводил к верховьям Лены.

Неслучайно в эпоху, охватывающую примерно два тысячелетия, в наиболее выгодном положении оказались относительно небольшие государства, владеющие, однако, естественными,

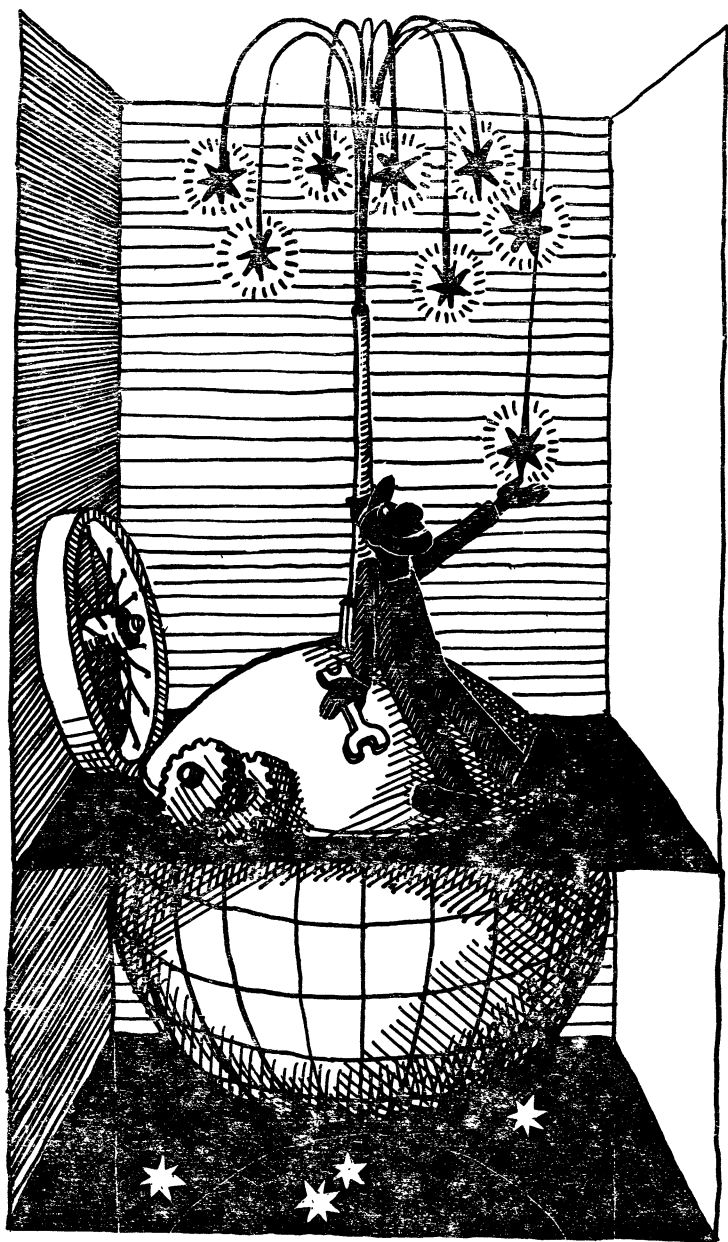
хорошо защищенными с моря и суши гаванями и природными ресурсами, необходимыми для строительства кораблей. В разные исторические периоды сюда можно отнести Финикию, Венецианскую и Генуэзскую республики, Испанию и Португалию, Голландию и Англию. Могущество Древней Греции и Римской империи в эпоху расцвета также в значительной мере обязано мощному флоту. Генеральные морские сражения, кончавшиеся сокрушением неприятельского флота, нередко решали судьбу не только военных кампаний, но и целых государств.

Отсутствие прямого доступа к незамерзающим морским портам, наоборот, сдерживало экономическое и культурное развитие даже мощных сухопутных держав, имеющих в своем распоряжении большие людские ресурсы и огромные территории. Гениальность внешней политики Петра Великого в решающей мере состоит в том, что он вывел Россию к магистральным морским путям в сочетании со строительством мощного флота.

Итак, трение о жидкость чрезвычайно мало. А нельзя ли использовать это свойство для снижения трения и изнашивания внутри машин? Вопрос этот не был особенно острым до тех пор, пока техника, приводимая в движение, в основном, силой животных и самих людей, оставалась тихоходной.

Во второй половине прошлого века скорости на железных дорогах заметно возросли. Из-за этого довольно несовершенные подшипники на паровозах и вагонах стали все чаще перегреваться, создавая угрозу крушения. Постепенно выяснилось, что скудный арсенал средств борьбы с трением, доставшийся в наследство от предков и основанный лишь на практическом опыте, уже явно недостаточен для решения новых инженерных задач. Необходимо было понимание сложных физических и химических явлений, возникающих при трении тел. Иными словами, практический опыт инженеров должен был сочетаться с научными экспериментами, позволяющими проникнуть в самую природу трения.

Заметим, что физика того времени все еще не была готова к такому повороту событий, главным образом из-за отсутствия необходимых приборов и методов исследований. Помощь инженерам пришла неожиданно совсем из другой области науки — гидродинамики, классические основы которой были заложены еще Ньютоном и знаменитым семейством Бернулли. Но прежде чем перейти к этому вопросу, напомним читателю, что примерно в середине прошлого века в США на очень небольшой глубине были открыты крупные нефтяные месторождения, позволившие получать помимо нового дешевого топлива — нефти — не менее доступные минеральные смазочные масла.



О необычайной важности этого события для машиностроения и транспорта свидетельствует то, что экспорт смазочного масла из США в Европу возрос с 1874 по 1899 гг. более чем в 50 раз. Однако после открытия в 80-х годах XIX века бакинских нефтяных месторождений вторым крупнейшим поставщиком минеральных масел стала Россия. Обладающие большей вязкостью при низких температурах русские масла были наиболее пригодны для железнодорожного транспорта, в то время как легкие американские масла использовались преимущественно в текстильных машинах. По сравнению с растительными и животными жирами минеральные масла отличались высокой стабильностью и, не имея в своем составе кислот, не вызывали коррозию металлов.

Но важность такого изобилия дешевой смазки для машиностроения была осознана далеко не сразу. Переход от «сухого» трения, с которым мы до сих пор имеем дело, к трению «жидкостному» вводит нас в совершенно иной мир физических представлений. Прежде всего, полностью исключается касание твердых тел, которые как бы уходят «за кулисы». На сцене оказывается лишь тонкая пленка жидкости, где и развивается совершенно своеобразный процесс трения. Гениально простую модель такого процесса придумал Ньютон. Пленка жидкости между двумя параллельными плоскостями толщиной h разбивается в воображении на большое число тончайших слоев. Причем те из них (это очень важно), которые находятся на границах пленки и прилегают к плоскостям, намертво *прилипают* к ним. Это означает, что при движении одной плоскости относительно другой со скоростью v слой, прилегающий к этой плоскости, движется с такой же скоростью, а слой, граничащий с неподвижной опорой, остается неподвижным. А промежуточные слои? Ньютон предположил, и это предположение затем блестяще подтвердилось опытами, что каждый из них движется со своей собственной скоростью, находящейся в промежутке между нулем и v . При этом изменение скорости от слоя к слою происходит по линейному закону, который на графике изображается прямой линией.

Тангенс угла наклона прямой, равный $\operatorname{tg} \varphi = v/h$, называется в этом случае градиентом скорости. По формуле Ньютона удельная (приходящаяся на единицу площади) сила жидкостного трения ψ прямо пропорциональна градиенту скорости, т. е. равна

$$\psi = \eta \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где η — коэффициент пропорциональности, полностью зависящий от свойств жидкости и называемый вязкостью.

По формуле (1), зная η и $\operatorname{tg} \varphi$, легко подсчитать удельную силу жидкостного трения, которая для машинных масел составляет примерно 1% сухого трения. Это очень малая величина, что не является неожиданностью. Все мы знаем, как легко, например, сдвинуть с места громоздкий плот, находящийся на плаву, и какие огромные усилия нужно приложить, чтобы вытащить на берег тот же плот или лодку. Но вот беда: из той же формулы Ньютона однозначно следует, что никакого избыточного давления в жидкости при относительном движении плоскостей не возникает, а это означает, что при малейшем внешнем нажиме их смазка просто выдавится из зазора, не оставив инженерам никаких шансов. Как же реализовать жидкостную смазку на практике?

Вот здесь-то и сыграло выдающуюся роль событие, связанное с именем скромного английского ученого Тауэра. Имевший в его лаборатории подшипник, работающий на масле, был по неизвестной причине просверлен в несущей части и вскоре заткнут пробкой. При быстром вращении нагруженного вала пробку неожиданно выбило сильным давлением масла в тонком слое, отделяющем вал от подшипника. Так был открыт гидродинамический эффект, состоящий в поразительной способности «масляного клина» создавать мощную подъемную силу, препятствующую полному выдавливанию масла из подшипника под действием внешней силы.

Позвольте, но согласно классической модели Ньютона ничего подобного происходить не должно. Откуда же берется подъемная сила? Вспомним, что в модели Ньютона плоскости, между которыми заключена жидкость, строго параллельны. Оказывается, что оси вала и подшипника при быстром вращении под действием внешней силы немного не совпадают. Возникает так называемый эксцентриситет. Благодаря этому заполненный смазкой зазор между валом и подшипником постепенно сужается в сторону вращения вала. Таким образом, создаются условия, когда масло за счет своей вязкости интенсивно втягивается валом в сужающийся зазор, создавая довольно сильное расклинивающее действие. Отсюда и название — масляный клин.

А что же происходит с градиентом скорости? Прямолинейная зависимость изменения скорости внутри слоя смазки становится более сложной, а абсолютная величина градиента, естественно, растет по мере сужения зазора. Это приводит к заметному росту трения. Выходит, что трение в жидкости порождает подъемную силу, призванную ... обеспечить жидкостное, т. е. более низкое, трение! И в этом нет ничего странного, если вспомнить, что вязкость жидкости — мера ее внутреннего тре-

ния. Но именно вязкость, которая у минеральных масел в десятки и сотни раз выше, чем у воды, обеспечивает, как мы видели, несущую способность опоры.

Таким образом, используя жидкую смазку, мы сталкиваемся с ситуацией, невиданной в царстве сухого трения: потери на трение, возникающие в гидродинамической опоре, служат одновременно причиной необычайно низкого трения в этих опорах! Аналогичная картина возникает и при движении самолета: часть так называемого лобового сопротивления движению, вызываемого набегающим потоком воздуха, создает машине дополнительную подъемную силу.

Теория гидродинамической смазки была создана русским ученым, профессором Н. Петровым и англичанином О. Рейнольдсом примерно столетие тому назад. «Расходы на топливо для машин, считающиеся у нас в России десятками миллионов, заслуживают самого серьезного внимания. Увеличение расходов на топливо на 5%, на 10% может легко явиться вследствие неудовлетворительных условий смазывания, а это выразится в народном хозяйстве потерями миллионов рублей. Таковы теперь причины, заставляющие наших техников обратить все свое внимание на правильный выбор смазочных материалов», — так прозорливо писал Н. Петров в своей основополагающей статье, вышедшей в 1883 г. и удостоенной Российской академией наук Ломоносовской премии. Уже в нашем веке теория жидкостной смазки была развита целой плеядой выдающихся ученых, включая члена Берлинской академии наук А. Зоммерфельда и советских академиков Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина.

В начале нашего века у австралийского инженера-изобретателя А. Митчелла возникла идея применить гидродинамический эффект для передачи продольного усилия на вал. Масляный клин в такой осевой опоре или пяте создавался уже совсем иным способом: с помощью набора так называемых упорных подушек, расположенных по окружности и способных свободно поворачиваться на специальных осях. При вращении вала подушки самоустанавливались в оптимальном положении, обеспечивая в паре с торцом вала необходимый сужающийся зазор. Гидродинамическая пята Митчелла была запатентована в 1905 г. и впервые применена на немецкой подводной лодке во время первой мировой войны. В настоящее время пята подобного типа широко используются на гидроэлектростанциях в качестве опор гигантских гидротурбин, масса которых достигает нескольких тысяч тонн. При этом коэффициент трения таких опор измеряется всего лишь тысячными долями единицы.

Но при всей своей простоте гидродинамический эффект имеет и серьезный недостаток: вал обязан вращаться довольно быстро, иначе действие смазочного клина, т. е. несущая способность опоры, окажется весьма слабым. Как же тогда быть с тихоходными устройствами, где трение в опорах по разным причинам также должно быть минимальным? В этих случаях используются гидростатические опоры.

Нехитрая идея их состоит в принудительной подаче смазки (жидкости или газа) в зону трения, осуществляемой специальными насосами. Конечно, смазка тут же вытекает из зазора, что требует непрерывной работы насоса. Однако малость зазора в сочетании с достаточно высокой вязкостью смазки позволяет создать в гидростатических опорах необходимое, правда, обычно небольшое, давление. В результате тяжелый агрегат, «подвешенный» подобным образом, как бы плавает на жидкостной или воздушной «подушке», трение в которой ничтожно мало. Именно с помощью такого способа осуществляется наводка гигантского советского телескопа-рефлектора, установленного в Зеленчукской обсерватории.

С другой стороны, при чересчур быстром вращении вала гидродинамический эффект может дать «осечку» уже по другой причине: из-за сильного внутреннего трения масло нагреется и настолько потеряет вязкость, что толщина смазочного слоя станет меньше высоты неровностей твердых поверхностей. Это означает, что рабочие поверхности опоры войдут в прямой контакт, что может привести к серьезной аварии. По этой причине в быстроходных опорах, используемых, например, в гироскопах и ультрацентрифугах, где скорость вращения измеряется десятками и даже сотнями тысяч оборотов в минуту, целесообразно применять газовые подшипники с использованием в качестве смазки-охладителя гелия, водорода и обычного воздуха. Несмотря на то, что вязкость перечисленных газов в тысячи, а то и в десятки тысяч раз меньше, чем у смазочных масел, при столь высоких скоростях она оказывается достаточной для восприятия небольших нагрузок, типичных для этих устройств.

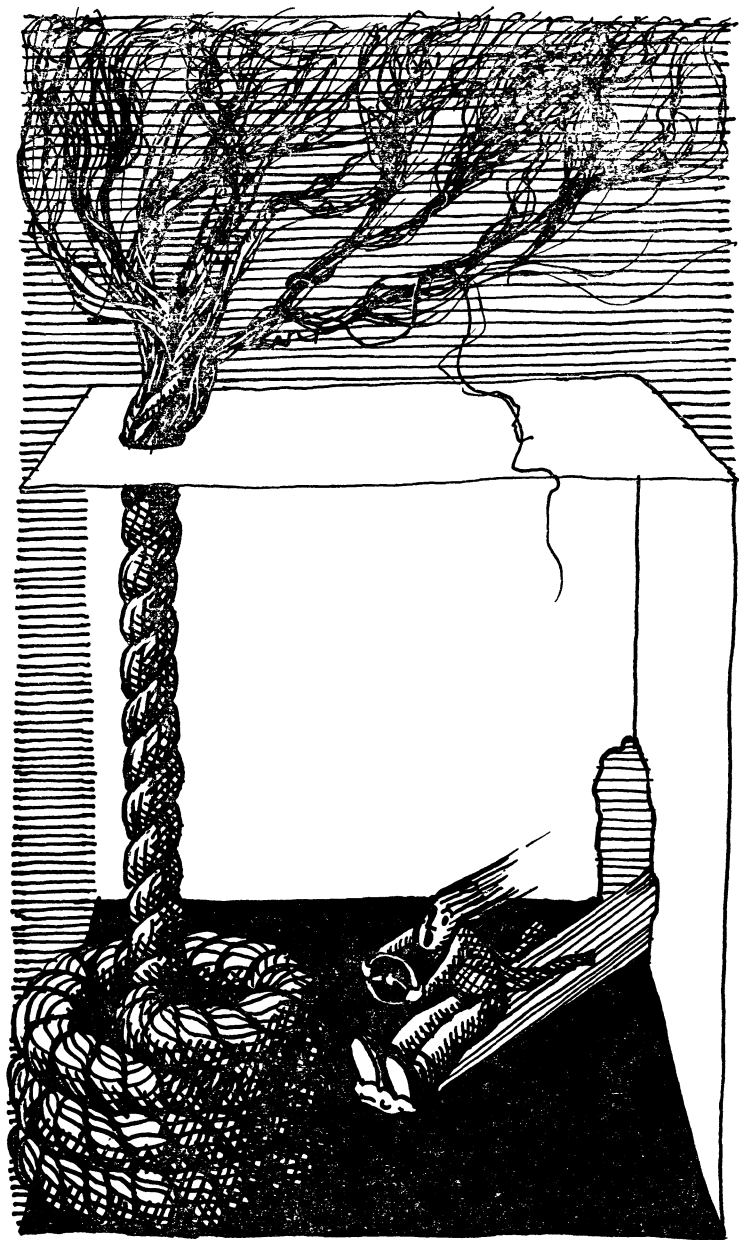
ТРЕНИЕ ПОЛЕЗНО!

До сих пор мы много говорили о разных способах борьбы с трением, как с вредным явлением, вызывающим изнашивание, нагрев и другие неприятные вещи. А вот огромная польза трения в нашей жизни настолько привычна и так сжилась с нашим бытом, что почти незаметна. Напомним, что человек, обитающий на суше и не умеющий летать, передвигается только благодаря наличию трения покоя в защищающей ступни обуви, конструкция которой при всем разнообразии становится постепенно все более совершенной. И пусть вас не удивляет слово «конструкция» применительно к ладням, ботфортам и босоножкам. Ведь ботинки или сапоги, в отличие, скажем, от шапки и рукавиц, не только согревают и оберегают от травм наши ноги, но и позволяют надежно и быстро двигаться по твердой поверхности. В этом смысле обувь — такое же техническое устройство, как протектор автомобильного колеса. Больше того, автопокрышки в техническом смысле — родные дети человеческой обуви с очень близким, как это ни странно, принципом работы. Поэтому специалисты, создающие обувь, просто обязаны хорошо разбираться не только в сапожном деле, но и в вопросах трения.

Увы, многие модели современной обуви, радующие глаз отделкой или модным фасоном, свидетельствуют, скорее, об обратном. Надев такую обувь, нередко чувствуешь себя беспомощным не только на обледеневшем тротуаре, но и на хорошо натертом паркете какого-нибудь фойе концертного зала. Похоже, обувщики и не подозревают, что полимерные материалы, из которых сейчас все чаще изготавливают обувь, имеют значительно более низкий коэффициент трения, чем натуральная кожа, не говоря уж о резине. Отсюда и скользкие башмаки — источники нешуточных неприятностей.

Знают ли изготовители обуви, что выйти из положения можно с помощью специальных рецептурных добавок и крупного (мелкий быстро стирается) гофра на подошвах, резко повышающих сцепление с грунтами самого различного типа? Есть и куда более тонкие приемы, которые нам подсказывает сама природа.

Хорошо известно, что в критические моменты, чтобы не сорваться со скользкой жерди или подняться по крутой стене, человек не очень-то доверяет обуви, предпочитая действовать босиком. И не зря. Огромное преимущество нашей голой пятки и стопы в том, что они весьма эластичны. Это дает им возможность «вписываться» в шероховатый рельеф, резко увеличивая



тем самым площадь фактического контакта с твердой поверхностью, а следовательно, и сопротивление проскальзыванию. Любопытно, что в значительно большей мере этим полезным свойством обладают ступни слонов. В поднятом положении конец ноги этих гигантов имеет закругленную форму, как бы лишенную стопы. Зато при опоре на землю ступня буквально расплющивается так, что ее диаметр заметно превышает толщину ноги. Особый мелкий гофр на человеческой ступне также препятствует проскальзыванию ноги назад. При этом такой природный гофр совершенно не изнашивается, а точнее, непрерывно восстанавливается по мере истирания кожи — чудо, о котором обувщики могут пока только мечтать.

Наконец, профиль нашей пятки округлен, что имеет глубокий смысл, поскольку хождение на двух ногах близко в определенном смысле к процессу качения, о чем мы рассказали выше. Тем не менее значительная доля обувного ширпотреба, как и столетия назад, изготавливается с прямоугольным профилем каблука, затрудняющим хождение и подверженным повышенному изнашиванию. Правда, в самое последнее время эту старую традицию сломали, наконец, специалисты по спортивной обуви: некоторые типы «кроссовок» уже выпускаются с закругленным сзади каблуком.

Немалую роль играют, по-видимому, и нервные клетки на наших ступнях, сигналы от которых, корректирующие ходьбу, мы воспринимаем не только сознательно, но и инстинктивно. Здесь, как видно, еще много неясного и потенциально полезного. Вспомним, например, о много раз описанных ритуальных танцах некоторых народов, когда молодые юноши и девушки спокойно и без всякого вреда для себя шествуют босиком по тлеющим углям. Многократные проверки надежно показали, что ни о каком фокусе или массовом гипнозе здесь не может быть и речи, а ступни этих танцоров, как ни удивительно, мало чем отличаются от наших.

Разгадка, если ее можно так назвать, состоит в том, что участники ритуала приводят себя путем особого психологического настроя накануне танца в экзальтированное состояние, которое, грубо говоря, временно придает их босым ступням повышенную термостойкость. Как и за счет чего это происходит в живом организме — пока не известно: и медики, и специалисты по созданию теплостойких материалов только недоуменно пожимают плечами.

Так или иначе, но совершенно ясно: в конструировании обуви, позволяющей нам свободно и легко двигаться по матушке-земле, наслаждаясь жизнью, еще много резервов, которые рано или поздно будут использованы.

Появление на транспортной арене автомобиля ознаменовало рождение нового типа двигателя — колеса с пневматической шиной, способного работать на дорогах самых различных типов. Подобная универсальность шин служит основой многочисленных преимуществ автомобиля. Автопокрышки, осуществляя прямой контакт машины с дорогой, служат одновременно источником тяги и амортизатором автомобиля. Способность пневматической шины к деформации при качении позволяет резко увеличить площадь контакта, а следовательно, и сцепление с дорогой. Правда, для этого необходима значительная энергия. Но большая часть работы деформирования возвращается колесу в виде его кинетической энергии, способствуя таким образом качению колеса.

На сухом шоссе коэффициент трения шины о дорогу максимален и составляет 0,8—1,0. На сырой дороге он примерно такой же, а при большой скорости может упасть до 0,5. При гололеде коэффициент трения оказывается меньше 0,1, что говорит само за себя. Наилучшее сцепление с дорогой дает резина на основе натурального каучука, однако при морозах это преимущество теряется.

Протекторы шин находятся в наиболее сложных и тяжелых условиях эксплуатации по сравнению с другими элементами автомобиля. Отсюда неизбежное изнашивание автопокрышек, главным образом, в результате их пробуксовки. Задумайтесь, пожалуйста, над такими цифрами. Годовой выпуск автомобильных шин уже в настоящее время исчисляется миллиардами штук. При этом их стоимость достаточно высока и доходит до 10% общей стоимости у легковых и до 25% у грузовых автомашин.

Для тяжелых самосвалов, работающих в горных карьерах, а также для мощных тракторов и прицепов нужны особо прочные шины. Только у нас в стране потребители таких шин ежегодно заказывают дополнительно сотни тысяч покрышек стоимостью около 40 миллионов рублей. При этом на производство подобных шин расходуется 14 тысяч тонн каучука, семь миллионов квадратных метров кордной ткани и труд более тысячи рабочих. Неудивительно, что проблемы шин по-прежнему чрезвычайно актуальны.

Решение этих проблем достаточно сложно. Коэффициент сопротивления качению у автомобильных колес примерно на порядок выше, чем у железнодорожных. При высоких скоростях сопротивление качению резко возрастает. Это объясняется не только ростом потерь в самой резине и ее сильным нагревом, но и возникновением колебаний из-за того, что участки шины при столь быстром контакте с дорогой не успевают

принять оптимальную форму. При этом возможны опасные побочные явления. Добавим к этому характерные для быстрой езды резкое торможение машины и ускоренное прохождение поворотов. В итоге при скоростях более 100 км/ч срок службы шин резко сокращается.

С другой стороны, эффективность колесного движителя с типичным для автомобиля широким ободом при скоростях более 150 км/ч начинает заметно падать. Быстро вращающееся колесо превращается в насос, засасывающий воздух в зону контакта шины с дорогой. Вследствие этого возникает сила, стремящаяся приподнять колесо, т. е. уменьшить его сцепление с дорогой.

Неизбежный контакт автомобиля с дорогой служит главной причиной его принципиального недостатка: необходимости в гигантской сети автострад и шоссе, без которой современный автомобильный транспорт просто не может существовать. Такая сеть автомагистралей непрерывно растет, а расходы на строительство и поддержание дорог достигают фантастических размеров. Так, помимо автодорожной трассы, связывающей Аляску с южной оконечностью Чили (панамериканской), в настоящее время проектируется межконтинентальная автострада Север—Юг, которая на первом этапе соединит польский порт Гданьск с Афинами, а позднее будет продолжена и пересечет всю Азию вплоть до Вьетнама и Сингапура.

Но, несмотря на огромные затраты, пропускная способность дорог по-прежнему зависит от погоды и времени года. В местах с ярко выраженным периодом дождей дорогам грозит размыв проезжей части. В пустынных районах даже при неслышных песчаных бурях шоссе может быть засыпано песком. Кроме того, сильная жара приводит к расплавлению асфальта. И все же наибольшие неприятности с автомобильными путями возникают в умеренных и приполярных областях, а также в высокогорной местности. Известны случаи, когда неожиданные снегопады, снежные обвалы, туманы и гололед парализуют автотранспорт в масштабах целого государства.

Автомобильные катастрофы ежегодно уносят 180 тыс. человеческих жизней, а число раненых при этом исчисляется миллионами. И значительная доля дорожных происшествий вызвана плохой погодой. Например, в Англии из 260 тыс. ежегодных аварий с автомобилями 80 тыс. происходит на мокрых дорогах, причем добрая четверть из них связана с ездой по сплошному водяному слою.

Но самым страшным врагом автомобиля бесспорно является гололед. Сцепление машины с дорогой ухудшается раз в десять. Для борьбы с гололедом в Советском Союзе и многих

европейских странах по автострадам с наступлением холодов разбрасываются в изобилии песок и соль. Это не только вызывает загрязнение и разрушение асфальтового покрытия, но и значительно усиливает коррозию автомобилей. Для очистки дорог от снега в нашей стране существуют целые учреждения, имеющие в своем распоряжении тысячи снегоочистителей и других технических устройств. И все из-за того, что для создания тяги ведущим колесам автомобиля нужно хорошее сцепление с трассой, которое непосредственно зависит от состояния дороги в данный момент и может сильно меняться.

Все эти трудности отпали бы, если бы шоссе и автострады можно было искусственно изолировать от погодных и сезонных изменений, например перевести их под землю, подобно линиям метро. Такой метод уже давно реализуется в больших городах и горных районах путем использования автомобильных тоннелей. Долгое время серьезно обсуждался проект уникального автомобильного тоннеля через Ламанш, которому в конце концов был предпочтен железнодорожный тоннель, предусматривающий погрузку автомашин на платформы. Этому же решению намерены следовать проектировщики другого подводного гиганта — тоннеля через Гибралтар, строительство которого намечается завершить к 2000 г. Такая, казалось бы, странность возить автомобили объясняется необычайной сложностью задачи удаления из тоннелей выхлопных газов. Поэтому вряд ли можно говорить о переводе под землю даже основной части автодорожной сети.

Рассказывая об автомобильных шинах, нельзя не вспомнить и о другом важнейшем примере полезного использования трения. Мы имеем в виду тормозные системы, применяемые сейчас в сухопутном транспорте и, разумеется, в автомобиле. Даже начинающий водитель, осваивая самые азы управления «Жигулями» или «Москвичами», знает, что тормоза — вещь особая. У вас может «барахлить» мотор, не работать «мигалка» и даже капризничать карбюратор и только тормоза всегда обязаны быть в образцовом порядке — таков чуть ли не главный принцип водительского кодекса.

Тормоза, если отбросить отдельные малозначащие изобретения, родились вместе с машинным транспортом, т. е. прежде всего на поездах железных дорог. И это были принципиально новые технические устройства, поскольку до них «торможение», точнее, остановка лошади искони осуществлялась вожжами, уздечкой и устной командой *). Это означало, что идея «тормо-

*) Любопытно, что во французском языке уздечка и тормоз обозначаются одним и тем же словом.

жения» основывалась на условном рефлексе или даже разумном поведении лошади, выработанном специальным тренажером. При всей его видимой простоте ненадежность такого метода отчетливо видна из многочисленных в прошлом трагических происшествий, когда случайно испугавшаяся чего-либо и охваченная паникой лошадь полностью выходила из-под контроля и несла, обрекая отчаявшихся седоков и пассажиров на увечья и гибель. Подобный случай произошел, например, с выдающимся французским ученым Блезом Паскалем, карета которого лишь чудом не сорвалась с моста в речной поток, суливший верную смерть.

Первые железнодорожные тормоза были механическими, т. е. основывались на трении специальных колодок, или «башмаков» (тоже не случайное сходство!), об обода колес, к которым они прижимались в необходимый момент с большой силой. В итоге огромная кинетическая энергия поезда должна была довольно быстро перейти в теплоту, бурно выделявшуюся в зонах торможения. Чтобы тормоза не сгорели от столь обильного тепловыделения, их пришлось устанавливать во всех вагонах.

Но как обеспечить быстрое и одновременное срабатывание многих тормозных устройств, расположенных по всей длине поезда?

Этого удалось добиться благодаря американскому изобретателю Д. Вестингаузу, запатентовавшему в 1869 г. надежный способ, применяемый до сих пор. Все вагоны должны быть соединены общим шлангом со сжатым воздухом, давление которого препятствует пружинам тормозов распрямиться и с силой прижать колодки к ободам колес. Для одновременного срабатывания всех тормозов достаточно выпустить воздух из шланга в любой его точке. Это достигается с помощью хорошо всем известного стоп-крана, имеющегося в каждом железнодорожном вагоне или вагоне метро.

И все же для современных быстро мчащихся поездов «тормозная волна» бежит уже недостаточно быстро. Поэтому новейшие тормозные системы сочетают пневматику с электроникой: воздушные клапаны, установленные в каждом вагоне, срабатывают почти одновременно по электрокомандам, автоматически поступающим от «сорванного» стоп-крана. В итоге экстренное торможение всего поезда может в случае необходимости осуществить без особого труда любой пассажир. Добавим к этому, что для большей надежности описанный способ торможения поездов сочетается сейчас с другими методами. Например, первый советский скоростной экспресс ЭР-200 на линии Москва — Ленинград, достигающий скорости 200 км/ч,

оборудован тремя видами тормозов: электропневматическим, электродинамическим и, наконец, магниторельсовым.

Пневматическая система торможения имеется в миниатюре и в любом современном автомобиле. Только колодки здесь прижимаются не к ходовой части колес, а к специальным тормозным цилиндрам, смонтированным на их ободах. Выбор материала для таких колодок — дело не простое. Высокий коэффициент трения по металлу, большая теплопроводность и термостойкость, малое изнашивание при сильном трении, наконец, отсутствие набухания в воде и масле — вот далеко не полный перечень требований, предъявляемых к тормозным материалам. Чтобы удовлетворять им, необходимо соединить в единое целое и обработать по специальной технологии десятки различных веществ.

Отметим в заключение, что механическими тормозами оборудован не только сухопутный, но и воздушный транспорт, конечно, на тот случай, когда торможение осуществляется уже на земле, т. е. при посадке. Несмотря на помощь других аэродинамических средств торможения, например закрылков, поворачиваемых при посадке, самолетные тормоза испытывают намного более высокие тепловые и механические нагрузки, чем автомобильные. Объясняется это не только значительно большей массой и посадочной скоростью самолета, но и типичной для летательных аппаратов ограниченностью габаритов. Напомним, что шасси самолетов, где установлены тормоза, — весьма компактные устройства, убирающиеся внутрь при полете. Возникающие в них большие термические и механические напряжения требуют создания для авиационных тормозов особо прочных материалов — предмета кропотливых и дорогостоящих разработок.

Выше мы упоминали об «усилителе трения», основанном на формуле Эйлера. Весь секрет, как мы видели, состоит в том, чтобы гигантскую силу *натяжения* каната перевести в силу, прижимающую канат к кнехту. Это и достигается обматыванием каната вокруг кнехта, чтобы угол охвата α стал достаточно большим. В итоге возникает эффект «удавки»: чем сильнее натягивается канат, тем интенсивнее он прижимается к кнехту, создавая гигантскую силу трения. Точно такой же принцип работает и при завязывании узлов.

Не все знают, что помимо такелажных устройств аналогичный принцип используется и в таком важнейшем технологическом процессе, как прядение нити. Задумывались ли вы над тем, как из прочных, но довольно коротких волокон хлопка получается длинная и вполне однородная нить? Ни клея, ни узлов — ничего этого нет, а операция выполняется поразительно

быстро и споро с помощью простейшей машины — прялки, изобретение которой уходит в глубину тысячелетий. Остается предположить, что волокна в нити сцепляются друг с другом с помощью трения. Как же это происходит?

Вспомним, что важнейшие этапы прядения — сучение и скручивание нити. Без этих операций волокна буквально расползутся уже под самой малой нагрузкой. Зато после них нить, как по волшебству, становится прочной и годной для производства ткани. Получается, что скручивание нити каким-то образом способствует возникновению сильного трения между волокнами. И это действительно так. Причем в основе такого упрочнения нити трением лежит тот же эффект Эйлера. Ведь ниоткуда не следует, что угол охвата α должен расти только при наматывании веревки или нити на цилиндр. Следовательно, эффект обязан проявляться и при винтообразной намотке. Но это как раз то, что получается при скручивании волокон нити. Правда, роль взаимного упора играют здесь уже сами волокна, но это неважно. Главное другое: простейшая операция позволяет включить в силовую цепь мощные силы трения, объединяющие разрозненные волокна в нить. И возникает чудо: нить оказывается тем прочнее, чем сильнее она натянута.

Перед нами еще один пример полезного использования трения — гениальная техническая находка, пришедшая неразгаданной из далекого прошлого и получившая объяснение лишь в период становления классической науки.

А МАШИНАМ ВСЕ ТЯЖЕЛЕЕ...

Посмотрим теперь, как проявляет себя трение в многочисленных технических устройствах, окружающих нас буквально повсюду. Вот знакомый нам автомобиль. Мы знаем, что движение автомобиля — результат сгорания топлива (горючей смеси бензина и воздуха) внутри цилиндров мотора. Но как передать колесам силу, возникающую благодаря расширению горячего газа, давящего на поршни? Для этого усилие от поршня передается сначала на шатун, а оттуда на коленчатый вал. Возникает вращательный момент, который передается в конце концов на колеса через целую систему валов и зубчатых передач, снабженных в свою очередь подшипниками. Во всем этом сложном механизме сопряженные детали с силой касаются и проскальзывают относительно друг друга. Но это, как мы знаем, неизбежно приводит к трению со всеми его грозными последствиями: повышенным расходом энергии, нагревом и изнашиванием деталей.

Как же уменьшить трение внутри современной машины? Для этого тот же автомобиль имеет, прежде всего, разветвленную систему принудительной смазки. Принудительной потому, что смазочное масло подается специальным насосом в зоны трения по многочисленным маслопроводам. Впрочем, существует и другой вид принуждения — разбрызгивание масла, скажем, в результате быстрого вращения коленчатого вала. Именно таким путем смазываются, например, стенки цилиндра автомобильного двигателя.

Далее обстановка, в которой происходит смазывание, оказывается далеко неодинаковой. Например, в подшипниках скольжения, где, как мы помним, создаются предпосылки для «жидкостного» трения (когда детали не касаются друг друга), масло почти не нагревается. Совсем другое дело — стенки цилиндров, по которым быстро «ходят» взад и вперед поршни. Эти стенки при сгорании топлива становятся горячими; кроме того, здесь нет никаких условий для появления «масляного клина»: ведь поверхности поршня и цилиндра, когда они трутся, параллельны. В результате режим трения оказывается довольно жестким и масло портится. Так или иначе, отработанное масло стекает в специальный поддон (картер), откуда оно снова засасывается насосом или разбрызгивается. От продуктов сгорания и изнашивания масло очищается фильтром.

Но и это далеко не все. Некоторые механизмы, скажем коробка скоростей, заполняются более густой смазкой, которая хорошо работает при высоких давлениях, возникающих при ка-

сании тел. Такие высокие контактные давления типичны для работы сильно нагруженных зубчатых колес и шестерен. Наконец, в любом автомобиле, особенно в ходовой части, имеются места, куда густая смазка периодически вдавливается с помощью особых масленок.

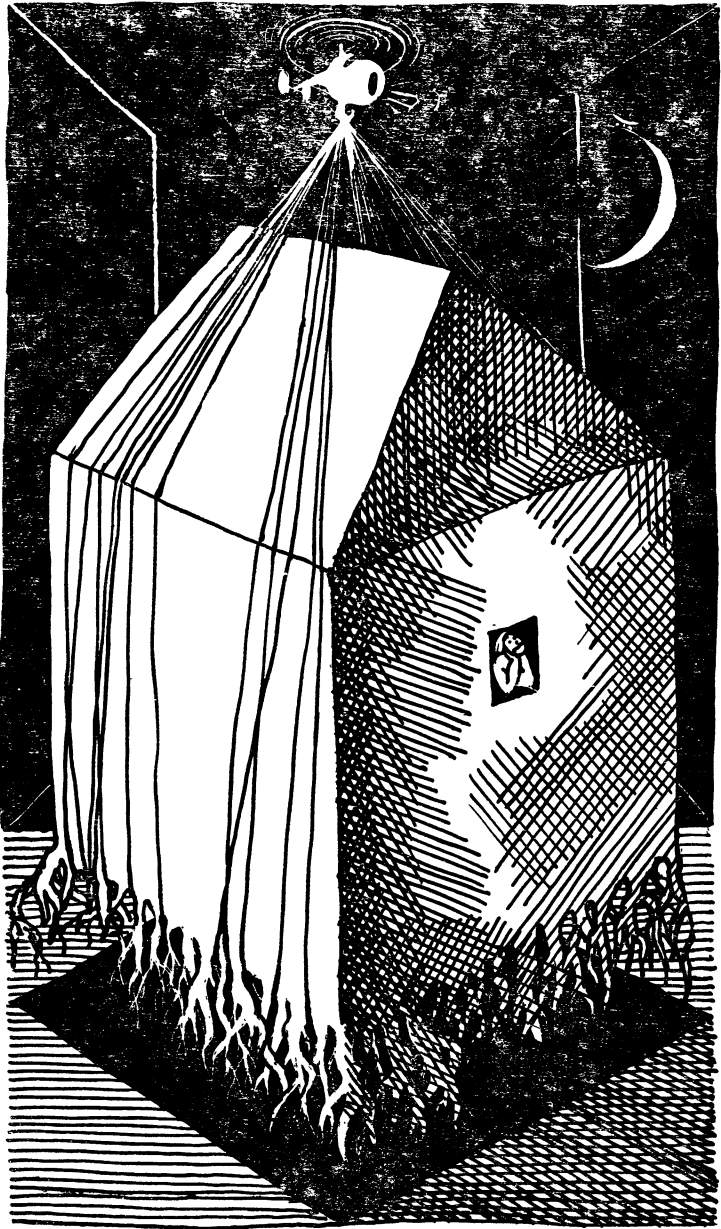
Что же достигается в итоге? Прежде всего, полностью или частично исключается прямое касание деталей. Между ними всякий раз оказывается спасительный слой или, на худой конец, граничная пленка масла, которая выполняет сразу несколько задач: резко снижает трение, еще в большей мере ограничивает изнашивание, а в тех случаях, когда масло циркулирует, выносит тепло из зоны трения, т. е. используется и для охлаждения. Поэтому в некоторых автомашинах имеются радиаторы для охлаждения масла.

Второй, не менее важный способ ограничения трения в современных машинах основан на использовании подшипников качения. В настоящее время в технических устройствах применяются самые разнообразные типы таких подшипников, где тела качения имеют форму шаров, цилиндров, усеченного конуса, бочки и т. п.

Помимо наружного и внутреннего колец, а также тел качения между ними, общим элементом опор такого типа служит сепаратор, т. е. разделитель. При работе подшипника сепаратор не дает шарикам или роликам соприкасаться друг с другом. Вы, наверное, поняли, для чего это надо: соприкасающиеся поверхности шариков вращаются хотя и с одинаковой скоростью, но ... в противоположные стороны! Допустить касание шариков значит вызвать трение скольжения, которое сведет на нет всю пользу от качения. Вот почему почти во всех опорах качения применяют сепаратор.

Но (опять это но!) не шьем ли мы таким способом тришкин кафтан? Ведь изгнанное было трение скольжения тут же появляется вновь при контакте шариков с сепаратором. Верно, но ... сепаратор не несет нагрузки! Поэтому и трение в нем пренебрежимо мало, если это не приборный подшипник, где малы сами нагрузки. Так или иначе, сепаратор следует хорошенько смазывать или изготавливать из самосмазывающегося материала. Потери на трение в шарикоподшипниках, как правило, значительно меньшие, чем в подшипниках скольжения, особенно тех, которые не позволяют создать в чистом виде режим жидкостного трения. Но, с другой стороны, опоры качения более дороги, более велики по габаритам и имеют большую массу.

Мы рассказали о двух основных способах снижения трения внутри автомобиля. Аналогичные способы применяются и во



множестве других машин наших дней. Правда, системы смазывания в этих случаях могут быть намного проще или, наоборот, гораздо сложнее.

Казалось бы, жидкие смазки и шарикоподшипники, на которых работает сегодня подавляющее большинство современной техники, начиная от простого велосипеда и кончая реактивным лайнером или сверхмощной гидротурбиной, раз и навсегда решили извечную проблему трения в машинах и механизмах. То, что это совсем не так, подтверждается колоссальными потерями, связанными, так или иначе, с трением и изнашиванием, о чем мы уже говорили выше. Причины такого положения далеко не просты, поскольку они прямо связаны с многообразием и сложностью современной инженерии. Тем не менее можно с уверенностью сказать об одном, может быть, самом главным факторе — нарастающей жесткости и необычности условий, в которых обязано работать все большее число современных технических устройств.

Давно миновали времена, когда машины и инструменты применялись человеком в тех же, почти не меняющихся условиях, к которым он привык с детства и в которых проходила жизнь его дедов и прадедов. Осваивая полярные области, высокогорье и знойные пустыни, взлетая все далее ввысь и погружаясь под воду на все большую глубину, настойчиво проникая в недра Земли в поисках нефти и газа, человек использует все более диковинные машины, рассчитанные на работу в тяжелых и непривычных условиях необычайной жары и сильного холода, большого гидростатического давления воды морской пучины и сильно разреженного воздуха верхних слоев атмосферы.

Устремившись в космос и высадившись на Луне, посадив автоматические станции на поверхность Венеры и Марса, человек столкнулся с еще более фантастическими для землян условиями: полной или частичной невесомостью, космическим вакуумом, чудовищной жарой и огромной плотностью венерианской атмосферы, агрессивным излучением Солнца, от которого нас спасает атмосфера Земли.

В этих и не снившихся нашим предкам условиях машины и приборы обязаны не только работать, но и действовать особенно четко и надежно, дабы не сорвать колоссальные усилия, прилагаемые человеком, покоряющим природу, не пустить по ветру огромные материальные ресурсы и не лишить жизни смельчаков, находящихся на самом переднем крае нашего познания и овладения миром.

Подшипники и зубчатые передачи, шарниры и направляющие, уплотнительные устройства и системы герметизации являются неотъемлемой частью подавляющего большинства

машин. Поэтому и они должны работать с максимальной надежностью в тяжелых и непривычных условиях. А это означает, что методы борьбы с трением и изнашиванием, успешно апробированные в обычной земной обстановке, оказываются мало подходящими или же вовсе неприемлемыми в устройствах, призванных работать в тяжелых, так называемых экстремальных, условиях.

Здесь первой и, может быть, самой главной на сегодня задачей исследователей служит создание термостойких узлов трения. Все более сильный нагрев отдельных узлов, а нередко и целых агрегатов — типичная черта современных технических устройств. Это объясняется многими причинами, вызванными в конечном счете стремлением конструкторов максимально повысить эффективность и отдачу машин.

Например, дальнейшее усовершенствование газовых турбин морских судов и самолетов неизбежно связано с повышением рабочей температуры в камере сгорания. Это позволяет резко повысить к. п. д. таких машин, значительно снизив расход топлива и массу двигателя. При этом возникают проблемы подбора термостойких материалов для подшипников и уплотнений, вращающихся с огромной скоростью валов турбин.

Ракеты, работающие на химическом и ядерном горючем, по-видимому, останутся в ближайшем будущем основным средством проникновения человека в космос. А их дальнейший прогресс обусловлен, в первую очередь, увеличением скорости истечения газов из сопла, пропорциональной, в свою очередь, температуре сгорания топлива. Хотя механизмы силовых установок, как правило, защищены от прямого воздействия потоков теплоты, излучаемых двигателем, температура их узлов трения нередко превышает 500°C , достигая иногда 1000°C .

Современная техника просто немыслима без непрерывного роста скоростей и нагрузок. Наиболее наглядно это проявляется на транспорте, где с каждым десятилетием растут скорости самолетов, железнодорожных составов, морских и речных судов. Столь же устойчиво ускорение технологических операций при механической обработке материалов, а также при бурении нефтяных и газовых скважин. Но вместе со скоростью процессов и операций растут, как правило, и нагрузки.

В результате разогреву узлов трения до температуры $500-1000^{\circ}\text{C}$ и выше способствуют характерные для современной техники высокая температура окружающей среды, большие скорости и нагрузки, различные виды облучения и, наконец, высокий вакуум. Вот почему создание термостойких конструкционных материалов, в том числе надежно работающих на тре-

ние, поставлено в современном материаловедении во главу угла.

С другой стороны, все большее число машин и приборов обязано сейчас работать при сильных морозах, а нередко и при таком холоде, который нам даже трудно представить. Вся наша цивилизация началась с того, что примерно 12 тыс. лет назад ледники, покрывавшие большую часть суши, стали постепенно таять и медленно отступать к приполярным областям. Вслед за уходящими ледниками последовательно и упорно двигались люди, осваивая края со все более холодным и суровым климатом. Именно так были заселены северная и восточная часть Европы, Сибирь и горные области Центральной Азии. В наше время приобрели особое значение проблемы дальнейшего освоения северных земель Азии и Америки, а также самой Арктики и Антарктики.

Достаточно упомянуть, например, о круглогодичной полярной навигации через Северный Ледовитый океан, роль которой для нашей страны, имеющей самую большую в мире северную береговую границу, невозможно переоценить. Необходимые для этого могучие атомные ледоколы, пробивающие во льдах путь для обычных судов, используют богатейшее техническое оснащение, работающее при морозах свыше 50°С. Кроме того, наползая своей тяжестью на толстый ледяной покров, чтобы продавить его, ледокол должен затрачивать всю гигантскую мощь двигателя на преодоление трения о лед. При этом толщина намерзающего на борту ледокола ледяного покрова, или так называемой «бороды», достигает в отдельных случаях 12 м. Контакт льда с металлами и другими конструкционными материалами вырастает в важную проблему, причем задачи трения и изнашивания тесно переплетаются с защитой корпуса ледокола от коррозии и сильного обледенения, препятствующего нормальной работе судна-первопроходца.

Помимо естественного холода, еще царящего во многих районах нашей планеты, все большее инженерное значение приобретает искусственный холод, создаваемый человеком путем сжижения в специальных машинах кислорода, азота, водорода и гелия. Все это относится к области криогенной (от греческого криос — холод, мороз) техники, используемой сейчас в самых различных отраслях народного хозяйства.

Жидкий кислород и водород находят с каждым годом все большее применение в качестве топлива космических кораблей и ракет. Упомянем, далее, об использовании жидкого азота и других охлажденных газов для наиболее простого способа получения высокого вакуума в больших объемах, что необходимо, например, для имитации условий космического пространства.

В медицине глубокое охлаждение позволяет длительно сохранять в состоянии замедленной жизнедеятельности (анабиоза) живые клетки и ткани, а в ряде случаев и целые органы человека, необходимые для сложнейших операций.

Особую роль играет криогенная техника в разработке многочисленных устройств, использующих явление сверхпроводимости. Уже сейчас имеются опытные линии, охлаждаемые жидким гелием и позволяющие передавать электроэнергию на большие расстояния без всяких потерь.

Другой важный пример использования сверхпроводимости — погруженные в жидкий гелий мощные электромагниты. В сверхскоростных транспортных средствах ближайшего будущего такие магниты станут, по-видимому, надежным средством устранения прямого контакта кабин с рельсами, — этого принципиального, как мы видели, недостатка колесного транспорта.

Мы перечислили все эти необычайные и суровые условия для того, чтобы подвести читателя к новой проблеме: многочисленным трудностям, а в ряде случаев и невозможности использования в современной технике жидких смазок, еще вчера казавшихся инженерам палочкой-выручалочкой от всех бед. В самом деле, в описанных тяжелых условиях такие жидкости, как технические масла, замерзают, окисляются, испаряются — словом, теряют свои смазочные свойства.

Поэтому внимание разработчиков все чаще обращается к твердым смазкам, о которых мы и расскажем в следующей главе.

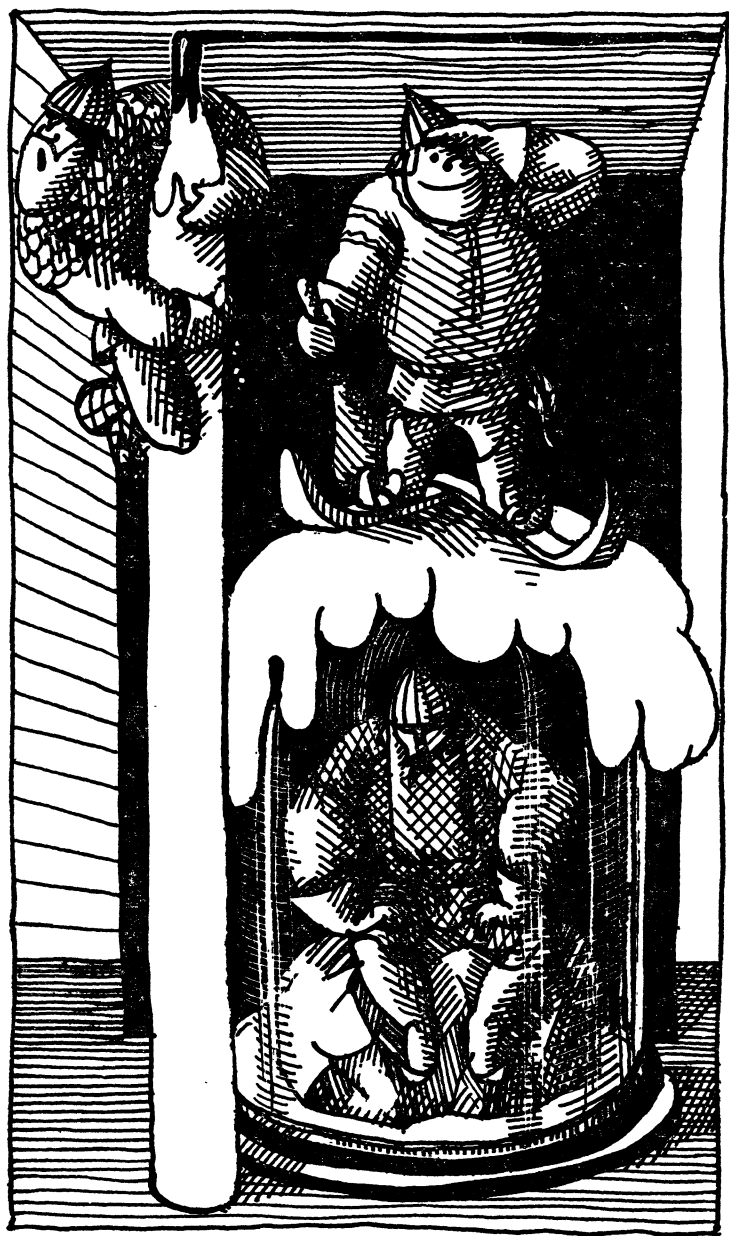
ТРИ БОГАТЫРЯ

Пользуясь карандашом или шариковой ручкой, мы вряд ли задумываемся над тем, что свойство вещества оставлять след при трении тесно связано с его способностью к смазыванию. Нужно обладать поистине незаурядной наблюдательностью и технической смекалкой, чтобы разглядеть в обыкновенном графите (от греческого корня графо — пишу), издавна применявшемся для изготовления грифелей, отличную твердую смазку.

Не случайно таким человеком оказался выдающийся русский механик-самоучка Иван Кулибин. Находясь на службе у самой российской императрицы Екатерины II, прославившийся уже к тому времени умелец обязан был изготовить ее престарелому величеству дворцовый лифт. Для плавной и бесшумной работы детали подъемного устройства нуждались в хорошей смазке, что вызвало серьезную проблему: растительные масла, сало и деготь — эти основные смазки того времени — не годились в этом совершенно особом случае по весьма деликатной причине: из-за их неприятного, отдающего «деревней и мужиками» запаха. Кулибин блестяще решил задачу, воспользовавшись «карандашом», что, возможно, было первым фактом использования графита в качестве смазки.

Второй поучительный эпизод в биографии графита как смазочного материала произошел веком позже и совпал с рождением двигателя переменного тока. Проблема, как это нередко случалось, возникла совсем неожиданно и была связана с передачей тока скользящим электроконтактом. В двигателе постоянного тока задача решалась просто: медная щетка скользила по вращающейся шине, вызывая небольшое искрение, с которым конструкторы были вынуждены мириться. При переходе к переменному току положение стало катастрофическим: коллектор, сменивший полукольцевые шины, окутывался сразу после пуска снопом искр и быстро выходил из строя. Бесчисленные опыты с различными металлами, длившиеся восемь лет, не дали ощутимых результатов: проблема искрения щеток при трении казалась непреодолимой.

Задача была решена группой инженеров во главе с выдающимся американским изобретателем Э. Томсоном. В качестве материала для щеток был выбран, наконец, наш знакомый графит, сочетающий в себе, как оказалось, вполне приличную электропроводность с отличными смазочными свойствами. При этом графит благодаря своей мягкости касался металла



по значительно большей поверхности, что еще более повышало проводимость контакта. В итоге искрение исчезло, медная поверхность, надежно защищенная графитовой пленкой, становилась зеркально гладкой и почти не истиралась, а износ графитовых щеток был незначительным и легко компенсировался пружинками.

Таким образом, решение сложнейшей инженерной проблемы получилось на редкость простым и исчерпывающим. Графитовые щетки образцово действовали в электромашинах самых различных систем почти сто лет, пока благодаря развитию космической техники не возникла потребность в электродвигателях, работающих в вакууме. Опять неожиданно (в истории техники это слово встречается, наверное, не реже, чем в детективах) выяснилось, что смазочные свойства графита теряются при переходе к вакууму. Возврат к металлическому контакту не сулил ничего хорошего: было известно, что трение металлов в пустоте да еще с пропусканием тока чревато неприятными последствиями. После долгих поисков были найдены подходящие смеси, имеющие в своем составе серебро и молибденит. Кроме того, в космическом приборостроении стали применяться электродвигатели, не имеющие щеток.

В этой поучительной истории налицо типичные этапы классической изобретательской драмы: кажущийся безысходным тупик, блестящая находка, шумный успех и ... новые проблемы и решения.

В наше время графит как смазочный агент широко применяется в машиностроении, в основном в виде добавок к особо вязким, так называемым пластичным, смазкам. Вы могли видеть такую смазку, наблюдая или участвуя в разборке коробки передач автомобиля.

Если работа жидких смазок описывается, хотя бы в принципе, с помощью простых физических соображений, то механизму смазочного действия графита посвящена обширная литература. Большинство ученых считает, что суть дела в особой слоистой структуре этого вещества. Слабо связанные друг с другом тончайшие слои графита при удачном приложении силы легко смещаются, подобно картам в колоде, что и обеспечивает смазывание. Тонкость состоит в том, что между структурными слоями графита почти всегда присутствуют молекулы воды и кислорода, проникающие из атмосферы и облегчающие взаимный сдвиг слоев. По этой причине графит утрачивает свои свойства хорошего смазочного материала в вакууме.

Хорошая связь графитовых пленок с окислами металлов — залог успешного смазывания. Именно поэтому трение графита

в контакте с благородным металлом, не имеющим окисных пленок, велико. В то же время графит хорошо смазывает стальные и медные поверхности, склонные к окислению.

Уже в XV веке графит применялся для изготовления тиглей. В XVI веке началась добыча графита в Англии, где он стал использоваться для карандашных грифелей вместо свинцовых. Поэтому сначала его называли плюмбаго (от латинского плумбум — свинец) и уже позже стали именовать графитом. Интересно, что этот материал долгое время не отличали от другого смазочного вещества — молибденита.

В настоящее время графит благодаря своим уникальным свойствам находит широкое применение практически во всех отраслях промышленности, включая ядерную энергетику. Главные районы добычи природного графита — Чехословакия, остров Шри Ланка, Корейский полуостров и остров Мадагаскар. Известен целый ряд способов промышленного получения этого вещества.

Второй «герой» этой главы — молибденит, о котором мы только что упомянули, был известен еще древним грекам, но из-за внешнего сходства его обычно путали с графитом и даже со свинцом (по гречески «молибдос»). Наиболее крупное месторождение минерального молибденита находится в штате Колорадо США.

Каждый элементарный слой этого вещества представляет собой «сэндвич» из двух рядов атомов серы с «начинкой» из атомов молибдена. Прочность самих слоев сочетается с их легкой подвижностью по «плоскостям серы». Такая неоднородность в строении кристаллической решетки молибденита выражена тем сильнее, чем чище вещество. Отсюда следует, что механизм смазочного действия молибденита совершенно автономен, т. е. не требует присутствия какой-либо среды. Это обеспечивает ему выдающиеся смазочные свойства, особенно при использовании в высоком и сверхвысоком вакууме.

Положительные результаты испытаний молибденита в лабораторном вакууме на Земле были подтверждены экспериментами в космическом пространстве, где трение этого вещества оказалось еще более низким. При сильном нагреве в вакууме его смазочная способность не только сохраняется, но и заметно улучшается.

Сейчас молибденит заслуженно считается наилучшей твердой смазкой, получившей распространение во всех промышленно развитых странах. Обычно на рынок поступает паста, содержащая 50–70% этого вещества. Значительный рост цен на молибденит привел в последнее время к рекламированию в Англии и других странах различных заменителей.

В настоящее время у нас в стране на основе молибденита создан новый самосмазывающийся материал — димолит, обладающий необычными свойствами. Материал отлично работает в самых различных условиях, в том числе в газовых средах и в вакууме. Удельная нагрузка на него при испытаниях доводилась до полутора тонн на 1 см^2 , но и это значение, по-видимому, не предельно. При работе в вакууме димолит обеспечивает высокую работоспособность как при сильном охлаждении, так и при нагреве до 1000°C . Без всякого вреда для себя он переносит различные виды радиации.

Отметим наконец, что молибденит обладает еще целым рядом важных свойств, в том числе способностью реализовать в определенных условиях эффект сверхнизкого трения, о котором пойдет речь ниже.

Расскажем теперь о последнем из «трех богатырей» среди твердых смазок — тефлоне. Это коммерческое название благодаря своей краткости намного удобнее другого, политетрафторэтилен, придуманного химиками. Если графит и молибденит — природные вещества, то тефлон — типичный «сын» химии XX века, которому не исполнилось еще и 50 лет. Будучи, в отличие от графита и молибденита, великолепным изолятором, тефлон начал свою технологическую карьеру в электротехнической промышленности. Позже непревзойденная химическая инертность сделала этот полимер незаменимым при изготовлении химического оборудования, а затем изделий бытовой техники и медицины.

Для нас интересно то, что тефлон обладает самым низким коэффициентом трения из всех известных на сегодня твердых веществ. Благодаря этому он и находит широчайшее применение в твердосмазочных материалах и покрытиях. Молекулы этого полимера — длинные углеродные цепи с привесками из атомов фтора — самого активного из химических элементов. Подобная конструкция цепей отличается высокой прочностью, в то время как связи между самими цепями довольно слабы.

Здесь мы снова сталкиваемся с характерной особенностью всех выдающихся твердых смазок: неравнопрочностью их атомно-молекулярной структуры. При трении это позволяет микроскопическим структурным блокам графита, молибденита и тефлона ориентироваться выгодным образом относительно плоскости и направления скольжения.

Такая самоориентировка на микроуровне и служит основой сильного смазочного действия, о чем мы еще поговорим позже.

Автономность механизма смазывания тефлона в сочетании с его химической инертностью и неспособностью сорбировать

влагу позволяют применять этот полимер в самых различных условиях, включая, помимо обычной атмосферы, высокий вакуум, многие газовые среды, повышенную температуру и сильное охлаждение. Но не все так просто: материаловеды должны преодолеть множество препятствий, связанных с различными недостатками тефлона как смазки — в частности, с его скромной несущей способностью (напомним, что связи между молекулами довольно слабы) и полным «нежеланием» прилипнуть к чему-либо. Очевидная невозможность писать тефлоновым стержнем так же, как графитовым карандашом, явно свидетельствует не в пользу этого материала.

Первый недостаток устраняется сравнительно легко: тефлоном как смазочным агентом заполняется прочный несущий каркас, выполненный, например, из пористой бронзы. Это позволяет также обеспечить хороший отвод тепла из зоны трения, поскольку сам по себе тефлон очень плохо проводит тепло. Кроме того, для повышения несущей способности достаточно покрыть зону контакта сравнительно тонким слоем тефлона, который в этом случае уже «не течет» под нагрузкой.

Вопрос заключается в том, как закрепить на металлической или другой основе вещество, главное назначение и свойство которого как раз и состоят в том, чтобы снижать трение и ни к чему не прилипнуть. Такая, кажущаяся на первый взгляд неразрешимой, задача возникает, например, при изготовлении горных лыж, а также при защите технических устройств от обледенения с помощью тефлоновой фольги. В последнее время и эта весьма тонкая проблема успешно решается у нас и за рубежом путем специальной обработки необходимой части поверхности тефлона, придающей ей способность прочно склеиваться с металлами, деревом и другими материалами.

Отметим объективности ради еще два заметных недостатка тефлона, с которыми обязаны считаться конструкторы. Прежде всего, этот полимер расширяется при нагреве сильнее, чем многие другие материалы, что требует особой заботы проектировщиков. Во-вторых, тефлон весьма чувствителен к воздействию радиации, например ультрафиолетовых лучей Солнца, которые особенно губительны в открытом космосе. Это в определенной мере ограничивает использование тефлоновых покрытий в космической технике.

В дальнейшем мы еще не раз будем называть имена «трех богатырей» смазочной техники, дав тем самым возможность читателю сполна и по достоинству оценить их выдающуюся роль в современном машиностроении. А пока задумаемся еще раз над тем, почему же все-таки демонстрируют свои необыч-

ные смазочные свойства такие несхожие друг с другом вещества, как герои этой главы. Не случайно ли это?

Оказывается нет. Вспомним, что все три вещества обладают одной важной физической чертой — неравнопрочностью и относительной подвижностью своих структурных элементов на микроуровне. Именно эти особенности обеспечивают поверхностным пленкам подобных веществ при скольжении определенное разнообразие и гибкость поведения, что приводит к главному — постепенному переходу в устойчивое состояние с малым трением.

ТРЕНИЕ ИСЧЕЗЛО!

Мы знаем, что в основе трения, по всей видимости, лежит рассеяние энергии, вызванное интенсивным обменом адгезионных связей при относительном скольжении тел. При переходе к качению этот обмен становится настолько мизерным, что трение почти исчезает. К сожалению, качение возможно далеко не всегда. Кроме того, подшипники качения — довольно сложные устройства и сравнительно дороги, да и в них, как мы заметили, почти неизбежно присутствует скольжение. Естественно возникает вопрос: как снизить трение скольжения до возможного минимума и каков он, собственно, этот минимум?

Из модели Д. Томлинсона следовало, что единственный путь здесь состоит в уменьшении энергии единичного обмена, которую этот ученый считал примерно равной самой энергии связи. Из физики твердого тела известно, что слабейшая связь между атомами (так называемая связь Ван-дер-Ваальса) примерно раз в сто меньше самой сильной связи. Таким образом, уже столетия назад существовала теоретическая возможность снизить коэффициент трения скольжения до уровня порядка 10^{-3} , близкого к показателю «жидкостного» трения.

Тем не менее на практике все известные тогда твердые тела по-прежнему давали значения коэффициента трения, близкие к полученным еще Леонардо да Винчи. Невольно среди ученых и инженеров утверждалось мнение, что относительная величина сухого трения просто не может быть меньше определенного, причем довольно высокого, уровня. Такая точка зрения, в свою очередь, заставляла специалистов скептически относиться к возможностям дальнейшего усовершенствования твердых смазок. В самом деле, ведь слабая адгезионная активность смазочного вещества должна была сочетаться с его сильным прилипанием к поверхности защищаемого тела. Задача представлялась неразрешимой.

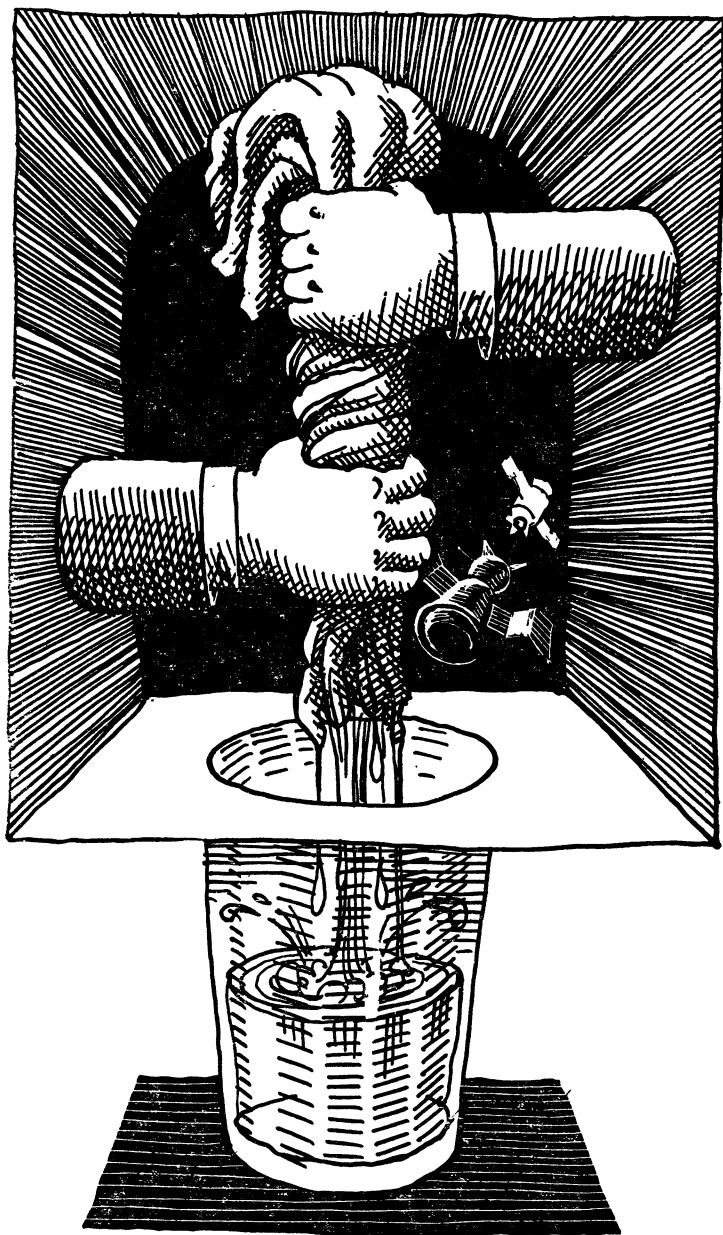
Дело сдвинулось с мертвой точки лишь после того, как предметом исследований стали не твердые тела и не жидкости, а тонкие пленки органических веществ, «сидящие» притом, как выяснилось, весьма прочно на поверхности металлов и многих других материалов. Такие пленки получили название «граничных». Это прилагательное стали вскоре добавлять также к самим процессам смазывания и трения подобных пленок. Более того, довольно быстро выяснилось, что в данном случае инженеры и ученые имеют дело, как правило, не с контактом двух твердых тел, а с трением, создаваемым третьим те-

лом — вездесущими граничными пленками, исподволь покрывающими поверхности контакта. Этим важным обстоятельством и объяснялось довольно странное постоянство коэффициента «сухого» трения у многих, столь не похожих друг на друга материалов.

С изучением свойств граничных пленок начался новый период в истории науки о трении. Исследуя тонкие пленки органических кислот, нанесенные на полированную металлическую пластинку, английский физик В. Харди выявил высокую прочность таких пленок на «раздавливание», сочетающуюся с необычайно низким для твердых тел коэффициентом трения. Достаточно было лишь легонько наклонить опору с пленкой, как лежащая на ней алюминиевая пластинка тут же соскальзывала прочь. Подобное явление «сверхскользкости» наблюдали позже примерно в аналогичных условиях и советские ученые А. С. Ахматов и Л. И. Панова. На первый взгляд можно было бы сказать, что поверхности смазаны жидкостью и ничего удивительного здесь нет. Но мы уже знаем, что механизм жидкостного трения не может быть реализован при столь низкой скорости скольжения и строгой параллельности пластинок. Кроме того, наблюдаемый при этом коэффициент трения в пределах $0,05 \div 0,02$ сохранялся и при высоких удельных нагрузках, при которых любая жидкость просто выдавливается из зоны контакта.

Разгадка заключается в особой конструкции молекул жирных кислот. Обычная углеводородная цепь, составляющая основу такой молекулы, имеет на одном конце пассивную группу CH_3 , а на другом — довольно активную группу COOH , «жаждущую» вступить в прочный контакт с металлом. Намертво вцепившись в металл своими активными концами, целые армии молекул таких кислот разворачивались перпендикулярно поверхности, напоминая при таком построении щетину зубной щетки. Прочность слоя, образовавшегося из подобных, стоящих торчком молекул, на сжатие оказалась, благодаря мощному углеводородному хребту, примерно такой же, как и у стали. В то же время противоположная сторона молекулярной «щетины» была сплошь образована пассивными группами, обеспечивающими легкое скольжение. С физической точки зрения такая сильно ориентированная структура граничных пленок позволяет говорить, скорее, об их твердом, нежели жидком, состоянии.

Но является ли такое состояние оптимальным для получения минимального трения? Оказывается, нет. В 1969 г. группой советских ученых было открыто явление аномально низкого трения твердых тел. Эффект был открыт случайно при попытке



воссоздать в лаборатории такие же условия трения, как и в космическом пространстве, что, в свою очередь, было необходимо для обеспечения надежной работы узлов трения спутников и других космических аппаратов. Для этого пару трения, представлявшую собой стальной шарик, скользящий по полимерному диску, помещали в глубокий вакуум. Но в космосе беспощадно жжет Солнце, испуская потоки излучения и ускоренных частиц. Кроме того, наша Земля окружена радиационными поясами, состоящими из потоков быстрых электронов и протонов. Как все это повлияет на процессы трения? Об этом тогда никто не знал. Поэтому поверхность вращающегося диска бомбардировали непосредственно в процессе трения ускоренными частицами — электронами и атомами гелия. Для поддержания высокого вакуума и исключения попадания в зону трения паров масла из насоса трущаяся пара была окружена металлическим экраном, охлаждаемым жидким азотом, что, как выяснилось позже, было одним из решающих обстоятельств, приведших к открытию.

При бомбардировке тефлона электронами трение, как и следовало ожидать, резко возросло, поскольку молекулярные цепи этого полимера необратимо рвались в этом случае на более короткие куски с образованием побочных продуктов распада, препятствующих смазыванию. При аналогичном воздействии на другой полимер — полиэтилен — трение, наоборот, заметно упало, что также не вызвало особого удивления: было известно, что молекулы полиэтилена, в отличие от тефлона, «сшиваются» под облучением, повышая его прочность.

Сенсация произошла при бомбардировке того же полиэтилена ускоренными атомами гелия. Трение в этом случае сначала несколько возросло, а затем стало быстро падать и ... исчезло совсем! Это означало, что коэффициент трения оказался ниже 0,001 — предела чувствительности установки. Но такой результат опрокидывал все представления о сухом трении, складывавшиеся на протяжении столетий. Это казалось столь невероятным, что ученые стали лихорадочно проверять — в порядке ли установка, а убедившись в справедливости и устойчивости результата, который упорно повторялся раз за разом, начали искать объяснение во всяких побочных явлениях, которые могли ускользнуть из поля зрения наблюдателей.

Что делать, в науке, да и в нашей повседневной жизни, нередко случаются странные и кажущиеся необъяснимыми явления, которые оказываются на поверку причиной самых обычных обстоятельств, до поры до времени просто никому не приходивших в голову. Отлично зная об этом, ученые стали хладнокровно проверять все возможные варианты.

Известно было, например, что полиэтилен под действием ускоренных частиц распадается, интенсивно выделяя водород. Не служит ли этот газ своеобразной «подушкой», исключаящей сухое трение? Оказалось, что нет: водорода было слишком мало. Тогда, может быть, виною всему электрический заряд, скапливающийся на полиэтилене в результате бомбардировки этого изолятора атомами гелия? И такую версию пришлось отклонить, поскольку эффект аномально низкого трения (АНТ) сохранялся в опытах, где накопление заряда исключалось. Окончательная уверенность в истинности наблюдаемого «чуда» пришла к ученым после того, как эффект был обнаружен на молибдените — веществе, не выделяющем никакого газа при облучении и обладающем к тому же заметной электропроводностью. Последнее подозрение, связанное с возможным смазочным действием гелия, скапливающегося на поверхности молибденита при бомбардировке его атомами этого элемента, исчезло после того, как эффект АНТ был получен при воздействии на молибденит пучком ускоренных электронов.

Итак, чудо действительно существовало: трение, оставаясь сухим, было в то же время неслыханно низким, близких по величине к жидкостному трению или даже трению качения. Перед учеными встала теперь захватывающая задача: раскрыть тайну обнаруженного явления, а заодно и проникнуть более глубоко в саму природу сухого трения. И здесь необходимо было прежде всего ответить на два естественных вопроса: почему эффект АНТ никогда не наблюдался раньше и что принципиально нового внесла в эксперимент бомбардировка одного из тел ускоренными частицами?

Тут, в свою очередь, сразу выступила на передний план одна очень важная деталь: глубина проникновения в вещество атомов гелия при тех энергиях, которые использовались в опытах, не превышала одной миллионной доли сантиметра. Отсюда следовало, что причина трения «прячется» так или иначе в слое ничтожной толщины и достаточно что-то изменить только в этом слое, как трение исчезнет.

Уже один этот вывод означал важный шаг как в понимании природы трения, так и в поисках путей его устранения. В самом деле, из представлений, изложенных выше, допускалось, что причина трения, по крайней мере в основном, связана, наряду с адгезией, с деформированием поверхностного слоя, толщина которого оценивалась в пределах 10^{-2} — 10^{-4} см. Поскольку это значение превышало глубину лучевой обработки дорожки трения в сотни и тысячи раз, гипотеза о передеформировании дорожки, как одной из главных причин трения, отпадала.

Иными словами, экспериментально подтверждалось, что фундаментальной причиной трения служит отнюдь не механическое деформирование дорожки, а адгезионный эффект, сконцентрированный в тончайшем поверхностном слое. Реализация такого эффекта, основанного на непрерывном обмене адгезионных связей, требует толщины слоя всего 10^{-7} см, т. е. порядка удвоенного диаметра атома. Таким образом, опыты с эффектом АНТ в данном случае однозначно подтверждали адгезионную природу сухого трения.

С инженерной точки зрения эффект АНТ позволил совсем по-новому оценить возможности твердых смазок, поскольку главный их недостаток — высокое трение, сопровождающееся интенсивным тепловыделением, — оказывался, в принципе, преодолимым. Кроме того, высокая эффективность необычайно тонких смазочных слоев, выявленная благодаря открытию эффекта АНТ, приводила к конструктивным идеям на совершенно новой основе.

Механическая модель смазочной пленки, описываемая, например, твердостью и сопротивлением на срез, заменялась физической моделью, основой которой должна была стать энергия адгезионной связи, постоянная Томлинсона и другие микроскопические параметры. Другими словами, формирование смазочной пленки становилось предметом атомно-молекулярной инженерии. Здесь уже явно проглядывает тесная связь машиностроения с физикой, типичная для современной техники.

Но что же все-таки служило главной причиной устранения трения, связанной с облучением? Получение эффекта АНТ на таком прочном и отлично изученном веществе, как молибденит, значительно упростило ученым ответ на этот вопрос. Вспомним, что молибденит, обладая слоистой структурой, способен ориентироваться в процессе трения так, что его элементарные слои оказываются примерно параллельными плоскости скольжения и на поверхности скапливаются преимущественно слабые адгезионные связи, которые и дают низкое трение ... Низкое, но не сверхнизкое. Так в чем же дело?

Физики-экспериментаторы пользуются методом, позволяющим судить о формировании поверхностных атомно-молекулярных структур по тому, как эти структуры отражают пучок ускоренных электронов, направленный под малым углом к поверхности. Причудливые изображения, рисуемые отраженным таким образом пучком электронов, могут наблюдаться воочию или фотографироваться с помощью специального прибора — электронографа. При этом о сильной ориентации или, как говорят, об упорядочении структур можно судить по узким дужкам или регулярно расположенным пятнам на электронограммах.

Оказалось, что ориентация таких структур на поверхности молибденита при трении в воздухе чрезвычайно слаба, но становится куда более заметной при трении в вакууме. При реализации эффекта АНТ ориентация оказывалась уже очень сильной, что и приводило к исчезновению трения. Выходило, что при обычном трении что-то мешает ориентации пройти до конца, но эта таинственная причина устраняется при бомбардировке ускоренными частицами. Таким образом, круг поисков значительно сузился.

Чтобы сделать следующий, решающий шаг, физики использовали другой чувствительный прибор — масс-спектрометр, позволяющий четко выявить состав и количество газа, определяющего так называемый фон камеры. Напомним, что трение происходило в среде, разреженной по сравнению с атмосферой примерно в миллиард раз. Тем не менее и в этом вакууме могли присутствовать, хотя и в малом количестве, различные вещества, в первую очередь молекулы воды и кислорода, способные повлиять на трение.

Многочисленные спектрограммы отчетливо выдавали одну и ту же картину: сразу после начала облучения уровень «водяного фона» резко возрастал, а затем быстро падал до ничтожного значения — предела чувствительности прибора. Это могло означать лишь одно: разогнанные атомы гелия при ударе в молибденитовую мишень выбивали из нее молекулы воды, которые тут же улавливались экраном, охлаждаемым жидким азотом, и «выходили из игры».

В самом деле, стоило только прекратить действие криогенного экрана, как водяной фон стабилизировался на сравнительно высоком уровне, а эффект АНТ в полной мере не наблюдался. Вывод напрашивался сам собой: молекулы воды и других веществ, прочно «сидящих» на поверхности молибденита, не только ухудшают его смазочное действие, но и препятствуют ориентации структурных блоков этого вещества в процессе трения.

Бомбардируя поверхность молибденита, мы тщательно очищаем его от этих примесей, в первую очередь, от молекул воды, убивая тем самым сразу двух зайцев: убираем источники активных адгезионных связей и способствуем сильной ориентации поверхностных структур. Зависимость между коэффициентом трения μ молибденита и давлением водяных паров p в окружающей среде отчетливо видна при наложении обеих характеристик друг на друга.

Например, при переходе от обычной атмосферы к вакууму p снижается в миллион раз, а μ — всего в два раза. При включении криогенного экрана p падает уже примерно в сто раз,

а μ — соответственно в 3,5 раза. Наконец, при включении электронной пушки давление паров снижается еще на несколько порядков, а уровень трения оказывается ниже 0,001 — предела чувствительности измерительного устройства. Поэтому можно сказать, что непосредственной причиной эффекта АНТ служит сверхобезвоживание поверхностного слоя молибденита, в результате которого парциальное давление влаги в окружающей среде снижается в десятки миллионов раз!

Но если вся роль облучения сводится к изгнанию молекул воды из зоны трения, то почему нельзя использовать для этого обычный нагрев? Оказывается, можно. Однако выдержка молибденита при температуре 300 °С, необходимая для его полного обезвоживания, требует уже суток, в то время как при бомбардировке ускоренными частицами при комнатной температуре для этого достаточно десятков секунд. Здесь и кроется причина того, почему эффект АНТ не был обнаружен исследователями раньше, несмотря на то, что молибденит как смазочное вещество изучен достаточно хорошо.

Приоткрыв завесу над тайной исчезновения трения, расшифровка эффекта АНТ не дала пока достоверного ответа на важнейший вопрос, что же является при подвижном контакте тел элементарной адгезионной связью — этим «кирпичиком» трения. Неясно, следует ли понимать под ним одновременное действие большой группы поверхностных атомов, сконцентрированных в некоем микроочаге, или же предполагать, следуя Томлинсону, что элементарным актом трения служит взаимодействие всего лишь двух атомов, сильно сближенных, но принадлежащих разным телам.

Четкий ответ на этот вопрос означал бы значительное продвижение на пути создания микроскопической теории трения.

Посмотрим теперь на эффект аномально низкого трения с иной точки зрения. Вспомним, что для его получения необходим подвод добавочной энергии извне — воздействие на трибосистему потоком ускоренных частиц, который изменяет свойства поверхностного слоя вещества. Не исключено, что при этом важную роль играет явление самоорганизации. Детально вопросы самоорганизации рассматриваются в новой науке — синергетике, охватывающей самые различные области знаний.

КОГДА МАШИНАМ ЖАРКО

Надеемся, что читатель не забыл о причинах, которые, при всем их разнообразии, приводят к общему и неприятному для инженеров итогу: сильному нагреву зоны трения. Жидкие смазки обычно не выдерживают такого нагрева, больше того: даже один из трех наших «богатырей» — тефлон — «складывает оружие» при температурах выше 200 °С. Из «богатырской дружины» остаются в строю только графит и молибденит, которые с большим или меньшим успехом сдерживают натиск высоких температур вместе с некоторыми другими веществами, но о них речь впереди.

Но в чем же все-таки заключается особенность и опасность «горячего» трения? Ответ на этот вопрос достаточно сложен и неоднозначен. Так, из-за неизбежного при нагреве снижения твердости материалов возрастает площадь фактического контакта, а следовательно, и трение. А химические реакции? Законы химии таковы, что скорости протекания реакций обычно резко возрастают с нагревом. Вот и получается, что при горячем трении контактируют не исходные материалы, а совсем новые, так сказать, вторичные вещества, способные на различные сюрпризы.

Например, при сильном нагреве в воздухе наш старый знакомец молибденит может покрыться твердым окислом, действующим подобно наждачной бумаге. При сильном нагреве в вакууме тот же молибденит преподносит новую неожиданность: значительно изменяет структуру решетки, в результате чего коэффициент трения скачком возрастает в несколько раз.

Вообще структурные переходы, связанные с перестройкой кристаллической решетки металлов, полупроводников и других твердых тел при изменении температуры, — явление не редкое и весьма коварное. Особенно интересны переходы, которые сопровождаются скачкообразным изменением коэффициента трения. Здесь наглядно подтверждается тонкая физическая природа процессов трения и смазывания.

Таким переходом обладает, например, металл кобальт, успешно применяемый в виде тонкого смазочного покрытия. При нагреве свыше 400 °С новый тип кристаллической решетки кобальта становится неблагоприятным для легкого проскальзывания микрослоев этого металла и его смазочное действие резко ухудшается. Любопытно, что такое явление обратимо: достаточно снова охладить кобальт, как его структура, а вместе с ней и смазочная «репутация» тут же восстанавливаются. Случаются и курьезы. Например, мягкая, хорошо смазываю-

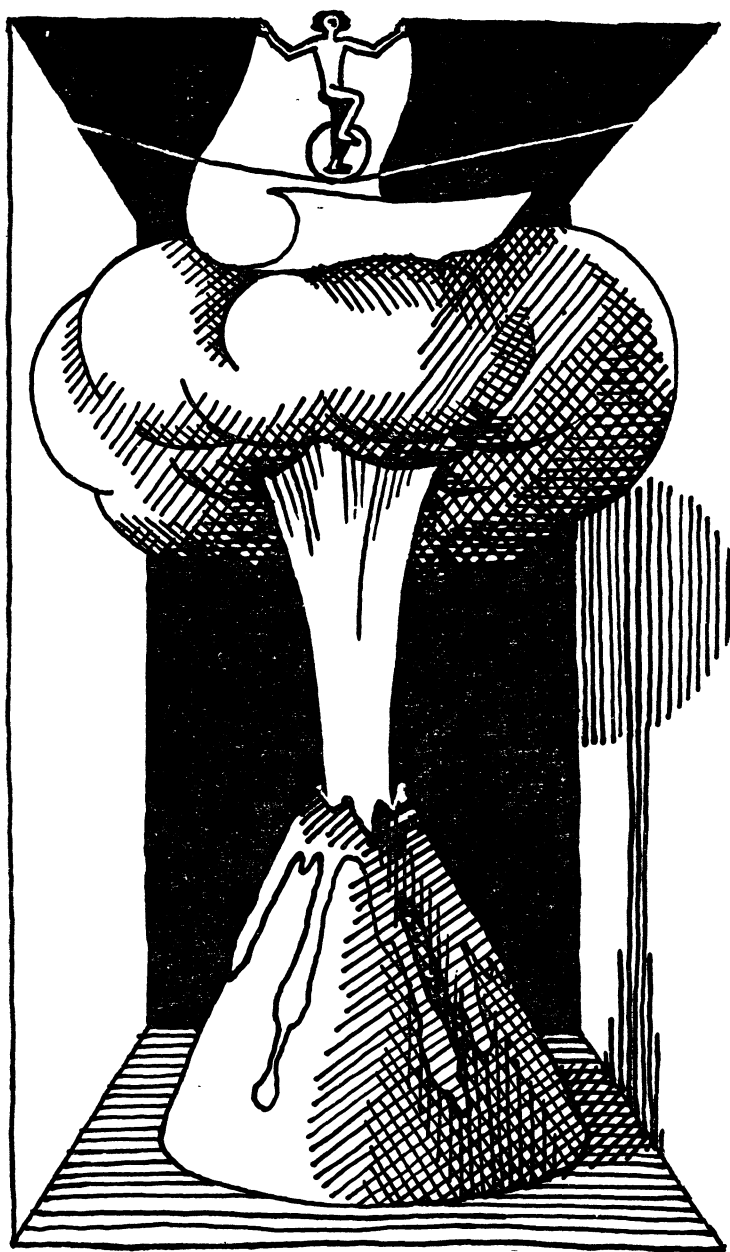
щая окись свинца при нагреве до 450°C сильно твердеет и становится негодной для смазки. Но уже при 550°C эта твердая разновидность окиси, как бы пожалев о прошлом, вновь превращается в мягкую.

Увеличение трения при высокой температуре связано и с явлением диффузии, состоящим во взаимном проникновении атомов контактирующих тел. Интенсивная диффузия, вызванная нагревом и сильной деформацией, может привести к спеканию, совершенно не допустимому при работе узлов трения. В других случаях до этого дело не доходит, зато благодаря обогащению «посторонними» атомами (легированию) исходный материал может сильно изменить свои свойства, что так или иначе отражается на трении и изнашивании. Здесь мы сталкиваемся с новыми фундаментальными представлениями. В основе этих представлений лежит идея формирования в процессе скольжения особых «структур трения», обладающих мощным смазочным действием.

У ряда распространенных смазочных материалов работоспособность, вопреки ожиданию, с ростом температуры только улучшается. Например, трение графита по металлу плавно снижается при нагреве до 1000°C , а для таких металлов, как золото, серебро и медь, — и до более высокой температуры. Причина этого кроется в особом слоистом строении графита. При сильном нагреве и без того ослабленная связь между слоями становится еще более непрочной, что усиливает смазочное действие. Этому дополнительно способствует особая стойкость благородных металлов к окислению.

Предельное действие нагрева состоит в расплавлении поверхностного слоя одного из трущихся тел. Тогда внешнее трение самопроизвольно переходит во внутреннее, описываемое уже знакомой нам гидродинамической теорией смазки. Типичный случай, с которым мы уже сталкивались, — принцип действия лыж и коньков, где причиной расплавления служит само трение.

Напомним читателю, что при хождении на лыжах гармонически сочетаются два основных явления: жидкостное трение, возникающее в результате расплавления снега при скольжении лыжи и дающее минимум сопротивления движению, и большая сила трения покоя, обеспечивающая сильный толчок в момент, когда лыжа неподвижна. Возникает интересный вопрос: как поведет себя легкоплавкое тело при скольжении по жесткой дорожке с достаточно большой скоростью? Ясно, что под действием трения контактный слой расплавится. Ну, а дальше? Нетрудно догадаться, что трение резко упадет и источник теплоты, необходимой для поддержания жидкого состояния, ис-



сякнет. Поэтому поверхностный слой снова затвердеет, трение тут же возрастет скачком и...цикл повторится заново. В итоге движение тела, как, впрочем, и движение лыжи, будет прерывистым: участки жидкостного и сухого скольжения будут чередоваться между собой.

О том, что наш вывод далеко не академичен, свидетельствует следующий случай. Известно, что при стрельбе из нарезного орудия закручивание снаряда в стволе, необходимое для его дальнейшего устойчивого полета, осуществляется с помощью мягкого медного пояска в хвостовой части снаряда. С силой вдавливаясь в винтообразные нарезы при выстреле, поясок движется далее по ним как по направляющим, заставляя вращаться весь снаряд. При этом часть меди благодаря сильному трению неизбежно переносится на поверхность стального канала ствола. Так вот, исследование этой поверхности показало, что омеднение происходит не равномерно по всей длине ствола, а лишь на определенных участках, чередующихся с местами, где меди нет.

А вот и другой, не менее характерный пример. На одном из военных полигонов США была исследована поверхность стального монорельса, по которому ракета разгонялась до огромной скорости. Оказалось, что поверхность иссечена глубокими выемками и трещинами, ясно свидетельствующими о сильном «схватывании» между монорельсом и опорными башмаками ракеты. Повреждения опять-таки вполне отчетливо чередовались с гладкими участками по всей длине монорельса.

Вывод совершенно ясен: расплавление, вызванное сухим трением, носило и тут прерывистый характер. Добавим, что нержавеющей сталь, из которой были сделаны башмаки, расплавлялась при скольжении и разбрызгивалась под действием встречного аэродинамического потока, создавая феерическое зрелище. Но было бы ошибкой думать, что оплавление происходит только горячему трению или высоким скоростям скольжения. Ведь температура плавления твердого вещества может быть низкой, что видно на примере тех же лыж.

Приведем и другой практический пример использования этого явления. Легкоплавкие металлы индий и гадолиний применяются в оригинальных вакуумных уплотнениях, разработанных советским ученым Д. Орловым. При вращении вала металл, находящийся в зазоре, расплавляется за счет трения, но удерживается на месте под действием магнитного поля. Получается безызносное уплотнение, обладающее к тому же ничтожным трением. При остановке вала металл-герметик тут же затвердевает вновь, наглухо изолируя полость машины от внешней среды.

Более «экзотическим» и вряд ли кому известным, кроме специалистов, примером расплавления при трении может служить скольжение друг по другу кусков льда инертного газа криптона, плавящегося при космическом холоде: -157°C !

Мы видим, что основное влияние на смазывающие свойства материалов при высоких температурах оказывают размягчение материалов, их вынужденное окисление, структурные изменения в кристаллической решетке, а также диффузия, способствующая в ряде случаев адгезии и схватыванию. Но большинство этих явлений отнюдь не влияет на трение однозначно. Например, окисление в одном случае улучшает смазывание, а в другом — вызывает интенсивное изнашивание. Детали, составляющие пару трения, при сильном нагреве расширяются неодинаково, что приводит к опасному увеличению зазоров или, наоборот, заклиниванию деталей. Все это создает для конструкторов дополнительные заботы и трудности. С другой стороны, сильный нагрев узлов трения в ряде случаев можно рассматривать и как благо, позволяющее конструктору применять новые смазочные вещества и даже иные механизмы смазывания.

Сложность и многообразие явлений при горячем трении настолько велики, что высокотемпературные смазки создаются до сих пор в основном опытным путем. Столбовой дорогой здесь служит изготовление всевозможных смесей, где керамическая или металлокерамическая основа сочетаются более или менее удачно с термостойким смазочным агентом: например, кобальто-никелевая основа заполняется тем же молибденитом. Этот материал сохраняет работоспособность в вакууме при нагреве до 900°C .

В других случаях жаропрочная металлическая основа пропитывается каким-либо мягким металлом, например свинцом. Такие самосмазывающиеся материалы особенно перспективны для приборостроения, где они применяются в быстроходных подшипниках скольжения, а также высокоскоростных зубчатых передачах, работающих как на воздухе, так и в вакууме.

В качестве керамической основы находят применение окиси кремния и кобальта. В комбинации с графитом и другими твердыми смазками, такими, как окись свинца, сернистые свинец и графит, эти вещества обеспечивают хорошее смазывание при температурах до 1000°C и на воздухе, и в вакууме. Добавка металлических порошков повышает теплопроводность смесей, увеличивая надежность узлов трения.

Наряду с термостойкими самосмазывающимися материалами, рассчитанными на длительный ресурс, широко используются высокотемпературные смазочные покрытия, задача которых — обеспечить одноразовое срабатывание или кратковре-

менное действие механизма. Наиболее простые из таких покрытий — пленки из мягких металлов, имеющих, однако, относительно высокую температуру плавления. При этом выдающимся смазочным действием обладает серебро, которое широко используется за рубежом, например, для смазки опор буровых долот. Толщина таких покрытий составляет обычно всего несколько микрометров. Металлические пленки применяются, как правило, для сравнительно небольших нагрузок.

Высокой несущей способностью в сочетании с жаропрочностью обладают твердосмазочные покрытия на основе синтетического молибденита. Такие покрытия находят применение в энергетических установках и другом оборудовании в подшипниках, работающих при сильном нагреве в вакууме, а также в углекислом газе.

В последние годы все большее распространение получает так называемое ионное легирование поверхностей скольжения, основанное на бомбардировке их ускоренными до больших энергий ионами азота, свинца, олова, бора и других элементов, что в ряде случаев приводит не только к повышению термостойкости поверхности контакта, но и к десятикратному росту их износостойкости при работе в открытом космосе. Одной из причин такого явления служит «залечивание» поверхностных микротрещин, что связано, в свою очередь, с распирающим действием поглощенных частиц.

Особый вид покрытий, связанных с проблемой трения о воздух при больших скоростях, породила авиация. При скорости 2500 км/ч обшивка самолета разогревается до 150°C. На истребителях, где выше не только скорость движения, но и лобовое сопротивление, нагрев возрастает до 300—400°C. Таким образом, защитные покрытия должны быть не только термостойкими, но и легкими, т. е. должны выполняться из полимеров. Необходимый для этого сверхтермостойкий пластик получают в виде многослойной пленки. Подобный материал значительно легче титана, хотя и не уступает ему в прочности. При температуре 1000°C и выше, типичной для гиперзвуковых самолетов и космических кораблей, для защиты от перегрева используют легкую ленту из графитовых волокон, а также керамические плитки.

Своеобразной высокотемпературной смазкой могут служить обычные силикатные стекла. Находясь в аморфном состоянии, стекла не имеют четко выраженной температуры плавления, что позволяет с успехом применять их в размягченном состоянии в качестве смазки при вытяжке труб, горячем сверлении, а также при прокатке, штамповке и других технологических операциях, когда необходим нагрев деталей до 1000—

1500 °С. Стекланный слой наносится на металл разными способами, в том числе и наиболее простым: погружением детали в расплав.

Снова возвращаясь к проблеме трения при скоростях в сотни, а то и тысячи метров в секунду, что почти неизбежно сопровождается сильным нагревом поверхностей, отметим, что эта проблема обусловлена, в первую очередь, общим прогрессом современной техники. Например, стоило советскому ученому Н. Гулиа предложить оригинальный накопитель кинематической энергии — супермаховик, как тут же возникла проблема высокоскоростного подшипника.

Представьте себе сравнительно небольшое колесо с массивным ободом, вращающееся в вакууме с огромной скоростью — в десятки и даже сотни тысяч оборотов в минуту. Это и есть супермаховик. Легко подсчитать, что накопленной в нем энергии достаточно, например, для движения автомобиля средних размеров в течение нескольких часов. После этого супермаховик можно разогнать снова на специальной «заправочной станции». Добавим, что такой «мотор» работает почти бесшумно и совершенно не загрязняет воздух. Но для подобных устройств нужны надежные сверхскоростные подшипники, длительно работающие в вакууме, а такая задача далеко не проста.

Почти столь же быстро вращаются роторы гироскопов — весьма чувствительных навигационных приборов, широко используемых в морском деле, авиации и космонавтике. Правда, проблема трения в них решается обычно с помощью аэродинамических опор, а также путем использования магнитного или, наконец, электростатического поля, выдерживающего целиком вес ротора. Однако и эти довольно экзотические средства сами по себе не снимают проблемы высокоскоростного трения с повестки дня.

Дело в том, что указанные поля обладают, увы, сравнительно малой жесткостью. Это означает, что любой случайный толчок чреват серьезными последствиями: вращающийся с огромной скоростью ротор гироскопа может на какое-то мгновение коснуться направляющей. Возникшая при этом сила трения немедленно создаст возмущающий момент. Тогда ротор тут же выйдет из равновесия и вдребезги разнесет прибор. Для борьбы с такой угрозой необходимо прежде всего свести к минимуму подобные случайные силы трения.

Отметим в заключение, что создание жаропрочных смазок сочетается со все более частыми и успешными попытками устранить механический контакт внутри самих технических устройств, о чем мы поговорим дальше.

ЧУДЕСА «ХОЛОДНОГО» ТРЕНИЯ

Изучение трения сильно охлажденных тел ... Не бессмыслица ли это? Ведь при трении так или иначе выделяется тепло, а следовательно, абсурдна и сама постановка задачи о холодном трении. Таковую, кажущуюся теперь по меньшей мере наивной, точку зрения автору этих строк пришлось услышать некогда от весьма уважаемого и признанного специалиста в области трения ... Быстро летит время. Активное освоение Западной Сибири и северо-восточных регионов нашей страны, смелое решение проблемы круглогодичной полярной навигации, применение в космической технике сжиженного водорода и кислорода в качестве топлива, использование в промышленности и на транспорте сверхпроводящих устройств, быстрое развитие криогенной электроники — вот далеко не полный перечень народно-хозяйственных задач, связанных с «холодным» трением.

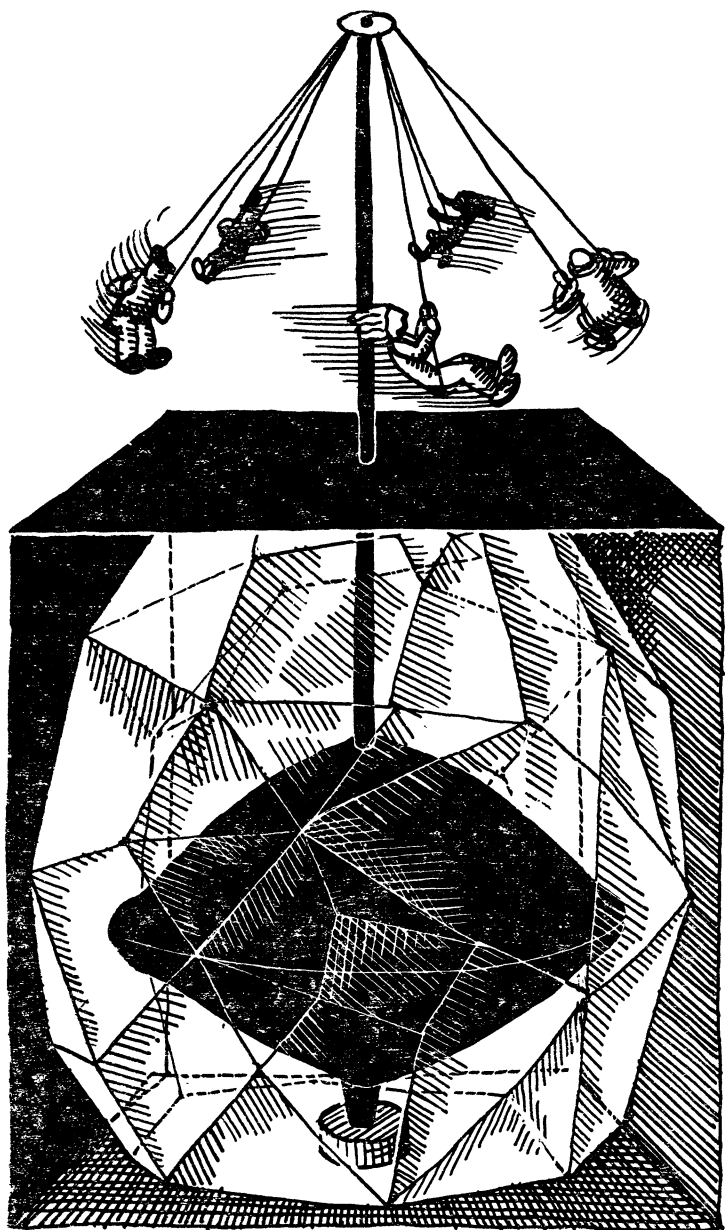
Актуальна и специфичная проблема взаимодействия обшивки ледоколов со льдом. У всех нас свежи в памяти приключения ледокола «Владивосток», бесстрашно устремившегося в полярную тьму Антарктики на выручку теплохода «Сомов», затертого льдами. Возникающее трение о лед не только требует затраты всей гигантской мощи двигателей, но и интенсивно разрушает корпус полярных гигантов.

Изучение «холодного» трения имеет и большой научный интерес. Неудивительно, что им занимаются сейчас многие трибологи*) Советского Союза, США, Канады, Японии и ряда других стран.

Попробуем предсказать некоторые явления, используя наши знания о «горячем» трении, обратив их в некотором смысле вспять. Например, если твердые тела размягчаются при нагреве, то при охлаждении они становятся тверже, поэтому фактическая площадь контакта, а с нею и коэффициент трения несколько снижаются. И этот эффект действительно наблюдается на практике, хотя он постепенно ослабляется при приближении к температуре 100—70 К.

Здесь нас поджидает первый сюрприз: вместе с твердостью катастрофически возрастает хрупкость ряда металлов (железа, хрома, молибдена и др.), что приводит к хорошо известному инженерам явлению «хладоломкости», присущему и стали, содержащей эти элементы. Поэтому даже небольшие темпера-

*) Трибологи — ученые, занимающиеся наукой о трении (от греческого трибос — трение).



турные скачки в сторону охлаждения могут вызвать разрушение таких материалов. С другой стороны, не менее популярные металлы, но с иным типом решетки (например медь, алюминий, никель, бериллий и титан), равно как и сплавы на их основе, сохраняют прочность даже при сильном охлаждении.

Выдающийся английский полярный исследователь Р. Скотт и его спутники, возвращаясь с Южного полюса, трагически погибли от холода и голода из-за того, что предусмотрительно оставленные ими на трассе и тщательно запаенные оловом бидоны с бензином оказались пустыми. Сказала свое веское слово «оловянная чума» — превращение олова в труху при 33-градусном морозе. При еще более низкой температуре (в районе 200 К) претерпевает структурный переход неизменный наш «герой» молибденит, что приводит к скачкообразному росту трения в два раза. Также скачком меняются теплофизические свойства этого вещества, в частности теплоемкость.

Существует целая отрасль науки, именуемая физикой низких температур. Она-то и позволяет рассматривать «холодное трение» как совершенно особую область, где возможны почти любые неожиданности, включая несбыточную пока мечту всех трибологов: практическое исчезновение трения и изнашивания.

Для более наглядного понимания того, о чем мы хотим рассказать далее, представим себе поднос с некоторым количеством почти невидимых глазом лунок, расположенных в причудливом, но строго определенном порядке. Высыпем на поднос шарики и начнем легонько трясти их. При этом шарики начнут хаотически метаться по подносу, «не замечая» никаких лунок. Будем теперь постепенно ослаблять тряску. Тогда рано или поздно наступит момент, когда шарики, случайно попадая в лунки, уже не смогут из них выбраться. В итоге нашему взгляду представится красивый узор, образовавшийся как бы сам собой.

Читатель, знающий из школьной физики, что мера нагрева твердого тела определяется интенсивностью колебаний его атомов, легко догадается: уровень тряски в нашей модели соответствует степени нагрева тела, пропорциональной термодинамической (абсолютной) температуре T . Добавим к этому, что глубина лунок аналогична энергии E , необходимой для поддержания определенного порядка в структуре твердого тела. Согласно Больцману вероятность установления такого порядка быстро растет по мере уменьшения T/E , т. е. охлаждения тела. Красивые узоры инея, которые мы наблюдаем на поверхности стекла в сильные морозы, — наглядное свидетельство правильности рассуждения Больцмана.

Что же показали опыты? Прежде чем рассказать об этом, отметим, что исследование «холодного» трения — задача не простая. Малая теплота испарения сжиженных газов требует их значительного расхода и хорошей теплоизоляции. К тому же работа с жидкими кислородом и водородом взрывоопасна. С еще большими трудностями связано применение жидкого гелия, позволяющего получить температуру 4 К и ниже. Этот газ дорог и после испарения не выпускается в атмосферу, а отводится в специальный газгольдер, откуда он снова попадает в холодильную и ожижительную установку.

Сильное охлаждение непредсказуемо влияет и на измерительную технику, что требует специальной калибровки датчиков. Не забудьте также, что в холодную зону необходимо передать значительные механические усилия.

Важным этапом в изучении «холодного» трения были опыты английского ученого Ф. Боудена и его учеников, проведенные на твердом криптоне. Этот инертный газ замерзает при температуре 116 К, причем его атомы соединены слабейшими из известных типов связей. Несмотря на это, коэффициент трения оказался необычайно высоким. Объясняется это ничтожной механической прочностью твердого криптона, которая даже при температуре жидкого водорода примерно такова, как у сливочного масла в холодный день.

Вспомним, что структурные слои в молибдените и графите также слабо связаны между собой. А вот прочность самих слоев у них, в отличие от криптонового льда, велика, что позволяет сосредоточить нагрузку на относительно малой площади контакта. В итоге низкое трение у этих веществ достигается не только слабостью адгезионных связей, но и их малым числом.

Трение сильно охлажденных металлов в сверхвысоком вакууме изучалось советскими учеными. Пары трения помещались в ванну из жидкого гелия. Каких-либо принципиально новых результатов на этом этапе исследований получено не было.

Зато исследование «холодного» трения тефлона и некоторых других органических полимеров в паре с металлами дало первый сюрприз. При достижении температуры 10–12 К и вакуума $2 \cdot 10^{-10}$ Тор (считают, что именно такое разрежение характерно для поверхности Луны) наблюдалось невиданное: никогда ни к чему не прилипающий тефлон не только схватывался при трении со сталью, но и переносился на ее поверхность в виде рваных кусочков.

В связи с широким использованием в криогенной технике жидких азота, кислорода и водорода естественно возникает вопрос о попутном применении этих жидкостей как есте-

ственных смазочных агентов, подобно, например, воде. К сожалению, такая идея не проходит. Сжиженные газы не способны обеспечить гидродинамическую смазку из-за ничтожной вязкости. Например, у жидкого водорода она такая же, как ... у воздуха при комнатной температуре! При трении в жидком водороде или азоте защитные окисные пленки на металлах не образуются, что ведет обычно к их интенсивному изнашиванию. А вот окисление металлов в жидком кислороде, наоборот, столь интенсивно, что вызывает другую неприятность: сильную коррозию.

Для работы в сжиженных газах хорошо зарекомендовали себя комбинации тефлона и нейлона с графитом, а также пара графит — графит. Например, в насосах для перекачки жидкого кислорода и азота успешно применялись подшипники скольжения из чистого тефлона или смеси на его основе.

Выход из строя подшипников качения, омываемых криогенной жидкостью, наступает, как правило, в результате изнашивания сепаратора. Оказалось, что и здесь лучшими показателями в жидком азоте обладают сепараторы из того же тефлона с наполнителем из стекловолокна.

Перейдем теперь к самому интересному. Подобно тому, как страдающий бессонницей человек улавливает в ночной тиши самые слабые звуки; о которых он и не подозревал днем, так и сильное охлаждение позволяет выявить новые тонкие эффекты. Однако устойчивость таких явлений чрезвычайно мала, поэтому они исчезают при малейшем нагреве, подобно привидениям. Ярчайшим примером такого эффекта служит поразительное явление сверхпроводимости, возникающее обычно при температуре не выше 20 К, — настолько слаба его способность противостоять нагреву.

Напомним, что речь идет о способности ряда металлов и сплавов при сильном охлаждении переходить в состояние, когда их электрическое сопротивление *строго* равно нулю. Мы выделили слово «строгое», поскольку электросопротивление не просто ослабевает, а исчезает полностью! Со временем практическое применение этого феномена, безусловно, приведет к революции в технике. Мы же остановимся здесь только на одном вопросе: как должны работать на трение металлы и другие вещества, переведенные в сверхпроводящее состояние?

Теория не давала однозначного ответа на этот вопрос. В то же время идея опытов, задуманных советскими исследователями, была достаточно простой. Пара трения в виде двух образцов из одноименного металла с критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние $T_{кр} > 4,2$ К (температура кипения жидкого гелия) погружалась в гелиевую ванну, в кото-

рой и осуществлялось трение. Жидкий гелий из-за своей ничтожной вязкости и полной химической инертности не мог оказать какого-либо влияния на трение, которое поэтому вполне можно было считать сухим. С другой стороны, температура гелиевой ванны, равная температуре кипения жидкого гелия, безусловно, обеспечивала переход и дальнейшее пребывание трущихся тел в сверхпроводящем состоянии.

Что же ожидало ученых, впервые вторгавшихся в неизведанный мир и стоявших, быть может, на пороге новых открытий? Чувства, охватывающие исследователей в такие «звездные» моменты, знакомы, наверное, любым первопроходцам, работающим в самых различных областях науки.

Вот что пишет, например, о самом драматическом эпизоде в своей научной карьере знаменитый археолог Г. Картер, раскрывший тайну погребения египетского фараона Тутанхамона, упорно сохранявшуюся историей на протяжении тридцати трех веков.

«Наконец мы увидели полностью расчищенную дверь. Наступил решающий момент. Дрожащими руками я проделал узкую щель в верхнем левом углу каменной кладки. За нею была тьма и пустота, насколько я мог определить железным шупом ... Произвели пробу воздуха на пламя свечи, на предмет скопления опасных газов, а затем я немного расширил отверстие, просунул в него свечу и заглянул внутрь ... Сначала я ничего не разглядел, потому что поток горячего воздуха из гробницы задувал свечу. Но постепенно глаза мои привыкли к мерцающему свету, и передо мной из полумрака начали возникать странные животные, статуи и ... золото — повсюду сверкало золото! На какое-то мгновение ... я онемел от изумления. Наконец лорд Карнарвон с волнением спросил:

— Вы что-нибудь видите?

— Да, — ответил я. — Чудесные вещи ...»

Разумеется, раскрытие тайн устройства окружающего нас мира внешне далеко не столь эффектно, а содержание и суть этих секретов остаются на долгое время достоянием лишь узкого круга специалистов. И тем не менее тщательная, занимающая порою многие годы подготовка решающего эксперимента, замешанная на вечно зовущей вперед романтике научного поиска и упорнейшем труде, роднит исследователей и естествоиспытателей любых отраслей науки и культуры. Но вернемся к приключениям с «холодным» трением.

Вначале в гелиевой ванне были испытаны на трение металлы, не обладающие сверхпроводящими свойствами: медь и молибден. Коэффициент трения у них, как и следовало ожидать, монотонно возрастал до значений, близких к единице.

Это объяснялось постепенным изнашиванием окисных пленок на поверхностях контакта.

И, наконец, наступил момент, когда сердца ученых забились не менее учащенно, чем у Г. Картера в преддверии усыпальницы фараона: в гелиевую ванну была помещена для испытания на трение пара образцов из чистого ниобия, имеющего критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние $T_{кр} = 9,2$ К. После обычной проверки аппаратуры был включен двигатель, и оба образца, находящиеся в сверхпроводящем состоянии, заскользили друг по другу ...

Начало опыта было самым обычным. Трение, как и в предыдущих случаях, начало постепенно возрастать, что объяснялось, по-видимому, тем же прозаическим истиранием окисных пленок на поверхностях ниобия. Затем рост прекратился, трение некоторое время сохранялось на постоянном уровне и вдруг ... начало падать!

Малы скорости скольжения в гелии, часами тянется опыт и медленно ползет вниз стрелка индикатора. Вот она уже достигла рекордного для металлов значения коэффициента трения 0,2, полученного ранее на редкоземельном металле неодиме, благополучно прошла этот уровень, двинулась далее вниз и застыла наконец где-то на отметке 0,05, характерной для граничных пленок, созданных лучшими сортами минеральных масел!

И здесь было чему удивляться. В учении о трении, как и в любой науке, есть свои незыблемые истины, своего рода «идолы». И самая незыблемая из таких истин беспрекословно гласила: *два тела из одноименного металла ни при каких условиях не могут реализовать низкое трение*. Это следовало из самых фундаментальных представлений о строении металлов. По выражению знаменитого американского физика-теоретика Р. Фейнмана, атомы одноименных металлов никак не могут «знать» о своей принадлежности к разным образцам. И вот эксперимент четко показывал, что атомы по какой-то причине «знали» об этом и не вступали в активный контакт с чужаками.

Не менее поразительно было и то, что эффект аномальной скользкости пары ниобий — ниобий сохранялся по мере подъема температуры до значения, во много раз превышающего критическую температуру перехода ниобия в сверхпроводящее состояние. Затем трение резко возрастало. Невольно возникал вопрос: если аномальная скользкость связана с пребыванием в сверхпроводящем состоянии, то не сохраняется ли это состояние в данном случае при столь высокой температуре? Увы, теория и эксперимент отвечали на этот вопрос отрицательно,

а проверить эту «еретическую» идею на практике было совсем не просто.

Тем временем анализ тонкого слоя, сформировавшегося на поверхности ниобия благодаря трению, показал неожиданное: устойчивая в обычных условиях и типичная для металлов кристаллическая структура в данном случае полностью разрушалась. Иными словами, металл переходил в совсем не свойственное ему аморфное состояние, обладающее, как оказалось, прекрасным смазывающим действием. В дальнейшем по мере нагрева аморфное состояние сохранялось и при более высоких температурах, что и объясняло, по-видимому, устойчивость аномального смазочного действия исследуемой пары.

Итак, пребывание в сверхпроводящем состоянии, видимо, способствовало каким-то образом аморфизации ниобия при трении, но каким именно? На этот счет существуют различные гипотезы.

С инженерной точки зрения куда важнее было другое обстоятельство: аморфный слой должен обладать огромной износостойкостью. Вспомним, что, говоря об изнашивании, мы подчеркивали «усталостные» явления на поверхности контакта. Уставший металл становится хрупким и отваливается маленькими кусочками — частицами износа. Такое явление — почти неизбежное следствие кристаллической структуры металлов. В аморфном же состоянии атомы металла располагаются хаотично, как и в жидкости, а жидкости, как известно, не устают. Задача трибологов, стало быть, состоит теперь в том, чтобы перевести металл в аморфное состояние, превратив его в так называемую псевдожидкость. Именно это и достигается, по-видимому, при трении металлов, переведенных предварительно в сверхпроводящее состояние.

Так криогенная технология подсказывает нам путь к созданию безыносной пары трения — давнишней мечте исследователей и инженеров. Добавим к этому, что аморфизованный слой металла можно получить и совершенно иным способом — воздействием мощного лазерного луча с последующей мгновенной закалкой образца.

Не менее интересные, хотя и не всегда понятные результаты были получены при трении в жидком гелии других материалов, в частности полупроводников, способных, как оказалось, в паре с металлами образовывать сложные трибоструктуры с весьма ценными инженерно-физическими свойствами. Словом, можно с уверенностью сказать, что перспективы исследования «холодного» трения необычайно заманчивы и главные открытия здесь еще впереди.

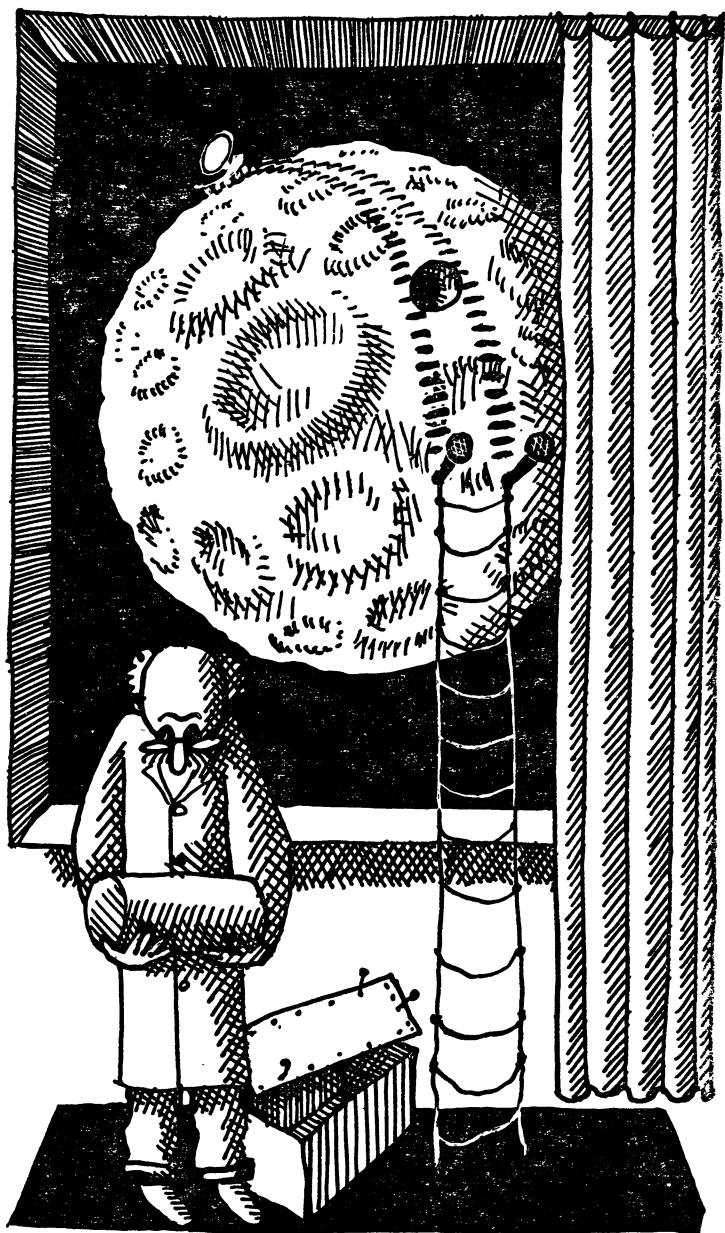
МЫ НА ЛУНЕ!

Сейчас вполне справедливо полагают, что за последние двадцать лет человек узнал о Луне больше, чем за всю предшествующую историю астрономии, измеряемую тысячелетиями. Этому в решающей мере способствовали поистине исторические события: доставка на нашу небесную спутницу автоматических станций, управляемых с Земли, и последующая высадка на Луну первых людей. И хотя на пути освоения человеком ближайшего к нам небесного тела сделаны пока лишь первые шаги, мы уже сейчас можем с большой достоверностью очертить круг основных задач лунной инженерии, охватывающих, в первую очередь, вопросы строительства, энергетики, транспорта, связи и жизнеобеспечения людей. И одна из этих задач, безусловно, — проблема трения, которая для нас, землян, в данном случае как бы рождается заново.

Оставив в стороне многократно описанную учеными, астронавтами и фантастами необычайность и неповторимость лунного пейзажа, выделим только несколько особенностей, имеющих прямое отношение к нашей теме. Прежде всего, наша спутница из-за ее относительно малой массы полностью лишена какой-либо атмосферы. Уже одно это требует радикального пересмотра чуть ли не всех привычных представлений о трении.

В самом деле, речь идет не только об отсутствии в окружающей среде ее наиболее активных составляющих — кислорода и паров влаги, но и об исчезновении самой среды как таковой! Если первая особенность исключает окисление, гидролиз, сорбцию и множество других важнейших физико-химических явлений в зоне контакта, то лунный вакуум в решающей мере влияет на процессы теплоотвода и теплообмена, способствуя одновременно генерации и накоплению на поверхностях контакта больших электрических зарядов.

Вспомним, что именно благодаря атмосфере главную роль при смазочном действии в земных условиях играют обычно вторичные структуры, в особенности окисные и другие пленки. При трении в лунном вакууме тон задают уже исходные вещества, сильная химическая активность которых может оказать решающее влияние на работу фрикционных пар. Не менее важно и отсутствие привычного защитного действия атмосферы, превращающее поверхность Луны в мишень для бомбардировки ускоренными частицами и потоками фотонов, летящими со стороны Солнца и способными еще более повысить химическую активность внешнего покрова нашей спутницы.



Сверхвысокий вакуум, сочетающийся с большим суточным температурным перепадом наружного слоя Луны (от $+135^{\circ}\text{C}$ днем до -150°C ночью), практически исключает применение жидких смазок: они или быстро испаряются или же просто замерзают. Ко всему этому следует прибавить и ослабленное в 6,5 раз притяжение на поверхности Луны, что, как мы увидим чуть дальше, также имеет прямое отношение к проблеме трения.

И все же основные головоломки, которые должны были разрешить инженеры, создавшие первые лунные автоматы и луноходы, были связаны с загадочными свойствами грунта Луны. Обладает ли ее наружный покров необходимой для движения по нему прочностью или же он представляет собой мощную пылевую толщу, в которой безнадежно увязнет любая машина? Определенно ответить на этот вопрос только на основе наблюдений с Земли было невозможно. Дерзкая идея академика С. П. Королева — взять с помощью автомата пробу лунного грунта и доставить ее на Землю для тщательного изучения — опять-таки упиралась в возможность безаварийной посадки бурового аппарата на поверхность Луны. Как же поступить? Мнения крупнейших научных авторитетов — планетологов по этому вопросу резко разошлись.

Многие из этих опасений были развеяны нашими выдающимися конструкторами после того, как первые советские автоматические станции не только успешно совершили мягкую посадку, но и остались на поверхности нашей спутницы, впервые дав возможность людям увидеть телевизионным оком ни с чем не сравнимый лунный пейзаж. Стало ясно, что поверхность ближайшего к нам небесного тела достаточно прочна для движения по ней машин-автоматов. Это блистательно подтвердили созданные в нашей стране и ставшие уже сейчас живой легендой луноходы — первые в истории человечества автоматы, движущиеся по поверхности другого небесного тела и управляемые по командам с Земли.

По следу, оставляемому причудливыми металлическими колесами этих лунных первопроходцев и хорошо видимому в телевизор, легко можно было заключить, что наша спутница — твердое тело, покрытое тонким и, по-видимому, довольно рыхлым слоем пыли, легко уплотняющимся под весом машины. При этом заметного налипания этой пыли на ходовую часть, чего сильно опасались конструкторы, в телевизор на первых порах обнаружено не было. Тем не менее уже тогда находившиеся на Земле «водители» луноходов на практике столкнулись с довольно каверзными проблемами, связанными с резким ослаблением силы тяжести.

Вспомним, что масса тела не меняется ни на йоту при его перенесении с Земли на Луну. В то же время трение пропорционально, по закону Амонтонна, весу тела, который в этом случае падает в 6,5 раз. Таким образом, незываемое с момента возникновения нашей планеты и привычное для любого землянина соотношение между массой тела и соответствующей ей силой трения нарушается здесь самым драматическим образом!

Возникающая при этом ситуация напоминает, в частности, довольно нелепое положение человека на скользком льду: ему трудно сдвинуться с места, но столь же сложно затормозить и остановиться на ходу. Конечно, подобная обстановка предвиделась и многократно «проигрывалась» на Земле. При этом лунная машина при ходовых испытаниях вывешивалась на специальном кране, снимающем 85% ее веса. И тем не менее искаженное восприятие через телевизор окружающего рельефа и самого пространства, порожденное тем же отсутствием лунной атмосферы, а также задержка в несколько секунд, связанная с прохождением сигналов с Луны и обратно, вносили серьезные трудности в управление луноходами, заставляя водителя все время быть начеку.

Американский луноход, управляемый уже самими астронавтами, напоминал по внешнему виду обычный автомобиль, поскольку двигался на четырех колесах с протекторами. Но и здесь экипаж жаловался на сильную, отсутствующую при земных испытаниях тряску и другие проблемы, связанные с особенностями лунных условий.

Сейчас можно только гадать, каким станет лунный транспорт будущего, и как, в частности, разрешатся проблемы разгона и торможения лунных экипажей. Ясно, что обычные, т. е. приспособленные к земным условиям, способы окажутся малоэффективными или вообще неприемлемыми. Возможно, что наряду с гусеничными вездеходами и колесными лунобилиями, движущимися по специально оборудованным трассам, появятся и охотно описываемые фантастами «блхи», перемещающиеся огромными, по земным меркам, скачками. Здесь есть о чем подумать: ведь при равной начальной скорости величина прыжка на Луне в длину и высоту увеличивается в те же 6,5 раз.

Вполне возможно применение на Луне и монорельсового электрического транспорта, где герметичная кабина на магнитном подвесе может перемещаться с помощью линейного двигателя с огромной скоростью, не встречая на пути практически никакого сопротивления. Вернемся, однако, к событиям, которые уже произошли.

Невидимая в телевизор и как бы затаившаяся лунная пыль стала все более настойчиво заявлять о себе по мере того, как по поверхности нашей спутницы стали двигаться сначала машины-автоматы, а затем и люди, облаченные в скафандры. Электричеству, скапливающемуся при трении на поверхностях гел-изоляторов, на Луне деться некуда: атмосферы нет, а лунный грунт является хорошим изолятором. Поэтому частицы пыли, попавшие в зону контакта, электризуясь, сохраняют заряд, а оседая затем на поверхностях машин и скафандров, держатся на них уже намертво.

Опасность такого положения несоизмерима с мелкими неприятностями, причиняемыми нам земной пылью. Судите сами: тончайший слой пыли, осевший, например, на солнечной батарее, используемой на том же луноходе в качестве одного из источников энергии, может снизить мощность батареи в 3—4 раза! Тот же слой, случайно попав на радиатор лунохода или скафандр космонавта, резко снижает отражательную способность их поверхности и, кроме того, заметно ухудшает условия теплоотвода. Серьезные последствия этих явлений не заставят себя ждать.

Вспомним опять, что на Луне — вакуум, а ее грунт — отличный теплоизолятор. Поэтому теплу, выделяющемуся из двигателя или живого организма, также деваться почти некуда, а ничем не экранированное Солнце палит беспощадно. Спасение в том, чтобы придать поверхности максимальную отражательную способность. В этих условиях попадание пыли может привести к резкому увеличению поглощения солнечного света, чреватому опасным перегревом машины или скафандра.

Можно предполагать, что легкие защитные экраны, предохраняющие от разящего действия Солнца, станут едва ли не первым и неотъемлемым условием многогранной деятельности человека во время лунного дня, длящегося примерно две недели. В столь же продолжительный ночной период сильное охлаждение поверхности нашей спутницы не представит, по-видимому, больших проблем как для инженеров, так и для исследовательских работ. При этом поверхность ночной Луны прекрасно освещена нашей собственной планетой, а отсутствие атмосферы делает это освещение не зависящим от погоды, т. е. абсолютно надежным.

Что же касается жилых, герметизированных помещений, то наиболее разумно размещать их под поверхностью, т. е. в толще лунного грунта, причем на глубине всего нескольких метров, где температура уже практически постоянна. При этом хотим мы этого или нет, но лунные породы, в основном близкие, как оказалось, к земным базальтам, станут универсальным

объектом лунной инженерии, используемым как в натуральном, так и в переработанном виде в качестве материала для строительства, а также сырья для получения кислорода, воды, металлов и многих других необходимых человеку веществ. Так каков же он все-таки, этот грунт?

Настоящим подвигом советских инженеров и ученых была доставка на Землю первой в истории человечества порции лунного вещества. Для этого прежде всего нужно было отправить и мягко посадить на Луну автоматическую буровую станцию, затем осуществить само бурение, отобрать пробу грунта — керн, погрузить ее в контейнер и отправить обратно на Землю. И все это без прямого участия человека!

Уже сам процесс бурения подтвердил присутствие под тонким покровом лунной пыли более плотных слоев, так называемого реголита, прочность которого возрастала с глубиной. Здесь-то участники эксперимента и подстерегала, пожалуй, главная проблема трения: угроза заклинивания вращающегося бура при сухом трении о грунт в условиях вакуума. Специфика задачи, которую необходимо было решить конструкторам, состояла в невозможности применить обычные смазки без нарушения первозданной чистоты лунного вещества, что погубило бы весь тщательно продуманный и невиданный по сложности эксперимент.

В конце концов ученые и инженеры пришли к компромиссу: выбрали смазочный состав, присутствие которого на Луне было маловероятно. В результате операция отбора лунного керна прошла без каких-либо осложнений.

Вместе с инопланетным веществом на Землю были благополучно возвращены и сами буры, которые, шутка ли сказать, усердно терлись о Луну! Тщательные лабораторные исследования показали, что рабочие поверхности этих уникальных буровых снарядов покрыты микроскопическими оспинами — свидетелями сильной адгезии. Ну, а само лунное вещество?

Для его исследования в условиях, максимально приближенных к естественным, был создан совершенно оригинальный комплекс установок, позволивший определить химические, механические, тепловые, электрофизические и оптические свойства образцов, доставленных с Луны. Советские специалисты не только раскрыли множество секретов инопланетного вещества, но и нашли способы заменять его при проведении всевозможных испытаний лунной техники земными аналогами.

Наиболее подходящими из таких грунтов-аналогов оказались вулканические или так называемые изверженные породы, имеющиеся в изобилии в горах Армении, а также на склонах вулканов Камчатки. Общий вывод, к которому пришли ученые,

состоит в том, что особенности наружного покрова нашей спутницы определяются не столько свойствами его химического состава, сколько условиями формирования и залегания этого покрова, резко отличными от земных.

Исследования лунного вещества, начатые советскими автоматическими станциями, успешно продолжили американские астронавты, осуществившие бурение лунной скважины ручным электроприводом и опять-таки без применения жидкостной промывки. Постепенно наращивая буровую штангу, астронавтам удалось проникнуть на глубину в 3 м, где, наконец, им встретились довольно крепкие породы. Извлечь бур с керном из скважины американцам удалось с большим трудом, несмотря на то, что штанга была покрыта специальным смазочным составом. Все это свидетельствует о наличии серьезных проблем трения в лунной инженерии уже на самых первых шагах ее становления и развития.

Расскажем попутно еще об одной проблеме трения, связанной с завоеванием космоса. Речь идет о стыковке космических кораблей, т. е. необычайно ответственной операции, не имевшей до 70-х годов аналогов в мировой технике. Особенную остроту эта задача приобрела при выполнении международной космической программы «Союз — Аполлон», когда советский корабль должен был стыковаться со своим американским партнером.

Стыковочные плоскости обоих аппаратов должны были быть совершенно одинаковыми, так как только в этом случае обеспечивалась возможность взаимного спасения кораблей, а следовательно, и наибольшая безопасность беспрецедентного совместного полета. Практически это означало, что два концентрически расположенных уплотнительных кольца, выполненных из резины, имелись в стыковочных системах обоих кораблей. При стыковке они, упираясь друг в друга, обеспечивали герметичность, а тем самым и нормальную жизнедеятельность космонавтов.

Конструкторов, однако, сильно беспокоило, что резина после пребывания в открытом космосе приобретет под действием солнечных лучей, точнее, ультрафиолетовой части их спектра, большую активность и слипнется при стыковке, после чего обратная операция может привести к аварии и выходу из строя всей стыковочной системы. Опасения оказались не напрасными. При лабораторных испытаниях, выполненных как у нас, так и в США в установках — имитаторах космического пространства, выяснилось, что обычные резины и впрямь не выдерживают ультрафиолетового света, покрываясь опасными трещинами.

Совместные исследования и испытания, проведенные советскими и американскими специалистами по единой программе, позволили успешно решить все эти проблемы и обеспечить нормальное протекание исторического полета.

Отметим в заключение, что проблемы, которые ждут человека на Луне, отнюдь не сводятся к решению чисто инженерных задач. Это в не меньшей мере психологические и даже философские проблемы, связанные с прорывом в совершенно необычный мир. И решая эти задачи, человек не только будет осваивать и изменять этот мир на свой манер, но, ломая вековые традиции и предрассудки, преобразаться и сам. Это означает, в частности, что многие задачи, связанные с покорением и обживанием Луны, могут решаться совершенно неожиданными, невиданными на Земле способами, которые сейчас даже трудно себе представить.

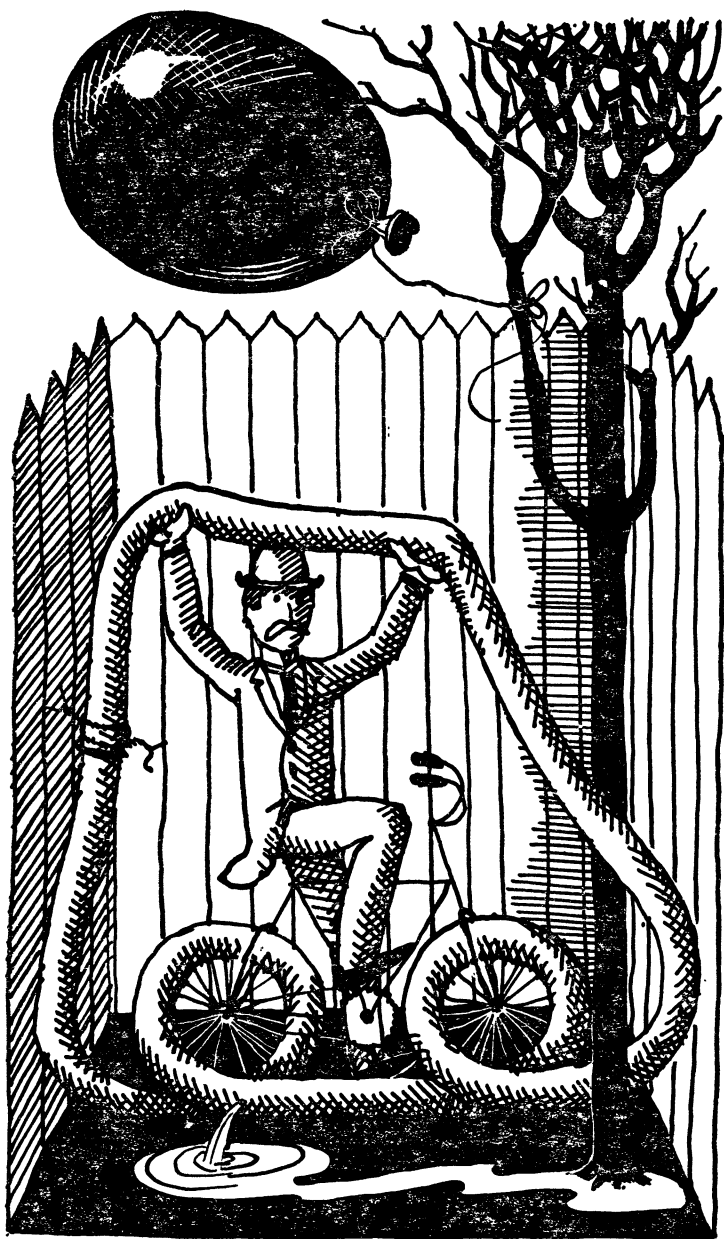
МАТЕРИАЛ — КЕНТАВР

Особое место в решении проблем трения в наше время занимают эластомеры, т. е. технические резины. Этот класс материалов достаточно молод. Еще в начале XVIII века основа резины — натуральный каучук — вообще не была известна в Европе. Лишь в 1735 г. французские астрономы, проводившие наблюдения солнечного затмения в Перу, случайно узнали от туземцев о необычном дереве, выделявшем бесцветный сок, который при высыхании на солнце превращался в материал с поразительной упругостью. При ударе о твердую поверхность шары из такого материала подскакивали так, «будто в них вселилась нечистая сила». В Старом свете новинка вызвала немалый интерес, однако долгое время использовалась в основном лишь для стирания ошибок в рукописях.

Настоящий резиновый бум начался после того, как американец Ч. Гудийр, уже отчаявшийся в долгих бесплодных поисках необходимого конструкционного материала и почти разорившийся, случайно уронил на топившуюся печь кусочек каучука, обработанный серой. Дело было в 1837 г. Обостренная проницательность и опыт исследователя помогли Гудийру разглядеть в обуглившемся и потерявшем липкость образце промышленный способ вулканизации резины, придавший, наконец, эластомеру необходимую стабильность и долговечность.

Сочетание высокой эластичности с огромным электрическим сопротивлением обеспечило затем массовое применение резины в качестве отличного изолятора в только что родившейся электропромышленности. «Еще при жизни Гудийра, — сообщает американский писатель М. Уилсон, — в Соединенных Штатах, Англии, Франции и Германии выросли корпуса огромных фабрик, на которых работало более шестидесяти тысяч человек и изготовлялось пятьсот видов различных резиновых изделий, в общей сложности на восемь миллионов долларов в год. Окрыленный успехом Гудийр стал тратить больше, чем зарабатывал. Он умер в 1860 г., оставив после себя двести тысяч долларов долгу, но друзья уже не считали его сумасшедшим».

И все же уникальность резины как конструкционного материала обусловлена прежде всего ее высокой эластичностью. Растяжение резиновой ленты измеряется десятками, а то и сотнями процентов. Напомним, что у сталей этот показатель измеряется всего лишь сотыми долями процента, а у керамических образцов он и того ниже. На языке инженеров это же свойство выражается по-другому: модуль упругости Юнга



у эластомеров меньше, чем у сталей, чуть ли не в 100 тысяч раз.

Секрет такого особого поведения кроется в своеобразной структуре резины, основой которой служат длинные молекулярные цепи, связанные между собой довольно редкими перемычками.

При очень быстром приложении нагрузки резина ведет себя как обычный материал, зато при достаточно медленном нагружении сказывается уже значительная протяженность свободных участков молекулярных цепей. Постепенно распрямляясь, они выходят из равновесного состояния, обеспечивая сильное растяжение резины. При охлаждении подобная подвижность молекулярных цепей пропадает, а вместе с нею утрачивается и высокая эластичность резины.

Но к чему инженерам столь податливый материал? Ведь девиз современной техники — жесткость конструкций, олицетворением чего служат сталь и бетон. В 1888 г. Д. Дэнлоп запатентовал надувную шину. Согласно распространенной легенде первая такая шина была изготовлена из резинового шланга для полива сада и предназначалась для велосипеда, на котором катался сын изобретателя. Исключая тряску при езде, такая шина решила одновременно и другую, не менее важную задачу: обеспечивала за счет сильного трения хорошую сцепляемость с дорогой. При этом необычайно высокое значение (близкое к единице) коэффициента трения объяснялось большой площадью фактического контакта высокоэластичной резины с дорогой. Эластомеры в этом смысле просто не имеют конкурентов и без них можно обойтись разве только в рельсовом транспорте, где толчки ослаблены высокой гладкостью рельсов и отсутствием стыков.

Но преимущества резины на этом не кончаются. Благодаря все той же высокой эластичности она обладает огромной сопротивляемостью к абразивному изнашиванию: вспомним, что резиновые подметки стираются заметно медленнее кожаных. На стенде, где резина трется по прозрачному стеклу, можно отлично видеть, как песчинки, затянутые в зону контакта, перекатываются там, подобно шарикам, и выносятся наружу, не причиняя резине никакого вреда.

Пора теперь рассказать и еще об одном свойстве резины, получившем широчайшее практическое применение. Кому не известно, что между двумя твердыми телами, даже плотно прижатыми друг к другу, всегда будет просачиваться вода и другие жидкости, не говоря уже о воздухе. Другое дело — эластомеры. Прижатые к твердой поверхности, они как бы вписываются в эту поверхность, точно повторяя, только не-

гativamente, все свойства ее рельефа. Следовательно, ... ну, конечно! Резина отличный и незаменимый уплотнитель.

Потребность в уплотнении или полной герметизации самых различных технических устройств и сооружений на сегодня колоссальна. Знаменитое высказывание древнегреческого философа Гераклита «все течет», относящееся ко всему мирозданию, приобрело в наше время, увы, и зловещую буквальную значимость. Действительно, все течет, и даже мизерные, казалось бы, протечки в водопроводных кранах приводят в общей сложности к огромным напрасным потерям все более дефицитной пресной воды.

В одной лишь Москве устранением этих утечек занята целая армия сантехников. При этом подсчитано, что для восполнения утекающей воды требуются баснословные капиталовложения. Еще более накладны и опасны утечки нефти и газа при их добыче, хранении, транспортировке ... Здесь не только теряется ценнейшее минеральное сырье, но и загрязняется окружающая среда, создается опасность пожаров и взрывов. А случайные попадания в атмосферу особо ядовитых веществ? Последствия в этом случае могут быть поистине катастрофическими.

Проблема герметизации становится все более значимой по мере вторжения человека в необычные условия окружающего мира, например в космос или глубины Мирового океана. От ее успешного решения зависят в первую очередь, по крайней мере, два первостепенных фактора: обеспечение безопасности людей и возможность использования в новых условиях традиционных, т. е. хорошо отработанных и надежных технических решений. И здесь необходимо (уже в который раз!) отметить еще одно важное свойство эластомеров — их высокую способность к самоуплотнению.

Например, по мере повышения внешнего давления со стороны воды (скажем, при постепенном погружении батискафа в морскую пучину) резина все плотнее прижимается к контртелу. В результате ее способность наглухо перекрывать зазор автоматически возрастает. Но вот давление начинает падать (батискаф всплывает). И что же? Прижатие резины снова ослабевает само собой в соответствии с изменившимися условиями и опять-таки благодаря высокой эластичности материала.

Второе, более тонкое свойство эластомеров-уплотнителей стало предметом специального изучения лишь сравнительно недавно. Речь идет о способности резины, прижатой к твердому телу, постепенно «течь», заполняя при этом все микростоты, связанные с шероховатостью контртела. В пределе поверхность эластомера становится как бы негативом сопряжен-

ной поверхности, из-за чего все щели наглухо перекрываются, т. е. достигается идеальное уплотнение.

Проследить за таким явлением воочию можно, прижимая резину к прозрачному оргстеклу. Видно, что очаги фактического контакта резины с оргстеклом значительно отличаются по цвету от заполненных воздухом или водой пустот. Постепенно увеличивая нагрузку, можно заметить, как площадь пустот и в самом деле значительно уменьшается. Правда, отнюдь не до нуля, как можно было бы ожидать: множество пустот сохраняется даже при довольно больших нагрузках.

В чем же дело? Что мешает столь податливой резине заполнить все пустоты и обеспечить тем самым идеальную герметизацию? Мешает трение резины об оргстекло, металл, керамику. Здесь мы сталкиваемся с важным свойством эластомера — уплотнителя — его необычайно высоким трением. Отмеченное свойство, вполне терпимое (а в ряде случаев даже выгодное) для так называемых статических (неподвижных) уплотнений, превращается в принципиальный недостаток в подвижных соединениях, например, когда надо устранить опасное попадание воды внутрь машины или механизма через вывод вала гребного винта или через головку для завода часов.

Что же делать в этих довольно типичных для инженера ситуациях? Потуже затянуть уплотнитель? Тогда сильное трение, неизбежно возникающее при вращении вала, тут же породит новые щели, а со временем быстро разрушит уплотнитель или даже вырвет его из гнезда. Кроме того, большое трение способно легко нагревать резину до недопустимой температуры.

Выходит, что высокая эластичность, обеспечивая большую площадь контакта, с одной стороны, способствует уплотняющему действию резины, а с другой, вызывая высокое трение, — ослабляет или даже исключает этот эффект. Разрыв такого порочного круга, безусловно, способствовал бы резкому расширению технических возможностей эластомеров и, прежде всего, в качестве уплотнителей.

Конечно, эластомер можно просто смазать и тем самым резко уменьшить трение. Однако есть множество машин и приборов, где присутствие масляных паров по различным причинам (взрывоопасность, нарушение стерильности и т. д.) недопустимо. Оптимальный выход — уменьшить трение самих уплотнителей, т. е. сделать резину скользкой.

Решение стало возможным после открытия эффекта АНТ, расшифровка которого дала возможность советским ученым создать методы специальной обработки поверхностей, что позволило, в свою очередь, не просто снижать трение, но и управлять этим сложным процессом в широких пределах. Одним из

таких приемов служит метод получения африкционных эластомеров, или «скользящей резины», т. е. по существу — совершенно нового класса конструкционных материалов. Достаточно сказать, что, сохраняя все преимущества обычных резин, эти эластомеры обладают весьма малой прилипаемостью к металлам, керамике, дереву и другим материалам, благодаря которой коэффициент трения «скользящей резины» почти на порядок меньше, чем у обычных эластомеров.

Мы уже видели, насколько скользкость резины и ее малая прилипаемость важны для решения проблемы герметичности. Неудивительно, что почти сразу после своего рождения африкционные эластомеры нашли применение в качестве герметизатора наручных часов, а также уплотнителя множества других технических устройств, применяемых в авиации, автомобилестроении и морском флоте.

Важнейшими живительными артериями, питающими нашу цивилизацию, являются магистральные нефтепроводы, тянущиеся на многие тысячи километров. Любое нарушение герметичности какого-либо узла или стыка в этом случае — не только прямая потеря нефти, но и простой всего гигантского нефтепровода, т. е. недопоставка «черного золота», а с нею вместе и срыв нормального ритма работы множества промышленных предприятий. Перевод в Советском Союзе на «скользящую резину» сначала нефтяной магистрали «Дружба», а затем и других нефтепроводов страны позволил резко повысить надежность герметизации, существенно сократить простои и потери нефти и получить в итоге экономический эффект, исчисляемый десятками миллионов рублей в год.

Даже при продолжительном, измеряемом годами контакте африкционные эластомеры не только не прилипают к металлам, но и не вызывают их коррозии. Благодаря этому резко повышается надежность многочисленных устройств, периоды активной работы которых чередуются с длительными паузами. Особенно это важно для механизмов, работающих в морской воде (морское бурение и добыча нефти, океанологические приборы, рыболовные снасти) и в космическом пространстве.

С другой стороны, из-за своей химической инертности африкционные эластомеры заметно более стерильны и гигиеничны, чем многие другие материалы, используемые в медицинском оборудовании и хирургии. Исследования, проводимые в настоящее время, свидетельствуют о перспективности их применения в искусственных суставах и других органах, вживляемых в организм человека. Добавим к этому, что при длительном хранении на складах в самых различных условиях африкционные эластомеры сохраняются значительно лучше

и оказываются более стойкими по сравнению с обычными резинами.

В древнегреческой мифологии фигурируют странные существа «кентавры» — полукони, полулюди, надолго ставшие символом парадоксального сочетания несоединимых, казалось бы, сущностей. Выше мы говорили, что высокая эластичность и большое трение взаимосвязаны и поэтому, по всей видимости, органически присущи эластомерам в силу их особой молекулярной структуры. Опровергая эти вполне серьезные и обоснованные представления, африкционные эластомеры позволяют говорить о себе как о некоем материале — кентавре, соединяющем воедино то, что еще вчера считалось несовместимым.

Любопытно, что скользкая резина была создана советскими специалистами при разработке системы стыковки международного космического корабля «Союз — Аполлон». Здесь отчетливо проглядывает важная особенность научного исследования: работа над одной прикладной проблемой нередко приводит к одновременному решению целого каскада задач, охватывающих самые различные отрасли техники.

В ЦАРСТВЕ НЕПТУНА И ПЛУТОНА

Мировой океан часто называют «внутренним космосом», имея в виду все более активное освоение человеком его глубин. Морские просторы покрывают 7/10 поверхности земного шара при средней толщине водного покрова, или гидросферы, около 4000 м. Как раз на этой глубине обнаружен недавно корпус «Титаника» — первого трансатлантического гиганта, затонувшего после столкновения с айсбергом. Устремление в подводный мир жизненно важно для людей, поскольку связано в первую очередь с глобальным решением проблем продовольствия, топлива и добычи ценнейших видов сырья.

Ученые считают, что океан способен давать в два раза больше продовольствия с гектара, чем суша, хотя и требует создания совершенно новых продуктов питания, а следовательно, и новой техники. Наиболее перспективны для подводного «сельского хозяйства» шельфы — пологие прибрежные долины на глубине до 200—300 м, относительно светлые и изобилующие растениями и животными. Являясь естественным продолжением материков, шельфы тянутся иногда на сотни километров от берега, как, например, в районе французского города Бреста и в Баренцевом море.

В 1960 г. со дна моря было получено всего лишь 9% мировой добычи нефти. В 1983 г. подводные кладовые природы дали человеку уже свыше 650 млн. т «черного золота», или 22% мировой добычи. Причем львиная доля этого богатства была получена с морских платформ, находящихся за пределами видимости с берега. Считают, что в Мировом океане рассеяно несметное количество кремния, фосфора, цинка, железа и алюминия и, кроме того, сотни миллионов тонн серебра и 6 млн. т. золота, которое, правда, растворено в морской воде в очень слабой концентрации, что делает его добычу весьма проблематичной.

В породах, выстилающих океанское дно, также имеются огромные залежи полезных ископаемых, эксплуатация которых постепенно становится рентабельной уже в наше время. Особенно перспективны так называемые «конкреции» окислов железа и марганца, устилающие дно огромных подводных равнин. Ряд зарубежных промышленных компаний уже приступили к их добыче, используя специальное оборудование — быстроедействующие драги и гигантские эрлифты — метод, заимствованный у нефтяников и состоящий в использовании закачиваемого с поверхности сжатого воздуха для подъема полезных ископаемых с большой глубины.

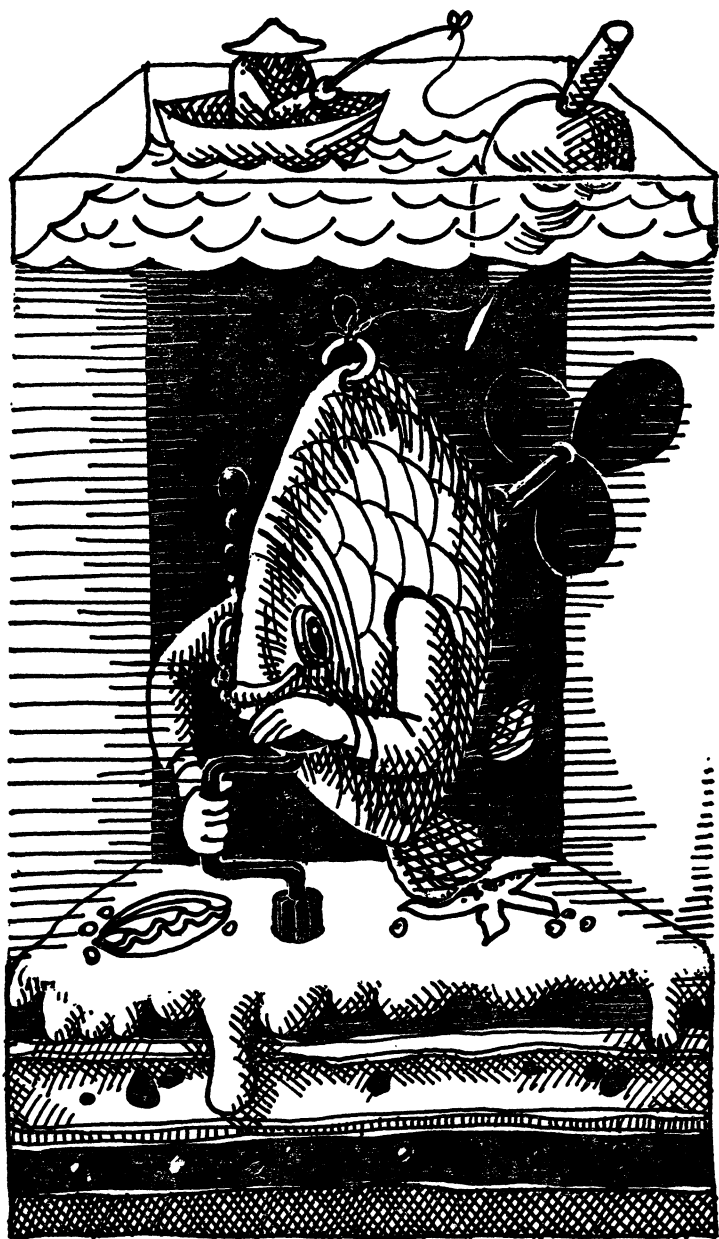
Современная техника уже сейчас позволяет «выдавать на-гора» тысячи тонн конкреций в сутки с глубины до 1800 м. Весьма перспективны для промышленного освоения и энергетические дары моря, связанные с использованием электростанций, не требующих топлива и работающих за счет приливов и отливов, а также даровой энергии морских волн. Надо сказать, что волновое энергосодержание Мирового океана огромно по современным оценкам: оно составляет около трети энергии, потребляемой в мире.

Решение всех перечисленных задач требует создания разнообразной техники, работающей под водой на разных глубинах, в том числе телеуправляемых подводных роботов-разведчиков и глубоководных вездеходов, экипаж которых мог бы не только пассивно наблюдать за окружающим миром, но и воздействовать на него с помощью специальных орудий и манипуляторов.

Но, рожденный на суше и привыкший к земной атмосфере как к чему-то вполне естественному и необходимому, человек, погрузившись в воду, чувствует себя перенесенным в совсем иной мир. Любые резкие перемещения здесь вызывают уже заметное сопротивление и немудрено: вспомним, что плотность воды почти в тысячу раз больше, чем воздуха.

С другой стороны, мягкие и плавные движения в воде полны какой-то удивительной легкости, чувства полета. Куда же исчезло вездесущее и неустранимое, казалось бы, притяжение Земли? Оно свелось «на нет» силой Архимеда, легко выталкивающей нас из воды и создающей тем самым волшебное ощущение невесомости. Недаром космонавты длительно тренируются под водой.

Живя и работая в высотных домах и ежечасно пользуясь лифтами, мы почти не ощущаем слабого изменения давления при подъемах и спусках на высоту десятков метров. Водная среда — совсем иной тип пространства: каждые десять метров глубины — это целая атмосфера, т. е. давление, создаваемое всей толщей солидной воздушной оболочки Земли. На глубине километра давление достигает уже ста атмосфер, т. е. становится примерно таким же, как на поверхности Венеры, окутанной куда более мощным, чем Земля, парогазовым покровом. Погружаясь еще глубже в мрачные и холодные пучины — царство древнегреческого морского бога Нептуна, мы сталкиваемся, наконец, с поистине чудовищным давлением, превышающим тысячу атмосфер. Могучие объятия такой силы блестяще выдержал автономный аппарат батискаф, спустившийся с двумя смельчаками на борту на дно Мариинской впадины в Тихом океане, где глубина близка к 11 км и считается рекордной.



Правда, никаких особых чудовищ в этой бездне обнаружить пока не удалось.

Итак, среда Мирового океана — особый и уже осваиваемый людьми мир, где привычные представления, а также навыки и огромный опыт, накопленный человечеством, нуждаются в серьезной ревизии, а в ряде случаев и в радикальной замене новыми представлениями, принципами и техническими решениями. Ограниченные нашей темой, мы будем по-прежнему вести рассказ только о проблемах трения. Следует помнить, однако, что особенности и странности «мира безмолвия», как назвал морскую пучину один из пионеров подводных исследований И. Кусто, неизбежно налагают свой оригинальный отпечаток на всю подводную инженерию.

Но в заглавие вынесено имя и другого древнегреческого бога — Плутона, повелителя земных недр. Мы сделали это не зря. Вспомним, что глубокое бурение нефтяных и газовых скважин, без которого сегодня немыслимо пополнение топливной базы планеты, связано как раз с проникновением в подземное царство Плутона. Проводка таких скважин осуществляется, как правило, в условиях водной или близкой к ней среды, заполняющей ствол. Поскольку глубина скважин измеряется обычно километрами, то и давление на забое (дне скважины), как очевидно, не уступает океанскому, достигая сотен атмосфер. Выходит, что и задачи трения в хозяйствах обоих богов оказываются в ряде случаев близкими. Но в чем же все-таки суть этих проблем?

Прежде всего, трение твердых тел возникает в данном случае в воде, обладающей множеством довольно своеобразных свойств. В речной и морской воде растворен кислород, что еще более повышает и без того высокую химическую активность этой среды. Поэтому обычные твердосмазочные вещества, включая инертный тефлон, теряют, частично или полностью, свои полезные свойства при использовании в воде. Применение здесь минеральных масел также возможно далеко не всегда, особенно в глубоководных устройствах, где любое дополнительное отверстие в корпусе, необходимое для подачи смазки, заметно ослабляет прочность корпуса, ограничивая тем самым глубину погружения аппарата. Вспомним, наконец, что повышенная опасность для людей, работающих на глубине, требует от инженерных решений исключительной надежности, а следовательно, и максимально возможной простоты. В этом отношении системы принудительной подачи жидкой смазки довольно далеки от совершенства.

Спрашивается, а зачем «городить этот огород» и не использовать для смазки в водной среде ... саму воду! Ведь это тоже

жидкость и чем она, собственно, хуже минерального масла? В такой простой и заманчивой идее есть свой резон, хотя на деле все далеко не так просто, как может казаться вначале.

Во-первых, вязкость, от которой, как вы помните, зависит подъемная сила смазки, у воды во много раз меньше, чем у минеральных масел. Это означает, что уже при самых малых нагрузках вода легко выдавится из зазора, допустив тем самым прямой контакт твердых поверхностей. Как же осуществить в таких условиях гидродинамический эффект?

Из хорошо разработанной теории жидкостного трения следовало, что это невозможно. Тем не менее опыты, проведенные у нас в стране, отчетливо подтвердили нечто противоположное: при трении помещенных в воду и строго параллельных плоскостей, одна из которых была металлической, а другая резиновой, в области контакта возникало большое избыточное давление! Об этом однозначно свидетельствовали манометры, соединенные при помощи хирургических игл прямо с зоной трения. Гидродинамический эффект существовал, хотя никакого, абсолютно необходимого для этого «клина» не было, казалось бы, и в помине!

Кропотливые исследования показали, тем не менее, что такой микроклин все-таки есть. Причем образуется он сам собой благодаря ничтожной деформации резины под нагрузкой. Поскольку слой водяной смазки в данном случае так тонок, что допускает взаимодействие поверхностных неровностей, трение носит смешанный характер, что приводит к некоторому росту потерь.

Разобравшись, в чем дело, ученые и изобретатели нашли способ резко повысить эффективность резино-металлических опор, работающих на воде. Для этого входные части опорных сегментов, выполненных из резины, были удлинены и освобождены от нагружения. Это позволяло им свободно деформироваться, создавая в зависимости от нагрузки оптимальные условия для образования смазочного клина. Подобные опоры, работающие на воде, не уступали по своим показателям знаменитым пятам Мичела, куда более сложным по конструкции и использующим в качестве смазки лучшие минеральные масла. В связи с этим рекомендовалось применять эластогидродинамические пяты в мощных гидротурбинах, устанавливаемых на ГЭС.

В свое время по целому ряду причин оказалось выгодным перевести на водяную смазку так называемый «дейдвудный» подшипник судна, воспринимающий нагрузку от гребного винта. Быстро выяснилось, что незаменимым подшипниковым материалом для этой цели служит бакаут — сравнительно редкая

и дорогая порода дерева, растущего в Центральной и Южной Америке и отличающегося особо высокой износостойкостью при длительном пребывании в воде.

Резина, обладающая благодаря своей эластичности повышенной сопротивляемостью к абразивному изнашиванию, оказалась достойным конкурентом дефицитному бакауту. Это имеет принципиальное значение не только для судов (особенно мелководных), но и для различных забойных двигателей, широко используемых при бурении глубоких скважин и добыче нефти. К ним относятся турбобуры, а также резино-металлические винтобуры и глубинные винтовые насосы. К подшипникам в таких устройствах предъявляют высокие требования: например, резино-металлическая осевая опора турбобура должна работать при высоком (до сотен атмосфер) гидростатическом давлении, сочетающемся с повышенной температурой и сильными динамическими нагрузками; при этом смазка пяты целиком осуществляется водой, содержащей песок.

Здесь уместно рассказать еще об одном изобретении, касающемся пяты турбобура. Ее эластичные элементы наглухо привулканизовывались к металлической опоре — подпятнику. Поэтому при изнашивании резины приходилось заменять весь набор подпятников, что требовало большого расхода довольно дорогих запасных частей. Изобретатели предложили помещать дешевые резиновые вкладыши в специальные пазы подпятника, имеющие в сечении вид ласточкиного хвоста. Расчет, который вполне оправдался, состоял в том, что огромное гидростатическое давление намертво прижмет вкладыш к опоре, сделав ненужной привулканизацию. При этом изношенный вкладыш можно легко заменить новым, сохранив тем самым остов подпятника. Так, устрашающий фактор — большое гидростатическое давление окружающей среды — стал союзником конструктора. Надо сказать, что подобное «обращение зла в добро» нередко используется изобретателями в самых различных ситуациях.

Большой вклад в проблему трения в воде внес советский ученый А. Дьячков, предложивший на основе теоретических исследований материал, отлично работающий на водяной смазке и нашедший применение во многих отраслях техники.

Следует отметить, что кроме малой вязкости вода как смазочный агент имеет еще один крупный недостаток. Дело в том, что тончайшая (в одну или несколько молекул) пленка воды, сохраняющаяся между резиной и металлом после выдавливания основного смазочного слоя, способна настолько сильно склеить эти материалы, что при повторном пуске частицы резины будут вырваны и перенесены на металл. Поэтому пробле-

ма страгивания решается путем придания металлическим поверхностям трения оптимальной шероховатости или особого, выполненного на станках узора, исключающего полное выдавливание смазки.

Наряду с этим интересно было выяснить, что же представляет собой эта остаточная водяная пленка. Опытами Б. Дерягина была доказана удивительная вещь: при некоторой толщине, измеряемой десятymi и сотыми долями микрометра, вязкость граничных пленок, образованных из жидкостей, возрастает скачком. Это позволяет говорить об особом агрегатном состоянии таких пленок, близком к твердому и связанному с особой ориентацией молекул. Относятся ли эти представления к воде?

Вот что пишет по этому поводу сам Дерягин, объясняя смазочную способность льда: «По-видимому, механизм граничной смазки водой, так же как и маслами, основан на скольжении внутри смазочного слоя по определенным плоскостям ... Образованию этих плоскостей скольжения способствует правильное расположение молекул воды, сохраняющееся и после плавления льда ...» Ну, а если речь идет о воде при «плюсовой» температуре? Способна ли она образовывать на поверхностях твердых тел подобные же упорядоченные пленки? Вопрос этот уже много лет вызывает жаркие споры и не решен до сих пор.

О том, насколько этот вопрос важен, видно из следующего примера. Представим, что мы спустились в батискафе на большую глубину и легли на дно. Спрашивается, что изменилось в нашем положении после опоры о дно? На первый взгляд, ничего. В самом деле, огромное гидростатическое давление продолжает с той же силой сжимать нас со всех сторон, пытаясь раздавить независимо от того, опираемся ли мы о дно или едва касаемся его. Но здесь есть важная тонкость, прямо связанная с трением нашего батискафа о дно.

Предположим сначала, что тонкая пленка воды между стенкой батискафа и дном способна передать гидростатическое давление окружающей воды, т. е. подчиняется закону Паскаля. Тогда ко дну нас будет прижимать вес батискафа P за вычетом архимедовой силы A . В результате сила трения батискафа о дно будет равна

$$F = \mu(P - A),$$

где μ — коэффициент трения о дно.

Далее, предположим, что граничная пленка воды полностью потеряла свойства жидкости и, следовательно, не способна передавать гидростатическое давление по закону Паскаля. Тогда

да, совершенно незаметно для нас, сидящих внутри, батискаф прижмется ко дну с чудовищной силой, равной весу столба жидкости над нами! Сила трения о дно даже при условии нейтральной плавучести окажется при этом равной

$$F = \mu H \rho S g,$$

где H — глубина, ρ — плотность воды и S — площадь контакта со дном. Например, при $H = 5000$ м, $\mu = 0,3$ и $S = 1$ м² $F = 15\,000$ Н, т. е. возрастает в десять тысяч раз! Не исключено, что в этих условиях стихия прижмет батискаф ко дну с такой силой, что мы не сможем не только передвигаться, но и вообще оторваться ото дна и всплыть. И все это зависит от такой «меточи», как тончайшая, не видимая простым глазом пленка воды.

Вопросы контактного взаимодействия тел при особо высоких гидростатических давлениях воды исследованы недостаточно. Пока можно лишь предполагать, что все более дальние путешествия в царство Нептуна и Плутона будут чреваты многими неожиданностями, которые поставят перед конструкторами нелегкие проблемы.

ВОДЕ И ВЕТРУ НАВСТРЕЧУ

Полагают, что человек и не подозревал о грозном сопротивлении водной и воздушной среды, пока сам не стал передвигаться по воде, суше и воздуху со все нарастающей скоростью. Вряд ли это так. Какой путник не знал, например, о силе встречного ветра, замедляющего переходы и вызывающего быстрое утомление. Еще ближе были знакомы с ураганными потоками воздуха и воды моряки всех времен и народов, неизбежно становившиеся не только победителями, но и жертвами разбушевавшихся стихий. Поэтому правильнее было бы сказать, что сопротивление воды и воздуха было знакомо людям, но не играло особой роли, пока транспорт на море и на суше оставался тихоходным, а авиации с ее стремительными скоростями не было вообще. Ведь сопротивление окружающей среды, о чем знал еще Галилей, неудержимо возрастает по мере увеличения быстроты движения.

Например, при равномерном движении океанского лайнера почти вся энергия его двигателей расходуется на преодоление сопротивления воды, которое состоит в основном из двух слагаемых: сопротивления из-за трения корпуса о воду и сопротивления, связанного с «разведением волны», которую мы видим за кормой корабля. И если первый вид затрат пропорционален примерно квадрату скорости хода, то вынужденный расход энергии на создание волны растет уже гораздо быстрее.

Для судна водоизмещением около 35 тыс. т и длиной около 180 м потери на трение о воду при умеренном ходе 14 узлов (26,4 км/ч) составляют примерно 75% общей мощности, в то время как остальные 25% затрачиваются на преодоление волнового сопротивления. Интересно, что этот последний вид потерь значительно уменьшается при движении тела в подводном положении.

Наша атмосфера у земной поверхности примерно в 800 раз менее плотна, чем вода, но и она может создать огромное противодействие движению. Так, колесный поезд обычной формы при скорости 200 км/ч затрачивает на преодоление сопротивления воздуха около 70% всей мощности. Даже при хорошо обтекаемой форме эта цифра не снижается ниже половины всей мощности. Теоретически для поезда из восьми вагонов с локомотивом, мчащегося со скоростью 300 км/ч, требуется мощность в 8,2 тыс. кВт, а при скорости 500 км/ч — уже около 30 тыс. кВт.

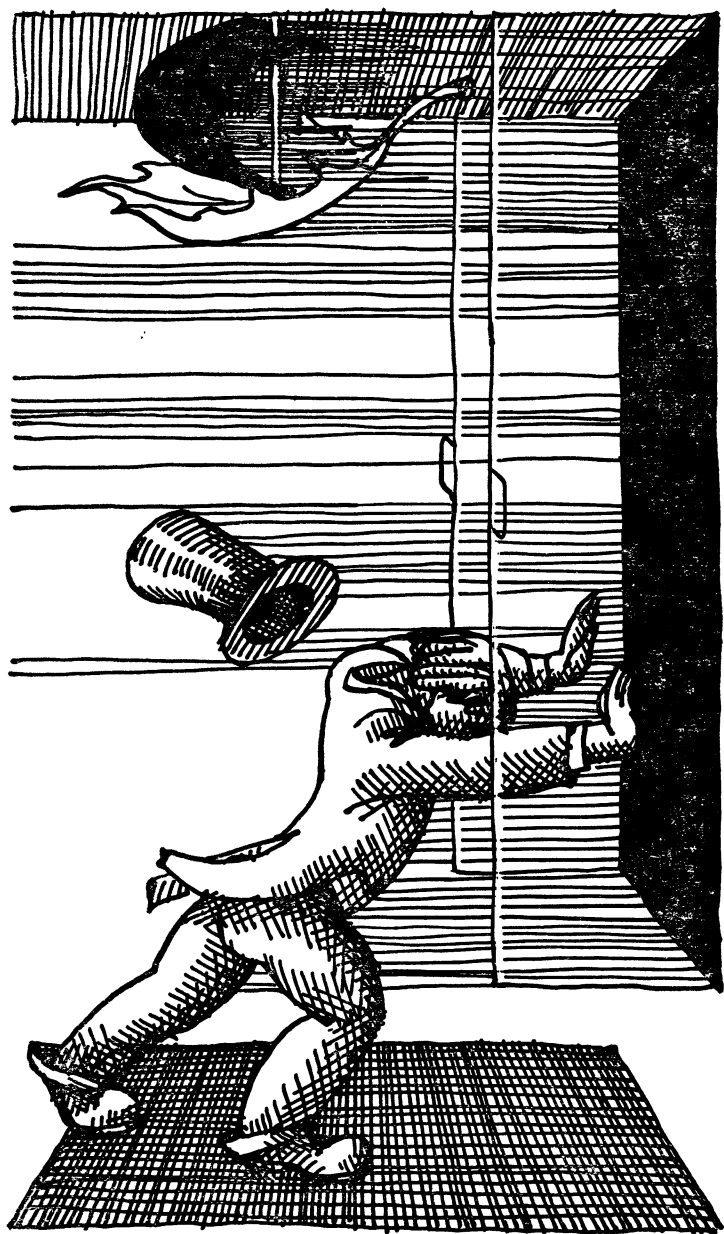
Даже первые летательные аппараты, едва оторвавшись от Земли, позволили отчетливо ощутить гигантскую силу сопро-

тивления воздуха. И с этого момента снижение лобового сопротивления за счет лучшей обтекаемости машин стало одной из главных проблем развития авиации. Ведь трение о воздух не только поглощает энергию двигателей, но и приводит к опасному перегреву самолета, особенно при полетах в плотных слоях атмосферы. В то же время набегающий поток служит одним из источников подъемной силы машин тяжелее воздуха. Поэтому сопротивление такого потока нецелесообразно уменьшать ниже определенного предела, который во многих случаях уже достигнут.

Постепенное приближение к скорости звука (330 м/с) вызывало в свое время у ученых и конструкторов самолетов большую тревогу. Хотя общие законы газовой динамики были сформулированы еще в XVIII веке, их конкретные формы, как писал академик В. В. Струминский, долгое время оставались малоизученными. Экспериментальные исследования в аэродинамических трубах и грубые теоретические оценки свидетельствовали о том, что при приближении к скорости звука сопротивление движению самолета может возрасти в несколько раз. На пути скоростной авиации появился так называемый «звуковой барьер». Успешное преодоление этого барьера привело к созданию сверхзвуковых самолетов, летящих со скоростью, превышающей звуковую в несколько раз.

Для полетов на значительные расстояния в пределах Земли становятся рентабельными гиперзвуковые самолеты, скорость которых может достигать уже 10–12 тыс. км/ч. Такие самолеты выгодно использовались на высотах 36–50 км. При еще большем увеличении скорости подобные самолеты можно превратить в космоланы многоразового действия, предназначенные для выведения на орбиту искусственных спутников нашей планеты, а также доставки грузов и смены экипажей орбитальных станций. Выполнив свою задачу, такой «космический паром» возвращается на Землю подобно обычному самолету. При этом трение о воздух приводит к разогреву обшивки до 800–1000 °С. В то же время использование в качестве топлива жидкого водорода, имеющего температуру –253 °С, требует исключительно надежной теплоизоляции баков летательного аппарата.

Спутники и космические корабли движутся уже в столь разреженной среде, что практически не встречают никакого сопротивления. Правда, для этого они должны вначале выйти за пределы земной атмосферы, а некоторые из них рано или поздно вернуться на родную планету. Эта завершающая стадия полета в космос пока что особенно сложна и опасна. Ведь корабль теряет гигантскую кинетическую энергию, необходимую



для движения по инерции вокруг Земли, и большая доля этой энергии гасится в результате трения возвращающегося корабля о верхние слои атмосферы.

Помимо сильных перегрузок, вызванных торможением, летательный аппарат, точнее, его наружная оболочка, испытывает сильный нагрев, приводящий к испарению части обшивки, буквально обътой пламенем. Ставшая ненужной на завершающей стадии посадки двигательная система корабля отделяется от кабины с помощью специальных пиропатронов и лишь после этого скорость снижается настолько, что можно раскрыть парашют и плавно приземлиться.

Неудивительно, что свидетельства наших отважных космонавтов, переживших торможение и спуск корабля на Землю, полны самых драматических впечатлений. Появление «космических челноков», способных не только взлетать в космос, но и садиться на Землю подобно обычным самолетам, значительно упрощает приземление. Тем не менее и здесь защита корабля от теплового удара, связанного с аэродинамическим торможением, по-прежнему остается одной из самых ответственных и сложных проблем.

Пора теперь и нам вернуться на Землю и рассмотреть причины, вызывающие столь мощное противодействие газовых и жидкостных сред. Еще совсем недавно мы говорили о том, что водные глади, омывающие материки, а также многочисленные реки во многом помогли человеку избавиться от трения. Это объяснялось тем, что плоты и гребные суда наших предков плыли медленно, благодаря чему сопротивление воды почти не ощущалось.

«Позвольте, — возразит читатель, умеющий грести, — усилие при работе веслом вполне ощутимо даже при тихом ходе лодки». Верно, но повышенному сопротивлению весла, обеспечивающему силу гребка, способствует большая рабочая площадь лопасти. В этом легко убедиться, попробовав грести обычными шестами. В то же время лодки имеют обычно острый нос и плавные обводы, снимающие большую часть сопротивления.

Парусники прошлых веков шли быстрее гребных галер, но затрачиваемая при этом энергия была «даровой» и не подлежала никакому учету. Тем не менее уже здесь кораблестроители обязаны были учитывать могучее противодействие воды: ведь именно этой силой, согласно третьему закону Ньютона, определялась прочность парусов, мачт, канатов и, в конечном счете, всего корабля.

Ситуация резко изменилась, когда двигателями речных и морских судов стали весьма несовершенные паровые машины, ненасытно пожиравшие целые горы каменного угля. Так,

первый трансатлантический гигант, знаменитый «Грейт Истерн», представляющий собой гибрид шестимачтового парусника с пароходом, сжигал в сутки 330 т каменного угля. При этом его невиданные по размерам бункеры вмещали 12 тыс. т топлива — запас, необходимый для перехода из Англии в Индию.

Разумеется, что и судовладельцы, и пассажиры страстно желали, чтобы пароходы плыли как можно быстрее, но ... Довольно скоро выяснилось, что даже скромное повышение хода оборачивалось непомерным расходом топлива. Это представлялось ученым весьма загадочным. Ведь сопротивление сухому скольжению, как мы помним, вообще не зависит от скорости движения, а жидкостное трение, согласно формуле Ньютона, пропорционально всего лишь первой степени скорости. Таким образом, классическая гидродинамика оказалась просто не в состоянии объяснить движение тел в жидкости при повышенных скоростях.

Причины «угольного обжорства» стали понятны ученым и инженерам только благодаря тщательным лабораторным исследованиям, выполненным в Германии, Англии, России и других странах, в связи с чем была создана целая наука — прикладная гидромеханика. Оказалось, что при движении в жидкости или газе гладкого и хорошо обтекаемого тела, имеющего, например, форму сигары, среда отделена от тела переходным, или так называемым пограничным, слоем. При достаточно медленном перемещении скорость жидкости или газа в этом слое плавно меняется, достигая на границе тела той же самой скорости, с которой тело движется относительно среды. Мы пришли, таким образом, к классической модели Ньютона, которая долгое время оставалась умозраительной и вызывала недоверие у инженеров.

Вопреки распространенному заблуждению, рассеянному столетие назад русским ученым Н. Петровым, жидкость не скользит по поверхности тела, а прилипает к ней, увлекая за собой часть обтекающего потока, который и образует пограничный слой. То же самое относится и к воздуху. Подобное плавное, как бы послойное, течение называют ламинарным. Создаваемое им сопротивление довольно мало, пропорционально скорости движения и легко может быть рассчитано по известной нам формуле Ньютона. Именно это сопротивление и преодолевается в основном при гребле на обычной лодке.

Но вот скорость движения возросла, достигнув некоторого критического значения. Тогда вместе с резким ростом сопротивления неузнаваемо меняется и вся картина обтекания,

равно как и само движение жидкости в пограничном слое. Течение в нем изобилует всякого рода завихрениями, т. е. становится турбулентным (от латинского турбулентус — бурный, беспорядочный). Потери на трение в этом случае зависят от быстроты движения уже гораздо сильнее и с трудом поддаются расчету. Интересно, что идею о том, что сопротивление жидкостному трению прямо пропорционально скорости при медленном движении и квадрату скорости при быстром, впервые выдвинул еще Кулон, опиравшийся при этом на свои собственные опыты с затуханием колебаний дисков, подвешенных на упругих нитях и погруженных в жидкость.

В начале главы мы упоминали о волновом сопротивлении движению судов. Вот что писал по этому поводу наш выдающийся кораблестроитель А. Крылов, который, будучи еще совсем молодым ученым, проводил наблюдения на быстроходном минном крейсере. «Меня тогда же поразили почти полное отсутствие буруна у форштевня, незначительность носовой волны, сравнительно небольшие расходящиеся волны и система весьма больших (высотой около 2 м) поперечных волн за кормой, бежавших за кораблем, но со скоростью, меньшей скорости его хода, так что эта система волн отставала от корабля... Волны на свое образование требуют затраты энергии; становилось ясным, что эта энергия доставлялась главными механизмами корабля и безвозвратно уносилась в море».

Но что же все-таки было непосредственной причиной этого явления? Впервые ответ на этот вопрос дал английский ученый Уильям Фруд, проводивший исследования на моделях судов, по всей вероятности, в первом в мире опытном бассейне, построенном в Англии в 1872 г.

Было установлено, что причина волнового сопротивления кроется в сложном взаимодействии кормовых и носовых волн, генерирование которых, в свою очередь, обусловлено, длиной и некоторыми другими характеристиками корпуса судна. Отчетливо выявился и получил всеобщее признание парадоксальный факт: тупая корма создает большее сопротивление, чем тупой нос, что объяснялось отрывом струй, обтекающих корпус, и образованием за кормой зоны пониженного давления. Теория подобия, созданная У. Фрудом, позволяла легко и с большой точностью рассчитать сопротивление реального корабля по данным, полученным на модели в бассейне.

Выяснилось далее, что гребной винт, отбрасывая назад водную массу и заставляя тем самым судно двигаться вперед, служит и источником дополнительных потерь, достигающих иногда почти половины общего сопротивления. Главная при-

чина — интенсивное отсасывание воды из прикормовой зоны, в результате чего и без того пониженное давление в этой зоне падает еще сильнее.

Кроме того, винт не только отбрасывает, но и закручивает водяную струю, затрачивая дополнительную энергию, также идущую на образование волн. Добавим к этому, что волны, которые разводит винтовое судно, интенсивно размывают берега каналов и рек. Необычайно сильная зависимость волнового сопротивления от скорости приводит к тому, что уже при ходе в 30 узлов оно превышает потери на трение о воду в несколько раз, а при скорости в 50 узлов становится подавляющим. Где же выход?

Незадолго до начала второй мировой войны молодые советские теоретики, будущие прославленные академики М. В. Келдыш и М. А. Лаврентьев выступили с докладом на конференции по волновому сопротивлению. Они установили, что подъемная сила крыла, погруженного под поверхность жидкости, достаточно сильно зависит от расстояния крыла до указанной поверхности. Это навело инженера Р. Алексеева, впоследствии знаменитого конструктора, на мысль о быстроходном речном судне на подводных крыльях. Появившаяся в 1957 г. на линии Горький — Казань хорошо знакомая нам «Ракета» привела к перевороту на мелководном транспорте, который можно, пожалуй, сравнить с фурором, произведенным за полтора века до этого знаменитой «Ракетой» Д. Стефенсона на сухопутном транспорте.

В отличие от судов обычного типа, не тонущих благодаря силе Архимеда, «Ракеты», «Метеоры» и их сородичи, распространившиеся сейчас по всему миру, держатся на воде, а точнее над водой, подобно самолетам, т. е. за счет подъемной силы погруженных в воду крыльев, возникающей при достаточно большой скорости скольжения. Эта сила, как и предсказывали теоретики, уменьшается по мере всплыwania крыльев и приближения их к поверхности водяной глади. Поэтому судно не вылетает из воды и автоматически сохраняет устойчивость движения при некотором, вполне определенном погружении крыльев.

В результате трение корпуса о воду сводится к минимуму, а волновое сопротивление резко сокращается, о чем свидетельствуют слабые волны, рождаемые быстроходным крылатым кораблем. Дальнейшее усовершенствование конструкции подводных крыльев приведет к тому, что уже в конце 80-х годов водоизмещение судов на подводных крыльях будет измеряться тысячами тонн, а их скорость, по авторитетному мнению специалистов, достигнет 120 км/ч.

Второе радикальное решение проблемы, также реализуемое во все больших масштабах прямо на наших глазах, основано на поразительно простой идее: вытолкнуть с помощью достаточно мощной «воздушной подушки» судно целиком из воды, превратив его таким путем в самолет или, скорее, вертолет. Известно, что так называемые «простые» идеи, предлагаемые изобретателями, нередко оказываются до поры до времени нерентабельными или вовсе неосуществимыми. Так произошло и с идеей судна на «воздушной подушке», впервые высказанной, как считают, шведским физиком и просветителем Э. Сведенборгом где-то в начале XVIII века.

Понадобилось ровно два столетия для того, чтобы первое судно, построенное австрийским инженером Д. Томахулом, смогло наконец оторваться от воды и развить скорость около 70 км/ч. Практическое использование так называемых глайдеров началось в конце 50-х годов, когда одна из английских фирм открыла регулярные рейсы через пролив Ла-Манш. При собственной массе около 170 т глайдер брал на борт 250 пассажиров и 30 автомашин. Специальные «юбки», позволяющие создать «воздушную подушку» с помощью мощных компрессоров, установленных на борту, оказались весьма удобными на мелководье и перекатах, а также при швартовке.

Однако эти же «юбки» вызвали массу затруднений при сильном волнении на воде. Поэтому для создания «подушки» используются и другие приемы. Сейчас считают, что глайдеры — идеальные морские паромы будущего, способные развить скорость до 160 км/ч. Что же касается летающих морских лайнеров, то решение проблемы больших волн требует солидного отрыва корабля от водной поверхности, измеряемого метрами. Для этого нужны облегченные компрессоры фантастической мощности, которые, как предполагают конструкторы, могут быть со временем созданы с помощью достаточно легких и компактных атомных двигателей. Сохраняется и проблема шума, а точнее сказать — оглушающего рева глайдеров, исключаяющего их эксплуатацию в многолюдных местах.

Любопытен уникальный опыт французского этнографа и писателя М. Песселя, дерзнувшего на небольшом надувном глайдере пересечь ... Гималайский хребет, покрыв в итоге 1800 км по девяти высокогорным рекам Непала. В головоломных ситуациях, пережитых отважными путешественниками, выявилась поразительная, граничащая с чудом способность глайдера преодолевать самые неожиданные препятствия, едва ли доступные любому другому из известных видов транспорта. «По сути, — заявляет М. Пессель, — произошла революция в способах пере-

движения: судно на воздушной подушке, или аэроглиссер, как я буду называть его для краткости, совместило в себе лодку, автомашину и самолет». Но доказав, казалось бы, невозможное, пионер нового вида транспорта дает ему трезвую и объективную оценку. «Опыт показал, что наши суда на воздушной подушке, не будучи ни самолетами, ни кораблями, ни автомобилями, унаследовали дефекты всех трех видов транспорта. Они опрокидывались как корабли, наталкивались на препятствия, как автомобили, немало стараний приходилось прикладывать, чтобы оставаться «на лету» и не совершить вынужденной посадки посреди реки».

Ну, а каковы методы снижения сопротивления среды как такового? Прежде всего, оказывается возможным резко уменьшить волновое сопротивление морских судов путем подавления носовой системы волн. Для этого подводная часть носа современного корабля снабжается внушительным, резко выступающим вперед обтекаемым выступом — бульбой. Идея метода принадлежит русскому эмигранту В. Юркевичу и была впервые осуществлена на знаменитой «Нормандии» — гигантском трансатлантическом лайнере, построенном в 30-х годах и развивавшем скорость более 30 узлов при мощности 160 тыс. л. с. Здесь же было использовано и другое новшество — подача в носовую часть обшивки водовоздушной эмульсии, легко проскальзывающей затем по бортам и снижающей трение.

Уже после второй мировой войны английский химик Б. Томс открыл возможность гасить турбулентность в пограничном слое воды добавкой в нее ничтожного количества полимерной жидкости. Дело в том, что даже чистая вода склонна к созданию «дальнего порядка», т. е. образованию протяженных объемных структур, повышающих ее вязкость. При некоторых благоприятных условиях, например на поверхностях металлических труб, может образовываться даже так называемая «полимерная вода», обладающая рядом необычных свойств, например более низкой точкой замерзания. Добавка полимеров, по-видимому, способствует структурированию воды. В результате ламинарный режим сохраняется при более высоких скоростях, и трение может быть снижено на четверть, а то и наполовину.

Не следует думать, однако, что ламинарный режим трения в пограничном слое — всегда благо. В прикладной аэродинамике хорошо известен «парадокс Эйфеля», названный так по имени строителя знаменитой высотной башни, символа Парижа. Парадокс состоит в резком снижении лобового сопротивления шара после достижения некоторой критической скорости.

Нетрудно представить себе изумление всякого, наблюдавшего, например, на модели шара в аэродинамической трубе этот легко воспроизводимый эффект: ведь сопротивление среды с ростом скорости, казалось бы, обязано только расти, причем все быстрее! Загадку разрешил известный немецкий механик Людвиг Прандтль. Добавив в поток воздуха дым, он сделал обтекание шара видимым простым глазом. Тут же выяснилось, что при малых скоростях ламинарный слой испытывает отрыв на самой середине (миделе) шара. В то же время турбулентный слой, возникающий при повышении скорости, настолько устойчив, что «срывается» лишь в задней части шара, снижая его лобовое сопротивление в четыре-пять раз!

Достаточно надеть на переднюю половину шара тонкое проволочное кольцо, чтобы искусственно вызванная этим турбулентность столь же резко улучшила обтекаемость шара и при меньших скоростях, когда турбулентность сама собой не наступает. Добавим к этому, что в наше время подобная возможность видеть невидимое может быть реализована с помощью нового и поистине универсального оптического средства — голографии.

Исследованиями «отца русской авиации» Н. Е. Жуковского и целой плеяды выдающихся ученых и конструкторов других стран было установлено, что одна из важнейших причин рассеяния энергии при движении в плотных средах кроется в образовании и последующем срыве вихрей, не только уносящих значительную кинетическую энергию, но и создающих за движущимся телом зону разрежения. В авиации настойчивая и стоящая многих жертв борьба с этим явлением была связана с поисками оптимальных профилей крыльев и хвостового «оперения» самолета и добавкой к ним устройств, которыми пилот мог бы сам регулировать обтекаемость на разных стадиях полета.

Представим себе, что движущееся тело способно автоматически изменять свою форму в соответствии с конкретной обстановкой так, что обтекание всегда оказывается оптимальным. Именно такой принцип самонастройки используется, по-видимому, нашими морскими «братьями по разуму» — дельфинами. Замечено, что эти существа способны плыть со скоростью, явно превышающей, казалось бы, их мускульные возможности. Объяснение, с точки зрения современной гидромеханики, здесь лишь одно: поразительно низкое сопротивление перемещению этих довольно крупных животных в воде. Механизм такого феномена пока не раскрыт и вызывает различные толки. Не исключено, что он связан с работой сильно разветвленной си-

стемы кровеносных сосудов и нервных волокон, расположенных вблизи наружных покровов дельфина. Возможно, что животное ощущает зоны зарождающейся турбулентности своей кожей и реагирует на это изменением формы тела. Хочется думать, что и этот сложный и остроумный метод, подсказываемый нам природой, позволит со временем резко снизить сопротивление движению кораблей и лодок, движущихся с большой скоростью в воде.

А как были решены задачи, связанные с полетами, обгоняющими звук? Проблема осложнялась новыми, неизвестными до того видами сопротивления. Для борьбы с ними фюзеляж самолета пришлось удлинить и сделать заостренным спереди, подобно клюву фантастической птицы. Поперечное сечение машины было, наоборот, уменьшено за счет сокращения размаха крыльев и их утоньшения. При этом сами крылья сверхзвуковых машин приобрели стреловидную, а затем и странную, куцую форму, напоминающую греческую букву дельта. Передняя кромка таких крыльев была заострена. Оптимальная высота полета сверхзвуковых самолетов выше, чем у обычных лайнеров, и находится в пределах 16–23 км.

При переходе к гиперзвуковым скоростям размеры крыльев машины еще сокращаются и значительную долю несущей способности берет на себя фюзеляж летательного аппарата. Но такому самолету для взлета и посадки по-прежнему необходимы крылья. Выход заключается в создании машин с изменяющейся геометрией крыла или же с частично убирающимися крыльями. При полете с гиперзвуковыми скоростями необходимо считаться с новыми явлениями: диссоциацией и ионизацией молекул кислорода и азота, сталкивающихся с летящим телом. Образующиеся при этом заряженные частицы обладают огромной разрушительной активностью, что еще более ужесточает требования, предъявляемые к материалам обшивки гиперзвуковых машин.

Таким образом, сравнивая трение при контакте твердых тел с сопротивлением движению в более или менее плотной среде, мы четко видим характерные различия в физической природе обоих явлений. При сухом, а точнее граничном, трении контактное взаимодействие сосредоточено в тончайших поверхностных слоях материала, а еще правильнее — в весьма малых очагах контакта, где твердое вещество находится в предельно напряженном состоянии, а рассеяние энергии происходит на микроскопическом уровне.

При жидкостном трении в машинах толщина смазочного слоя, на этот раз уже сплошного, в сотни и тысячи раз больше, чем толщина области контакта у граничных пленок, но и

в этом случае контакт, по существу, локализован в самом смазочном слое, где внутреннее трение служит главной причиной превращения механической энергии в теплоту.

Сильное противодействие со стороны воздушной и водной среды, встречающей тело, движущееся с достаточно большой скоростью, имеет совсем иную природу. Оно обусловлено возмущением самой среды, вовлекающим в процесс рассеяния энергии огромные массы вещества. Поэтому все без исключения способы снижения сопротивления, о которых мы рассказали в этой главе, основаны, в конечном счете, на том, чтобы всячески ограничить масштабы возмущения окружающей среды.

РАСПЛАТА ЗА СКОРОСТЬ

В современной научной фантастике, особенно зарубежной, популярна тема о всемогущих пришельцах из космоса, бойко развиваемая на все лады. Но, увы, хотя многие предсказания фантастов рано или поздно сбываются, никаких внеземных «братьев по разуму» наяву еще никто не видел.

Представим себе, однако, что такие пришельцы действительно существуют и исподволь наблюдают за нами на протяжении столетий, не вмешиваясь в людские дела и оставаясь незамеченными. Какая же черта нашего бытия оказалась бы для них наиболее разительной и характерной? Безусловно, непрерывно нарастающий темп изменений, которые человек вносит в окружающую среду. А отсюда — все большая быстрота перевозок грузов и людей, опять-таки отлично наблюдаемая извне.

Приведем такой пример. Первое кругосветное путешествие, начатое португальским мореплавателем Магелланом 10 августа 1519 г. и законченное 6 ноября 1521 г. горсткой его чудом оставшихся в живых спутников, длилось в общей сложности 824 суток или примерно 19,7 тыс. часов. Впервые поднявшийся менее чем четыре с половиной столетия спустя в космос посланец нашей родины Ю. А. Гагарин облетел Землю всего за полтора часа, т. е. быстрее героических первопроходцев средневековья более чем в 13 тысяч раз!

Но повышение скорости движущихся тел охватывает не только транспорт, но и многие отрасли промышленности, о чем мы не раз говорили выше. Кроме того, мы выяснили и основные причины роста сопротивления движению при самых различных скоростях, включая сверхзвуковые.

Но, рассказав о методах борьбы с этим явлением, мы почти не коснулись того, во что обходятся людям перемещения со все нарастающей скоростью. Вопрос этот становится особо актуальным по мере приближения человечества (а это время не за горами) к тому драматическому рубежу, когда на планете иссякнут запасы нефти, газа и каменного угля, образующие на сегодня основу энергетической базы планеты.

«И какой же русский не любит быстрой езды!» — гордо воскликнул в одном из своих лирических отступлений Н. В. Гоголь, сравнив нашу Русь с бойкой, необгонимой тройкой, стремительно несущейся в неизвестность. И сейчас, полтора века спустя, нам представляется вполне естественным, что все, на чем мы ездим, плаваем и летаем, должно двигаться быстрее

и быстрее. Ведь тогда сами мы успеем больше увидеть, узнать и пережить.

С другой стороны, любые попытки увеличить скорость и объем перевозок всегда наталкивались на проблему транспортных издержек. «За морем телушка полушка, да дорог перевоз», — эта нехитрая народная мудрость лежала в основе торговой деятельности купцов всех народов с незапамятных времен.

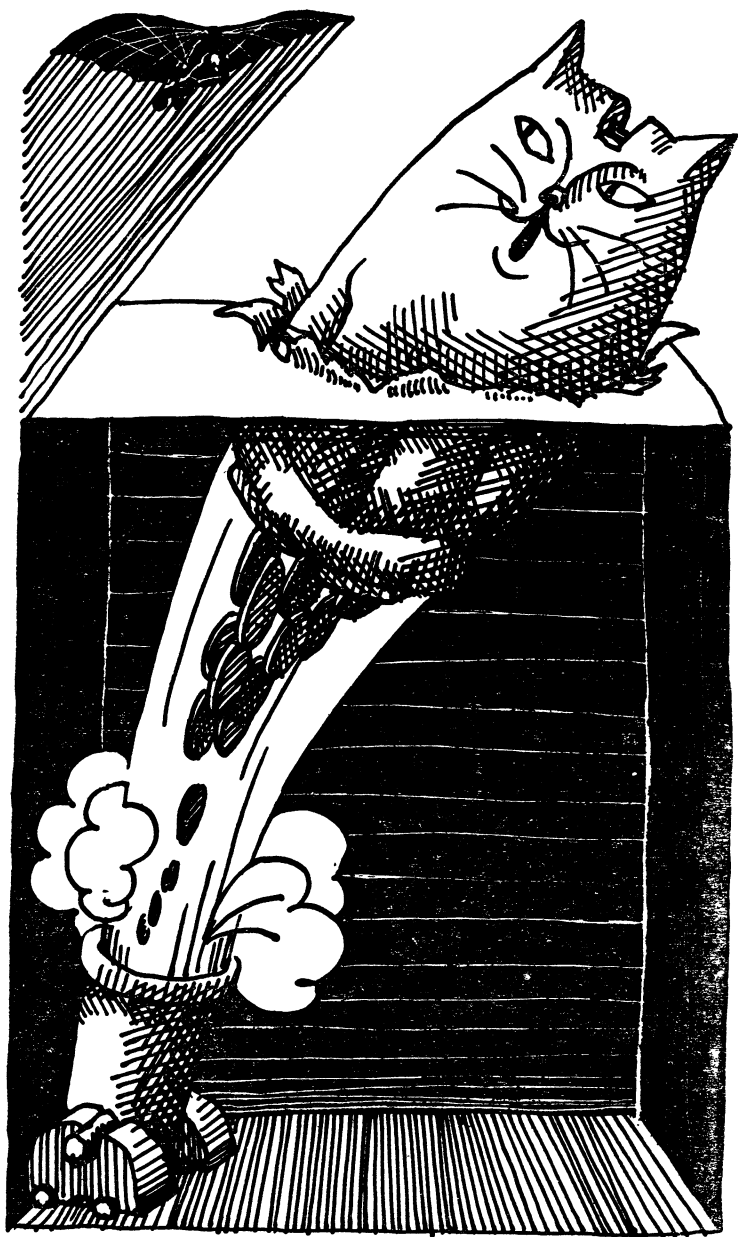
В длительных морских путешествиях прошлого создание на борту больших запасов воды и продовольствия, необходимых для питания команды, вырастало в сложную задачу, усугубляемую отсутствием консервов и холодильников. Непонимание роли витаминов неизбежно приводило к болезням, наиболее опасной из которых была цинга. Повышение скорости позволяло резко сократить длительность переходов и тем самым намного уменьшить бортовые запасы продовольствия, что имело решающее значение.

В этих условиях гребные суда древнего мира и средневековья, сумевшие сохранить военное значение вплоть до эпохи Петра Великого, оказались совершенно непригодными для продолжительных океанских плаваний как из-за их тихоходности, так и из-за многочисленной команды. Великие географические открытия были сделаны с помощью крохотных парусных судов, использующих даровую энергию ветра, имевших сравнительно небольшой экипаж и, главное, двигавшихся в среднем намного быстрее весельных галер*).

Совсем иная картина была на суше. Расхожая реплика российских извозчиков «а овес-то нынче почему!» очень метко отражала экономику транспорта в эпоху, когда лошадь оставалась основным и почти единственным средством сухопутных перевозок. Как мы уже отмечали, повышение цен на овес в Европе в период наполеоновских войн заставило промышленно развитые страны искать новые пути выхода из столь серьезного по тем временам энергетического кризиса.

Радикальное решение проблемы сухопутных перевозок, родившееся впервые в Англии, состояло в невиданном по темпам и масштабам развитии железных дорог с использованием тогда же появившихся паровых машин, работающих на местном

*) Исключение составляли древнекитайские океанские парусные суда, строившиеся в VII — XV веках. Достигая 140 м в длину, такие парусники имели несколько палуб и экипаж, насчитывающий сотни моряков. Двигаясь вдоль восточного побережья Китая со средней скоростью около 3,5 узла (примерно 6,5 км/ч), эти средневековые гиганты огибали Малайский полуостров и шли на Запад, достигая Индии, а в отдельных случаях южно-аравийских и даже восточно-африканских стран.



каменном угле. Машинная тяга позволила перемещать огромные по тем временам грузы с невиданной скоростью, что, наряду с телеграфом, революционизировало общественные отношения и послужило мощным толчком к развитию промышленности во всех ведущих капиталистических странах.

Но вместе с тем перед человечеством впервые встала во весь рост проблема топливной базы, решаемая на первых порах почти целиком с помощью сжигания дров и каменного угля. Только в Англии добыча этого полезного ископаемого возросла за 16 лет, начиная с 1800 г., в три раза.

Ведущее положение этих двух видов топлива в мировой энергетике сохранялось с начала прошлого века еще на протяжении более ста лет с постепенным повышением доли каменного угля. Например, в США вклад каменного угля в топливную базу возрос к началу нашего столетия до 75% и оставался на этом уровне примерно до 1920 г. Так погоня за скоростью, начавшаяся в начале прошлого века, породила гигантскую и необычайно трудоемкую отрасль промышленности — подземную добычу каменного угля с помощью прокладки шахт, глубина которых в отдельных случаях достигала нескольких тысяч метров.

Во второй половине прошлого века, в первую очередь в США и России, стала бурно развиваться добыча нефти и газа, достигшая в наше время поистине глобальных масштабов и составляющая сегодня основу мировой энергетики. Достаточно сказать, например, что вклад нефти и газа в энергетику США составил к 1980 г. около 80%. О колоссальной роли топливной базы в современном хозяйстве свидетельствует, в частности, то, что общая масса нефти, потребляемой сейчас в США, на 40% больше суммарной массы продовольственных продуктов, металла, бетона и дерева, производимых в этой самой богатой капиталистической стране. Свыше половины всей этой нефти расходуется на транспорт, причем только в автомобилях сжигается ежегодно свыше 200 млн. т этого ценного продукта, запасы которого быстро истощаются и о котором наш великий химик Д. И. Менделеев справедливо сказал: «нефть — не топливо, топить можно и ассигнациями».

Привыкнув видеть в автомобилях и самолетах некий символ технического прогресса и считая запасы энергии практически неограниченными, мы часто не представляем себе энергетическую рентабельность «быстрой езды», которую, как оказалось, любят не только русские, но и практически все народы мира.

Подсчитано, что только в США, где автодорожный транспорт поглощает около 7,5% всей потребляемой энергии, эконо-

мический эффект от снижения потерь на трение может составить 11 млрд. долларов в год.

Какая же величина характеризует эффективность (рентабельность) нашего движения? Ясно, что, с одной стороны, она должна быть пропорциональна скорости — ведь мы стремимся проводить в пути как можно меньше времени. В то же время, экономя горючее, мы заинтересованы в том, чтобы сила сопротивления нашему движению была как можно меньше. В результате описывающая эффективность движения величина должна быть обратно пропорциональна силе сопротивления. В качестве искомой величины удобно использовать безразмерное отношение

$$K = \tilde{v}/f(v),$$

где \tilde{v} — отношение скорости перевозки к скорости пешехода и $f(v)$ — отношение силы сопротивления к весу груза при заданной скорости v .

Очевидно, что значение K тем выше, чем больше скорость перемещения и чем меньше преодолеваемое сопротивление. Отсюда следует, что наиболее рентабельный способ повышения числа K состоит в наращивании скорости перемещения, но с одним важным условием: сопротивление движению, создаваемое средой, должно при этом расти как можно медленнее.

При действии закона Амонтона, когда сухое трение $f(v)$ о дорогу не зависит, как мы помним, от скорости, выгодно всячески увеличивать скорость перемещения v . При этом K растет пропорционально v . Но уже при ламинарном жидкостном трении, где $f(v)$ пропорционально v , число K при увеличении скорости движения сохраняется постоянным. Наконец, при турбулентном жидкостном трении, когда $f(v)$ растет уже пропорционально квадрату и более высоким степеням v , число K с ростом скорости перемещения резко уменьшается, т. е. рентабельность падает.

К сожалению, именно последний случай типичен для основных видов нашего транспорта: поездов, автомобилей, тепловозов и самолетов. В итоге каждый новый скоростной рубеж, достигаемый на транспорте и вызывающий всеобщее ликование, оплачивается все более непомерными расходами топлива!

Это отчетливо видно из приведенной таблицы, в которой с помощью числа K сопоставляется рентабельность средств перемещения, используемых на разных этапах развития нашей цивилизации. Оказывается, что лучшие показатели отнюдь не у автомобиля и самолета — этих признанных королей транс-

Таблица

Эффективность различных типов транспорта

Способ транспортировки	$v^*)$	$F(v)$	K
Волок	1,0	0,300	3,5
Повозка с лошастью	1,5	0,075	20
Гребное судно	3,0	0,006	500
Парусное судно	4,0	0,003	1300
Железная дорога	15	0,006	2500
Теплоход	10	0,004	2500
	15	0,015	1000
Автомобиль	15	0,075	200
	30	0,200	150
Самолет	200	1,100	180

*) По отношению к скорости пешехода $v_0 = 1$ м/с

порта, по праву считающихся гордостью нашего века. Оба они сильно уступают старым добрым парусным судам, от которых (не слишком ли легкомысленно?) мы поспешили отказаться. Показатели парусника выглядели бы еще более впечатляющими, если бы мы учитывали стоимость затрачиваемой энергии, которая, очевидно, здесь чрезвычайно низка, хотя и не равна нулю, поскольку необходимо считаться с использованием какой-то другой энергии при полном безветрии.

Далее, мы видим, что наибольшая эффективность перевозок достигалась при использовании таких сравнительно тихих средств, как обычный железнодорожный локомотив и морской теплоход, после чего с появлением автомобилей и самолетов число K резко пошло на убыль. Объясняется это, как легко догадаться, быстрым ростом сопротивления среды при увеличении скорости движения.

В самом деле, при скорости 80 км/ч на преодоление сопротивления воздуха затрачивается половина мощности современного автомобиля, в то время как при $v = 130$ км/ч этот показатель близок уже к $2/3$. Параметр $F(v)$ (аналогичный по смыслу коэффициенту трения) возрастает у легкового автомобиля соответственно от 0,16 до 0,33, что во много раз превышает коэффициент трения автомобильного колеса по хорошему шоссе.

Еще более разительна картина у «королей воздуха». Современный реактивный лайнер, имея на борту 150 пассажиров и двигаясь со скоростью 700–900 км/ч, сжигает ежедневно 4–6 т горючего. Только для подъема на крейсерскую высоту 9000 м авиалайнер «Боинг-747» затрачивает около 12 т горю-

чего, не считая огромного количества атмосферного кислорода. А вот и еще один довольно удручающий пример. Американский космический челнок «Шаттл» выбрасывает в атмосферу всего за один старт около 100 т ядовитых хлористых соединений.

Преодоление трения о воздух как обязательная плата за все возрастающую скорость земного транспорта превратилось в проблему трения номер один. Поэтому можно предположить, что наряду со средствами решения этой задачи, о которых мы рассказали выше, уже в ближайшие десятилетия получат распространение иные методы, основанные на практически полном устранении среды как таковой! Речь идет об использовании вакуумированных тоннелей, позволяющих без особых энергетических затрат развить скорости в сотни и даже в тысячи км/ч.

Трассы подобного типа со скоростью движения 400—600 км/ч уже эксплуатируются в Японии. Число K таких суперэкспрессов составляет, по нашим оценкам, около 10^4 , т. е. превышает рекордный показатель, достигнутый в свое время на железнодорожных поездах и морских теплоходах. Однако и этот рекорд — далеко не предел.

Известен, например, проект гигантского вакуумированного тоннеля американца Р. Слоттера, предусматривающий использование уже знакомого нам линейного электродвигателя и подвеску кабин с помощью мощного магнитного поля, создаваемого сверхпроводниками. Имея фантастическую скорость 9600 км/ч, подземный трансконтинентальный суперэкспресс «Планетран» покроет расстояние между Нью-Йорком и Лос-Анджелесом, находящимися по разные стороны материка, за какой-нибудь час. При этом 97% энергии, затраченной на разгон экспресса, возвратится в сеть на стадии его торможения.

Число K для транспортных единиц подобного типа достигает $10^5 - 10^6$, подтверждая тем самым поистине неисчерпаемые возможности быстрого движения без трения. К этому следует добавить полную независимость подобного транспорта от погодных условий — преимущество, которым не обладает почти ни одно из современных средств передвижения, за исключением, может быть, метро и подводных лодок.

А парусная тяга? Невероятно, но факт: энергетический кризис, охвативший нашу планету в конце столетия, возрождает даровую и не отравляющую атмосферу парусную тягу в самых различных вариантах. XXI век станет веком возрождения парусов, — утверждают эксперты. По их мнению сокращение расхода топлива примерно на 20% при средней скорости 10—20 узлов может быть достигнуто в первую очередь на малых судах,

включая небольшие танкеры. В Японии уже имеется такой парусный танкер, оснащенный на случай штиля и дополнительно маневрирования мощным дизелем. Стерильность и бесшумность парусников привлекла внимание и военных специалистов, считающих возможным использовать их в качестве охотников за подводными лодками противника!

Конечно, возрождение паруса происходит с применением новейших достижений технологии, включающей новые материалы для такелажа и парусов, а также полностью автоматизированное управление парусами и всем кораблем с помощью бортового компьютера. Невольно вспоминается лермонтовское «Не слышно на нем капитана, не видно матросов на нем ...» Словом, становится явью поистине волшебный корабль, бесшумно скользящий по волнам.

Рассказывая о парусной тяге, нельзя не упомянуть и о другой гораздо более могучей силе, бесплатно представляемой природой — силе тяготения.

«Можно убедиться, что земля поката:
Сядь на собственные ягоды и катись»,

— пошутил некогда В. Маяковский. И в этой шутке есть доля инженерной правды.

Взобравшись на высокую ледяную гору, можно и впрямь скатиться довольно далеко, не затрачивая никакой энергии: за нас работает незримое и вездесущее тяготение, обладающее к тому же поразительным свойством: его сила растет пропорционально массе груза. Это равносильно тому, что тяга обычного автомобиля возрастала бы сама собой по мере его загрузки! Не в сказке, а наяву все получается как «по щучьему велению». Правда, необходимая энергия все равно затрачивается при подъеме в гору.

А нельзя ли «запрячь» эту умную и щедрую силу так, чтобы она тянула не с маленькой горки, а на сотни и тысячи километров, причем без предварительного расхода энергии? Оказывается, можно! И решается такая, поистине фантастическая, задача по идее удивительно просто: с помощью гигантского подземного тоннеля, прорытого по хорде, соединяющей две точки на поверхности Земли. Наблюдателям, находящимся как в начале, так и в конце тоннеля, он будет представляться наклонным и уходящим под некоторым углом вглубь. Не мудрено, что по такому тоннелю можно катиться, как с горки, но ... с любой его стороны! Весь фокус состоит в том, что сила тяжести тянет кабину с ускорением только до половины тоннеля. А оставшийся путь разогнавшаяся до большой скорости кабина преодолевает уже по инерции.

Рассмотрим модель такого гравитационного туннеля более подробно. Если угол наклона туннеля α_0 невелик, то можно пренебречь изменением силы тяжести при движении тела по туннелю. Однако важно учесть, что сила тяжести $F_T = mg$ все время направлена к центру Земли, а значит, проекция этой силы, заставляющая тело двигаться к центру туннеля, равна $mg \sin \alpha$. При малых углах $\sin \alpha \approx \tan \alpha = x/R \cos \alpha_0 = x/R$, поэтому проекция силы тяжести на ось x равна $mg x/R$ и пропорциональна смещению тела от центра туннеля. Согласно второму закону Ньютона уравнение движения тела в туннеле

$$ma = -\frac{mg}{R}x,$$

т. е. ускорение тела a и его смещение x связаны точно таким же соотношением, как и для обычного математического маятника с длиной нити, равной R . А значит, и движение тела в туннеле представляет собой гармонические колебания с периодом $T = 2\pi\sqrt{R/g}$.*).

Время t , за которое тело достигнет противоположного конца туннеля, равно половине периода $t = \pi\sqrt{R/g}$ и зависит только от радиуса Земли и значения g . С ростом наклона растет и длина туннеля, но одновременно увеличивается и скорость движения в нем. В результате время прохождения туннеля не меняется.

Подставив в формулу для t значения $R = 6,37 \cdot 10^6$ м и $g = 9,81$ м/с², получим $t = 42,2$ мин — время, за которое необычный туннель может теоретически доставить нас в любую точку поверхности земного шара независимо от расстояния! Причем без затраты какого-либо топлива или вообще энергии. Не правда ли, здорово? Добавим, что закон сохранения энергии при этом отнюдь не нарушается, точно так же, как он остается неизбылемым при вращении планет вокруг Солнца, на что не расходуется никакой энергии.

А какова скорость движения по такому туннелю? Длина туннеля равна $2R \sin \alpha_0$, поэтому средняя скорость

$$v_{\text{ср}} = \frac{2R \sin \alpha_0}{t} = \frac{2 \sin \alpha_0}{\pi} \sqrt{Rg}.$$

При угле наклона $\alpha_0 = 2^\circ$ скорость $v_{\text{ср}} = 635$ км/ч, причем максимальная скорость в середине туннеля ровно в полтора раза больше средней.

*) Интересно отметить, что период колебаний в туннеле совпадает с периодом обращения спутника вокруг Земли.

Но это пока только теория. На деле гравитационным силам воспрепятствует трение кабины о воздух, которое при таких скоростях, как мы знаем, чудовищно велико. Поэтому тоннель необходимо вакуумировать.

Энергию, теряемую на трение, можно постараться компенсировать, например, в самом начале разгона кабины линейным электродвигателем. После этого основную часть пути кабина пройдет уже по инерции, и лишь на последнем участке пути потребуется дополнительная тяга.

В итоге обеспечивается не только сверхвысокая скорость, но и полная безопасность перевозок пассажиров и грузов. Кроме того, в отличие от другого дарового источника тяги — ветра, непостоянство и капризы которого вошли в поговорку, гравитационная тяга всегда к нашим услугам, автоматически возрастающая по мере роста массы груза, что мы уже отмечали.

Почему же столь удобный и экономичный способ передвижения пока практически не используется? Прежде всего, потому, что длина и глубина тоннеля быстро растут с увеличением угла наклона, уже при $\alpha = 2^\circ$ достигая 450 км и 4 км соответственно. А это влечет за собой гигантскую стоимость строительства. Здесь необходима принципиально новая техника прокладки тоннелей, которую людям еще предстоит создать.

И все же истинные возможности гравитационной тяги становятся понятными лишь в результате прорыва человека в космос. Затратив немалые усилия на преодоление земного тяготения, космонавты получают возможность двигаться затем по баллистической траектории к Луне, Венере, Марсу и другим планетам, используя уже их собственное притяжение.

Особенно изящно выглядит осуществляемый в наше время удивительный проект, в котором космический аппарат, посланный с Земли, последовательно «подтягивается» и разгоняется Юпитером, Сатурном, Ураном и Нептуном, что позволит людям исследовать эти находящиеся на колоссальных расстояниях от нас небесные тела, используя в основном лишь силу их собственного тяготения — быть, превосходящая по своей дерзости и остроумию самые захватывающие сказки барона Мюнхгаузена.

Все это прекрасно, но как избавиться от гигантского сопротивления атмосферы при разгоне и выводе на орбиту ракет-носителей, число которых уже в недалеком будущем достигнет многих тысяч? На первый взгляд используемый сегодня, и прямо скажем, варварский, способ пробивания на огромной скорости всей толщи воздуха, представляется, увы, единственно возможным.

Остроумное решение предложил советский изобретатель А. Юницкий, проект которого равно поражает как своей смелостью, так и глобальными масштабами. «Взаимодействие со средой, — рассуждает изобретатель, — можно устранить только тогда, когда используются внутренние силы. Подобно тому как барон Мюнхгаузен тащил себя за волосы из болота, гипотетический транспорт должен перемещаться, ни на что не опираясь. Безопорное статическое равновесие может быть только в центре масс планеты ... Решение напрашивается само собой. Нужно охватить Землю кольцом».

Мысль автора ясна: Мюнхгаузен заведомо врал, поскольку при самоподъеме его центр масс поднимался относительно Земли. В то же время подъем за счет внутренних сил кольца, опоясывающего Землю, вполне возможен, поскольку его центр масс, совпадая с центром планеты, остается при этом неподвижным. Но где взять эту внутреннюю силу?

Дальнейшее развитие идеи видится так. Гигантское транспортное кольцо, способное вместить 400 миллионов человек и 200 миллионов тонн груза, вначале совершенно неподвижно и охватывает земной шар по экватору. Кольцо в состоянии равномерно растягиваться и сжиматься по всей длине окружности.

Легко подсчитать, что при постепенном растяжении кольца всего на 0,8 % его диаметр возрастет на 100 км. Это означает, что кольцо, медленно и практически не встречая сопротивления внешней среды, поднимется над Землей на 50 км, оставив под собой основную толщу атмосферы.

Метод самоподъема путем растяжения кольца внутри чрезвычайно остроумен и может использовать уже знакомые нам средства: кольцевой линейный электродвигатель и находящийся в вакууме в мощном магнитном поле ротор-маховик. При «раскрутке» на Земле до первой космической скорости маховик становится невесомым, а при еще большей скорости вращения обретает подъемную силу и поднимает кольцо вверх, расширяясь вместе с ним.

При дальнейшем расширении кольцо достигнет орбиты искусственных спутников, превратившись в причальную базу и стартовую площадку космических кораблей за пределами атмосферы ...

Ценность подобных научно-фантастических проектов, прежде всего, в том, что они бесстрашно ломают привычные, сложившиеся на протяжении многих лет инженерные традиции и стереотипы мышления, подготавливая почву для нового поколения ученых и конструкторов, способного мыслить глобальными категориями.

Из всего сказанного следует, что дальнейшее убыстрение наземного транспорта, определяемое извечной погоней за самым важным, по словам Маркса, видом экономии — экономией времени, уже немыслимо без радикального решения проблемы трения и, прежде всего, трения о воздух. Избавление от этого чудовищного сопротивления не только означает экономию сотен миллионов тонн ценнейшего сырья — нефти, но и открывает дорогу к созданию сверхбыстрого наземного транспорта, раз и навсегда решающего проблему перевозок грузов и людей. И можно надеяться, что такое решение уже не за горами.

ТРЕНИЕ, СПОРТ И... ИСКУССТВО

Научно-технические проблемы трения — это понятно, но при чем тут спорт, а тем более искусство? Но спорт и такой, скажем, распространенный вид искусства, как танцы, — это, прежде всего, механическое движение, которое, следовательно, неизбежно связано с трением, и еще как связано!

В основе самого популярного в мире вида спорта футбола — быстро и легко катящийся по полю мяч. Отсутствие такой возможности в регби, где мяч катиться не может, поскольку имеет форму тыквы, приводит к коренному изменению характера всей игры.

Кто не знает, что при выявлении победителей соревнований и регистрации рекордов счет в ряде популярных видов спорта идет сейчас уже на сотые, а то и на тысячные доли секунды, как, например, в бобслее, давно включенном в программу зимних Олимпийских игр. И сопротивление движению спортсменов в таких скоростных видах спорта нередко играет решающую роль. С другой стороны, для многих видов спорта, например спринтерского бега и прыжков, а также футбола и баскетбола, типичны мгновенные ускорения атлетов, что требует мощного отталкивания от дорожки, игрового поля и т. д., т. е. значительного трения.

Лыжнику или конькобежцу не надо говорить о роли трения при скольжении по снегу или льду. Правда, нелегкая проблема лыжных мазей в какой-то мере упростилась с появлением пластиковых лыж, не нуждающихся в смазке и имеющих для исключения «отдачи» особую насечку. Тем не менее и здесь осталось еще немало тонкостей и секретов, тщательно оберегаемых асами лыжных трасс и их тренерами. На недавних зимних Олимпийских играх в Сараево американский чемпион в лыжных гонках привлек всеобщее внимание тем, что выступал на засекреченных лыжах, которые бдительно охранял специальный страж. Лыжи извлекались из особого футляра только перед самым стартом и вновь упрятывались туда же сразу после финиша. Правда, ожидаемая сенсация не состоялась: американец не попал даже в десятку сильнейших.

Понятие «быстрый лед» применительно к высокогорным каткам Медео или Давоса давно уже стало синонимом скрупулезной подготовки льда на основе хитроумных рецептов, известных широкой публике лишь в самом общем виде. Впрочем, лед, в отличие от лыжных мазей, — один для всех и дает спортсменам равные шансы. Другое дело — коньки. Здесь даже малозаметное изменение в конструкции может привести к ре-

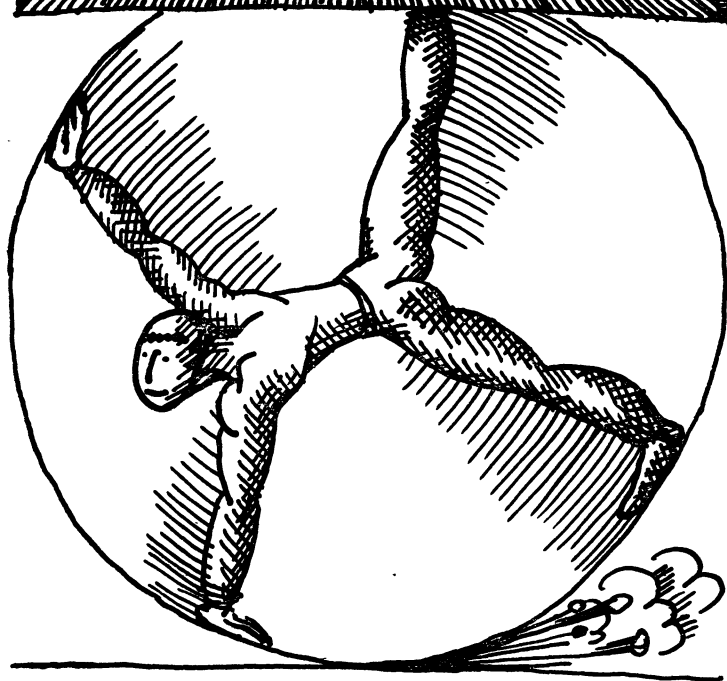
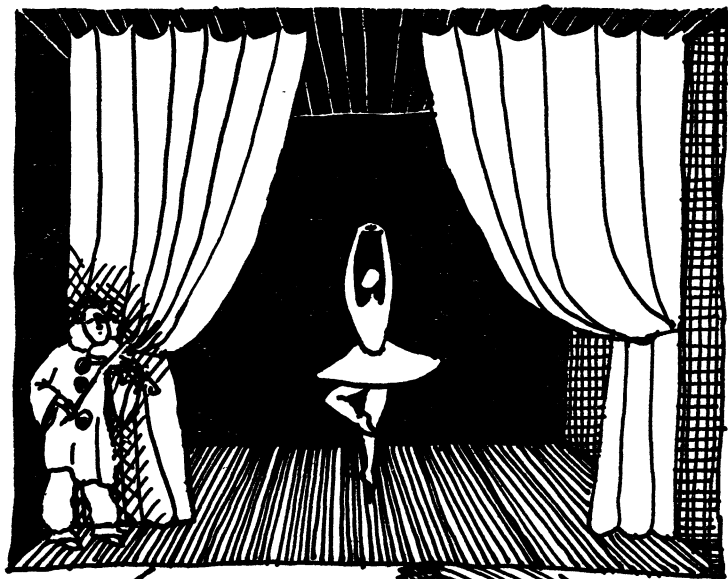
корду или золотой медали. Напомним, что малое трение конька обеспечивается таянием льда в результате ... его трения о лед.

Здесь нет противоречия. Сухое трение, необходимое для расплавления льда, обязательно возникает лишь в передней части конька, постоянно набегающего на свежий лед. Все дальнейшее зависит от последующего перераспределения тепла в зоне контакта конька со льдом, на что, в свою очередь, в решающей мере влияют теплофизические свойства лезвия конька. Сюда-то и направлена в основном изобретательская инициатива. Не менее важную роль играют тепловые свойства и состояние полозьев в саночном спорте. Именно поэтому предстартовый подогрев полозьев, каким бы то ни было способом, категорически запрещен правилами состязаний.

При скоростном спуске на санях и горных лыжах костюмы и снаряжение спортсменов должны быть максимально обогреваемыми, дабы свести к минимуму встречное сопротивление воздуха. Этот минимум достигается теперь путем использования специальных тканей и материалов, а также «продувкой» спортсменов или их манекенов в аэродинамических трубах. Однако и в спорте сопротивление набегающего потока воздуха — далеко не всегда зло. Вспомним о коварных, захватывающих дух ударах «сухой лист» в футболе или знаменитых крученых подачах в волейболе и теннисе. Все эти виртуозные приемы, доставляющие особое удовольствие любителям и знатокам спортивных зрелищ, основаны на довольно сложных аэродинамических эффектах и были бы совершенно невозможны в пустоте.

А что в этой связи можно сказать о метании спортивных снарядов? Здесь вырисовывается довольно любопытная картина. Оказывается, что наличие плотной атмосферы в одних случаях неплохо помогает метателям, а в других — явно мешает установлению рекордов. Атлет, перенесенный на Луну, вполне способен метнуть ядро раз в шесть дальше, чем на Земле. Иное дело спортивное копье: уподобившись планеру, оно уже унеслось в рекордном броске спортсмена за стометровую отметку!

На Луне, как мы знаем, нет атмосферы, зато сила тяжести ослаблена в шесть с половиной раз. На Марсе сила тяжести в два раза меньше земной, а атмосфера сильно разрежена. В итоге мы не беремся судить, кто стал бы победителем в метании копья в заочных соревнованиях землян с представителями этих небесных светил. Примерно то же можно сказать и о прыжках в длину. Ведь прыжку предшествуют мощный разбег и толчок, которые зависят от силы трения между подош-



вой спортсмена и беговой дорожкой. Эта сила по закону Амонтона на Луне меньше в 6,5 раз, т. е. ровно во столько, во сколько благодаря ослабленной тяжести должна возрасти при данной скорости разбега длина прыжка. Иными словами, меньшая сила тяжести, давая лунному прыгуну одно преимущество, тут же лишает его другого, не менее важного.

Лыжи и коньки — издавна занятие сезонное, более того, возможное до недавнего времени лишь в странах с относительно холодным климатом. Современная техника позволяет исправить это положение к восторгу не только заядлых спортсменов и болельщиков, но и самых широких слоев населения. Катки с искусственным льдом позволяют сейчас проводить многие состязания при относительно теплой погоде, а то и в закрытых помещениях, где погода не играет роли вообще.

Появление пластиков с различными фрикционными свойствами позволило в одних случаях создать беговые дорожки, футбольные поля и корты с искусственными покрытиями, а с другой — решить еще более сложную задачу: заменить скользкий снег на горнолыжных трассах и трамплинах. Для этого, как оказалось, наиболее целесообразно использовать материалы, имеющие не только достаточно низкий коэффициент трения, но и рифленую поверхность. Добавим к этому, что круглогодичные тренировки лыжников-равнинников уже который год ведутся с помощью лыжероллеров, где легкое скольжение с отталкиванием имитируется очень оригинально: с помощью роликов, способных катиться только вперед.

А хоккей с шайбой! Немногие, наверное, задумывались над тем, что этот «взрывной» и приобретший огромную популярность вид спорта обязан своим происхождением ... трению, точнее, весьма малому трению при скольжении плоской резиновой шайбы по льду. Именно это обстоятельство позволяет хоккеистам поддерживать невиданный темп игры, осуществляя молниеносные комбинации.

Завоевавшее всеобщее признание фигурное катание на коньках органически сочетает в себе спорт и искусство самой высокой пробы. Но в чем, собственно, особая и неповторимая прелесть танцев на льду? «И вдруг прыжок, и вдруг летит, летит как пух из уст Эола ...» Это сказано А. Пушкиным о знаменитой балерине классического стиля. Какими же словами можно описать поистине волшебное по своей легкости и изяществу парение танцевальных пар на льду, стремительное движение которых не требует, как представляется со стороны, никаких усилий!

Да простят нас почитатели и знатоки ледовой эстетики «за этот прозаизм», но в основе чарующего действия балета на

льду явно скрыт технический или, если угодно, физический эффект, о котором уже говорили: необычайно низкое трение при скольжении конька по льду. Возможность галилеева движения по инерции не только создает здесь сказочное ощущение свободного полета, но и раскрепощает исполнителей, позволяя им целиком сосредоточиться на чисто эстетических моментах: выразительности жестов, скульптурности поз и т. д. Иными словами, лежащая в основе любого вида танцевального искусства легкость и непринужденность движений достигаются в данном случае не только с помощью бесчисленных тренировок и репетиций, но и благодаря важнейшему техническому приему: устранению трения, сковывающего движения артистов.

Возможно, кто-то и не согласится с нами, заявив, например, что столь грубые попытки «поверить алгеброй гармонию» всегда несостоятельны и тот же классический балет великолепен по-прежнему и не нуждается в каких-то там технических трюках. При всей деликатности вопроса заметим все же, что развитие искусства, так же как и спорта, немыслимо без сильного влияния и помощи со стороны технического прогресса. Об этом в равной мере свидетельствует как непрерывное повышение качества и пополнение арсенала спортивного инвентаря, так и пристальное внимание режиссеров-постановщиков ко всевозможным техническим новинкам.

ПОДСКАЗКИ БИОНИКИ

Бионика — одна из самых молодых областей науки. Занимается она техническими решениями, которые придумал не человек, а сама природа, «конструируя» растительные и животные организмы. Решения эти достаточно сложны и необычны, поэтому разобраться в «чертежах» природы не так-то просто.

Собственно, никаких чертежей и нет, а есть только сами организмы, живые и мертвые, исследование которых требует специальной подготовки и аппаратуры, использующей самые последние достижения науки и техники. Бионика позволяет расшифровать сложнейший технологический язык природы, корни которого уходят, как правило, в описание и анализ процессов, идущих на молекулярном уровне.

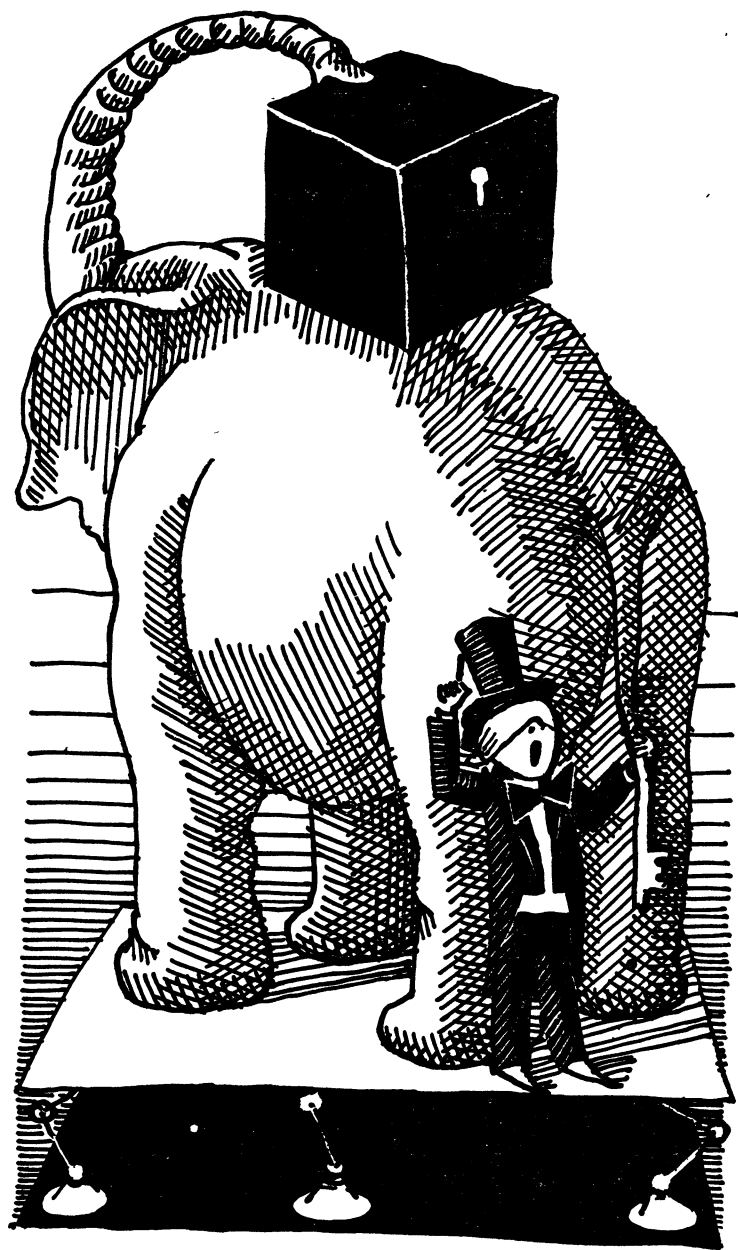
Такая «игра», бесспорно, «стоит свеч»: внимательно изучая устройство биологических систем, инженеры получают шансы найти новые решения важнейших технических задач, связанных, например, с получением и обработкой информации или способностью роботов выбирать оптимальные пути для достижения поставленной перед ними цели.

Наша задача куда более скромна. Мы хотим ознакомить читателя с методами, избранными природой для решения проблем трения как внутри живых организмов, так и для обеспечения их передвижения. При этом необходимо иметь в виду, что устройство всякого живого организма — результат длительной, продолжавшейся сотни миллионов лет эволюции.

Благодаря естественному отбору, сохранились лишь те варианты конструкций, которые обеспечивали приспособляемость и стабильное выживание организмов в естественных условиях. Именно этим объясняется поразительная взаимосвязь живого и неживого, наблюдаемая нами в природе.

Выше мы говорили о том, как умело и ловко используются для сухопутного передвижения живых существ такие методы, как хождение и ползание, близкие, в определенном смысле, к качению. При этом мы ни словом не обмолвились о беге. «А какая, собственно, разница между ходьбой и бегом, — скажет читатель, — ведь принцип перемещения здесь один и тот же». Верно, но разница все-таки есть, и о ней отлично знает любой судья по спортивной ходьбе.

При беге периодически возникают моменты, когда ни одна из ног не касается земли, чего нет при перемещении шагом. Иными словами, чрезвычайно распространенный в животном мире бег представляет собой сочетание ходьбы с прыжками.



И лишь одно из самых оригинальных животных — кенгуру, передвигаясь, как и человек, всего на двух ногах, не бежит, а скачет, причем гигантскими прыжками, достигающими многих метров в длину. О том, насколько хорош этот своеобразный способ передвижения, свидетельствует то, что кенгуру, наряду с гепардом, считается самым быстроходным из млекопитающих.

«Позвольте, — возразит дотошный читатель, — откуда, собственно, известно, что четвероногие бегут, а не ходят, и как доказать, что хотя бы одна из ног не касается земли?» Любопытно, что еще лет сто тому назад ответить на это замечание было и впрямь невозможно. Лишь появление кинематографа и спортивной фотографии позволило надежно установить, что движение лошади рысью — именно бег, а не ходьба.

Вспомнив о качении, отметим, что это явление все-таки используется природой и в его прямом, так сказать чистом, виде. Мы имеем в виду необычное степное растение, известное в народе под названием перекасти-полё. После созревания плодов наземная часть его отламывается от корня, приобретает шаровидную форму и гонимое ветром легко катится по земле, рассеивая семена.

Выше мы упоминали о том, что кожа дельфина обладает особым демпфирующим действием, позволяющим, по-видимому, гасить турбулентность. Эта гипотеза, высказанная еще в 1957 г. немецким инженером М. Крамером, в настоящее время подтверждена экспериментально. Установлено, в частности, что передняя часть тела дельфина действительно обтекается ламинарно, тогда как позади спинного плавника пограничный слой становится турбулентным.

В то же время другая интересная гипотеза, согласно которой дельфин сбрасывает завихрения с помощью складок кожи, движущихся по телу животного в направлении от головы к хвосту, была опровергнута исследованиями профессора Ю. Алеева.

В опытах приняли участие спортсменки-пловчихи, которые по размерам и контурам тела вполне соответствовали требованиям эксперимента. С помощью скоростной подводной киноъемки было установлено, что при быстром плавании спортсменок, а также при буксировке их в погруженном состоянии со скоростью 2—4 м/с у всех испытуемых возникли на торсе и бедрах вполне отчетливые складки кожи, расположенные перпендикулярно движению. Такие же складки были обнаружены ранее американцем Ф. Эссапьяном на боках и брюшной поверхности дельфинов в момент резких ускорений и при плавании с максимальными скоростями.

Далее, выяснилось, что подобные складки возникают только под действием внешних гидродинамических сил, причем они не только не снижают сопротивление движению, а, наоборот, увеличивают его! Это подтвердила буксировка тех же пловчих в специальных облегающих костюмах. Больше того, выяснилось, что у брюшной и боковых поверхностей дельфина имеются особые мышцы, которые, по всей видимости, препятствуют образованию складок, повышающих сопротивление и вызывающих болевые ощущения.

Поразительным образом решается в живой природе инженерная задача равномерного прокачивания жидкостей по трубам. В момент «рабочего хода» сердца артерии упруго расширяются, накапливая энергию. Зато в промежутках между сокращениями сердечных мышц скопленная в артериях энергия проталкивает кровь дальше в более мелкие сосуды, обеспечивая не только постоянство скорости движения, но и меньший расход энергии. Упругость сосудов возникает благодаря присутствию в артериальных стенках особого вещества — эластина. Вполне возможно, что снижению потерь на трение способствует также особый, напоминающий ламинарный, режим течения в периодически расширяющихся и сжимающихся сосудах.

Проблема трения и изнашивания в суставах решена природой на таком уровне, о котором инженеры-трибологи могут пока только мечтать. Особенно ярко это прослеживается на примере тазобедренного сустава человека — этого, пожалуй, наиболее изученного на сегодня естественного узла трения. Здоровый человек вряд ли задумывается о том, какие жесткие требования предъявляются к его тазобедренным суставам: ежедневные динамические нагрузки, превышающие тысячу ньютонов при прыжках, практическое отсутствие трения и изнашивания, никакого особого «техобслуживания» и ... безотказная работа в течение всей жизни! Как же достигается подобное совершенство?

Ответить на этот вопрос оказалось не так-то легко. Изучение тазобедренного сустава медиками, биофизиками и трибологами, десятки серьезных научных статей и оживленные дискуссии выявили чрезвычайно сложную картину, не сводимую к тем традиционным представлениям о трении и смазывании, которые сложились у инженеров и ученых-трибологов. Оказалось, например, что поверхности трения сустава покрыты особой хрящевой тканью, пропитанной удивительной, так называемой синовиальной, жидкостью. Именно в этой среде и осуществляется, как выяснилось, подвижный контакт костей.

Эта жидкость по своему составу сходна с плазмой крови, но обладает значительно большей вязкостью, чем кровь. Одна-

ко внутреннее трение синовиальной жидкости падает в сотни раз при резком повышении градиента скорости! Кроме того, тончайший слой этого необычного вещества ведет себя при сжатии примерно так же, как слой резины. Впрочем, подобными свойствами обладают в какой-то мере и другие разбавленные растворы высокополимерных веществ.

Режим трения, возникающий при скольжении в столь специфической среде, имеет весьма мало общего с уже знакомым нам жидкостным и граничным трением. Под периодической внешней нагрузкой, например при ходьбе, жидкость начинает выдавливаться из капилляров хряща, усиливая смазочное действие. В результате коэффициент трения оказывается весьма малым, приблизительно равным 0,003. Но такое представление о работе сустава оказалось слишком упрощенным. Дело в том, что синовиальная жидкость обладает, по-видимому, необычной способностью резко увеличивать вязкость под давлением. В итоге процесс выдавливания смазки из хряща автоматически регулируется под действием нагрузки.

Но и такая модель служит лишь грубым приближением к действительности, поскольку она не учитывает тонких процессов в зоне контакта. По некоторым данным синовиальная жидкость обладает свойствами жидких кристаллов — особых веществ, способных к весьма совершенной ориентации и резко-му изменению различных свойств под действием слабых электромагнитных полей.

Такие поля присутствуют в нашем организме, активно участвуя в регулировании многочисленных процессов жизнедеятельности. Возможно, что эти поля оказывают определенное влияние и на работу суставов, исключая усталость тканей и их изнашивание.

Увы, при всем совершенстве природных узлов трения болезнь и преклонный возраст способны время от времени нарушить идущие в них тончайшие процессы саморегулировки. Последствия в этом случае особенно тяжелы: человек практически лишается возможности нормально ходить. И тогда на помощь ему приходит современная медицина: вышедший из строя сустав удаляется хирургическим путем и заменяется искусственным! Такие вживленные в организм суставы называются эндопротезами.

Но вмешательство в деятельность человеческого организма требует самых тщательных предварительных проверок, на которые уходят обычно годы. И это естественно: риск, связанный с человеческой жизнью, при любых обстоятельствах должен быть сведен к минимуму. С другой стороны, наш организм настолько сложен и взаимосвязан, что любая неосторожная по-

пытка «помочь» ему чревата самыми неожиданными и серьезными последствиями.

В СССР была создана установка, имитирующая работу тазобедренного сустава человека при ходьбе. Благодаря ей длительность клинических испытаний можно резко сократить и свести к минимуму риск, которому подвергается больной. Лабораторный «сустав» смазывается так называемой изоплазмой, нагретой до температуры человеческого тела и близкой по вязкости и ряду других свойств к плазме крови.

Материалы, из которых изготавливаются эндопротезы, помимо отличных фрикционных свойств, обязаны удовлетворять особым требованиям, предъявляемым медициной: не вступать в химическое взаимодействие с кровью и лимфой и иметь минимум продуктов изнашивания, притом совершенно безвредных для организма. Последнее требование было практически невыполнимым, пока эндопротезы выполнялись из металлических сплавов. Мельчайшие частицы изношенного металла постепенно проникали в организм, вызывая в конце концов страшную болезнь — металлоз.

Сейчас такой исход полностью исключен, поскольку на трение в эндопротезах работают только керамические и полимерные материалы. Такие устройства могут использоваться годами без вреда для организма, однако и они не идут пока ни в какое сравнение с конструкциями, созданными самой природой.

И тем не менее вызов, брошенный инженерам и ученым эволюцией, совершенствовавшей свои шедевры на протяжении десятков миллионов лет, принят. Можно не сомневаться в том, что тайна работы тазобедренного сустава, равно как и другие трибологические секреты природы, будут раскрыты уже в ближайшем будущем. В итоге узлы трения совершенно нового типа, не нуждающиеся в смазке и работающие практически без изнашивания, будут использованы не только в живых организмах, но и в технике, в частности в роботах, применяемых на больших глубинах океана, в космосе и в других экстремальных условиях.

Наряду с материальными ресурсами, даруемыми природой, человек, накапливая постепенно опыт и знания, берет у окружающего мира и использует в своих целях нечто не менее важное — ценнейшую информацию об устройстве этого мира, включая сюда по нарастающей сложности неживое вещество, растения, животных и ... самого себя.

ЧТО ЖЕ НАС ЖДЕТ В БУДУЩЕМ?

Рассказывая о самых разнообразных сторонах и задачах трения, мы нередко обращались к прошлому, приводя характерные и поучительные, на наш взгляд, примеры из самых различных эпох. Мы поступали так потому, что без знания истории просто невозможно по-настоящему понять содержание и оценить общественную значимость столь сложной и многообразной проблемы. Больше того, без анализа опыта прошлого мы вряд ли в состоянии оценить, хотя бы в общих чертах, дальнейший ход событий.

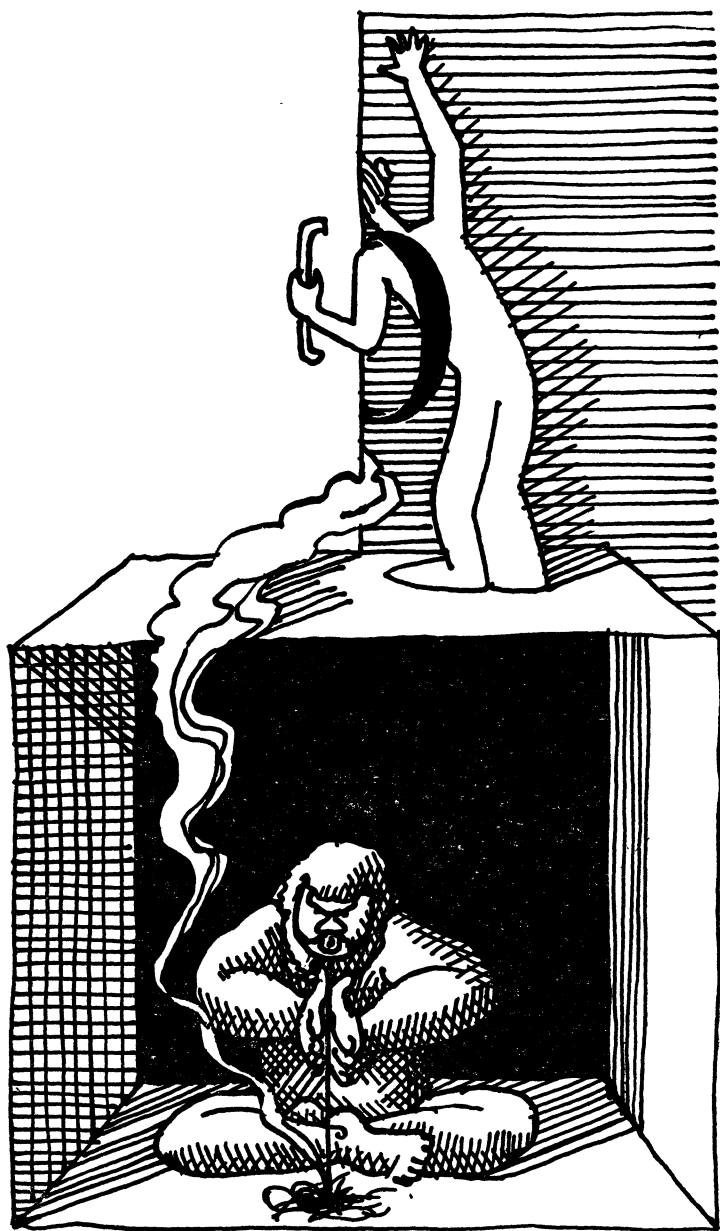
Мы убедились, что еще в древние времена человек научился побеждать трение, приручив быков и лошадей, додумавшись до рычага и колеса, построив первые лодки и парусники и поняв важную роль смазки в работе машин. Интересно, что ко всем этим выдающимся техническим находкам люди пришли без всякой науки, которой в те далекие времена просто не существовало, опираясь с тем или иным успехом на смекалку безывестных умельцев и житейский опыт, передававшийся из поколения в поколение.

Не менее любопытно, что почти все методы борьбы с трением и изнашиванием, счастливо обретенные в древности, благополучно дожили до нашего времени, хотя и были сильно развиты и улучшены. Например, полностью сохранил значение колесный транспорт, основа которого — автомобиль — имеет те же четыре колеса, что и архаическая телега.

Бурный научно-технический прогресс, начавшийся примерно два века назад, привел к тому, что инженерные решения, одно лучше другого, все чаще и увереннее стали приходить из области науки. Помимо коренного усовершенствования старинных и уже известных способов, были открыты и изобретены принципиально новые приемы укрощения трения, к числу которых можно отнести, в первую очередь, гидродинамический эффект, теорию быстрого движения тел в плотных средах, синтез тefлона, магнитную подвеску, вакуумирование транспортных тоннелей и выход человека в космос.

В основе всех этих достижений, как нетрудно убедиться, лежали два главных обстоятельства. С одной стороны — все более глубокое понимание физики поверхностных явлений и процессов рассеяния механической энергии в теплоту, а с другой — неизмеримо выросший технологический потенциал современной инженерии.

Но, заканчивая книгу, мы так или иначе обязаны ответить на естественный вопрос: а что же дальше? Не отомрут ли эти,



представляющиеся нам сегодня столь серьезными, проблемы уже в ближайшем будущем? А может быть, удовлетворенные крупными успехами, достигнутыми в управлении трением, люди просто махнут рукой на эту проблему, посчитав ее второстепенной по сравнению со многими другими, например освоением термоядерной энергии или овладением глубин Мирового океана.

Возможен, наконец, и третий вариант. Четко сознавая огромные трудности, связанные с трением внутри механических систем и их взаимодействием с окружающей средой, ученые и конструкторы, создающие новые виды техники, будут все чаще отказываться от использования механических систем, заменяя их, скажем, лазерными, сверхпроводящими и электронными устройствами.

Чему же учит опыт истории? Главный вывод, который напрашивается, состоит в том, что зародившаяся еще на заре цивилизации насущная потребность людей в преодолении трения неизменно сохраняла свою остроту во все времена и эпохи. Научно-техническая революция, ознаменовавшаяся примерно два века назад изобретением парового двигателя, решив одни задачи трения, тут же поставила на повестку дня другие, еще более сложные и важные проблемы, отражающие общий технологический прогресс. Подобная ситуация сохраняется и до настоящего времени.

Энергетические и материальные потери на трение и изнашивание, как это следует из цифр, приведенных в нашей книге, по-прежнему огромны. Более того, они продолжают чудовищно расти по мере неумолимого ускорения транспортировки грузов и людей. Энергетический кризис, все более ощутимо охватывающий нашу планету и связанный главным образом с истощением запасов нефти и газа, настоятельно требует экономии ископаемого горючего, сжигаемого в десятках миллионов двигателей внутреннего сгорания. Все это свидетельствует о том, что проблемы трения не только сохраняют свою жизненность в ближайшие десять — двадцать лет, но и «весомо, грубо, зримо» перейдут в следующее тысячелетие, настоятельно требуя своего эффективного разрешения.

Подобная «живучесть» проблем трения объясняется, прежде всего, тем, что человек использует в технологии примерно те же принципы, которые природа заложила в него самого. Поэтому в могучем и разнообразном техническом арсенале современных людей, по-прежнему, как и тысячелетия назад, властвуют механические устройства. А они-то, в свою очередь, не способны обойтись без совершенных узлов трения, надежных уплотнений и износостойких исполнительных органов.

Что же касается атомных реакторов и лазеров, вышедших из физических лабораторий и играющих все большую роль в современной энергетике и технологии, то и их промышленное использование просто невозможно без многочисленных механических устройств и агрегатов.

Как бы ни были грандиозны и своеобразны цели, которые преследует человек, будь то обуздание «термояда», покорение Мирового океана или прорыв в космос, *средства* достижений этих целей остаются и, по-видимому, останутся в обозримом будущем по преимуществу механическими. Таким образом, мы можем сказать, что многочисленные проявления трения органически присущи нашей технологии с самого момента ее зарождения.

С другой стороны, непрерывный рост требований, предъявляемых человеком к машинам, безусловно, повлечет в грядущем еще более активный поиск новых и эффективных путей решения проблем трения. О некоторых из таких путей мы уже упоминали, рассказывая о совсем «молодых» видах транспорта и перспективных смазочных материалах, а также о широких возможностях, предоставляемых криогенной технологией. Многого следует ожидать и от использования инженерных решений, подсказываемых нам живой природой. Наконец, огромные резервы таятся в овладении секретами упорядочивания вещества на микроуровне, открывающими дорогу к устранению сухого трения и созданию безызносных фрикционных пар.

Но, прогнозируя дальнейшие судьбы трибологических проблем, мы не можем не считаться и с тем, что феномен трения в нашей жизни настолько универсален, что определяется всем жизненным укладом людей. Поэтому более или менее серьезные изменения в этом укладе порождают, с одной стороны, новые, невиданные ранее проблемы трения, а с другой — решительно отодвигают на задний план затруднения, считавшиеся еще вчера весьма серьезными.

В начале нашего века, когда первые автомобили стали появляться на улицах все чаще, одна из американских газет с оптимизмом предсказывала грядущее избавление горожан от неприятного цокота лошадиных копыт по булыжной мостовой и от грязи. Сейчас, когда чрезмерное скопление автомобилей в городах стало чуть ли не главной причиной загрязнения и отравления окружающей среды, такое «пророчество» напоминает скорее карикатуру и может вызвать лишь саркастическую улыбку.

Тем более сложно сейчас предсказать социальные и другие последствия «электронного рая», с уверенностью обещаемого

нам чудесами техники. Тем не менее ясно одно: каким бы он ни был, этот «рай», проблемы, о которых мы попытались рассказать в книге, безусловно, сохраняют свою значимость и в обозримом будущем.

А раз так, то к раскрытым тайнам трения, безусловно, добавятся новые, не менее захватывающие проблемы, загадки и парадоксы, разрешать которые будет суждено уже следующему поколению исследователей и инженеров. Если среди них окажутся хотя бы некоторые из молодых читателей этой книги, то автор станет считать свою задачу выполненной.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. ТАИНСТВЕННЫЙ ЗНАКОМЕЦ	5
Глава 2. ЭСТАФЕТА ТИТАНОВ	11
Глава 3. ОТКУДА ЖЕ БЕРЕТСЯ ТЕПЛОТА?	23
Глава 4. ПОЧЕМУ МЫ ХОДИМ?	30
Глава 5. ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ	37
Глава 6. ДА ЗДРАВСТВУЕТ КОЛЕСО!	44
Глава 7. ЗАГАДКА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ	53
Глава 8. НОВАЯ ПРОФЕССИЯ КОЛЕСА	60
Глава 9. ПЕРПЕТУУМ МОБИЛЕ ВОЗМОЖЕН?!	67
Глава 10. НА ТРЕНИЕ РАБОТАЕТ ЖИДКОСТЬ!	75
Глава 11. ТРЕНИЕ ПОЛЕЗНО!	82
Глава 12. А МАШИНАМ ВСЕ ТЯЖЕЛЕЕ	91
Глава 13. ТРИ БОГАТЫРЯ	98
Глава 14. ТРЕНИЕ ИСЧЕЗЛО!	105
Глава 15. КОГДА МАШИНАМ ЖАРКО	113
Глава 16. ЧУДЕСА «ХОЛОДНОГО» ТРЕНИЯ	120
Глава 17. МЫ НА ЛУНЕ!	128
Глава 18. МАТЕРИАЛ – КЕНТАВР	136
Глава 19. В ЦАРСТВЕ НЕПТУНА И ПЛУТОНА	143
Глава 20. ВОДЕ И ВЕТРУ НАВСТРЕЧУ	151
Глава 21. РАСПЛАТА ЗА СКОРОСТЬ	163
Глава 22. ТРЕНИЕ, СПОРТ И... ИСКУССТВО	175
Глава 23. ПОДСКАЗКИ БИОНИКИ	180
Глава 24. ЧТО ЖЕ НАС ЖДЕТ В БУДУЩЕМ?	186

Аскольд Александрович Силин

ТРЕНИЕ И МЫ

Серия «Библиотечка «Квант», вып. 57

Редактор *Л. П. Русакова*
Художник *П. И. Чернуский*
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*
Технический редактор *Е. В. Морозова*
Корректор *И. Я. Кришталь*

ИБ № 12277

Сдано в набор 24.06.86. Подписано к печати 30.12.86. Т-25 529. Формат 84 × 108/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура таймс. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,5. Уч.-изд. л. 11,24. Тираж 150 000 экз. Заказ № 461. Цена 35 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136 Ленинград П-136, Чкаловский пр., 15

35 коп.
