

## ЛИТЕРАТУРА

- Аппель П. Теоретическая механика. М.: Физматгиз, 1960.
- Боголюбов А. Н. История механики машин. Киев: Наукова думка, 1964.
- Веселовский И. Н. Очерки по истории теоретической механики. М.: Высшая школа, 1977.
- Галилей Галилео. Избранные труды. М.: Наука, 1964.
- Гарднер М. Теория относительности для миллионов. М.: Атомиздат, 1979.
- Герц Г. Принципы механики, изложенные в новой связи. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
- Григорьян А. Т. Механика от античности до наших дней. М.: Наука, 1974.
- Гулиа Н. В. Инерционные аккумуляторы энергии. Воронеж: Воронежский государственный университет, 1973.
- Гулиа Н. В. Накопители энергии. М.: Наука, 1980.
- Гюйгенс Х. О центробежной силе. Три мемуара по механике. М.: Изд-во АН СССР, 1951.
- Даламбер Ж. Л. Динамика: Трактат. М.; Л.: Гостеортехиздат, 1950.
- Декарт Р. Избранные произведения. М.: Изд-во АН СССР, 1950.
- Динамика инерционных трансформаторов, проводов и устройств. Челябинск, 1976.
- Ишлинский А. Ю. Механика относительного движения и силы инерции. М.: Наука, 1981.
- Мальцев В. Ф. Импульсивные вариаторы. М.: Машгиз, 1963.
- Ньютон И. Математические начала натуральной философии. СПб., 1915.
- Павлов В. А. Гироскопический эффект, его проявление и использование. Л.: Судостроение, 1978.
- Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. М.: Наука, 1970.
- Эйлер Л. Основы динамики точки. М.; Л.: ОНТИ, 1938.
- Эйнштейн А. Физика и реальность. М.: Наука, 1965.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора . . . . .	3
От автора . . . . .	8
<b>Глава I. Физика об инерции . . . . .</b>	<b>9</b>
Что такое инерция? . . . . .	9
Инерция в античной механике . . . . .	11
Инерция в доньютоновскую эпоху . . . . .	14
Инерция и Ньютон . . . . .	19
Инерция и принцип Д'Аламбера . . . . .	23
Инерция и «бессиловая» механика Герца . . . . .	27
Инерция вращения . . . . .	30
Механика относительного движения и эйлеровы силы инерции . . . . .	35
Инерция в теории относительности . . . . .	40
Дискуссия о силах инерции . . . . .	46
<b>Глава II. Использование инерции в машинах . . . . .</b>	<b>52</b>
Инерционное и «псевдоинерционное» движение . . . . .	52
Инерция и «выравнивание» хода машин . . . . .	57
Инерция и рекуперация механической энергии . . . . .	63
Инерция малых движений . . . . .	80
<b>Глава III. Инерция и накопление энергии . . . . .</b>	<b>90</b>
Инерция и проблема аккумулятора . . . . .	90
Снижение потерь энергии . . . . .	92
Супермаховик — перспективный инерционный аккумулятор . . . . .	100
Неуравновешенность маховиков и ее устранение . . . . .	113
Переменный момент инерции . . . . .	121
<b>Глава IV. «Загадочные» проявления инерции . . . . .</b>	<b>127</b>
Инерция и гироскопический эффект . . . . .	128
Инерционные «химеры» . . . . .	144
Литература . . . . .	151



Цена 50 коп.



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«НАУКА»  
ВЫХОДИТ  
ИЗ ПЕЧАТИ  
КНИГА:

НЕЙМАРК А. М.

**Роботы на службе человека.**

10 л., 65 к.

Книга посвящена современным промышленным роботам и их использованию в различных отраслях народного хозяйства. Автор излагает классификацию и структуру роботов, современные системы управления, созданные в СССР и за рубежом. Рассмотрены возможные области применения роботов в промышленных и непромышленных областях.

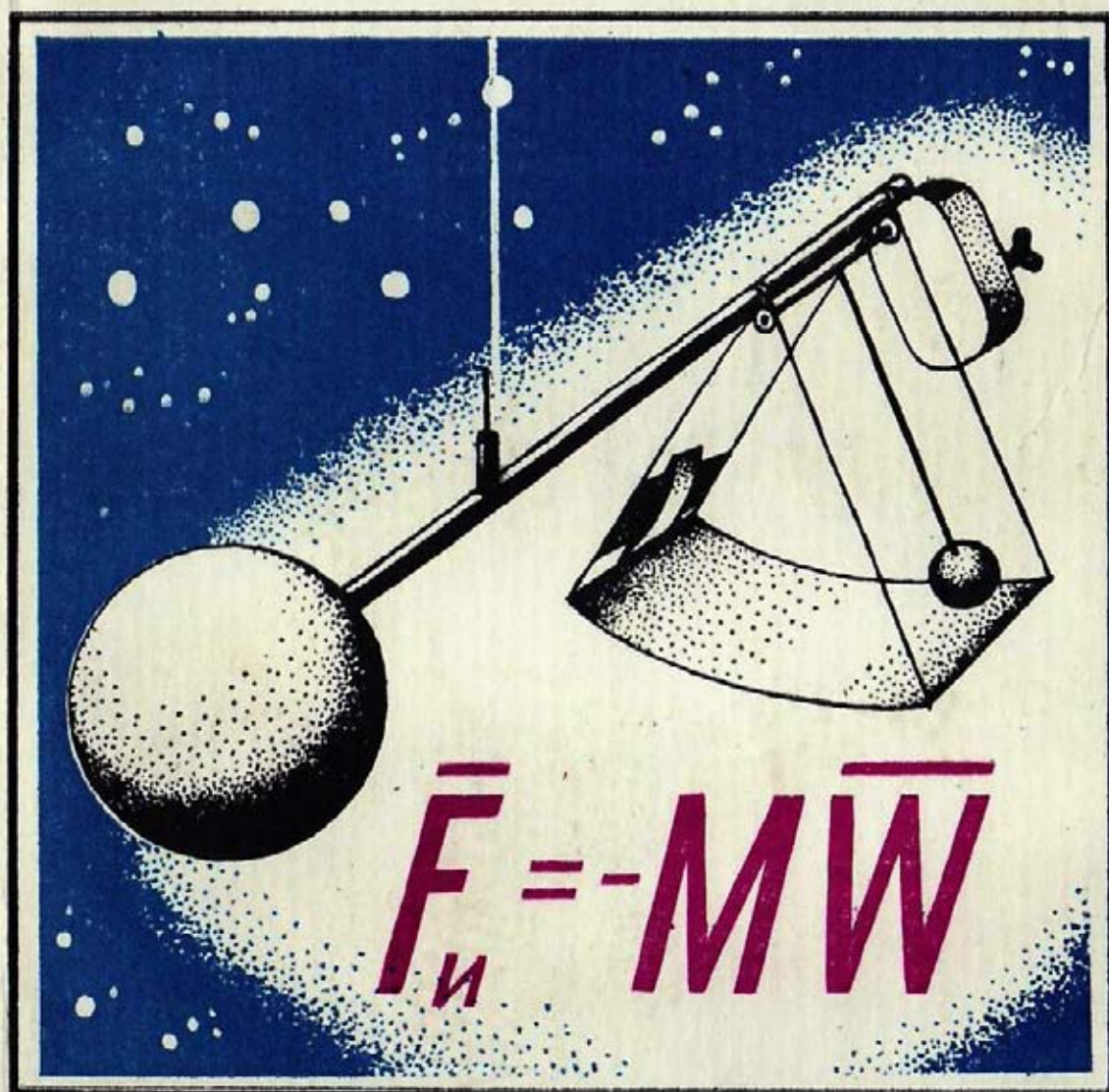
Книги можно предварительно заказать в магазинах Центральной конторы «Академкнига», в местных магазинах книго-торгов или потребительской кооперации без ограничений.

Для получения книг почтой заказы просим направлять по адресу: 117192 МОСКВА В-192, Мичуринский проспект, 12, магазин «Книга-почтой» Центральной конторы «Академкнига»; 197110 ЛЕНИНГРАД П-110, Петрозаводская ул. 7, магазин «Книга-почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига» или в ближайший магазин «Академкнига», имеющий отдел «Книга-почтой».

ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

Н.В.ГУЛИА

## ИНЕРЦИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА



АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Серия «Наука и технический прогресс»

Н. В. ГУЛИА

# ИНЕРЦИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1982

**Г94 Гулиа Н. В. Инерция.**— М.: Наука, 1982.— 152 с., ил.— (Серия «Наука и технический прогресс»).

Инерция — одно из самых фундаментальных свойств природы — необычайно широко используется человечеством. В книге рассказывается об основных явлениях, связанных с инерцией, об использовании этих явлений в технике, в частности рассматриваются гироскопические приборы, инерционные двигатели, перспективные инерционные механизмы. Приводятся современные воззрения на инерцию и силы инерции, разбираются ошибки, вызванные их неправильной трактовкой и использованием.

Доктор технических наук, профессор по кафедре теоретической механики Н. В. Гулиа — автор многих трудов, разрабатывающих вопросы инерции, и новых машин, связанных с использованием инерции.

17.3.1

Ответственный редактор  
академик  
А. Ю. ИШЛИНСКИЙ

Нурбей [Владимирович Гулиа  
ИНЕРЦИЯ

Утверждено к печати редколлегией серии научно-популярных изданий АН СССР

Редактор издательства Н. Б. Прокофьева. Художник М. М. Бабенков  
Художественный редактор Н. А. Фильчагина  
Технический редактор Т. С. Жарикова. Корректоры Н. Г. Васильева,  
Л. И. Лепанова

ИБ № 24559

Сдано в набор 23.12.81. Подписано к печати 26.03.82. Т-03965.

Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 2. Гарнитура обыкновенная  
Печать высокая. Усл. печ. л. 7,98. Усл. кр. отт. 8,3

Уч.-изд. л. 8,4. Тираж 40 000 экз. Тип. зак. 1220. Цена 50 коп.

Издательство «Наука» 117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90  
2-я типография издательства «Наука» 121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

© Издательство «Наука», 1982 г.

Г  $\frac{1703010000-183}{054(02)-82}$  9—82 ИП



## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Книга Н. В. Гулиа — гимн основному свойству материи — инерции, проявляющемуся и в явлениях природы, и в творениях человека. Книга дает правильное представление о том, что такое инерция тел, если рассматривать их движение в рамках классической механики. Автор рассказывает об истории изучения инерции, выясняет происхождение ряда терминов в механике, критикует неверные трактовки механических явлений, и особенно попытки создать устройства (инерцоиды), ускорение центра масс которых происходило бы под действием внутренних сил за счет вращательного или иного движения составляющих частей этих устройств при изоляции их от внешних воздействий.

Значительное место отводится вопросу накопления, хранения и дальнейшего целесообразного расходования кинетической энергии вращающихся твердых тел, особенно применительно к транспорту (автобусам, метро) и, в частности, к столь необходимым сейчас в народном хозяйстве погрузчикам. Особое место занимает описание различных устройств и их основы — маховика. Многие из устройств — плод творчества самого автора, причем некоторые из них осуществлены на практике и оказались весьма перспективными. Конструирование современных маховиков — накопителей кинетической энергии, или так называемых супермаховиков, требует большого инженерного мастерства, преодоления значительных трудностей, связанных с прочностью и целостностью самого маховика, снижением трения, созданием редукторов с переменным передаточным числом, долговечностью устройства, его экономичностью и т. п. Автор книги все это прекрасно понимает и квалифицированно указывает на возможность использования здесь последних достижений науки и техники.

В методологическом отношении весьма полезно прово-



димое автором книги строгое разграничение между свойством инерции и силой инерции. Словом «сила» инерции в прошлом нередко именно и обозначали свойство инерции, в общежитийском же смысле оно встречается и сейчас. Слово «сила», как известно, используется в самых разных смыслах — сила упругости, сила электрического тока, живая сила, сила ума, привычки, характера и т. п.

Что же касается понятия «сила инерции» в механике, то здесь автор проявляет похвальную категоричность, относя ее к разряду псевдосил, вводимых для упрощения конкретных расчетов и, разумеется, не существующих на самом деле, фиктивных. На этом следует остановиться особо.

Классическая механика — это как бы своеобразная модель картины мира, движения реальных тел, оправдывающаяся на практике с исключительной точностью. Следующей по времени моделью является релятивистская механика, в которой существенную роль играет скорость распространения электромагнитных колебаний, в частности видимого света, принимаемая в уравнениях движения за постоянный параметр. Если сделать предельный переход в результате устремления этого параметра в бесконечность, то законы релятивистской механики, или механики специальной теории относительности, обращаются в законы механики классической.

Понятия пространства, времени, массы, силы, в том числе силы инерции, в релятивистской механике несколько иные, чем в классической. Исключительное значение приобретает понятие энергии.

Дальнейшим шагом является, как известно, механика общей теории относительности с ее зависимостью кривизны пространства от присутствия масс и принципом локальной неотличимости поля тяготения от поля сил инерции переносного движения.

Нельзя, как правило, переносить содержание отдельных понятий из механики специальной и из механики общей теории относительности в механику классическую. На получающуюся при этом некую эклектическую механику обрушивается автор книги. И он прав.

Классическая механика постулирует наличие «абсолютной» системы координат с началом в центре масс Солнечной системы и с осями, направленными к «неподвижным» звездам. Пространство принимается за евклидово,



время считается независимой категорией, «абсолютным», всюду текущем одинаково.

Каждое тело (точнее, материальная точка) ускоряется в такой системе координат под воздействием других тел. Мера этого воздействия называется силой, силой физической, или ньютоновой, естественной — по определению. Ускорение обратно пропорционально массе тела, его мере инерции. Верен закон действия и равного, противоположно направленного противодействия — третий закон Ньютона. Всякой ньютоновой силе, т. е. воздействию одного тела на другое, присуща равная, противоположно направленная и действующая по той же прямой сила воздействия второго тела на первое.

Векторные величины, хотя бы и называемые по ряду причин силами и имеющие ту же размерность, но не вызывающие «абсолютного» ускорения и не имеющие отношения к третьему закону Ньютона, таким образом, не являются физическими, ньютоновыми или естественными силами. Таким образом, если, по определению, именовать последние силы реальными, то, как следствие, все другие силы, также по определению, надлежит именовать, а в рамках классической механики и считать, силами перереальными, фиктивными, псевдосилами или как либо еще. Во всяком случае, такие силы не ньютоновы.

Так называемые силы инерции, встречающиеся в классической механике, как раз и являются в этом смысле силами фиктивными. В классе реальных сил, т. е. сил, вызывающих «абсолютное» ускорение и имеющих противодействие, их нет. В исходных уравнениях движения по отношению к «абсолютной» системе координат, а также и «галилеевой» (равномерно и поступательно перемещающейся относительно «абсолютной») они отсутствуют. Появляются силы инерции лишь при модификации записи уравнений движения как обозначения отдельных их членов, соответствующих некоторым искусственно вводимым векторам, модуль которых имеет размерность силы.

Силы инерции в классической механике, в свою очередь, делятся на два класса: даламберовы и эйлеровы. Под последними предлагается понимать совокупность переносных и кориолисовых сил инерции, встречающихся при изучении движения по отношению к подвижным системам координат. Введение и даламберовых, и эйлеровых сил инерции оказывается полезным для пояснения ряда меха-



нических явлений, составления удобных, наиболее простых уравнений движения, определения сил связей и внутренних усилий.

При использовании даламберовых сил инерции, по существу, производится следующая мысленная операция. «Абсолютному» (или по отношению к некоторой галилеевой системе координат) движению механической совокупности материальных точек либо тел (твердых, жидких, газообразных) ставится в каждое мгновение времени в соответствие точно такая же воображаемая совокупность с теми же физическими силами, однако «абсолютно» (или относительно галилеевой системы) неподвижная — своеобразный мгновенный снимок движущейся механической совокупности, произведенный «абсолютно» неподвижным наблюдателем. Каждая даламберова сила равна произведению элементарной массы механической совокупности на ее «абсолютное» ускорение и направлена в противоположную сторону. Вследствие этого если к каждой элементарной массе воображаемой совокупности приложить соответствующую даламберову силу инерции, считая ее условно как бы физической («квазиньютоновой»), то такая совокупность останется пребывать в «абсолютном» покое. Физические силы и даламберовы силы инерции образуют взаимно уравновешенную систему сил, которую можно назвать «даламберовым равновесием». Внутренние усилия и силы реакции, разумеется, останутся теми же и могут определяться методами статики, что, как правило, нагляднее.

В самом деле, маховик или веревка, удерживающая движущийся по окружности камень, разрываются в этой воображаемой схеме физическими силами, равными центробежным силам инерции, когда последние становятся достаточно большими. Однако в соответствии с законами классической механики разрушение маховика или обрыв веревки происходят вследствие недостаточной прочности их материала, не позволяющей осуществить заданное движение с большими ускорениями.

Следует, таким образом, помнить, что «даламберово равновесие» является лишь воображаемой моделью, точнее: расчетной схемой истинного «абсолютного» движения, и даламберовы силы инерции как физические (реальные, по определению) не существуют. В рамках классической механики — это лишь удобные вспомогательные, искусственно вводимые векторные величины. То же отно-



сится и к эйлеровым силам инерции, которые позволяют истинное движение условно рассматривать как «абсолютное». А именно, вновь вводится идентичная заданной воображаемая механическая совокупность, на которую действуют точно такие же ньютоновы (т.е. физические, или естественные) силы. Абсолютное движение такой совокупности будет точно копировать относительное движение исходной, если к ньютоновым силам добавить еще дополнительные физические силы. Они, как нетрудно сообразить, соответственно равны эйлеровым силам инерции, обусловленным относительным движением реальной механической совокупности по отношению к заданной подвижной системе координат.

Таким образом и здесь, по существу, используется некая модель истинного движения, в которой эйлеровы, т.е. переносные и кориолисовы, силы инерции становятся как бы реальными физическими силами. Однако это — всего лишь модель. При торможении железнодорожной платформы плохо укрепленный предмет начинает движение по отношению к ней не потому, что на него начинает действовать сила инерции переносного движения. С точки зрения классической механики он просто стремится продолжать то же движение, что и до торможения, удерживаемый в какой-то степени силами, развиваемыми креплением к платформе. Однако первая трактовка нагляднее. Надо лишь точно оговорить, что платформа принимается условно за неподвижную, и вследствие этого надлежит ввести как бы физические («квазиньютоновы», ибо они по имеют никакого отношения к третьему закону Ньютона) силы, равные переносным силам инерции. И тогда все становится ясным и верным.

В заключение отмечу ясную трактовку автором определения «движение по инерции». В самом деле, строго говоря, движение по инерции возможно лишь у тела, перемещающегося поступательно при отсутствии внешних сил. Тем не менее в быту так обозначается движение при малом сопротивлении, например автомобиля или поезда без тормозов по горизонтальному пути. Вращение маховика, его выбег при малом трении в подшипниках тоже можно условно отнести к движению (вращению) по инерции.

*А. Ю. Ишлинский*



— Когда весь бензин вышел, автомобиль принужден был остановиться... И после этого ещё болтают об инерции, господа!.. Ну не смешно ли?..

*Я. Гашек.* Похождения храброго солдата Швейка во время мировой войны

## ОТ АВТОРА

Давайте вместе посмеемся над невежеством полковника Крауса фон Целлергута, произнесшего столь нелепую тираду, но, посмеявшись, задумаемся. Действительно, а как же инерция? Ведь говорят, что автомобиль после выключения двигателя движется по инерции. И в школьных учебниках написано, что движение по инерции — равномерное, прямолинейное. Стало быть, гашековский автомобиль, двигаясь по инерции, ехал бы до сих пор и продолжал бы ехать целую вечность.

Надо заметить, что гашековский герой — не единственный, кто имеет достаточно туманное представление об инерции. К сожалению, несмотря на полную ясность этого понятия в классической механике, неправильная его трактовка имеет место по сей день. Целью этой книжки и является попытка популярно изложить правильное, с точки зрения современной механики, воззрение на проблемы инерции и так называемые силы инерции. При этом теоретические рассуждения для большей доказательности подкрепляются практическими примерами: описанием устройств, использующих в своей работе инерцию (кстати, весьма перспективных).

В заключении разбираются основные ошибки, связанные с неправильной трактовкой сил инерции, их действия на реальные механические системы. Рассматриваются и «загадочные» проявления инерции, дающие почву для попыток создания «безопорных движителей» — так называемых инерцидов и аналогичных «химер» в технике.



## Глава I

### ФИЗИКА ОБ ИНЕРЦИИ

#### Что такое инерция?

«Инерция» — (*inertia*) в переводе с латинского означает «покой», «бездействие». Под инерцией, или инертностью, понимают стремление тела сохранить неизменным свое состояние по отношению к инерциальной (в первом приближении неподвижной) системе отсчета. То есть если на тело не действуют никакие внешние силы (приложенные со стороны других тел и вообще окружающей среды) или если эти силы уравновешивают друг друга, то тело, или, по крайней мере, центр его массы, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения (а это в классической механике то же, что покой, — так называемый относительный покой). Если же на тело или заменяющую его массивную (материальную, т. е. не геометрическую, а обладающую какой-то реальной массой) точку действует неуравновешенная система внешних сил, оно постепенно начинает менять скорость своих точек (массивная точка — собственную скорость). Под действием одинаковых сил более инерционные тела (более инертные) медленнее изменяют свою скорость. Конечно, слово «постепенно» странно слышать, когда речь идет, например, об ударе или выстреле, но тем не менее скорости и там меняются постепенно: не мгновенно. Разгоняющуюся пулю или бильярдный шар можно скоростной кинокамерой заснять на пленку и убедиться, что тело (шар или пуля) приобрело скорость не мгновенно, а постепенно — правда, очень быстро.

Мерой инерции тела является его масса. Природа массы пока не выяснена. Условно принято считать, что масса элементарной частицы определяется полями, с ней связанными, — электромагнитным, ядерным и др., однако количественной теории массы еще не создано.

Проявляется свойство инерции в так называемой инерциальной системе отсчета. Ранее мы говорили, что в пер-



вом приближении это — неподвижная система. Но ведь ничего абсолютно неподвижного в мире нет — все движется друг относительно друга. Земля вращается вокруг своей оси и вокруг Солнца, не говоря уже о возмущениях ее движения из-за движения других планет. Солнце движется относительно центра Галактики, а Галактика разбегается относительно центра мира, который... и т. д.

Как же тогда быть с инерциальной системой отсчета, где справедлив закон инерции, говорящий, что массивная точка, если на нее не действуют никакие неуравновешенные силы, находится в состоянии относительного покоя, т. е. она может быть неподвижной относительно какой-нибудь инерциальной системы отсчета или двигаться равномерно и прямолинейно относительно нее или другой инерциальной системы? Более того, всякая система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно по отношению к инерциальной системе отсчета, сама делается инерциальной. Следовательно, может существовать сколько угодно инерциальных систем отсчета, т. е. действует принцип относительности (принцип относительности классической механики — не путать с теорией относительности Эйнштейна).

Однако если наша система отсчета движется по отношению к инерциальной системе неравномерно или непрямолинейно, то она не может быть инерциальной, так как в ней уже не будет соблюдаться закон инерции, не будут проявляться свойства инерции массивных тел, а следовательно, потеряют свою силу законы движения и сохранения — основные законы механики. Произойдет это потому, что помещенная в неинерциальную систему материальная точка будет иметь ускорение даже при отсутствии внешних действующих сил, поскольку даже без них она будет участвовать в ускоренном поступательном или вращательном движении самой системы отсчета.

Таким образом, инерциальная система отсчета — это всего лишь научная абстракция. Реальная система отсчета всегда связывается с каким-либо конкретным телом — Землей, корпусом корабля, самолета или автомобиля, которое не неподвижно. Если мы захотим иметь очень точную (абсолютная недостижима) инерциальную систему отсчета, то должны будем поместить ее центр в центр Солнца — точнее, в центр массы Солнечной системы, а оси направить на три неподвижные (условно) звезды. Для большинства же технических задач центр инерциальной систе-



мы можно перенести из центра Солнца в центр Земли, а оси направить на те же звезды. В очень грубых случаях систему можно жестко связать с Землей, но тут ее неперциальность видна уже глазом: движется по кругу маятник Фуко в Исаакиевском соборе; реки северного полушария подмывают правые, а южного — левые берега; пушечное ядро, выстреленное вертикально вверх, падает не обратно в жерло пушки, а далеко в сторону, и т. п.

Как видим, понятие инерции — непростое. Поэтому имеет смысл начать ее изучение, так сказать, с истории вопроса: давайте перенесемся в Древнюю Грецию — колыбель науки — и посмотрим, как в античной механике зарождалось понятие инерции.

### Инерция в античной механике

Теоретическая механика родилась в Древней Греции в V в. до н. э. Интересно, что эта строгая и точная наука получила свое начало в театре. Греческое слово «механэ» (*μηχανή*) первоначально обозначало подъемную машину, которая в театрах поднимала и опускала актеров, изображавших богов. Главная часть механики — динамика, наука, изучающая движение реальных (массивных) тел под действием сил, — рассматривается уже в сочинениях Аристотеля (384—322 г. до н. э.). Аристотель под механическим движением понимал изменение места. Для современных людей существенно направление движения, куда движется предмет. Древних греков же интересовали только начальная и конечная точки движения. Это вызывало известную путаницу. Например, как быть с движением по кругу? Ведь здесь нельзя четко назвать отправную и конечную точки, не зная направления движения. Поэтому Аристотель и определил круговое движение как движение «из чего-нибудь в то самое» и особо подчеркивал, что круговое движение неограничено.

Аристотель различал два вида движения: естественное и насильственное. Естественное движение происходило само собой без вмешательства посторонней силы. Насильственное же требовало некоторого «двигателя». Такой двигатель должен был быть либо расположен в самом движущемся теле, либо находиться в непосредственном контакте с ним. В нашем понимании естественное движение, движение без приложения сил — это инерционное движение. Но древние греки здесь имели в виду нечто иное.



Естественное движение, по их мнению, представляло собой стремление тела занять свое «естественное» место в мире. Для тяжелых предметов, например: камней, металлических предметов и т. п., таким естественным местом была земля. Для легких же тел, например огня, естественным местом было небо. Поэтому камень сам по себе падал на землю, вниз, а огонь стремился на небо, вверх. И чтобы изменить это движение — иначе говоря, поднять камень наверх или сбить пламя вниз, нужно было приложить силу. Это естественное стремление тел занять «свои» места называлось *ропé* (*ρόπή*). В нижнем, подлунном мире, где все имело начало и конец, естественное движение должно быть прямолинейным, чтобы также иметь начало и конец. В верхнем же, надлунном мире, где все являлось вечным и неизменным, естественное движение должно быть вечным и неизменным — и, следовательно, круговым и равномерным. Таким им казалось движение светил. Это представление о естественности круговых движений дошло даже до Галилея, который считал, что движение по инерции должно быть круговым.

Как видим, понятие *ропé* — естественное движение — соответствует нашему понятию инерции. Современное понятие инерции связано с покоем или относительным покоем тела — равномерным прямолинейным движением. Если же находящееся в таком состоянии тело встречается с препятствием, подвижным относительно него, то возникают реальные силы, действующие на тело, и в ответ на это реакция тела на действие этих сил. У древних же греков, наоборот, естественное движение начинало проявлять себя тогда, когда движущееся тело встречало препятствие. Если в это время какая-либо точка тела оказывалась неподвижной, то инерция остальных точек заставляла их продолжать свое движение, т. е. вращаться вокруг неподвижной точки. Такую картину можно наблюдать на спокойной речке, когда плывущий плоский предмет, например лист фанеры, сталкивается с торчащей из воды веткой и начинает медленно поворачиваться вокруг нее. Таким образом, *ропé* проявлялось в виде вращающего момента. Если движение различных точек тела нейтрализовать (например, соединением с таким же телом, вращающимся в противоположную сторону), тело останавливается и наступает состояние равновесия под действием двух одинаковых, но противоположно направленных моментов.

Что же касается насильственного движения, то, как мы



уже говорили, для его возникновения нужна сила. Эта сила была названа Аристотелем динамис (δυναμις) и определена следующим хитрым образом: если  $\alpha$  — движущее,  $\beta$  — движимое тело,  $\gamma$  — длина, на которую оно продвинуто,  $\Delta$  — время, в течение которого оно двигалось, то в такое же время сила, равная  $\alpha$ , продвинет половину  $\beta$  на двойную длину  $\gamma$ , а на длину  $\gamma$  — в половину времени  $\Delta$ . При этом считалось, что движущее и движимое тела находятся в непосредственном контакте.

В современных обозначениях формула Аристотеля выражается так:

$$F = k \frac{PL}{T}, \quad (1.1)$$

где  $F$  — сила (у Аристотеля  $\alpha$ ),  $P$  — вес движимого тела,  $L$  — длина движения,  $T$  — время движения,  $k$  — коэффициент пропорциональности, подразумевавшийся Аристотелем. Величина  $P$  у Аристотеля имела к весу, а тем более к массе тела, лишь косвенное отношение.  $P$  — это сопротивление движению. При движении по твердой поверхности оно примерно пропорционально весу (силе тяжести) тела, выраженному через коэффициент, равный коэффициенту трения скольжения или качения, в зависимости от того, как двигалось тело — волоком или на колесах. Но если тело двигается в воде (как лодка), то сила сопротивления примерно пропорциональна скорости, а не весу тела, и формула Аристотеля теряет смысл.

Иногда формулу Аристотеля записывают и так:

$$F = mv, \quad (1.2)$$

где  $m$  — масса тела,  $v$  — его скорость, в среднем равная  $L/T$  (из формулы 1.1). Однако понятие массы было неизвестно Аристотелю, да и величина, стоящая перед скоростью, — по смыслу не масса, а сила сопротивления. Под силой Аристотель, скорее всего, понимал то, что на современном языке называется мощностью. Такое античное воззрение на силу отразилось на существующей до сих пор единице мощности — лошадиной силе. В действительности же лошадиная сила — это не сила, а работа «эталонной» лошади, отнесенная ко времени, в течение которого эта работа была совершена, т. е. мощность<sup>1</sup>. И возникла эта единица как количественная оценка паровой машины по мощ-

<sup>1</sup> Сущность аристотелевской силы подтверждает и терминология: если учесть, что греческое *δυναμις* переводится латинским *potentia*, что, в частности, соответствует французскому *puissance*, т. е. русскому «мощность».



ности, а, конечно, не по силе, которая в этом случае не имеет никакого смысла.

Попробуем определить движение по инерции по Аристотелевской формуле. Заменив в формуле (1.2) массу силой сопротивления и приписав к весу  $P$  коэффициент пропорциональности, например коэффициент трения  $k$ , получим

$$F = kPv. \quad (1.3)$$

Очевидно, если сила равна нулю, то и скорость будет такой же. Но Аристотель прекрасно знал, что стрела, выпущенная из лука, продолжает двигаться уже после того, как на нее перестает действовать сила тетивы; продолжает лететь камень, выпущенный из руки. На это у Аристотеля был свой ответ — так называемая теория антиперистасиса. Суть ее состояла в том, что в момент бросания камня рука приводит в движение не только камень, но и окружающую среду, в данном случае воздух. Рука сообщает окружающей среде некий «виртус мовенс» — способность передавать движение другим телам. Передвигаясь в соседнее место за счет «виртус мовенс», камень сдвигает новый участок среды и т. д. Замедление в процессе такого движения, происходящее за счет сопротивления среды, Аристотель объясняет тем, что при передачах «виртус мовенс» от камня к воздуху и обратно часть его теряется, и движение постепенно замедляется. Значит, в пустоте такого движения не должно происходить, но как раз только в пустоте можно осуществить движение по инерции, когда на тело не действуют силы сопротивления. Но Аристотель пустоты не признавал, он даже смеялся над теми, кто пытался использовать это понятие. «Что такое пустота?» — спрашивал он. И отвечал: «Это место без помещенных туда тел».

### Инерция в доньютоновскую эпоху

Развитие динамики как науки связано с именем великого итальянского ученого эпохи Возрождения Галилео Галилея (1564—1642). Наибольшей заслугой Галилея как ученого-механика было то, что он первым заложил основы научной динамики, нанеся сокрушительный удар по динамике Аристотеля. Галилей называл динамику «наукой о движении относительно места». Его сочинение «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых



наук» состоит из трех частей: первая часть посвящена равномерному движению, вторая — равномерно ускоренному; третья — принужденному движению брошенных тел.

В античной механике термина «скорость» не было. Рассматривались более или менее скорые движения, а также «равноскорые», но количественной характеристики этих движений в виде скорости не существовало. Галилей впервые подошел к разрешению вопроса о равномерном и ускоренном движении массивных тел и рассмотрел движение тел по инерции.

Галилею приписывают открытие закона инерции. Однако этот закон он знал только в форме закона космической инерции, которым пользовался еще Коперник. В этой форме закон можно было бы выразить так: «Движение тела, на которое не действуют силы (конечно, внешние), либо равнодействующая их равна нулю, является равномерным движением по окружности». Так, по мнению Галилея, двигались небесные тела, «предоставленные самим себе». На самом же деле движение по инерции может быть только равномерным и прямолинейным. Что же касается небесных тел, то их с этого движения «сбивает» внешняя сила тяготения массивных тел друг к другу — сила всемирного тяготения. При этом тела, которые «сбиваются» с прямолинейного пути этой силой, не обязательно движутся по окружности, а по любым коническим сечениям — эллипсам и даже параболам (именно по параболе движутся кометы, появляющиеся на небосклоне только раз: после прохождения возле Солнца они так сильно разгоняются его притяжением, что уходят навсегда из Солнечной системы). Рассматривая в этом аспекте взгляд Галилея на инерцию, убеждаемся в его неправомочности: ошибка в рассуждениях возникла из-за того, что Галилей не знал о законе всемирного тяготения, открытого позже Ньютоном.

Доказывая принцип относительности, Галилей утверждал, что если корабль движется равномерно и без качки, то никаким механическим экспериментом нельзя обнаружить этого движения. Он предлагал мысленно разместить в трюме корабля сосуды с вытекающей из них водой, с плавающими в них рыбками, летающих мух и бабочек и утверждал, что стоит ли корабль неподвижно или движется равномерно — их действия не изменяются. Не надо при этом забывать, что движение корабля не прямолинейное, а круговое (правда, по окружности большого радиуса, какой является то или иное сечение Земли).



Сейчас мы знаем, что в системе, движущейся по кривой, какой является и окружность, невозможно соблюдение закона инерции: эта система не является инерциальной. Действительно, в принципе Галилея величина скорости относительно движения не играет роли, как и скорость движения одной инерциальной системы относительно другой. (Важно только, чтобы эта скорость не была соизмерима со световой, иначе мы вклинимся из механики классической в эйнштейновскую релятивистскую механику.) Но если кораблю придать первую космическую скорость (8 км/с), то все предметы в его трюме, как и сам корабль, сделаются невесомыми. Механический эксперимент, проведенный с достаточной точностью, покажет, что и для реальных скоростей движения перемещения тел в трюме движущегося корабля и корабля неподвижного будут различаться между собой. Более того, движение тел изменится, если корабль будет идти с одной и той же скоростью, но разными курсами — допустим, по меридиану и по экватору. Не только движущиеся в трюме тела будут сбиваться с предполагаемой траектории, но и сам корабль в северном полушарии будет относить вправо по курсу, а в южном — влево. Интересно, что эти отклонения, вызванные вращением Земли как неинерциальной системы, не зависят даже от направления движения.

В другой своей работе — «Диалог о двух главнейших системах мира . . .» — Галилей утверждает, что мир есть тело, в высшей степени совершенное, и в отношении его частей должен господствовать наивысший и наисовершеннейший порядок<sup>2</sup>. Из этого можно сделать вывод, что небесные тела по своей природе не могут двигаться прямолинейно, поскольку если бы они двигались прямолинейно, то безвозвратно удалялись от своей исходной точки и первоначальное место для них не было бы естественным, а части Вселенной не были бы расположены в «наисовершенном порядке». Следовательно, небесным телам недопустимо менять места, т. е. двигаться прямолинейно. Исчезни вдруг закон всемирного тяготения, это и случилось бы! Именно он удерживает небесные тела в устойчивом движении, не допуская их хаотического разбегания (здесь мы, конечно, не касаемся явления «разбегания» галактик). Кроме того, прямолинейное движение беско-

<sup>2</sup> См.: Галилей Галилео. Избранные труды. М.: Наука, 1964, т. 1, с. 115.



печно, ибо согласно евклидовой геометрии прямая линия бесконечна, а стало быть неопределенна. Галилей же считал, что по самой сути природы невозможно, чтобы что-либо двигалось по прямой линии к недостижимой цели.

Но коль скоро порядок достигнут и небесные тела размещены наилучшим образом, невозможно, чтобы в них оставалась естественная склонность к прямолинейному движению, в результате которого они отклонились бы от надлежащего места. Как утверждал Галилей, прямолинейное движение может только «доставлять материал для сооружения», но, когда последнее готово, оно или остается неподвижным, или если и обладает движением, то только круговым.

Исследуя движение тел, брошенных по горизонтальной («скользящей») плоскости, Галилей установил, что, пока тело движется по плоскости, не встречая никакого сопротивления движению, его движение равномерно и могло бы продолжаться бесконечно, если бы сама плоскость простиралась в пространстве без конца. Но если эта плоскость конечна и расположена достаточно высоко над Землей, то тело, имеющее вес, достигнув конца плоскости, продолжает двигаться далее таким образом, что к его первоначальному равномерному беспрепятственному движению (в нашем понимании — движению по инерции) присоединяется другое, вызываемое силой тяжести, благодаря чему возникает сложное движение, состоящее из равномерного горизонтального и ускоренного движения<sup>3</sup>.

Кажется, здесь Галилей совсем близко подходит к современному пониманию инерционности, по крайней мере равномерного горизонтального движения, но далее он указывает, что ось полученной в результате сложного движения полупараболы должна быть перпендикулярна к горизонту и оканчиваться в центре Земли. Но так как движение по инерции все время удаляет брошенное тело от оси параболы, то оно никак не может пересечь своей траектории с центром Земли и, следовательно, действительная траектория падающего тела не может быть полупараболой. Кроме того, движение по горизонтальной («скользящей») плоскости таково, что тело, отходя от точки пересечения кратчайшего радиуса Земли с этой плоскостью, начинает удаляться от центра Земли. Значит, и приближаясь, и удаляясь от центра Земли, тело не может

<sup>3</sup> См.: Галилей Галилео. Избранные труды, т. 2, с. 304, 305.



двигаться равномерно, поскольку на него все время (кроме одной точки) будет действовать сила в направлении движения. Как видим, Галилей в своем воззрении на инерцию, хотя и приблизился к действительности, полностью вопроса не разрешил.

Формулировку законов инерции, очень близкую к ньютоновской и принятую с незначительными изменениями в современной механике дал французский философ и математик Рене Декарт (1596—1650).

В своей книге «Начала философии», вышедшей в свет в 1644 г., он так формулирует законы инерции. *Первый закон*: «Всякая вещь продолжает по возможности пребывать в одном и том же состоянии и изменяет его не иначе как от встречи с другим»<sup>4</sup>. *Второй закон*: «Каждая материальная частица в отдельности стремится продолжать дальнейшее движение не по кривой, а исключительно по прямой, хотя некоторые из этих частиц часто бывают вынуждены от нее отклоняться...»<sup>5</sup>.

С формированием понятия инерции связано и имя голландского ученого Христиана Гюйгенса (1629—1695). Гюйгенс, изучая движения маятника, установил, что если тяжелое (в нашем понятии — массивное) тело, подвешенное на нити, движется по окружности, то нить начинает растягиваться как бы силой, дополнительной к весу тела. Гюйгенс назвал ее центробежным стремлением, или центробежной силой.

Таким образом, теориям Аристотеля о естественном круговом движении и Галилея об инерционном круговом движении был нанесен удар. Движение по кругу оказалось насильственным, так как при этом к телу, сворачивающему с прямого пути, должна быть приложена со стороны связи (нити) центростремительная (устремленная к центру кривой) сила. В отличие от центробежной, она вполне реальна: это и натяжение нити, на которой подвешен колеблющийся или движущийся по замкнутому кругу груз; и сила тяготения, не пускающая планеты разбежаться по прямому; и сила сцепления частиц маховика, не дающая им разлететься по прямому, касательным к их траектории (сила сопротивления материала деформации).

Согласно второму закону Ньютона, эта центростремительная сила пропорциональна массе тела и сообщаемому

<sup>4</sup> Декарт Р. Избранные произведения. М.: Изд-во АН СССР, 1950, с. 486—487.

<sup>5</sup> Там же, с. 490—491.



ею этому телу ускорению. Ускорение это, называемое нормальным или центростремительным, для движения по кругу радиусом  $R$  со скоростью  $v$  равно

$$w_n = v^2/R. \quad (1.4)$$

Величина центростремительного ускорения впервые была определена Гюйгенсом. Центростремительная сила, вызывающая это ускорение,

$$F_{\text{ц}} = mv^2/R \quad (1.5)$$

и направлена, как ускорение, т. е. к центру. А центробежную силу направляют от центра, т. е. противоположно ускорению. Между тем ни одна реальная сила не может быть направлена против ускорения, создаваемого ею. Значит, сила эта фиктивная, введенная условно.

Стало быть, движение по инерции — это обязательно прямолинейное, равномерное; это движение можно приравнять к покою, изменив инерциальную систему отсчета на такую, которая двигалась бы тоже равномерно и прямолинейно со скоростью движущегося тела.

### Инерция и Ньютон

Наибольший вклад в классическую механику сделал великий английский ученый Исаак Ньютон (1643—1727). В 1686 г. вышел его фундаментальный труд «Математические начала натуральной философии», в котором сформулированы основные законы классической механики. В этом произведении с максимальной полнотой определено понятие инерции и явлений, с ней связанных. Дальнейшие изменения в этих определениях можно отнести лишь к ряду редакционных поправок, приближающих язык Ньютона к нашему времени.

В 1915 г. выдающийся механик и математик академик А. Н. Крылов выполнил перевод этого сочинения Ньютона с языка оригинала (латыни), снабдив его подробным комментарием. В предисловии он писал: «Я придерживался латинского текста издания 1871 года и, переведя его сперва подстрочно, неоднократно перечитывал и исправлял этот перевод так, чтобы при точном сохранении не только смысла подлинника, но и самых слов автора, достигнуть правильности и гладкости русского языка»<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Ньютон И. Математические начала натуральной философии. СПб., 1916, с. VI.



Как же Ньютон трактует инерцию? «Врожденная сила материи, — пишет он, — есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Эта сила всегда пропорциональна массе и если отличается от инерции массы, то разве только воззрением на нее.

От инерции материи происходит, что всякое тело лишь с трудом выводится из своего покоя или движения. Поэтому «врожденная сила» могла бы быть весьма вразумительно названа «силою инерции». Эта сила проявляется телом единственно лишь, когда другая сила, к нему приложенная, производит изменение в его состоянии. Проявление этой силы может быть рассматриваемо двояко — и как сопротивление, и как напор. Как сопротивление — поскольку тело противится действующей на него силе, стремясь сохранить свое состояние; как напор — поскольку то же тело, с трудом уступая силе сопротивляющегося ему препятствия, стремится изменить состояние этого препятствия. Сопротивление приписывается обыкновенно телам покоящимся, напор — телам движущимся. Но движение и покой при обычном их рассмотрении различаются лишь в отношении одно к другому, ибо не всегда находится в покое то, что таковым простому взгляду представляется»<sup>7</sup>.

Следует заметить, что в XVII и XVIII вв. понятие о силе было весьма неопределенным. Кинетическую энергию называли живой силой, мощность — лошадиной силой, использовали также такие значения силы, как жизненная, божественная сила и много других «сил», ничего общего не имеющих с современным пониманием силы.

Ньютон только пользовался существующей терминологией, и никоим образом не мыслил силу инерции как реальную физическую силу. Свойство инерции он называет «врожденной силой материи». Неужели под «врожденной силой» Ньютон мог понимать физическую силу? Конечно, нет! Этот термин, который Ньютон тут же объясняет, может быть растолкован только как «свойство» (или нечто подобное). Далее, «эта сила» (т. е. свойство) если и отличается от инерции массы, то «лишь воззрением на нее», т. е. физически не отличается. Это врожденное свойство (у Ньютона «сила») материи есть не что иное, как инерция. И это

<sup>7</sup> Там же, с. 24—26.



свойство Ньютон считает «вразумительным» называть «силой инерции». Если под «силой» понимать «свойство», что соответствует пониманию термина «сила» той эпохи, то это свойство Ньютон называет свойством инерции, или просто инерцией. Выражение же «другая сила» (приложенная) означает внешнюю силу, силу в современном ее толковании.

Далее Ньютон отмечает: «Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остается. Тело продолжает затем удерживать свое новое состояние вследствие одной только [силы] инерции. Происхождение приложенной силы может быть различное — от удара, от давления, от центростремительной силы».

Отсюда ясно, что только равномерное движение может быть движением по инерции. Если на тело действует внешняя (у Ньютона, приложенная) сила (или, выражаясь точнее, равнодействующая системы всех внешних сил, приложенных к телу), то уже о движении по инерции не может быть речи. Значит, все те движения, которые в повседневной жизни мы называем движением по инерции, — свободный выбег автомобиля, качение бильярдного шара, наконец наше движение вперед при резком торможении поезда, — весьма условно так названы. Ведь в процессе этих движений на тело действует сила трения, сила сопротивления среды и другие внешние силы, делающие движение ускоренным (замедленным). Это уже не движение по инерции. Так можно, в частности, получить и движение по кругу, например, зацепив движущееся тело веревкой с закрепленным концом. Тогда выходит, что движение по кругу — тоже инерционное и прав Галилей?

Конечно, нет. Но это выражение так укоренилось в разговорной речи, что исключить его сейчас невозможно. Для научной же терминологии движение «по инерции», «инерционное» — такое, когда либо никакая неуравновешенная внешняя система сил на движущийся объект не действует, либо оговаривается, что равнодействующая этой системы настолько мала, что ею можно пренебречь и приближенно считать тело движущимся по инерции. Именно так в реальной жизни мы и делаем, но обходимся без оговорок.

Например, о движении автомобиля с отсоединенным двигателем по хорошей дороге мы часто говорим, как о дви-



жении по инерции. Но так не говорят, например про гусеничный трактор или бульдозер, хотя там тоже двигатель отсоединяется и машина какой-то путь движется, в нашем понимании, по инерции. Но у автомобиля из-за малых сопротивлений и большой скорости этот путь может достигать сотен метров, а у трактора он менее метра. Опять-таки следует учесть, что при наличии сил сопротивления среды или иных неуравновешенных внешних сил мы имеем движение, которое можно назвать, скорее, «псевдоинерционным», чем по инерции. Это следует иметь в виду во избежание ошибок, сводящихся к попыткам получения работы от машин, движущихся по инерции, без сбавления скорости.

В разделе «Аксиомы, или Законы движения» Ньютон так излагает первый закон: «Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние»<sup>8</sup>. Ввиду особой важности этого закона — закона инерции — для нашей книги приведем также два других его толкования. *Первое*: «Всякое тело продолжает пребывать в своем состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока приложенные силы не понудят его изменить это состояние». *Второе*: «Всякое тело удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние».

Далее следует разъяснение: «Брошенное тело продолжает удерживать свое движение, поскольку его не замедляет сопротивление воздуха и поскольку сила тяжести не побуждает это тело вниз. Волчок, коего части вследствие взаимного сцепления отвлекают друг друга от прямолинейного движения, не перестает равномерно вращаться, поскольку это вращение не замедляется сопротивлением воздуха...»<sup>9</sup>. (Эта фраза Ньютона о вращательном движении

<sup>8</sup> Там же, с. 36—37.

<sup>9</sup> Там же, с. 37. Одна из наиболее совершенных с современной точки зрения формулировок первого закона Ньютона приведена в учебнике теоретической механики профессора С. М. Тарга: «Изолированная от внешних воздействий материальная точка сохраняет свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока приложенные силы не заставят ее изменить это состояние» (Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. М.: Наука, 1970, с. 244). Тут же автор добавляет, что «движение, совершаемое точкой при отсутствии сил, называется движением по инерции».



дает обоснование так называемым инерционными аккумуляторами энергии в виде вращающихся маховиков, о которых речь пойдет ниже.)

Инерции много внимания уделял в своем научном творчестве швейцарский механик и математик, академик Петербургской Академии наук Леонард Эйлер (1707—1783). Основные понятия динамики у Эйлера по существу ньютоновские, а отличия относятся к деталям. Можно сказать, что Эйлер придал ньютоновской динамике математическую законченность.

Используя ньютоновский термин «сила инерции», Эйлер так разъясняет физический смысл, вкладываемый в это понятие: сила инерции — это присущая всем телам (вложенная во все тела) способность или пребывать в покое, или же равномерно продолжать движение по прямому направлению<sup>10</sup>. При этом он отмечает, что причине сохранения такого состояния не вполне удачно дано название силы, так как она неоднородна (неадекватна) с другими «силами», например силой тяжести, и не может с ними сравниваться.

Видимо, тенденция того времени называть силами многие величины, не имеющие ничего общего с физическими силами, обусловила утверждение Эйлера, что сила инерции каждого тела пропорциональна количеству материи, из которой оно состоит. Здесь, конечно, слова «сила инерции» следует понимать в правильном смысле, который Эйлер сам пояснил так: «Иногда пользуются выражением „сила инерции“, так как сила есть нечто противодействующее изменению состояния. Но если под силой понимать какую-то причину, изменяющую состояние тела, то здесь ее нужно понимать совсем не в этом смысле: проявление инерции в высшей степени отлично от того, которое свойственно обычным силам. Поэтому для избежания какой-либо путаницы слово „сила“ не будем употреблять и будем рассматриваемое свойство тел называть инерцией»<sup>11</sup>. (Золотые слова! Однако как ни боялся Эйлер путаницы, она все-таки произошла.)

### Инерция и принцип Д'Аламбера

Но еще лет за двадцать до Эйлера французский математик Жан Лерон Д'Аламбер (1717—1783) подчеркивал отличие сил инерции от «обычных» сил.

<sup>10</sup> См.: Эйлер Л. Основы динамики точки. М.; Л.: ОНТИ, 1938, с. 76.

<sup>11</sup> Там же, с. 116.



В своем трактате с длинным, подробным названием «Динамика: Трактат, в котором законы равновесия и движения тел сводятся к возможно меньшему числу и доказываются новым способом и в котором излагается общее правило для нахождения движения нескольких тел, действующих друг на друга произвольным образом» в разделе «О силе инерции и о вытекающих из нее свойствах движения» он писал: «Силой инерции я вместе с Ньютоном называю свойство тел сохранять то состояние, в котором они находятся. Это свойство и нужно здесь доказать. Но телу необходимо находиться или в состоянии покоя, или в состоянии движения. Поэтому необходимо доказать следующие два закона.

Первый закон. Тело, находящееся в покое, будет неизменно пребывать в покое, пока какая-нибудь внешняя причина не выведет его из этого состояния.

В самом деле, тело не может само себя привести в движение, потому что нет никакого основания к тому, чтобы оно двигалось предпочтительнее в одну сторону, чем в другую.

Отсюда вытекает, что, если вследствие какой-либо причины тело получило движение, оно не сможет само по себе ни ускорить, ни замедлить этого движения.

Все то, что побуждает тело к движению, называют вообще силой, или движущей причиной»<sup>12</sup>.

Как видим, под термином «сила инерции» Д'Аламбер, как и Ньютон, понимал не физическую силу, называемую Ньютоном «приложенной силой», а Д'Аламбером «силой», или «движущей причиной».

«Второй закон. Тело, приведенное однажды какой-либо причиной в движение, должно неизменно пребывать в состоянии равномерного прямолинейного движения, пока на него не подействует какая-нибудь новая причина, отличная от той, которая привела его в движение. Другими словами, до тех пор, пока на это тело не подействует какая-либо внешняя причина, отличная от движущей причины, оно будет неизменно двигаться по прямой линии и за равные промежутки времени проходить равные расстояния.

Итак, вообще, тело, приведенное в движение какой бы то ни было причиной, будет неизменно двигаться равно-

<sup>12</sup> Даламбер Ж.-Л. Динамика: Трактат. М.; Л., Гостеортехиздат, 1950, с. 38—39.



мерно и прямолинейно, пока на него не подействует какая-либо новая причина.

Прямая линия, которую тело описывает или стремится описать, называется направлением этого тела»<sup>13</sup>.

И далее: «В согласии с приведенными рассуждениями опыт также подтверждает принцип силы инерции. Во-первых, мы видим, что окружающие нас тела остаются в покое, пока что-нибудь не выведет их из этого состояния. И если иногда нам кажется, что тела движутся без видимой причины, то по аналогии, а также на основании единообразия законов природы и вследствие неспособности материи самой по себе приходить в движение мы вправе заключить, что причина здесь не менее реальна, хотя она и скрыта от нас. Во-вторых, хотя и не существует таких тел, которые бы вечно сохраняли свое движение, всегда ведь существуют причины, как, например, трение и сопротивление воздуха, которые постепенно замедляют движение, — тем не менее мы видим, что движущееся тело тем дольше сохраняет движение, чем меньше эти причины, замедляющие движение. Отсюда мы можем заключить, что движение никогда бы не кончилось, если бы никаких замедляющих причин не было»<sup>14</sup>.

И наконец, вот как Д'Аламбер излагает свой принцип (общее уравнение механики) в 7-м томе французской «Энциклопедии наук, искусств и ремесел», в статье «Динамика»: «Положим, что нескольким телам передаются какие-то движения, которые у них не могут удержаться вследствие их взаимодействия и которые вынуждены заменить другими. Известно, что всякое движение можно рассматривать как сложное движение, состоящее из двух движений по выбору. Поэтому мы можем первоначальное движение каждого тела рассматривать как сложное движение, составленное из двух движений, из которых одно мы возьмем такое, какое данное тело воспринимает вследствие действия на него других тел. Но если бы каждое тело получило это последнее движение вместо своего первоначального, которое ему было передано, то все тела могли бы сохранить это самое движение без всяких изменений: это как раз те движения, которые тела воспринимают сами по себе. Вследствие этого другие составляющие движения должны быть таковы, что они нисколько не будут

<sup>13</sup> Там же, с. 39—40.

<sup>14</sup> Там же, с. 43.



нарушать первых составляющих движений. Другими словами, вторые движения должны быть таковы, что если бы только их сообщить всем телам и ничего больше, то система оставалась бы в покое.

Отсюда следует, что для того, чтобы найти движение нескольких тел, действующих друг на друга, нужно разложить полученные телами движения, т. е. движения, с которыми тела стремятся двигаться, на два других движения. Эти составляющие движения должны быть подобраны таким образом, что у каждого тела одно из этих составляющих движений должно уничтожиться, а другое должно быть таким и так направленным, чтобы действие окружающих тел не могло ничего в нем изменить. Отсюда легко видеть, что все законы движения могут быть сведены к законам равновесия»<sup>15</sup>.

За два с лишним века, прошедшие с момента опубликования принципа Д'Аламбера, форма его претерпела разительные изменения. Вот, например, одна из формулировок принципа Д'Аламбера для точки, приведенная в известном «Трактате по теоретической механике» П. Аппеля: «В каждый момент времени существует равновесие между силой инерции и силами, действительно приложенными в точке». При этом Аппель замечает, что «вектор, численно равный произведению массы на ускорение и направленный противоположно ускорению, называется силой инерции, хотя это никоим образом не будет силой, приложенной к точке»<sup>16</sup>.

Или одна из самых современных формулировок принципа Д'Аламбера для системы: «Если в любой момент времени к каждой из точек системы, кроме фактически действующих на нее внешних и внутренних сил, приложить соответствующие силы инерции, то полученная система сил будет находиться в равновесии и к ней можно будет применять все уравнения статики»<sup>17</sup>.

Французский математик и механик Ж.-Л. Лагранж (1736—1813) в своем классическом трактате «Аналитическая механика» в основу всей динамики положил «общую формулу», являющуюся сочетанием его принципа возможных перемещений с принципом Д'Аламбера, изложенным Лагранжем с привлечением понятия «сила». Так

<sup>15</sup> Там же, с. 334.

<sup>16</sup> Аппель П. Теоретическая механика. М.: Физматгиз, 1960, т. 1, с. 458.

<sup>17</sup> Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики, с. 449.



возник принцип Д'Аламбера—Лагранжа, вытекающий из общего уравнения динамики: «При движении системы с идеальными связями (т.е. такими, реакции которых не могут произвести работы,— без трения, без потерь энергии в этих связях) в каждый данный момент времени сумма элементарных работ всех приложенных активных сил (т.е. не реакций) и всех сил инерции на любом возможном перемещении системы будет равна нулю». Этот принцип позволяет составить уравнения движения любой механической системы, а стало быть — и определить ее движение.

Упоминающиеся в этом принципе силы инерции и их работа являются величинами фиктивными, вводимыми для удобства. Характерно, что сам Д'Аламбер уклонился от употребления не вполне ясного понятия «сила», не говоря уже о «силе инерции», которую он считал не силой, а свойством тел.

Пожалуй, ни одно из положений теоретической механики не вызывало (да и сейчас не перестает вызывать) столько споров и путаницы, как принцип Д'Аламбера. В 20-е годы нашего века против него выступили философы, обвиняя автора в недиалектичности: по принципу Д'Аламбера изучение движения (динамики) сводится к исследованию равновесия (статики), тогда как равновесие само представляет частный случай динамики. В 30-е годы возникла дискуссия о силах инерции между инженерами-практиками и механиками-теоретиками. Практики утверждали, что силы инерции реальны и именно они производят те действия, которые тела совершают «по инерции» (об этом подробнее мы скажем ниже).

Однако, как мы убедились, самого Д'Аламбера никак нельзя обвинять в путанице по вопросу «сил инерции».

### Инерция и «бессиловая» механика Герца

Как мы уже говорили, понятие «сила» было весьма неопределенным в механике доньютонической эпохи. Даже Галилей, развивший учение об инерции и движущей силе как ускоряющей, представлял ее себе как ряд последовательных толчков. Лишь Ньютон пришел к современному понятию силы и определил ее с помощью принципа действия и противодействия. До этого для Ньютона и его современников понятие силы, действующей на расстоянии, было совершенно неприемлемо.



Дальнейшее развитие механики происходило с использованием ньютоновского определения силы. Но, как мы уже знаем, не всегда это определение силы вносило полную ясность в объяснение явлений природы, особенно если речь шла о «силах» инерции. Поэтому и Д'Аламбер изложил свой принцип, избегнув использования понятия «силы» и заменив его понятиями движения, непосредственного соприкосновения.

Наиболее значительная попытка создания стройной механики, где сила не являлась бы основным, исходным ее понятием, — так называемой бессиловой механики, была сделана немецким физиком Генрихом Герцем (1857—1894) в книге «Принципы механики, изложенные в новой связи».

Герц приходит к выводу, что при помощи классической механики Галилея—Ньютона невозможно дать удовлетворительное объяснение силе и массе. Действительно, если механическая система полностью изолирована, не подвержена никаким внешним воздействиям, то центр ее масс будет двигаться по инерции, т. е. равномерно и прямолинейно. Отсюда, казалось бы, несложно определить массу, ведь положение центра масс будет зависеть от ее значений. Но реально систем, совершенно не подверженных внешним воздействиям, не существует: все части Вселенной испытывают более или менее сильное влияние всех остальных ее частей. Вывод отсюда один — закон инерции строго справедлив только в случае его приложения ко Вселенной в целом. Но тогда для определения величины масс следовало бы наблюдать за движением центра Вселенной, которое для нас, как говорит Герц, останется навеки неизвестным.

Герц делает вывод, что классическая механика «не состоятельна» по следующим причинам: 1) потому, что невозможно дать хорошее определение силы; 2) потому, что она неполна; 3) потому, что она вводит паразитические гипотезы, которые часто способны породить трудности совершенно искусственные, но тем не менее настолько большие, что они могут остановить даже лучшие умы.

Герц выводит основной закон своей механики, имеющий форму закона инерции: «Всякая свободная система пребывает в своем состоянии покоя или равномерного движения вдоль прямейшего пути»<sup>18</sup>. И так обосновывает его

<sup>18</sup> Герц Г. Принципы механики, изложенные в новой связи. М.: Изд-во АН СССР, 1959, с. 158.



важность: «Совокупность следствий, которые можно извлечь из Основного закона о свободной системе и о ее несвободных частях, образует содержание механики. Других причин движения, кроме тех, которые вытекают из Основного закона, наша механика не знает»<sup>19</sup>. Из этого закона, подчеркивает Герц, можно вывести движение любой несвободной (реальной) системы. Таким образом, все известные в механике движения Герц сводит к инерционному движению по «прямейшему» пути свободных систем. Он прямо говорит об этом: «Каждое движение какой-нибудь материальной системы или ее частей, которое происходит в согласии с Основным законом, мы называем естественным движением системы в противоположность всем мыслимым и возможным движениям последней. Механика, следовательно, имеет дело с естественными движениями свободных материальных систем и их частей»<sup>20</sup>.

Герц подчеркивает, что выбранная формулировка основного закона намеренно примыкает к формулировке закона инерции Ньютона, однако содержит три независимых положения: 1) свободная система не следует другим возможным путем, кроме прямейшего; 2) различные свободные системы описывают за одинаковые промежутки времени пропорциональные друг другу длины путей; 3) измеряемое часами время возрастает пропорционально длине пути какой-нибудь движущейся свободной системы.

Примечательна теорема о сохранении энергии, данная Герцем в такой форме: «Энергия находящейся в произвольном движении свободной системы не изменяется со временем. Ибо энергия определяется массой системы, которая не меняется, а также скоростью, которая тоже не меняется»<sup>21</sup>. Герц «расшифровывает» понятие потенциальной энергии (в общем, не слишком ясное) как кинетическую энергию скрытых систем.

Понятие о силе, как о причине ускорения — как положительного, так и отрицательного, в механике Герца исчезает. Сила с точки зрения Герца является только мерой переноса или взаимопреобразования движения между непосредственно связанными системами. Естественно, в механике Герца нет места и для сил инерции, нет и путаницы, с ними связанной. Механика Герца дает ясную, лишен-

<sup>19</sup> Там же.

<sup>20</sup> Там же.

<sup>21</sup> Там же, с. 167.



ную внутренних противоречий, обоснованную математически картину мира. Но это еще не значит, что реальный мир таков, каким обрисовал его Герц.

В механике Герца оставлено место «мировому эфиру», которому приписаны свойства обычной инертной материи, т. е. движения частичек этого эфира подчиняются законам классической механики. Утверждение Герца о том, что мнимое действие сил на расстоянии сводится исключительно к процессам механического движения в мировом эфире, было опровергнуто релятивистской механикой Эйнштейна. Но в некоторых идеях теории относительности и механики Герца есть много общего. Например, объяснение движения планет вокруг Солнца без привлечения сил с помощью инерции как фундаментального свойства тел.

Основная же ценность механики Герца в том, что она помогла в свое время освободиться от устаревших представлений.

### Инерция вращения

Можно ли сказать «тело вращается по инерции»? Если рассуждать строго, движение по инерции может быть только равномерным прямолинейным. Значит, вращения по инерции в принятой нами ньютоновой механике быть не может, хотя у Галилея по инерции совершается именно вращательное движение (точнее, движение по кругу). Но ведь твердое массивное тело тоже сохраняет состояние покоя или равномерного вращения, пока его не выведет из этого состояния момент внешних сил. Стало быть, фактически и здесь имеет место явление инерции, хотя отличное от классического случая. Что же общего и в чем различие между инерцией вращения и прямолинейным равномерным движением (относительным покоем)?

Как известно, инерция, или инертность, массивной точки зависит только от ее массы. Масса является мерой инертности тела при поступательном, в том числе и прямолинейном движении. Значит, при таком движении на инерцию не влияет распределение масс в теле, и это тело можно смело принять за материальную (массивную) точку. Масса этой точки равна массе тела, а расположена она в центре тяжести, или, что почти то же, в центре масс или центре инерции тела (поэтому «тело» в законах Ньютона справедливо заменено «материальной точкой»).



Проведем следующий опыт. Попытаемся вращать вокруг вертикальной оси  $Z$  стержень с насаженными на него массами (грузами), например металлическими шарами (рис. 1). Пока эти шары находятся близ центра, раскрутить стержень легко, инертность его мала. Но если мы раздвинем массы на края стержня, то раскрутить такой стержень станет намного труднее, хотя масса его осталась без изменения. Стало быть, инертность тела при вращении зависит не только от массы, но и (даже в большей степени) от распределения этих масс относительно оси вращения. Мерой инертности тела при вращении является так называемый момент инерции.

Моментом инерции тела относительно данной оси называется величина, равная сумме произведений масс всех частиц тела на квадраты их расстояний от этой оси:

$$I = \sum m h^2, \quad (1.6)$$

где  $I$  — осевой момент инерции,  $m$  — масса частицы тела,  $h$  — расстояние этой частицы от оси.

Осевой момент инерции играет при вращательном движении ту же роль, что и масса при поступательном (в том числе и прямолинейном), и таким образом он является мерой инертности (инерции) тела при вращательном движении.

Распределение масс в теле наглядно характеризуется так называемым радиусом инерции. Радиус инерции — это такое расстояние от оси, на которое надо поместить центр масс тела, чтобы момент инерции этого центра относительно оси был бы тем же, что и момент инерции всего тела:

$$\rho = \sqrt{I/M}, \quad (1.7)$$

где  $\rho$  — радиус инерции,  $M$  — масса тела.

Таким образом, разница в мере инертности прямолинейного движения и вращения состоит в том, что в первом

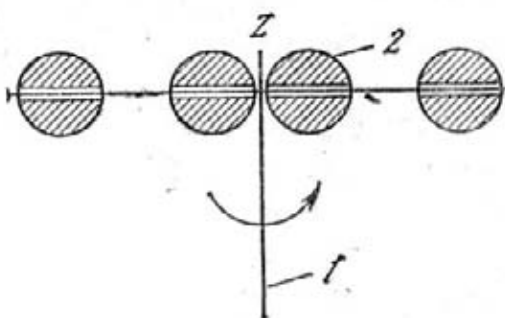


Рис. 1. Опыт, демонстрирующий изменение момента инерции тела при неизменной его массе

1 — стержень,  
2 — груз



случае она измеряется массой, а во втором — моментом инерции<sup>22</sup>.

Далее. Как мы знаем, закон инерции устанавливает эквивалентность относительного покоя и равномерного прямолинейного движения — движения по инерции. Ибо нельзя никаким механическим опытом установить, покоится ли данное тело или движется равномерно и прямолинейно. Во вращательном движении это не так. Например, совсем не безразлично, покоится ли волчок или вращается равномерно, с постоянной угловой скоростью. Как отмечает академик А. Ю. Ишлинский, угловая скорость твердого тела является величиной, характеризующей его физическое состояние<sup>23</sup>. Угловая скорость может быть определена (например, с помощью гироскопа или измерением центробежных сил) без какой-либо информации о положении тела по отношению к «абсолютной» системе координат. Поэтому термин «абсолютная угловая скорость тела» в отличие от «абсолютной скорости точки» должен употребляться в прямом смысле (без кавычек).

Таким образом, механические явления в покоящейся и вращающейся системах будут протекать по-разному, не говоря уже о том, что падение и движение тел во вращающейся системе происходят иначе, чем в неподвижной: достаточно хорошенько ее раскрутить — и она развалится на части из-за возникших в ней напряжений.

Поэтому второе отличие состоит в том, что прямолинейное равномерное движение и покой эквивалентны, а вращение, даже с постоянной угловой скоростью, может быть четко отграничено не только от покоя, но и от вращения с другой угловой скоростью.

Вот, пожалуй, и все основные отличия. Остальное настолько одинаково, что можно взять на себя смелость сформулировать по образу и подобию ньютоновых законов «закон» инерции вращательного движения абсолютно твердого тела: «Изолированное от внешних моментов абсолютно твердое тело будет сохранять состояние покоя или равномерного вращения вокруг неподвижной точки

<sup>22</sup> Момент инерции однородных тел находится довольно легко. Например, момент инерции цельного цилиндра радиусом  $R$  и массой  $M$  равен  $MR^2/2$ , полого цилиндра той же массы и размера  $MR^2$ , шара  $0,4MR^2$  (моменты инерции разнообразных тел приводятся в специальных справочниках).

<sup>23</sup> См.: Ишлинский А. Ю. Механика относительного движения и силы инерции. М.: Наука, 1981, с. 38.



или оси до тех пор, пока приложенные к телу моменты внешних сил не заставят его изменить это состояние».

Почему же абсолютно твердое тело, а не любое? Потому, что у нетвердого тела из-за вынужденных (или заранее предусмотренных) деформаций при вращении может измениться момент инерции, а это равносильно изменению массы тела. Мы же не упоминаем этого случая, когда формулируем закон инерции, иначе он бы начинался так: «Изолированная от внешних воздействий материальная точка постоянной массы...». А эта точка может легко менять свою массу. Самолет или ракета, двигаясь за счет сжигания горючего, довольно существенно изменяют свою массу. Даже человек, пройдя достаточное расстояние, изменяет свою массу настолько, что это фиксируется медицинскими весами.

А как отразится это изменение массы на инерции? Ведь при измерении массы возникает дополнительная, так называемая реактивная сила. О каком же движении по инерции может идти речь, когда на тело действует сила?

Конечно, тут можно возразить, что мы рассматриваем тело, которое полностью сохраняет свое количество материи. Но если мы его как следует разгоним, например до скоростей, соизмеримых со скоростью света, как разгоняют в ускорителях элементарные частицы, тогда мера инерции материальной точки — ее масса — будет заметно возрастать с увеличением скорости; как пишет Эйнштейн, «обобщенный закон инерции перенял роль закона движения»<sup>24</sup>. Тогда, видимо, придется смириться с изменением массы и признать, что изолированная от внешних воздействий материальная точка переменной массы сохраняет постоянным по модулю и направлению вектор количества своего движения, т. е. произведение массы на скорость, направленное, как и вектор скорости. Это закон сохранения количества движения (у Ньютона он формулируется немного по-другому).

Так и в случае вращательного движения: если момент инерции непостоянен, приходится принимать постоянной не угловую скорость, а произведение угловой скорости на момент инерции — так называемый кинетический момент. В этом случае закон инерции примет такую форму: «Изолированное от внешних моментов тело будет сохранять

<sup>24</sup> Эйнштейн А. Физика и реальность. М.: Наука, 1965, с. 18.



вектор своего кинетического момента постоянным по величине и направлению». Если же тело вращается вокруг неподвижной оси: «Изолированное от внешних моментов относительно оси вращения тело будет сохранять кинетический момент относительно этой оси постоянным». Эти законы (в несколько иной формулировке) носят название законов сохранения кинетического момента.

Что же представляет собой инерция вращательного движения, например вокруг оси  $Z$ , в случае переменного момента инерции тела? Так как кинетический момент относительно оси  $K_z$  равен произведению момента инерции относительно той же оси  $I_z$  на угловую скорость:

$$K_z = I_z \omega, \quad (1.8)$$

то суть «закона» инерции для этого случая состоит в том, что  $K_z = \text{const}$ . Если при этом тело вследствие деформаций под действием внутренних сил (вызванных, например, центробежными силами при вращении) или внешних (управляющих воздействий) меняет свой осевой момент инерции, то с его увеличением угловая скорость будет уменьшаться, а с уменьшением — увеличиваться так, что их произведение останется постоянным.

Для демонстрации этого закона удобно воспользоваться простым прибором, называемым платформой Жуковского. Это круглая горизонтальная платформа на подшипниках, которая с малым трением может вращаться вокруг вертикальной оси. Если человек, стоя на этой платформе и вращаясь с некоторой угловой скоростью, разведет в сторону руки (еще лучше с грузом в них, например гантелями), то его момент инерции относительно вертикальной оси повысится, а угловая скорость сильно упадет. Опуская руки, человек внутренним усилием сообщает себе первоначальную угловую скорость. Даже стоя на платформе неподвижно; можно повернуть корпус в любую сторону, вращая вытянутую вверх руку в противоположном направлении. Таким способом изменения угловой скорости широко пользуются в балете, акробатике и т. п. (и кошки успешно приземляются на лапы благодаря вращению хвоста в соответствующем направлении).

На явлении инерции вращательного движения основаны многочисленные приборы и машины, в частности инерционные двигатели — аккумуляторы, сохраняющие кинетическую энергию при инерционном вращении маховика, и гироскопические приборы, сохраняющие, образно



говоря, его кинетический момент. Существуют также и маховики переменного момента инерции, напоминающие по принципу действия человека на платформе Жуковского.

### Механика относительного движения и эйлеровы силы инерции

Во многих разделах механики и ее приложений к техническим наукам движение материальных точек и тел изучается по отношению к подвижным телам большой массы. Движение последних считается практически не зависящим от изучаемого движения сравнительно небольших масс и обычно заранее задается. Например, при изучении колебаний маятников на корабле, движения атмосферы и рек по отношению к Земле, поведения гироскопов на самолете можно смело считать, что движение корабля, Земли и самолета остается неизменным. При рассмотрении этих достаточно сложных явлений, как и в предыдущих примерах, необходимо четкое разграничение реальных физических сил и сил инерции.

Как уже говорилось, реальными мы считаем силы, вызывающие ускорение материальных точек и тел относительно «абсолютной» системы координат, или (что одно и то же) инерциальной системы отсчета. Эти силы выражают меру механического взаимодействия тел и могут быть различны по своей природе: это силы тяготения, электрические и магнитные силы, силы упругости и пластичности, силы сопротивления среды, давления ветра или даже света. Надо сказать, что нередко обнаруживается общность сил, казалось бы, совершенно различных. Так, силы упругости могут трактоваться как проявление сил электрических, возникающих при взаимодействии атомов и молекул. Сила прилипания (адгезии) клеев к гладкой поверхности тоже относится к электрическим силам. В конечном счете, реальная физическая сила измеряется производимым ею ускорением единицы массы в инерциальной («абсолютной») системе отсчета.

При изучении механики относительного движения важно отличать даламберовы силы инерции и силы инерции, вводимые при рассмотрении движения материальных точек и тел по отношению к подвижным (неинерциальным) системам отсчета. Эти последние, по предложению академика А. Ю. Ишлинского, будем называть эйлеровы-



ми силами инерции<sup>25</sup> (как известно, Л. Эйлер впервые использовал подвижные системы координат для решения сложных задач механики, например сферического движения твердого тела). Как даламберовы, так и эйлеровы (и любые) силы инерции не являются физическими, т. е. они нереальны. Вводятся эти несуществующие силы в механику относительного движения, как и в принципе Д'Аламбера, чисто условно — для облегчения решения задач и объяснения отдельных механических явлений.

Следует заметить, что каждому относительному движению тела, т. е. движению по отношению к выбранной подвижной (неинерциальной) системе отсчета, соответствует движение некоторого точно такого же тела относительно системы инерциальной, «абсолютной». Чтобы осуществить такое «абсолютное» движение тела, надо воспроизвести не только те же реальные физические силы, которые действовали на исходное тело, но и добавить новые физические силы. Вот эти силы в точности соответствуют эйлеровым силам инерции в данном относительном движении исходного тела. Эйлеровы силы инерции определяются как реальные силы, действующие на тело, в предположении, что подвижная система отсчета условно принимается за неподвижную. Например, если поворачивающийся автобус условно примем за неподвижный, то те силы, которые мешают нам пройти в нем «по одной доске», приходится считать реальными.

Во многих случаях неудобно рассматривать движение точек и тел по отношению к «абсолютной» системе координат. Вряд ли имеет смысл развивать теорию колебаний маятника по отношению к «абсолютной», инерциальной системе координат с началом в центре Солнечной системы и осями, направленными на неподвижные звезды. Куда удобнее, и даже естественнее, использовать систему координат с началом в точке подвеса маятника и осями, жестко связанными с Землей.

Однако такая система и не «абсолютна», и даже не инерциальна. Земля вращается, а вместе с нею имеет ускорение и центр наших координат — точка подвеса. Как известно, в этом случае ускорение точки в «абсолютной» системе — абсолютное  $\bar{w}_a$  (реальное) ускорение — является векторной суммой трех ускорений — относительного  $\bar{w}_r$ ,

<sup>25</sup> См.: Ишлинский А. Ю. Механика относительного движения и силы инерции, с. 7.



переносного  $\bar{w}_e$  и кориолисова  $\bar{w}_k$ :

$$\bar{w}_a = \bar{w}_r + \bar{w}_e + \bar{w}_k. \quad (1.9)$$

Относительное ускорение — это ускорение точки в подвижной системе координат, как если бы она была неподвижна. Переносное ускорение — ускорение точки, в данный момент времени совпадающей с рассматриваемой точкой, лежащей в подвижной системе, например связанной с Землей. Кориолисово (по имени французского механика XIX в. Густава Кориолиса) ускорение, выражаемое как векторное произведение угловой скорости переносного движения  $\bar{\omega}$  на относительную скорость  $\bar{v}_{отн}$ :

$$\bar{w}_k = 2 [\bar{\omega} \times \bar{v}_{отн}], \quad (1.10)$$

характеризует изменение относительной скорости точки в переносном движении и переносной скорости в относительном движении. Получается так, что если мы складываем два движения: относительное, т. е. движение по отношению к подвижной системе координат (например, Земле), и переносное, т. е. то, с которым сама подвижная система как бы «переносится» в неподвижной (например, Земля в «абсолютной» системе отсчета), то для получения абсолютного (реального) ускорения нам недостаточно просто сложить относительное и переносное ускорение. В случае, если подвижная система имеет вращательное движение, а сама точка движется в этой подвижной системе, мы должны еще прибавлять и кориолисово ускорение.

Таким образом, основное уравнение динамики, или второй закон Ньютона

$$m\bar{w} = \bar{F} \quad (1.11)$$

(сила равна произведению массы на ускорение и направлена так же, как ускорение), для относительного движения будет иметь такой вид:

$$m\bar{w}^r = m\bar{w}_r - m\bar{w}_e - m\bar{w}_k = \bar{F} + \bar{F}_e + \bar{F}_k. \quad (1.12)$$

Таким образом, основное уравнение динамики относительного движения (1.12) наряду с физической силой  $\bar{F}$  содержит в правой (силовой) части две эйлеровы силы инерции — переносную  $\bar{F}_e$  и кориолисову  $\bar{F}_k$ . И переносная, и кориолисова сила инерции — силы нереальные, их нет на самом деле, зависят они только от выбора конкретной подвижной системы координат и никак не отражают взаимодействия данной материальной точки с другими телами.



Не имеют эти силы и противодействия, которое по третьему закону Ньютона должна иметь каждая сила. Следовательно, этот закон равенства и противоположной направленности действия и противодействия никакого отношения к эйлеровым силам инерции не имеет (по образному выражению известного физика Р. Фейнмана, это — псевдосилы).

Если заменить одну подвижную систему на другую, эйлеровы силы инерции могут измениться решительным образом. Например, если подвижная система координат перемещается поступательно, т. е. ее угловая скорость по отношению к «абсолютной» системе координат, или (согласно сказанному выше) просто угловая скорость равна нулю, то кориолисова сила инерции

$$\vec{F}_k = -m\vec{\omega}_k \quad (1.13)$$

совсем исчезнет. Переносная же сила инерции

$$\vec{F}_e = -m\vec{\omega}_e \quad (1.14)$$

не зависит от положения точки в подвижной системе.

В частности, переносные силы инерции частиц сплошного тела в подвижной системе координат параллельны друг другу; их равнодействующая равна произведению общей массы тела на абсолютное ускорение начала подвижной системы координат (со знаком минус). При любом положении тела равнодействующая этих сил проходит через центр инерции (массы, тяжести) тела. Такие поступательно перемещающиеся системы координат удобны и часто встречаются.

Если же подвижная система координат движется равномерно и прямолинейно по отношению к «абсолютной» системе, то она уже становится инерциальной. В такой системе уже не только кориолисовы, но и переносные силы инерции равны нулю. Основное уравнение динамики для этой подвижной системы такое же, как для «абсолютной» системы координат. Значит, «абсолютная» система координат не имеет каких-либо преимуществ по отношению к любой инерциальной системе — полностью с нею эквивалентна. Все законы механики в ней будут выполняться так же, как и в любой инерциальной системе. Этот вывод и следует из первого закона Ньютона — закона инерции<sup>26</sup>.

<sup>26</sup> Инерциальные системы отсчета в физике часто называются галилеевыми системами. Но это вряд ли обосновано. Как мы уже знаем, Галилей предполагал инерционным круговое движение,



Возвращаясь к общему случаю подвижных систем отсчета, т. е. неинерциальных, вспомним основное уравнение динамики для движения материальной точки в таких системах (1.12). Механика движения в таких системах относительного движения отличается от механики абсолютного движения, а стало быть — движения в инерциальных системах, необходимостью учета, наряду с реальными, физическими силами, еще и псевдосил — эйлеровых сил инерции — переносной и кориолисовой. В расчет должны приниматься эйлеровы силы инерции всех точек и всех частиц, составляющих рассматриваемую механическую систему, сплошное тело.

Эйлеровы силы инерции можно также определить не формальным, а как бы физическим методом<sup>27</sup>. Рассмотрим вспомогательное тело, полностью идентичное основному телу по распределению его масс. Пусть это вспомогательное тело совершает в точности такое же движение по отношению к произвольно выбранной «абсолютной» системе координат, какое совершает основное тело по отношению к данной подвижной неинерциальной системе. Таким образом, на все точки (или частицы) вспомогательного тела действуют те же физические силы (внешние и внутренние), что и на основное тело, т. е. силы той же величины, приложенные к тем же местам и так же ориентированные относительно осей «абсолютной» системы координат, как они ориентированы относительно подвижной системы.

Чтобы движение вспомогательного тела относительно «абсолютной» системы координат в точности повторяло движение основного тела относительно подвижной системы координат, необходимо в общем случае к вспомогательной системе приложить, помимо всех физических сил основной системы, еще и дополнительные силы. Так как движение рассматривается по отношению к «абсолютной», инерциальной, системе отсчета, то это могут быть только физические силы. Очевидно, что они точно соответствуют эйлеровым силам инерции.

---

т. е. то самое, где эйлеровы силы инерции проявляют себя, так сказать, в полном комплексе. Если вращающуюся систему, например нашу Землю, посчитать хотя бы на миг системой, эквивалентной «абсолютной», инерциальной, то в тот же миг «оживли» бы, стали бы реальностью обе эйлеровы силы инерции — переносная и кориолисова.

<sup>27</sup> См.: Ишлинский А. Ю. Механика относительного движения и силы инерции, М.: ИПМ АН СССР, 1973, с. 30.



Таким образом, эйлеровы силы инерции равны тем физическим силам, которые следует добавить к исходным физическим силам, чтобы в точности воспроизвести относительное движение какого-либо тела как движение абсолютное, т. е. в инерциальной системе отсчета.

Надо отметить, что внутренние усилия, как известно, не принимающие участия в движении центра инерции тела, у обоих тел — основного и вспомогательного — будут одинаковыми и такими, как у основного тела.

## Инерция в теории относительности

Свойство инерции, равно как и понятие массы, рассматриваются не только в классической механике — механике Ньютона, но и в теории относительности. Как известно, в классической механике покой и равномерное прямолинейное движение (движение по инерции) — понятия эквивалентные. Но при ускоренном движении в инерциальной системе на ускоряющееся тело обязательно должна действовать сила. Поэтому ускоренное движение в такой системе можно легко обнаружить механическим экспериментом, хотя бы измерением напряжений в материале или особыми приборами — акселерометрами.

В специальной теории относительности Эйнштейна равномерное движение признается относительным, а ускоренное — абсолютным. В течение десяти лет после ее опубликования Эйнштейн думал о том, как представить относительным и ускоренное движение. В 1916 г. он публикует свою общую теорию относительности, включающую специальную как частный случай. И центральным стержнем общей теории относительности стал принцип эквивалентности — ошеломляющее утверждение (за которое Ньютон, безусловно, счел бы Эйнштейна безумцем), что тяжесть и инерция — одно и то же. В конце своей жизни Эйнштейн написал такие слова: «Ньютон, прости меня! В свое время ты нашел тот единственный путь, который был пределом возможного для человека величайшего ума и творческой силы»<sup>28</sup>. Эйнштейн просил простить его за то, что он создал новую релятивистскую (*relativus* — относительный) механику, по иному объясняющую явления природы.

<sup>28</sup> Цит. по кн.: Гарднер М. Теория относительности для миллионов, М.: Атомиздат, 1979, с. 72.



Естественно, механика Эйнштейна никоим образом не устраняет классическую (как, например, геометрия Лобачевского не устраняет евклидову геометрию). Для очень многих случаев жизни, для подавляющего большинства инженерных расчетов механика Ньютона была, остается (и еще долго будет) основным аппаратом, несмотря на создание новых механик. И (как будет отмечено ниже) неправильно переносить отдельные понятия из «новых» механик в ньютоновскую, получая таким образом механику, так сказать, эклектическую.

Но прежде чем говорить о принципе эквивалентности, играющем основную роль в релятивистском взгляде на инерцию, следует остановиться на так называемом принципе Маха. Этот принцип, названный Эйнштейном по имени австрийского физика Эрнста Маха, оказал большое влияние на раннее творчество Эйнштейна, на формирование его принципа эквивалентности.

Принцип эквивалентности Эйнштейна гласит, что силовое поле, возникающее, когда телу сообщается ускорение или вращение, в зависимости от выбора системы отсчета можно рассматривать как инерционное или как гравитационное. Но при этом возникает важный вопрос, который ведет к глубоким, еще не решенным задачам: являются эти силовые поля результатом движения по отношению к пространству-времени, существующему независимо от веществ, или само пространство-время создано веществом? Иначе говоря, создается ли пространство-время галактиками и другими телами Вселенной?

Доводы XVIII и XIX вв. о существовании «пространства», или «эфира», независимо от вещества высказываются и поныне, только сейчас говорят о пространственно-временной структуре (или метрическом поле) космоса. Большинство ученых (Эддингтон, Рассел, Уайтхед и др.) считает, что свойство пространства-времени не зависит от звезд, хотя, конечно, местные искривления создаются звездами. Иными словами, если бы во Вселенной не существовало никаких других тел, кроме Земли, то было бы возможно вращение Земли относительно пространства-времени. Одиноким космическим кораблем, единственным телом во Вселенной, мог бы включить свои двигатели и ускориться. Космонавты внутри корабля при ускорении почувствовали бы действие инерции. Одинокая Земля, вращаясь в пространстве, сплющивалась бы в направлении к экватору из-за того, что частицы ее вещества, двигаясь, так сказать,



«против шерсти» пространства-времени, испытывали бы действие сил. Было бы даже возможно на этой одинокой Земле измерить кориолисову силу инерции и определить направление вращения Земли.

Эйнштейн признавал возможную справедливость подобной точки зрения, но предпочитал теорию, предложенную английским философом XVIII в. Дж. Беркли. Беркли утверждал, что если Земля — единственное тело во Вселенной, то бессмысленно говорить о возможности ее вращения. Такой взгляд в какой-то степени разделяли немецкий философ и математик XVII столетия Г. В. Лейбниц и голландский физик Хр. Гюйгенс, но впоследствии этот взгляд был забыт, и лишь в конце XIX в. австрийский физик Э. Мах возродил его, предложив научную теорию, с первого взгляда весьма правдоподобную.

С точки зрения Маха, космос, лишенный звезд, не имеет той пространственно-временной структуры, по отношению к которой могла бы вращаться Земля. Для существования гравитационных (или инерционных) полей, способных сплющить планету (или поднять жидкость на стенку вращающегося ведра), необходимо существование звезд, создающих структуру пространства-времени. Вначале Эйнштейн надеялся, что принцип Маха может быть введен в теорию относительности: он создал модель Вселенной, в которой пространственно-временное строение существует лишь постольку, поскольку существуют создающие ее звезды и другие материальные тела. «В последовательной теории относительности,— писал Эйнштейн в первом математическом описании этой модели (1917 г),— не может быть никакой инерции относительно „пространства“, а лишь инерция масс по отношению друг к другу. Если, следовательно, я удалю какую-то массу достаточно далеко от всех других масс Вселенной, ее инерция упадет до нуля». Позже, однако, он отказался от принципа Маха.

Не только Эйнштейна поражало странное сходство между явлением гравитации и инерцией. Представим себе, что пушечное ядро и маленький деревянный шарик падают с одной и той же высоты. Допустим, что масса ядра в 100 раз больше, чем масса деревянного шарика. Это означает, что на ядро действует сила тяготения, в 100 раз большая, чем та, которая действует на деревянный шарик. Теперь мы знаем, что если пренебречь сопротивлением воздуха, то шары будут падать бок о бок. Но Ньютон, чтобы объяснить это явление, должен был предположить нечто уди-



вительное: в той же степени, с какой тяжесть тянет вниз ядро, инерция ядра, сопротивляемость силе тяжести, его сдерживает. Действительно, на ядро действует сила тяжести, в 100 раз большая, чем на деревянный шарик, но и инерция сдерживает ядро в 100 раз сильнее, чем деревянный шар.

Физики выражают это другими словами: сила тяжести, действующая на предмет, всегда пропорциональна инерционной массе этого предмета. Если предмет *A* вдвое тяжелее предмета *B*, его инерция также вдвое больше. Вдвое бóльшая сила тяжести необходима для ускорения предмета *A* до той же конечной скорости, что и у предмета *B*. Если бы это было не так, то предметы разной массы падали бы с разными ускорениями. Значит, инерцию можно использовать таким образом, что гравитационное поле будет возникать и исчезать.

Вообразите в космосе лифт, движущийся вверх с постоянно нарастающей скоростью. Если ускорение постоянно и в точности равно ускорению падающего на Землю предмета, то человек внутри лифта будет себя чувствовать, как на Земле,— таким путем можно не только смоделировать тяготение, но и нейтрализовать его. В падающем же лифте ускорение вниз полностью ликвидирует влияние тяготения. Невесомость, которую испытывают космонавты, объясняется тем, что их корабли, обращаясь вокруг Земли, находятся в состоянии свободного падения ( $g=0$ ) все то время, пока ракетные двигатели космического корабля выключены.

Соответствие между гравитацией и инерцией Эйнштейн объяснил в своей общей теории относительности: тяготение и инерция кажутся одним и тем же потому, что они являются одним и тем же.

Значит, неправильно говорить, что внутри свободно падающего лифта тяготение Земли нейтрализуется: оно не нейтрализуется — оно ликвидируется, исчезает. Аналогично этому тяготение во вращающемся космическом корабле или в поднимающемся с ускорением лифте не моделируется, а создается. Гравитационное поле, созданное таким способом, имеет иную математическую форму, чем гравитационные поля, окружающие планеты, например Землю, но тем не менее это обычное гравитационное поле.

Принцип эквивалентности Эйнштейна — эквивалентности тяготения и инерции — дает возможность рассматривать все движения, в том числе и ускорение, как относи-



тельные. Когда воображаемый лифт с нарастающей скоростью движется в космосе, внутри него можно наблюдать явления инерции. Но теоретически лифт можно рассматривать как неподвижную, фиксированную систему отсчета. Тогда вся Вселенная окажется движущейся вниз мимо лифта с нарастающей скоростью. Ее ускоренное движение создает гравитационное поле, которое заставляет все предметы в лифте прижиматься к полу. Можно сказать, что эти явления — не инерционные, а гравитационные.

Но что же происходит в действительности? Двигается лифт, и его движение создает инерционные явления, или движется Вселенная, создавая гравитационное поле? Это неправильная постановка вопроса: «действительного», абсолютного движения не существует; существует лишь относительное движение лифта и Вселенной. Это относительное движение создает силовое поле, которое может называться гравитационным или инерционным в зависимости от выбора системы отсчета: если системой отсчета служит лифт, то поле называется гравитационным, если космос, то инерционным.

Общую теорию относительности можно «резюмировать» следующим образом. Ньютон разъяснил, что если наблюдатель находится в состоянии равномерного и прямолинейного движения, то нет ни одного механического опыта, с помощью которого он мог бы отличить свое состояние от состояния покоя. Специальная теория относительности распространила это заключение на оптические опыты. Общая теория является обобщением специальной теории на неравномерное движение. Она утверждает, что ни один эксперимент, какого бы вида он ни был, не поможет наблюдателю, в каком бы движении тот ни находился, равномерном или неравномерном, отличить свое состояние от состояния покоя.

Несмотря на то что имеются опыты, подтверждающие общую теорию относительности (и, может быть, огромное число их еще не проводилось и даже не обсуждалось), возможны эксперименты, которые могут сильно дискредитировать эту теорию, например опыты с античастицами, описанные американским физиком Г. Гамовым. Античастицы во всем подобны элементарным частицам, но имеют противоположный электрический заряд. Есть мнение, что античастицы имеют отрицательную массу, — если это так, то любая действующая на них сила ускоряет их в отрицательном направлении. Пока это не установлено, но



если это так, то теория относительности окажется сильно поколебленной.

Чтобы понять, почему должны появиться трудности, представим себе космический корабль, покоящийся по отношению к звездам. В центре корабля плавает «антияблоко» с отрицательной массой. Корабль начинает двигаться в направлении к потолку с ускорением  $1g$ . Что произойдет с яблоком? С точки зрения наблюдателя, находящегося вне корабля в инерциальной системе космоса, яблоко по отношению к звездам должно остаться на том же самом месте, так как на него не действует никакая сила.

Если же принять корабль за неподвижную систему отсчета, ситуация полностью изменится. Теперь наблюдатель должен предположить наличие поля тяготения, действующего внутри корабля. Это поле направит яблоко к потолку с ускорением (по отношению к звездам)  $2g$ . Основной принцип относительности нарушается. Две системы отсчета не взаимозаменяемы. Иными словами, понятие отрицательной массы нелегко примирить с общей теорией относительности, тогда как ньютоновский подход к инерции свободно его допускает.

Современные исследования вносят уточнения в релятивистские взгляды на инерцию. Дело в том, что при построении общей теории относительности Эйнштейн исходил из принципа эквивалентности (гравитационного поля и инерции). С помощью этого принципа он и получил основные уравнения теории. Однако необходимо помнить, что принцип эквивалентности не является общим принципом и имеет ограниченную область применимости: инерции эквивалентно лишь однородное (т. е. постоянное по величине и направлению) гравитационное поле. Но поле можно считать однородным только для очень небольших участков пространства. Например, силовые линии гравитационного поля Земли расходятся радиально от ее центра. Только внутри объемов пространства, линейные размеры которых во много раз меньше размеров Земли, гравитационное поле Земли можно считать однородным. Поэтому говорят, что принцип эквивалентности локален, т. е. что с помощью перехода в ускоренную систему координат можно исключить гравитационное поле на отдельных участках пространства, но отнюдь не везде, что очень важно.

Общим принципом, применяемым без всяких ограничений, является принцип равенства инертной и гравитаци-



онной масс. Пользуясь этим принципом, можно построить всю теорию гравитации. Если же исходить из принципа эквивалентности, то для построения теории необходимо сделать дополнительное предположение, что явление гравитации целиком сводится к геометрическим свойствам пространства-времени.

В специальной теории относительности все инерциальные системы равноправны не потому, что в них уравнения теории имеют один и тот же вид, а потому, что все физические явления в них имеют один и тот же характер. Лучшее доказательство этого, что никакими опытами, ни механическими, ни электромагнитными, нельзя обнаружить, покоится система или находится в состоянии равномерного движения.

Другое дело, когда речь идет об общей теории. Конкретный вид физических процессов здесь, конечно, различен в разных системах координат, и некоторые системы являются выделенными. Например, специальная теория относительности, как известно, есть частный случай общей теории, так что в принципе можно пользоваться не только инерциальными системами координат, но и произвольным образом ускоренными. Формально это сделать можно, но это не означает, что с точки зрения физики все системы будут равноправны: во всех инерциальных системах свет всегда распространяется по прямой с одной и той же скоростью, в ускоряющихся системах координат путь света искривлен. Таким образом, существует объективный критерий, который заставляет считать инерциальные системы выделенными.

Как видим, четкого ответа на то, что такое масса, инерция, а тем более силы инерции с точки зрения их физической сущности (а не в рамках классической механики) мы пока не имеем.

### Дискуссия о силах инерции

Как мы говорили, путаница в вопросе о силах инерции началась в основном с принципа Д'Аламбера — вернее, с той формы его изложения, которую дал Лагранж.

Проследим возникновение принципа механики, посвященного имя Д'Аламбера. Прежде всего, необходимо уточнить, что же, наконец, имеется в виду под термином «сила инерции»? Этот термин употребляется в механике в четырех различных смыслах. В начале XVIII в. силой инерции «традиционно» называли свойство материи со-



хранять свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. После работ Эйлера этот термин был оставлен.

В первой половине XIX в. термин «сила инерции» возродил французский инженер Ж.-В. Понселе. Под «силой инерции» он понимал реальную силу противодействия, которую движимое тело оказывает связям или движущим телам. Эта реальная сила приложена к связям. Такой является центробежная сила (которую ввел Гюйгенс), натягивающая веревку, прикрепленную к массе, совершающей круговые движения. (Или пример из современности: когда мы сидим в разгоняющемся на взлет самолете, наше тело с силой вдавливается в сиденье. Ускоряя наше тело, самолет посредством сиденья действует на него с силой  $m\bar{w}$ , где  $m$  — масса тела, а  $\bar{w}$  — ускорение. Поскольку каждому действию отвечает равное по величине и обратное по направлению противодействие, наше тело, в свою очередь, действует на сиденье с такой же силой.)

Таким образом, силы инерции по Понселе могут быть реальными только в случае взаимодействующих тел, а в общем случае не существуют как одна реальная сила, т. е. это уже не сила, а трудно сказать что, какой-то фантом. Поэтому теоретическая механика сил инерции Понселе не признает. Однако термин остался в разговорной речи и в техническом обиходе, где этим силам придают самый разный смысл.

Термином «силы инерции» обозначают также фиктивные кориолисовы силы инерции, которые надо добавить к реальным силам, чтобы определить движение тела по отношению к неинерциальной системе отсчета. А свойство инерции, как известно, проявляется только в «неподвижной», или инерциальной, системе.

И наконец, даламберовы силы инерции. Сейчас так называют приложенные к телу фиктивные силы, равные произведению его массы на ускорение и направленные противоположно ускорению. Если бы это были реальные силы, то добавленные к другим реальным силам, действующим на тело, они их уравновесили бы. К такой точке зрения приближался и Гюйгенс, когда утверждал, что центробежные силы Ньютона уравнивают центробежные. С современных позиций это утверждение неверно. Если вращающееся тело (о котором говорит Гюйгенс) остановить, тогда оно было бы, пожалуй, правомерно, по



тогда прекратится и действие центробежной силы. Остановить же тело, приложив силы инерции, в том числе и центробежную, можно только пользуясь принципом Д'Аламбера.

Теория относительности, как мы видели, не внесла ясности в понятие инерции и сил инерции, а попытка «втиснуть» релятивистские воззрения на силы инерции в рамки классической механики окончательно запутали этот вопрос.

Между тем вопрос о силах инерции интересовал механиков и машиноведов. В 1936—1937 гг. в советской прессе возникла дискуссия о силах инерции. Дискуссия была открыта письмом заведующего кафедрой теоретической механики Одесского университета Г. К. Суслова в редакцию журнала «Вестник инженеров и техников» с критикой взглядов на инерцию известного советского ученого-механика и педагога Л. Б. Левенсона — автора популярного учебника для вузов «Статика и динамика машин». В ответ на эту критику Левенсон изложил свои взгляды на инерцию сначала в небольшой заметке в газете «Техника», а затем в двух больших статьях, опубликованных в журналах «Вестник инженеров и техников» и «Под знаменем марксизма». Содержание обеих статей заключается в исследовании понятия «силы инерции».

В одной из них автор пишет: «В вопросе о силах инерции существует не только полная неувязка между теорией и практикой, но налицо и принципиальный спор: техники давно уже ведут расчеты машин, учитывая реальность действия сил инерции; тысячи машин строятся и работают на основе таких расчетов, а „теоретики“, упорно не считаясь с фактами, по-прежнему настаивают на „нереальности“ сил инерции, утверждают, что эти силы „вовсе не существуют“, что они „воображаемые“, что силы инерции — „условный геометрический вектор“, вводимый лишь „для удобства расчета“, что это „чисто математическая фикция“ и т. п.

...Этот полный и недопустимый по своей вредности для дела разлад между «теорией» и «практикой», длящийся уже свыше 200 лет, проник даже в школу, вызывает протесты как с той, так и с другой стороны, обычно весьма резкие со стороны теоретиков, в то время как техники, большей частью избегая принципиальных споров с более агрессивным противником, продолжают рассчитывать машины по силам инерции, отлично зная по опыту, что ма-



шину разнесет в куски, если они не учтут реального действия этих сил»<sup>29</sup>.

Далее Л. Б. Левенсон анализирует высказывания о сущности сил инерции 62 авторов учебников и исследований по теоретической и прикладной механике. Из их числа только десять высказались за реальность сил инерции как реакций материи на сообщаемое им внешней силой ускорение. «Остальные же авторы-теоретики или умалчивают о сути вопроса, по-видимому, трактуя член  $-m(d^2x/dt^2)$  (выражение силы инерции. — Н. Г.) как чисто математическую величину, или же подчеркивают «фиктивность» самой силы инерции, в то же время признавая реальность действия сил инерции на связь, передающую ускорение», — замечает Левенсон.

В результате Л. Б. Левенсон приходит к ряду выводов. Проблема сил инерции существует, ибо ученые до сих пор не пришли к единому мнению об их сущности. Силы могут быть активными и реактивными; к последним относятся силы трения, сопротивление среды, силы упругости и силы инерции. Своеобразие сил инерции заключается в следующем: 1) по происхождению и действию сила инерции стоит особняком, не являясь ни внешней, ни внутренней (в узком понимании) силой; 2) возникающие в одиночку (не парами) силы инерции должны быть уравновешены; 3) при отсутствии физической связи, передающей ускорение, сила инерции, хотя и существует как кинематическая реакция материи, но проявить свое действие в ясном виде не может; 4) при свободном движении материальной точки из-за полного отсутствия связей действие силы инерции также не может явно проявиться; тогда ускоряющая сила действует непосредственно на каждую частицу тела, минуя связи, и сообщает всем частицам равные и параллельные ускорения.

Критики такой позиции отмечали, что основным недостатком как книги Л. Б. Левенсона, так и его статей заключается в том, что он не сумел понять различия между фиктивной даламберовой силой, приложенной к движущемуся телу, и реальной силой, с которой это тело действует на связи. В статье Е. Л. Николаи был подвергнут историко-критическому анализу сам принцип Д'Аламбера как исходное положение всех недоразумений.

<sup>29</sup> Цит. по кн.: Боголюбов А. Н. Советская школа механики машин. М.: Наука, 1975, с. 55—56.



В редакционной статье журнала «Под знаменем марксизма», подводящей итоги дискуссии, в частности, отмечалось, что многие ее участники продемонстрировали недостаточное знакомство с философией, а также с работами классиков механики, вследствие чего неправильно толковали принцип Д'Аламбера. Дискуссия оказала значительное влияние не только на преподавание одного из разделов теории механизмов и машин, но и на постановку научной и педагогической работы в вузах.

Между тем уже в 1940 г. была издана книга профессора С. Э. Хайкина «Что такое силы инерции?», в которой вопрос опять трактовался с позиции ученых — сторонников реального существования сил инерции. Сторонники таких взглядов считают, что «недоразумения» с силами инерции возникают прежде всего потому, что неправильно толкуется понятие «сила» вообще. Сторонников сил инерции не устраивает существующее определение силы как «меры механического действия на данное материальное тело других тел» (БСЭ, т. 23, с. 1064), поскольку силы инерции в это определение не «укладываются», так как неизвестно, со стороны чего они действуют. Это как бы силы, которые действуют сами по себе. Эти силы они предлагают называть «силами инерции просто», а силы инерции, вводимые в принципе Д'Аламбера и, вообще, в инерциальной (неподвижной или движущейся по инерции) системе, — «силами инерции в смысле Ньютона». По их мнению, силы инерции «в смысле Ньютона» — фиктивны, а «силы инерции просто» — реальны<sup>30</sup>.

Значит, «силы инерции просто» могут существовать только в неинерциальных, т. е. ускоренно движущихся системах координат. Там они реальны, в инерциальных же системах они фиктивны. Отсюда выходит, что законы природы, объективная реальность зависят от выбора координат? Выразителем такого мнения, как мы уже знаем, был Э. Мах. В принципе Маха инерциальные свойства тел обусловлены их взаимодействием с бесконечно удаленными большими массами Вселенной. Мах стремился придать законам механики такой вид, чтобы они не зависели от вращения «подбором» системы координат.

Итак, если законы природы зависят от выбора системы координат, от наблюдателя, то давайте поместим быстро

<sup>30</sup> См.: Хайкин С. Э. Что такое силы инерции? М.; Л., 1940, с. 67—83.



вращающегося наблюдателя на неподвижный маховик. Относительно наблюдателя маховик быстро вращается (допустим, быстрее, чем может выдержать его прочность). Но маховик не разорвется, хотя наблюдателю кажется, что на него действуют огромные (и притом реальные) силы инерции. А сам вращающийся наблюдатель (если, конечно, он реален) может пострадать, так как части его тела стремятся сохранить движение по инерции (т. е. равномерное, прямолинейное), а их вынужденно сворачивают с этого пути. Или, говоря иначе, Земля не разорвется от того, что мы, «наблюдатели», вальсируем на ней, хотя относительной угловой скорости более чем достаточно для этого.

Чем же руководствовался Мах при создании своего принципа? Остается предположить, что не физика определяла его философию, а философские взгляды идеалиста-солипсита — физику. Но философия философией, а как же быть с реальностью сил инерции? Правда, реальность даламберовых и других «в смысле Ньютона» сил инерции отвергли сами сторонники сил инерции. Как же быть с «силами инерции просто», т. е. с теми, которые действуют в неинерциальных системах отсчета, причем действуют неизвестно откуда. Ведь именно об их реальности говорится во многих учебниках уже сегодняшнего дня.

Исчерпывающий ответ на это дает академик А. Ю. Ишлинский: «Реально существующими объявляются лишь силы, вызывающие ускорения материальных точек и тел относительно «абсолютной» системы координат... Они выражают меру механического взаимодействия тел в природе и могут быть различными по своему характеру». И далее: «Следует отличать так называемые даламберовы силы инерции от сил инерции, вводимых при рассмотрении движения материальных точек и тел по отношению к подвижным системам координат. Последние будут... именоваться эйлеровыми силами инерции. И даламберовы, и эйлеровы силы инерции не являются силами физическими и в этом смысле нереальны. Введение этих несуществующих сил чисто условное...»<sup>31</sup>.

\* \* \*

Вот кратко о физике инерции. А если резюмировать основное, что было сказано в этой главе, то, пожалуй, все можно свести к нескольким фразам.

<sup>31</sup> Ишлинский А. Ю. Механика относительно движения и силы инерции. М.: Наука, 1981, с. 5—7.



1. Движение инерционное, или по инерции, может существовать только в инерциальных системах отсчета. Это равномерное прямолинейное движение или эквивалентный ему относительный покой.

2. Все силы инерции — силы нереальные, фиктивные, необходимые нам лишь для облегчения решения тех или иных задач механики. Ни в коем случае нельзя считать их реальными силами и приписывать им свойства и действия физических сил.

3. Вращательному движению тоже присуще (правда, в несколько иной форме) свойство инерции. Мерой инертности во вращательном движении является момент инерции. Угловая скорость вращающегося тела является величиной, характеризующей его физическое состояние. Она может быть определена безотносительно к системе отсчета, и поэтому в классической механике она всегда абсолютна.

4. Теория относительности потребовала введения новых принципов во взглядах на инерцию. Однако эти принципы, во-первых, не в полной мере отвечают современным требованиям, а во-вторых, не имеют прямого отношения к классической механике, где используется понятие сил инерции. Введение отдельных, в том числе и спорных, положений о силах инерции из релятивистской механики в классическую нельзя признать обоснованным, хотя бы методологически.

5. Многие общепринятые термины, связанные с понятием инерции («силы инерции», «движение по инерции» и др.), часто используются не по назначению, что приводит к неправильным толкованиям явлений.

## Глава II

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНЕРЦИИ В МАШИНАХ

#### Инерционное и «псевдоинерционное» движение

Свойство инерции заложено в основу очень многих машин, механизмов и приборов (действительно, невозможно представить себе нечто, обладающее массой и не проявляющее свойств инерции). Массивное тело, будучи разогнанным, стремится в силу инерции сохранить свою скорость и «со-



1. Движение инерционное, или по инерции, может существовать только в инерциальных системах отсчета. Это равномерное прямолинейное движение или эквивалентный ему относительный покой.

2. Все силы инерции — силы нереальные, фиктивные, необходимые нам лишь для облегчения решения тех или иных задач механики. Ни в коем случае нельзя считать их реальными силами и приписывать им свойства и действия физических сил.

3. Вращательному движению тоже присуще (правда, в несколько иной форме) свойство инерции. Мерой инертности во вращательном движении является момент инерции. Угловая скорость вращающегося тела является величиной, характеризующей его физическое состояние. Она может быть определена безотносительно к системе отсчета, и поэтому в классической механике она всегда абсолютна.

4. Теория относительности потребовала введения новых принципов во взглядах на инерцию. Однако эти принципы, во-первых, не в полной мере отвечают современным требованиям, а во-вторых, не имеют прямого отношения к классической механике, где используется понятие сил инерции. Введение отдельных, в том числе и спорных, положений о силах инерции из релятивистской механики в классическую нельзя признать обоснованным, хотя бы методологически.

5. Многие общепринятые термины, связанные с понятием инерции («силы инерции», «движение по инерции» и др.), часто используются не по назначению, что приводит к неправильным толкованиям явлений.

## Глава II

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНЕРЦИИ В МАШИНАХ

#### Инерционное и «псевдоинерционное» движение

Свойство инерции заложено в основу очень многих машин, механизмов и приборов (действительно, невозможно представить себе нечто, обладающее массой и не проявляющее свойств инерции). Массивное тело, будучи разогнанным, стремится в силу инерции сохранить свою скорость и «со-



противляется» всему, что мешает ее сохранить. Оно ломает преграды, если их поставить на его пути, нагревает и изнашивает тормоза, если его начать тормозить, перемещивает воздух, воду и другую сопротивляющуюся среду — иначе говоря, производит работу. И в эту работу переходит кинетическая энергия, запасенная в массивном теле при его разгоне. Точнее говоря, энергия не переходит в работу непосредственно, а совершает ее, переходя в тепло.

«Работает» инерция только в том случае, когда массивное тело движется с ускорением. Ускорение это может быть положительным, тогда тело накапливает в себе кинетическую энергию, или отрицательным, тогда тело выделяет накопленную энергию для совершения работы. И если иногда говорят, что, совершая работу, тело движется «до инерции», то это лишь, так сказать, дань традиции: ведь движение по инерции — это движение без ускорения, когда телу ничего не мешает свободно двигаться, когда оно не совершает никакой работы. А при ускоренном движении используется свойство инерции, свойство сопротивляться изменению скорости как по величине, так и по направлению. Свойство очень ценное для работы многих машин и механизмов (и даже живых организмов). Рассмотрим использование инерции при ускоренном движении машин, и прежде всего транспортных.

На транспорте инерция используется весьма широко. Она помогает экономить горючее и энергию при свободном выбеге — накате, позволяет «с ходу» преодолевать значительные подъемы. Накатом называется движение машины после отсоединения двигателя от колес на автомобилях или после выключения электродвигателей на электрическом транспорте. Машина в этом случае движется замедленно, расходуя кинетическую энергию на преодоление сопротивлений. На практике накат часто называют движением по инерции, не придавая при этом значения действию сил сопротивления и замедленному характеру движения (к сожалению, в некоторых учебниках по теории автомобиля накат также называют движением по инерции).

Итак, часто движением по инерции неправильно называют такое движение, когда на движущуюся материальную точку (тело) не действуют движущие силы, а действуют только силы сопротивления, и движение происходит за счет накопленной кинетической энергии. Например, при движении автомобиля с отсоединенным двигателем накатом движущие силы, создаваемые ведущими колесами, от-



сутствуют, силы сопротивлений от качения колес по дороге, от сопротивления воздуха и т. п. остаются. Или при движении бильярдного (либо любого другого) шара после удара движущие силы, действовавшие на него во время удара, отсутствуют, силы трения шара об опорную поверхность и о воздух остаются. Качение шара происходит благодаря накопленной в нем во время удара кинетической энергии. Во всех этих случаях мы имеем «псевдоинерционное» движение.

Движение накатом ускоренное. Ускорение здесь, конечно, отрицательное, поэтому на практике часто такое движение называют замедленным. И это замедление, равно как и ускорение при действии на машину движущихся сил, можно измерить прибором, использующим для своей работы опять-таки инерцию, — инерционным акселерометром, представляющим собой стеклянный сосуд с трубкой, снабженной шкалой. Работает он следующим образом. При торможении машины ртуть из нижней части сосуда в силу инерции перемещается вперед. При этом масло, находящееся в сосуде над ртутью, выливается в измерительную трубку. Чем больше замедление, тем выше уровень масла в трубке.

Каким же образом накат позволяет экономить энергию? Двигатели транспортных машин, в том числе и автомобилей, обычно рассчитаны на существенно большую мощность, чем та, которая требуется для равномерного движения со средней скоростью. Запас мощности нужен главным образом для интенсивного разгона и движения с максимальными скоростями. А когда автомобиль движется со средней скоростью по ровной дороге, мощность двигателя используется далеко не полностью, нередко он работает в четверть силы, если не меньше. Экономичность двигателя при этом далеко не лучшая: на каждую единицу произведенной работы тратится гораздо больше горючего, чем при нормальной «номинальной» загрузке силового агрегата. Поэтому, разогнав автомобиль при работе двигателя на полной загрузке, а затем двигаясь накатом за счет накопленной при разгоне кинетической энергии, можно экономить горючее.

Накат автомобиля имеет и отрицательные стороны, поскольку движение в этом случае неравномерное — скорость при накате постоянно падает. Кинетическая энергия машины  $E_k$  при переходе на накат (т. е. ее максимальное значение) равна сумме текущей кинетической энергии



$0,5mv^2$  и потерь энергии на преодоление сил сопротивления  $\int_0^S R dS$ :

$$E_k = 0,5 mv^2 + \int_0^S R dS, \quad (2.1)$$

где  $m$  — масса машины с учетом инерции вращающихся частей,  $v$  — текущая (мгновенная) скорость машины,  $R$  — сумма сопротивлений движению машины,  $S$  — путь выбега, или наката.

Естественно, если снижается кинетическая энергия, то падает и скорость — правда, медленнее, чем энергия:

$$v = \left( 2 \left( E_k - \int_0^S R dS \right) / m \right)^{1/2}. \quad (2.2)$$

Отсюда можно сделать вывод, что для осуществления среднетехнической скорости машины приходится ускорять выше этой скорости до наката и существенно снижать ее скорость в конце наката. А это не всегда можно сделать. Если верхний предел скорости ограничен небольшой величиной, как, например, в городе, то в конце наката ее приходится снижать до самых малых величин — почти до скорости пешехода. Да и водителю и пассажирам такое «импульсивное» движение — смена постоянных ускорений и замедлений — не доставляет удовольствия. Однако при этом экономится горючее.

Аналогично используется накат в трамваях, что наглядно иллюстрируется поведением стрелки амперметра на панели водителя. При трогании с места и разгоне трамвая ток очень велик. Но после достижения определенной скорости водитель выключает тяговый двигатель, и стрелка на амперметре падает до нуля. Трамвай идет накатом. Благодаря тому, что стальные колеса трамвая, катясь по рельсам, имеют очень малое сопротивление — в 3—4 раза меньшее, чем у автомобиля, — скорость при накате трамвая падает незначительно. И только при торможении стрелка амперметра снова подскакивает, но тут уже ток течет в обратном направлении — это торможение самим электродвигателем.

Важное значение имеет использование инерции для так называемого динамического преодоления подъемов. Транспортное средство — скажем, автомобиль — при этом специально разгоняется, приобретая скорость, а вместе с



ней и кинетическую энергию, чтобы «с ходу» преодолеть такой подъем, который он либо совсем не смог бы осилить, либо осилил бы только на очень малой скорости. Особенно часто этим способом пользуются при перевозке сверхтяжелых поездов, поскольку если тут подойти к подъему на малой скорости или остановиться перед ним, то его уже не преодолеть — не хватит тяги локомотива. Поэтому если для тяжелого автомобиля или автопоезда неполное использование инерции грозит лишь потерей времени — автомобиль все-таки одолеет подъем — правда, на малой скорости, то для железнодорожного «тяжеловеса» это пренебрежение инерцией имеет более серьезные последствия.

При движении на подъем за счет инерции скорость машины падает более интенсивно, чем при езде накатом. В формулу энергетического баланса (2.1) в этом случае в правую часть нужно добавить еще одно слагаемое — потенциальную энергию  $\Pi = mgH$ , которая накапливается в массе  $m$  машины при подъеме ее на высоту  $H$ . Если машина перед подъемом имела скорость  $v$ , то максимальная высота преодолеваемого за счет инерции подъема:

$$H = \frac{1}{mg} \left( 0,5 mv^2 - \int_0^S R dS \right). \quad (2.3)$$

Здесь не следует забывать, что в общую инерцию машины, измеряемую массой  $m$ , входит и инерция всех ее вращающихся частей — валов и маховика двигателя, колес и т. п. Влияние инерции вращающихся частей проявляется как увеличение общей массы машины, называемой фиктивной массой.

Для оценки влияния инерции вращающихся частей при расчете автомобиля академик Е. А. Чудаков предложил ввести особый коэффициент  $\delta_j$ . Фиктивная масса машины  $M_\phi$  при этом в  $\delta_j$  раз больше реальной массы  $M$ :

$$M_\phi = M \delta_j. \quad (2.4)$$

Следует четко помнить, что фиктивная масса, зависящая от влияния инерции вращающихся частей, проявляет себя лишь тогда, когда колеса машины взаимодействуют с опорной поверхностью. Как только машина потеряет связь с неподвижной опорой, с землей, она мгновенно лишается своей фиктивной массы, остается только реальная.

Для обычных автомобилей увеличение фиктивной массы невелико — от 10% на высшей передаче до 200–300%



и более на первой. Но в середине прошлого века, в 1860 г., русским инженером Шуберским был разработан экипаж, названный им «маховозом», в котором фиктивная масса превышала реальную более, чем в 1000 раз.

Маховоз представлял собой железнодорожную платформу, на которой были установлены оси с громадными маховиками наподобие железнодорожных колес. Оси маховиков лежали на верхней части периферии колес как фрикционы, и, свешиваясь наружу, маховики едва не доставали земли. Рама, в которой крепились подшипники осей маховиков, могла приподниматься, и маховики расцеплялись с колесами. Таким образом, привод между колесами платформы и маховиками осуществлялся фрикционно без какого-либо дополнительного механизма. Платформа цеплялась между локомотивом и вагонами поезда.

При движении на горизонтальном участке, а тем более на спуске, маховики массой в сотни пудов разгонялись от колес платформы, а затем своей инерцией помогали поезду преодолевать достаточно крутые подъемы. Шуберский предлагал оснастить маховиками и тендер локомотива.

Изобретение Шуберского путем увеличения инерции поезда при заданной его скорости позволяло существенно повысить экономичность железнодорожных перевозок, но было сложно не по времени и тогда «не прижилось». Только сейчас возобновились работы по созданию тепловозов с маховиками, позволяющими существенно повысить их эффективность, например на маневровых работах.

### Инерция и «выравнивание» хода машин

Инерция вращения, проявляющаяся ярче всего в работе маховиков, необыкновенно широко используется в технике. Трудно назвать машину, в которой не присутствовал бы маховик или аналогичная деталь — массивный шкив, зубчатое колесо, фрикцион и т. п. Чаще всего маховик в машинах и механизмах применяется для выравнивания их хода. Для этой цели они используются с XV в. Начало использования маховиков в машинах связано с появлением кривошипно-шатунных механизмов, требующих уменьшения неравномерности вращения валов. Чаще всего требовалось уменьшение неравномерности вращения входной вал, так как он обычно приводился во вращение вручную (тот, кто хотя бы раз пытался завести двигатель автомобиля



рукоятю, знает, как трудно работать, когда рукоять вращается неравномерно).

Средневековый ученый Г. Агрикола в своей книге «О металлах» (*De re metallica*), изданной в 1556 г., описывает конструкцию водоподъемника с ручным приводом и маховиком, выполненным из металла, насаженным на рукоять. Этот механизм был одним из первых, содержащих маховик в трансмиссии. Маховик применялся и в приводе средневекового поршневого насоса, приводимого в движение опять-таки мускульной силой человека. А вот в машинах с приводом от неживого источника энергии, например падающей воды, маховик ставился уже близ выходного вала, несущего рабочий орган. Сравнительно большой маховик можно наблюдать в вододействующей установке для распиловки бревен XVI в. Назначение маховика здесь все то же — снижение неравномерности хода машины.

Однако массовое распространение маховик получил с появлением паровых двигателей, а затем и двигателей внутреннего сгорания. И здесь он служил все той же цели.

Каким же образом маховик выравнивает ход машины? Проследим это на примере поршневого двигателя внутреннего сгорания. Начнем со вспышки рабочей смеси в цилиндре двигателя — с процесса, при котором вырабатывается энергия. Эта энергия должна произвести работу, требуемую от двигателя, а кроме того — подготовить следующую вспышку. А для этого нужно вытолкнуть из цилиндра продукты сгорания, набрать в цилиндр свежий заряд смеси и, что требует максимальной затраты энергии, сжать смесь. Если бы механизм двигателя был безынерционным, то, расширившись от вспышки, газ довел бы поршень до нижнего положения и на этом работа двигателя была бы закончена. Но благодаря высокой инертности маховика, насаживаемого на вал двигателя, последний не только не останавливается после вспышки, а продолжает равномерно вращаться.

При вспышке рабочей смеси в цилиндре и ходе поршня при этом маховик воспринимает почти всю механическую энергию, выделенную вспышкой. Маховик разгоняется, с преодолением инертности в нем накапливается избыточная кинетическая энергия. Затем часть этой энергии, причем большая, передается через трансмиссию рабочему органу машины. Оставшаяся же часть энергии производит всю ту работу по подготовке рабочего хода, о которой говорилось выше. И при этом благодаря высокой инертно-



сти угловая скорость маховика почти не падает. Работу маховика в этом случае можно уподобить действию разогнанного автомобиля, преодолевающего бугорок. Скорость незначительно снижается, но препятствие преодолено.

При выборе маховика руководствуются тем, чтобы он не был настолько малоинертным, что неравномерность вращения стала бы угрожать устойчивой работе машины. С другой стороны, маховик нельзя делать и слишком инертным — хоть это и будет хорошо для двигателя, но сам маховик станет либо очень тяжелым, либо очень крупным. Без этих мер нельзя увеличить инертность — момент инерции маховика.

Однако маховик большой инертности, поставленный на дизельный двигатель, может существенно повысить его экономичность при очень малых оборотах. Воспользовавшись этим, немецкий специалист Шрамм недавно построил автомобиль с дизельным двигателем мощностью 1 л.с., имеющий неслыханно малый расход горючего — 100 г на 100 км пути. Средняя скорость этого одноместного автомобиля 21 км/ч — выше, чем средняя скорость автобуса в крупном городе. Маховик повышенной инертности позволил в этом случае «выровнить» ход двигателя при очень низких его оборотах, когда экономичность максимальна, но весьма велика неравномерность вращения.

Несколько иное назначение маховика в так называемых машинах ударного действия, где инерция используется для произведения механической работы: в различных дробильных и металлообрабатывающих установках, прокатных станах, прессах, ножницах и пр. Во время рабочего хода таких машин маховик испытывает сильное замедление, разгон же производится особым двигателем достаточно плавно. В поршневых машинах дело обстоит иначе — разгон там резкий, а замедление достаточно плавное и растянутое. Но и в том, и в другом случае кинетическая энергия, накопленная при разгоне, используется при замедлении. И там, и здесь инерция маховика делает возможной работу машины.

В машинах ударного действия момент инерции маховика должен быть настолько велик, чтобы угловая скорость вращения двигателя, приводящего маховик, не упала при рабочем ходе ниже критического значения. Некоторые двигатели, например асинхронные, не могут устойчиво работать при низких скоростях. Да и вообще, сильное снижение скорости понижает производительность машины. Вме-



сте с тем момент инерции маховика должен быть настолько мал, чтобы двигатель успел набрать при разгоне всю номинальную скорость. Эта скорость опять-таки определяется характеристикой применяемого двигателя.

Интересно применение маховика в транспортной машине, созданной русским механиком И. П. Кулибиным в 1791 г. и названной им самокаткой<sup>1</sup>. Самокатка Кулибина приводилась в движение человеком, нажимавшим ногами на педали. От педалей шел механический привод на колеса через коробку передач (первую такого рода в технике). Но подобные самокатки были и раньше, новизна же этой машины заключалась в наличии на ней маховика. Маховик диаметром 1,5 м и массой около 50 кг подключался к приводу между педалями и колесами экипажа. Значительно увеличивая инертность экипажа, маховик снижал неравномерность его движения, особенно по неровной местности. За счет инерции маховика экипаж преодолевал и небольшие подъемы.

Следует отметить, что самокатка Кулибина была первым экипажем, использующим маховик в трансмиссии. В настоящее время, как известно, использование маховика в трансмиссиях транспортных машин, в первую очередь автомобилей и электромобилей, считается одной из самых актуальных задач современного, а тем более перспективного транспорта.

Маховики применяются и в современных мускульных машинах — велосипедах и педикарах. В одних случаях они, как и в самокатке Кулибина, позволяют выравнивать ход машины при движении по дорогам с подъемами и спусками, в других — маховик, повышая общую инертность машины, обеспечивает ее равномерное движение не только при работе педалями, но и при иных побочных движениях человека, в частности «подпрыгивании» его в седле.

А нельзя ли использовать энергию «подпрыгивающего» кузова автомобиля при движении его по плохим дорогам? Известно, что при движении по целине и другим неровным поверхностям до 25% мощности двигателя машины уходит на «гашение» колебаний кузова в амортизаторах. Неровные участки дорог сильно снижают скорость движения автомобилей, хотя многие из машин, например вездеходы, могли бы двигаться на этих участках и быстрее. Есть ряд

<sup>1</sup> Действующая модель этого экипажа экспонируется в Политехническом музее в Москве.



проектов, где энергию колебаний кузова предполагается не «гасить» (т. е. переводить в тепло), а передавать вращающемуся маховику. Роль маховика здесь состоит в поглощении энергии отдельных толчков через тот или иной тип привода — рейку с шестерней либо (лучше) гидропривод — и последующем равномерном выделении ее для движения машины, подзарядки аккумуляторов или просто освещения.

Суть такого «выравнивания» энергии отдельных толчков хорошо прослеживается на работе маховичного карманного фонарика (называемого «жуком» за внешнее сходство, а также жужжание при работе). Этот фонарик — настоящая электростанция, работающая от периодических нажатий кисти руки на его рукоятку. Рукоятка же через механическую передачу вращает небольшой магнитный маховик, играющий роль ротора электрогенератора. Рабочий ход рукоятки — внутрь корпуса фонарика; обратный ход совершается пружиной, причем маховик в этом случае вращается свободно — он соединен с механической передачей через обгонную муфту. Достаточно нескольких периодических нажатий на рукоятку фонаря, чтобы лампочка ярко загорелась и горела бы еще некоторое время после прекращения нажатий, постепенно затухая.

Аналогична роль маховика на крупных электростанциях, где также требуется сглаживание колебаний мощности, поскольку потребление электроэнергии меняется, а электростанция рассчитана на определенную мощность, ее невыгодно снижать и практически невозможно резко повысить. Расчеты и экспериментальная проверка показали, что самый экономичный способ сглаживания колебаний мощности — посредством маховика: во время недогрузок станции разгонять через электродвигатели большие маховики, а затем при перегрузках переключать эти двигатели в режим генераторов с получением необходимой электроэнергии<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Американский инженер А. Милнер предложил систему бесперебойного снабжения жилого дома электроэнергией, получаемой от Солнца с помощью фотоэлектрических преобразователей или тепловых двигателей — паровых, двигателей Стирлинга и т. п. Электроэнергия подается в электродвигатель, использующий, как и «фонарь-жук», постоянные магниты. Вал двигателя соединен с маховиком диаметром 1 м, массой 2 т, который, разгоняясь от двигателя до 15—20 тыс. об/мин, может долго питать дом электроэнергией по ночам и в пасмурную погоду. «Маневренный фонд» такой системы 25 кВт·ч.



Следует заметить, что использование инерции вращающегося маховика для сглаживания пульсаций тока на электростанции было впервые осуществлено русским изобретателем А. Г. Уфимцевым еще в 20-х годах. На его ветроэлектростанции в Курске был применен маховик массой 320 кг. Ветроэлектростанция Уфимцева бесперебойно снабжала энергией и теплом его дом и даже освещала часть улицы, на которой жил изобретатель. Эта конструкция сохранилась и по настоящее время.

Маховики, применяемые для сглаживания энергетических и мощностных пиков на крупных электростанциях, имеют поистине гигантские размеры и обладают огромной инерцией вращения (рис. 2). Например, для сглаживания энергетического пика в 20 тыс. кВт·ч разработан маховик диаметром 4,6 м, массой 200 т, разгоняющийся до скорости 3500 об/мин.

Американский ученый Д. В. Рабенхорст предложил еще более грандиозный проект — систему из четырех маховиков, каждый диаметром 18 м, толщиной 3—6 м, изготовленных из стеклопластика.

Такой маховик может сгладить энергетический пик в 100 тыс. кВт·ч. Этим же ученым разработана более дешевая и реальная система, предусматривающая маховичные электрические модули на 113 кВт·ч энергии при мощности 70 кВт. Маховик имеет средние параметры: диаметр 1,2 м, высоту 1 м, массу 4,3 т, скорость вращения 7200 об/мин. Однако таких модулей предполагается 1440 штук, рас-

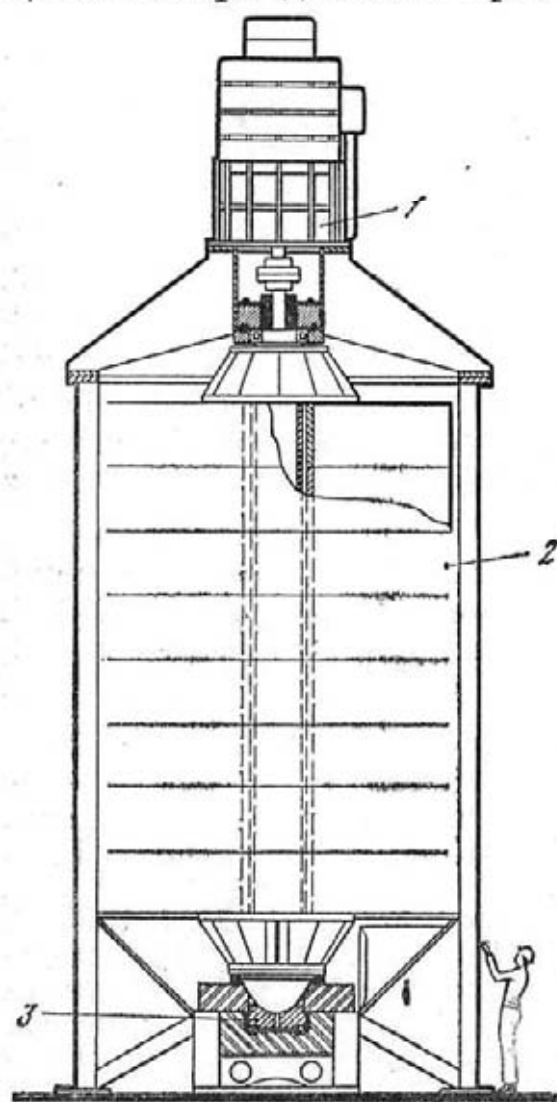


Рис. 2. Инерционный накопитель для энергосистем

- 1 — мотор-генератор,
- 2 — батарея маховиков,
- 3 — подпятник



положенных на 36 стеллажах, занимающих площадь 0,2 га. Такая «инерционная батарея» способна поглотить и выдать 160 тыс. кВт·ч энергии при пиковой мощности 100 тыс. кВт.

Однако и это не самый крупный инерционный поглотитель пиков энергии. Система, где инертные тела расположены в трубе метрового сечения, образующей окружность радиусом 16 км (например, вокруг крупного города), способна обеспечить сглаживание пика в 5,5 млрд. кВт·ч.

## Инерция и рекуперация механической энергии

С увеличением масс и скоростей транспортных машин, улучшением дорог, повышением КПД трансмиссий все большее значение приобретает рекуперация, т. е. использование энергии, погашаемой при торможении. В чем же состоит проблема рекуперации энергии движущейся машины? И при чем здесь инерция?

Дело в том, что именно из-за инертности машины, чтобы ее стронуть с места, разогнать, необходимо приложить к ней силу. Эта сила разгоняет машину, но, действуя на каком-то участке пути, она совершает работу. Часть этой работы идет на преодоление сил сопротивлений, а другая, обычно бо́льшая, переходит в кинетическую энергию машины. Теперь машина обладает инерцией движения и, если не учитывать действующих на нее сил сопротивлений, будет двигаться равномерно и прямолинейно все время. Эти силы сопротивлений могут быть уравновешены движущими силами машины, и тогда возникает почти чистое инерционное движение.

Но вот машине надо остановиться. Тут уж инерция мешает это сделать. Можно, конечно, пустить машину двигаться накатом, но это не всегда приемлемо: автобус, например, может пройти накатом около километра, а поезд — гораздо больше. Тормозить же надо обычно на пути, измеряемом двумя-тремя десятками метров, а то и меньше.

Сейчас чаще всего останавливают машины так. Тормозами создают колесам сопротивления их проворачиванию, т. е. в свою очередь, создают силу трения своей периферии о дорогу, а уж силы трения, направленные против движения, «воспринимают» инерцию движущейся машины. Машина останавливается, а ее кинетическая энергия безвозвратно переходит в тепло. Как видим, не лучшее приращение энергии.



Проверим, много ли энергии переводит инерция в тепло таким образом. В качестве примера рассмотрим зависимость изменения доли кинетической энергии  $E$  в общем расходе механической энергии от скорости движения транспортной машины  $v$ , сопротивлений ее движению  $p$ , а также расстояний между остановками  $S$  (рис. 3). Остановки транспортных машин, за исключением конвейеров и эскалаторов, практически неизбежны. Очень часто, например при движении городского транспорта — автобусов, троллейбусов, трамваев, поездов метро, остановки следуют одна за другой через каждые несколько сот метров.

На рис. 3 кривая 1 показывает зависимость изменения доли кинетической энергии от скорости движения машины при расстоянии между остановками 300 м (среднее расстояние между остановками автобуса) и сопротивлении движению 1,5% от силы тяжести машины. Кривая 2 отражает тот же процесс, но уже в зависимости от расстояния между остановками при максимальной скорости движения 60 км/ч и той же силе сопротивления движению. Кривая 3 характеризует зависимость  $E$  от  $p$  при постоянных скорости и расстоянии между остановками — соответственно 60 км/ч и 300 м.

Из графика видно, что для современных машин циклического действия — автобусов, троллейбусов, трамваев, поездов метро, пригородных поездов и аналогичных им — для наиболее эффективных рабочих циклов тратится с пользой около половины энергии, выработанной двигателем. Другая же половина переходит в кинетическую энергию с последующим ее переводом в тепло и рассеиванием при торможении. В будущем это соотношение энергий, несомненно, еще более ухудшится.

Значит, инерция транспортных и других циклично работающих машин вредна — она влечет за собой износ двигателя и тормозов, нагрев окружающей среды и т. д. Если бы реальные машины были безынерционными, их можно было бы разгонять и тормозить, не тратя на это сил и энергии. Но даже если в будущем человечество сумеет построить очень легкие транспортные средства из каких-либо сверхпрочных материалов, то все равно масса пассажиров и грузов останется прежней. Следовательно, надо изыскивать пути устранения вредного влияния инерции циклично работающих машин.

Интересное решение этой проблемы представляет так называемый принцип постоянства кинетической энергии



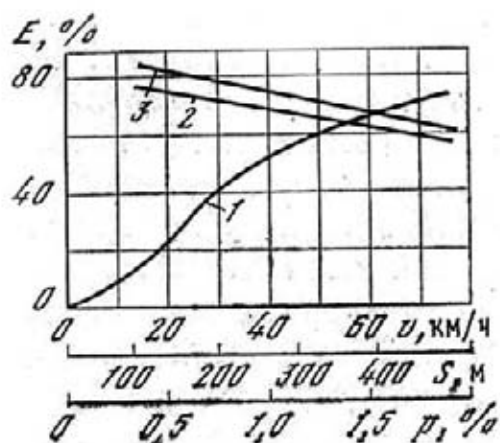


Рис. 3. Зависимость доли кинетической энергии в энергетическом балансе машины от режима движения

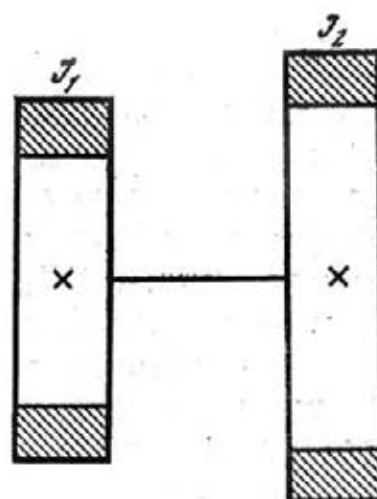


Рис. 4. Система движущаяся машина — маховик

машины. В первом приближении пренебрежем силами сопротивлений, частично рассеивающими энергию, т. е. представим, что машина движется без потерь на трение, сопротивление среды и пр. Затем представим движущееся транспортное средство или другую машину — разумеется, кинематически связанную с опорной поверхностью, — в виде добавочной маховой массы — маховика. При этих преобразованиях важно одно — чтобы кинетическая энергия приводимых друг к другу поступательно движущейся массы при данной скорости и маховой массы при данной угловой скорости была равна и чтобы связь между вращающейся и поступательно движущейся инертностями осуществлялась посредством неподвижного (имеющего бесконечно большую массу и соответственно момент инерции) звена, например Земли.

Далее жестко соединим с маховиком, заменившим нам машину, другой маховик — реальный, играющий роль аккумулятора механической энергии и находящийся на самой машине (рис. 4). Если эти маховики вращаются с угловой скоростью  $\omega$ , то их суммарная кинетическая энергия

$$\sum E_k = 0,5 I_1 \omega^2 + 0,5 I_2 \omega^2 = 0,5 \omega^2 (I_1 + I_2), \quad (2.5)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  — моменты инерции соответственно маховика, заменяющего машину, и маховика-аккумулятора.

Чтобы машина двигалась как можно быстрее, необходимо, чтобы практически вся кинетическая энергия систе-



мы «перетекла» в первый маховик. Как следует из формулы (2.5), для этого инертность первого маховика должна быть во много раз больше инертности второго:  $I_1 \gg I_2$ . Чтобы практически остановить машину, кинетическая энергия должна вся «войти» в маховик-аккумулятор, которому в этом случае придется стать много инертнее первого маховика:  $I_2 \gg I_1$ . Но при постоянной угловой скорости  $\omega$  сумма  $I_1 + I_2$  всегда остается постоянной, поэтому принцип постоянства кинетической энергии можно также назвать и принципом постоянной инерции машины. Просто инерция поступательно движущейся массы, взаимодействуя с неподвижным звеном, преобразуется в инерцию вращательного движения маховика, и наоборот.

Чтобы машина двигалась с максимальной скоростью, практически достаточно свести момент инерции маховика аккумулятора  $I_2$  к 1% от  $I_1$ . И наоборот, чтобы почти остановить машину, момент инерции маховика аккумулятора  $I_2$  должен стать примерно в 100 раз больше  $I_1$ . Иначе говоря, диапазон регулирования моментов инерции должен быть порядка 10 000. Это очень много. Этого не достигнуть изменением расстояний грузов от оси вращения, о чем говорилось выше. Но этого можно достигнуть изменением передаточного числа привода, соединяющего первый и второй маховики, если его поставить вместо жесткого вала.

Представим себе два маховика, закрепленные на стойках в подшипниках, при этом на валы маховиков намотана тонкая прочная лента, как на кассеты магнитофона. Лента выполнена одним куском, т. е. она переходит из одного мотка ветвью на другой моток.

Пусть вся лента намотана на валу маховика-аккумулятора и диаметр мотка раз в 10 больше диаметра вала. Маховик, имитирующий транспортное средство, разогнан; это должно означать, что машина движется с достаточной скоростью. Маховик-аккумулятор с мотком ленты на его валу неподвижен.

Теперь, чтобы энергией одного, вращающегося, маховика разогнать неподвижный, соединим конец ленты из мотка с валом первого маховика. Лента начнет наматываться на него и плавно стронет с места неподвижный маховик. По мере перемотки ленты моток на первом маховике будет расти, на втором — уменьшаться. Маховики будут обмениваться скоростями, и в конце процесса наступит картина, обратная исходной, — вся лента будет намотана на вал первого маховика, скорость вращения которого бу-



дет в 10 раз меньше скорости вращения маховика-аккумулятора. Если скорость в 10 раз меньше, кинетическая энергия, как известно, уменьшается в 100 раз.

Итак, в начале процесса кинетическая энергия, а стало быть и «приведенный» момент инерции первого маховика, был в 100 раз больше, чем маховика-аккумулятора. В конце процесса — наоборот, энергия и «приведенный» момент инерции маховика-аккумулятора в 100 раз больше, чем первого маховика. Диапазон варьирования моментов инерции получится именно тот, о котором говорилось выше, — 10 000. Таким образом, кинетическая энергия системы из двух маховиков, или, что одно и то же, машины и маховика-аккумулятора, оставаясь все время постоянной, перетекает то в машину, то в маховик-аккумулятор. Машина может останавливаться, но ее кинетическая энергия не пропадает, а временно переходит в маховик-аккумулятор. Вот принципиальное решение проблемы рекуперации механической энергии, сулящее огромные резервы энергии.

Что же касается инерции, то она, можно сказать, тоже остается постоянной у всей системы. Так как угловая скорость вала все время постоянна, то постоянство инертности при наличии привода будет соблюдаться относительно некоторой его точки, тоже имеющей постоянную угловую или линейную скорость. Сперва такой точкой является вал одного маховика, затем, в конце процесса перемотки ленты, вал другого, а в промежутке эта точка будет перемещаться между валами по приводу.

Практическое осуществление такого типа привода, названного дискретным вариатором, требует возвратного хода — реверса ленты перед началом каждого цикла перемотки, сопровождаемой передачей (рекуперацией) энергии.

Работоспособность такого рекуператора механической энергии проверялась в стендовых условиях и на автомобиле. Опыты на автомобиле показали, что такая система вполне применима для транспортных машин. Кинетическая энергия автомобиля передавалась через дискретный вариатор маховику при торможении машины и обратно при ее разгоне. Торможение и разгон автомобиля протекали плавно, без рывков. Разгон не требовал участия двигателя, по крайней мере на первом его этапе, и это значительно сокращало расход горючего: на каждом цикле торможения — разгона экономилось около половины горючего.

Режим рекуперации энергии наиболее подходит к работе городского транспорта — автобусов, троллейбусов,



трамваев, поездов метро. Автобус, пожалуй, больше всех нуждается в рекуперации энергии, так как работает на дефицитном и дорогом горючем. Кроме того, с уменьшением количества сжигаемого горючего и устранением таких процессов, как трогание с места и разгон, холостой ход, во много раз снижается токсичность выхлопных газов. А это не менее важно, чем экономия горючего. Опыты показали, что рекуперация механической энергии на городском автобусе может обеспечить экономию 30—50% горючего при значительном снижении выделений токсичных выхлопных газов в атмосферу. Повышается интенсивность разгона автобуса, его средняя скорость.

Можно сказать, что чем более инертно транспортное средство при прочих равных условиях, тем больше выигрыш от рекуперации его энергии при торможении. Пожалуй, самый большой расточитель кинетической энергии — это метропоезд. Масса его вагона раз в 5 больше, чем автобуса, и скорость перед торможением почти вдвое больше, т. е. каждый вагон метро при торможении гасит энергию, как 20 автобусов. Другими словами, каждый вагон метропоезда, подходя к станции «губит» как минимум около 120 млн. Дж энергии. Сопротивление движению поезда метро мало, он катится по рельсам без ощутимых потерь, его движение близко к чисто инерционному. Во всяком случае, при скорости 80 км/ч метропоезд запасает в виде кинетической вчетверо большую энергию, чем ему требуется для прохождения перегона между станциями.

Американские специалисты подсчитали, во что обходится инерция нью-йоркскому метрополитену. В его парке 6700 вагонов. Если каждый вагон при остановке «губит» 120 млн. Дж энергии, а частота их следования 3—4 мин (в часы пик они ходят чаще), то за время между шестью утра и часом ночи, т. е. за 19 часов работы, каждый вагон переведет в тепло около 40 млрд. Дж энергии, а весь парк — почти 300 триллионов джоулей энергии, т. е. нью-йоркское метро способно обесточить небольшое государство. Если сохранить всего 30% энергии, с учетом всех затрат на системы рекуперации (которые отнюдь не дешевы), ежегодная экономия на нью-йоркском метро составит не менее 20 млн. долл.

Американские инженеры создали систему рекуперации кинетической энергии с маховиками (рис. 5), очень похожую на ту, что мы рассмотрели выше, только роль привода в ней играет не лента, а мощные электрические маши-



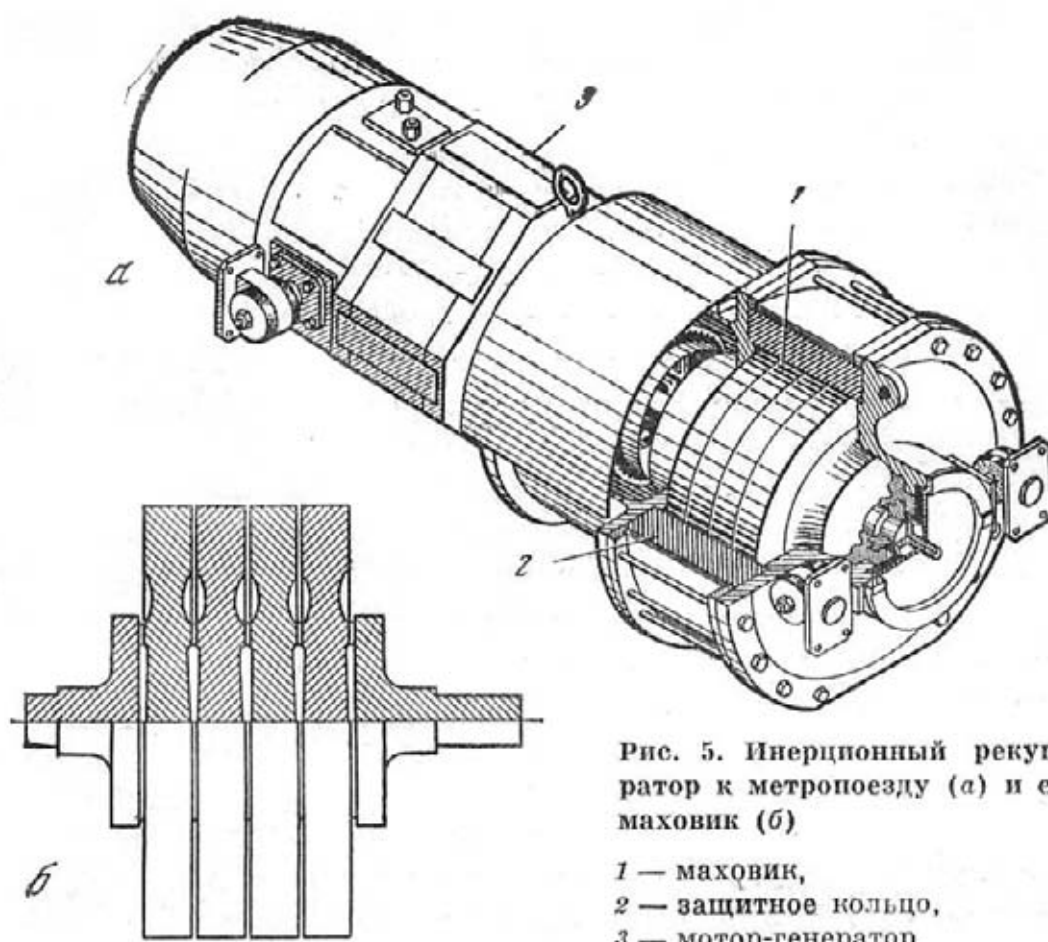


Рис. 5. Инерционный рекуператор к метропоезду (а) и его маховик (б)

- 1 — маховик,
- 2 — защитное кольцо,
- 3 — мотор-генератор

ны. Вагон метро снабжался двумя рекуператорами массой более 2 т каждый и длиной около 3 м, при этом масса самих маховиков составляла чуть больше  $1/10$  массы рекуператора. Остальное приходилось на долю электрических машин. После нескольких остановок метропоезда накопленной в рекуперации энергии хватает, чтобы «тащить» не только свой вагон, но и два прицепленных к нему обычных вагонов. Кроме того, в аварийных ситуациях можно довести поезд до следующей станции без подвода питания. Экономия энергии составила 30%.

Недостаток системы — в слишком дорогом и тяжелом электроприводе: маховик массой 250 кг требует привода массой в 2 т с лишним.

Анализ показывает, что идеальным для метро был бы рекуператор с дискретным вариатором. Во-первых, его масса была бы в несколько раз меньше, чем масса электропривода. Во-вторых, КПД дискретного вариатора при любых передаточных числах настолько высок, что его даже трудно замерить: он не ниже 0,97. А электропривод, работая в очень широком диапазоне изменения передаточных чи-



сел, имеет КПД не выше 0,7—0,8. В режиме накопления-отдачи энергии это значение берется в квадрате: 0,5—0,65. Это мало.

Еще одно преимущество дискретного вариатора над любым другим приводом — он изменяет передаточное число автоматически так, что путь торможения и разгона при любой скорости остается постоянным. Если поставить на определенном расстоянии от места остановки поезда «автостоп» в виде луча света, магнита, просто механического контакта или любого другого сигнального устройства, включающего рекуператор, то поезд остановится точно в заданном месте.

Дискретный вариатор, «выкачивая» из маховика почти всю его кинетическую энергию, намного снижает среднюю угловую скорость его вращения. А это практически устраняет сложную систему вакуумизации маховика, снижающей потери на трение о воздух (об этом подробнее в следующей главе).

Надо сказать, что помимо дискретного вариатора и электропривода, роль трансмиссии, соединяющей маховик и рабочий орган, например колеса машины, могут играть самые различные механизмы.

Небольшие количества кинетической энергии могут быть накоплены в маховике с приводом, включающим упругое звено. Привод с упругим звеном, например резиновой муфтой, подключается к трансмиссии машины с помощью фрикционной муфты. На первом этапе торможения основная часть энергии аккумулируется в упругом звене в виде потенциальной энергии. Затем по мере разгона маховика кинетическая энергия машины вместе с потенциальной энергией упругого звена «переходит» в маховик. Недостаток этого рекуператора в том, что в упругом звене должно накапливаться от четверти до половины всей кинетической энергии машины (в зависимости от угловой скорости маховика перед торможением). А упругие звенья типа муфт в состоянии накопить только очень малые количества энергии, притом с небольшим КПД ее отдачи. Поэтому такой рекуператор на практике применения не получил.

Рекуператоры с маховиками называются инерционными рекуператорами или рекуперативными тормозами.

Наибольшая сложность в системе рекуперативного торможения маховиком заключается в приводе, соединяющем маховик, разгоняющийся при торможении, с транс-



миссией, и, наоборот, разгоняющийся вал трансмиссии при разгоне машины с замедляющимся маховиком. В 1951 г. профессором Н. К. Куликовым была предложена схема инерционного рекуператора с планетарным приводом. Английской фирмой «Кларк» разработаны различные варианты рекуперативных тормозов, состоящих из маховиков и планетарных коробок передач (так называемый тормоз Гиректа). Установка рекуперативного тормоза такого типа на автобусе позволяет экономить до 50% топлива, особенно при малых расстояниях между остановками.

Фирмой «Кларк» разработано также гидромеханическое устройство с маховиком для рекуперативного торможения, названное Гидректа. Гидректа представляет собой сочетание планетарного привода Гиректа с гидродинамическим трансформатором для повышения плавности и легкости управления. Экономические показатели Гидректа несколько ниже, чем у Гиректа, что объясняется потерями энергии в гидроприводе.

Новейшей рекуперативной системой с маховиком для автобусов является система фирмы «Бош» (ФРГ). Маховик диаметром 0,5 м вращается в вакуумном корпусе с частотой 12 тыс. об/мин. Он соединен с двигателем автомобиля через дифференциал и двухскоростную планетарную коробку передач. Трансмиссия включает в себя также две обратимые гидромашины, обеспечивающие бесступенчатое изменение передаточного числа, что очень важно для привода с маховиком. Мощность от двигателя передается на ведущую ось механической трансмиссией, а от маховика — гидромашинами. При достаточном запасе энергии в маховике он движет автобус вместе с двигателем; если же доля мощности маховика падает ниже 25% по сравнению с мощностью двигателя, маховик отключается и движение продолжается только двигателем. Управление этими процессами обеспечивается микрокомпьютером. Масса стального маховика 104 кг. Но разрабатывается для этой цели супермаховик, который будет весить всего 24 кг и вращаться с частотой 28 тыс. об/мин при том же запасе энергии (1,5 кВт·ч).

На таком же принципе основан рекуператор фирмы «Мерседес-Бенц». Привод от маховика к колесам осуществляется через четыре обратимые гидромашины. При нажатии на педаль тормоза автомобиль замедляется, а его кинетическая энергия переходит в маховик, при разгоне происходит обратное явление. Частота вращения махови-



ка — от 8,5 до 12 тыс. об/мин. Такие машины с маховичными рекуператорами стоят не намного дороже обычных, но экономят 30–40% горючего и имеют весьма малотоксичный выхлоп.

Английская фирма «Филипс» разработала конструкцию легкового автомобиля с рекуператором на основе небольшого маховика, позволяющего двигателю постоянно работать в оптимальном режиме. Автомобиль приводится в движение через бесступенчатую передачу от двигателя и маховика, вместе или порознь. Переключение на соответствующий вид привода осуществляется автоматически микрокомпьютером. Дополнительные затраты, связанные с установкой рекуператора, сейчас окупаются после пробега 65 тыс. км, но с ростом цен на бензин этот пробег будет резко сокращаться.

В Висконсинском университете (США) разработан, изготовлен и испытан автомобиль (типичной схемы) массой 1350 кг с маховичным рекуператором энергии (рис. 6), продемонстрировавший отличные динамические качества и высокую экономичность. Силовой агрегат автомобиля включает стандартную четырехскоростную коробку передач и бесступенчатую трансмиссию на основе гидрообъемного привода. Маховик диаметром 0,58 м вращается в вакуумном корпусе с частотой 11 тыс. об/мин, с потерями на вращение при этой частоте не выше 1 л. с. Запас энергии в маховике 0,5 кВт·ч. Маховик в этом приводе соединен через муфты с двигателем и коробкой передач, которая, в свою очередь, передает вращение через карданный вал на дифференциал ведущего моста со встроенной гидрообъемной бесступенчатой передачей.

Рекуперация энергии торможения очень эффективна на электромобилях. Дело в том, что торможение бывает обычно весьма кратковременным и электроаккумуляторы, установленные на электромобилях, не в состоянии воспринять и малой доли энергии торможения. Пуск в ход и разгон электромобиля при езде в городе примерно вдвое сокращает путь пробега. Наличие даже небольшого маховика в рекуператоре на электромобиле позволяет производить его разгоны практически той энергией, которая была накоплена в маховике при торможении. Аккумуляторы в этом случае будут работать в таком же режиме, как если бы электромобиль двигался без торможений и разгонов. Экономия энергии может достигать 30–50%.

Новейшая схема рекуперативной системы фирмы «Гар-



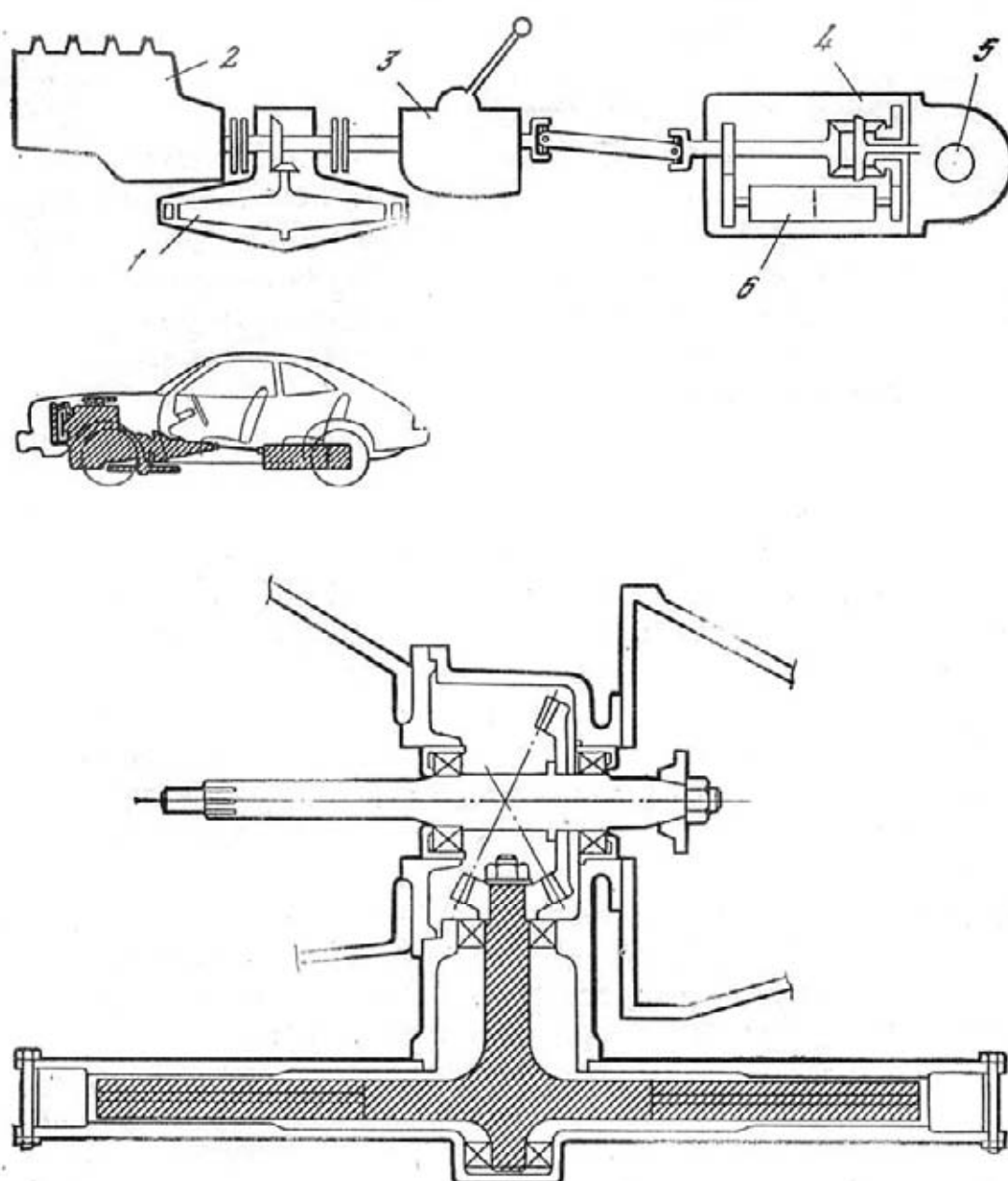


Рис. 6. Инерционный рекуператор к легковому автомобилю и его маховичный узел (внизу)

1 — маховик, 2 — двигатель, 3 — коробка передач, 4 — дифференциал, 5 — ведущая ось, 6 — обратимая гидромашина

ретт» (США) с маховиком для электромобиля представлена на рис. 7. Система включает в себя маховик, дифференциальную передачу, тяговый электродвигатель, генератор, контроллер, управляемый педалью акселератора и тормозной педалью, а также блок аккумуляторных батарей. Валы маховика, генератора и тягового электродвигателя механически связаны планетарной передачей и действуют совместно как бесступенчатая электромеханическая трансмиссия. Вал маховика соединен с солнеч-



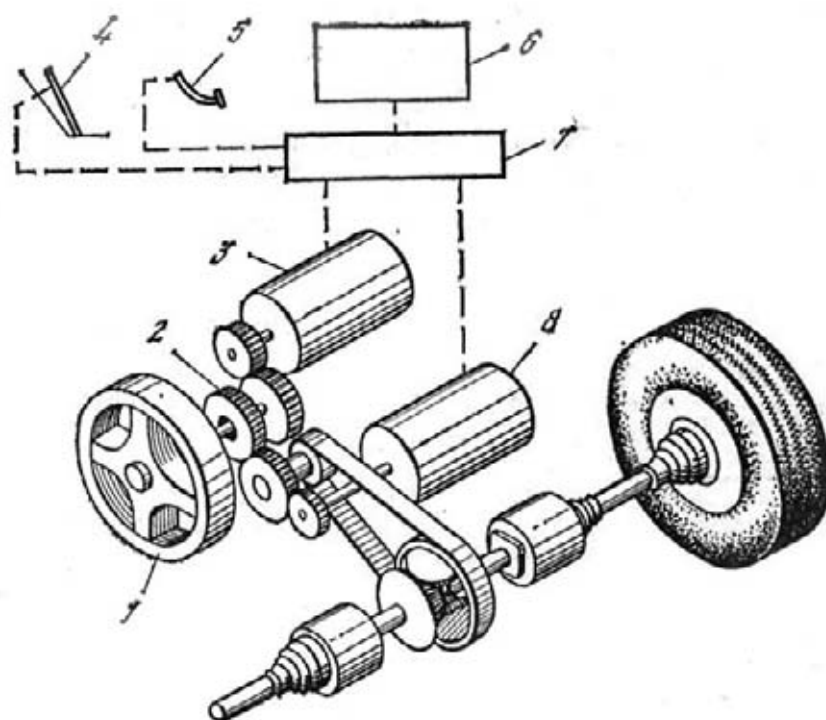


Рис. 7. Инерционная рекуперативная система к электромобилю

1 — маховик, 2 — передача, 3 — двигатель, 4 — акселератор, 5 — тормозная педаль, 6 — контроллер, 7 — батарея аккумуляторов, 8 — генератор

ной шестерней дифференциальной планетарной передачи, шестерня же генератора — с коронной шестерней, а водило с сателлитами — с шестерней дифференциальной трансмиссии, с этой же шестерней зацеплена шестерня электродвигателя.

Поток энергии в направлении к маховику и от него контролируется генератором. Скорость вращения маховика зависит от крутящего момента, приложенного генератором, работающим в режиме двигателя, к коронной шестерне планетарной передачи. Момент от генератора, как и механическая энергия, передается через планетарную передачу на выходной вал трансмиссии, а электрическая энергия протекает по якорной цепи генератора и двигателя. Величина и направление потока мощности определяются контроллером в соответствии с требованиями водителя. Регулирование осуществляется воздействием на обмотки возбуждения двигателя и генератора. Изменение тока в целях обеих обмоток определяет силу и направление якорного тока.

Чтобы обеспечить дополнительную мощность для ускорения электромобиля и преодоления подъемов, генератор своим моментом замедляет коронную шестерню плане-



тарной передачи, для чего сила тока в обмотке возбуждения увеличивается. Соответственно реактивный момент солнечной шестерни и планетарной передачи тормозит маховик для получения необходимой энергии. Кинетическая энергия экипажа используется во время рекуперативного торможения благодаря обратному потоку мощности в трансмиссии. Тяговый электродвигатель работает как генератор, вырабатывая электроэнергию. Генератор, уже работающий как электродвигатель, использует эту энергию для ускорения вращения коронной шестерни планетарной передачи, накапливая механическую энергию для последующего использования. Маховик расходует энергию, когда необходимо превысить среднюю мощность, что способствует работе батареи в постоянном режиме. На умеренных скоростях и на холостом ходу энергия батареи используется для подзарядки маховика.

При установленной скорости 88 км/ч запас хода электромобиля 110 км, но при городском цикле эксплуатации дальность поездки увеличивается до 150 км. Максимальная скорость электромобиля 109 км/ч.

По данным Д. В. Рабенхорста (Университет Дж. Гопкинса, США), для легкого электромобиля массой 1814 кг средняя мощность должна быть около 47 л. с., а при разгонах — до 94 л. с. Для разгона с места до скорости 96 км/ч за 15 с достаточно «взять» 110 л. с. от маховика и 50 л. с. от электроаккумуляторов. Необходимый для такого электромобиля маховик удельной энергоемкостью 66 Вт·ч/кг будет иметь массу всего 10 кг. Для более легкого варианта электромобиля, чтобы получить мощность 24 л. с., масса батарей должна составлять 136 кг. Для развития этой мощности в течение 30 с — времени, достаточного для разгона электромобиля, — потребуется маховик массой всего 1,5 кг, а масса батарей составит 43 кг.

На международной автомобильной выставке в Дюссельдорфе экспонировался 40-местный электробус фирмы «Мерседес» с рекуператором на основе маховика. Электробус имеет два ременных вариатора с общим диапазоном варьирования 16 : 1. Мощность в 80 л. с., необходимую для разгона машины до 80 км/ч, электробус получает от маховика.

Компания «Дженерал электрик» (США) разработала электромобиль с достаточно большим маховиком — массой 75 кг при массе аккумуляторных батарей 60 кг. Масса четырехместного электромобиля — 1500 кг. При типичном



городском цикле движения — разгон до 64 км/ч за 28 с, пробег с постоянной скоростью 80 км/ч в течение 50 с и торможение за 9 с затрачивается 0,25 кВт·ч энергии, причем для разгона требуется 0,105 кВт·ч. Эту энергию обеспечивает маховик. Использование рекуперативного торможения с применением маховика позволяет увеличить пробег электромобиля почти вдвое — с 63 до 112 км.

Более совершенный электромобиль с маховиком, также созданный в США, включает два двигателя-генератора, систему регулирования частоты вращения и механическую трансмиссию. Маховик, вернее супермаховик (диаметром 0,58 м, шириной 0,1 м, момент инерции 1 кг·м<sup>2</sup>), имеет максимальную частоту вращения 25 тыс. об/мин, запасая при этом 1 кВт·ч энергии. Электропривод обеспечивает отдачу 75% энергии до того момента, пока частота вращения маховика не достигнет 12,5 тыс. об/мин.

Проводились сравнительные испытания стального маховика и перспективного супермаховика. Испытания показали, что удельная энергия цилиндрического стального маховика — 12,5 Вт·ч/кг, или примерно в полтора раза меньше, чем у свинцово-кислотных аккумуляторов, перспективный же супермаховик показал феноменальную удельную энергию — 187 Вт·ч/кг, или в 10 с лишним раз больше, чем у электроаккумуляторов. Значит, чтобы разогнать электромобиль массой 1500 кг до 80 км/ч, для чего затрачивается 0,105 кВт·ч энергии, потребовался бы супермаховик массой менее 1 кг.

Типичный современный электромобиль с маховиком для рекуперативного торможения показан на рис. 8. Батареи аккумуляторов расположены под полом, на переднем плане видны тяговый двигатель (снизу) и маховик (сверху), привод — на передние колеса.

Своеобразное применение рекуперации механической энергии осуществлено на так называемом маховичном лифте (рис. 9), предназначенном для экстренного спуска людей из высотных зданий. Роль маховика здесь играют массивные (около 10 кг) щеки катушки, на которую намотана гибкая стальная или синтетическая лента. Катушка закрепляется на втулках-подшипниках в корпусе, а на конце ленты закрепляются пояс или лямки с карабином. Механизм крепится над окном, спасаемый человек пристегивается карабином к лямкам и прыгает из окна, при этом инерция щек-маховиков не дает ему падать с большой скоростью, а позволяет плавно разогнаться. Лента, разма-



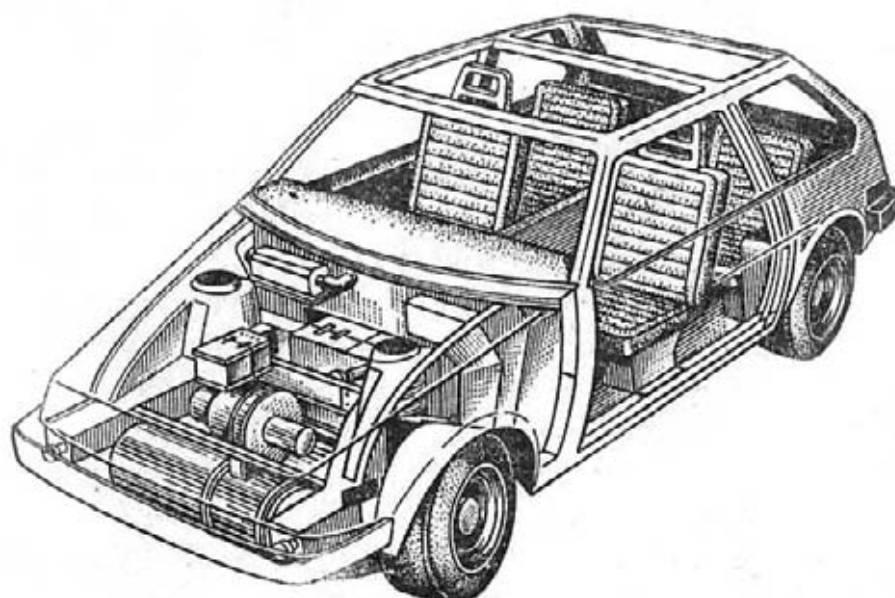


Рис. 8. Современный электромобиль с инерционным рекуператором

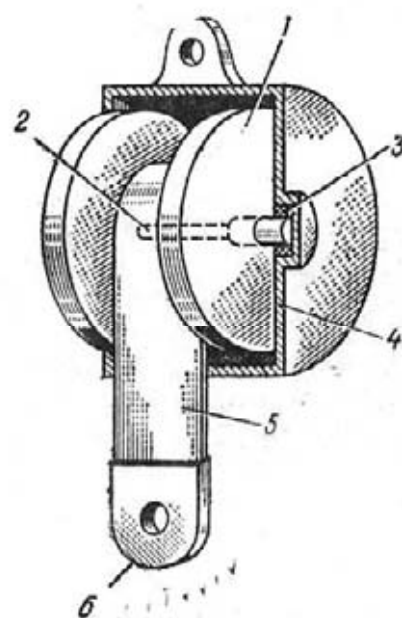


Рис. 9. Инерционный лифт с маховиком

- 1 — щеки-маховики,
- 2 — вал,
- 3 — втулки,
- 4 — корпус,
- 5 — лента,
- 6 — крепление

тиваясь, раскручивает маховики, сообщая им кинетическую энергию, в которую переходит потенциальная энергия спускаемого человека. В конце спуска диаметр намотки становится достаточно малым, а скорость человека, даже при высокой частоте вращения маховиков, очень мала: она соответствует прыжку человека с высоты менее полуметра и совершенно безопасна.

Как только человек коснется земли, натяг ленты ослабевает и карабин автоматически отстегивается. Щеки-маховики разогнаны при этом до максимальной скорости. Лента разматывается окончательно, и при дальнейшем вращении вала наматывается в другом направлении на этот же вал, пока ее конец с лямками не упрется в корпус устройства. Лента затягивается, а избыток кинетической



энергии маховиков погашается трением. Устройство готово к повторному спуску. Таким образом, рекуперировав потенциальную энергию спускаемого человека, устройство само себя снабжает энергией для подъема ленты и может работать сколько угодно раз (в других устройствах аналогичного назначения энергия спускаемого человека гасилась трением и спуститься мог только один человек).

Рекуператоры могут быть и без маховиков. Это уже, естественно, не инерционные рекуператоры, но для их работы тоже необходима инерция машины — именно она «загоняет» энергию в рекуператор. Аккумуляторы таких «неинерционных» рекуператоров выполняются в виде упругого звена (но уже без маховиков), либо (еще лучше) в виде баллона с сжатым газом. Надо сказать, что сжатый газ — прекрасный аккумулятор энергии. Газ в баллонах-аккумуляторах обычно сжимают, подкачивая туда масло. Затем это масло, гошимое под большим давлением сжатым газом, крутит гидромашину, приводящую в движение транспортное средство.

Процесс рекуперации энергии при использовании такого «газогозового» аккумулятора происходит следующим образом. Машина под действием инерции движения начинает прокручивать вал обратной гидромашины, связанной с колесами экипажа. Гидромашина перекачивает масло из бака в нижнюю полость баллона-аккумулятора, сжимая газ в верхней полости. Кинетическая энергия движущейся машины переходит в потенциальную энергию сжимаемого газа, и машина останавливается. Для преодоления инерции покоя машины, т. е. ее разгона, масло из баллона под давлением пускается в гидромашину, приводя ее вал, а следовательно и колеса машины, во вращение. Машина вновь приобретает скорость<sup>3</sup>. Такая система использования инерции движения испытывалась на автобусе ЛАЗ. Была получена экономия горючего около 30% на цикле движения городского автобуса и сильное снижение токсичности выхлопных газов.

Аналогичные системы разрабатываются и за рубежом. Фирма МАН (ФРГ) наметила выпустить 80 двухэтажных автобусов для г. Берлина, которые вместо обычных двигателей мощностью 200 л. с. будут снабжены двигателями в 132 л. с., но с гидрогазовым рекуператором. Запас энергии в рекуператоре после торможения — 0,33 кВт·ч.

<sup>3</sup> См.: Гулиа Н. В. Накопители энергии. М.: Наука, 1980, с. 59, 60, 135, 136.



Этой энергии достаточно, чтобы добавить к мощности двигателя еще 100 л. с. в течение 15 с — времени, необходимого для разгона. Только энергией, заключенной в рекуператоре, можно разогнать автобус до 48 км/ч. Работой трансмиссии при торможении, разгоне и в режиме крейсерского движения управляет микроЭВМ.

Надо сказать, что системы использования инерции движения автомобилей весьма перспективны. По прогнозам американских специалистов, к 2000 г. не менее 15% всего автомобильного парка США будет оснащено рекуператорами, несмотря на их сравнительную сложность. Оснащать ими предполагается не только автомобили, но и электромобили — в помощь основному электрическому силовому агрегату. Это позволит экономить до 80 млн. т нефти в год, не говоря уже о сохранении чистоты атмосферы.

Есть еще один интересный механизм, который позволяет использовать инерцию вращения сравнительно небольших маховых масс<sup>4</sup>. Его можно устанавливать, например, на машинах, содержащих поворотную платформу (экскаваторах, кранах и т. п.), торможение и разгон которых происходят при малых углах поворота.

Если представить себе два маховика, один из которых играет роль инертной маховой массы машины, а другой — маховик-аккумулятор, то достаточно эти маховики связать друг с другом шатуном, чтобы получить рекуператор энергии (рис. 10). Шатун укрепляется в подшипниках на кривошипных пальцах (радиусом  $r$ ) маховиков или на других кривошипах, связанных с маховиками через привод. Привод целесообразнее всего выполнить с муфтами включения, чтобы иметь возможность по желанию запустить и останавливать рекуператор.

Эффект рекуперации энергии будет наблюдаться лишь в том случае, если длина шатуна

$$l = r + \sqrt{A^2 - r^2} \text{ или } l = \sqrt{A^2 - r^2} - r, \quad (2.6)$$

где  $A$  — межосевое расстояние кривошипов (или самих маховиков).

Иначе говоря, длина шатуна выполняется такой, чтобы в положении, когда один кривошип параллелен шатуну, другой образовывал с ним прямой угол (на рисунке показано штриховой линией).

<sup>4</sup> См.: Гулиа Н. В. Пружина, которой на самом деле нет. — Изобретатель и рационализатор, 1980, № 3, с. 14, 15.



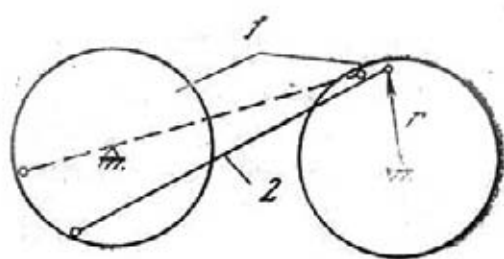


Рис. 10. Инерционный рекуператор с маховиками, связанными шатуном

1 — маховики,  
2 — шатун

Можно изготовить модель такого рекуператора из двух маховиков (металлических дисков), закрепленных консольно на подставке и связанных шатуном (металлической или деревянной линейкой). Если толкнуть один из маховиков, придав ему вращение, то он, немного повернувшись, передаст свою энергию (за исключением очень небольших потерь) другому

маховику, а сам остановится. Такая «перекачка» кинетической энергии от одного маховика другому будет идти достаточно долго. Если такой рекуператор поместить на платформу, изолированную от внешних воздействий (например, в невесомости), то во время его работы платформа будет совершать колебательные движения, что в ряде случаев бывает необходимо. Все, что выше говорилось об инерции маховиков с дискретным вариатором, справедливо и для этого механизма, при этом наглядность его работы поразительна: кажется, инерцию маховиков здесь можно уловить простым глазом.

### Инерция малых движений

Существует множество динамических механизмов, которые называются инерционными, — это инерционные вариаторы, конвейеры, грохоты, муфты, бурильные устройства и т. п. Почему же они называются инерционными? Ответ все тот же: считается, что для их работы используются «силы инерции» (как мы уже знаем, — несуществующие).

Будем считать, что под силами инерции здесь подразумевается, как у Ньютона, свойство инерции, или просто инерция, либо что мы применили принцип Д'Аламбера и рассматриваемое тело уже не движется, а находится в равновесии (покое), для чего мы приложили к нему фиктивные силы инерции. Тогда инерционными механизмами можно называть такие, где используется инерция их звеньев. Во всех инерционных механизмах используются относительно непродолжительные (малые) движения, циклически повторяющиеся. Так как частота повторений этих движений достаточно высока, высоки и ускорения даже



при малой амплитуде движений. А при достаточной инерционности звеньев, чтобы их разогнать или затормозить или изменить направление движения, нужно приложить довольно значительные силы (или моменты) со стороны других тел. Реакция этих сил и моментов, прикладываемые к опорам инерционных звеньев, производят динамическое действие, отвечающее замыслу механизма.

Очень интересны инерционные вариаторы, или, как их еще называют, инерционные трансформаторы крутящего момента. Эти вариаторы предназначены для автоматического изменения передаточного отношения привода в зависимости от нагрузки на выходном валу. Такая характеристика передачи, когда крутящий момент на валу растет с уменьшением угловой скорости, называется прогрессивной. Вариаторы с прогрессивной («мягкой») характеристикой очень перспективны для использования в машинах, особенно в автомобилях. Поэтому, когда в 20-х годах румынский инженер Константинеску изобрел импульсивный инерционный вариатор, все ожидали революцию в машиностроении. Но революции не произошло, и вина в этом была отнюдь не инерции: быстро выходила из строя важнейшая часть всех импульсивных вариаторов — обгонная муфта.

Обгонная муфта (нечто вроде храповика) передает вращение только в одну сторону, в другую она проскальзывает (пример обгонной муфты — втулка заднего колеса велосипеда, которая передает вращение только в сторону движения велосипеда вперед). Конструкция обгонных муфт постоянно совершенствуется; кроме того, появилась надежда создания некоторого подобия прогрессивных вариаторов вообще без обгонных муфт. Поэтому вариаторы с прогрессивной характеристикой, в основном инерционные, не утратили своей перспективности.

Инерционные импульсивные вариаторы — это механические системы с двумя или несколькими степенями подвижности. Но движения звеньев этих систем при одном ведущем звене вполне определены, так как динамические усилия, возникающие благодаря инерционности элементов механизма, определены. Как говорят, на механизм налагаются дополнительные связи динамического характера.

На практике встречаются инерционные вариаторы двух видов — с использованием инертности звеньев в тангенциальном (окружном) и в радиальном направлении.



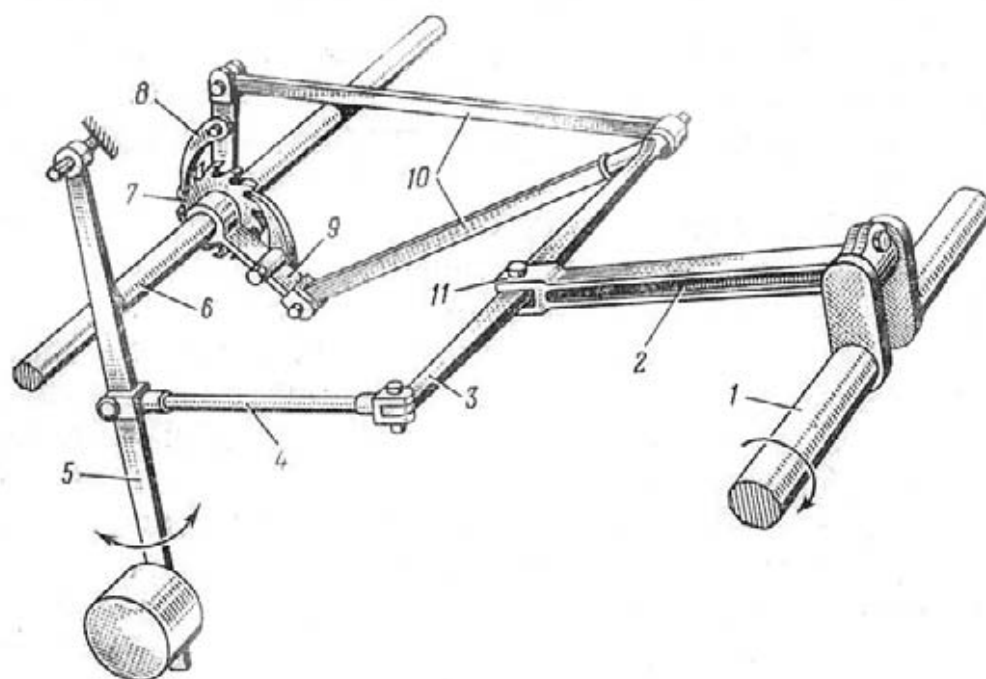


Рис. 11. Инерционный импульсный вариатор с использованием инертиости звеньев в тангенциальном направлении

Иначе говоря, первые работают потому, что инертное тело сопротивляется изменению скорости по величине, а вторые — потому, что трудно изменить эту скорость по направлению. На практике говорят еще, что в вариаторах второго вида «работают центробежные силы инерции».

Чтобы уяснить принцип действия инерционного импульсивного вариатора, в котором используется инертность звеньев в тангенциальном направлении, рассмотрим схему такой передачи (рис. 11). Кривошип ведущего вала 1 посредством шатуна 2 соединен с балансирующим рычагом 3, одно плечо которого тягой 4 связано с маятником 5, а второе шарнирно соединено через шатуны 10 с коромыслами 9, качающимися на ведомом валу 6. На коромыслах закреплены оси собачек 8, образующих с храповым колесом 7, закрепленным на валу, обгонную муфту.

Если бы шатуны 10 были непосредственно присоединены к кривошипу ведущего вала, то получился бы обычный храповый механизм, — и тогда за каждый оборот кривошипа ведомый вал поворачивался бы на вполне определенный угол. Между ведущим и ведомым валами в этом случае установилось бы вполне определенное передаточное отношение, которое оставалось бы неизменным для различных крутящих моментов на ведомом валу. Соединение же шатунов 10 с ведущим валом через балансирующий



рычаг при наличии маятника с массивным грузом на конце позволяет автоматически изменить передаточное отношение в зависимости от нагрузки (крутящего момента) на ведомом валу.

Проследим движение механизма с того момента, когда маятник занимает крайнее правое положение. При своем последующем движении маятник ускоряется. Так как он инертен, для осуществления этого ускорения к маятнику через тягу 4 передается усилие, которое вызывает реакцию на одном из шатунов 10. Минимальное ускорение маятника, как известно, бывает в начале хода, поэтому сила, действующая на маятник со стороны тяги 4, будет наибольшей в начале движения маятника вправо.

Маятник разгоняется, преодолевая инерцию, накапливает кинетическую энергию. Затем в течение второй половины хода он движется замедленно и отдает накопленную им энергию. Энергия эта воспринимается ведущим валом через усилие на другом шатуне 10 и опять через обгонную муфту. Кривошип на валу 1 через шатун 2 и шарнир 11, связывающий шатун 2 с балансирным рычагом 3, сообщает вынужденное колебательное движение маятнику. Динамическая же реакция от «сопротивления» маятника этому знакопеременному ускоренному движению передается через шатуны и обгонную муфту ведомому валу в виде крутящего момента.

Эта динамическая реакция, а стало быть, и крутящий момент, увеличивается с повышением угловой скорости вращения кривошипа. Если скорость вращения кривошипа достаточно мала, крутящий момент на ведомом валу может оказаться меньше момента сопротивления. В этом случае шатуны, как и конец балансирного рычага, с ними связанный, будут оставаться неподвижными, а маятник будет качаться с максимальной амплитудой.

С увеличением скорости ведущего вала и кривошипа ускорение маятника, а стало быть и динамическая реакция на шатуны возрастает. Крутящий момент на ведомом валу повышается, и, когда он превысит момент сил сопротивления, вал начнет вращаться. При этом одни концы шатунов совершают возвратно-поступательное движение, а другие — вращательное, передавая через собачки 8 вращение храповику 7, а значит, и ведомому валу. По мере увеличения хода шатунов и скорости ведомого вала колебания маятника уменьшаются по амплитуде. При



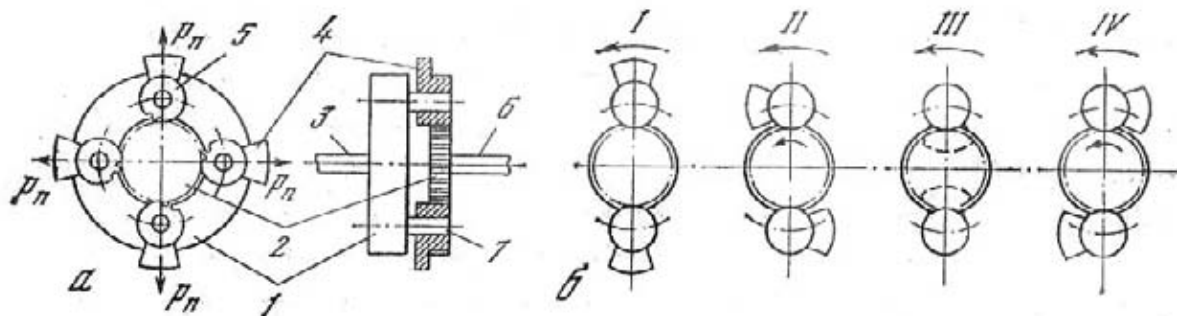


Рис. 12. Инерционный импульсный вариатор с использованием инертности явненьев в нормальном направлении

определенной скорости вращения кривошипа угол качания коромысел, а следовательно, скорость вращения ведомого вала, будет тем меньше, чем больше момент сопротивления на нем. Таким образом, передаточное отношение в механизме изменяется автоматически в зависимости от нагрузки на ведущем валу, т. е. прогрессивно.

Наиболее целесообразно, однако, использовать не тангенциальную инертность, проявляющуюся в сопротивлении массы изменению скорости по величине, а инертность в радиальном, нормальном направлении, проявляющуюся в сопротивлении массы изменению направления движения. Как мы уже говорили, эту инертность связывают с действием центробежных сил инерции, реально не существующих. На самом деле изменение направления движения массивного тела, обусловленное нормальными ускорениями, вызывается реальной центростремительной силой, действующей в направлении ускорения (например, сила тяготения Луны к Земле, натяжение пращи от камня и т. п.), т. е. к центру вращения. На вращающийся камень в праще действует сила, стремящаяся отклонить его от прямолинейного движения и направления к центру вращения. Если бы действовала центробежная сила, то камень в праще не стремился бы к центру вращения, а постарался бы уйти как можно дальше от него. Более того, в системе камень—праща есть только камень и веревка, не передающая, как известно, сжимающих усилий. Откуда же может появиться сила, стремящаяся отдалить камень от центра?

Типичным примером инерционной передачи, работающей на принципе использования инертности в нормальном направлении, или, как мы договорились называть, центробежных реакций, является вариатор, показанный на



рис. 12. Маховик 1, на котором закреплены пальцы 7 сателлитов 5, соединен с ведущим валом 3. Сателлиты зацепляются с центральной шестерней 2, посаженной на ведомый вал 6. С каждым сателлитом скреплено массивное звено 4 с эксцентрично расположенным центром масс.

При незначительной угловой скорости ведущего вала шестерня 2 из-за наличия момента сопротивления на ведомом валу 6 остается неподвижной и сателлиты, обкатываясь вокруг нее, вращаются вокруг пальцев. Центры масс звеньев 4, стремясь в силу инерции сохранять прямолинейное движение, вопреки «навязываемому» им пальцами 7 круговому движению, действуют на них с центробежной реакцией  $P_n$ . Но эта реакция пока мала, и момент, развиваемый ею, не может преодолеть момента сопротивления.

При увеличении угловой скорости ведущего вала и маховика динамическая реакция, действующая на пальцы 7 и на шестерню 2, уже не может вызвать на шестерне такой момент, который преодолел бы момент сопротивления на ведомом валу. При этом шестерня начинает совершать знакопеременное вращательное движение — крутильные колебания вокруг своей оси. Эти крутильные колебания, «выпрямленные» обгонной муфтой, состоящей из обоймы, роликов и ступицы, передаются уже в виде импульсивного однонаправленного движения ведомому валу 6.

Чтобы яснее представить действие инертности звеньев 4, выражающееся в центробежных динамических реакциях на связи, рассмотрим характерные положения звена на схеме 6. Если сателлит 5 проворачивается пальцем 7 из положения I звена в положение III, то центр масс звена, стремясь двигаться по наименее кривой (наиболее близкой к прямой) траектории, из-за инерции сопротивляется приближению к центру вращения — оси валов 3—6. В положении I расстояние его по этой оси наибольшее, в положении III — наименьшее. Положение II характеризует переходную от I к III позицию, когда звено «всеми силами» стремится занять положение I. При этом сателлит 5, естественно, стремится повернуть шестерню 2 против часовой стрелки. Из положения IV звено может занять положение I, когда траектория центра масс наиболее близка к прямолинейному движению, только повернув шестерню по часовой стрелке.

Так стремление центра масс звеньев 4 сохранить движение возможно более близким к инерционному вызывает



знакопеременное импульсивное вращение шестерни 2. Амплитуда, а следовательно и скорость этого движения шестерни, определяется нагрузкой на ведомом валу, момент от которого передается на шестерню через обгонную муфту.

Момент, развиваемый при круговом движении эксцентричных масс звеньев 4, зависит от квадрата угловой скорости. Если этот момент больше или равен моменту сопротивления, то сателлиты и шестерня вращаются как одно целое; если меньше, то инерция звеньев не в состоянии удержать их от проворачивания вокруг осей сателлитов, и скорость шестерни из-за этого начинает падать. Передаточное отношение привода и крутящий момент при этом возрастают. Так будет происходить, пока не наступит равенство моментов, развиваемых звеньями и силами сопротивления. Таким образом, вариатор позволяет изменять скорость ведомого вала от нуля до скорости ведущего вала, причем это изменение происходит автоматически и с соответствующим варьированием крутящего момента.

Как мы уже говорили, неизменной частью инерционных вариаторов является обгонная муфта. Это она преобразует знакопеременное вращение звена, на которое действуют динамические реакции, в однонаправленное вращение ведомого вала. Но эта муфта является и «ахиллесовой пятой» всех импульсивных вариаторов, в том числе инерционных, поскольку она чаще всего не выдерживает огромного числа включений и выключений под нагрузкой при «выпрямлении» знакопеременного вращения и ломается. Поэтому если бы можно было создать инерционный вариатор без обгонных муфт, то это, действительно, означало бы «революцию» в механических приводах.

А почему, собственно, нельзя создать такой вариатор?

Хорошим примером инерционного вариатора без обгонной муфты является привод для так называемого инерционного бурения. Специалисты заметили, что передавать довольно большой крутящий момент, необходимый для бурения скважин в плотной породе, через длинные трубы нерационально: турбобуры, где вращается только концевая часть бура, развивают недостаточный крутящий момент. Поэтому возникла идея разгонять маховик, расположенный на нижнем конце буровой штанги, а затем соединять его с буром. Разогнанный маховик позволяет развить очень большой крутящий момент, которому не может противостать даже самая крепкая порода.



Чем же это не вариатор? Разгоняется маховик малым крутящим моментом, но долго, а тормозится гораздо скорее, но и развивает во столько же раз больший момент.

Таким же приемом нередко пользуются трактористы. Если крутящего момента двигателя не хватает для преодоления какого-либо большого сопротивления, они отсоединяют двигатель от трансмиссии, разгоняют двигателем маховик на конце коленчатого вала и резко включают муфту. Маховик, обладая большой инерцией вращения, создает в трансмиссии момент такой величины, какой только может передать муфта. Трактор при этом преодолевает довольно большие сопротивления, гораздо большие, чем те, которые может осилить двигатель.

Иногда требуется получить большой крутящий момент на ведомом валу без воздействия «реактивного» момента на поддерживающие части, в том числе и на человека. Когда мы сверлим дрелью или закручиваем гайки гайковертом, на нас через инструмент действует реактивный момент, в общем случае, при установившемся движении, равный моменту на ведомом валу. Этот момент, довольно большой иногда, может повлечь за собой много неприятностей. Так, космонавт, работая дрелью в невесомости, рискует закрутиться в сторону, обратную сверлу. То же происходит при бурении на плаву и в других случаях, когда нельзя эффективно уравновесить реактивный момент.

Раскрученный маховик, обладая инерцией вращения, как бы замыкает на себя реактивный момент на валу, с ним связанным. Если представить себе маховик в корпусе на подшипниках и рабочий инструмент, например сверло, связанный с валом маховика, то получим наиболее простой «безреактивный» двигатель. Как бы мы ни нагружали вал маховика моментом сопротивления, на корпусе это никак не отразится. Ведь маховик связан с ним только подшипниками, не передающими, как известно, крутящего момента (если пренебречь, конечно, небольшими сопротивлениями в них). На таком принципе основана работа, например, инерционной дрели (рис. 13).

Однако высокая угловая скорость вращения маховика не всегда приемлема: для гайковертов, например, требуется значительно меньшая скорость и очень большой крутящий момент. И массивный маховик не всегда приемлем. С учетом этого разработано специальное устройство, включающее инерционный вариатор с обгонной муфтой (но можно обойтись и без нее). Принцип действия такого уст-



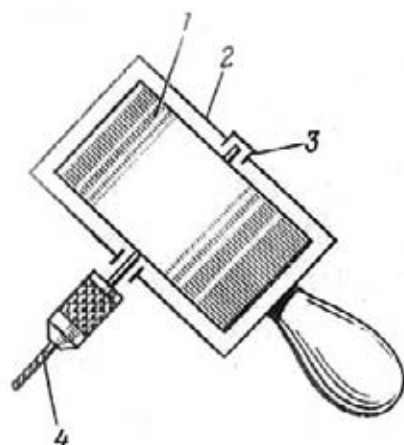


Рис. 13. «Безреактивная» инерционная дрель

1 — маховик, 2 — корпус, 3 — подшипники, 4 — инструмент

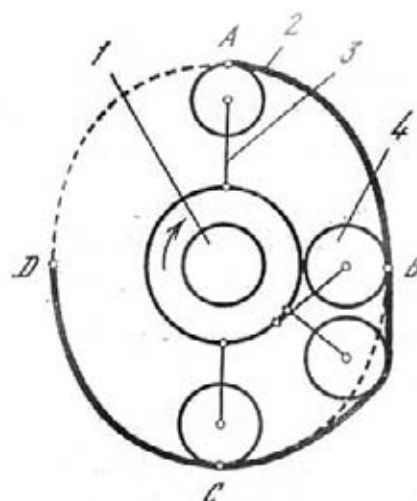


Рис. 14. Инерционный импульсный вариатор-муфта

1 — ведущее звено, 2 — ведомое звено (обойма), 3 — рычаги, 4 — ролики

ройства хорошо иллюстрируется следующим примером.

Чтобы раскрутить зажавшуюся или очень тугую большую гайку, иногда применяют такой прием: пристраивают к ней по касательной зубило и легкими ударами молотка свободно откручивают гайку. Чем объясняется «магическое» действие ударов по гайке? Тем, что время и расстояние разгона молотка продолжительно по сравнению с ударом. Поэтому и сила удара молотка, обладающего большой инерцией движения, весьма велика. Так же, без восприятия реактивного момента неподвижной опорой, т. е. при помощи муфты, но не простой, а инерционной, мы трансформируем крутящий момент. Ведущий вал вращается быстро, насаженная на него кулачковая обойма бьет своими скошенными кулачками по кулачкам ведомого вала (как молотобоец по гайке) и передает ему крутящий момент, гораздо больший, чем на ведущем валу.

Такие муфты-вариаторы успешно работают на некоторых видах гайковертов. Ведущий вал гайковерта вращается низкомомментным скоростным электромоторчиком, а ведомый, приводимый инерционной муфтой, заворачивает крупные гайки. При этом на оператора действует только небольшой крутящий момент от моторчика. Если же приводить инерционную муфту от маховика, то оператор теоретически будет полностью разгружен от реактивного момента.



Однако удары долго не может выдержать ни одна деталь, ни одна машина. Поэтому разработан механизм, позволяющий использовать инерцию масс при изменении направления движения, но не включающий в свою конструкцию обгонных муфт и не испытывающий ударов (рис. 14).

Ведущий вал механизма несет на себе рычаги, на концах которых насажены массивные ролики. Благодаря шарнирным складывающимся рычагам ролики могут отходить от вала радиально и приближаться к нему. При вращении они обкатываются по внутренней поверхности обоймы, имеющей профиль, близкий к эллипсному. Эта обойма, играющая роль ведомого звена, соединяется с ведомым валом.

Допустим, ведущий вал быстро вращается, и ролики проходят участок от  $A$  до  $B$ . Стремясь двигаться по возможно более прямой траектории, благодаря инерции они прижимаются к участку  $A - B$  обоймы, которая воспринимает их динамические реакции. Результирующая этих давлений создает момент, прокручивающий обойму в сторону вращения с преодолением момента сопротивления. Характер зависимости крутящего момента на ведомом звене от его угловой скорости — прогрессивный, как у всех инерционных вариаторов.

Но дальнейшее движение ведущего вала должно вызвать ход ведомого звена в обратном направлении. Получаемое знакопеременное вращение и «выпрямляют» обгонные муфты. В рассматриваемом же механизме потребность в обгонной муфте отпадает. Представим, что участки  $B - C$  и  $D - A$  на обойме вообще отсутствуют, тогда ролики, стремясь к прямолинейному движению, будут отходить на периферию, сдерживаясь на валу шарнирно укрепленными рычагами. При этом ролики опишут траекторию, которая начнется в точке  $B$  касательной к обойме и закончится в точке  $A$ , отстоящей от центра дальше, чем  $B$ , но тоже касательной к обойме. Естественно, если на этом участке нет обоймы, то давить не на что, и сдерживаться ролики будут только рычагами. В этот период крутящий момент на ведомом валу не создается, а ведущий вал (с которым лучше всего связать небольшую маховую массу) тормозится расходящимися на периферию роликами.

Входя по касательной (мягко) в контакт с обоймой и двигаясь к центру, ролики оказывают на нее давление,



создавая крутящий момент, и одновременно, оказывая динамическое давление на концы рычагов, разгоняют ведущий вал (следует заметить, что нагрузка на обойму должна быть такая, какая создается диссипативными силами — трением, сопротивлением среды и пр.). Конечно, в реальных конструкциях участки  $B - C$  и  $D - A$  не устраняются, но им придается такой профиль (на рисунке показан штриховой линией), при котором давление на них при наиболее характерных режимах работы оказывается минимальным.

## Глава III

### ИНЕРЦИЯ И НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

#### Инерция и проблема аккумулятора

Сейчас большая часть электроэнергии вырабатывается теплоэлектростанциями, меньшая — гидростанциями и атомными станциями. Огромное количество энергии производится мелкими двигателями автомобилей, тракторов, самолетов и других машин. Из всех этих источников энергии экологически безвредными являются только гидроэлектростанции и относительно безвредными — атомные. Остальные в той или иной мере «засоряют» окружающую среду — кто газами, кто теплом. Особенно вредны для окружающей среды мелкие двигатели транспортных машин: их трудно отрегулировать, работают они почти всегда на переменном режиме, потребляют дефицитное топливо.

Как же осуществить такое снабжение человечества энергией, чтобы ни отравлять, ни перегревать атмосферу и при этом не нарушать привычный нам механизированный мир? В будущем энергию, вероятнее всего, будут получать от экологически безвредных источников — гидравлических, ветровых, приливных, геотермальных и, главным образом, солнечных электростанций. Часть энергии, безусловно, будет вырабатываться атомными, а затем и термоядерными электростанциями. Стационарные, крупные потребители энергии — фабрики, заводы — используют энергию, переданную по проводам от источников. Но энергию не обязательно передавать по проводам: можно разлагать воду на водород и кислород и передавать водород в ка-



создавая крутящий момент, и одновременно, оказывая динамическое давление на концы рычагов, разгоняют ведущий вал (следует заметить, что нагрузка на обойму должна быть такая, какая создается диссипативными силами — трением, сопротивлением среды и пр.). Конечно, в реальных конструкциях участки  $B - C$  и  $D - A$  не устраняются, но им придается такой профиль (на рисунке показан штриховой линией), при котором давление на них при наиболее характерных режимах работы оказывается минимальным.

## Глава III

### ИНЕРЦИЯ И НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

#### Инерция и проблема аккумулятора

Сейчас большая часть электроэнергии вырабатывается теплоэлектростанциями, меньшая — гидростанциями и атомными станциями. Огромное количество энергии производится мелкими двигателями автомобилей, тракторов, самолетов и других машин. Из всех этих источников энергии экологически безвредными являются только гидроэлектростанции и относительно безвредными — атомные. Остальные в той или иной мере «засоряют» окружающую среду — кто газами, кто теплом. Особенно вредны для окружающей среды мелкие двигатели транспортных машин: их трудно отрегулировать, работают они почти всегда на переменном режиме, потребляют дефицитное топливо.

Как же осуществить такое снабжение человечества энергией, чтобы ни отравлять, ни перегревать атмосферу и при этом не нарушать привычный нам механизированный мир? В будущем энергию, вероятнее всего, будут получать от экологически безвредных источников — гидравлических, ветровых, приливных, геотермальных и, главным образом, солнечных электростанций. Часть энергии, безусловно, будет вырабатываться атомными, а затем и термоядерными электростанциями. Стационарные, крупные потребители энергии — фабрики, заводы — используют энергию, переданную по проводам от источников. Но энергию не обязательно передавать по проводам: можно разлагать воду на водород и кислород и передавать водород в ка-



честве энергетического агента по трубам, как природный газ.

А как же быть с мобильными машинами, главным образом с транспортом? Тут необходим автономный источник энергии, который запасал бы энергию от экологически безвредных источников, а затем расходовал ее при движении. Он должен накопить энергию, сохранить ее, по возможности с меньшими потерями, а затем при необходимости выделить с требуемой интенсивностью. И все это при как можно меньших габаритах и массе.

Такие устройства имеются, существующие постоянно совершенствуются и создаются новые. Называются они накопителями, или аккумуляторами энергии.

Что же такое аккумулятор энергии? В БСЭ он определяется как устройство для накопления энергии с целью ее последующего использования. Но если быть более точным, то аккумулятор энергии следует определить как устройство, позволяющее накопление энергии, хранение ее и последующее выделение без преобразований. Такое определение, как представляется, более строго отражает сущность аккумулятора энергии.

Сжимая пружину, мы затрачиваем механическую энергию; разжимаясь, она выделяет энергию в той же форме. Так же обстоит дело с маховиками. Разгоняя маховик, мы аккумулируем механическую (кинетическую) энергию; тормозя его, выделяем энергию в той же форме. Электроаккумулятор заряжается электрической энергией и выделяет электрическую энергию.

Здесь мы поведем речь только об одном типе аккумулятора энергии, имеющем непосредственную связь с инерцией, — инерционном аккумуляторе (маховике)<sup>1</sup>, который считается одним из самых перспективных. Маховики способны кратковременно развивать колоссальные мощности, недоступные другим аккумуляторам. Экономичность маховиков чрезвычайно высока: помимо того, что они имеют высокий КПД, это — единственные из аккумуляторов, способные эффективно использовать (рекуперировать)

<sup>1</sup> Археологическими раскопками установлено, что самый древний на Земле маховик был изготовлен почти 5,5 тыс. лет назад. Это был гончарный круг — массивный диск из обожженной глины диаметром около 1 м с круглым отверстием в центре. Диск, посаженный на цапфу, после раскрутки некоторое время вращался, расходуя накопленную кинетическую энергию, т. е. выполнял роль маховика.



ровать) механическую энергию машины на спусках и при торможении. И наконец, нет достаточно емкого аккумулятора, который в меньшей степени загрязнял бы окружающую среду вредными выделениями при работе, чем маховичный (что чрезвычайно важно с экологической точки зрения, весьма актуальной в наше время). Маховичные аккумуляторы могут применяться с большей эффективностью, чем двигатели других типов, на общественном городском транспорте — в автобусах и рельсовых машинах, внутризаводском транспорте, транспорте специального назначения — аэродромном, почтовом, прогулочном, рудничном и троллейном, в энергосистемах кратковременного действия, в ручном инструменте и во многих других случаях.

Чтобы инерционный аккумулятор максимально эффективно проявил свое свойство сохранять накопленную кинетическую энергию, движение маховика должна быть возможно ближе к инерционному вращательному движению. А для этого нужно, чтобы сопротивление вращению маховика было исчезающе мало и не оказывало заметного влияния на равномерность его движения. Нужно также, чтобы линейная скорость движения большей части массы маховика была максимально высокой — тогда при одной и той же инерционности маховика в ней будет накоплено большее количество кинетической энергии. Для нормальной работы инерционного аккумулятора необходимо, чтобы маховик был статически и динамически отбалансирован, — иначе, кроме инерционного вращательного движения, маховик будет участвовать еще и в вибрационном движении, отнюдь не способствующем эффективному сохранению энергии.

Инерционный аккумулятор, основанный на инерционном вращении маховика, в отличие от тела, движущегося равномерно и прямолинейно, может легко менять показатель инертности — момент инерции. Такие маховики переменного момента инерции позволяют регулировать угловую скорость вращения, что определяет многие полезные свойства инерционного аккумулятора.

### Снижение потерь энергии

Итак, чтобы движение маховика стало возможно ближе к инерционному (как в ньютоновом примере вращающегося без потерь на трение волчка), момент внешних сил, дейст-



вующий на маховик инерционного аккумулятора, должен быть возможно меньшим. Моменты внешних сил, действующих на маховик, обуславливаются потерями энергии в инерционном аккумуляторе. Посмотрим, где же теряется энергия при вращении маховика.

Вращаясь, маховик приводит в движение и окружающие слои воздуха, на что, естественно, уходит энергия. Потери, или сопротивления, возникающие при этом, называются аэродинамическими, или вентиляционными. Кроме вентиляционных, есть потери энергии и в опорах — подшипниках, зависящие от типа опор. Если это подшипники качения, то энергия уходит на перекатывание шариков или роликов, если подшипники скольжения — на сухое или жидкостное трение, если магнитные — то на вихревые токи и гистерезис, и т. д. Есть еще ряд потерь энергии: на вихревые токи при вращении в поле земного магнетизма, на демпфирование при вибрациях, на звук, который обычно сопровождает вращение маховика. Однако все эти потери пренебрежимо малы по сравнению с двумя основными — вентиляционными и в опорах.

Мощность потерь в инерционных аккумуляторах зависит от плотности окружающей среды. Зазор между маховиком и кожухом для обеспечения минимальных потерь должен составлять от 1 до 3 % диаметра маховика. При большем зазоре в движение вовлекается много газа и растут потери, а при очень малых зазорах пограничные слои газа начинают влиять один на другой. Наличие кожуха уменьшает потери мощности на 20%. В водородной среде потери снижаются почти в 10 раз, а в гелиевой — в 7 раз по сравнению с воздушной. Даже температура окружающей среды влияет на потери энергии, например: при  $-60^{\circ}\text{C}$  по сравнению с обычной комнатной температурой ( $20^{\circ}\text{C}$ ) они увеличиваются на 17%, а при температуре кипения воды ( $100^{\circ}\text{C}$ ) уменьшаются на 11%.

Мощность потерь на вентиляцию в воздушной среде определяется по следующей формуле:

$$N = 5,36 \cdot 10^{-16} \pi n^{2,7} P^{0,7} (1 + 4,4L/D) D^{4,4} \text{ Вт}, \quad (3.1)$$

где  $n$  — частота вращения маховика (об/мин),  $P$  — давление среды (в долях от атмосферного),  $L$  — ширина маховика (см),  $D$  — диаметр маховика (см).

Для маховиков, вращающихся в газовой среде нормального давления, вентиляционные потери составляют до 85% общих механических потерь. Это очень много. Как же их



уменьшить? Прежде всего, конечно, рациональным выбором зазора между маховиком и кожухом. Следует избегать всякого рода изменений сечения зазора, выточек, шлицев, отверстий в маховике, особенно близ периферии, где окружная скорость высока. Но так много не выиграть.

Для маховиков одинакового диаметра мощность потерь на вентиляцию в зависимости от окружной скорости и можно примерно выразить формулой

$$N = k u^3, \quad (3.2)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Стало быть, если уменьшить окружную скорость вдвое, потери упадут сразу в  $2^3$ , т. е. в 8 раз. Если между маховиком и кожухом поставить дополнительный легкий кожух, вращающийся с половинной скоростью маховика, относительная скорость упадет вдвое, а потери (с учетом того, что трущихся о воздух поверхностей будет уже две) должны уменьшиться в 4 раза. Это уже немало. Правда, наличие вращающегося кожуха несколько увеличивает потери в подшипниках и создает ряд других потерь, но в общем потери уменьшаются более чем в 2 раза. И при этом не нужно никакого привода для вращения этого кожуха — он вращается сам, увлекаемый потоком воздуха, и именно со скоростью, равной половине скорости маховика.

Однако наиболее радикальным и перспективным решением вопроса о снижении вентиляционных потерь является вакуумирование или значительное снижение давления в камере вращения. Для этого камера должна быть герметичной и из нее надо «вывести» вращение — в этом заключается основная трудность. Создано несколько способов вывода мощности из герметичной камеры маховичного аккумулятора.

Часто маховик вместе с электрогенератором помещают в герметичный корпус, а энергию отводят по проводам в виде электрического тока. На этом принципе основаны системы, работающие на маховичных автомобилях и гироскопах. В некоторых из них камера вращения заполняется разреженным водородом для лучшего охлаждения электромашины. Однако КПД электрической передачи в такой схеме невысок, схема тяжела и лишает маховичный привод его большого преимущества — высокой удельной мощности. Несколько лучше в этом отношении гидростатический привод, перспективный для машин с основной гидростатической трансмиссией. Но оба эти привода не



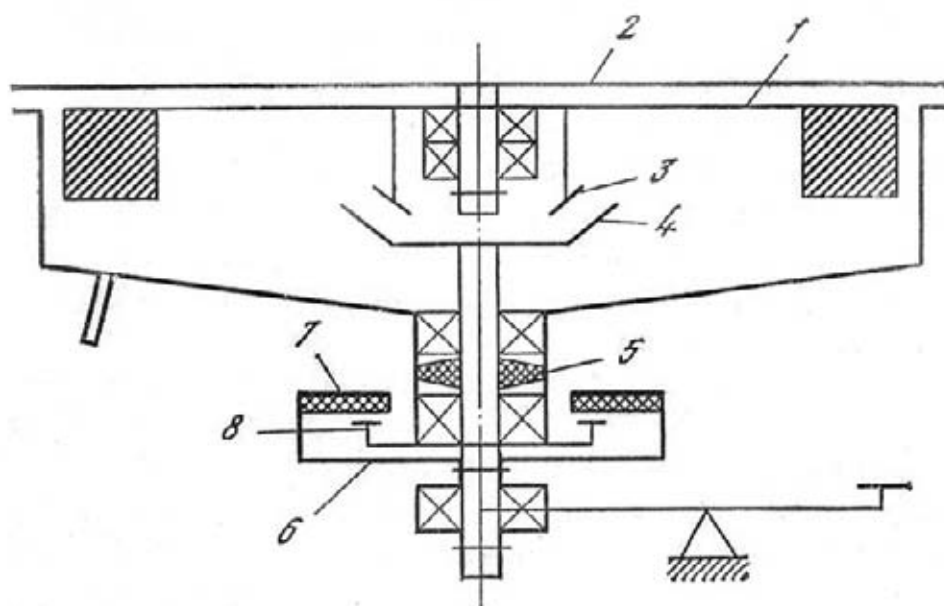


Рис. 15. Инерционный аккумулятор с герметизацией корпуса при выбеге маховика

позволяют развивать больших мощностей, необходимых, например, для экстренной подзарядки (раскрутки) маховика.

Иногда вал выводится из камеры вращения через обычные уплотнения, а воздух, который постоянно подсасывается в вакуумную камеру, непрерывно удаляется насосом. На этом принципе основана, например, герметизация камеры вращения маховика приводов систем Гиректа и Гидректа, созданных английским конструктором инерционных аккумуляторов Р. С. Кларком. В этой системе воздух из камеры вращения удаляется насосом, питающимся от самого маховика. Выбег (холостой ход после разгона) такого маховика достигает нескольких дней. Но необходимость постоянно откачивать воздух, уход за вакуум-насосом усложняют систему.

Удобнее откачивать воздух только во время работы инерционного аккумулятора, а во время длительных выбегов герметизировать камеру вращения маховика. Это повышает экономичность откачки и сильно уменьшает потери при выбеге.

Одна из конструкций, работающих по этому принципу, представлена на рис. 15.

Маховик 1 установлен в подшипниках на оси, соединенной с корпусом 2. На маховике закреплена полушестерня 3 муфты сцепления, другая полушестерня 4 закреплена на выходном валу, имеющем уплотнение 5 (например, манжетное). На выходном валу установлен стакан 6 с дополни-



тельным контактным уплотнением 7 в виде торцового кольца (например, из резины). На корпусе закреплено неподвижное кольцо 8.

При зарядке маховика или отдаче им энергии полумуфта 4 прижата к полумуфте 3 и выходной вал соединен с маховиком. При этом вал герметизирован только манжетным уплотнением 5, через которое, хоть и в небольшом количестве, воздух все-таки просачивается. В это время уплотнительное кольцо 7 приподнято вместе с валом и не касается стакана 8. Во время же выбега маховика вал вместе с полумуфтой 4 перемещается вниз, маховик отсоединяется от вала, а кольцо 7 прижимается к стакану 8, герметизируя корпус. Включение и выключение сцепления может производиться, например, педалью.

Так как выбег обычно длится гораздо дольше, чем работа или зарядка инерционного аккумулятора, снижение потерь при выбеге очень важно. Если отбор мощности осуществляется гидро- или электросистемой либо каким-нибудь из низкомомментных устройств вывода мощности (описанных ниже), то зарядку инерционного аккумулятора удобно производить приводом весьма высокой мощности (например, крупным электродвигателем) за очень короткое время. В этом случае описанная конструкция очень удобна, так как позволяет раскручивать маховик непосредственно за вал и откачивать воздух одновременно с зарядкой.

Перспективны также магнитные уплотнения, состоящие из магнитной жидкости, находящейся в магнитном поле, создаваемом постоянными магнитами вокруг вала. Магнитная жидкость — это коллоидный раствор феррита в жидкости. Размеры частиц феррита должны быть очень малы, иначе жидкость будет нестойкой. Но и эти уплотнения не лишены недостатков: максимальное давление невелико, особенно при высоких угловых скоростях; растворитель испаряется в вакууме, отчего жидкость может загустеть; при высоких угловых скоростях и большом диаметре вала (это необходимо, например, для передачи больших мощностей) велики потери в уплотнении, что может вызвать нагрев и выход из строя уплотнения.

Наиболее высокий вакуум позволяет держать уплотняющие системы с гибкими звеньями. Их можно разбить на два основных типа — сильфонные и волновые.

Сильфон — это гофрированная упругая пластина или трубка, которая сильно деформируется, сохраняя упру-



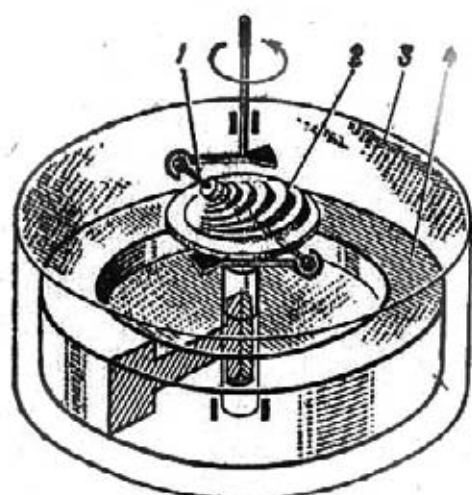


Рис. 16. Передача вращения через герметичный корпус поводковой муфтой  
1 — поводок, 2 — сильфон, 3 — герметичный корпус, 4 — маховик

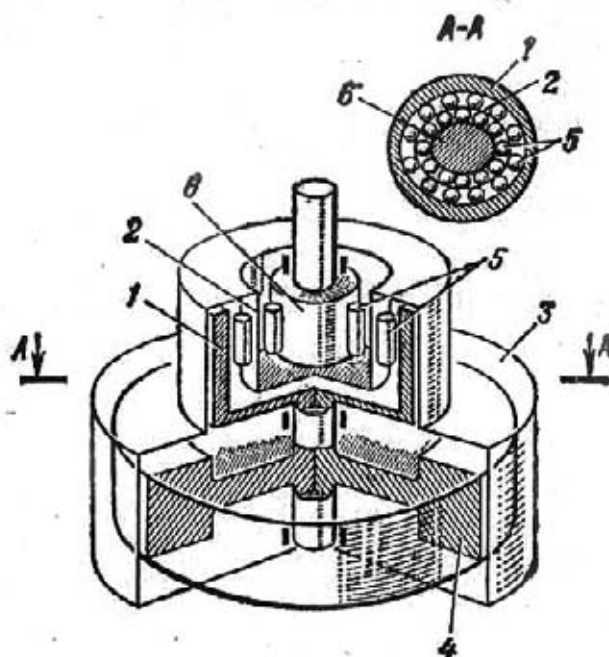


Рис. 17. Передача вращения через герметичный корпус волновой муфтой  
1 — внешняя обойма, 2 — гибкий стакан, 3 — корпус, 4 — маховик, 5 — ролики или шарики, 6 — генератор волн

гость, и это свойство используется для герметизации при передаче вращения в вакуум. Проще всего передать из вакуума при помощи сильфона возвратно-поступательное движение. Для этого вращательное движение надо преобразовать в возвратно-поступательное (например, кривошипно-шатунным механизмом), а затем передать с помощью сильфона из вакуума. После этого его можно снова преобразовать во вращательное или использовать как возвратно-поступательное.

Вращательное движение можно передать через герметичную стенку и с помощью поводковой муфты (рис. 16). На основе поводковых муфт создано много разнообразных систем передачи вращения. Их достоинством является возможность поддержания в камере вращения высокого вакуума и надежность его сохранения, недостаток же заключается в невысоком передаваемом вращающем моменте и угловой скорости, т. е. в малой мощности передачи.

Пожалуй, перспективнее всех (но только пока, так как «грозным соперником» всех систем передачи вращения через герметичную стенку является магнитное уплотнение для передачи высоких мощностей из вакуума) системы с волновыми муфтами (рис. 17). Генератор волн — кулачок



эллипсной формы, вращаясь, изгибает гибкий стакан, придавая ему в сечении форму кулачка — эллипса. Внешняя обойма, имея внутреннее отверстие такой же эллипсной формы, «следит» за волной, возникающей на стакане, и вращается синхронно генератору. Для уменьшения трения между генератором, стаканом и обоймой находятся ролики. Это как бы волновая передача с передаточным числом, равным единице (как известно, волновая передача также пригодна для передачи вращения через герметичную стенку, но только в одну сторону, поскольку она обладает свойством самоторможения при использовании ее как ускоряющей передачи). Волновая муфта передает большие вращающие моменты при достаточных угловых скоростях, т. е. большие мощности. Слабое звено волновой муфты, как и всех волновых передач, — невысокая долговечность гибкого звена.

Известен способ передачи вращения через герметичную стенку с помощью магнитных муфт. Стенка, через которую передается вращение магнитной муфтой, должна быть немагнитной, чтобы через нее проникало магнитное поле, и не должна проводить ток — иначе будут большие потери энергии на вихревые токи. Магнитные муфты хорошо передают большие угловые скорости.

Потери энергии в опорах хотя относительно невелики при вращении маховика в воздушной атмосфере, но с уменьшением вентиляционных потерь становятся основными, а при достаточно высоком вакууме в камере вращения являются практически единственными потерями.

Мощность трения в подшипниках качения, обычно применяемых в качестве опор оси маховика, определяется по выражению

$$N = 5 \cdot 10^{-3} G \mu d \omega, \text{ Вт}, \quad (3.3)$$

где  $G$  — сила тяжести маховика (Н);  $\mu$  — приведенный коэффициент трения в подшипниках качения (изменяющийся примерно от 0,001 до 0,004 в зависимости от качества подшипника);  $d$  — диаметр вала под подшипником (см),  $\omega$  — угловая скорость маховика.

Потери энергии в опорах можно значительно уменьшить применением специальных подвесов маховиков. Для валов с вертикальной осью вращения наиболее удобным и эффективным методом является магнитное подвешивание. В настоящее время магнитное подвешивание используется большей частью в точных приборах. Вакуум-



ная магнитная подвеска маховика без непосредственного контакта с опорами практически устраняет потери энергии при вращении. Разработаны системы магнитного подвешивания с применением диамагнетиков, позволяющие «вывесить» маховик без твердого контакта или следящей системы в поле постоянных магнитов. Однако реальнее применение магнитной подвески с постоянными магнитами совместно с подшипниками.

Не очень тяжелые маховики можно подвешивать в электростатическом поле. В одной из конструкций такого подвеса маховик, изготовленный в виде полого бериллиевого шара, помещен в сферическую камеру из специальной керамики. На внутренней поверхности камеры расположены три пары чашеобразных электродов. Благодаря очень малому зазору между маховиком и внутренней стенкой камеры (сотые доли миллиметра) электростатическое поле «подвешивает» маховик, который вращается без соприкосновения с твердой поверхностью. Будучи разогнанным до 24 тыс. оборотов в минуту, маховик в электростатическом подвесе с вакуумной камерой вращения может вращаться месяцами без существенного уменьшения скорости.

Интересно также криогенное подвешивание маховиков. Принцип такого подвеса основан на использовании явления сверхпроводимости некоторых материалов при весьма низких температурах. Если тело из сверхпроводящего материала поместить в магнитное поле при низкой температуре, на его поверхности возникнут токи, препятствующие проникновению магнитного поля внутрь тела. Тело повиснет в магнитном поле, не требуя для своей поддержки механической опоры. Маховик в этом случае изготавливается из титана, покрытого тонким слоем ниобия. В корпусе, где он вращается, поддерживается глубокий вакуум и температура —  $269^{\circ}$ . Магнитное поле создается током, протекающим по трем парам сверхпроводящих обмоток.

Однако наиболее перспективен для опор маховиков, работающих в вакууме, особенно глубоком, метод, основанный на явлении сверхнизкого трения. Дело в том, что у целого ряда материалов (и ранее применявшихся для подшипников с твердой смазкой в вакууме) при соответствующем их облучении, например, ядрами гелия или просто потоком электронов, коэффициент трения снижается практически до нуля. Стало быть, вакуум не только не



является помехой, но служит неременным условием достижения сверхнизкого трения. Если такой метод будет разработан, инерционные аккумуляторы фактически лишатся внутренних потерь энергии, что обеспечит им почти 100%-ный КПД. Маховик будет вращаться практически только по инерции.

### Супермаховик — перспективный инерционный аккумулятор

Как известно из физики, любое движущееся тело является носителем кинетической энергии. Тела могут двигаться по-разному: поступательно, вращательно, произвольно в плоскости, вращаться вокруг неподвижной точки (как, например, волчок), двигаться произвольно в пространстве. Самый простой вид движения — поступательное: при этом все точки описывают одинаковые траектории, имеют одинаковые скорости и ускорения.

Кинетическая энергия поступательно движущегося тела пропорциональна массе  $m$  тела и квадрату скорости  $v$  движения:

$$T=0,5mv^2, \quad (3.4)$$

а его удельная энергия

$$e=T/m=0,5mv^2. \quad (3.5)$$

Так, например, каждый килограмм массы автомобиля, движущегося со скоростью 100 км/ч, накапливает согласно формуле (3.5) 385 Дж энергии; самолета, летящего со скоростью 1000 км/час, в 100 раз больше — 38 500 Дж энергии, а космического корабля, имеющего скорость 10 км/с, — гигантскую энергию, равную 50 млн. Дж!

Вот идеальные аккумуляторы энергии, плотность энергии которых во много раз превышает плотность энергии лучших электрических аккумуляторов. Но как «привязать» этот аккумулятор к месту? Надо как-то «привязать» несущийся аккумулятор к неподвижной оси, а уже с нее снимать энергию.

Оказавшись «привязанными», массы сразу изменят свое движение на круговое и начнут натягивать нить из-за стремления двигаться прямолинейно. В этом натяге вся трудность — он получается очень большим. Если просчитать силу, вызываемую движущейся по окружности радиусом 1 м массой с принятыми ранее скоростями, то



1 кг массы автомобиля натянет даже невесомую нить с силой 7,7 кН, 1 кг массы самолета — 0,77 МН, а космического корабля — 1000 МН. Этого, конечно, не выдержит и самый прочный канат, а ведь мы считали нить невесомой, на самом деле и она сама будет усиливать свой же натяг. Для реальных конструкций маховиков напряжения в материале при вращении рассчитываются по формуле вращающегося тонкого кольца: они будут пропорциональны квадрату линейной скорости, т. е. накопленной кинетической энергии:

$$\sigma = \rho v^2, \quad (3.6)$$

где  $\rho$  — плотность материала кольца.

Радиуса кольца в формуле нет, значит напряжение во вращающемся кольце не зависит от его размеров, а только от плотности и квадрата скорости. Если вспомнить, что  $e = 0,5v^2$ , а  $v^2 = e/0,5 = 2e$ , то

$$\sigma = 2\rho e. \quad (3.7)$$

Смысл таков: если нужно накопить больше энергии, то в столько же раз приходится увеличивать прочность материала маховика.

Теперь, зная, каким образом накапливается кинетическая энергия во вращающемся маховике, зададимся вопросом: до какого же предела можно «накачивать» в маховик энергию? Что мешает беспредельному повышению плотности его энергии? Ответ только один — прочность материала маховика. Повышая во сколько-нибудь раз плотность энергии маховика конкретной формы, мы должны расплачиваться таким же увеличением его прочности. Например, изготовив маховик — кольцо из стали ( $\rho = 7,8 \text{ т/м}^3$ ) и высчитав напряжения в материале, получаем, что для плотности энергии 385 Дж/кг надо иметь кольцо прочностью не менее 0,6 кН/см<sup>2</sup>, для плотности 38,5 тыс. Дж/кг — 0,06 МН/см<sup>2</sup>, а для 50 млн. Дж/кг — 78 МН/см<sup>2</sup>. Современная техника пока может удовлетворить требованиям прочности материалов только для первых двух случаев, но это только пока <sup>2</sup>...

Известно, что максимальную прочность металл развивает в виде лент или проволок. Лента или проволока бла-

<sup>2</sup> Сейчас уже созданы образцы волокон, способные обеспечить теоретическую плотность энергии 15 МДж/кг. Это углеродные волокна со структурой алмаза. Теоретически предсказаны материалы, способные обеспечить плотность энергии 60 МДж/кг.



годаря своей внутренней структуре, образованной холодной прокаткой или волочением, имеют прочность, в несколько раз превышающую прочность исходного материала<sup>3</sup>. Как изготовить маховик из проволоки или ленты? На легкий центр (например, катушку из дюралюминия или пластмассы) навивается тонкая лента или проволока, предварительно смазанная клеем. Клей должен быть достаточно эластичным, чтобы заполнять собой зазоры между витками ленты, образованные неодинаковым расширением витков разного диаметра при вращении. Проволоку (или любое волокно) можно намотать так, что оба свободных конца окажутся на внутренней поверхности обода. Такое закрепление концов создает благоприятные условия работы маховика, избавляя обод от опасных узлов и скруток на периферии. Для «поджатия» внутренних витков к внешним, т. е. для устранения расслоения обода при вращении, часто используют балласт.

Испытания таких витых маховиков на разрыв при вращении показали, что плотность энергии в них почти в 6 раз выше, чем у маховиков, изготовленных из высококачественной, но монолитной стали. Однако самое главное в том, что витой маховик совершенно безопасен при разрыве.

Маховики, изготовленные из слоисто-волоконистых композиционных материалов высокой прочности, накапливающие энергию с гораздо большей плотностью, чем обычные монолитные, и обладающие безопасным разрывом, получили название супермаховиков. Идея и устройство безопасного витого маховика — супермаховика — были заявлены независимо и практически одновременно в СССР и США: в мае 1964 г. автором книги и в январе 1965 г. американцем Т. Рейнхартом. Первая публикация по этому вопросу<sup>4</sup> относится к 1965 г. Надо заметить, что витые маховики известны с 1883 г., но по устройству и достигаемой цели они не имели отношения к супермаховикам.

По плотности энергии существующие супермаховики вполне соизмеримы с лучшими электроаккумуляторами:

<sup>3</sup> Недавно начала производиться лента из аморфного металла — метгласса, полученного сверхбыстрым охлаждением расплавленной жидкой стали на вращающемся барабане. Такая лента выпускается непрерывной, она очень прочна и недорога; пожалуй, это идеальный материал для супермаховиков.

<sup>4</sup> См.: Гулия Н. В. Маховик — опасный конкурент существующих двигателей. — Изобретатель и рационализатор, 1965, № 12, с. 4—7.



она у них достигает 200—300 тыс. Дж/кг, а у некоторых образцов даже 650 тыс. Дж/кг (180 Вт·ч/кг). В последнее время специалисты во всем мире почти полностью перешли на разработку ободковых супермаховиков, навитых из различных прочных материалов — проволоки, лент метгласса, волокон стекла, бора, углерода, кварца и в первую очередь из так называемого кевлара, который при малой плотности — примерно  $1,3 \text{ кг/дм}^3$  — обладает очень высокой прочностью — свыше  $2 \text{ кН/мм}^2$ .

Создав сверхпрочные волокна, сверхсильные магниты, сверхнизкое трение и сверхвысокий вакуум, техника сегодняшнего дня словно позаботилась об инерционных аккумуляторах, обеспечив им блестящие перспективы. Какие же основные проблемы надо разрешить, чтобы получить инерционные аккумуляторы с супермаховиками высокой и сверхвысокой плотности энергии?

Дело в том, что при вращении супермаховика его внешние витки, судя по формуле (3. 6), напряжены больше внутренних. С одной стороны, это хорошо, поскольку такое распределение напряжений обеспечивает безопасность при превышении допустимой скорости вращения и разрушении супермаховика. Первым разрушается наиболее напряженный внешний виток<sup>5</sup>. Отслоившийся конец ленты отходит от остальных витков и, стремясь двигаться по инерции прямолинейно, прижимается к корпусу с достаточно большой силой. Трением о внутреннюю цилиндрическую поверхность корпуса он, как тормозной лентой, автоматически останавливает супермаховик. При этом основная масса супермаховика остается целой. Когда супермаховик изготовлен из тонких легких волокон, склеенных между собой, он может разорваться и полностью. Хотя осколков в этом случае не образуется, но вся нагрузка, которую мгновение до разрыва несло тело супермаховика, сразу же «перекладывается» на корпус, который может этого не выдержать. Этот случай гораздо опаснее первого.

Однако, с другой стороны, такое распределение напряжения способствует расслоению супермаховика на отдельные кольца. Ведь внешние витки напряжены, а следовательно упруго деформированы, растянуты, больше внутренних, и между витками появляются зазоры. Это

<sup>5</sup> Следует заметить, что у обычных монолитных маховиков внутренние слои напряжены больше и разрушение начинается именно с них.



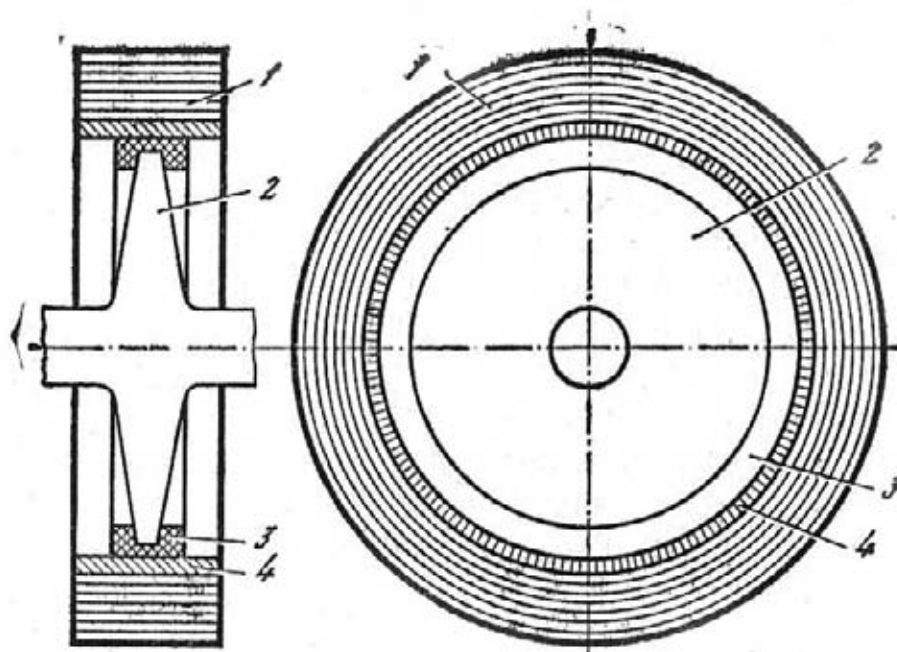


Рис. 18. Супермаховик с балластом

1 — ленточный обод, 2 — центр, 3 — упругое звено, 4 — балласт

явление создает основные трудности при создании супермаховиков.

Как бороться с этим явлением? Об одном из решений мы уже упоминали — под обод, намотанный из ленты или волокна, подкладывается балласт — тяжелые сегменты из стали или свинца либо порошок из этих металлов на упругом связующем. Одна из конструкций балластированного супермаховика представлена на рис. 18. Упругое кольцо, установленное между балластом и центральным диском супермаховика, служит для компенсации зазора из-за неодинакового упругого расширения диска и обода и надежной фиксации обода и балласта на диске. Балласт как бы «поджимает» при вращении внутренние витки к внешним, обеспечивая намотке плотность и нерасслоение. Сам балласт тоже накапливает достаточную энергию при вращении.

Однако обеспечивая плотность намотанного обода, балласт ухудшает его безопасность. Из-за «поджима» внутренних витков к внешним первые напряжены больше, чем вторые. А это значит, что при превышении допустимой скорости разрушение начнется с внутренних витков и будет носить катастрофический характер — супермаховик будет разорван целиком. Как мы уже говорили, даже полный разрыв супермаховика далеко не так опасен, как разрыв монолитного маховика, но лучше, конечно, когда разрывается только его внешняя часть, а основная



масса остается целой. Советскими учеными разработан метод и конструкции супермаховиков, обеспечивающие нерасслоение витого обода и безопасный разрыв маховика<sup>6</sup>.

Суть этого метода состоит в том, что плотность навивки обеспечивается поджатием не внутренних витков к внешним, а наоборот — внешних к внутренним. Достигается это навивкой ленты или волокна (провода) с расчетным натягом на упругую центральную часть — ступицу. Натяг зависит от многих факторов — податливости ступицы, формы сечения наматываемого элемента, толщины слоя навивки и т. п. В среднем этот натяг равен половине от максимального натяга внешнего витка супермаховика при вращении.

После намотки ступица и часть внутренних витков сжаты, а внешние витки растянуты, причем максимально растянут самый внешний виток, и напряжение в нем при этом составляет всего лишь половину от рабочего. При разгоне супермаховика зона растяжения постепенно переходит на внутренние витки, а затем и на ступицу. Внешний же виток повышает свое напряжение до рабочего. Чтобы весь обод не отслоился от ступицы, материал последней выбирается так, чтобы его упругое удлинение при вращении было больше, чем у обода. Такие материалы имеются — это алюминиевые и магниевые сплавы, пластмассы. Описанный метод позволяет сохранить плотность навивки и посадки обода на ступицу на всем диапазоне рабочих скоростей супермаховика. При этом первым будет разрываться внешний, наиболее нагруженный виток.

Этот же эффект — нерасслоение намотки и разрушение внешнего витка первым — достигается намоткой ленты или другого гибкого элемента вообще без натяга, но со склейкой витков эластичным клеем. При этом толщина склейки должна составлять 10—30% от толщины ленты. Слои эластичного клея играют роль компенсаторов зазора между витками при вращении, растягиваясь при разной деформации витков, а также обода и ступицы. Однако наличие эластичных слоев между слоями рабочей ленты имеет и отрицательные стороны. Удельная масса обода становится с ними невысокой, возраста-

<sup>6</sup> См.: Гулиа Н. В., Очан М. Ю. К теории намотки рогоров. — Механика машин, 1978, вып. 53, с. 43—50.



ет объем супермаховика. Из-за податливости слоев могут начаться колебания витков друг относительно друга, нарушается балансировка. Такой метод применим только в очень крупных супермаховиках, где угловые скорости невелики.

Внешние витки ленты даже в случае супермаховика с преднатягом крепятся склейкой. Однако крепление только склейкой обосновано опять-таки лишь для крупных супермаховиков, где нормальное ускорение при той же окружной скорости меньше, чем на малых. Снова влияние инерции: на малых маховиках, вращающихся с высокой угловой скоростью, материальная точка сворачивает с естественного, инерционного движения резче, чем на крупных, но медленно вращающихся маховиках. А окружная скорость, определяющая плотность энергии маховика, в обоих случаях одинакова. Поэтому в крупных супермаховиках конец ленты будет стремиться отклеиться от его обода меньше, чем в мелких. Вращающуюся Землю можно уподобить очень крупному маховику: она так плавно «уводит» лежащие на ней предметы от инерционного прямолинейного движения, что мы не чувствуем ее вращения, а ведь, находясь на экваторе, мы мчимся с окружной скоростью около 500 м/с, накапливая кинетическую энергию, соизмеримую с хорошим супермаховиком той же массы.

На малых супермаховиках приклеенный конец ленты при вращении обязательно отслоится. Поэтому внешние витки ленты приходится бандажировать витками проволоки или волокна. Материал бандажа должен иметь упругое удлинение при вращении (в отличие от материала ступицы) чуть меньшее или равное таковому у материала ленты. В качестве такого бандажного материала для ленты из стали и метгласса может служить тонкая высокопрочная пружинная проволока, кевлар.

Схема супермаховика, намотанного из ленты с преднатягом и бандажированными внешними витками, представлена на рис. 19.

Можно навивать супермаховик и целиком из проволоки, такие конструкции показали неплохие результаты. На рис. 20 представлен супермаховик, навитый из проволоки с преднатягом и склейкой витков эпоксидным клеем. Заштрихованная зона на сечении обода соответствует области напряжений сжатия витков при покоящемся супермаховике. Супермаховик предназначен для



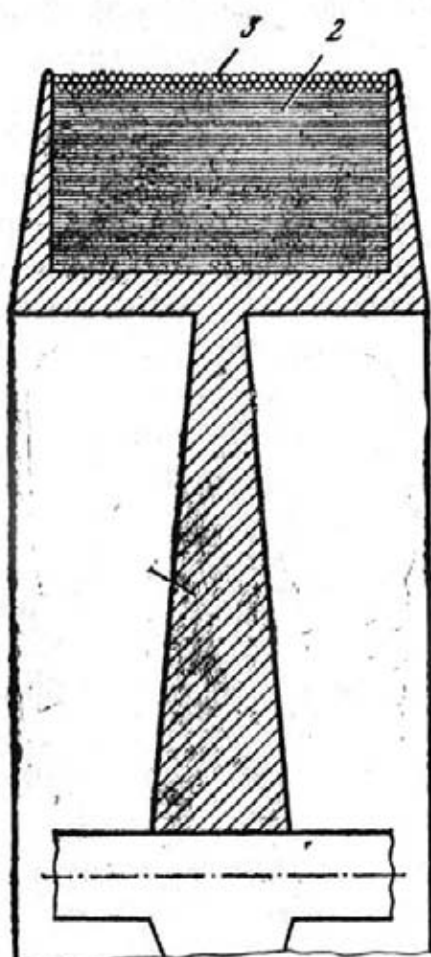


Рис. 19. Супермаховик с бандажом

- 1 — центр,  
2 — ленточный обод,  
3 — проволочный бандаж

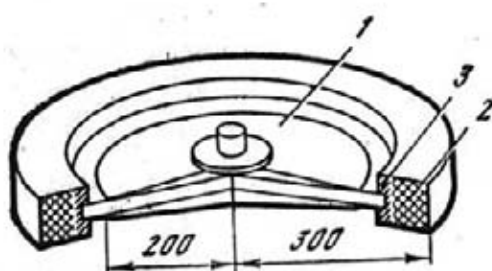


Рис. 20. Проволочный супермаховик

- 1 — центр,  
2 — зона растянутой проволоки,  
3 — зона сжатия

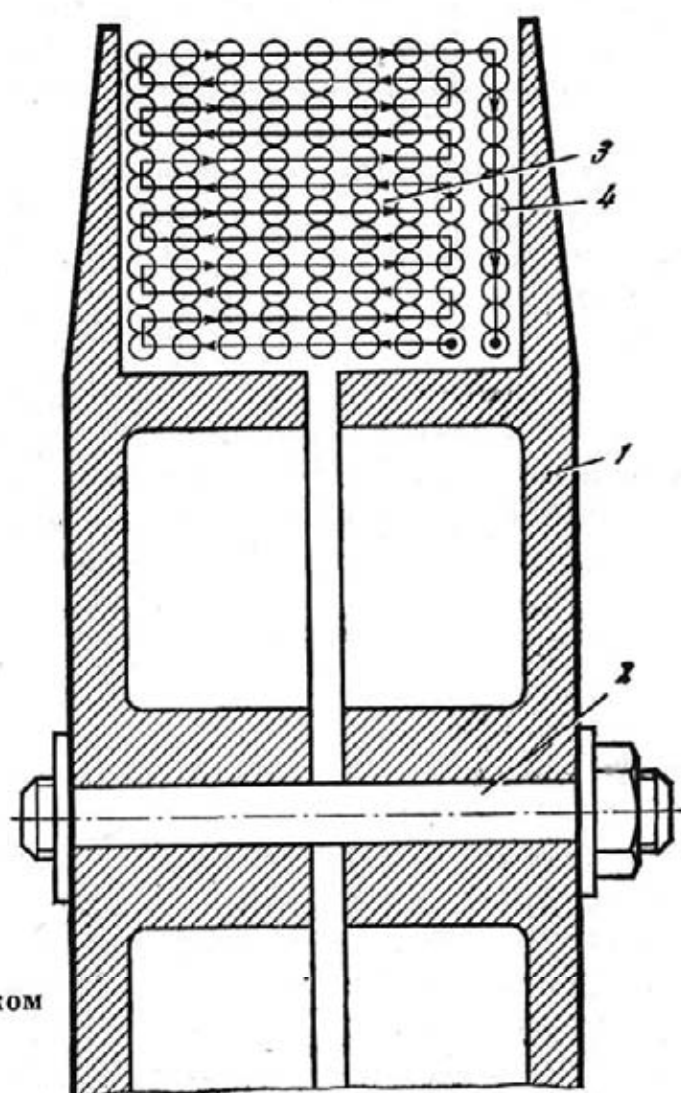


Рис. 21. Проволочный супермаховик с концами под навивкой

- 1 — щека,  
2 — вал,  
3 — обычная навивка,  
4 — навивка к центру (стрелками показано направление навивки)

накопления 1 кВт·ч энергии, масса его 31,5 кг, диаметр 0,607 м, удельная масса намотки 6,16 кг/дм<sup>3</sup>. Возможна намотка, обеспечивающая и ббольшую удельную массу.

Как было сказано выше, проволоку целесообразно мотать так, чтобы оба свободных конца оказались у внутренней части намотки, т. е. у ступицы. Несмотря на кажущуюся нереальность осуществления такой навивки,



ее можно достигнуть, если наматывать витки проволоки так, как показано на схеме рис. 21. Направление стрелок показывает последовательность намотки. Видно, что основная часть проволоки намотана обычным способом, т.е. от центра к периферии. Но правый торцовый слой, шириной в диаметр проволоки, намотан наоборот — от периферии к центру. Можно так наматывать даже не весь слой, а несколько внешних витков — этого достаточно, чтобы конец проволоки был надежно заделан и не выскочил при вращении супермаховика. Мотать проволоку снаружи вовнутрь можно разными способами. В частности, можно укрепить конец проволоки на правой щеке супермаховика и вращать ее в сторону навивки основного массива обода. После намотки торцового слоя его надо проклеить, как, впрочем и весь обод, для надежности фиксации витков.

Стремление обеспечить нерасслоение витого обода привело к созданию таких экзотичных конструкций, как некруглые супермаховики. Эти супермаховики имеют многослойный витой обод, смонтированный на ступице с заранее рассчитанным числом спиц. Радиус внутренней поверхности витого обода меньше радиуса спиц, на которые должен монтироваться обод, и после установки на спицы обод принимает некруглую форму. Когда же супермаховик вращается на расчетной скорости, обод, стремясь раздаться равномерно, принимает форму, очень близкую к окружности. Соседние слои обода трением удерживаются между собой, а внутренний слой обода приклеивается к спицам или удерживается на них силой трения.

На рис. 22 показаны разные виды некруглых супермаховиков. Позиция *а* — гибкий витой обод, *б* — узел с четырьмя спицами, *в* — супермаховик, собранный из этих компонентов, *г* — супермаховики с тремя и двумя спицами, *д* — супермаховик, вращающийся на расчетной скорости, принявший круглую форму. Хотя этот вид относится к супермаховику с четырьмя спицами, такая же форма обода будет приниматься при любом числе спиц, если параметры обода и спиц будут надлежащим образом рассчитаны.

Одним из направлений современного развития супермаховиков является создание бесцентровых конструкций в виде чистого обода. Такой обод освобожден от центральной части, оказывающей влияние на нагруженность



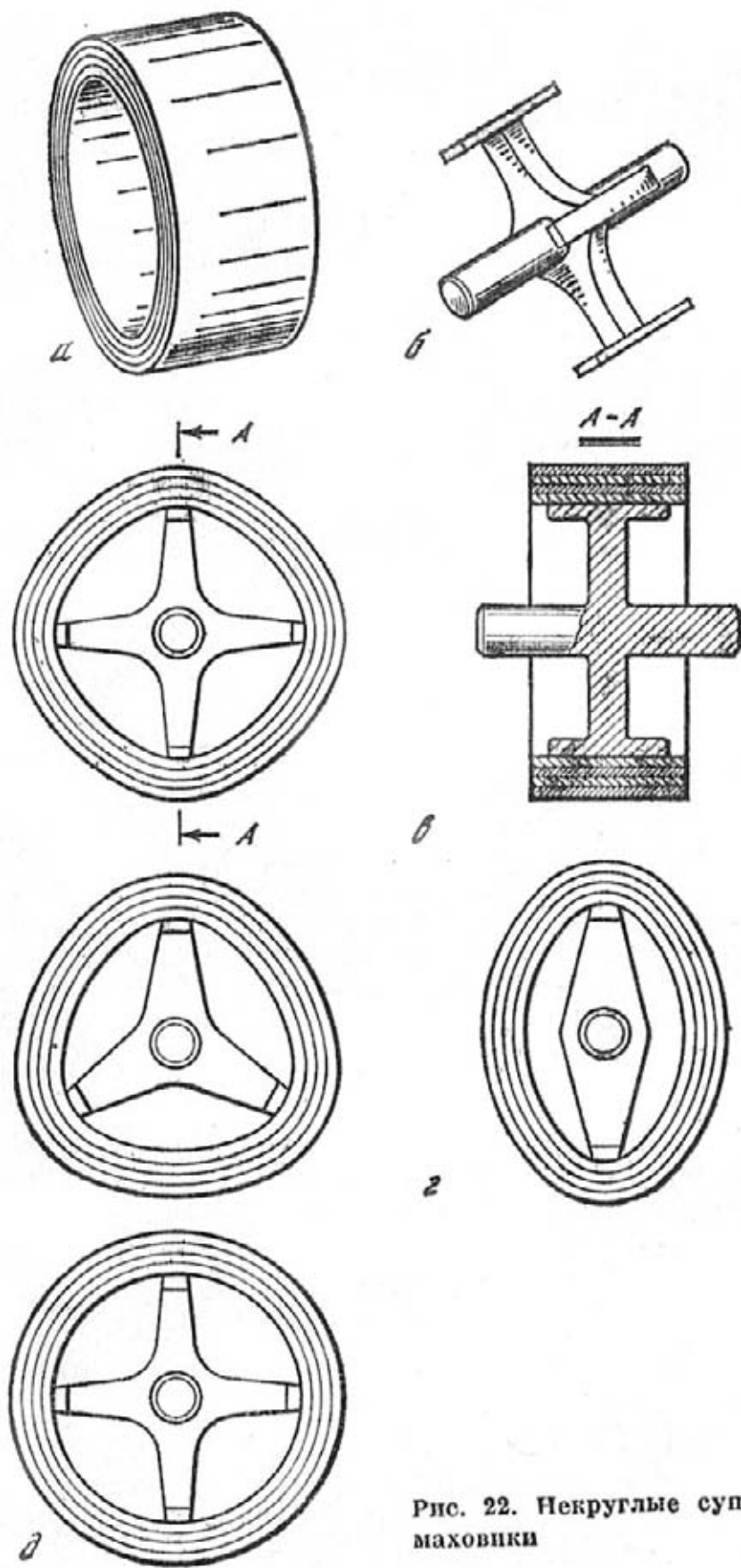


Рис. 22. Некруглые супер-  
маховики



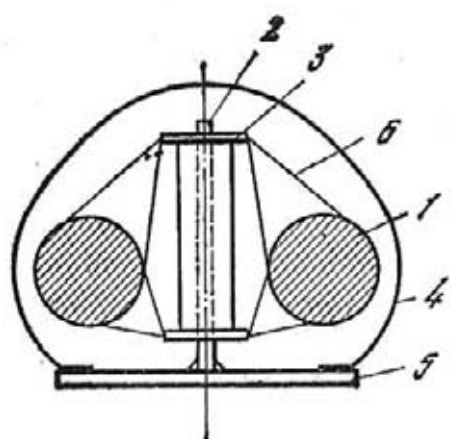
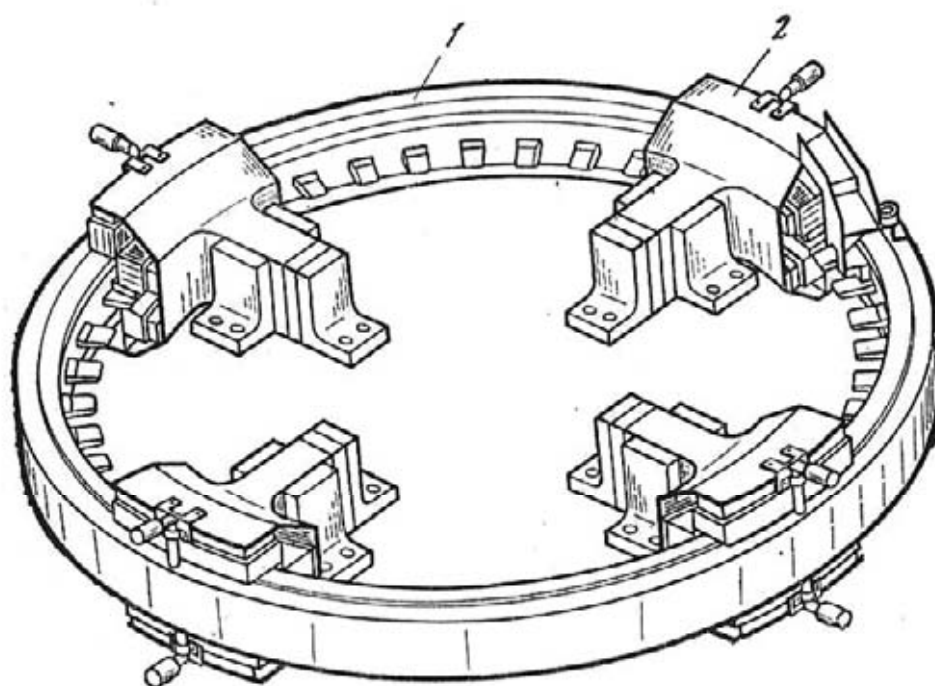


Рис. 23. Карусельный супермаховик

- 1 — витой обод,
- 2 — ось,
- 3 — втулка,
- 4 — кожух,
- 5 — основание,
- 6 — канаты подвески супермаховика

Рис. 24. Кольцевой супермаховик

- 1 — вакуумированный тороидальный корпус,
- 2 — узлы подвески и статора линейного двигателя



супермаховика и увеличивающей его массу. К подобным конструкциям можно отнести, например, витой обод, подвешенный на канатах (рис. 23). Канаты, равномерно распределяясь по длине обода, подвешивают его как на карусели, поэтому такой супермаховик назван карусельным. Канатная подвеска позволяет свободное упругое удлинение обода, обеспечивает мягкое закрепление супермаховика на опорах, снижая динамические нагрузки. Такая подвеска оправдана главным образом на крупных стационарных супермаховиках.

Большой интерес представляют конструкции кольцевых супермаховиков (рис. 24), разработанных американской фирмой «Рейдио корпорейшн оф Америка». В этих супермаховиках витой обод из высокопрочных материалов помещен в тороидальную камеру вращения, в которой поддерживается глубокий вакуум. Обод удержи-



Таблица

Показатели	Кольцевой супермаховик из кевлара	Стальной диск равной прочности
Масса, кг	4,12	54,0
Момент трения, Н·см	0,326	16,0
Удельный момент трения, Н·см/кг	0,079	0,29
Удельная мощность потерь, Вт/кг	0,175*	0,815
Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	132	27,6
Время выбега до остановки, ч	750	34

\* Предполагается, что в перспективе удельная мощность потерь будет снижена до 0,011 Вт/кг, а выбег в связи с этим увеличится до 12 тыс. ч, т. е. будет почти чистое инерционное вращение.

вается в камере с помощью магнитных опор в нескольких точках по периметру. В этих же точках размещены статоры линейного двигателя-генератора, сообщающие движение ротору, вмонтированному в обод супермаховика. Электромашина позволяет осуществлять как разгон обода, так и отбор мощности от него. Поскольку обод такого супермаховика лишен центра, в нем в наибольшей мере используются прочностные свойства анизотропного материала, из которого он изготовлен.

В таблице приведены сравнительные характеристики кольцевого супермаховика из кевлара и маховика из высокопрочной стали наиболее выгодной формы — стальной диск равной прочности на шарикоподшипниках в вакуумном корпусе. Линейная скорость кольцевого супермаховика достигает 975 м/с. При такой огромной относительной скорости отбор даже очень высокой мощности требует весьма небольших масс электромашин.

Тороидальный корпус супермаховика легкий, занимает минимальный объем, не требует ребер жесткости. Величина удельной энергоемкости (132 Вт·ч/кг) очень большая и соизмерима с таковой у лучших перспективных электрохимических накопителей.

Особенно высоки показатели супермаховиков, предназначенных для автомобилей, где очень важны габариты и масса силового агрегата. Так, маховик из высокопрочной стали в виде диска равной прочности имеет максимальную окружную скорость 690 м/с и плотность энергии 29 Вт·ч/кг. Супермаховик, навитый из стеклонити на алюминиевую ступицу, имеет окружную скорость 680 м/с, но





Рис. 25. Схема и общий вид махомобиля Рабенхорста

- 1 — маховик,
- 2 — муфта,
- 3 — редуктор,
- 4 — вариатор

плотность энергии уже  $40 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ , что объясняется высокими напряжениями в его ободке. Супермаховик, намотанный из кевлара-49, имеет окружную скорость  $750 \text{ м/с}$  и плотность энергии  $50 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ . Но абсолютным чемпионом среди испытанных супермаховиков является пока конструкция диаметром  $0,4 \text{ м}$ , развившая при  $54800 \text{ об/мин}$  окружную скорость  $1150 \text{ м/с}$  и плотность энергии  $187 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ .

Для обеспечения пробега  $320 \text{ км}$  легковому автомобилю, движущемуся со скоростью  $96 \text{ км/ч}$ , достаточен кевларовый супермаховик массой  $127 \text{ кг}$  и энергоемкостью  $30 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ , масса всего силового агрегата с при-

водом на колеса составит  $227 \text{ кг}$ . Электромобиль с аналогичными ходовыми показателями должен быть оснащен аккумуляторной батареей массой около  $1 \text{ т}$ . Раскрутка супермаховика мощным внешним двигателем предполагается за  $5 \text{ мин}$ . В вакуумной камере и магнитном подвесе выбег такого маховика должен быть от  $6$  до  $12$  месяцев.

На рис. 25 показана принципиальная схема маховичного автомобиля (махомобиля) и его общий вид (рядом — создатель махомобиля Д. В. Рабенхорст). Трехколесный махомобиль имеет высокие аэродинамические свойства, необходимые для минимизации потерь энергии при движении.



Для привода автобуса, имеющего конкретный путь следования и обязательные периодические остановки, вовсе не обязателен сложный инерционный аккумулятор с супермаховиком. Здесь иногда вполне достаточен и монолитный маховик современной конструкции. Фирмой «Дженерал электрик» (США) выпущен маховичный автобус (махобус), у которого маховик выполнен из пакета высокопрочных дисков (как для поездов метро). Масса маховика 1400 кг, рабочая частота вращения — от 5 до 10 тыс. об/мин. Маховик выполнен заодно с мотор-генератором постоянного тока с вертикальным валом. Корпус маховика и мотор-генератор заполнен разреженным гелием. Раскрутка маховика осуществляется подключением к сети. Тяговый двигатель махобуса имеет мощность 115 кВт и позволяет пройти машине с полной нагрузкой 5—6 км до следующей подзарядки. При торможениях предусмотрена рекуперация энергии.

Такой же маховик в виде пакета скрепленных между собой дисков предусмотрен в конструкции маховичного погрузчика — махокара. Махокар снабжен гидрообъемным приводом от маховика на исполнительные органы, камера вращения маховика — вакуумная, с периодической откачкой воздуха при его раскрутке. Раскрутка производится мощным внешним электродвигателем непосредственно за вал в течение 5—7 мин с последующей герметизацией. Запас энергии в маховике — 3—4 кВт·ч — достаточен для работы погрузчика в течение часа между подзарядками. При опускании грузов и движении погрузчика на спусках предусмотрена рекуперация энергии. При работах, связанных только с разгрузкой высоко расположенных грузов, подзарядка делается ненужной — погрузчик работает на потенциальной энергии спускаемых грузов. Диаметр маховика 0,85 м, максимальная частота вращения 6 тыс. об/мин.

### **Неуравновешенность маховиков и ее устранение**

Наличие тяжелого быстро вращающегося маховика в инерционном аккумуляторе требует тщательной балансировки, так как в случае неуравновешенности маховика могут наступить опасные вибрации. Хотя в некоторых конструкциях инерционных аккумуляторов предусмотрены гибкие опоры, даже здесь неуравновешенность нежелательна, по-



сколько она приводит к дополнительным потерям энергии и может вызвать резонансные явления.

Рассмотрим равномерное вращение с угловой скоростью  $\omega$  твердого тела вокруг какой-нибудь оси и применим к нему принцип Д'Аламбера. Центробежная сила инерции (термин уместен, если оговорен принцип Д'Аламбера) массы  $m$  тела равна

$$F_{ц} = m\omega^2 r, \quad (3.8)$$

где  $r$  — расстояние от оси вращения до центра массы тела.

Для реальных частот вращения маховиков инерционных аккумуляторов даже сравнительно малая неуравновешенность может вызвать большую центробежную силу. Например, для массы 100 г, расположенной на расстоянии 0,5 м от оси вращения, центробежная сила при 5 тыс. об/мин составляет около 15 кН, при 10 тыс. — около 60, при 20 тыс. об/мин — около 240 кН. Отсюда видно, как тщательно должны быть отбалансированы маховики инерционных аккумуляторов, вращающиеся с весьма высокой скоростью, чтобы не могли возникнуть опасные динамические реакции, равные по величине центробежным силам инерции.

В процессе изготовления маховика из-за неизбежных технологических погрешностей, неоднородности материала это условие нарушается и маховик приобретает неуравновешенность. Неуравновешенность бывает трех видов: статическая, динамическая и комбинированная. В случае статической неуравновешенности все неуравновешенные массы можно заменить одной приведенной массой  $m$ , центр которой смещен относительно оси вращения на расстояние  $\rho$  (рис. 26, а). Статическую неуравновешенность можно обнаружить без сообщения маховику вращательного движения. Она характерна для таких деталей, размер которых вдоль оси вращения мал по сравнению с поперечными размерами, например дисков и т. п.

В случае динамической неуравновешенности неуравновешенные массы можно привести к двум массам, лежащим в одной диаметральной плоскости. Статические моменты масс  $m_1$  и  $m_2$  относительно оси вращения в случае чистой динамической неуравновешенности равны между собой (рис. 26, б). При вращении маховика динамические реакции этих приведенных масс образуют пару, момент которой, постоянный по абсолютной величине, непрерывно меняет свое направление. Эта пара сил также действует



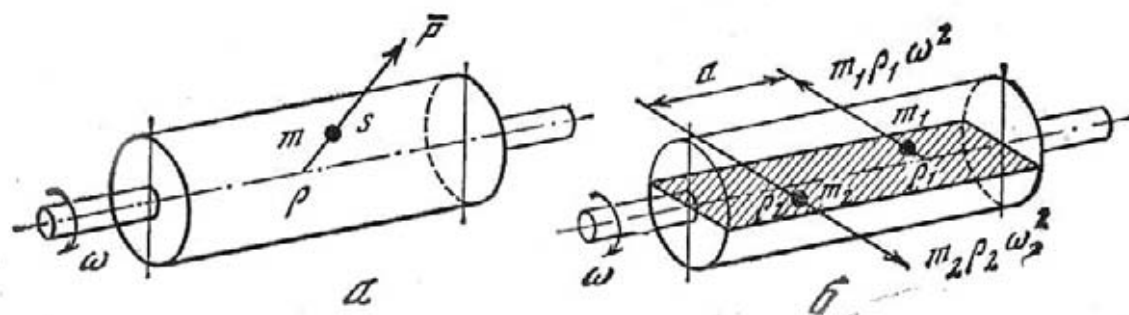


Рис. 26. Виды неуравновешенности маховиков

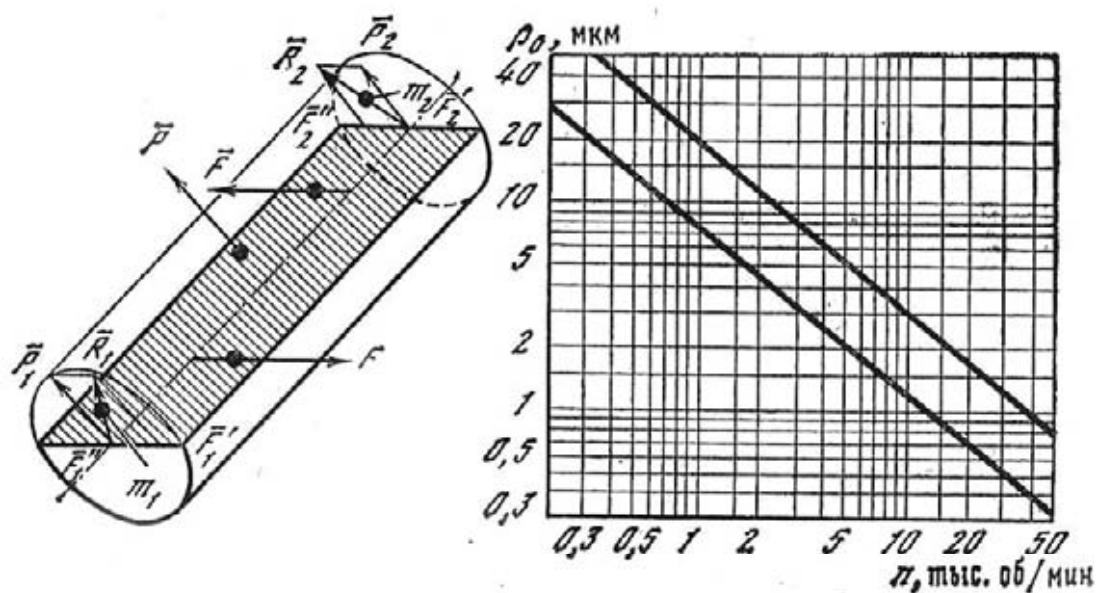


Рис. 27. Комбинированная неуравновешенность маховиков

Рис. 28. График для определения допускаемого смещения центра инерции маховика в зависимости от угловой скорости

на подшипники, вызывая их колебания. В соответствии с обозначениями на рис. 26, б момент этой пары

$$M = m_1 \rho_1 a \omega^2. \quad (3.9)$$

Как видно, момент пары увеличивается с ростом угловой скорости и становится равным 0 при  $\omega = 0$ . Вследствие этого динамическую неуравновешенность можно обнаружить только при вращении детали. В чистом виде динамическая неуравновешенность маловероятна.

Одновременное наличие статической и динамической неуравновешенностей создает так называемую комбинированную (смешанную) неуравновешенность, характеризующуюся силой  $\bar{P}$  и парой  $(\bar{F} \bar{F})$ , причем сила и пара не находятся в одной плоскости (рис. 27). Такая неуравновешен-



ность на практике встречается чаще всего. Систему, состоящую из силы и пары, можно привести к двум скрещивающимся силам, расположенным в произвольных плоскостях, перпендикулярных к оси вращения тела. Разложим силу  $\bar{P}$  на две параллельные ей  $\bar{P}_1$  и  $\bar{P}_2$ , лежащие в произвольно выбранных плоскостях. Разложим также каждую из сил пары на составляющие  $\bar{F}_1'\bar{F}_2'$  и  $\bar{F}_1''\bar{F}_2''$ . В результате получим в первой из выбранных плоскостей сходящуюся систему сил  $\bar{P}_1\bar{F}_1'\bar{F}_1''$ , а в другой плоскости систему  $\bar{P}_2\bar{F}_2'\bar{F}_2''$ . Заменяв каждую систему сил одной равнодействующей, получим две силы  $\bar{R}_1$  и  $\bar{R}_2$ , лежащие в тех же плоскостях. При комбинированной неуравновешенности детали балансировка называется статической или динамической, в зависимости от того, какой вид неуравновешенности устраняется.

Современные высокоскоростные маховики обычно имеют дискообразную форму, при этом диаметр значительно превышает у них толщину. Известно, что если отношение толщины детали к ее диаметру менее 0,2, то динамической неуравновешенностью можно пренебречь и проводить только статическую балансировку. Однако точность статического уравнивания не всегда оказывается достаточной, и тогда применяется динамическое уравнивание, обеспечивающее более высокую точность. Динамическую реакцию (или центробежную силу инерции — при использовании принципа Д'Аламбера), вызываемую неуравновешенностью, обычно определяют по выражению:

$$P < kG, \quad (3.10)$$

где  $k$  — коэффициент, выбираемый в результате анализа условий работы,  $G$  — масса тела.

Рекомендации различных авторов по выбору коэффициента  $k$  весьма разноречивы, причем значение его колеблется от 0,01 до 0,5. Такое расхождение объясняется специфическими условиями работы отдельных машин: чем массивнее вращающийся ротор по сравнению с машиной, тем большую точность уравнивания необходимо обеспечить, поскольку ротор воздействует не только на несущие подшипники, но и на всю машину (или узел), вызывая вибрацию.

На рис. 28 дан ориентировочный график для определения среднего допускаемого смещения от оси центра инерции  $\rho_0$  в зависимости от частоты вращения. Для более легких маховиков в тяжелых, грубых механизмах можно



принимать верхний предел, а для массивных маховиков легковесных точных машин — нижний. Уточнение допуска на неуравновешенность должно производиться путем исследования машины в рабочем состоянии, измерения вибраций и сопоставления их с допускаемыми по ГОСТу. Существует множество приспособлений и устройств для статической и динамической балансировки маховиков. Здесь мы рассмотрим наиболее универсальные средства и методы (дающие к тому же неплохие результаты).

Очень часто балансирование маховиков приходится производить непосредственно в шарикоподшипниках. В этом случае целесообразно применение устройства с принудительной вибрацией, дающего хорошие результаты. Точность уравнивания здесь соизмерима с точностью балансировочных весов. При этом устройство весьма просто и позволяет уравнивание деталей, изготовленных заодно с валом. Приспособление (рис. 29) состоит из основания 1 со стойками 2, на которые устанавливают деталь с надетыми на ее ось подшипниками 3 (смазку, особенно густую, целесообразно с подшипников снять). Стенд подвергается принудительной вибрации с помощью электромотора 5, имеющего на валу неуравновешенную массу 6. Под основание целесообразно подложить резиновые амортизаторы 7. Под действием вибрации деталь (маховик) 4 давит на подшипник с переменной силой. При ускорениях вибрации, близких к  $g$ , момент трения в подшипниках в отдельные мгновения может стать весьма малым.

Описанный метод наиболее удобен для статической балансировки маховиков.

Во многих случаях требуется динамическое уравнивание. Такая необходимость может возникнуть в составных маховиках, которые после сборки уже не проходят механической обработки. Наиболее простым и доступным способом динамической балансировки в условиях экспериментального производства является уравнивание с использованием в качестве упругих элементов балок

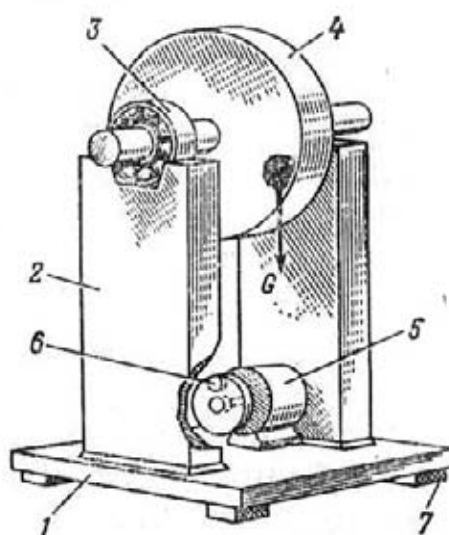


Рис. 29. Стенд для вибробалансировки



нормального сечения (рис. 30) — двутавров, швеллеров, полос и т. п.

Деталь 1, подлежащая уравниванию, устанавливается в подшипниках 2 на двух балках 3, лежащих на опорах 4. Затем деталь тем или иным способом раскручивается до угловой скорости, незначительно превышающей круговую частоту собственных колебаний устройства. По мере сбавления оборотов колебания балки увеличиваются, достигая резонансных значений. Амплитуда резонансных колебаний измеряется индикатором 5.

Частоту собственных колебаний балки с деталью можно примерно определить, сообщив устройству легкий толчок. Число оборотов в секунду разогнанной детали должно несколько превышать частоту колебаний балки, которую целесообразно выбирать около 5 Гц для средних деталей и меньшей для тяжелых.

Зафиксировав одну из балок, например с помощью подкладок или винтового домкрата, измеряют амплитуду колебаний второй балки. Разделив торец балансируемой детали на 6—8 частей и пронумеровав их, устанавливают поочередно на каждом делении пробный груз и измеряют амплитуду резонансных колебаний при каждой установке пробного груза. Массу пробного груза  $G_{\text{п}}$  рекомендуется приближенно выбирать по формуле

$$G_{\text{п}} = GA/4R, \quad (3.11)$$

где  $G$  — масса детали (кг);  $R$  — радиус установки пробных грузов (мм);  $A$  — амплитуда зарезонансных колебаний балки при угловой скорости детали, вдвое превышающей резонансную.

Определив такие точки установки пробного груза, которым соответствуют минимальное и максимальное значения колебаний, определяют массу уравнивающего груза  $G_{\text{у}}$  по формуле

$$G_{\text{у}} = 2G_{\text{п}} \frac{A_1}{A_{\text{макс}} - A_{\text{мин}}}, \quad (3.12)$$

где  $A_1$  — амплитуда колебаний балки до установки пробного груза;  $A_{\text{макс}}$  и  $A_{\text{мин}}$  — соответственно амплитуды максимальных и минимальных колебаний балки с пробными грузами.

Если при установке уравнивающего груза не достигается значительное уменьшение колебаний, то массу



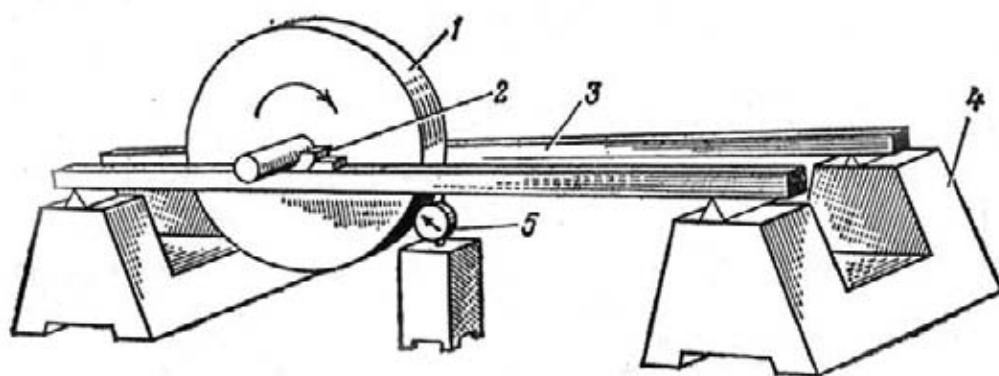


Рис. 30. Стенд для динамической балансировки

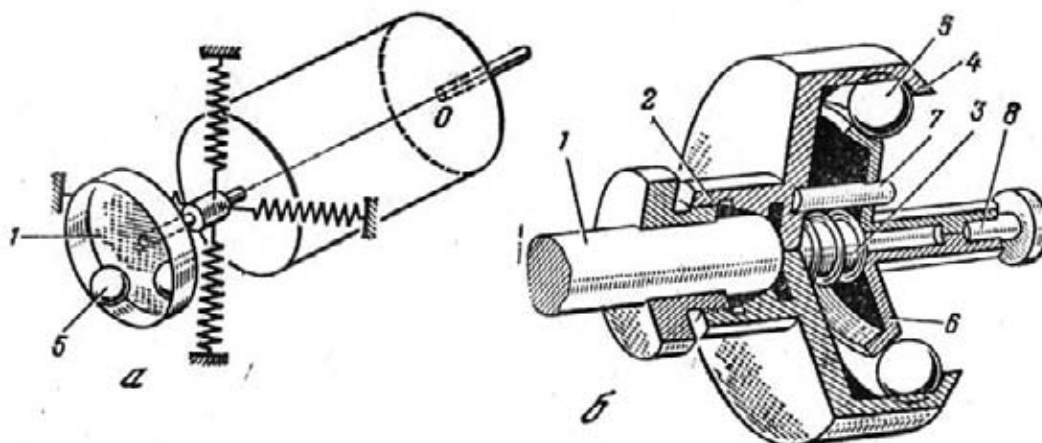


Рис. 31. Схема уравнивания шарами (а) и приспособление для балансирования (б)

уравновешивающего груза и радиус его установки уточняют опытным путем. Аналогично поступают при уравнивании другого торца детали.

Грузы при небольшой частоте вращения детали целесообразно изготавливать из пластилина. Детали приводят во вращение с помощью различных фрикционных устройств либо кулачковых муфт.

На рис. 31 дана схема автоматического уравнивания с помощью шаров и показана головка с шарами для балансирования.

При вращении детали, закрепленной в точке  $O$ , с угловой скоростью, значительно превышающей резонансную, центр ее будет вращаться вокруг оси, проходящей через неподвижную точку  $O$  и центр массы детали с приспособлением. Геометрический центр цилиндра 1, насаженного на свободный торец детали, будет вращаться также вокруг этой оси. Шары 5 в силу инерции будут стремиться занять устойчивое положение, наиболее удаленное от центра вра-



щения. Однако это положение вновь вызовет неуравновешенность (правда, в другом направлении). В результате быстро затухающих колебаний шары примут положение, соответствующее уравновешенности детали.

Головка для балансирования устроена следующим образом. На торец детали 1 с помощью конусной разрезной втулки и гайки 2 насаживается корпус головки 4, в котором шары 5 (как правило, два или три) фиксируются конусом 6 под давлением пружины 3. Штифт 7 предохраняет конус от углового смещения относительно корпуса. Кнопка 8 служит для освобождения шаров при уравнивании. По окончании процесса уравнивания кнопка отпускается и положение шаров фиксируется.

В конструкциях, разработанных в США, шары помещают в кольцеобразную полость в маховике, заполненную вязким маслом.

Часто возникает необходимость динамической балансировки маховика в самой машине при угловой скорости, соответствующей рабочему режиму. В основном это происходит в результате нарушения уравновешенности при температурных деформациях, смещении отдельных элементов механизма в реальных условиях или из-за неравномерного износа или проведения текущего ремонта.

Динамическая балансировка в машинах существенно отличается от этой же операции на специальных устройствах. При балансировке в реальной машине с опорами неопределенной жесткости плоскость и ось колебания маховика также неопределенны. Методы динамической балансировки в машине основаны на подборе уравнивающих грузов в каждой полости отдельно — так, как это делается на балансировочных машинах.

Методы балансировки зависят от применяемой аппаратуры, из которой наиболее совершенными являются балансировочные аппараты, позволяющие определять амплитуды и фазы колебаний для обеих опор. Наиболее употребительным балансировочным прибором является резонансно-стробоскопический прибор (виброскоп) Н. В. Колесника. Массу пробного груза при балансировке в машине не рекомендуется подбирать так, чтобы центробежная сила инерции груза не превышала 10—20% статической нагрузки на подшипник. В случае колебаний опор на режиме, близком к резонансному, масса груза может быть уменьшена.



## Переменный момент инерции

Любой маховик при вращении растягивается, увеличивая свою инертность. Однако если у монолитных маховиков удлинения при вращении микроскопичны, то ободы, навитые из высокопрочных волокон, растягиваются при вращении почти как резиновые. Это объясняется тем, что у многих высокопрочных волокнистых материалов наряду с высокой прочностью довольно низок модуль упругости.

Чем больше прочность и меньше модуль упругости материала, тем больше удлинение. Так, например, для композиционного материала на основе ориентировочного стеклопластика (один из лучших материалов для изготовления супермаховиков) с модулем упругости  $E=50\,000\text{ Н/мм}^2$  и прочностью  $\sigma=2500\text{ Н/мм}^2$  упругое удлинение может достигать 5%. Это очень много. Чтобы такое же упругое удлинение могла выдержать сталь при модуле упругости  $E=220\,000\text{ Н/мм}^2$ , ей нужно развить прочность  $\sigma=\varepsilon E=0,05\cdot 2,2\cdot 10^5=11000\text{ Н/мм}^2$ . Это — фантастическая прочность, недоступная даже для лучшей проволоки.

Что же делать? Ведь обод из «растягивающегося» материала надо на что-то надеть, его должен поддерживать какой-то центр, чтобы обод можно было фиксировать и снимать с него вращение. А ни один из металлов не выдерживает такого удлинения. Попробовали делать центр из пластмассы, выдерживающей большие удлинения, но центр из пластмассы может потерять устойчивость, например от воздействия высоких температур. Помимо прочего, центр должен выдерживать рабочую угловую скорость супермаховика самостоятельно, не разрушаясь без поддерживающего действия обода.

На рис. 32 показан супермаховик, где «растяжимый», обод из стеклопластика поддерживается центром, имеющим гибкий элемент на периферии в виде лепестков, охватывающих обод. При растяжении обода лепестки стремятся быть постоянно прижатыми к нему. Есть много других способов и конструкций выполнения гибких элементов «растяжимых» маховиков, но суть их сводится также к упругим деформациям центра. Попытки применения «раздвижного» центра не привели к цели, так как при столь высокой угловой скорости и нагрузках подвижные механические соединения работают очень ненадежно.

Но всегда ли плохо, когда обод растяжим? Нет ли в этом явлении и положительной стороны? Оказывается,



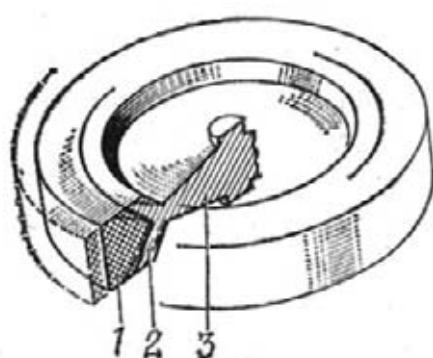


Рис. 32. Супермаховик с «растяжимым» ободом и упругим центром

1 — обод, 2 — упругая периферия, 3 — центр

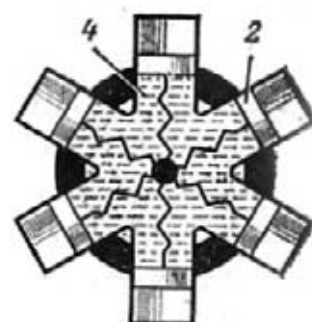


Рис. 33. Маховик переменного момента инерции

1 — цилиндры, 2 — поршни, 3 — пружины, 4 — жидкость

есть — и немалая. Дело в том, что обод, растягиваясь, накапливает, помимо кинетической, еще и потенциальную механическую энергию, как растянутая пружина. И доля ее существенна. Так, например, обод из кварцевой нити при напряжении  $6000 \text{ Н/мм}^2$  дополнительно накапливает в виде потенциальной энергии почти треть общего запаса. И эта доля потенциальной энергии растет с повышением прочности и снижением модуля упругости.

А если для изготовления маховиков применить материал, выдерживающий напряжения бóльшие, чем его модуль упругости? К таким материалам относится, например, резина. Тогда маховик накопит преимущественную часть своей энергии в виде потенциальной. И эта энергия будет накапливаться без применения каких-либо вспомогательных устройств и выделяться непосредственно при вращении вала. Такой маховик выделяет значительную часть накопленной энергии при небольшом перепаде угловых скоростей, что иногда очень удобно. Угловые скорости вращения резинового маховика невелики, и потери энергии на трение о воздух и в подшипниках незначительны. При этом запасенная в резинового маховике энергия соизмерима по плотности с энергией стальных монолитных маховиков. Нужно, конечно, учитывать, что резиновый маховик при вращении увеличивает свой диаметр в 2 раза и более, а инертность его возрастает во много раз.

Конечно, если бы стало возможным произвольно менять, регулировать инертность маховика, то мы получили



бы ценнейшее свойство варьирования угловой скорости (о чем говорилось еще в главе I). Задача создания такого маховика заманчива — ведь, меняя момент инерции маховика, можно обеспечить его разгон и получить желаемую рабочую характеристику при выделении энергии — и привлекает многих изобретателей. Одна из конструкций подобных маховиков дана на рис. 33 (этот маховик предложен известным французским писателем и летчиком А. Сент-Экзюпери). Принцип действия маховика заключается в следующем: при отсутствии давления воды поршни, стягиваемые пружинами, находятся у центра, при подаче воды в центральную часть маховика они раздвигаются, увеличивая общий момент инерции, при пуске воды возвращаются в исходное положение.

Несмотря на то что кинематически этот маховик вполне работоспособен, анализ динамики показывает полную его непригодность для выполнения поставленной цели. Например, при массе одного из поршней (грузов) 10 кг, угловой скорости маховика 628 рад/с (6000 об/мин), расстоянии груза от центра вращения 0,25 м нагрузка на каждую пружину составит свыше 1 МН, что явно невыполнимо.

Изобретателями «раздвижных» маховиков, кроме маховиков с грузами-поршнями, чаще всего предлагаются маховики с раздвижными грузами в виде регулятора Уатта, с грузами, раздвигаемыми рейками, винтовыми парами и т. п. Отдельное место занимают полые маховики, заполняемые водой, маслом, ртутью, дробью, иными жидкими и сыпучими телами. При этом одни из них используют собственную кинетическую энергию для изменения момента инерции (перекачка жидкости, перемещение сыпучих тел), другие предполагают принудительное перемещение к центру сыпучих или жидких наполнителей (например, с помощью сжатого воздуха и гибких диафрагм).

Но даже самые хитроумные конструкции подобного рода обречены на неудачу. Дело в том, что маховики как постоянного, так и переменного момента инерции должны эксплуатироваться при значительной окружной скорости. Иначе маховик не накопит достаточной кинетической энергии. Но при большой окружной скорости вся масса маховика, как уже говорилось, подвергается значительным напряжениям. Эти напряжения разрушают маховик, поэтому и создаются сверхпрочные супермаховики, чтобы вся инертная масса маховика сопротивлялась при вращении напряжениям.



Что же происходит в маховиках переменного момента инерции? Отдельные грузы, раздвигаемые механизмами, накапливают почти всю кинетическую энергию, но напряжений не несут. Все их напряжения воспринимают механизмы раздвижения грузов, что приводит к разрыву маховика уже при самых небольших оборотах. Жидкость, сыпучие тела и прочие предметы, находящиеся в полом маховике для увеличения его инертности, также не несут касательных напряжений, и всю нагрузку от этого огромного «балласта» воспринимает оболочка маховика. Но она должна быть тонкой, иначе сама будет играть подавляющую роль в инертности маховика (роль, которую авторы проектов предписывают именно наполнителю). Как говорится, дай бог, чтобы оболочка сама по себе выдержала вращение, которое делает маховик эффективным. А если уже нагруженную до предела собственными напряжениями оболочку еще «пригрузить» балластом в виде накопителя, то она мгновенно лопнет.

Эта судьба присуща всем маховикам переменного момента инерции, если можно так выразиться, «паразитического» типа, где инертная масса сама напряжений не воспринимает, а передает их несущим элементам — механизмам, оболочкам и т. п. Другое дело, если бы сама инертная масса несла свои нагрузки, причем была бы высокопрочной. Вот такой маховик обладал бы всеми полезными свойствами и супермаховика, и маховика переменного момента инерции — именно в этом направлении следует работать создателям маховиков переменной инертности.

В качестве примера такого маховика переменной инертности приведем так называемый центробежный аккумулятор. Роль инертной и в то же время несущей массы здесь играет перематывающаяся высокопрочная лента.

С первого взгляда он похож на заводную пружину: та же ленточная пружина, навитая на барабан и переходящая на вал. Но упругость ленты в обычном смысле, т. е. ее изгибная жесткость, благодаря которой накапливается энергия в заводных пружинах, здесь ни при чем. Если вращать заводную пружину специально и при этом рассчитать ее так, чтобы основная часть энергии накапливалась в динамике, то получим как раз тот случай, о котором говорили выше. Эта пружина (уже не пружина, а центробежный аккумулятор) накопит энергии столько же, сколько и ленточный супермаховик, а выделять ее бу-



дет с «мягкостью» заводной пружины<sup>7</sup>. Рассмотрим подробнее схему центробежного аккумулятора (рис. 34).

Аккумулятор состоит из вращающегося корпуса 1, в котором заключены два мотка ленты — внешний 2, прилегающий к цилиндрической части корпуса, и внутренний 3, навитый на вал 4 с фиксирующими кассетами 5. Между собой мотки соединяются одной или несколькими ветвями ленты (их число зависит от требуемого крутящего момента на валу и угловой скорости вращения корпуса). Лента 6 может быть металлической или неметаллической, постоянной или переменной толщины и массы по длине. Последнее обеспечивает закон изменения величины крутящего момента на валу 4. Вал соединяется с корпусом посредством дифференциального механизма с тремя степенями свободы (на рисунке показан механизм с коническими шестернями).

Дифференциальный механизм состоит из шестерни 7, соединяемой с валом 4 посредством муфты включения 9 жесткой или фрикционной, сдвоенной шестерни 10 и сателлитов 11 и 12, связывающих шестерню 10 с шестернями 7 и 8. Водила сателлитов при необходимости затормаживаются соответственно тормозами 13 и 14. Вал может блокироваться с корпусом блокировочной муфтой 15.

Энергия аккумулируется следующим образом. При заторможенном водиле одного из сателлитов, например 11, водило другого 12 приводится во вращение (в плоскости вращения корпуса 1) от источника энергии с любой степенью неравномерности вращения вала. Количество на-

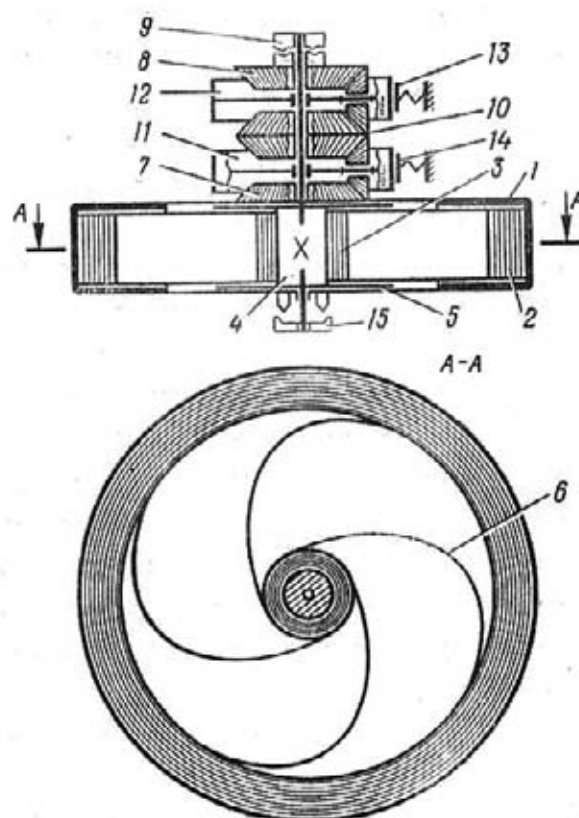


Рис. 34. Принципиальная схема центробежного аккумулятора

<sup>7</sup> Здесь и далее для удобства применен принцип Д'Аламбера, т. е. маховик представляется остановленным, причем прибавляются центробежные силы инерции.



копленной энергии зависит только от суммарного угла поворота водила сателлитов. Энергия выделяется при вращении водила сателлитов в противоположном направлении. Водило сателлита 12 в этом случае соединяется с приемником энергии.

Описанные процессы можно осуществить аналогичным образом при заторможенном водиле сателлита 12 вращением водила сателлита 11. При этом направления вращений при аккумуляции и выделении энергии будут противоположны тем, которые имели место в первом случае. Это свойство дает возможность как аккумулятировать, так и выделять энергию при любом направлении вращения вала источника или приемника энергии при поочередном вращении водил обоих сателлитов в требуемых направлениях. Кроме того, принудительным вращением водила одного из сателлитов с помощью постороннего источника энергии можно изменить интенсивность процессов накопления и выделения энергии.

При заторможенных водилах обоих сателлитов 11 и 12 корпус 1 вращается вместе с мотками ленты 2 и 3 и валом 4. Для устранения потерь энергии при холостом прокручивании дифференциального механизма вал заблокирован с корпусом с помощью блокировочной муфты 15, а муфта включения 9, соединяющая механизм с корпусом и валом, выключена.

Для аккумулятирования блокировочная муфта 15 выключается и включается муфта 9. Затем водило одного из сателлитов растормаживается и приводится в принудительное вращение от источника энергии. Лента 6 при этом перематывается с внешнего мотка 2 на внутренний моток 3, преодолевая напряжение, стремящееся перемотать ее в противоположном направлении. Центробежные силы, создаваемые витками ленты, зависят от ее ширины и толщины, длины витка и плотности материала ленты, а также от угловой скорости витков. Так, например, при четырех витках ленты с массой каждого около 50 г, угловой скорости 6 тыс. об/мин и расстоянии центра вращения 25 см суммарная центробежная сила достигает 20 кН, а крутящий момент на валу при радиусе внутреннего мотка 10 см — 2 кНм.

Накопленная при этом центробежная потенциальная энергия с перемоткой каждого метра ленты при неизменной центробежной силе равна 20 тыс. Дж. Если принять, что лента изготовлена из стали шириной 10 см и толщи-



ной 0,25 мм, то при тех же параметрах для накопления этой энергии с внешнего мотка на внутренний должно быть перемотано около 0,8 кг ленты. Напряжения в ленте при этом не превышают 20 тыс. Н/см<sup>2</sup>, что почти в 10 раз меньше предела прочности ленты. Такой запас прочности дает возможность еще больше повысить энергоемкость аккумулятора.

Процесс выделения энергии происходит аналогично: лента при этом переходит с внутреннего мотка на внешний.

Следует заметить, что центробежный аккумулятор может работать и без дифференциального механизма. Роль последнего можно заменить муфтой включения, но тогда несколько сузится область возможного применения аккумулятора.

На основе центробежного аккумулятора можно сконструировать инерционные аккумуляторы с различными свойствами, необходимыми для той или иной машины. Центробежным аккумулятором можно плавно разгонять машину и, наоборот, тормозить, аккумулируя ее кинетическую энергию. Можно построить такой маховик, который, расходуя энергию, например на вращение генератора, будет почти до полного выделения всей энергии сохранять постоянную угловую скорость<sup>8</sup>. Для этого надо соответствующим образом перематывать ленту с наружного мотка на внутренний. Можно даже создать маховик, разгоняющийся при совершении работы — до определенного, конечно, предела.

## Глава IV

### «ЗАГАДОЧНЫЕ» ПРОЯВЛЕНИЯ ИНЕРЦИИ

Случается, что люди верят в чудеса больше, чем в реальные, но труднопонятные вещи. Так и с инерцией в силу ее «труднопонятности», а вернее путаницы, которую мы сами вносим в это понятие, связывают много загадочного.

Особенно это относится к таким проявлениям инерции, как гироскопический эффект и виброперемещения. Такое

<sup>8</sup> Это свойство является основополагающим при создании накопителей для энергосистем, использующихся в сетях с промышленной строго фиксированной частотой 50 или 60 Гц.



ной 0,25 мм, то при тех же параметрах для накопления этой энергии с внешнего мотка на внутренний должно быть перемотано около 0,8 кг ленты. Напряжения в ленте при этом не превышают 20 тыс. Н/см<sup>2</sup>, что почти в 10 раз меньше предела прочности ленты. Такой запас прочности дает возможность еще больше повысить энергоемкость аккумулятора.

Процесс выделения энергии происходит аналогично: лента при этом переходит с внутреннего мотка на внешний.

Следует заметить, что центробежный аккумулятор может работать и без дифференциального механизма. Роль последнего можно заменить муфтой включения, но тогда несколько сузится область возможного применения аккумулятора.

На основе центробежного аккумулятора можно сконструировать инерционные аккумуляторы с различными свойствами, необходимыми для той или иной машины. Центробежным аккумулятором можно плавно разгонять машину и, наоборот, тормозить, аккумулируя ее кинетическую энергию. Можно построить такой маховик, который, расходуя энергию, например на вращение генератора, будет почти до полного выделения всей энергии сохранять постоянную угловую скорость<sup>8</sup>. Для этого надо соответствующим образом перематывать ленту с наружного мотка на внутренний. Можно даже создать маховик, разгоняющийся при совершении работы — до определенного, конечно, предела.

## Глава IV

### «ЗАГАДОЧНЫЕ» ПРОЯВЛЕНИЯ ИНЕРЦИИ

Случается, что люди верят в чудеса больше, чем в реальные, но труднопонятные вещи. Так и с инерцией в силу ее «труднопонятности», а вернее путаницы, которую мы сами вносим в это понятие, связывают много загадочного.

Особенно это относится к таким проявлениям инерции, как гироскопический эффект и виброперемещения. Такое

<sup>8</sup> Это свойство является основополагающим при создании накопителей для энергосистем, использующихся в сетях с промышленной строго фиксированной частотой 50 или 60 Гц.



свойство гироскопа, как прецессия, иногда возводится в ранг «загадочных». А виброперемещения, т. е. перемещения вибрирующего тела, находящегося в контакте с шероховатой поверхностью или в сопротивляющейся среде, постоянно будоражат человеческие умы. Пресловутые инерцоиды — частый случай виброперемещений — тоже кажутся загадочными машинами, способными к беспорядочному движению. Чтобы устранить из науки чудеса, рассмотрим подробнее так называемые загадочные проявления инерции.

### Инерция и гироскопический эффект

Действие гироскопического эффекта обычно связывают с устойчивостью вращающегося волчка. Удивительная устойчивость, сообщаемая волчку быстрым вращением, уже давно привлекала внимание пытливых умов. Еще около 200 лет назад в английском флоте была сделана попытка использовать это свойство быстро вращающегося волчка для создания на корабле устойчивого «искусственного горизонта», могущего заменить в туманную погоду видимый горизонт. В наше время гироскопические приборы приобретают все большее значение в различных областях техники. В частности, военная и военно-морская техника оснащены целым рядом приборов, основанных на принципе гироскопа, особенно широкое применение гироскоп получил в авиации.

В чем же причина удивительного поведения быстро вращающегося волчка? И вообще, чем объясняются гироскопические явления, т. е. явления, наблюдающиеся при быстром вращении тел? Ничем иным, как инерцией.

Рассмотрим маховик, быстро вращающийся вокруг оси  $Z'$  (рис. 35). Предположим, что вся масса маховика сосредоточена в его ободе на окружности радиусом  $\bar{R}$ , по которой она распределена равномерно. Вращение вокруг оси  $Z'$  принято называть собственным вращением гироскопа, а скорость этого вращения  $\omega$  — собственной угловой скоростью. Вращение вокруг каждой из двух других осей называют прецессией, а скорость этого вращения — угловой скоростью прецессии.

Если маховик прецессирует относительно оси  $X'$  с постоянной угловой скоростью  $W$  (рад/с), то линейная скорость материальной частицы обода, находящейся в данный момент на оси  $+X'$ , не имеет составляющей, параллельной



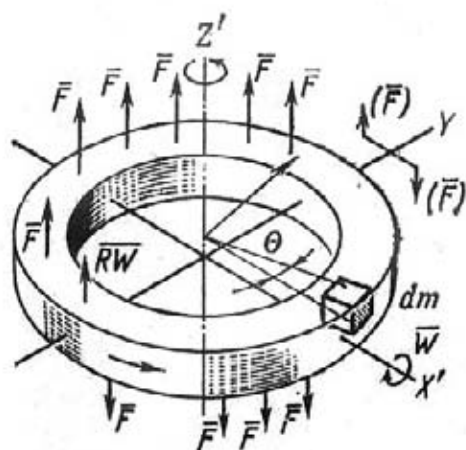


Рис. 35. Схема возникновения прецессии

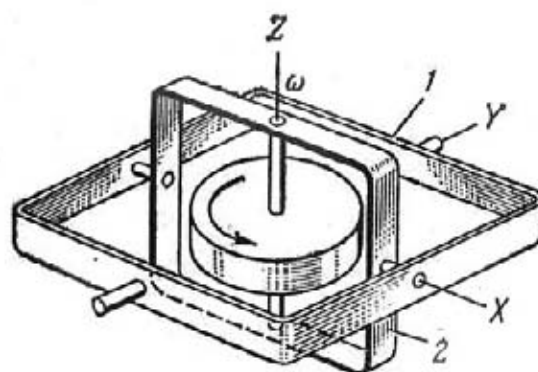


Рис. 36. Гирискон в кардановом подвесе  
1, 2 — наружная и внутренняя рамки

оси  $Z'$ . Через четверть оборота данная частица пересечет ось  $+Y'$ . В этот момент составляющая ее скорости, параллельной оси  $Z'$  и обусловленная прецессией, будет равна  $-RW$ . Когда та же частица будет пересекать ось  $-X'$ , составляющая ее линейной скорости, обусловленная прецессией, обратится в нуль. Затем, когда частица достигнет оси  $-Y'$ , эта составляющая возрастет в противоположном направлении до  $+RW$ . За следующую четверть оборота она будет уменьшаться и в момент завершения цикла, т. е. когда частица достигает оси  $+X'$ , снова станет равной нулю. Для создания ускорений, которые вызовут эти изменения скорости, на обод маховика должны действовать силы, параллельные оси  $Z'$ .

Таким образом, во время прецессии относительно оси  $X'$ , совершающейся по часовой стрелке, если смотреть со стороны оси  $+X'$ , количество движения каждой материальной частицы обода при изменении ее полярного угла  $\theta$  от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  (при движении частицы в направлении  $+\theta$  через 0) изменяется в направлении, которое совпадает с отрицательным направлением оси  $Z'$ . При изменении угла  $\theta$  от  $+90^\circ$  до  $-90^\circ$  (в направлении  $+\theta$  через  $180^\circ$ ) количество движения изменяется в направлении, совпадающем с положительным направлением оси  $Z'$ . Для таких изменений количества движения необходимы силы, эквивалентные моменту, действующему относительно оси  $Z'$ . Так как положительный момент приводит к прецессионному движению, его называют прецессионным, или гироскопическим, моментом. Величину этого момента можно определить следующим образом.



Каждой материальной частице массы маховика  $dm_1$  с полярным углом  $\theta$  соответствует другая частица равной массы  $dm_2$  с полярным углом  $\theta + 90^\circ$ . Момент  $dL_{12}$ , необходимый для создания движения этой пары частиц ( $dm_1$  и  $dm_2$ ) с требуемым ускорением, т. е. для преодоления инерции этих частиц, определяется по формуле

$$dL_{12} = 2R^2 \omega W (dm_1 \cos^2 \theta + dm_2 \sin^2 \theta) = 2R^2 \omega W dm. \quad (4.1)$$

Так как вся масса маховика  $M$  складывается из массы спаренных частиц, то полный прецессионный момент

$$L = R^2 \omega W M. \quad (4.2)$$

Это уравнение основного закона прецессии.

Рассмотрим гироскоп в карданном подвесе (рис. 36). Воспользуемся основным законом прецессии, чтобы выяснить, как будет прецессировать такой гироскоп при действии на него внешнего момента. На рис. 36 ось  $Z$  совпадает с осью собственного вращения маховика (ротора гироскопа), ось  $X$  — с осью вращения внутренней рамки подвеса и ось  $Y$  — с осью вращения наружной рамки подвеса.

Внешний момент, действующий относительно оси вращения какой-либо из рамок карданова подвеса (наружной или внутренней), не может изменить скорость собственного вращения гироскопа, а следовательно, и величину  $H$ , или кинетический момент маховика, равный  $MR^2 \omega$ . Однако такой момент вызывает прецессию гироскопа относительно оси вращения другой рамки карданова подвеса. Скорость прецессии  $W$  по величине равна внешнему моменту  $L$ , деленному на кинетический момент  $H$ , т. е.

$$W = L/H. \quad (4.3)$$

Заметим, однако, что эта формула справедлива лишь в том случае, если векторы  $\vec{H}$ ,  $\vec{L}$  и ось прецессии взаимно перпендикулярны.

Посмотрим, что произойдет с гироскопом в кардановом подвесе с внутренней рамкой, отклоненной на угол  $\Phi$  от своего нормального положения, при котором она перпендикулярна к наружной рамке, если к узлу внутренней рамки с ротором приложить со стороны наружной рамки момент  $L$ , направленный по оси  $X$ . При этом на наружную рамку будет действовать реактивный момент, равный по величине, но противоположный по направлению момен-



ту  $L$ . Он нагрузит ее подшипники радиальными силами, лежащими в плоскости  $Y-Z$ .

В данном случае целесообразно представить вектор кинетического момента  $\vec{H}$  в виде суммы двух векторов, равных его составляющим по осям  $Y$  и  $Z$ . Составляющая  $\vec{H}$  по оси  $Y$  равна  $-H \sin \Phi$ , а по оси  $Z$   $H \cos \Phi$ . В результате действия момента  $-H \sin \Phi$  подшипники наружной рамки будут нагружаться радиальными силами, лежащими в плоскости  $X-Y$ . В результате действия момента на составляющую  $H \cos \Phi$  гироскоп согласно основному закону прецессии будет прецессировать вокруг оси  $Y$  со скоростью

$$W_y = L/H \cos \Phi. \quad (4.4)$$

Подобным же образом момент, приложенный к наружной рамке по оси  $Y$ , действуя на составляющую  $H \cos \Phi$ , вызывает прецессию гироскопа относительно оси  $X$  со скоростью

$$W_x = -L/H \cos \Phi. \quad (4.5)$$

В этом случае вектор момента  $\vec{L}$  параллелен составляющей  $H \sin \Phi$  кинетического момента и поэтому не может изменить ее направление. Если реактивный момент обозначить через  $L_r$ , то для предотвращения поворота наружной рамки величина  $L_r \cos \Phi$  должна быть равной  $L$ . Вертикальная составляющая  $L_r \sin \Phi$  будет восприниматься подшипниками наружной рамки.

Рассмотрим явления, возникающие при изменении скорости собственного вращения гироскопа. Примем такие обозначения:  $L_m$  — момент, порождаемый гиromотором при разгоне ротора;  $L_y$  — составляющая  $L_m$  по оси  $Y$  наружной рамки карданова подвеса;  $L_z$  — составляющая  $L_m$  по оси  $Z$ , воспринимаемая подшипниками наружной рамки карданова подвеса. Используем выражение

$$L = L_y = L_m \sin \Phi. \quad (4.6)$$

Подставив уравнение (4.6) в уравнение (4.5), получим

$$W_x = -\frac{L_m \sin \Phi}{H \cos \Phi} = -\frac{L_m \operatorname{tg} \Phi}{H}. \quad (4.7)$$

Уравнение (4.7) показывает, что скорость прецессии, создаваемая моментом гиromотора при разгоне ротора, прямо пропорциональна тангенсу угла отклонения внутренней рамки от ее нормального положения.



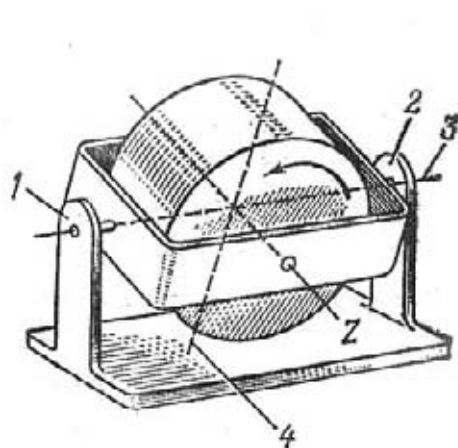


Рис. 37. Гироскоп для стабилизации платформ

1 — место установки датчика момента, 2 — место установки датчика угла, 3 — выходная ось, 4 — входная ось

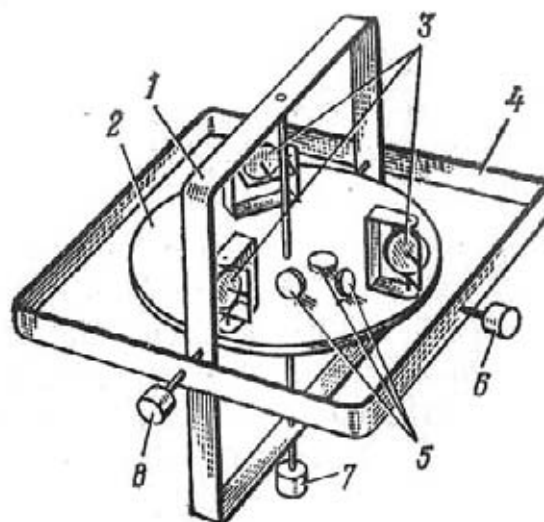


Рис. 38. Схема платформы, стабилизированной относительно Земли

1 — внутренняя рамка, 2 — платформа, 3 — двухступенчатые гироскопы, 4 — наружная рамка, 5 — акселерометры, 6 — сервомотор креновой рамки, 7 — сервомотор азимутальной оси, 8 — сервомотор тангажной рамки

Одним из «загадочных» свойств гироскопа является его способность удерживать направление своей оси в пространстве, а благодаря этому стабилизировать машину или платформу, на которой он установлен. Поясним это явление. Рассмотрим двухстепенный гироскоп, используемый в стабилизированных платформах (рис. 37).

Двухстепенный гироскоп может поворачиваться вокруг выходной оси; относительно входной оси он удерживается в заданном положении системой автоматической коррекции. Двухстепенный гироскоп вместе с платформой обеспечивает стабилизацию относительно одной оси. Применяв два или три двухстепенных гироскопа, можно осуществить стабилизацию платформы относительно двух или трех взаимно перпендикулярных осей.

Рассмотрим, как стабилизируется платформа (рис. 38). Стабилизация относительно осей внутренней и наружной рамок осуществляется гироскопами, у которых ось вращения рамки (ось прецессии) перпендикулярна к плоскости платформы (на рис. 38 это левый и правый гироскопы на переднем плане), и сервомоторами внутренней и наружной рамок. Платформа показана в положении, когда ось собственного вращения левого гироскопа параллельна оси внутренней рамки, а правого — оси наружной рамки.



Предположим, что по оси наружной рамки действует возмущающий момент. Согласно закону прецессии он не может повернуть платформу, а вызовет прецессию левого гироскопа относительно платформы; правый гироскоп не прореагирует на этот момент. Прецессируя, гироскоп будет отклоняться от своего нормального положения, вследствие чего его датчик угла начнет выдавать сигнал. Этот сигнал через преобразователь координат (о нем будет сказано ниже) и усилитель подается на сервомотор наружной рамки, который начинает прикладывать к ней момент, противоположный возмущающему моменту и все возрастающий по мере возрастания угла прецессии. Когда момент сервомотора уравнивает возмущающий момент, прецессия прекратится, причем практически мгновенно, безынерционно (эта безынерционность возникновения и прекращения прецессии, следующая из свойств гироскопа, тоже нередко считается загадочной). В таком состоянии система будет оставаться до тех пор, пока действует возмущающий момент. Важно, чтобы указанное равновесие наступило при достаточно малом отклонении гироскопа от его нормального положения.

С исчезновением внешнего момента, под действием момента сервомотора гироскоп вернется в нормальное положение, при котором сигнал датчика угла, а следовательно и момент сервомотора, обратится в нуль. Таким образом, платформа стабилизируется путем компенсации возмущающего момента моментом сервомотора. В течение времени, когда момент сервомотора меньше возмущающего момента, избыток последнего компенсируется гироскопическим моментом, развиваемым прецессирующим гироскопом.

Если возмущающий момент будет действовать по оси внутренней рамки, то он вызовет прецессию правого гироскопа, который в этом случае аналогично предыдущему приведет в действие сервомотор внутренней рамки. Значит, при положении платформы, показанном на рис. 38, левый гироскоп должен управлять сервомотором наружной рамки, а правый — сервомотором внутренней рамки.

Повернем корпус платформы в азимуте на некоторый угол, не кратный  $90^\circ$ . Теперь оси собственного вращения указанных гироскопов уже не будут параллельны осям внутренней и наружных рамок. Поэтому возмущающий момент, действующий по любой из этих осей, вызовет прецессию сразу обоих гироскопов. И следовательно, если сохранить прежнюю схему управления, то будут включе-



ны оба сервомотора, в то время как должен работать только тот, по оси которого действует возмущающий момент.

В этом случае требуется определить, по какой оси действует возмущающий момент, на какой сервомотор подать управляющий сигнал и каким он должен быть по величине и знаку. Если же возмущающие моменты действуют одновременно по обеим осям, то необходимо установить, каким должен быть управляющий сигнал для каждого сервомотора. Автоматическое решение этого вопроса обеспечивается так называемым преобразователем координат, который представляет собой поворотный трансформатор, используемый в качестве фазовращателя.

Прецессию левого и правого гироскопа вызывают только моменты, направленные по их взаимно перпендикулярным осям (см. рис. 37 и 38), связанным с платформой. Поэтому прецессия гироскопов, а следовательно и сигналы их датчиков угла, характеризуют моменты, действующие на платформу по этим двум связанным с ней осям. Преобразователь координат воспринимает азимутное положение платформы относительно корпуса прибора. Он обеспечивает преобразование указанных моментов к осям внутренней и наружной рамок для любого азимутального положения платформы относительно корпуса прибора. Это достигается путем соответствующего изменения сигналов датчиков угла гироскопов.

Преобразователь координат расположен на внутренней рамке справа от сервомотора (на рис. 38 не показан). Его статор жестко связан с внутренней рамкой, а ротор получает вращение от платформы 2 через пару шестерен при ее поворотах относительно внутренней рамки.

Стабилизация платформы относительно азимутной оси осуществляется третьим гироскопом и сервомотором платформы, установленным на внутренней рамке (внизу). Входная ось данного гироскопа всегда параллельна азимутальной оси платформы, поэтому он реагирует только на моменты, действующие на платформу относительно ее азимутальной оси.

Такой способ стабилизации называется силовой гироскопической стабилизацией. Стабилизирующий момент, создаваемый гироскопом, представляет собой гироскопический момент, возникающий при прецессии гироскопа и направленный перпендикулярно к осям прецессии и собственного вращения. Он равен по величине и противополо-



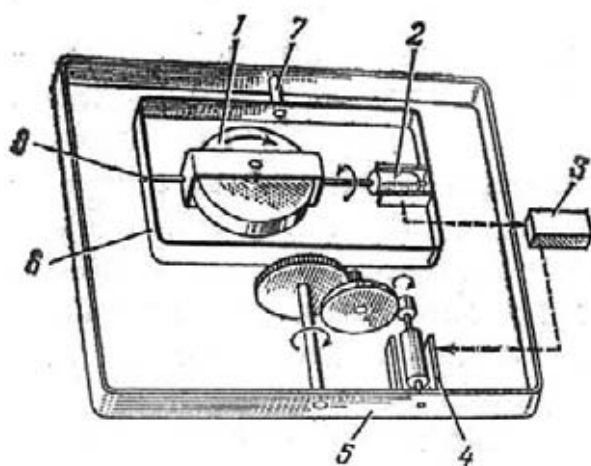
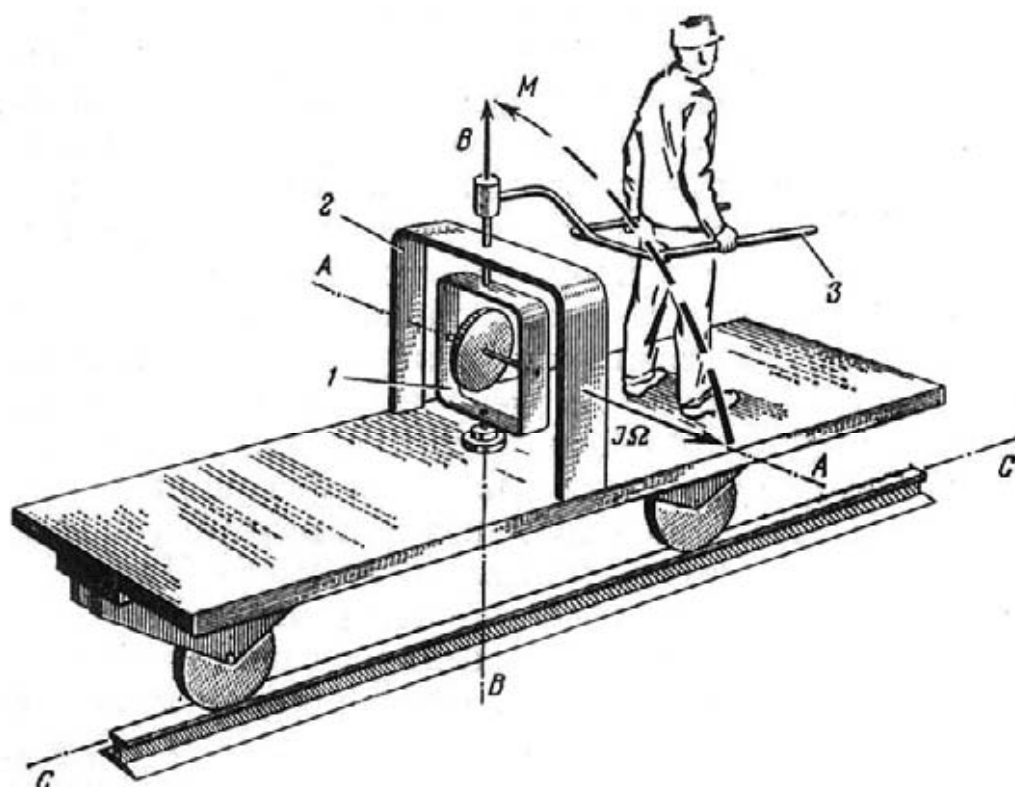


Рис. 39. Одноосная стабилизированная платформа

- 1 — гироскоп,
- 2 — датчик угла,
- 3 — сервоусилитель,
- 4 — сервомотор,
- 5 — корпус,
- 6 — платформа,
- 7 — ось платформы,
- 8 — выходная ось гироскопа

Рис. 40. Стабилизатор одноплатформенного рельсового вагона



жен по направлению внешнему моменту, действующему на платформу и вызывающему прецессию гироскопа. Гироскопический момент, а следовательно и стабилизирующее действие на платформу непосредственно самого гироскопа, существует только до тех пор, пока существует прецессия. Когда момент сервомотора становится равным по величине возмущающему моменту, прецессия прекращается и стабилизация платформы осуществляется только сервомотором.

На рис. 39 показана одноосная стабилизированная платформа.



Стабилизирующие свойства инерционных аккумуляторов используются в так называемых однорельсовых экипажах, равновесие которых поддерживается помещенным в них стабилизирующим гироскопическим устройством. Это свойство гироскопов было использовано для стабилизации двухколесного экипажа русским инженером П. П. Шиловским, а еще ранее — англичанином Бренаном.

В однорельсовых вагонах используется два варианта размещения гироскопического стабилизатора: в первом главная ось гироскопа расположена вертикально, во втором она размещается горизонтально и перпендикулярно к продольной оси вагона. По второму варианту был изготовлен гироскопический стабилизатор однорельсового вагона Бренана. Массивный ротор монтировался на подшипниках в раме 1 (рис. 40), благодаря чему обеспечивалась свобода его вращения вокруг оси  $AA$ , параллельной днищу вагона. Рама 1 устанавливалась на подшипниках в станине 2, жестко закрепленной в корпусе вагона так, чтобы плоскость гироскопа, составляемая его осями  $AA$  и  $BB$ , была перпендикулярна продольной оси  $CC$  вагона.

Сообщая ротору гироскопа максимально возможную угловую скорость  $\Omega$  вращения вокруг оси  $AA$ , получили систему, движение которой подчинялось основному закону прецессии. Для воздействия на гироскоп внешним моментом рама была снабжена рукояткой 3. При наклоне вагона на правый борт по ходу движения водитель нажимал на рукоятку 3, стремясь повернуть ее влево. Тем самым создавался действующий на гироскоп относительно оси  $BB$  момент  $M$ , направленный против часовой стрелки, если смотреть на платформу сверху. Под влиянием момента  $M$  гироскоп, обладающий кинетическим моментом  $I\Omega$ , получал прецессионное движение вокруг продольной оси  $CC$  вагона. В результате ось  $AA$  гироскопа кратчайшим путем шла на совмещение с вектором момента  $M$ . Так как станина 2 жестко связана с корпусом вагона, последний участвовал в прецессии гироскопа. В результате этого движения наклон вагона начинал уменьшаться, и когда платформа принимала горизонтальное положение, водитель прекращал нажимать на рукоятку 3.

Описанная схема гироскопического стабилизатора была осуществлена в однорельсовом вагоне, построенном для англо-японской выставки 1912 г. в Лондоне. Вагон вмещал одновременно до 40 человек и перевозил по территории выставки посетителей.



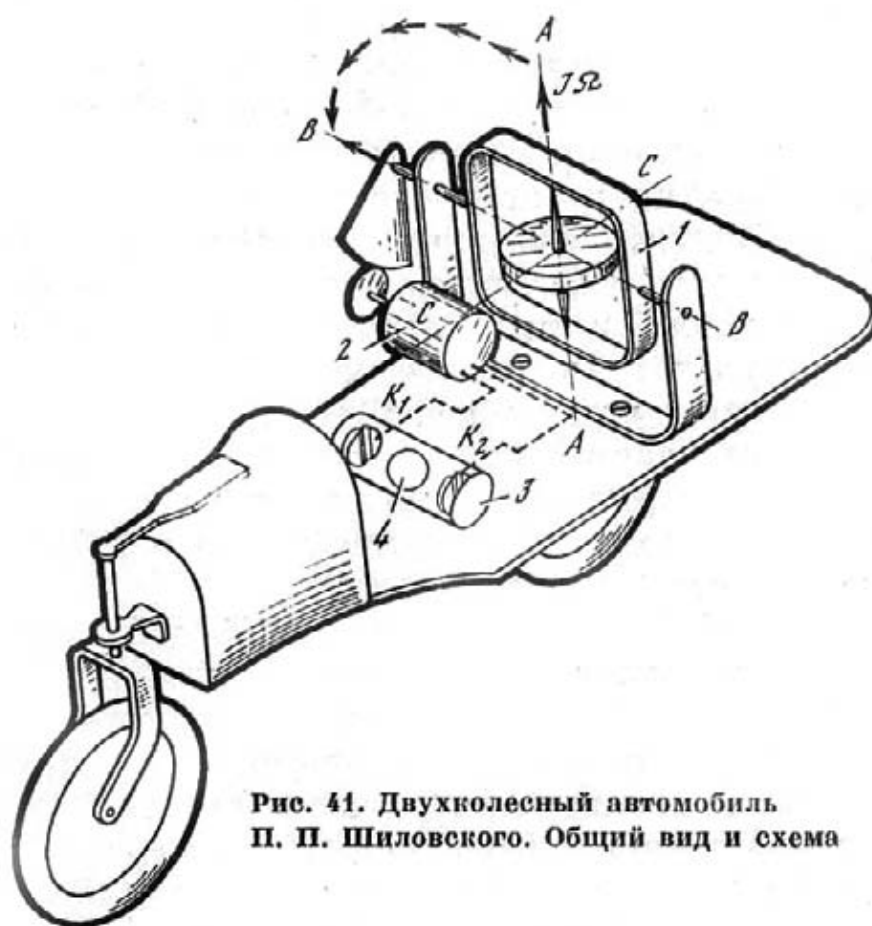


Рис. 41. Двухколесный автомобиль  
П. П. Шиловского. Общий вид и схема

Двухколесный автомобиль П. П. Шиловского появился в 1914 г. на улицах Лондона. Экипаж (рис. 41) был снабжен гироскопом, обеспечивающим ему устойчивость не только во время движения, но и при остановке. Гироскоп состоял из массивного ротора, вращающегося со скоростью  $\Omega$  вокруг оси  $AA$  в раме 1, обладающей возможностью поворота вокруг оси  $BB$  в кронштейнах, жестко



закрепленных на днище кузова автомобиля. Рама 1 через зубчатую передачу была связана с валом электродвигателя 2, управляемого переключателя 3, продольная ось которого размещалась параллельно оси  $BB$ .

При посадке пассажиров или при их перемещениях внутри автомобиля во время его движения корпус машины стремился повернуться вокруг продольной оси  $CC$ . При этом металлический шарик 4, перекачиваясь в сторону наклона внутри переключателя 3, замыкал одну из двух пар управляющих контактов:  $K_1$  или  $K_2$ . Тем самым включался двигатель 2, создающий воздействующий на гироскоп момент  $M$ . Если наклон автомобиля происходил на левый борт, шарик замыкал контакты  $K_2$  и электродвигатель 2 создавал относительно оси  $BB$  момент  $M$ , вектор которого был направлен в сторону правого борта. При противоположном наклоне включались контакты  $K_1$  и двигатель 2 создавал момент  $M$ , направленный в сторону левого борта автомобиля.

Под действием момента  $M$  гироскоп, а вместе с ним и кузов автомобиля, получает прецессионное движение вокруг продольной оси  $CC$  машины, при котором вектор кинетического момента  $I\Omega$  гироскопа стремится прийти к совмещению с вектором момента  $M$  по кратчайшему расстоянию. В результате кузов автомобиля начнет выравниваться, уменьшая наклон к горизонту. Когда экипаж возвратится в горизонтальное положение, шар переключателя 3 разомкнет управляющие контакты, и тогда действие на гироскоп момента  $M$ , а тем самым и поворот автомобиля вокруг оси  $CC$ , прекратятся.

В горизонтальном положении автомобиль будет находиться до тех пор, пока новое возмущение не вызовет нового наклона машины. Описанная работа гироскопического стабилизатора повторится вновь, и горизонтальное положение экипажа опять будет восстановлено.

На Международной автомобильной выставке 1961 г. демонстрировалась модель нового двухколесного автомобиля «Гирон», а в 1967 г. прошли испытания его первых образцов.

Как и в автомобиле Шиловского, горизонтальное положение автомобиля «Гирон» стабилизировалось гироскопом, размещенным под капотом машины. Ротор гироскопа диаметром 60 см вращался вокруг вертикальной оси с частотой 6 тыс. об/мин. Автомобиль с двигателем мощностью 80 л. с. благодаря совершенной аэродинамической



форме развивал скорость до 140 км/ч. Автомобиль оборудован (расположенными в задней части кузова) двумя малыми вспомогательными колесами, автоматически выдвигающимися из машины при снижении ее скорости ниже 5 км/ч. Они поддерживают автомобиль на стоянке, когда ротор гироскопа не имеет вращения. Такой автомобиль используется в труднодоступных горных районах: он легко проходит по тропам, расположенным на косогорах с уклоном до 60°.

Итак, если мы попытаемся повернуть ось вращающегося маховика в плоскости, перпендикулярной плоскости его вращения, то ось будет поворачиваться не в том направлении, в котором ее пытаются сдвинуть. В этом, грубо говоря, и заключается гироскопический эффект.

Существует ряд правил определения направления гироскопического момента. Например, правило Жуковского состоит в том, что вектор момента внешних сил проектируется на плоскость маховика и поворачивается на 90° в сторону его вращения. Получается вектор гироскопического момента. Коротко, ясно, но требуется еще знать, что такое вектор момента и как его проектировать. А эти знания цепочкой требуют еще и других, и таким образом для определения гироскопического момента требуется некий «образовательный ценз».

Есть и другой метод определения гироскопического момента: пускаем монету по столу — она катится сперва прямо, а потом обязательно свернет в сторону и на эту же сторону упадет. Это значит, что на монету начинает действовать момент внешних сил (ее собственных сил тяжести), который пытается положить ее на бок. А на это катящаяся монета отвечает поворотом в ту же сторону. Итак, если представить маховик в виде катящегося колеса (монеты) и попытаться внешним моментом положить его на бок, то гироскопический момент будет сворачивать его с курса в сторону предполагаемого падения (велосипедисты «нутром» чувствуют это направление и, падая, сворачивают в ту же, а не в обратную сторону).

По величине гироскопический момент равен

$$M_{\Gamma} = I\omega_1 W \sin \alpha, \quad (4.8)$$

где  $I$  — момент инерции маховика,  $\alpha$  — угол между плоскостями собственного вращения  $\omega$  и прецессии  $W$  маховика.

Если не дать маховику прецессировать, то гироскопический момент не возникнет. Это свойство гироскопа мож-



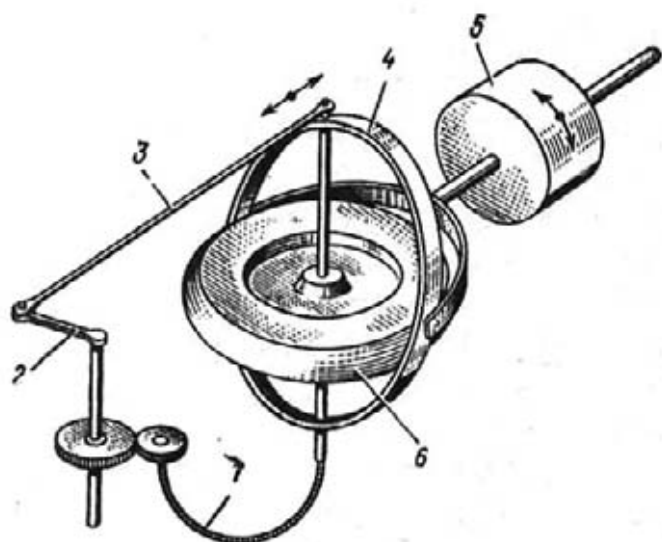


Рис. 42. Гироскопический прогрессивный вариатор

но обыграть — показать «фокус». Если на большом гироскопе в кардановом подвесе (аналогичном изображенному на рис. 36) с вертикальной осью и внешней рамкой, поворачивающейся вокруг этой оси в подшипниках на подставке, раскрутить маховик, то повернуть внешнюю рамку вокруг оси, разумеется, будет очень трудно. Внутренняя рамка из-за прецессии

маховика начинает медленно поворачиваться, и возникающий гироскопический момент мешает движению. Но если скрепить (незаметно для зрителя) внешнюю и внутреннюю рамки специальным штифтом на оси подвижной рамки, маховик теряет возможность прецессировать — и тогда внешнюю рамку можно закрутить буквально одним пальцем, и она еще долго после этого сама вращается «по инерции» (штифт, при этом сильно нагружен, и если сломается, то рамка замрет на месте, как вкопанная). Чем сильнее пытаться крутить рамку, тем быстрее маховик прецессирует. Эта «мягкая» зависимость между моментом и скоростью легла в основу так называемого гироскопического прогрессивного вариатора (рис. 42). Двигатель приводит маховик 6 посредством гибкого вала 1 во вращение и одновременно с помощью рычажного механизма 2, 3, 4 ось маховика приводится в колебательное движение. Гироскопический момент вызывает колебания оси маховика с той же частотой, но в плоскости, перпендикулярной вынужденным колебаниям. Крутильные колебания от гироскопического момента улавливаются двумя обгонными муфтами 5, выпрямляются ими и подаются на ведомый вал в виде «мягких» импульсов.

Другой демонстрационный гироскопический прибор привел к мысли о выведении мощности маховика из вакуума через движение корпуса. Гироскопический эффект позволяет вывести из герметичного (предпочтительно сферического) корпуса 1 огромный крутящий момент, причем



с вращением в любой плоскости (рис. 43). Объем корпуса используется почти полностью, а сам корпус не вращается, только ось его совершает коническое движение, улавливаемое двумя кривошипами 2. Маховик 3 вращает вал 4, концы которого, оснащенные шестернями или фрикционами, обкатываются вокруг колес 5, закрепленных на корпусе. Обкатываясь, вал постоянно меняет плоскость вращения маховика, вызывая его вынужденную прецессию. При этом вал с огромной силой давит на колеса, вызывая поворот оси корпуса в кривошипах. С вала кривошипов снимается уже выведенный из герметичного корпуса крутящий момент маховика.

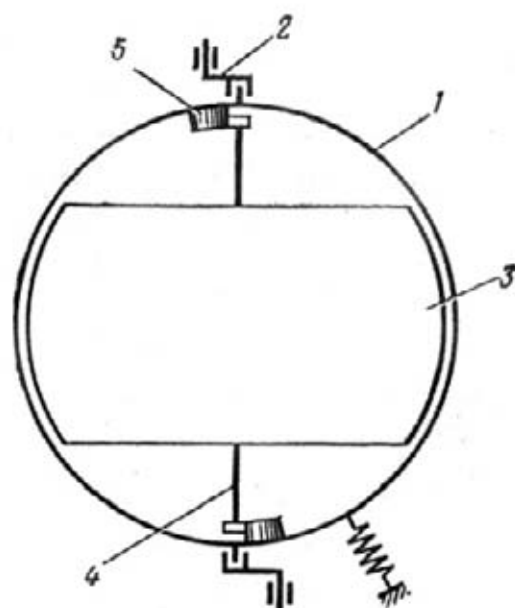


Рис. 43. Гироскопическое устройство для вывода вращения маховика из герметического корпуса

Существуют гироскопические тахометры, или измерители скорости вращения. Если в описанном выше опыте —

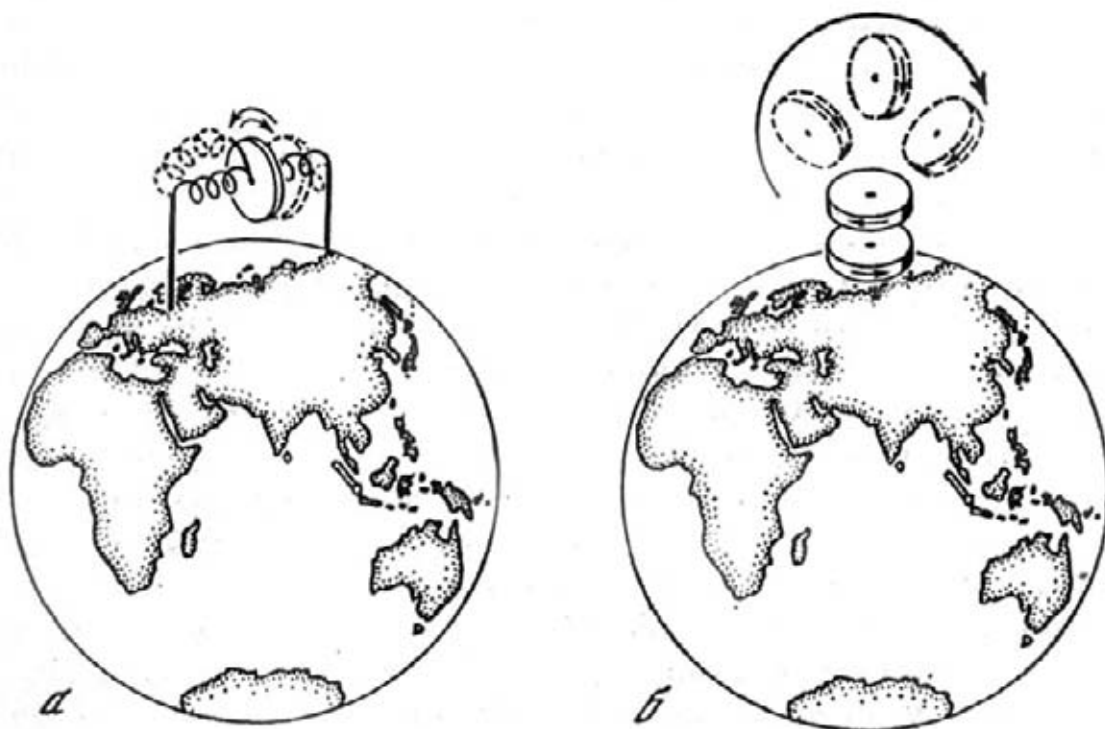


Рис. 44. «Проекты» использования энергии вращения Земли  
а — с маховиком на пружине кручения, б — с переворачиванием маховика



«фокусе» — штифт замечить пружиной, связывающей внешнюю подвижную и внутреннюю рамки, то деформация пружины будет тем больше, чем выше скорость вращения внешней рамки, — осталось прикрепить стрелки, шкалы, оттарировать прибор и пользоваться им.

Обычно, когда говорят о гироскопах, вспоминают гироскомпас. И если спросить, как он устроен, большинство ответит, что ось гироскопа сохраняет свое направление в пространстве и указывает всегда одно и то же первоначальное направление.

Ось гироскопа, действительно, сохраняет свое положение в пространстве, но это достигается лишь тогда, когда на маховик гироскопа, его ось и другие чувствительные элементы не оказывается никаких возмущающих силовых воздействий. Создание такого гироскопа, а на его базе многочисленных гироскопических приборов — гироскомпасов, гиригоризонтов, указателей отклонений, гириориентиров, автопилотов и др. — дело трудное и интересное. Создание таких систем знаменовало собой целую эпоху в истории приборостроения, сделало возможной инерциальную навигацию. Без них немислимы полеты самолетов и космических систем, плавание современных кораблей и т. п.

Гироскопические явления кажутся загадочными, если их рассматривать в отрыве от механики, от основных законов сохранения. Изобретатели вечного двигателя часто связывают свои надежды с гироскопом: сажают на ось на подшипниках маховик, конец оси подвешивают на нити и, раскрутив маховик, например, по часовой стрелке, отпускают другой конец оси. Под действием силы тяжести ось маховика стремится повернуться вниз, но начинается прецессия, которая поворачивает ее поперек предполагаемого движения в направлении, указанном стрелкой. Ось с маховиком вращается довольно долго, закручивая нить. Под конец ось, конечно, наклоняется книзу, а затем и повисает. Но это, обычно, не обескураживает изобретателей: они считают, что если устранить потери в подшипниках маховика его подкруткой электродвигателем, то ось с маховиком будет вращаться вечно. На самом деле она будет вращаться лишь до тех пор, пока потенциальная энергия поднятой до горизонтального состояния оси не будет израсходована на скручивание нити.

Недоразумения вызывал когда-то проект использования энергии вращения Земли. Эту энергию предполагалось отбирать с помощью большого маховика — гироскопа.



Представим себе на полюсе Земли огромный маховик, вращающийся в плоскости, перпендикулярной вращению Земли. Если бы маховик просто пассивно сопротивлялся любому изменению положения оси в пространстве, то плоскость его вращения оставалась бы неподвижной, а вокруг него вращалась бы Земля. Это относительное вращение могло быть уловлено генераторами, и мы получили бы даровую электроэнергию.

Этот проект, конечно, легко разоблачить. Мы уже знаем, что вращающийся маховик не просто пассивно сопротивляется повороту его оси, но прецессирует. А эта прецессия очень скоро совместит ось вращения маховика с осью вращения Земли, и тогда отбор энергии закончится.

Вот другой проект, который не так просто разоблачить. Маховик сидит в рамке на пружине кручения и, колеблясь, крутится то в одном, что в другом направлении (рис. 44). Для простоты потерями в пружине и аэродинамическими потерями пренебрежем. Итак, при вращении маховика в одном направлении он будет прецессировать в одну сторону, при перемене вращения — в другую. Эта прецессия будет происходить под действием вращения Земли. Стало быть, энергию можно «снимать» от относительного вращения постоянно, так как ось вращения маховика никогда не совместится с осью вращения Земли? Этого, естественно, сделать нельзя, так как при деформации пружины ось вращения маховика изменится и появится момент, компенсирующий момент торможения Земли.

Или совсем уже простой опыт. Представим себе, что на полюсе Земли находится огромный маховик, вращающийся с той же угловой скоростью, что и сама Земля, т. е. неподвижный относительно нее. А затем перевернем маховик на  $180^\circ$  каким-нибудь мощным механизмом за ось в подшипниках и приблизим его снова к Земле. При этом маховик будет вращаться уже в другую сторону и относительная скорость его вращения будет два оборота в сутки. И эту скорость можно легко «снять» с маховика, затратив ее на работу. Маховик снова остановится, его скорость сравняется со скоростью Земли, потом мы его снова повернем, и так далее. Значит, можно постепенно остановить Землю, используя ее кинетическую энергию? Неужели инерция вращения Земли «уничтожится» без всякого воздействия извне, своими, внутренними средствами?

Естественно, нет. Объяснение этого парадокса заключается в том, что переворачивая маховик, мы вызываем



гироскопический момент, разгоняющий Землю ровно настолько, насколько она затормозится при соприкосновении с маховиком. Так что скорость вращения Земли при переворачивании маховика никак не изменится, хотя энергия на его переворачивание будет затрачена, но полностью перейдет в тепло при соприкосновении маховика с Землей.

Еще об одной «невероятной» истории, связанной с гироскопом и, следовательно, с инерцией, сообщил несколько лет назад журнал «Знание — сила» (со ссылкой на чешский источник). Английский физик Э. Лейтуейт в Лондонском технологическом институте демонстрировал прибор (состоящий из электромотора, двух тяжелых латунных роторов и спиральной рамы), установленный на весах. Когда был включен мотор, роторы-гироскопы начали вращаться и вес прибора уменьшился<sup>1</sup>.

Похожий опыт был обнаружен и советским ученым<sup>2</sup>.

Тщательная проверка этого парадокса показала, что объясняется он вполне «земными» причинами. Прежде всего, вибрация, которой неизбежно сопровождается работа гироскопов, оказывает воздействие на чувствительные элементы — призмы весов. При этом сопротивление в призмах то уменьшается, то растет — в зависимости от фазы поворота маховика гироскопа. Вращение маховика в этом случае то пригружает чашу весов, на которой находится гироскоп, то разгружает ее, когда вращение меняет свое направление. Немаловажную роль здесь играет и эффект Барнета, заключающийся в том, что у вращающегося маховика гироскопа появляется магнитный момент — он как бы намагничивается в осевом направлении. Взаимодействуя с земным магнетизмом, магнитный момент либо прижимает маховик к Земле, либо отталкивает в зависимости от направления его вращения.

### Инерционные «химеры»

Теперь мы вплотную подошли, пожалуй, к самому пространенному заблуждению, связанному с инерцией, — к инерцоидам, которые с полным основанием можно называть инерционными химерами. По определению создателей этих приборов, «инерцоид — механизм, осуществляющий...

<sup>1</sup> См.: Опять антигравитационный двигатель. — Знание — сила, 1977, № 1.

<sup>2</sup> См.: Валентинов А. А. Вечный маятник Вселенной. — Социалистическая индустрия, 1977, 20 ноября.



самостоятельное перемещение, независимое от окружающей среды, преодолевая ее сопротивление». И далее: «Совершенно очевидно, что тут не может быть и речи о так называемом „безопорном движении“, хотя инерцоид и не отталкивается ни от чего около себя. Превосходящее количество инертности одной половины системы масс инерцоида — то грузов, то корпуса — вполне надежная динамическая точка опоры для другой половины масс»<sup>3</sup>. Инерцоид движется потому, что «совершается работа сил инерции грузов, которая заключается в ускорении корпуса»<sup>4</sup>. В конце делается вывод: «Инерцоид не отбрасывает от себя „рабочее тело“. Ему не нужно запастись топливом. Он может использовать энергию космического пространства, которой для его привода вполне достаточно в любой точке космоса»<sup>5</sup>.

Надо сказать, что увлечение инерцоидами — отнюдь не безобидно. Конструкторы инерцоидов строят модели, создают проекты, даже закладывают их в планы заводов (и требуют финансирования). В Библиотеке им. Ленина заведен новый раздел библиографии: «Инерцоиды. Их теория», хотя инерцоиды ничем не лучше вечных двигателей. Чтобы разоблачить порочную идею вечных двигателей, потребовалось четкое разъяснение закона сохранения энергии, в случае с инерцоидами надо внести ясность в понятия сил инерции — не существующих, фиктивных, не могущих производить работу. На принципе инерционного, или, как еще говорят, виброперемещения, основаны реальные машины — виброходы. Отличие их от инерцоидов — не так конструктивное, как скорее философское: их авторы не придают своим машинам чудодейственных свойств «безопорного» движения, не считают, что они могут двигаться независимо от окружающей среды (преодолевая в то же время ее сопротивление!). Конструкторы инерцоидов, со своей стороны, считают, что их машины не имеют ничего общего с виброходами<sup>6</sup>.

<sup>3</sup> Толчин В. Н. Инерцоид. Пермь: Кн. изд-во, 1977, с. 7.

<sup>4</sup> Там же, с. 12.

<sup>5</sup> Там же, с. 90.

<sup>6</sup> Например, в книге В. Н. Толчина сказано: «Несмотря на внешнее сходство, вибратор (т. е. виброход.— Н. Г.) и инерцоид — устройства, принципиально отличные друг от друга. Вибратор работает на принципе отталкивания рабочих тел — грузов и корпуса механизма — друг от друга, а инерцоид — на принципе их притяжения друг к другу» (с. 8).



Машины инерционного перемещения — виброходы, из которых потом «вышли» инерцоиды, наделяемые их создателями необычными свойствами, имеют свою историю.

В 1927 г. изобретатель Г. Шиферштейн получил патент на принципиально новое средство передвижения по земле. Его машина опиралась о грунт четырьмя опорами, упруго закрепленными на кузове. Двигатель машины вращал грузы, эксцентрично укрепленные на осях, образуя вибратор. Машина при включении двигателя начинала прыгать и, прыгая, перемещалась.

В 1939 г. в Институте механики АН СССР демонстрировался виброход, созданный сотрудником института. Принцип действия этого виброхода характерен для работы многих виброходов, которые потом стали выдавать за инерцоиды. Машина двигалась благодаря тому, что в ней был механизм, толкающий груз (гирю) возвратно-поступательно. В одну сторону толчки были резкие, в другую — плавные, замедленные. Машина передвигалась рывками в сторону резких толчков.

Изготавливают виброход в 1959 г. в Сибирском металлургическом институте (г. Новокузнецк), создают импульсно-фрикционный движитель инженеры НАМИ. Этот движитель представляет собой шарнирно закрепленную на основании раму, качающуюся относительно оси. Ось сидит в подшипниках перпендикулярно направлению движения всей системы. Два вала, укрепленные на раме, вращаются от электродвигателя в разные стороны. На каждом валу эксцентрично посажены массы — эксцентрики. При вращении валов эксцентрики создают динамические реакции на опоры (если применить принцип Д'Аламбера, считая всю систему неподвижной, можно сказать «центробежные силы инерции»). На одном валу динамические реакции от эксцентриков то прижимают машину к земле, то отталкивают ее вверх, на втором они действуют в горизонтальном направлении: толкают машину вперед во время ослабления ее давления на грунт и назад во время прижима ее к земле. Ясно, что машина при этом будет двигаться вперед — назад она сдвинуться не может, потому что во время толчка назад она прижата к земле и ее прочно удерживает сила трения. В этот период центр масс машины перемещается вперед. Так что машина (вернее, ее центр масс) перемещается вперед именно при покоящемся основании, а во время передвижения основания вперед (кажущемся движении машины) центр ее



масс остается на месте или даже несколько отодвигается назад.

Заметим, что авторы этого механизма не претендовали на создание инерцоида и даже в названии машины подчеркнули ее фрикционную природу.

Аналогичные машины существуют в американской технике<sup>7</sup>, почти на таком же принципе работают виброкатки, самоперемещающиеся трамбовки. В 1973 г. был создан так называемый католет, передвигающийся энергией двигателя через направленную вибрацию и непрерывную связь с землей.

В настоящее время существует большая разновидность машин вибрационного действия, позволяющих не только перемещать грузы и самих себя, но даже, например, выталкивать сваи из земли<sup>8</sup>.

Откуда же возникли инерцоиды? Вероятно, дело складывалось следующим образом. Люди уже давно стали замечать, что вибрирующие механизмы имеют тенденцию перемещаться в сторону более резких импульсов сил. Объяснить правильно это явление могли не все, и, как в таких случаях бывает, виброходу стали приписывать чудесные свойства, например безопорного движения. Или, что одно и то же, искать точку опоры внутри самого движущегося тела — и за такой «чудодейственной» машиной укоренилось название «инерцоид».

Далее, поскольку движение инерцоида, каким представляли себе его создатели, невозможно объяснить с позиций механики, возникли попытки «перекроить» ее на свой лад<sup>9</sup>.

По идее конструкторов инерцоидов работающий прибор создает силу тяги, не зависящую от окружающей среды, — стало быть, он должен весить больше или меньше, чем неработающий (выключенный), смотря по тому, куда направлена сила тяги — вверх или вниз. Но опыты по взвешиванию включенных и выключенных инерцоидов всегда приводят к однозначному результату: вес у них одинаковый.

<sup>7</sup> Но известен также американский патент Нормана Дина на «приспособление для превращения вращательного движения частей системы в прямолинейное движение самой системы».

<sup>8</sup> Зрелище удивительное, но объясняется просто: вибратор укрепляется на верхнем конце сваи с направлением резких ударов вверх.

<sup>9</sup> Например, в упоминавшейся книге В. Н. Толчина делается попытка обосновать движение инерцоида введением новых определений силы инерции и сил вообще. См.: Толчин В. Н. Инерцоид, с. 74, 76, 81, 83 и др.



Как движется инерцоид, хорошо иллюстрирует следующий опыт. Если стать на санки, взять в руки молот и бить им по заднему краю санок, то они толчками поедут вперед (в случае с колесной тележкой молот при ударе нужно разгонять «помягче»). Если в этом опыте человека заменить механизмом, получится инерцоид.

Действие механизмов самых различных инерцоидов, как бы сложны они ни были, сводятся к одному — созданию резкого импульса, кратковременного, но с развитием большой силы, в одну сторону, и мягкого импульса, длительного, но с развитием малой силы, — в другую. Согласно законам механики, внутренними силами машины невозможно создать импульс (приблизненно импульс — произведение силы на длительность ее действия), который в одну сторону больше, чем в другую. Сумма импульсов в обе стороны равна нулю, т. е. машина, как бы сложна она ни была, одними внутренними силами никуда не сдвинется.

Но хитрость здесь в другом. Так как импульс можно «растянуть» как угодно сильно (например, разгоняя молоток для удара целый час), силу, направленную в сторону этого импульса, можно сделать как угодно малой. И как бы ни было мало сопротивление движению тележки с инерцоидом на нем, силу эту можно сделать еще меньше. Тогда тележка из-за трения не сдвинется в сторону этого импульса. Когда же молот ударит по тележке, импульс будет очень кратковременным — доли секунды, сила же — очень велика и преодолеет силу трения, какой бы большой та ни была. Отсюда и движение тележки с инерцоидом в сторону большей силы (что и демонстрируется обычно создателями инерцоидов).

Инерцоид на воде может двигаться в направлении, противоположном сухопутному инерцоиду. Дело тут в следующем. Под действием импульсов разной резкости инерцоид будет «дергаться» по поверхности воды. В сторону большей силы рывок будет резким, но непродолжительным, в сторону меньшей — плавным, но длительным, и скорость движения будет в одну сторону большая, а в другую — малая. Как известно, сопротивление жидкости (и воздуха) с увеличением скорости прогрессивно возрастает — и, следовательно, инерцоид на воде может двигаться в сторону меньшей, а не большей, как на суше, силы.

Движение типа инерцоидов в реальных условиях известно уже очень давно. Многие виды животных передвигаются именно таким образом и по суше, и в воде.



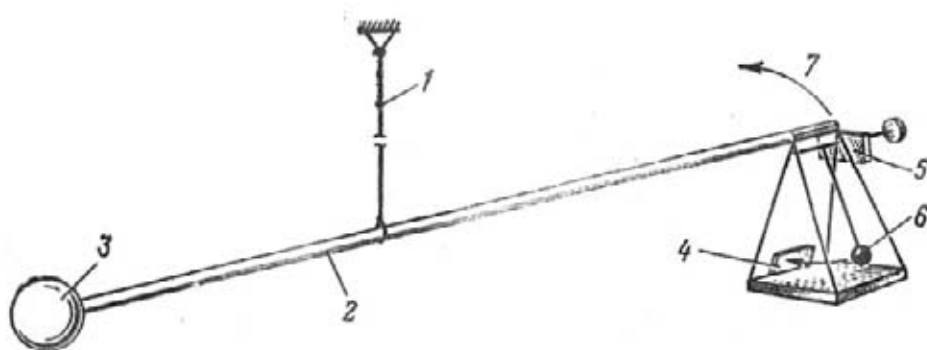


Рис. 45. Инерцоид на крутильных весах

1 — струна, 2 — рычаг, 3 — противовес, 4 — упор, 5 — заводная пружина инерцоида, 6 — маятник, 7 — направление предполагаемого движения

Каждый может сам изготовить инерцоид и прибор, доказывающий, что без трения инерцоид работать не будет. Купим детскую игрушку под названием «заводные качели». На стойке качелей устроим перемычку, чтобы маятник качелей в конце хода с достаточной силой ударял в нее, но не прекращал своих качаний (хитроумный конструктор может придумать и много других вариантов инерцоидов — лишь бы в одну сторону модели удар был резким). Заведя пружину и поставив модель на стол, увидим, как она начнет скачками передвигаться в сторону ударов<sup>10</sup>. Можно поставить инерцоид и на колесики, хотя тогда будет риск небольшой отдачи назад. Но по столу такой инерцоид, как и любой другой, двигаться будет: даже звенящий будильник перемещается по гладкому столу.

Теперь изготовим прибор для испытаний инерцоида — крутильные весы (рис. 45). На тонкой струне (нити, леске) подвесим за середину рейку длиной метра два. На одном краю рейки укрепим модель инерцоида, на другом — противовес (любой груз), чтобы рейка висела горизонтально. Инерцоид должен быть расположен так, чтобы сила его тяги (предполагаемая, поскольку таковой не будет!) располагалась перпендикулярно рейке, а плоскость вращения грузов — перпендикулярно плоскости вращения рейки (см. рис. 45). Если в модели инерцоида есть какие-либо

<sup>10</sup> Инерцоиды, описанные в книге В. Н. Толчина, отличаются только тем, что в них удары наносятся без остановки груза. Груз, двигаясь по окружности, ударяет по тормозу и проскакивает, имея, конечно, после такого удара весьма малую скорость. Далее груз опять разгоняется и снова встречается с тормозом. Разницы в принципе действия инерцоида тут нет.



лопасти, длинные рычаги и прочие части, могущие создать аэродинамическую тягу, его следует накрыть картонной коробкой. Струна, на которой висит рейка, закручивается с очень низким трением, и инерцоид практически не испытывает сопротивлений.

Теперь надо включить инерцоид, желательно, не толкнув его, например пережиганием фиксирующей нити. Если бы он действительно создавал тягу без взаимодействия с внешней средой, то рейка незамедлительно пришла бы во вращение, все ускоряющееся, и напоминала лопасть большого вентилятора, подвешиваемого к потолку. Но, увы, чудес не бывает: рейка под действием инерцоида лишь задержается, не меняя своего положения. А это значит, что тяги инерцоид не создает. Поставьте его снова на стол, и он, как кузнечик, заскачет в сторону ударов. Это и есть доказательство того, что движет инерцоид только сила трения.