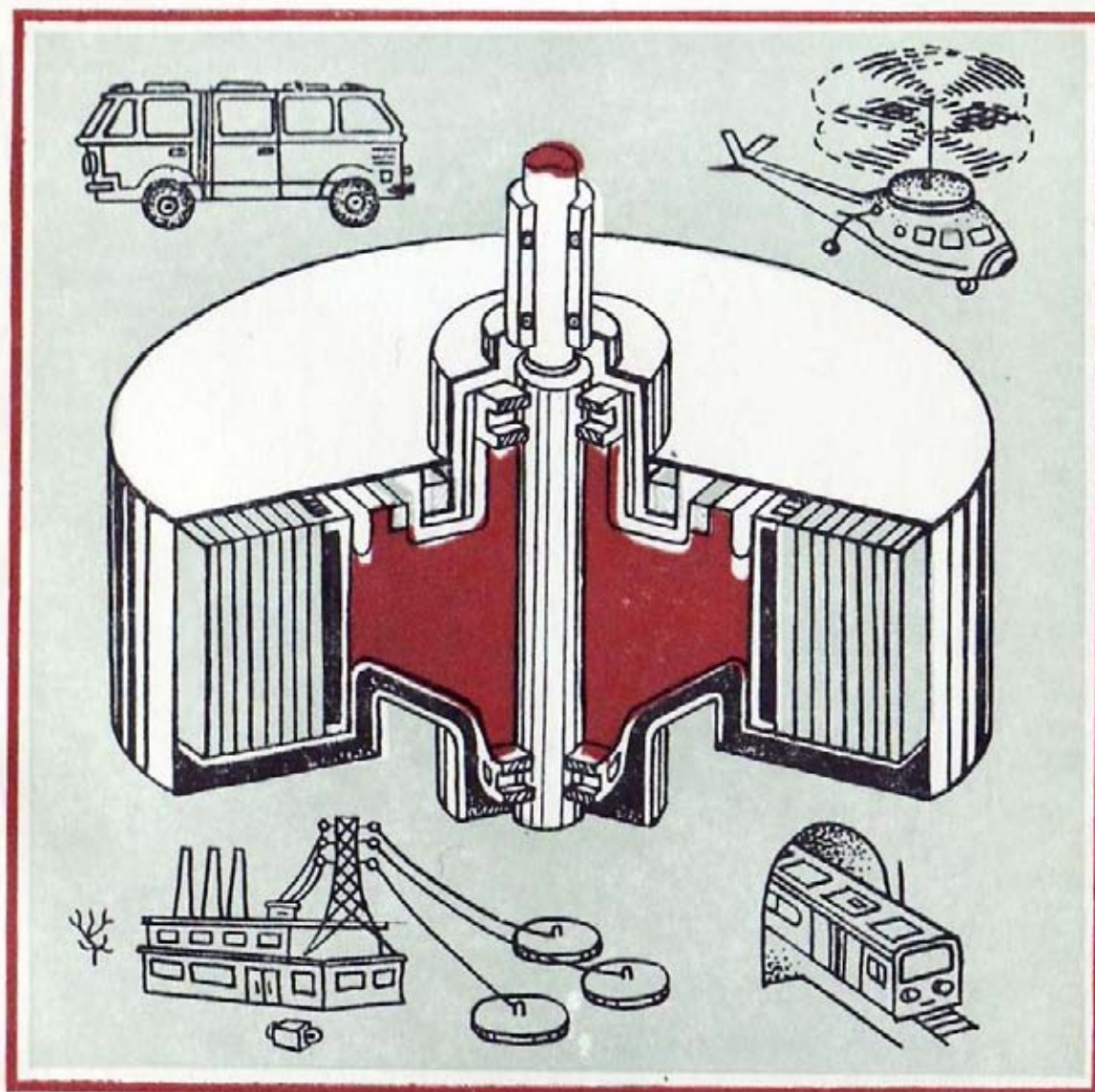


Н.В.ГУЛИА

# НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Серия  
«Наука и технический прогресс»

Н. В. ГУЛИА

# НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1980

Г94

Гулиа Н. В. Накопители энергии. М.: Наука. 152 с.

Решение многих современных проблем энергетики, топлива, транспорта, сохранения чистоты атмосферы и других, связанных с производством и потреблением энергии, невозможно без использования различных аккумуляторов — накопителей энергии. Еще более широкое применение найдут они в технике будущего. В книге рассказывается обо всех известных видах аккумуляторов энергии, показываются их возможности сегодня и в перспективе, приводятся примеры их использования.

Доктор технических наук Н. В. Гулиа — автор свыше 150 научных трудов (в том числе 70 изобретений) в области аккумуляирования энергии, главным образом маховичных аккумуляторов. Многие практические разработки по аккумуляированию механической энергии, проводящиеся в нашей стране, осуществляются под его руководством либо при его участии.

## 23.2.3

Ответственный редактор

доктор технических наук

М. Ю. ОЧАН

© Издательство «Наука», 1980 г.

Г  $\frac{30309-018}{054(02)-80}$  13—79НП2302030000



## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ БУДУЩЕЕ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА (вместо введения)

«Вся жизнь есть энергия,  
Энергия — вечный восторг» —  
в таких поэтических строках выразил свое философское кредо знаменитый английский поэт XVIII в. Уильям Блейк. И действительно, роль энергии в жизни человечества исключительно велика.

Иногда, чтобы подчеркнуть важность какого-либо явления, например трения, в жизни человека, описываются картины типа «жизнь без трения». Картина получается то комической (отпадают пуговицы, развязываются шнуры), то трагической (аварии машин, зданий, невозможно передвигаться и т. д.), но все-таки получается. Картины же «что было бы без энергии» не получится: *без энергии ничего не было бы.*

Что же такое энергия, что мы о ней знаем? Часто люди, считающие себя сведущими в вопросах энергии (может быть, даже «главные энергетики»), говорят: «машина работает, потребляя энергию», «потребление энергии достигает...», «человек питается, чтобы использовать энергию пищи». А если задуматься? Ведь энергия не исчезает, о каком же тогда «потреблении» идет речь? Вся механическая, электрическая и другая энергия, в том числе и энергия пищи, без остатка переходит в тепловую. Откуда же берется работа? Оказывается, энергия не переходит в работу, а работа получается при изменении формы энергии из более ценной в менее ценную.

С момента появления человека на Земле до зарождения цивилизации основным источником энергии была мускульная сила. Сперва человек пользовался только своими мускулами, затем куда более сильными мускулами прирученных животных — лошадей, быков, буйволов, верблюдов. Не гнушались и мускульной силой других людей — рабов.



Однако как ни совершенны мускулы, как ни высок их КПД\*, ни обеда на их энергии не сварить, ни металла не выплавить. И стал человек использовать химические источники энергии, главным образом дрова, доведя их долю в своем энергетическом рационе к 1500 г. до 90%.

Катастрофическое вырубание лесов и малая эффективность дров как топлива (к счастью для нас) снизили их роль в энергетике нового времени, и к началу нашего века основным источником энергии стал уголь. Нефть использовалась тогда едва заметно, но уже в наше время доля ее в выработке энергии достигла трети. Почти треть энергии падает на долю угля и столько же на долю газа, торфа, сланцев, дров и экзотических видов горючего. Около 10% составляет доля энергии, получаемой от атомных станций.

Так обстоит дело с расходом на энергетические нужды природных ресурсов Земли — угля, нефти, газа, дров, урана и пр. Но надолго ли их хватит человечеству?

Сейчас во всем мире добывается в год около 8 млрд. т условного топлива (т. е. такого, калорийность которого равна 7 тыс. ккал/кг, что примерно равно этому показателю для угля). Около трети топлива, в основном угля, идет на тепловые электростанции, еще треть, а именно нефть, на транспорт. Оставшаяся треть расходуется на многие виды промышленности (в основном металлургическую) и на бытовые нужды.

Академик Н. Н. Семенов дает простую формулу для определения годичной добычи топлива в будущем\*\*:

$$Q = A \cdot 2^{t/20},$$

где  $Q$  — добыча топлива в тоннах условного топлива,  $A = 6 \cdot 10^9$  т — добыча топлива в 1970 г.,  $t$  — время в годах от 1970 г.

Тогда общая выработка горючего за  $t$  лет, прошедших с 1970 г., выразится интегралом

$$\int_0^t Q dt \approx 30A (2^{t/20} - 1).$$

\* КПД мускулов млекопитающих выше, чем у дизельных двигателей, — до 40%, а у черепахи, чемпиона по КПД, — до 80%!

\*\* См.: Семенов Н. Н. Энергетика будущего. — В кн.: Заглянем в будущее. М.: Знание, 1974. Формула выведена на основе анализа добычи топлива в прошлые годы и исходя из того, что темпы роста добычи сохраняются.



Каковы же запасы горючих ископаемых? Дать точный ответ на этот вопрос затруднительно: каждый год открываются новые месторождения, истощаются старые. Но примерная оценка составляет около  $2,9 \cdot 10^{12}$  т угля,  $0,37 \cdot 10^{12}$  т нефти и  $0,18 \cdot 10^{12}$  т газа, т. е. всего около  $3,5 \cdot 10^{12}$  т.

Применив формулу Н. Н. Семёнова, приходим к выводу, что все топливо будет исчерпано через 70 лет! Американские ученые прогнозируют близкие результаты: 65—90 лет. Может быть, различными техническими усовершенствованиями удастся продлить этот срок до 100—150 лет, но это же секунда по сравнению с многовековой историей цивилизации.

Особенно плохо обстоит дело с нефтью. Добыча нефти удваивается почти каждые 10 лет, а мировых запасов нефти и газа в пять с лишним раз меньше, чем угля. Если не произойдет чуда, нефть и газ могут исчезнуть в конце тысячелетия. А ведь нефть, можно сказать, самой природой создана не как горючее, а как ценнейшее химическое сырье. Возмущенный сжиганием нефти на топливо, еще на заре ее использования, великий русский химик Д. И. Менделеев воскликнул: «Топить можно и асигнациями!».

Трудно сказать, как изменится наша жизнь, когда не будет нефти, газа и угля. Но еще труднее предсказать, сохранится ли жизнь на Земле вообще, если мы будем добывать энергию из топлива прежними способами, т. е. сжигать уголь, нефть, газ и другие виды топлива на тепловых электростанциях, в двигателях машин и промышленных установках.

Какова природа энергии, заложенной в природном горючем? Известно, что растения питаются главным образом углекислым газом и водой. Но это химически неактивные, энергетически бедные соединения. Чтобы из этих веществ могли произойти органические соединения, имеющие высокое энергетическое содержание и химическую активность, в этом процессе должен участвовать мощный источник энергии; энергия этого источника, аккумулируясь в растениях, способствует превращению энергетически бедных веществ в богатые. И таким источником энергии является, конечно, Солнце — вернее, его световая энергия. Этот факт был установлен только во второй половине XIX в. и получил название фотосинтеза.



Таким образом, энергия любого вида топлива — это солнечная энергия, аккумулированная в форме химической. Концентрация солнечной энергии происходит главным образом в углеводах — глюкозе, сахаре, крахмале и целлюлозе. Сжигая топливо, мы выделяем солнечную энергию, которая когда-то была запасена в нем. Однако это сжигание экологически далеко не безвредно. Получение энергии таким путем наиболее пагубно для человечества в настоящее время, поскольку ведет к опасности отравления атмосферы токсичными веществами. Не меньшую опасность таит в себе и перегрев биосферы, который может наступить как от чрезмерного выброса углекислоты в атмосферу, так и от производства больших количеств «искусственной» энергии.

Человек будущего, чтобы чувствовать себя в абсолютной безопасности, должен неизбежно обратиться к самому естественному, самому проверенному, самой природой уготовленному для нас источнику энергии — Солнцу.

Какими же методами можно использовать энергию Солнца?

Солнечная энергия — это не только свет и тепло. Ветер, теплота океана, течение рек — все это так или иначе энергия Солнца. Более того, приливные явления, вызываемые Луной, и внутреннее тепло Земли в конечном итоге тоже, по-видимому, энергия Солнца, поскольку планеты, возможно, произошли от Солнца. Но даже если это не так, то и «лунная энергия», и энергия горячих геотермальных вод, вытекающих на поверхность Земли, — это экологически безвредные виды энергии, подобно солнечной, постоянно сопутствующие жизни на Земле.

Как же использовать эти экологически безвредные виды энергии?

Использование энергии рек и водопадов при помощи гидроэлектростанций (ГЭС) широко известно. В 1966 г. за счет использования гидроресурсов было удовлетворено около 6% мировых потребностей в энергии, в 1980 г. ГЭС всего мира должны произвести 21 млрд. кВт·ч энергии, что составит всего 5% мировой потребности, а к 2000 г. этот показатель упадет до 2,0—2,5%.

В настоящее время приобретает актуальность ветроиспользование. На начало 80-х годов планируется широкое внедрение ветроэлектростанций (ВЭС) и их серийный выпуск в тысячах экземпляров. В СССР уже выпус-



каются ВЭС мощностью от 0,1 до 35 кВт, а некоторые ВЭС, построенные как у нас, так и за рубежом (США, Франция), имеют мощность до 400—1250 кВт. На Филиппинах разработан план строительства ВЭС мощностью 3 тыс. кВт. Сейчас КПД использования ветра достигает 50%. Особенно перспективны так называемые тропопаузные ВЭС — станции, размещенные на высоте 8—12 км, где всегда дуют постоянные по скорости и направлению потоки, скорость которых в 3—7 раз выше, чем у земли, и составляет 80—100 м/сек. Но создание и установка таких ВЭС еще связана с рядом технических трудностей.

Велики запасы приливной энергии Мирового океана, т. е. энергии приливов и отливов. Энергия всего одного цикла прилив—отлив составляет около  $8 \cdot 10^{12}$  кВт·ч, что в 100 раз превышает энергию, произведенную всеми ГЭС мира. Однако работы по использованию энергии приливов и отливов морей и океанов, т. е., по сути дела, «лунной» энергии, пока ведутся недостаточно активно.

Огромное количество энергии можно получить от морских или океанских течений, и в первую очередь от мощнейшего из них — Гольфстрима. По расчетам специалистов, турбины, установленные на глубине от 30 до 130 м, где скорость течения достигает 3,2 км/час, позволяет получить мощность 25 тыс. МВт.

По-видимому, столь же экзотическим источником энергии являются установки, использующие разность температур между верхними и глубинными слоями морской и океанской воды. Вблизи экватора температура поверхности океана достигает  $28^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 2 км —  $4^{\circ}$ . Разница, достигающая  $20^{\circ}$  и более, позволяет получать энергию, охлаждая поверхностный слой и, соответственно, нагревая глубинные слои воды. В 50-е годы подобная термогидроэлектростанция довольно большой мощности — 14 тыс. кВт — была построена у Атлантического побережья Африки. Но станции подобного рода пока еще сложны и экономически себя не оправдывают. Но это еще «пока». В будущем все может быть иначе!

Несколько утешительнее обстоит дело с использованием геотермальных вод. Этот способ имеет ряд преимуществ — технологическая простота, практическая неиссякаемость энергии, широкое распространение. В 1971 г. общая мощность ГеоТЭС в мире достигла 1000 МВт. Полагают, что ресурсы геотермальных вод очень велики,



Непрерывно возобновляющаяся тепловая энергия всех подземных вод земной коры оценивается в  $3 \cdot 10^{27}$  кал. Тепловая же энергия доступных человеку 85 млн. км<sup>3</sup> воды составит  $4 \cdot 10^{21}$  кал, что во много раз превышает ресурсы всего минерального топлива на Земле. Во многих местах Земного шара найдены месторождения перегретой воды при температуре  $200^{\circ}$ — $300^{\circ}$  и пара —  $600^{\circ}$ — $800^{\circ}$  С. Такие параметры позволяют строить высокоэффективные тепловые электростанции. Сегодня имеются реальные возможности применения геотермальной энергии в 40 странах \*.

И наконец, каковы перспективы непосредственного использования лучистой энергии Солнца? Солнечное излучение приносит на Землю каждую секунду около  $10^{24}$  эрг энергии, в то время как уровень производства энергии всей земной цивилизацией еще не достиг  $10^{20}$  эрг в секунду. Считается, что наиболее эффективно прямое преобразование солнечной энергии с помощью фотоэлектрического метода. Это может быть осуществлено в основном тремя способами: непосредственной установкой фотоэлементов на зданиях, покрытием больших площадей земли, например пустынь, достаточно дешевыми пленочными фотоэлементами и, наконец, выносом энергоустановок в космос, где сильна солнечная радиация и не мешает вес, с последующей передачей электроэнергии на Землю \*\*.

Согласно наиболее общепринятым прогнозам, основную часть энергии в будущем человечество будет получать от Солнца, в разумных пределах «разбавляя» ее термоядерной энергией.

Как же осуществить такую систему снабжения человечества энергией, чтобы не отравлять, не перегревать атмосферы и при этом не нарушать привычный нам механизированный мир. Как мы выяснили, прежде всего, энергию следует получать только от экологически безвредных источников — гидравлических, ветровых, приливных, геотермальных и, главным образом, солнечных элек-

\* См.: Шишкин М., Антонов А. Сегодня и завтра геотермической энергии. — В кн.: Земля и люди. М.: Знание, 1971.

\*\* Американцами, например, разработан один из вариантов внеземной радиационной энергоустановки мощностью 10 тыс. МВт. Масса станции всего 25 т, стоимость — 20 млрд. долл. Реализация такой станции ожидается около 1985 г.



тростанций. Стационарные, крупные потребители энергии — фабрики, заводы используют энергию, переданную по проводам от источников. А как быть с мобильными машинами, главным образом с транспортом? Тут необходим автономный источник энергии, «энергетическая капсула», которая запасала бы энергию от экологически безвредных источников, а затем расходовала ее при движении. Что́ будет представлять собой эта «капсула», пока не важно, главное — она должна накопить энергию, сохранить ее с возможно меньшими потерями, а затем при необходимости выделить с требуемой интенсивностью. И все это при условии наименьших габаритов и массы «капсулы».

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

Если открыть энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона 1890 г. издания, то об аккумуляторах энергии там можно прочесть: «Так называются в машиностроительном деле приборы для накопления механической энергии. Изобретены они Армстронгом и основаны на постепенном поднятии на высоту большого груза или на сильном сжатии воздуха». Конкретно, образно, но для сегодняшнего дня нечетко. Во втором издании Большой советской энциклопедии (1958) и вовсе нет обобщающего понятия аккумулятора энергии. Есть аккумуляторы электрические, тепловые, инерционные и т. д., а аккумулятора вообще как такового нет.

В третьем издании БСЭ (1970—1977) уже есть определение аккумулятора как «устройства для накопления энергии с целью ее последующего использования». Если следовать этому определению, то электрическая машина, которую мы «крутим», затрачивая механическую работу, а затем извлекая из нее энергию в виде искр, — аккумулятор. Вместе с тем лейденская банка, которую мы заряжаем от электрической машины, а затем разряжаем, — тоже аккумулятор.

В чем же разница? В том, что в первом случае энергия трансформируется, изменяет свою форму, переходя из механической в электрическую, а во втором — и накапливается, и выделяется в виде электрической. А трансформация энергии — это уже свойство не аккумулятора, а машины.



Следовательно, если быть более точным, то аккумулятор энергии нужно определить как устройство, позволяющее накапливание энергии, хранение ее и последующее выделение без преобразований. Разумеется, это определение не претендует на какую-либо полноту или законченность, но оно 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 ту же форму энергии. Электроаккумулятор заряжается электрической энергией, ту же форму энергии он и выделяет.

Но бывает иначе. Всем известно, что двигатель автомобиля заводится электростартером при помощи аккумулятора. Так вот, система аккумуляторы — электростартер тоже позволяет накапливать энергию в виде электрической (зарядка аккумулятора), но использует ее уже в виде механической (вращение вала стартера), поэтому она — не чистый аккумулятор, а «гибрид» аккумулятора и электромашины — стартера.

Существует весьма перспективный проект использования дешевой электроэнергии (и не только электроэнергии) путем разложения воды на кислород и водород, а затем использования водорода в качестве экологически безвредного горючего\*. Тут сам водород является аккумулятором энергии — вернее, не водород, а смесь водорода с кислородом, поскольку на их получение была затрачена химическая энергия и химическая же энергия будет получена при окислении водорода кислородом. Сам же двигатель, где водород будет сжигаться, или, окисляясь, выделять электроэнергию, вряд ли следует относить к аккумуляторам. Это можно было бы сделать лишь в том случае, если не вводить в топливный элемент (аппарат для прямого преобразования химической энергии в электрическую) водород и кислород извне, а добывать их тут же, разлагая, например, находящуюся в самом аппарате воду. Такая система была бы очень похожа на электрохимический аккумулятор, где химическая энергия веще-

\* См.: Лидоренко Н. С., Мучник Г. Ф. Экологическая энергетика. — Природа, 1974, № 9.



ства внутри аккумулятора преобразуется в электрическую\*.

Как будет показано ниже, почти любой гальванический элемент можно назвать и аккумулятором, если его подзаряжать энергией извне. Если же такая «заправка» энергией осуществляется заливкой электролита, горючего и прочих энергетически богатых веществ, то это уже не аккумулятор, а двигатель, преобразующий форму энергии. Классический пример двигателя — это тот, куда мы заливаем горючее, а получаем механическую работу, или электродвигатель, преобразующий электрический ток (электроэнергию) и совершающий при этом работу.

Начиная разговор о типах аккумуляторов энергии, прежде всего вспомним о поднятом грузе. Это классический тип аккумулятора механической энергии, причем аккумулятора статического типа. Статический — это такой, в котором нет движения, где все уравновешено, но это равновесие по тем или иным причинам может нарушиться — и тогда совершится работа.

Обычно поднятый груз опускается до уровня пола, земли, иногда для него строят специальные шахты. Идеально было бы опускать груз до центра Земли, но это переально. Накопить много энергии таким путем нельзя — слишком большие габариты и массу будет иметь аккумулятор (слаба гравитация Земли, вот если бы мы жили на Юпитере...).

Чтобы сравнивать аккумуляторы между собой, нужно ввести (хотя бы основные) критерии сравнения. Таких основных критериев, на наш взгляд, три: удельная энергия, удельная мощность и время консервации энергии. Удельные энергия и мощность — это энергия, накопленная в аккумуляторе, и мощность, которую может воспринять или выделить аккумулятор, отнесенные к массе аккумулятора. Время консервации — это срок, в течение которого аккумулятор «держит» энергию (всю или часть ее). Надо сказать, что аккумулятор энергии в виде подня-

---

\* Несмотря на то, что энергия внутри этого аккумулятора преобразуется из электрической в химическую и обратно, устройство все-таки относится к аккумуляторам, поскольку и заряд и разряд осуществляются энергией одной формы — электрической, и эти обратимые преобразования в веществе происходят на атомарном уровне без помощи каких-либо искусственных дополнительных устройств.



того груза является своеобразным чемпионом: трудно назвать аккумулятор, имеющий более низкую удельную энергию и более высокий срок консервации энергии, чем этот. Ходики, изготовленные в доисторические времена, превосходно заработали бы и сейчас, расходуя энергию гири, поднятой миллионы лет назад. Но, увы, каждый килограмм массы поднятого груза накапливает слишком мало энергии.

Аккумуляторы механической энергии статического типа в виде пружин — уже более компактны. Конструкторы много веков трудятся над тем, чтобы по возможности снизить габариты и вес заводных пружин, прежде всего для часов. В наше время часы умещаются даже в перстнях. Но как ни отработаны заводные пружины, им все-таки далеко до обычной резины: растянутая или скрученная резина может накопить в единице массы в десятки раз больше энергии, чем заводная пружина. Почему же тогда не делают часов с резиномоторами? Причин здесь много: резина менее долговечна, чем стальная пружина; она не выносит длительных статических нагрузок; много энергии в ней уходит на внутренние потери; резиномотор очень трудно сделать компактным.

Еще большей удельной энергией обладают аккумуляторы, где упругим телом является сжатый газ. Часто их используют в комбинации с жидким рабочим телом.

Совершенно на другом принципе работают аккумуляторы кинетической энергии, иначе динамические, или инерционные, аккумуляторы — маховики. Известно, что массивное тело, движущееся с какой-либо скоростью, обладает кинетической энергией, тем большей, чем больше масса этого тела, и пропорциональной квадрату его скорости. Чтобы не «догонять» аккумулятор, а использовать его энергию на месте, его выполняют в виде вращающегося тела, а не движущегося поступательно. Такое вращающееся тело — маховик — легко «привязать» к оси и с нее «снимать» его энергию. Маховики — чемпионы среди аккумуляторов по удельной мощности, она у них практически безгранична.

Маховики известны с глубокой древности, но как перспективные аккумуляторы энергии стали рассматриваться сравнительно недавно, с изобретением так называемых супермаховиков — аккумуляторов энергии, обладающих наибольшими возможностями из всех известных и, поми-



мо этого, наиболее простых и долговечных. Супермаховики изготавливаются из сверхпрочных ните- и лентовидных материалов путем навивки и обладают высокой удельной энергией, однако разрыв их от случайной причины, в отличие от обычных маховиков, безопасен.

Наибольшую популярность приобрели сейчас электрические аккумуляторы. Их все знают по стартерным батареям автомобилей, батареям питания транзисторов и электрических фонариков. Электрические аккумуляторы можно разделить на запасющие чисто электрическую энергию и электрохимические, где электроэнергия накапливается и выделяется при химических реакциях.

Чисто электрические аккумуляторы — это конденсаторы и катушки индуктивности (их очень много в любом приемнике или телевизоре). Интересно, что характер накопления и выделения энергии в конденсаторе выражается теми же зависимостями, а стало быть, протекает так же, как и в статических механических аккумуляторах — пружинах, сжатом газе, а в катушках индуктивности — как в механических динамических аккумуляторах-маховиках. Эти типы аккумуляторов аналогичны по своей природе. В конденсаторе электрическая энергия накапливается в виде заряда на обкладках. Если вокруг довольно сухой воздух, то этот заряд держится сравнительно долго. В катушках индуктивности энергия держится не так долго — мешает сопротивление проводника, в данном случае проволоки. Такую катушку можно уподобить маховику на грубых подшипниках: он часто теряет энергию и останавливается из-за сопротивления в них. Совсем иное дело, если это сопротивление устранить. Известно, что если обычный проводник поместить на очень большой холод (например, жидкий гелий при температуре, близкой к абсолютному нулю), то электрическое сопротивление проводников скачком исчезает. Тогда ток, наведенный в кольце из сверхпроводника, будет практически вечно циркулировать по нему, а стало быть, сохранится и накопленная электроэнергия. В маховиках тот же эффект достигается помещением тела вращения в магнитный подвес и в вакуум, там маховик может вращаться годами с одной раскрутки.

Явление аккумуляции электроэнергии мы часто наблюдаем в приемниках и телевизорах: с выключением этих приборов звук и яркость экрана исчезают не сразу,



некоторое время они работают за счет энергии, накопленной в аккумуляторах электрической энергии, а также в нагретых радиолампах. Зато и сразу после включения они не срабатывают — некоторое время энергия в них «накапливается» (очень хорошая аналогия с автомобилем, который мгновенно не разгоняется, зато и не останавливается сразу же при выключении двигателя, поскольку в нем при движении накапливается кинетическая энергия).

Может возникнуть вопрос, отчего экран телевизора, особенно после большой яркости изображения, долго светится уже после того, как вся накопленная электроэнергия исчерпана. Это «срабатывает» другой вид аккумулятора — аккумулятор световой энергии. Рассматривать его мы здесь не будем из-за узкой специфичности и ничтожного энергетического значения, но несколько слов о нем сказать надо.

Аккумуляторы световой энергии называются фосфорами или кристаллофосфорами. Этими фосфорами часто покрывают циферблаты приборов, стрелки часов и прочие детали, которые должны светиться в темноте. Но прежде их нужно осветить, причем лучше светом с возможно большей энергией излучения, т. е. с короткой длиной волны, например ультрафиолетовым. После этого фосфоры долго, часами еще светятся, выделяя накопленную световую энергию, причем с весьма высоким КПД. Свечение бывает разных цветов, разной интенсивности и продолжительности.

Иной принцип действия электрохимических аккумуляторов. В 1799 г. Алессандро Вольта, поместив медный и цинковый электроды в разбавленную серную кислоту, получил первый гальванический элемент. Впоследствии стали набирать целые «столбы» из медных и цинковых колец, переложенных матерчатыми прокладками, смоченными серной кислотой. Столбы эти, названные «вольтовыми», давали достаточно большое напряжение — с их помощью были проведены первые основополагающие опыты по электротехнике. После Вольта многие ученые (Лекланше, Даниэль, Грове и др.) создали свои гальванические элементы, более эффективные и практичные. Элементы Лекланше, например, мы видим и в современных «сухих» батареях.

Но не каждый гальванический элемент может стать хорошим аккумулятором, а только тот, который обеспе-



чивает ход реакции в обоих направлениях — и с выделением электроэнергии, и с поглощением ее. Таких аккумуляторов сегодня огромное количество видов — от свинцово-кислотных, известных еще в прошлом веке \*, до современных с металлическим расплавленным электролитом при температуре 300—600° С. Электрохимические аккумуляторы имеют весьма высокую удельную энергию, достаточно долго хранят ее. Удельная мощность их, правда, сравнительно невелика, поэтому зарядка и экономичная разрядка длятся сравнительно долго. Невысока их долговечность и надежность срабатывания, сильно зависящая от срока хранения и температуры. Но пока электрохимические аккумуляторы имеют очень широкое распространение и над их усовершенствованием работают многие научные коллективы.

Если несколько отойти от принятого понятия аккумулятора как искусственно созданного устройства, то можно привести пример живого источника электроэнергии — рыбу, называемую электрическим скатом. Этот скат, обитающий в теплых морях, переводит химическую энергию пищи в электроэнергию. Трудно сказать точно, но, возможно, он умеет и накапливать ее, как мы, например, отдыхая, накапливаем силы. Тогда его уже смело можно назвать живым аккумулятором. Электрические органы ската, расположенные по бокам головы, весят около пуда и по своему строению поразительно похожи на батарею гальванических элементов: состоят из многочисленных пластинок, несущих положительные и отрицательные заряды, причем эти пластинки собраны столбиками (соединены последовательно), а столбики объединены в батареи с параллельным соединением. Весь электрический орган заключен в электроизолирующий «корпус» — соответствующую ткань.

Скат способен давать ток в 8 А при напряжении в 300 В, т. е. мощность почти 2,5 кВт, что больше 3 л. с. Это — завидные показатели для электроаккумуляторов, во всяком случае тех, которые мы используем для запуска автомобильных двигателей. Если отнести мощность к массе электрических органов ската, то получим цифру свыше 150 Вт/кг. Вместе с тем, как отмечают многие исследо-

---

\* Свинцово-кислотный аккумулятор был изобретен в 1859 г. французом Плантэ.



ватели, удельная мощность 100—150 Вт/кг обеспечила бы качественный скачок в использовании электрохимических источников энергии для привода электромобилей.

Особое место среди накопителей энергии занимают тепловые аккумуляторы (пример такого аккумулятора — горячая вода в термосе). Они способны накопить очень большое количество энергии, особенно если их рабочее тело нагрето до температуры выше его плавления. При охлаждении рабочее тело испытывает фазовый переход и, переходя в твердую фазу, выделяет большое количество тепла. Такой фазовый переход для различных веществ наступает в широкой гамме температур — от десятков до 3000° С.

Тепловые аккумуляторы всем хороши: у них высокая удельная энергия и срок ее консервации, но тепловая энергия их «второсортна», т. е. из нее очень трудно получить механическую работу или перевести ее в электрическую энергию. Чаще всего приходится использовать ее без преобразований, в виде тепла.

Аккумуляторы энергии могут использоваться как отдельно, так и в комбинациях, дополняя друг друга своими полезными свойствами. Оправдывают себя комбинации, или гибриды электрохимических и маховичных аккумуляторов. Первые обеспечивают высокую удельную энергию, вторые — удельную мощность гибридной установки. Тепловые аккумуляторы очень полезны в сочетании с аккумуляторами энергии в виде сжатого газа. При расширении газ сильно охлаждается, теряя свою энергию; тепловой аккумулятор позволяет восполнить эту потерю. Существует много других комбинаций аккумуляторов. На вопрос, какой же аккумулятор лучше, перспективнее всех, нет однозначного ответа: не может быть универсального аккумулятора, применимого во всех случаях жизни.

Если режим загрузки силовой установки спокойный, энергию требуется получить в виде электрической, циклы зарядки—разрядки повторяются не очень часто, то для этих целей наиболее подходит электрохимический аккумулятор. Это и аварийные системы освещения, и питание электроприборов, а частично и механических силовых систем. Весьма перспективны электрохимические аккумуляторы для транспорта — электромобилей, особенно тех, которые имеют ненагруженный рабочий цикл, невы-



сокие скорости движения и используются непродолжительное время. Если же электромобиль должен часто тормозить и разгоняться, быстро набирать скорость и обгонять другие средства транспорта, то на помощь электрохимическим аккумуляторам приходят маховичные, играя роль дополнительной силовой установки, берущей на себя «пиковые» нагрузки.

Транспортные средства, почти вся работа которых состоит из одних торможений и разгонов, а также работающие большую часть суток с интенсивной нагрузкой, целесообразно снабжать маховичными аккумуляторами. Это почти все средства городского транспорта: автобусы, трамвай, поезда метро. Хорошие перспективы и у гибридов маховичных аккумуляторов с обычными тепловыми двигателями почти для всех видов автомобилей. Применимы также маховичные троллейбусы, которые определенную часть пути проходят, питаясь от троллеев, одновременно заряжая маховичный аккумулятор, а в центре города, например, идут на энергии маховика. Внутриводские транспортные средства, шахтный, взрывобезопасный транспорт, аварийные системы питания высокой надежности — вот области применения маховичных аккумуляторов.

Механические аккумуляторы малой удельной энергии — пружины, поднятый груз — применяются в часах, различных приборах, причем предпочтение отдается, за исключением отдельных случаев, пружинам. Резиномоторы используют в различных моделях, в упругих муфтах-аккумуляторах, иногда для аккумуляции энергии торможения машин.

Аккумуляторы в виде баллонов со сжатым газом устанавливают в разнообразных пусковых устройствах и сервосистемах, т. е. системах управления. Если в качестве рабочего тела в таких аккумуляторах применяется жидкость, то они называются гидрогазовыми. Имея высокий КПД, они применяются в системах металлообрабатывающих машин, в основном прессовых, а также в качестве аккумуляторов энергии торможения машин. Гигантские газовые аккумуляторы, как и огромные маховики, весьма перспективны в качестве накопителей энергии на электростанциях в ночное время, когда нагрузка невелика. Сейчас с этой целью применяют гидроаккумулирующие станции. Принцип их действия тот же, что и у поднятого



груза, только в качестве груза здесь выступает вода, закачиваемая в расположенное на высоте водохранилище.

«Чистые» электроаккумуляторы — конденсаторы и катушки индуктивности — применяют в основном в электронике и радиотехнике, хотя мощные конденсаторные батареи используют и для силовых электропроводов, создания мощных электрических импульсов и аналогичных целей. Сейчас построены конденсаторы невиданно большой емкости, что, безусловно, сильно расширяет область их применения. Катушки индуктивности, как было отмечено выше, могут накопить большое количество энергии в том случае, если находятся в условиях сверхпроводимости.

Осталось рассмотреть тепловые аккумуляторы. Эти устройства, стоящие особняком среди аккумуляторов энергии, должны сыграть видную роль в использовании солнечной энергии. Не исключено использование энергоемких тепловых аккумуляторов и для производства механической работы, например, в пневмоприводах, для двигателей Стирлинга и в ряде других случаев.

Как было отмечено, топливные элементы, которые непосредственно преобразуют энергию, выделяемую при окислении водорода и ряда других веществ, в электроэнергию, можно и не относить к понятию аккумуляторов. Но в определенных условиях они могут быть причислены к электрохимическим аккумуляторам, о чем было сказано выше. Роль топливных элементов в энергетике будущего велика. Являясь, в общем, конкурентами электрохимических аккумуляторов, они не исключают «гибридизации» с аккумуляторами высокой удельной мощности, например маховичными, в первую очередь для транспортных целей. По мнению ряда ученых, топливные элементы, работающие на водороде, полученном разложением воды, могут сыграть решающую роль в использовании экологически безвредных источников энергии, и в первую очередь солнечной\*.

\* Более того, Н. С. Лидоренко и Г. Ф. Мучник — авторы упоминавшейся статьи в журнале «Природа» (1974, № 9) — принципиально не отвергают возможности поглощения топливным элементом окружающего тепла, т. е. работы его с КПД выше 100%. Это перекликается с идеями «энергетической инверсии», или передачи тепла от менее к более нагретым телам, разрабатываемыми сейчас общественным институтом энергетической инверсии (ЭИИН), созданным АН СССР.



## АККУМУЛЯТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ АККУМУЛЯТОРЫ

Как мы уже знаем, аккумуляторами энергии можно считать такие гальванические элементы, электроды которых работают обратимо. Свежий аккумулятор выделяет электроэнергию до тех пор, пока его электрохимические активные вещества не израсходуются до допустимого предела. Тогда говорят, что аккумулятор «истощен», «разряжен». Точно так же протекает процесс и в обычном гальваническом элементе, например в сухих элементах Лекланше (которые используются для питания большинства известных батарейных приборов — карманных фонарей, приемников и т. д.). Но, в отличие от любого гальванического элемента, если через разряженный аккумулятор пропустить ток от внешнего источника энергии в обратном направлении, то израсходованная химическая энергия аккумулятора восполнится, после чего он опять готов к работе, заряжен. Такие аккумуляторы хранят электрическую энергию в виде химической, и поэтому их можно называть электрохимическими. Можно попытаться пропустить ток в обратном направлении через любой гальванический элемент, но далеко не всегда процесс «зарядки» их будет протекать эффективно\*.

\* Часто в литературе попадаются советы, как обновить истощенную батарею сухих элементов пропусканием через них тока, преимущественно импульсами. Возможно и такое, только по техническим и экономическим соображениям в качестве аккумуляторов лучше применять такие «обрабатываемые» гальванические элементы, в которых как исходные соединения, так и конечные продукты при зарядке и разрядке являются практически нерастворимыми твердыми веществами и содержат только один электродлит. Если бы вещества, образующиеся при разрядке элемента, растворялись в электролите, то они из-за диффузии удалялись бы далеко от электрода и не могли при зарядке возвратиться в исходное положение. Также не стоит применять на практике в качестве аккумуляторов гальванические элементы, содержащие два электролита, например элементы Даниэля.



По признаку применимости или неприменимости гальванических элементов в качестве аккумуляторов они делятся на первичные и вторичные. Первичные элементы (или просто элементы) не могут быть возвращены (или это очень трудно сделать) в рабочее состояние после того, как их активное вещество было уже однажды израсходовано. После истощения таких элементов нельзя или просто неэкономично пытаться заряжать их, пропуская ток в обратном направлении. Вторичные элементы (аккумуляторы) можно заряжать после истощения, если, как говорилось выше, пропускать через них ток в обратном направлении. Процессы, происходящие на электродах вторичных элементов, с достаточным приближением электрохимически обратимы.

Обратимые электродные процессы в аккумуляторах протекают обычно с высоким КПД. Например, у свинцового аккумулятора в наиболее благоприятных случаях КПД достигает 80%. Напрашивается вопрос, почему же аккумуляторы, имеющие столь высокий КПД, не используются в качестве первичных элементов для превращения химической энергии активных веществ аккумулятора в ток и выбрасывания затем энергетически обедненных продуктов. Вместе с тем аккумуляторы заряжают от внешних источников энергии, чаще всего от электростанций, где электрическая энергия также получается из химической, причем с гораздо более низким КПД.

Здесь все решает экономика. Для современных гальванических элементов, в том числе и аккумуляторов, нужны свинец, никель, цинк, а нередко и серебро. Это — сравнительно редкие и слишком дорогие вещества для простого превращения их в энергию с выбрасыванием полученных продуктов, подобно шлаку и золе на тепловых станциях. Топливо же пока несравненно дешевле этих электродных продуктов и получать с его помощью энергию даже с низким КПД рентабельнее, чем в аккумуляторе.

Однако если упомянутые дорогие и дефицитные вещества применять в аккумуляторе только однократно и, заряжая и разряжая аккумулятор, использовать их энергетические возможности большое число раз, то получение энергии (хранение ее) становится уже рентабельным. Правда, после некоторого количества циклов зарядки и разрядки, которых обычно бывает несколько сотен, доро-



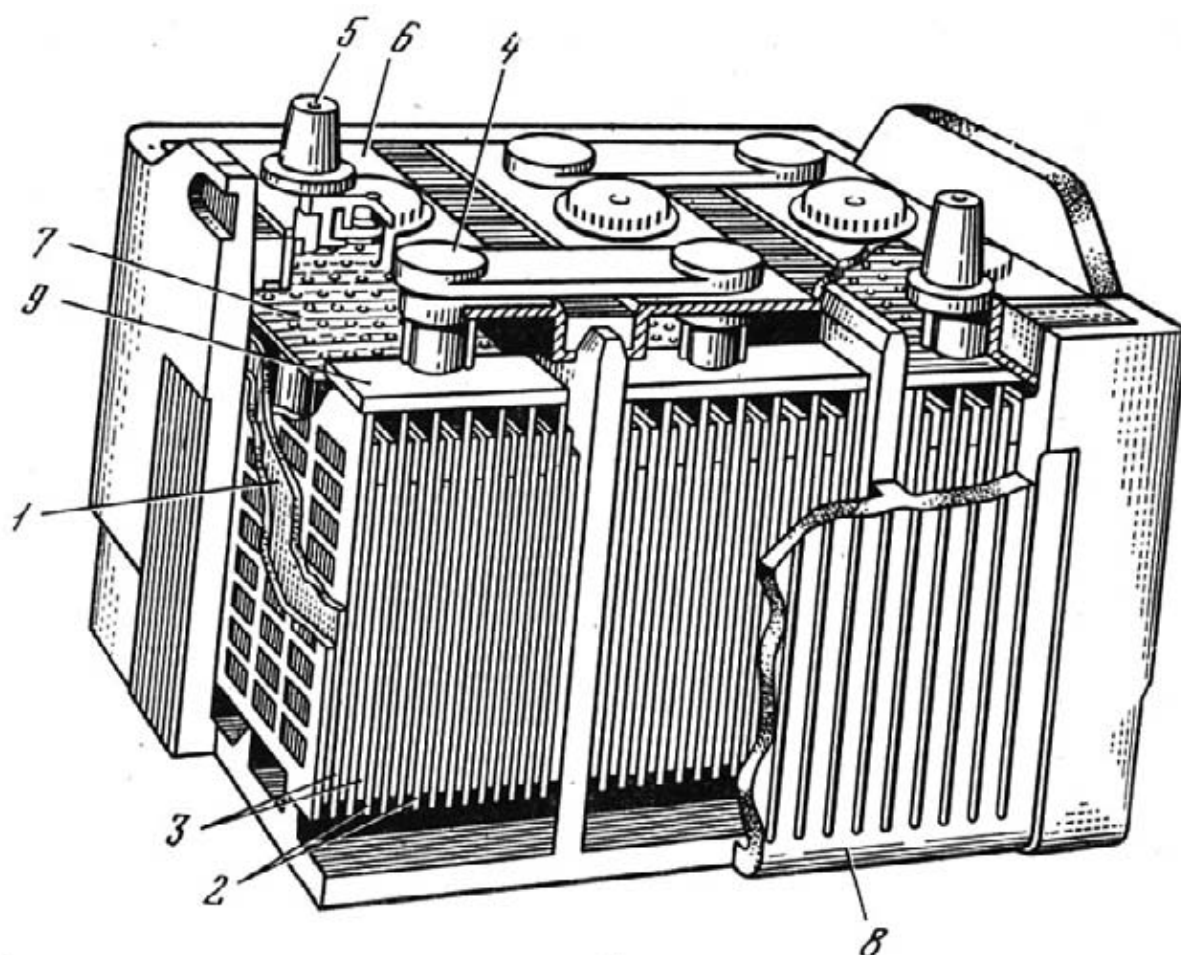
гостоящие электродные вещества все-таки приходят в негодность. Поэтому энергия, накапливаемая в электрохимических аккумуляторах, удорожается.

Существует большое количество типов и разновидностей электрохимических аккумуляторов. На практике до сих пор оправдывают себя три вида аккумуляторов: кислотный (свинцовый), щелочной (железо-никелевый) и серебряно-цинковый. Считаются перспективными также цинково-воздушные (и аналогичные) аккумуляторы, а также аккумуляторы, где электролитом является расплавленный щелочной металл (литий, натрий) при высокой температуре, а также ряд других менее известных аккумуляторов.

С некоторым приближением аккумуляторами можно считать и так называемые топливные элементы, когда, например, постоянный объем воды, находящийся в топливном элементе, разлагают подачей тока извне на водород и кислород. Затем эти вещества, хранящие в себе энергию, затраченную при разложении воды, окисляют в топливном элементе. Выделяемая при этом энергия в виде электрической может быть использована так же, как и энергия, выделенная аккумулятором. Если вода подвергается электролизу где-то вдали от топливного элемента, а затем продукты электролиза — водород и кислород — доставляются к топливному элементу, где происходит их соединение с выделением энергии, то процесс принципиально не отличается от описанного выше. Просто аккумулятор придется считать очень протяженным по расстоянию, например, от завода, где разлагают воду, до электростанции, где из продуктов разложения получают энергию. Важно одно: что химически активные вещества получены искусственно при затрате на это электроэнергии и энергия выделена из них также в виде электрической. Если же полученные водород и кислород сжигать в двигателе, например внутреннего сгорания, и получать механическую работу, то устройство для этого вряд ли можно считать аккумулятором, а скорее двигателем, работающим на искусственном горючем, хранящем аккумулярованную в нем энергию.

Как видим, провести четкую грань между аккумулятором, двигателем и горючим достаточно сложно. Почти вся потребляемая нами энергия есть аккумулярованная энергия Солнца (в том числе и наша пища), но не можем же мы считать себя живыми аккумуляторами солнечной





**Аккумуляторная свинцово-кислотная батарея**

1 — сепаратор, 2 — положительные пластины, 3 — отрицательные пластины, 4 — положительный штырь, 5 — отрицательный штырь, 6 — крышка, 7 — предохранительный щиток, 8 — бак, 9 — баретка

энергии. Поэтому с некоторой натяжкой причислим кислородно-водородные топливные элементы к электрохимическим аккумуляторам энергии.

Свинцовый аккумулятор имеет отрицательный электрод (анод) из свинца и положительный электрод (катод) из двуокиси свинца, которые для обеспечения электропроводимости находятся в контакте со свинцом. Электролитом служит 25—35%-ный водный раствор серной кислоты. Химический процесс генерирования тока протекает в двух местах, отделенных один от другого, т. е. на двух электродах. На аноде при этом происходит образование почти нерастворимого сульфата свинца, который осаждается на поверхности электрода. При зарядке электрическая энергия затрачивается, чтобы из энергетически обедненного сульфата свинца получить из энергетически активные свинец и двуокись свинца.

Так как во время разрядки в электролите образуется вода, то концентрация серной кислоты при работе аккумуля-



мулятора постоянно уменьшается. Электродвижущая сила (ЭДС) при этом снижается. По концентрации серной кислоты можно судить о степени разрядки аккумулятора. На практике обычно измеряется плотность раствора серной кислоты с помощью специального ареометра. Очень важно, чтобы свинцовый аккумулятор не разряжался до полного израсходования свинца и двуокиси свинца: при этом электроды теряют свою механическую прочность и разрушаются (разряжать ниже, чем до 1,8 В, не следует; ЭДС заряженного аккумулятора 2,0—2,2 В).

Как и у всех гальванических элементов, ток у аккумуляторов тем сильнее, чем больше поверхность соприкосновения электродов с раствором электролита. Электроды должны иметь сильно развитую пористую поверхность, чтобы электролит, проникая через поры, соприкасался с ними на большой площади. Поэтому электроды выполняются в виде свинцовой решетки, а их полости заполняются губчатым свинцом у отрицательного электрода и массой из двуокиси свинца у положительного.

КПД свинцового аккумулятора, рассчитанный по энергии, не превышает 75—80%, т. е. при работе аккумулятора возвращается менее 80% энергии, затраченной при зарядке. Это происходит в основном из-за образования в порах электродов воды, которая очень медленно проникает в глубь раствора электролита. В результате концентрация серной кислоты на рабочих поверхностях электродов ниже, чем средняя концентрация электролита. В связи с этим уменьшается напряжение на клеммах — и, следовательно, количество энергии, выделяемой аккумулятором. Обратный процесс происходит при зарядке — из-за высокой концентрации кислоты на рабочих поверхностях электродов напряжение при зарядке, а стало быть, и затраченная электроэнергия, выше, чем при разрядке. Так, при зарядке напряжение быстро увеличивается до 2,2 В, а затем медленно до 2,3 В и доходит до 2,6—2,7 В, когда следует прекратить зарядку. При этом наблюдается интенсивное выделение водорода, так называемое кипение электролита.

Поскольку, как мы видим, на энергетический КПД аккумулятора существенно влияет разность концентраций серной кислоты в порах электродов, то понятно, что он сильно зависит от интенсивности зарядки и разрядки. Чем меньше интенсивность, а следовательно, и плотность



тока, тем больше времени имеется для диффузионного выравнивания концентраций, тем ближе друг к другу количества энергии при зарядке и разрядке и, значит, выше КПД. Поэтому заряжать и разряжать аккумулятор выгодно возможно более слабыми токами: при этом снижается разрушающее действие на электроды происходящих в них процессов и долговечность аккумуляторов увеличивается. Это сильно снижает удельную мощность электрохимических аккумуляторов, что является одним из отрицательных их качеств.

Оставлять аккумулятор в разряженном состоянии также не следует из-за разрушения пористых стенок электродов растущими кристаллами сульфата свинца. Этот процесс называется сульфатацией. Заряженный свинцовый аккумулятор может саморазрядиться и во время хранения. На энергоемкость аккумуляторов сильно влияет присутствие каких-либо примесей в электролите, его температура, условия хранения.

Свинцовые аккумуляторы пока являются самыми экономичными, однако при очень сильных токах они портятся. Поэтому в зависимости от частоты и интенсивности загрузки аккумуляторов их устройство различно. Например, стартерные аккумуляторы, применяемые при запуске автомобильных двигателей и подвергаемые редким, но большим нагрузкам, устроены иначе, чем, например, используемые в системах освещения.

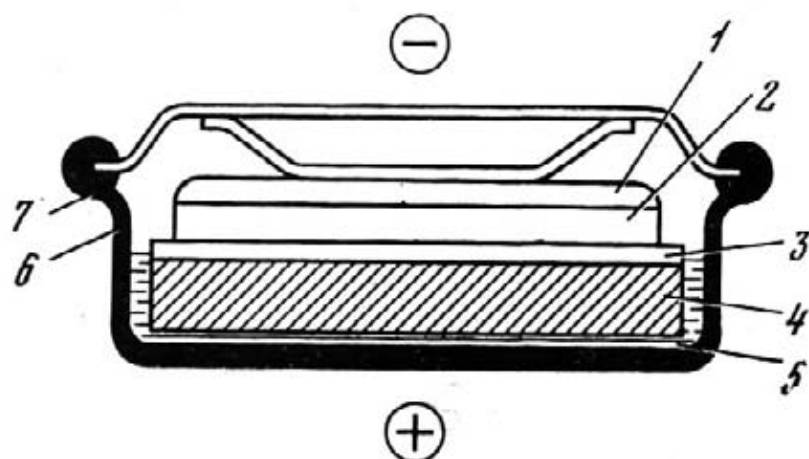
В противоположность свинцовому щелочной аккумулятор хорошо переносит перегрузки, нечувствителен к избыточному заряду и к сильному разряду; поэтому он долгое время может находиться как в заряженном, так и в разряженном состоянии, менее чувствителен он к механическим воздействиям, хорошо переносит перегрев, не нуждается в ремонте. Щелочному аккумулятору отдается предпочтение перед свинцовым при неблагоприятных режимах работы и нерегулярной эксплуатации.

Щелочные аккумуляторы имеют пористый железный или кадмиевый отрицательный электрод с большой рабочей поверхностью и никелевый положительный, окруженный окисью трехвалентного никеля. Электролитом является 21%-ный раствор едкого кали или едкого натра. Корпус аккумулятора изготавливается в основном из стали, что обеспечивает высокую прочность. ЭДС у щелочного аккумулятора меньше, чем у свинцового, и рав-



на 1,4—1,3 В. При разрядке ЭДС может упасть до 1,1 В, тогда следует ее прекращать. КПД, рассчитанный по энергии, также меньше — примерно 50%. Щелочной аккумулятор дороже, а его удельные показатели меньше, чем у свинцового.

Щелочной аккумулятор можно изготовить герметически закрытым: это так называемые сухие аккумуляторы. Их делают таким образом, чтобы они всегда оставались частично незаряженными и не происходило выделения водорода. Весьма небольшие количества газа (в основном кислорода) устраняются окислением отрицательного



Щелочной «кнопочный» аккумулятор

1 — железная пластинка, 2 — пористое железо, 3 — пластинка, пропитанная едким кали, 4 — окись никеля, 5 — никелевая пластинка, 6 — стальной корпус, 7 — изолятор

электрода. По всем этим причинам экономичность сухих аккумуляторов, безусловно, ниже обычных, однако это с избытком возмещается тем удобством, что процесс зарядки не нуждается в контроле.

Сухие аккумуляторы могут изготавливаться маленькими, величиной почти с кнопку, откуда и пошло их название «кнопочные» аккумуляторы. Такие герметично закрытые щелочные аккумуляторы применяются в транзисторных приемниках, телефонных аппаратах, карманных фонариках, слуховых аппаратах и пр.

В последнее время для специальных целей, где требуется высокая удельная энергоемкость, работа при низких температурах (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), длительное нахождение в разряженном состоянии без потери работоспособности, применяют серебряно-цинковые аккумуляторы. Отрицательный электрод изготавливается из цинка, положитель-



ный — из окиси или перекиси серебра. Электролитом служит едкое кали. До 50-х годов считалось, что серебряно-цинковый аккумулятор не приспособлен к длительной работе, и использовался он лишь в качестве резервного, когда требовались кратковременно очень большие токи. Однако в последнее время эти аккумуляторы существенно усовершенствовались: самозаряд их значительно уменьшен, КПД доведен до 85%, а долговечность увеличена. Максимальное напряжение при заряде 2,1 В; при разряде допускается понижение до 1 В. Обычно напряжение при разряде стабильно и составляет приблизительно 1,5 В.

Из-за высокой стоимости серебра эти аккумуляторы применяются лишь в исключительных случаях, когда важно иметь малые массу и объем, а также высокие значения токов и КПД.

В последнее время для увеличения удельных энергетических и мощностных показателей пытаются создать аккумуляторы с использованием веществ, обладающих высокими энергетическими свойствами. Таким веществом является натрий (или литий), находящийся в аккумуляторе в расплавленном состоянии и реагирующий там с серой или хлором при температуре выше 300° С. Такие энергетические элементы уже созданы, но лишь немногие из них «доведены» до размеров нормальных аккумуляторов. Очень мешает использованию этих аккумуляторов интенсивная коррозия их герметизирующих оболочек. Изыскания направлены как раз на создание материалов, способных выдержать такие сверхтяжелые эксплуатационные условия. Неудобно и то, что для работы этих аккумуляторов необходима столь высокая температура.

«Супераккумуляторы», позволяющие обеспечить удельную энергоемкость 110—220 Вт·ч/кг, реального применения пока иметь не могут, однако они постоянно совершенствуются, считаются перспективными, и поэтому мы кратко рассмотрим их устройство и принцип действия.

Наибольший интерес, несомненно, представляют попытки создать серно-натриевый аккумулятор. У него удельная мощность очень высока: 200—220 Вт/кг, что связано с небольшим эквивалентным весом натрия и серы.

Отличительная особенность серно-натриевого аккумулятора (например, разрабатываемого американской фир-



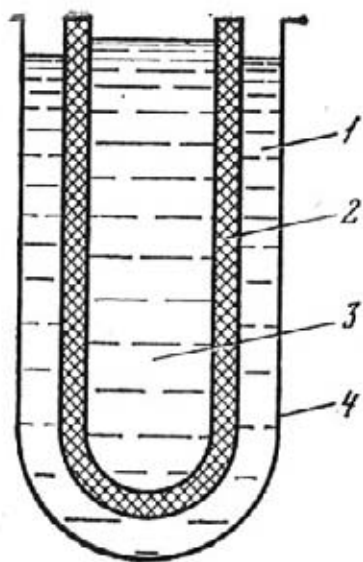
мой «Форд») заключается в том, что в рабочем состоянии и сера, и натрий находятся в жидком виде, в то время как роль электролита выполняет твердая керамическая мембрана, изготовленная из специального материала на основе алюминия. Главным свойством мембраны является способность пропускать только ионы натрия, в то время как для ионов серы и атомов обеих составляющих пары она непроницаема. При разряде атомы центрального катода, в качестве которого используется натрий в расплавленном состоянии, превращаются в анионы, проходят через твердый керамический электролит и вступают в реакцию с серой, которая электропроводна и также находится в расплавленном состоянии. Электрохимическая реакция протекает с достаточной интенсивностью лишь при нагреве серно-натриевого гальванического элемента до температуры  $250^{\circ}\text{C}$ — $300^{\circ}\text{C}$ , несмотря на то, что натрий плавится при температуре  $97^{\circ}\text{C}$ , а сера — при  $113^{\circ}\text{C}$ — $119^{\circ}\text{C}$ . Такое повышение температуры необходимо для того, чтобы сопротивление керамики, зависящее от температуры, уменьшилось до величины, соизмеримой с сопротивлением обычных кислотных или щелочных электролитов. Подогрев нужен, чтобы началась реакция, при работе элемента необходимая температура поддерживается за счет выделяемого аккумулятором тепла. ЭДС элемента непостоянна и имеет сперва значение 2,08 В, а затем постепенно падает до 1,76 В.

Необходимость подогрева перед работой является существенным недостатком серно-натриевого аккумулятора. Кроме того, сера и натрий огнеопасны, что требует строгого соблюдения мер безопасности при эксплуатации. Натрий в твердом и расплавленном состоянии вступает в реакцию с водой, которая протекает быстро и носит характер взрыва. При контакте расплавленной серы с воздухом образуется ядовитый сернистый газ.

К преимуществам серно-натриевого элемента можно отнести высокие удельные характеристики, небольшую стоимость, обусловленную недефицитностью применяемых материалов, отсутствие газовыделения и возможность в связи с этим полной герметизации батареи, а также простоту заряда.

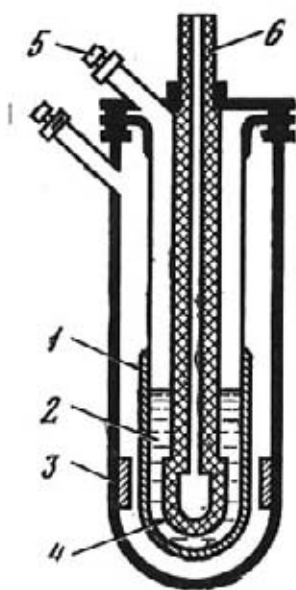
В хлорно-литиевом аккумуляторе электроэнергия освобождается в процессе химического воздействия газообразного хлора и лития. Хлор подается через отверстие в





**Серно-натриевый аккумулятор**

- 1 — жидкая сера,
- 2 — ионообменная керамика,
- 3 — жидкий натрий,
- 4 — сосуд



**Хлорно-литиевый аккумулятор**

- 1 — сепаратор хлора,
- 2 — хлористый литий,
- 3 — литиевый электрод,
- 4 — хлорный электрод,
- 5 — вывод газов,
- 6 — ввод хлора

трубке из пористого графита, служащей анодом, и через поры проникает в область жидкого лития, где, соединяясь с ним, образует хлорид, а избыток хлора удаляется через отвод. Хлорид лития имеет температуру плавления  $315^{\circ}\text{C}$ , поэтому, как и в случае серно-натриевого аккумулятора, рабочая температура его высока и находится в пределах  $320\text{--}640^{\circ}\text{C}$ .

Удельная энергоемкость аккумулятора высока и может достигать  $330\text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$ , а его стоимость, по предварительным оценкам, будет в 3 раза выше, чем свинцово-кислотных аккумуляторов. Этот аккумулятор во многом походит на серно-натриевый. Однако у него имеется недостаток, являющийся следствием циркуляции хлора: система подачи и удаления должна выполняться с особой тщательностью во избежание отравления атмосферы.

Медно-литиевый элемент имеет катод, выполненный из медного сплава, и литиевый анод. Теоретически плотность энергии такого элемента достигает  $1100\text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$  по сравнению с  $485\text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$  для серебряно-цинковых и  $255\text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$  для свинцово-кислотных аккумуляторов. Практически плотность энергии медно-литиевых батарей в 1,5—2,4 раза выше, чем у серебряно-цинковых, и в 12—20 раз выше, чем у свинцовых.

Эти результаты получены с применением органического электролита с относительно высокой электропроводностью, допускающего обратимость реакций на



электродах, а также благодаря разработке электрода из пористого лития. В новых батареях можно создать плотность тока, в 10–12 раз более высокую, чем у существующих электрохимических пар. В изготовленных образцах небольшой емкости получена плотность энергии на 50% выше, чем в серебряно-цинковых батареях, а в батареях большей емкости можно получить плотность энергии от 463 до 507 Вт·ч/кг. Практически такие батареи имеют удельную энергию от 264 до 353 Вт·ч/кг, в то время как для воздушно-цинковых аккумуляторов этот показатель не превышает 175 Вт·ч/кг.

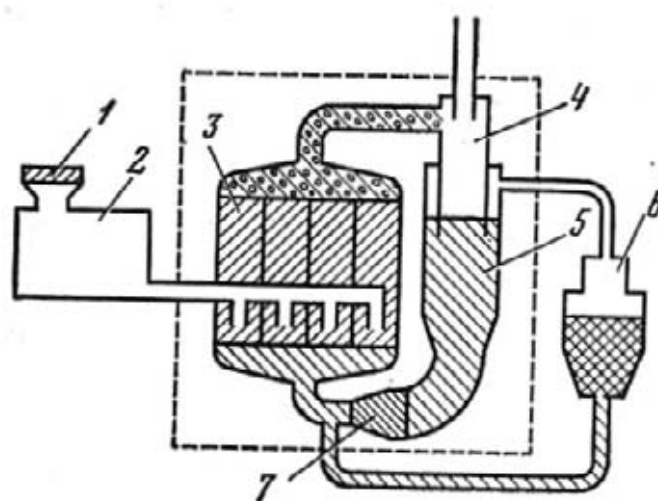
Имеется сообщение о работах по созданию литиево-никельгалоидной аккумуляторной батареи. Литиево-никельгалоидный гальванический элемент полностью герметизирован и состоит из лития и нетоксичного неорганического фтористого соединения никеля. Процесс зарядки у него длится всего несколько минут, срок службы составляет несколько тысяч циклов зарядов-разрядов. Отмечается, что работы по созданию литиево-никельгалоидного гальванического элемента ближе к завершающей стадии, чем у других перспективных аккумуляторных батарей.

В воздушно-цинковых системах электроэнергия получается за счет реакции окисления цинкового анода кислородом воздуха. Важным преимуществом этой системы является то обстоятельство, что при работе ее используется кислород атмосферы и отпадает необходимость в его хранении. Таким образом, запас энергии в этой системе определяется количеством цинка, способного вступить в реакцию.

На основе системы воздух—цинк могут быть выполнены как аккумуляторы, так и топливные элементы. В первом случае окись цинка восстанавливается на аноде до металла за счет пропускания зарядного тока, а во втором — израсходованные аноды заменяются новыми, и процесс выработки энергии продолжается в том же порядке.

Одна из возможных схем воздушно-цинковой аккумуляторной батареи следующая. Элементы батареи продуваются воздухом через катод из пористого никеля при помощи вентилятора, на входе которого установлен фильтр. В результате продувки кислород воздуха окисляет цинковую поверхность анода, а его избыток и азот после сепаратора уходят в атмосферу. Электролит в этом





**Воздушно-цинковый аккумулятор**

- 1 — фильтр очистки воздуха,
- 2 — воздушный компрессор,
- 3 — рабочие элементы,
- 4 — воздушный сепаратор,
- 5 — резервуар с электролитом,
- 6 — фильтр для окиси цинка,
- 7 — насос для подачи электролита

аккумуляторе также прокачивается через элементы батареи с помощью насоса и уносит окись цинка, в результате чего обеспечивается хороший доступ кислорода к металлической поверхности цинкового анода, свободной от продуктов реакции. Удаление окиси цинка прокачкой электролита снижает внутреннее сопротивление элемента и способствует увеличению допустимой плотности тока до  $250 \text{ мА/см}^2$ , поскольку элементы интенсивно охлаждаются. Избыток окиси цинка в электролите осаждается в фильтре и при заряде переносится на анод, где восстанавливается до металлического цинка, а образовавшийся на катоде кислород уходит в атмосферу.

Зарядку аккумуляторной батареи можно осуществить в течение часа, однако для увеличения срока ее службы время зарядки необходимо увеличить, по крайней мере, до 8 ч. Значительную трудность представляет явление насыщения электролита двуокисью углерода из атмосферы, в результате чего после 400 ч работы эксплуатационные свойства батареи заметно ухудшаются и может потребоваться дополнительная установка фильтров для очистки воздуха от углекислоты или разработка процесса очистки от нее анода.

Воздушно-цинковые элементы имеют высокую энергоемкость (110—175 Вт·ч/кг при использовании их в качестве аккумулятора и до 330 Вт·ч/кг в качестве топливных элементов) и хорошие разрядные характеристики, сохраняющиеся в широком диапазоне температур до  $-40^\circ \text{C}$ .

Недефицитность сырья, отсутствие затруднений при использовании, небольшая потребность в дополнительных устройствах позволяют рассчитывать на получение

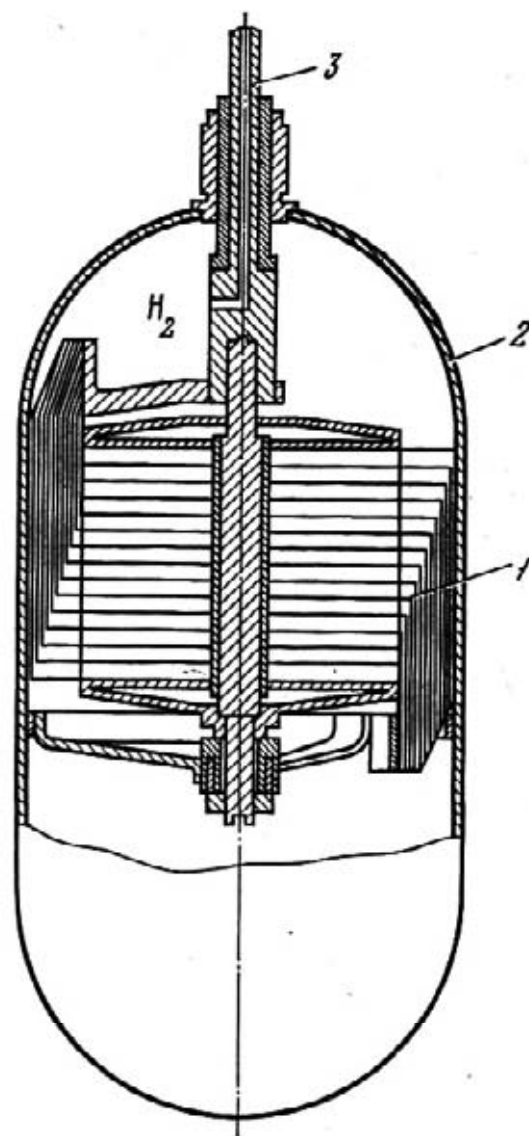


элементов с конкурентоспособной стоимостью, что в сочетании с высокими эксплуатационными показателями делает эту систему весьма перспективной для применения в качестве источника энергий электромобиля.

При хорошей герметизации эти элементы допускают хранение, однако после начала разряда они должны быть использованы в течение определенного срока — две-три недели. Проблема создания воздушно-цинковых аккумуляторов очень заманчива, но и очень сложна.

Довольно перспективен вариант аккумулятора комбинированного типа: никель-водородный. Он очень удобен тем, что по величине давления газа можно просто и точно определить степень его разряженности (это важно для ряда областей применения). Несмотря на тяжелый корпус, удельная энергоемкость аккумулятора достигает 60 Вт·ч/кг. Ожидается, что срок его службы будет больше 1000 зарядно-разрядных циклов.

Никель-цинковые аккумуляторы по удельным характеристикам находятся между серебряно-цинковыми и железо-никелевыми. Отрицательный электрод никель-цинкового аккумулятора конструктивно аналогичен отрицательному электроду серебряно-цинкового, а в качестве положительного электрода может применяться прессованный или керамический окисно-никелевый, изготовленный по технологии производства кадмий-никелевых аккумуляторов. В качестве электролита используется раствор едкого кали плотностью 1,25—1,30 г/см<sup>3</sup>.



Никель-водородный аккумулятор

1 — электроды, 2 — корпус,  
3 — токовыводы



В результате исследовательских работ были получены довольно высокие удельные электрические показатели, достигающие до 55 Вт·ч/кг, которые путем различных усовершенствований могут быть доведены до 85—100 Вт·ч/кг, однако срок службы не удалось поднять выше 150 зарядно-разрядных циклов. Причинами выхода из строя аккумуляторов были разрушение сепараторов и короткие замыкания между пластинами.

Высокие удельные характеристики, недефицитность и относительная дешевизна применяемых материалов, простота конструкции делают никель-цинковые аккумуляторы весьма перспективными для электромобиля. Применение их в качестве источника энергии практически решило бы проблему использования электромобилей с запасом хода до 120—150 км, однако для этого необходимо провести работы по значительному увеличению срока их службы.

Описанные источники тока по своим показателям заметно превосходят существующие, тем не менее этого недостаточно для ряда важных областей применения. Примерно так же обстоит дело с созданием так называемых топливных элементов, позволяющих превращать энергию химически активных веществ непосредственно в электрическую.

Некоторые исследователи (например, Т. Эрдеи-Груз\*) считают, что топливные элементы занимают промежуточное положение между гальваническими элементами и аккумуляторами; другие (например, Н. С. Лидоренко, Г. Ф. Мучник), что топливные элементы существенно отличаются от гальванических элементов и аккумуляторов. Они относят принцип работы топливных элементов (или, как их называют, электрохимических генераторов — ЭХГ) скорее к машинным, чем к аккумуляторным схемам. Однако те же авторы предполагают разработки электролизеров воды с электродами из пористого никеля, состыкованными с ЭХГ, с одними и теми же исходными и конечными продуктами реакции. Предполагается достаточно широкое комбинированное применение этих агрегатов. Такое устройство, пожалуй, уже может быть отнесено к электрохимическим аккумуляторам. По мнению В. С. Багоцкого, топливные элементы в

\* См.: Эрдеи-Груз Т. Химические источники энергии. М.: Мир, 1974.



сочетании с электролизерами воды и стационарными газгольдерами представляют очень удобные аккумуляторы для накопления больших количеств электроэнергии. Гигантские аккумуляторы с успехом могут быть использованы совместно с электрогенерирующими установками непостоянного действия, например: с ветровыми, солнечными или приливными электростанциями. Общая энергоемкость такой аккумулирующей установки зависит только от величины газгольдеров. Мощные водородно-кислородные топливные элементы, у которых КПД преобразования намного выше, чем у любых тепловых машин, представляют один из высокоэффективных способов обратного преобразования энергии водорода в электрическую.

Основными составными частями топливного элемента являются анод, катод, электролит и органы управления. Свободная энергия реакции, осуществляемой в топливном элементе, превращается в нем в электрическую энергию.

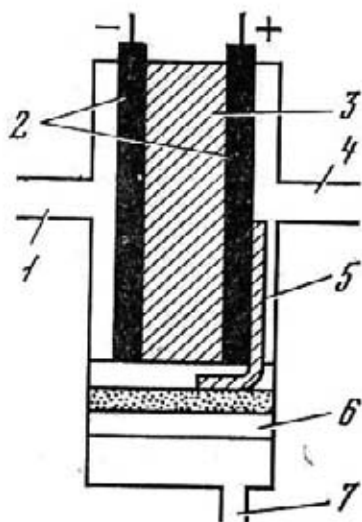
Топливные элементы можно подразделить на высоко-, средне-, низкотемпературные. К первым относятся элементы, использующие в качестве электролита расплавленные соли при температуре  $600^{\circ}\text{C}$ — $650^{\circ}\text{C}$ , ко вторым — водородно-кислородные элементы типа элемента Бэкона, работающие при  $200^{\circ}\text{C}$ , и к третьим — водородно-кислородные системы, работающие при температуре кипения водного электролита.

По типу электролита элементы можно подразделить на щелочные и кислотные, а по состоянию электролита — на элементы с жидким, твердым электролитом и электролитом в мембранах. В последнем случае применяются асбестовые капиллярные или ионообменные мембраны.

Топливные элементы можно классифицировать и по агрегатному состоянию топлива. В качестве газообразного топлива применяется водород, жидкого — спирт, твердого — уголь или металлы.

Окислителями в топливных элементах служат в основном кислород, воздух и перекись водорода. Кислород и воздух обычно могут быть взаимозаменяемы, однако замена кислорода воздухом в низкотемпературных элементах, как правило, влечет за собой снижение мощности на 40—50%.





**Водородно-кислородный топливный элемент**

1 — подача водорода, 2 — электроды, 3 — ионнообменная мембрана, 4 — подача кислорода, 5 — фитиль, 6 — сепаратор воды, 7 — удаление воды

Разрабатываются также возможности использования водорода, выделяемого из спирта, аммиака и углеводов. Изучаются также системы, в которых применяются борогидрид натрия, гидрид лития, гидразин лития, гидразин, спирт и аммиак непосредственно.

К настоящему времени лучше всего разработаны низкотемпературные топливные элементы низкого давления, поэтому рассмотрим их более внимательно.

В водородно-кислородном элементе водород ионизируется на поверхности отрицательного электрода-катализатора, а кислород — положительного. Водород и кислород поступают на поверхность электродов по трубопроводам. Ионы водорода, проходя че-

рез мембрану, соединяются с ионами кислорода, и образующаяся вода через фитиль удаляется из элемента.

Водородно-кислородные топливные элементы имеют самое высокое теоретическое значение удельной энергии (3650 Вт·ч/кг). Однако при определении фактического значения их удельной энергии необходимо учитывать как массу самого генератора (батарея элементов с вспомогательным оборудованием), так и запас активных веществ (топливо и окислитель). Масса самой батареи зависит только от полной расчетной мощности данной установки и от удельной мощности батареи данного типа (равна их отношению), но не зависит от расчетной длительности работы, а вес активных веществ с увеличением последнего показателя возрастает. Соотношение этих двух составляющих зависит от расчетной длительности работы: при коротких режимах преобладает масса батареи, а при длительных — вес активных веществ (включая тару).

Таким образом, фактическая удельная энергия всей установки в целом зависит от расчетной длительности работы, возрастая с ее увеличением. Следовательно, понятие удельной энергии для водородно-кислородных топлив-



ных элементов является определенным только в связи с указанием режима (длительности) работы элементов.

Возможны два варианта выполнения силовых установок топливных элементов. В одном из них (наиболее простом) газы подаются к электродам топливных элементов без циркуляции. В этом случае нужны только насос для электролита, радиатор, вентилятор и регуляторы давления газов. Недостатками этой системы являются необходимость периодической смены электролита, трудность пуска элементов и снижение пиковой мощности.

Во втором варианте добавляются вспомогательные устройства для поддержания постоянной концентрации электролита. Рециркуляция водорода и кислорода улучшает распределение газов и работу элементов. Конденсаторы в газовых магистралях отделяют воду от газов, а температура электролита регулируется радиатором и термостатом. Таким образом, поддерживается нужная концентрация электролита.

Водородный контур состоит из криогенного баллона, испарителя, регулятора давления, рециркуляционного насоса и конденсатора для воды. Поступающий из баллона жидкий водород превращается в газ в комбинированном испарителе-перегревателе, погруженном в электролит. Регулятор поддерживает постоянное давление перед насосом, перекачивающим водород через электроды топливных элементов и конденсатор, для отделения воды, равномерного распределения газа и его охлаждения.

Электролитный контур состоит из насоса, радиатора, термостатного перепускного клапана, бака и газовыделителя. Основным назначением этого контура является удаление тепла, выделяемого в топливных элементах, и регулирование их температуры. Таким же образом регулируется и выделение воды из электролита. Циркулирующий электролит, кроме того, переносит просачивающиеся через электроды газы к газоотделителю, из которого они выходят в атмосферу.

В кислородном контуре имеется криогенный баллон, испаритель, регулятор давления и инжекционный насос. Жидкий кислород также проходит через испаритель-перегреватель, погруженный в электролит, и через регулятор давления, комбинированный с инжекционным насосом. Охлажденный воздух прогоняется вентилятором через конденсатор и радиатор электролита: 15% всего тепла



отбирается в конденсаторе водородного контура и 25% — в радиаторе электролита.

В силовой установке выделяется 0,45 кг воды на 1 кВт·ч произведенной электроэнергии.

Одним из наиболее активных видов топлива, используемых в топливных элементах, является гидразин. Кроме того, при нормальных условиях гидразин — жидкость, что значительно упрощает проблему его хранения. Это определяет перспективность применения разрабатываемых в настоящее время гидразино-кислородных элементов.

Гидразинный топливный электрод состоит из двух пластин, прикрепленных к рамке эпоксидной смолой. К пластинам припаяны два полых штуцера, которые служат токоотводами. Раствор гидразина подается через эти штуцеры и по узкой трубке попадает на дно электрода. Азот, являющийся единственным продуктом реакции, собирается внутри электрода и удаляется через отверстие в штуцере. Кислородные электроды по конструкции аналогичны гидразинным и изготовлены из пористого угля. Элемент состоит из пяти кислородных и четырех гидразинных электродов, помещенных в контейнер из полистирола. Штуцеры на электродах выведены через отверстия в крышке и изолированы от нее при помощи прокладок из нитрильного каучука.

В США разработана батарея гидразино-кислородных элементов для питания электротележки. Оба электрода в элементах изготовлены из пористого (80%) никеля. Положительный электрод гидрофобизируется и активизируется серебром, его толщина 1,5 мм. Лучший катализатор для отрицательного электрода — палладий, его толщина 0,8 мм. Рабочая поверхность электродов  $44 \text{ см}^2$  ( $6,7 \times 6,7 \text{ см}$ ), а размер элемента  $7,6 \times 7,6 \text{ см}$ . Между электродами расположена асбестовая мембрана, пропитанная электролитом и покрытая по краям воском для обеспечения герметичности элемента. Электролит — 25%-ный раствор едкого кали, к которому добавляется 3—6% гидразина. Этот раствор циркулирует в системе при температуре  $70^\circ \text{C}$  и подается в элемент с обратной стороны отрицательного электрода.

При работе описанного элемента реализовались плотности тока до  $100 \text{ мА/см}^2$ , а при общем КПД 40% удельная энергия составила  $2000 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$  на 1 кг гидразина.



Электротележка, питаемая батареей, проработала в общей сложности 175 ч.

Основные недостатки гидразина — его высокая стоимость и токсичность.

В настоящее время в ряде стран с высоким промышленным потенциалом проводится большой комплекс работ по возможному применению водородно-кислородных топливных элементов для хозяйственных задач, и прежде всего для транспортных средств — электромобилей. Пока широкое применение электромобилей сдерживается отсутствием приемлемого по своим удельным мощностным и энергетическим характеристикам источника движения. Начальная стоимость и эксплуатационные затраты его должны быть соизмеримы с подобными характеристиками двигателей внутреннего сгорания современных автомобилей. Чтобы обеспечить применение аккумуляторных силовых агрегатов на автомобиле, необходимы удельная энергия порядка 100—200 Вт·ч/кг и удельная мощность 100—200 Вт/кг.

Есть все основания предполагать, что использование энергии, аккумулированной в искусственно полученном водороде, как и в других аккумуляторах энергии — маховичных, электрических, тепловых, в течение ближайших 20—30 лет будет доведено до необходимого технического уровня. Это приведет к широкому использованию аккумулированной энергии в глобальном масштабе, особенно с учетом их основных достоинств экологического плана.

## ЭЛЕКТРОМОБИЛИ

Не следует думать, что электромобили, т. е. экипажи, движущиеся энергией, накопленной в электрохимическом аккумуляторе, являются новинкой. В 1898 г. француз Ж. Шасслу-Лоба достиг на электромобиле скорости 63 км/ч, а годом позже бельгийский электрический автомобиль (гонщик К. Иенатци), оборудованный аккумуляторной батареей массой около 2 т, установил мировой рекорд скорости на суше — 105,9 км/ч. Интересно, что в начале нашего века в Чикаго, например, число электромобилей более чем вдвое превышало число машин с бензиновыми двигателями.



В России впервые пригодный для эксплуатации электромобиль был построен инженером И. В. Романовым в Петербурге в 1902 г. Им же были построены первые электробусы вместительностью 15 человек и предложен обширный план использования электробусов для городских перевозок пассажиров.

В 1936 г. под руководством В. Е. Розенфельда были построены первые советские опытные электромобили, а в 1944 г. по инициативе И. С. Ефремова были построены первые троллейэлектробусы, т. е. машины, могущие работать в режиме как троллейбуса, так и электробуса. На Ленинградском почтамте использовались для перевозки почты электромобили фургонного типа грузоподъемностью 0,5 и 1,5 т.

В 1959 г. на базе троллейбусов в нашей стране были построены аккумуляторные электробусы. Такой электробус, оборудованный железно-никелевой аккумуляторной батареей массой 4 т, развивал скорость 30 км/ч и обладал радиусом действия 50 км.

В годы второй мировой войны немцы использовали электромобили для военных целей: это были дистанционно управляемые самоходные малогабаритные электротанкетки, несущие заряд взрывчатки.

В настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом над созданием электромобилей работает большое число научных и инженерных коллективов. В ряде стран электромобильный транспорт уже получил широкое развитие: легковые электромобили, таксомотory, электромобили для обслуживания торговой сети, для почтовых перевозок, мусоровозы, поливочные и подметальные машины и т. п. В США, например, на разработку и определение возможности коммерческого производства электромобилей ассигнованы значительные средства. Первые стандарты, регламентирующие эксплуатационные характеристики этих машин, были разработаны весной 1978 г. А, согласно постановлению конгресса США, к началу 1979 г. должны быть выпущены первые 2500 электромобилей массового пользования, за последующие 5 лет — еще 5 тыс. таких машин. Эти электромобили, в отличие от более примитивных старых моделей, будут содержать такие новшества, как вспомогательные супермаховики, рекуперативные тормозные системы, электронные системы управления мощностью машины и микрокомпьютеры



размером со спичечный коробок, регулирующие подачу энергии из аккумуляторов и маховика в электродвигатели.

На роли маховика в электромобилях, как и в обычных автомобилях, в качестве дополнительного аккумулятора-двигателя мы остановимся ниже. Сейчас лишь отметим, что с помощью маховиков (вернее, супермаховиков) электромобиль может интенсивно разгоняться, обгонять другие машины, осуществлять подъем в гору, а также рекуперировать энергию торможения, что почти вдвое удлинит его пробег в городе.

Специалисты считают, что к 2000 г., т. е. фактически через 20 лет, на дорогах США будет курсировать 20 млн. электромобилей. Электромобиль станет массовым средством передвижения, что потребует производства в огромных масштабах аккумуляторов энергии: электрохимических, маховичных, а возможно и других типов. В наш век может все так быстро измениться!

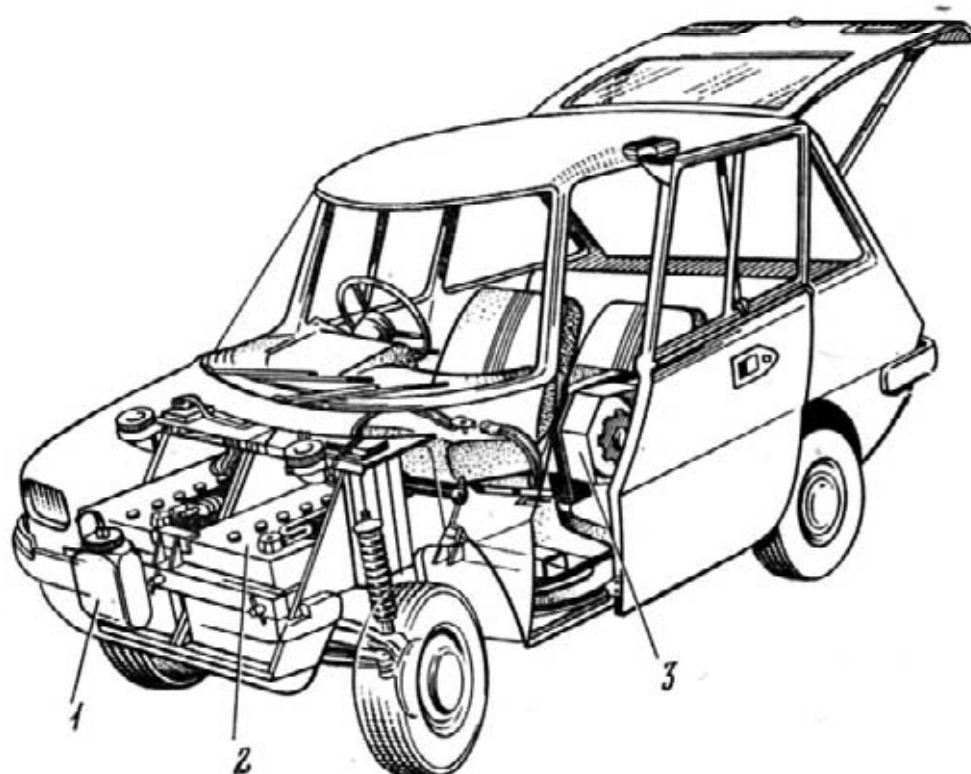
В чем же преимущества электромобилей? В основном в их экологической безвредности — они совершенно не загрязняют атмосферу, не сжигают горючего. Стоимость энергии, затрачиваемой электромобилем, на 60—80% ниже стоимости энергии горючего, расходуемого автомобилем. В дальнейшем, особенно с применением маховичных рекуператоров, стоимость каждого километра пробега электромобиля будет еще более снижаться. По утверждению американских специалистов на основе семилетнего опыта эксплуатации электромобиля, расход электроэнергии составляет всего 1,5 цента на милю пробега, в то время как бензин обходится в 4 цента на милю. Однако сами аккумуляторы пока еще дороги.

Сегодня в США эксплуатируется более полумиллиона электрических автомашин самого различного назначения. Не менее четырех компаний регулярно выпускают электромобили первого поколения, и более 100 других фирм занимаются исследованием и разработкой подобных машин. Типичный электромобиль 1977 г. управляется почти так же, как обычный автомобиль. В нем установлен прибор, показывающий уровень зарядки аккумуляторов (вместо указателя уровня бензина). Двигатель электромобиля автоматически выключается при красном сигнале светофора, чтобы избежать таким образом напрасного расхода энергии.



Но, несмотря на шумную и многолетнюю рекламу этих электромобилей, владельцы жалуются на них. Электромобили первого поколения не могут «вписаться» в обычное движение. Они очень медленно ускоряются при трогании с места, развивают небольшие скорости, особенно при подъеме в гору. Необходима регулярная перезарядка аккумуляторов.

Сегодня средний (не рекламный!) электромобиль обладает максимальной скоростью 80 км/ч и дальностью пробега между перезарядками 50—60 км. А для того чтобы электромобиль мог составить конкуренцию автомобилю с бензиновым двигателем, согласно анализу Национальной академии наук США, так называемая семейная модель машины должна иметь дальность пробега свыше 300 км и среднюю (а не максимальную) скорость до 90 км/ч. В качестве первой партии электромобилей второго поколения в США хотят видеть машину, которая имела дальность пробега хотя бы 120 км, максимальную скорость — 90 км/ч и ускорялась с 16 до 48 км/ч за 10 с. Перезарядка аккумуляторов не должна превышать



Электромобиль «Энфилд-465» (Англия)

1 — зарядное устройство, 2 — аккумуляторная батарея, 3 — тяговый электродвигатель



6 ч. Стоить такая машина должна не более 5 тыс. долл. (в ценах 1975 г.). Вторая модель, которая должна появиться к 1984 г. будет иметь дальность пробега около 160 км и, что более важно, в ней будут внедрены технические новшества (супермаховики и пр.), о которых говорилось выше.

Главнейшей проблемой в создании эффективных электромобилей являются, безусловно, аккумуляторы. Сейчас автомобильный аккумулятор массой 5,5 кг накапливает такое же количество энергии, какое заключено в рюмке бензина. Паллиативным решением, по-видимому, могут стать никель-цинковые аккумуляторы, способные обеспечить около 40 Вт·ч на 1 кг массы и 800—1000 циклов перезарядки. Но на создание такой системы потребуется около 5 лет.

Между тем системы аккумуляторов, пригодные для коммерческого использования в электромобилях сегодняшнего дня, чтобы обеспечить нормальное движение в городе, будут весить не менее половины всего автомобиля.

Таково реальное положение вещей с электромобилями, пригодными для массового выпуска. Но оптимизма терять не стоит. Электромобиль, или, во всяком случае, автомобиль, работающий на аккумуляторной, экологически безвредной энергии и способный заменить сегодняшний автомобиль, обязательно будет создан до конца нынешнего тысячелетия. Что в них будет служить источником энергии — электрохимические аккумуляторы, маховики, топливные элементы или вообще двигатели, работающие на водороде, — сказать пока трудно. Возможно, это будет какой-то иной тип аккумулятора энергии или «безвредного» двигателя, а может быть, их симбиоз. Короче говоря, над такими машинами надо еще работать и работать, чтобы «довести до ума».

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ АККУМУЛЯТОРЫ

«Чистая» электрическая энергия может быть накоплена в аккумуляторах на основе конденсаторов и катушек индуктивности. Конденсаторы, или электростатические накопители энергии, обладают свойством накапливать и сохранять на своих электродах (обкладках) равные по



величине и противоположные по знаку электрические заряды. Электрический заряд  $Q$  каждой из оболочек пропорционален напряжению  $U$  между обкладками, где коэффициент пропорциональности служит электрическая емкость конденсатора  $C$ . Электрическая емкость является одним из основных параметров конденсатора; она зависит от формы и размеров обкладок-электродов, их взаимного расположения и расстояния между ними, а также от свойств диэлектрика, разделяющего обкладки. Емкость конденсатора измеряют в фарадах (по имени английского ученого Майкла Фарадея), это — очень большая единица, и обычно пользуются размерностью в миллион раз меньшей — микрофарадой. Емкость конденсатора можно сильно увеличить, подбирая соответствующие диэлектрики, разделяющие обкладки.

Обычно промышленностью выпускаются конденсаторы емкостью до 1000 мкФ с номинальными напряжениями до 100 кВ. Конденсаторы можно соединять параллельно в батареи, тогда общая емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.

При увеличении напряжения на конденсаторе увеличиваются заряды на его обкладках и напряженность поля в диэлектрике, разделяющем обкладки. При этом аккумулярованная в конденсаторе энергия увеличивается. Энергия, накопленная в электрическом поле конденсатора, определяется по формуле

$$W_k = C \frac{U^2}{2}.$$

Как мы увидим далее (см. гл. III), эта формула очень похожа на выражение, определяющее энергию статического аккумулятора механической энергии. Таким образом, конденсатор и, например, пружина — аналоги, что часто используется в моделировании механических явлений электрическими.

Энергию, накопленную в конденсаторе, можно переводить в тепло, получая при этом необходимую работу. Удельная энергия обычных конденсаторов невелика. Например, при емкости конденсатора 10 мкФ и напряжении 300 В накопленная в нем энергия составляет менее половины джоуля. Поскольку этот конденсатор (очень распространенный в радиотехнике) имеет обычно массу несколько десятков граммов, то удельная энергия будет



около 10 Дж/кг. Однако специально выполненные конденсаторы даже обычных типов могут иметь емкость, а стало быть, и накопленную энергию, в десятки раз выше при той же массе. Практика показывает, что хорошо выполненные пружинный и конденсаторный аккумуляторы энергии имеют примерно равную удельную энергоемкость.

Следует отметить, что в последнее время достигнуты большие успехи в накоплении энергии конденсаторными аккумуляторами. При этом создатели новых типов идут на всевозможные ухищрения, чтобы повысить емкость конденсаторов. Например, в Японии в 1976 г. был создан конденсатор из... активированного угля. Известно, что активированный уголь имеет огромную поверхность в единице объема, что и важно для конденсатора. Электролитом здесь служит раствор соли щелочных металлов в органическом растворителе. Удельная емкость такого конденсатора была доведена почти до 10 Ф на 1 см<sup>3</sup>, что почти в сто миллионов раз превышает емкость обычных конденсаторов. Каждый кубический сантиметр такого конденсатора может накопить 1,22 Дж энергии (примерно 1 кДж/кг). Это, конечно, немного по сравнению с другими типами аккумуляторов, но на один-два порядка выше, чем у обычных конденсаторов. Надо сказать, что и это не предел. Специалисты определили теоретическую удельную энергоемкость конденсаторов в 1 Вт·ч/кг, или 3,6 кДж/кг. Но вполне вероятно, что в лабораториях ученых уже имеется реальный конденсатор с удельными характеристиками, превышающими предполагаемые теоретические значения.

Кроме статических (конденсаторных) накопителей, электрическую энергию можно аккумулировать в динамических накопителях, так называемых катушках индуктивности, состоящих из витков проводника, по которому течет ток. При прохождении тока в цепи каждый виток катушки пронизывается собственным потоком самоиндукции, представляющим собой магнитный поток. При постоянной магнитной проницаемости среды магнитный поток, т. е. сумма потоков самоиндукции всех витков катушки, пропорционален протекающему в витках току  $I$ . Коэффициент пропорциональности  $L$  между этими величинами называется индуктивностью. Единицей индуктивности является генри, названная по имени американского физика Джозефа Генри. Как и фарада, генри — также



крупная единица, поэтому на практике применяют ее тысячные или миллионные доли.

Индуктивность катушки зависит от ее размеров, числа витков и магнитной проницаемости среды, главным образом сердечника катушки.

С возрастанием тока в катушке индуктивности в окружающем пространстве создается магнитное поле, в котором аккумулируется энергия, затраченная внешним источником. Эта энергия определяется формулой

$$W_{\text{и}} = L \frac{I^2}{2} .$$

Накопление энергии в катушке индуктивности очень похоже на ее накопление в механических динамических аккумуляторах-маховиках. Как и в маховиках, энергия в катушке индуктивности может существовать только при движении (в данном случае электронов), т. е. в динамике. При моделировании обычно индуктивность считают аналогом момента инерции или массы, а ток — скорости, угловой или линейной. Тогда катушка индуктивности является полнейшим электрическим аналогом маховика и энергия в них накапливается по одним и тем же законам.

Особо большие количества энергии можно накопить в индуктивных аккумуляторах, если применять накопители энергии, основанные на явлении сверхпроводимости.

Из физики известно, что с понижением температуры электрическое сопротивление металлических проводников уменьшается. В 1911 г. голландский ученый Каммерлинг-Оннес обнаружил, что столбик ртути, охлажденный до температуры 4,2 К, полностью теряет электрическое сопротивление. Даже самые точные приборы не обнаруживают ни малейших признаков затухания тока в течение долгого времени. Сверхпроводимость была обнаружена также у свинца, олова, цинка, алюминия и других металлов. Открытие сверхпроводимости породило большие надежды на создание сверхмощных магнитных систем. Однако вскоре оказалось, что перечисленные сверхпроводники, названные сверхпроводниками первого рода, уже при небольших токах или магнитных полях теряли свойство сверхпроводимости.

В 1961 г. американский физик Кунцлер испытал сверхпроводник второго рода — проволоку из сплава ниобия с оловом. По ней удалось пропустить ток громад-



ной плотности —  $1000 \text{ А/мм}^2$ . Даже самый сильный из имевшихся тогда электромагнитов не смог разрушить этой сверхпроводимости. С этого момента началось лавинообразное нарастание количества работ по прикладной сверхпроводимости: уже известно более тысячи сверхпроводников второго рода.

Учеными разрабатываются сверхпроводящие индуктивные аккумуляторы, созданные таким образом, чтобы запастись и сохранять без потерь как можно больше энергии. Если сравнивать объемы электрических накопителей энергии, то окажется, что объем сверхпроводящего индуктивного накопителя в 7 раз меньше, чем у конденсаторной батареи.

Одна из первых моделей индуктивного аккумулятора энергии была успешно испытана в 1970 г. в Институте высоких температур АН СССР. В сверхпроводящем соленоиде была накоплена энергия в  $10^4$  Дж. Удельная энергоемкость индуктивных аккумуляторов оценивается в  $10 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ , или  $40 \text{ кДж/кг}$ .

Специалисты возлагают большие надежды на возможность создания мощного сверхпроводящего индуктивного аккумулятора. В одном из проектов французских ученых в гигантский криостат (сосуд для сохранения веществ при сверхнизких температурах) помещена тороидальная катушка из сверхпроводника, стабилизированного медью или алюминием. Криостат заполнен жидким гелием с так называемым азотным экраном. Азотный экран — это слой жидкого азота, помещаемый обычно поверх сосуда с жидким гелием для уменьшения потерь на испарение дорогого и дефицитного гелия, кипящего при очень низкой температуре. Средний диаметр этого криостата огромный — 136 м. Сечение обмотки сверхпроводника со стабилизатором, а также гелиевой оболочки, азотного экрана, теплоизоляции и бандажей крепления обмотки будет иметь диаметр 17 м. В катушке течет ток 140 кА, причем плотность его в сверхпроводнике предполагается  $3000 \text{ А/мм}^2$ . В подобном накопителе может запастись до  $10^{13}$  Дж энергии. Чтобы судить о такой величине, достаточно знать, что этой энергии хватит для пополнения пикового приращения мощности в энергосистемах Франции в течение нескольких часов.

Такие аккумуляторы энергии, как маховичные (описанные ниже), призваны накапливать энергию электро-



станций в ночное время, когда их загрузка минимальна, с последующей отдачей в часы пик. В настоящее время для этих же целей сооружаются гидроаккумулирующие станции (ГАЭС).

Если сравнивать проекты индуктивного и маховичного аккумуляторов энергии для электростанций, то можно заметить, что энергию  $10^{13}$  Дж могут накопить около 100 маховичных аккумуляторов диаметром и высотой каждый 5 м.

Безусловно, есть «узкие места» и у индуктивного накопителя. Это и дороговизна огромных объемов жидкого гелия, большая сложность устройства, необходимость постоянного поддержания сверхнизких температур в огромном криостате, что, естественно, не обходится без потерь. Главная же трудность, до сих пор практически непреодоленная, — это огромная механическая прочность обмотки, которая должна выдерживать колоссальные электродинамические силы, разрывающие ее, почти как маховик при вращении. Случайная потеря свойства сверхпроводимости такого аккумулятора, могущая вызвать мгновенное выделение всей энергии, тоже небезопасно.

Удивительна схожесть не только физических основ накопления энергии в маховичных и индуктивных аккумуляторах энергии, но и возникающих при этом технических проблем, например: прочности, опасности взрыва при внезапном выделении энергии. Даже в их названиях («супермаховичный» и «сверхпроводящий» аккумуляторы энергии) есть общее. Чем окончится «соперничество» между этими родственными по физической природе аккумуляторами, сказать трудно (но в последних зарубежных исследованиях больше внимания уделяется супермаховичным). Использование сверхэнергоемких накопителей энергии этих типов может коренным образом изменить энергетику, обеспечив громадные экономические выгоды.

## НЕРАЗГАДАННАЯ ТАЙНА ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Некоторые специалисты полагают, что самым энергоемким относительно единицы массы, но одновременно самым загадочным и неизученным аккумулятором энергии является шаровая молния. Строго говоря, она может и не вполне отвечать определению аккумулятора энергии, так



как согласно одной из гипотез, например, выдвинутой академиком П. Л. Капицей, энергия в шаровую молнию проникает извне, в виде радиоизлучения\*. Но эта гипотеза не вполне оправдывается некоторыми наблюдениями шаровой молнии, например так называемым «опытом с бочонком», о котором речь пойдет ниже. Поэтому мы с некоторой долей риска все-таки будем считать шаровую молнию аккумулятором энергии.

Опишем кратко основные характеристики шаровой молнии, которые составлены на основе большого количества наблюдений и заслуживают полного доверия:

- 1) внутренняя энергоемкость — от 0,1 до 4 кВт·ч;
- 2) время существования — от нескольких секунд до 4 мин.;
- 3) масса — от 0,5 до 50 г;
- 4) плотность — от 0,0013 до 0,015 г/см<sup>3</sup>.

Естественно, у шаровой молнии есть и много других характеристик — таких, как сила свечения, скорость движения и т. д., но нас здесь интересуют только ее аккумулялирующие возможности.

В общей сложности собрано более тысячи описаний шаровой молнии, но, с нашей точки зрения, особый интерес представляет так называемый «опыт с бочонком». Никто, конечно, не планировал этот эксперимент, но обстоятельства сложились так удачно, что представилось возможным достаточно точно подсчитать внутреннюю энергию (энергоемкость) шаровой молнии. «Опыт» был описан английским профессором Б. Л. Гудлетом, он и определил эту энергию. «Опыт» состоялся в присутствии наблюдателя, который, по словам профессора, был совершенно трезв, и рассказ его заслуживает доверия. Шаровая молния размером с большой апельсин (10—15 см диаметром) залетела в дом через окно на кухне и оказалась в бочонке с водой. Хозяин дома, со страхом наблюдавший за этим явлением, заметил, что недавно налитая холодная вода в бочонке закипела. Через некоторое время она перестала кипеть, но и 20 мин. спустя в нее нельзя было опустить руку. Шаровая молния, израсходовав свою энергию на кипячение воды, исчезла без взрыва. Возможно, в течение некоторого времени она была погружена в воду.

\* См.: *Леонов Р. А. Загадка шаровой молнии*. М.: Наука, 1965.



В бочонке было около 16 л воды, откуда энергия, затраченная на ее кипячение, должна составлять от 1,0 до 3,5 кВт·ч. В действительности эта энергия была еще больше, так как по пути к бочонку молния пережгла телеграфные провода и опалила оконную раму.

Определим удельную энергоемкость этой молнии. Считая объем шаровой молнии около 1 л при средней плотности  $0,01 \text{ г/см}^3$ , получаем массу молнии 10 г. Это типичная масса шаровой молнии, которая, как было отмечено выше, оценивается в 0,5—50 г. Удельная энергия этой молнии, считая даже по минимуму, составит 100 кВт·ч, или 360 мДж/кг. Для сравнения: удельная энергия лучшего стального маховика около 0,2 мДж/кг, а наиболее перспективных электрических и супермаховичных аккумуляторов — раз в 5 больше. Таким образом, удельная энергоемкость шаровой молнии на два-три порядка выше, чем лучших аккумуляторов!

Американский исследователь Гарольд У. Льюис считает, что если бы объем шаровой молнии был заполнен напалмом, т. е. желеобразным бензином, то внутренняя энергия такого напалмового шара равнялась энергии шаровой молнии тех же размеров. В таком случае удельная энергия составит уже около 50 мДж/кг, но и это чрезвычайно много.

Было сделано множество попыток объяснить природу шаровой молнии, но практически ни одна из них не увенчалась успехом.

Остановимся на нескольких объяснениях природы шаровой молнии. Существует две противоположные гипотезы: одна из них предполагает, что весь запас энергии шаровой молнии находится внутри нее самой, другая — что энергия в шаровую молнию поступает извне.

Многие ученые, начиная со знаменитого Араго, видели в шаровой молнии уплотненное соединение азота с кислородом, энергия которого и расходуется на существование шаровой молнии. Обобщением подобных взглядов является гипотеза французского астронома и физика Матиаса. По Матиасу, шаровая молния представляет высшие соединения азота с кислородом  $N_pO_q$  и высшие формы озона  $O_m$  или азота  $N_n$ . Энергию этой «грозовой материи» Матиас оценивает как вчетверо превышающую внутреннюю энергию нитроглицерина. Это, в общем, совпадает с приведенными выше данными. Беда только в



том, что пока таких соединений химики не создали, хотя и существует мнение, что цепная химическая реакция легких продуктов сравнима с эффектом взрыва шаровой молнии. Характерно, что охлаждение «грозовой материи» происходит тем медленнее, чем больше ее запас.

Вторая группа гипотез предполагает, что источник энергии шаровой молнии находится вне ее.

По мнению известного советского физика Я. И. Френкеля, шаровая молния является сфероидным вихрем смеси частиц пыли или дыма с химически активными (из-за электрического разряда) газами, причем шаровихрь способен на длительное независимое существование. Действительно, согласно наблюдениям, шаровая молния возникает преимущественно при электрическом разряде в запыленном воздухе и оставляет после себя дымок с острым запахом.

Американский профессор Хилл предложил считать шаровую молнию «миниатюрным грозовым облаком». Он предполагает, что появлению шаровой молнии предшествует удар линейной молнии. Нейтрализация такого «облака» носит замедленный темп, потому что в нее частями включаются отдельные слои и области находящегося в турбулентном движении «сферического облака».

Совершенно оригинальную концепцию шаровой молнии выдвинул в 1955 г. академик П. Л. Капица: «Если в природе, — пишет он, — не существует источников энергии, еще нам неизвестных, то на основании закона сохранения энергии приходится принять, что во время свечения шаровой молнии непрерывно подводится энергия, и мы вынуждены искать этот источник энергии вне объема шаровой молнии» \*. Время «высвечивания» энергии из шара прямо пропорционально его диаметру. Данные об экспериментальных ядерных взрывах показывают, что облако диаметром 150 м «высвечивается» примерно за 10 с. Стало быть, шаровая молния диаметром 10 см (наиболее вероятный ее размер) «высветится» за 0,01 с. Однако известно, что шаровые молнии существуют до нескольких минут, причем за это время кипятят воду, взрываются и совершают прочие действия, требующие больших затрат энергии.

---

\* Цит. по кн.: *Леонов Р. А. Загадка шаровой молнии*, с. 61.



Таким источником энергии шаровой молнии П. Л. Капица считает приходящие извне радиоволны, преимущественно длиной от 35 до 70 см. Взрыв шаровой молнии объясняется внезапным прекращением подвода энергии (например, если резко меняется частота электромагнитных колебаний) и представляет собой простое «схлопывание» разреженного воздуха.

В этой теории многое не соответствует наблюдениям. Так, имеющимися радиоустановками электромагнитные колебания в диапазоне 35—70 см, появляющиеся в результате атмосферных разрядов, не зафиксированы. Теория не соответствует «опыту с бочонком», описанному профессором Гудлетом. Дело в том, что вода является практически непреодолимой преградой распространению радиоволн. Если же энергия передалась воде мгновенно, то это не вызвало бы даже заметного нагрева ее.

На основании множества наблюдений взрыв шаровой молнии приравнивается к взрыву от сотен граммов до 20 кг тринитротолуола (тола). Это — взрыв, способный нанести большие разрушения. «Схлопнувшая» же шаровая молния, по П. Л. Капице, будет напоминать скорее лопнувший воздушный шарик, чем грозный взрыв. Что же касается «высвечивания», которое П. Л. Капица считает основным пороком гипотез внутренней энергии шаровой молнии, то, по нашему мнению, оно вовсе не противоречит закону сохранения энергии.

Согласно наблюдениям, сила света шаровых молний достигает 50—80 свечей. Считая, что среднюю шаровую молнию по мощности свечения (а также шипения, треска, искрения) можно приравнять к 100-ваттной электрической лампе, то даже маленькая молния с внутренней энергией 0,1 кВт·ч обеспечила бы свое существование за счет этой энергии в течение часа. Однако у шаровой молнии, по-видимому, много других «статей» расхода энергии: нагрев окружающей среды, обугливание и оплавление предметов, с которыми она соприкасается, взрывы с разрушениями и т. д. Поэтому и время жизни ее составляет от нескольких секунд до нескольких минут. Основное заключается в том, что нейтрализация (вернее, деградация) энергии шаровой молнии носит замедленный темп, а не происходит мгновенно, как, например, при ядерных взрывах. Таким образом, если внутренняя энергия шаровой молнии, как аккумулятора, выделяется медленно, то



свечение может продолжаться достаточно долго. Так, литр легкого газа ацетилен, медленно сгорая в кислороде, обеспечит достаточно яркое свечение, соизмеримое с силой света шаровой молнии, в течение нескольких, может быть даже десятка секунд, но не 0,01 с. А ведь вещество шаровой молнии может таить энергию и в сотни раз бóльшую!

Ценность теории П. Л. Капицы состоит не столько в объяснении загадочных свойств шаровой молнии, а главным образом в замечательных перспективах сосредоточения больших количеств электромагнитной энергии в малых объемах, что дает возможность волновой передачи энергии на большие расстояния. Под руководством П. Л. Капицы разработана физическая основа электроники больших мощностей, что может преобразить современную электроэнергетику.

Совсем недавно советскими учеными была предложена новая гипотеза возникновения шаровой молнии \*. По этой гипотезе шаровая молния обусловлена наличием так называемых ХЛО — хемолюминесцирующих образований, обладающих способностью ярко светиться, быстро перемещаться и даже взрываться.

Однако загадка шаровой молнии до сих пор остается неразгаданной, и с ее разгадкой человечество получит едва ли не самый емкий аккумулятор энергии.

---

\* См.: Дмитриев М. Пришелец из космоса, или ХЛО? — Техника и наука, 1980, № 1, с. 33—35.



## Глава II

### АККУМУЛЯТОРЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

#### СТАТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ АККУМУЛЯТОРЫ

Как мы уже знаем, поднятый груз — самый древний и простой аккумулятор механической энергии. Он знаком каждому по часам-ходикам, копрам, трамбовкам и многим другим машинам, использующим гравитацию для накопления энергии.

Кстати, если мы уже заговорили о ходиках, стоит вспомнить об их важнейшей части — маятнике. Это — тоже аккумулятор энергии. Отклоняясь, груз поднимается на некоторую высоту, накапливая при этом потенциальную механическую энергию. Стремясь к равновесному положению, груз разгоняется, преобразуя потенциальную энергию в кинетическую, которая поднимает груз опять на ту же высоту.

Теперь самое время внести ясность в понятия «статический» и «динамический» аккумуляторы механической энергии. Как выше было показано, электрические аккумуляторы тоже бывают статические и динамические. Но на примере механических аккумуляторов разница между ними особенно наглядна.

Статический аккумулятор хранит накопленную энергию в статике, в неподвижном состоянии. Так, маятник, отклоненный на некоторый угол, несет в себе энергию поднятого груза, так называемую потенциальную. Освобожденный маятник разгоняется, преобразуя постепенно потенциальную энергию также в механическую, но уже называемую кинетической. В самой нижней точке маятник уже не имеет потенциальной энергии, а вся она накоплена в виде кинетической. Так вот, отклоненный маятник (как и поднятый груз) — статический аккумулятор энергии. Разогнанный же маятник — динамический аккумулятор той же механической энергии (ниже мы увидим, что процессы «перетекания» энергии из статического



аккумулятора в динамический носят колебательный характер).

У статических аккумуляторов механической энергии в виде поднятого груза весьма малая удельная энергия. По этому показателю они не идут в сравнение даже с аккумуляторами, имеющими упругие элементы, например пружинными. Однако, обладая достаточно ценными свойствами — стабильностью накопления энергии, высоким КПД, долговечностью, они обеспечили себе прочное место во многих машинах и механизмах.

Практически все мы владельцы как минимум двух пружинных аккумуляторов: заводной пружины и пружины маятника ручных часов. Упругий элемент пружинных аккумуляторов работает либо на растяжение—сжатие, либо на кручение (сдвиг), либо на изгиб. Рассмотрим, как происходит накопление механической энергии в каждом из них.

На упругий элемент, скажем, стальной стержень, действует сила  $P$ , зависящая от степени осадки  $h$  (перемещения конца) элемента. Эта сила может как сжимать, так и растягивать стержень. Чем значительнее  $h$ , тем большая приложена сила, причем эта зависимость пропорциональна жесткости стержня  $C$ . Итак  $P = C \cdot h$ . Поскольку же сила при перемещении  $h$  изменялась от 0 до  $P$ , то в среднем она была  $P/2$ . Умножив среднюю силу на перемещение, получаем накопленную потенциальную энергию:

$$A = \frac{Ph}{2} = C \frac{h^2}{2}.$$

Аналогично определяется энергия, накопленная в упругих элементах других типов. Правда, сила не всегда прямолинейно зависит от перемещения, и тогда ее среднюю величину вычислить несколько труднее: приходится отыскивать предельную сумму — интеграл элементарных энергий. Но в принципе картина явления остается прежней.

— Когда стержень растянут или сжат, его поперечное сечение напряжено равномерно и одинаково и можно сказать, что оно одинаково участвует в накоплении энергии. А как обстоит дело в других случаях? Торсион, т. е. стержень, работающий на скручивание, скручен: один его торец повернут относительно другого на определенный



угол. Если внешние слои торсиона напряжены сильно, то внутренние — гораздо меньше, а осевой участок вообще не напряжен. Значит, здесь материал «работает» уже неравномерно: внешние слои накапливают больше энергии, чем внутренние. Можно было бы и убрать эти внутренние слои, выполнив торсион в виде трубки, однако она при очень тонких стенках способна потерять устойчивость. То же самое наблюдается и при изгибании балок. Один внешний слой растянут, другой сжат, а средний (нейтральный) не напряжен вовсе: опять неравноценное аккумулятивное энергии по сечению. Анализируя остальные два случая, приходим к выводу, что проволока пружины при растяжении—сжатии работает на кручение, как торсион, а при кручении — на изгиб. Следовательно, и здесь справедливо все сказанное нами об упругих элементах.

А теперь сравним описанные упругие элементы по важнейшему для аккумуляторов показателю — по удельной (на единицу собственной массы) энергоемкости. Так вот, если равномерно напряженные, растянутые или сжатые элементы характеризовать показателем, равным 1, то у элементов кручения (торсионов, пружин растяжения—сжатия) этот показатель 0,5, а у элементов изгиба (балок, пружин кручения) — примерно 0,3. Это означает, что выгоднее упругий элемент растягивать, а если нет опасности потерять устойчивость, то и сжимать.

Взяв за основу величину удельной энергоемкости, все «упругие» аккумуляторы можно разделить на три типа: накопители малых (муфты), средних (пружинные двигатели) и высоких энергий. С ростом удельной энергоемкости изменяется не только область применения «упругого» аккумулятора, но и его конструкция, принцип действия, даже внешний вид. Представим себе, что нужно быстро соединить два массивных вала машины, один из которых вращается, а другой неподвижен. При жестком соединении возникает удар, ломаются соединяющие устройства, а то и сами валы, вся машина испытывает сильное потрясение. Если же между этими валами поставить упругую муфту, то, поглотив избыточную энергию, она смягчит ударную нагрузку. Подобные ситуации встречаются в жизни машин на каждом шагу. Поэтому такие муфты широко распространены в технике. Во всех случаях упругая муфта состоит из двух частей, которые могут проворачиваться друг относительно друга, и аккумуля-



лирующего элемента между ними. И разница между муфтами заключается главным образом в конструкции этого самого элемента.

Наиболее простая упругая муфта — втулочно-пальцевая. Здесь аккумулирующий элемент — вделанная в ведомую полумуфту резиновая втулка, в которую просовывается штырь ведущей полумуфты (понятия «ведущая» и «ведомая» полумуфты чисто условные). Эта муфта накапливает ничтожно малые количества энергии и служит для смягчения небольших толчков в трансмиссии.

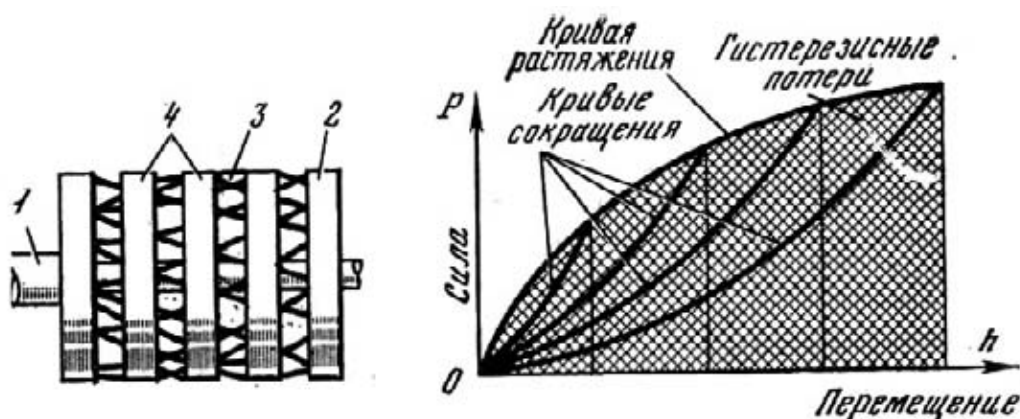
В автомобилях используются упругие муфты иной конструкции: с цилиндрическими пружинами сжатия. А для очень маломощных приводов, например в приборах, применяются муфты с пружиной кручения.

В магнитных муфтах аккумулирующий элемент сразу и не отыщешь: его роль играет магнитное поле между полюсами постоянных магнитов. Эта муфта интересна еще и тем, что может передавать вращение через «стенку» из немагнитного материала. Столь уникальное свойство позволяет ее использовать для передачи вращения из вакуума, агрессивной и радиоактивной среды.

Но по аккумулирующим возможностям вне конкуренции муфты с упругими элементами из резины, поскольку она может накопить в единице веса больше энергии, чем любой другой материал. Ниже описан маховичный рекуператор, в котором резиновая шайба играет роль аккумулирующего элемента, как бы промежуточного аккумулятора, при передаче энергии от движущегося транспорта маховику и обратно.

Однако все описанные резиновые упругие элементы работают на сдвиг (кручение), а как мы уже установили, использование материала при таком виде деформации далеко не эффективно. Лучше было бы растягивать резиновые элементы. Тогда показатель, характеризующий их энергоемкость, достиг бы максимальной величины 1. С учетом этого сконструирована упругая муфта-аккумулятор. Резиновые жгуты, закрепленные концами на ведущей и ведомой полумуфтах, опираются на легкие, свободно сидящие на оси промежуточные поддерживающие диски (изготовленные, например, из пластмассы) и при относительном повороте полумуфт принимают положение «винтовой линии». Поскольку крепление жгутов к полумуфтам шарнирное, резина практически подвергается





Резиновая муфта-аккумулятор и график силы натяжения жгутов в зависимости от их растяжения и сокращения

1 — ведущий вал, 2 — ведомая полумуфта, 3 — резиновые жгуты, 4 — поддерживающие промежуточные диски

только растяжению. По энергоемкости эта муфта соизмерима даже с маховиками.

Но почему же резиновые элементы, обладая столь ценными качествами, используются не так уж широко?

Если деформировать, например растягивать, резиновый упругий элемент и записывать зависимость силы от перемещения его конца, то кривая растяжения резины при накоплении в ней энергии будет отличаться от кривой ее сокращения при выделении энергии. Эти две кривые образуют так называемую гистерезисную петлю, характеризующую потери энергии на упругий гистерезис. И чем больше растягивать резину, т. е. накапливать в ней энергию, тем выше потери на упругий гистерезис. Кроме того, чем дольше сохраняется энергия в растянутой резине, тем больше петля гистерезиса и тем меньше энергии будет возвращено обратно. Гистерезисные потери постепенно разрушают резину, и свойства ее меняются. Все это (мы уж не говорим о других недостатках) ограничивает применение резиновых упругих элементов для аккумулялирования энергии в точных, долговечных и надежных приборах и машинах. Широко применяются резиновые аккумуляторы энергии в моделях в качестве резиномоторов.

Аккумуляторы с использованием упругости применялись человеком еще в глубокой древности: вспомним хотя бы о луках, самострелах и катапультах. В эпоху Возрождения пружинные двигатели можно было встретить в заводных игрушках, часах и даже в «самобеглых» каретах, предназначенных исключительно для торжественного



выезда королей. Пружины тогда ковали кузнецы, и стояли они весьма дорого.

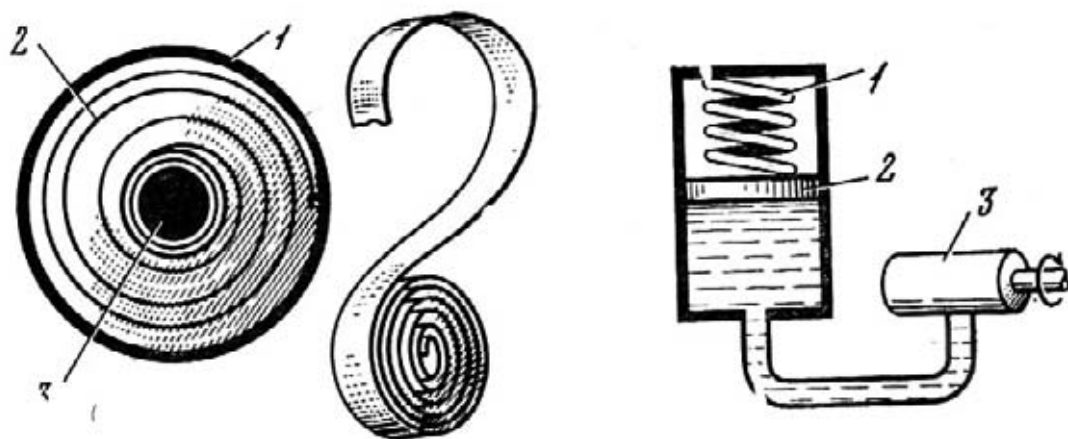
Сейчас же пружинные двигатели для самых различных механизмов выпускаются многомиллионными сериями. Наиболее распространенные из них — двигатели со спиральной пружиной. Закаленная пружинная лента закладывается в обойму (барабан), крепится одним концом к ней, другим — к валу и заворачивается вокруг него. В таком «взведенном» состоянии пружина «заневоливается», т. е. оставляется на несколько дней для стабилизации упругих свойств. КПД этих двигателей выше 0,9. Пружинная лента работает на изгиб. Причем та ее часть, что напряжена выше (навернута на меньший диаметр), аккумулирует больше энергии: периферийные же части напряжены слабее — стало быть, и аккумулируют меньше энергии. Если же пружину предварительно изогнуть S-образно, тогда все ее участки будут напряжены равномерно, и она накопит гораздо больше потенциальной энергии.

Поднять энергоемкость спиральных пружин можно еще, придав им желобчатый профиль. Наворачиваясь на вал, такая пружина претерпевает деформацию изгиба как в продольном, так и в поперечном направлениях и накапливает максимальную энергию. S-образные пружины с желобчатым профилем обладают и другими достоинствами, например почти постоянным крутящим моментом.

Для машин с гидравлической системой лучше всего подойдет гидроаккумулятор — пружинный двигатель. В нем накопление и выделение энергии производятся при закачке или выпуске масла. Здесь пружина уже не ленточная, а проволоочная. Эффективность проволоки можно значительно повысить, удалив осевые участки, которые при ее кручении не участвуют в процессе накопления энергии. Конечно, изготовление вместо пружинной проволоки трубки с высокими прочностными свойствами куда сложнее и труднее, но при необходимости приходится идти на такую жертву.

Однако несмотря на все меры по увеличению энергоемкости пружинных двигателей, они по этому показателю сильно отстают от аккумуляторов других видов. Например, энергоемкость маховиков превышает энергоемкость любых пружин при той же прочности материала в десятки тысяч раз!





Пружинный аккумулятор со спиральной пружиной и спиральная S-образная пружина с желобчатым профилем

1 — обойма, 2 — пружина, 3 — вал

Гидроаккумулятор с пружинным двигателем

1 — пружина, 2 — поршень, 3 — гидромотор

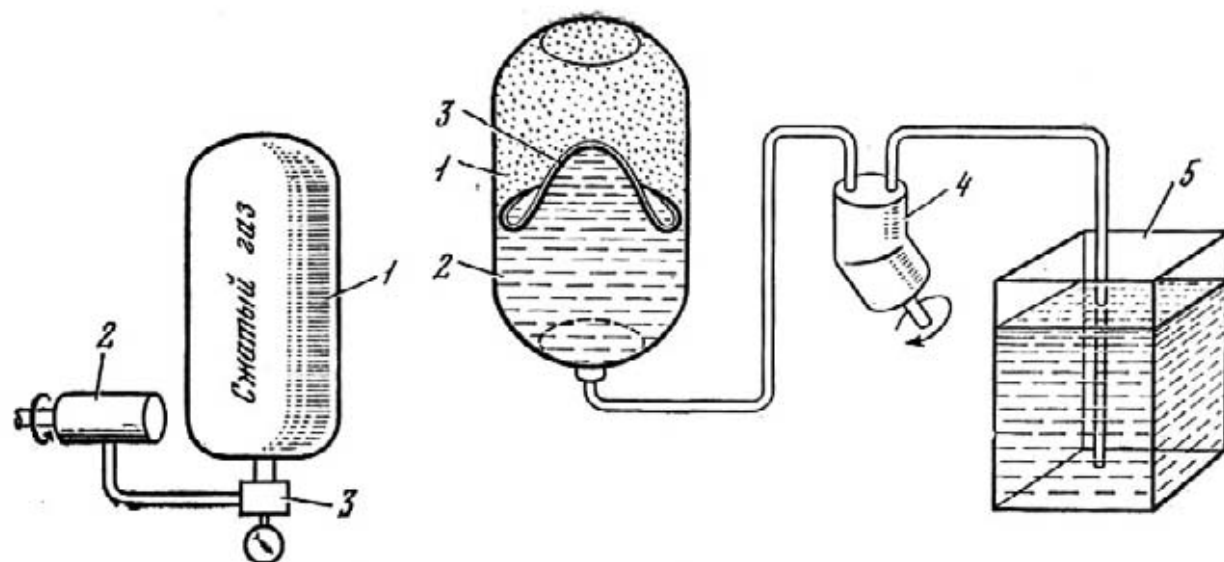
Каковы же пути повышения энергоемкости «упругих» аккумуляторов?

Накопленная в аккумуляторе механическая энергия тем выше, чем значительнее сила и перемещение под действием этой силы. Следовательно, в качестве аккумулирующего элемента целесообразно использовать материалы, допускающие большие деформации под действием больших сил. И здесь, пожалуй, не найдешь ничего лучшего, чем газ. При его сжатии запасается огромная энергия, соизмеримая с энергией перспективных электроаккумуляторов и маховиков. К сожалению, и недостатки «газовых» аккумуляторов весьма существенны.

Прежде всего, закачивать газ в баллон надо компрессором, а отбирать энергию — пневмодвигателем. А КПД этих агрегатов довольно невысок: хорошо, если удастся использовать хоть четверть затраченной энергии. И еще: газ при сжатии нагревается, а при расширении охлаждается. Поэтому только что закачанный газ в баллоне очень горяч, но со временем он охлаждается, принимает температуру окружающей среды, и это выделяющееся тепло уносит с собой до 40% накопленной энергии — от «запасов» газового аккумулятора остаются лишь жалкие крохи.

Однако есть способ повышения КПД газовых аккумуляторов — это их симбиоз с гидроприводом. Выше





Газовый аккумулятор (пневмоаккумулятор)

1 — баллон, 2 — пневмодвигатель, 3 — клапанная коробка

Гидрогазовый (гидропневматический) аккумулятор с гидродвигателем

1 — газовая полость, 2 — жидкость, 3 — эластичная перегородка, 4 — обратимая гидромашина, 5 — бак

был упомянут пружинно-гидравлический аккумулятор, где энергию аккумулирует пружина, а гидросистема выполняет роль лишь трансмиссии. При этом КПД аккумулятора (называемого гидрогазовым) сильно возрастает. Во-первых, газ расширяется в гораздо меньшей степени, чем в чисто газовых аккумуляторах, и при этом происходит гораздо меньшее тепловыделение. Во-вторых, гидросистема, которая в данном случае является гидрообъемной, или статической, обладает весьма высоким КПД. Поэтому гидрогазовые аккумуляторы находят широкое применение для аккумулирования значительных количеств энергии в самых различных машинах: прессах, стартерных устройствах, самолетах, а в последнее время — и в качестве рекуператоров энергии торможения (о чем будет подробнее сказано в гл. V).

Для повышения удельной энергии гидрогазовых аккумуляторов баллон, в который закачан газ, выполняется из возможно более прочных материалов, имеющих к тому же низкую плотность. Такими материалами могут быть стеклянное или графитовое волокно на эпоксидной связке, а также целый ряд недавно разработанных сверхпрочных нитевидных материалов. Баллон лучше всего изготовить в виде сферы (она имеет наименьшую площадь при наи-



большем объеме), внутренняя поверхность которой соответствующим образом герметизирована. Для закачки в баллон используются газы, технически инертные,— обычно азот, реже гелий. Газовая и жидкостная среды в таком аккумуляторе чаще всего разделяются. В старых конструкциях цилиндрических баллонов это делалось с помощью свободного поршня, а в более прогрессивных, в том числе и сферических,— с помощью эластичной перегородки. Давление газа в таких аккумуляторах обычно бывает 150—400 атм.

Одним из главных недостатков гидрогазовых аккумуляторов является большое количество потребной рабочей жидкости (масла) для привода гидромашины. При сколько-нибудь значительной энергоемкости гидрогазового аккумулятора масса рабочей жидкости может существенно превышать массу самого аккумулирующего агента с баллонами. Однако существует устройство, где закачивание газа в практически любое количество баллонов производится постоянным небольшим объемом масла. Таким образом, масса всего гидрогазового аккумулятора и его габариты могут быть снижены, особенно при больших запасах аккумулированной энергии.

Гигантские газовые аккумуляторы могут применяться в качестве аккумулирующих устройств для электростанций. Энергия будет запасаться в аккумуляторе путем сжатия газа (разумнее всего, воздуха) в ночное время, когда расход электроэнергии мал. В часы пик при потребности в максимальной мощности электростанции газ будет подаваться на мощные турбины или другие пневмодвигатели, добавляя накопленную энергию к энергии электростанции. Согласно существующим проектам, газ предполагается закачивать в огромные полости под землей.

Выше отмечалось, что в такой же роли могут выступать и индуктивные аккумуляторы со сверхпроводимостью, и гигантские супермаховики (о последних речь пойдет ниже). Поскольку энергия, запасенная в единице массы, у всех перспективных аккумуляторов примерно одинакова, то и размеры их будут одинаково огромными. Преимуществом газовых аккумуляторов перед электрохимическими является высокая удельная мощность и простота, перед электродинамическими (индуктивными) и супермаховичными — только простота, а общим недо-



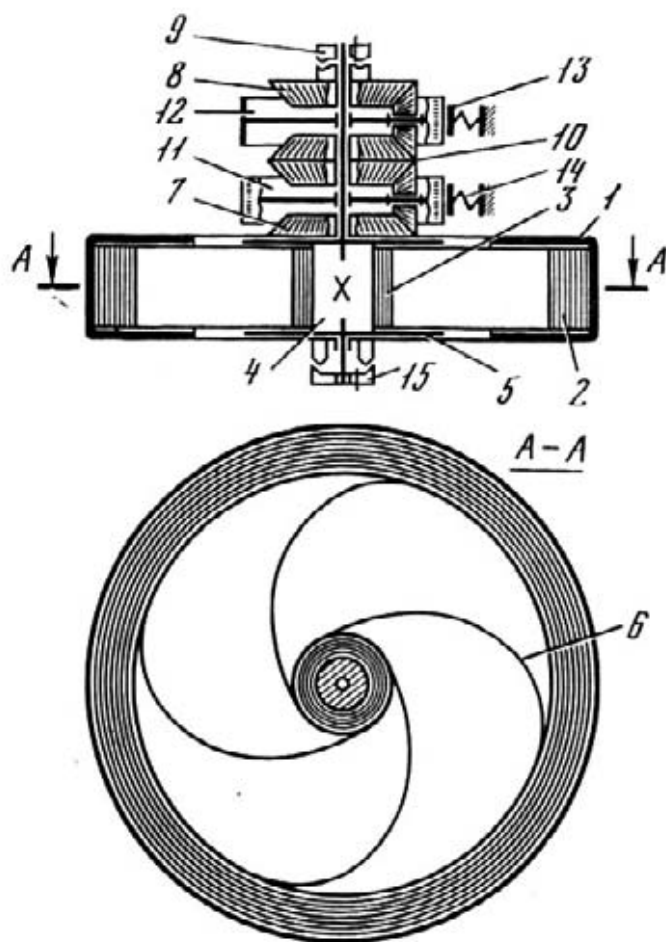
статком их является весьма низкий КПД. Не отличается этот аккумулятор от других и по опасности — взрыв огромного хранилища сжатого до высокого давления газа мало приятен.

Вернемся к твердым веществам. Современная техника располагает большим количеством сверхпрочных волокнистых материалов, выдерживающих огромное напряжение. У некоторых из них, например стеклянных и кварцевых волокон, сравнительно низкий модуль упругости, т. е. деформации достаточно велики и есть условия для накопления энергии. Казалось бы, все просто: надо как можно сильнее натянуть эти волокна, словно струны музыкального инструмента, и тем самым запасти в них механическую энергию. Но беда в том, что вес собственного аккумулирующего элемента — струны — будет составлять крайне малую часть веса натяжного устройства, которое даже при небольшой мощности грозит перерасти в тяжелый и громоздкий агрегат. Нельзя ли как-нибудь от него избавиться? Оказывается, можно натянуть и даже разорвать струну без помощи каких-либо натяжных устройств.

Ниже будет показано, что при вращении с достаточно большой скоростью материал супермаховика растягивается настолько, что накопленная потенциальная механическая энергия может даже превысить кинетическую. Казалось бы, что еще надо: без каких-либо дополнительных приспособлений накапливается потенциальная энергия, в тысячи раз превышающая энергию, сосредоточенную в сжатой пружине того же веса, что и супермаховик, да еще вместе с кинетической, в меньшем размере. Увы, энергию можно снимать с вала маховика только при замедлении его вращения, а это не всегда удобно. Теряется основное преимущество «упругих» аккумуляторов, например заводных пружин, — возможность съема энергии при произвольном изменении угловой скорости выходного вала.

Тут следует вспомнить задачу об артиллерийском взрывателе, возникшую в начале Великой Отечественной войны и решенную профессором МВТУ им. Баумана А. Н. Обморшевым. В механизме взрывателя артиллерийского снаряда использовалась миниатюрная заводная пружина, которая в летящем снаряде развивала почти вдвое больший крутящий момент, а следовательно, выде-





**Принципиальная схема  
центробежного аккумулятора**

- 1 — корпус-маховик,
- 2 — внешний моток,
- 3 — внутренний моток,
- 4 — барабан,
- 5 — кассета,
- 6 — переходный участок (ветвь) ленты,
- 7 и 8 — конические шестерни,
- 9 — муфта включения,
- 10 — сдвоенная коническая шестерня,
- 11 и 12 — водила сателлитов,
- 13 и 14 — тормоза водил,
- 15 — муфта-фиксатор

ляла вдвое бóльшую энергию, чем в неподвижном, поскольку летящий снаряд не только движется поступательно, но и вращается вокруг продольной оси, и на пружину, кроме силы ее упругости (в даламберовой статике), действуют еще и центробежные силы\*.

Отсюда возникает идея: вращать пружинный аккумулятор вокруг своей оси с необходимой скоростью, например при диаметре обоймы 0,5 м — со скоростью 10 тыс. об/мин. При этом ветви пружинной ленты растянутся до предела (разумеется, число ветвей ленты должно быть больше одного, чтобы она стала уравновешенной). Развиваемый ими крутящий момент в тысячи и десятки тысяч раз превысит ту величину, которая была у неподвижного аккумулятора. Остается снять запасенную энергию. Как это сделать? С помощью дифференциальной (или суммирующей) передачи. Вал (на нем покоится внутренний моток ленты) и обойма (к ней прилегает внешний моток) связаны с двумя коническими (можно и цилиндрическими) шестернями, которые через сателлиты, расположен-

\* См.: Гулиа Н. В. Маховичные двигатели. М.: Машиностроение, 1976, с. 42.



ные на водилах, кинематически соединяются с блок-шестерней, свободно сидящей на валу. При вращении всего аккумулятора (обойма с валом) водила сателлитов из-за натяжения ленты стремятся повернуться во взаимно противоположных направлениях (подобно обойме и валу неподвижного пружинного двигателя). Стоит отпустить их, как они, раскручиваясь, начнут выделять энергию; при этом лента будет переходить с внутреннего мотка на внешний. Если вращать водило против действующего усилия, аккумулятор станет накапливать энергию, «заводиться», а лента — переходить на внутренний моток. Совсем как в заводной пружине, но энергия в тысячи раз больше! Аккумулятор, конечно, должен иметь как можно меньше потерь при вращении, что достигнуто уже в современных маховиках. Такой аккумулятор энергии назван центробежным.

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАХОВИЧНЫХ (ДИНАМИЧЕСКИХ) АККУМУЛЯТОРОВ

В 1929 г. английский археолог Леонард Вулли, производя раскопки Урского могильника в долине реки Евфрат в Месопотамии, обнаружил массивный диск из обожженной глины диаметром около метра с круглым отверстием в центре. Близ периферии диска было и отверстие поменьше, в которое, по-видимому, когда-то была вставлена палка — рукоять. Наличие этого небольшого отверстия и решило судьбу диска — это был первый на Земле маховик, использовавшийся в качестве гончарного круга. Диск сидел на примитивной цапфе своим большим отверстием, а за рукоять его периодически раскручивал мастер. Массивный диск после раскрутки некоторое время вращался, расходуя накопленную кинетическую энергию, т. е. выполняя роль маховика. Гончар в это время обрабатывал стоящее на диске изделие. Был определен возраст этого первого маховика — его изготовили в середине IV тысячелетия до нашей эры.

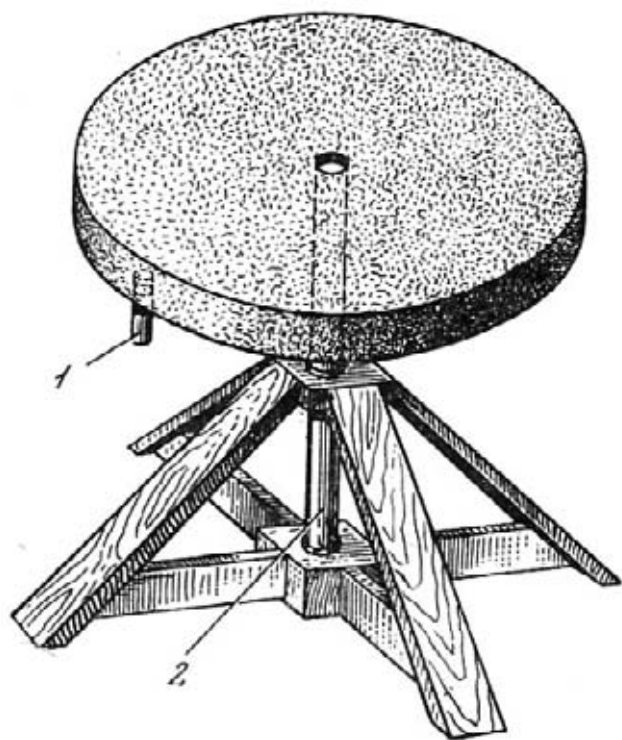
Древний гончар, пользуясь маховиком, естественно, и не подозревал, что его творение через пять с половиной тысячелетий, в период современной научно-технической революции станет одним из самых перспективных аккумуляторов.



Чем же так перспективен инерционный, или, проще, маховичный аккумулятор? Ведь сегодня его основные показатели все еще оставляют желать много лучшего. Дело в том, что современное развитие техники подготовило хорошую базу для резкого, можно сказать качественного, скачка полезных показателей этих аккумуляторов. Они способны кратковременно развивать колоссальные мощности, недоступные другим аккумуляторам. Трудно назвать аккумулятор, который был бы проще, надежнее и долговечнее маховичного. Экономичность маховичных аккумуляторов чрезвычайно высока, так как, во-первых, маховик имеет высокий КПД и, во-вторых, он единственный из аккумуляторов и двигателей, способный с большой эффективностью использовать (рекуперировать) механическую энергию машины на спусках и при торможениях.

Маховики практически свободны от каких-либо вредных выделений при работе, что чрезвычайно важно с экологической точки зрения, очень актуальной в наше время.

Уже сегодня маховичные аккумуляторы могли бы применяться с большей эффективностью, чем двигатели других типов, на общественном городском транспорте (автобусах и рельсовых машинах), внутризаводском транспорте, транспорте специального назначения (аэродромном, почтовом, прогулочном, рудничном и троллей-



Гончарный круг из Урского могильника — первый в истории человечества маховик

1 — рукоять,  
2 — ось



ном), в энергосистемах кратковременного действия, ручном инструменте и во многих других случаях.

А в перспективе? Сейчас трудно даже представить, какую роль в технике будущего могут играть маховичные аккумуляторы.

Главной и неотъемлемой частью маховичного аккумулятора, естественно, является маховик. Обычно аккумулятор состоит из маховика с трансмиссией и ряда сопутствующих устройств — таких, как кожухи, ограждения, опоры, уплотнения, системы поддержания вакуума в кожухе и т. п. Трансмиссия же у маховичных аккумуляторов может быть одна, когда через нее производятся раскрутка маховика и отбор мощности от него, или две (в редких случаях больше), когда разгон маховика и отбор мощности производятся через разные трансмиссии. Трансмиссии бывают самыми разнообразными: механическими, электрическими, гидростатическими, гидродинамическими, пневматическими. Без трансмиссии обойтись трудно, но можно: в крайнем случае ее роль играет вал, рукоятка или тело самого маховика. Без сопутствующих устройств также можно обойтись: например, в вакууме становится излишним герметичный кожух, уплотнения, системы поддержания вакуума; в невесомости можно обойтись (хотя бы временно) без опор; при отсутствии людей возле маховика становятся излишними ограждения и т. д. Конечно, лишь как исключение можно вообразить маховичный аккумулятор, состоящий только из одного маховика. Например, висящий в невесомости диск, разгоняемый вращающимся магнитным полем, или газовым вихрем, или просто руками. Таким же образом производится и отбор энергии, идущей на создание магнитного поля, газового вихря или просто согревание рук в холодное время. Но уж без маховика маховичному аккумулятору, понятно, не обойтись. Поэтому начнем с главного — с маховика, а именно: как накапливается в маховике энергия, которая затем будет выделена им на совершение работы.

В отличие от маховика, присутствующего почти на любой машине для выравнивания хода, маховичным аккумулятором будем называть, по предложению английского специалиста Р. Кларка, такой, который за период отдачи энергии делает не менее 10 оборотов (хотя это и весьма условно).



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. Так движется, например, автомобиль по ровной дороге, спарник, соединяющий колеса паровоза, или космический корабль в состоянии невесомости — не вращаясь. Энергия  $T$  для поступательного движения пропорциональна массе  $m$  тела и квадрату скорости  $v$  движения:

$$T = 0,5mv^2,$$

а его удельная энергия

$$e = \frac{T}{m} = 0,5v^2.$$

Так, например, каждый килограмм массы автомобиля, движущегося со скоростью 100 км/ч, накапливает, согласно формуле, 385 Дж энергии; килограмм массы самолета, летящего со скоростью 1000 км/ч, в 100 раз больше — 38 500 Дж энергии, а космического корабля, имеющего скорость 10 км/с, — гигантскую энергию, равную 50 млн. Дж! Мы уж не говорим об астероидах, имеющих еще бóльшую скорость и энергию, растущую пропорционально квадрату скорости.

Вот идеальные аккумуляторы, плотность энергии которых во много раз больше, чем не только у лучших электрических аккумуляторов, но и у самого горючего. Но... как „привязать“ этот аккумулятор к месту? Ведь надо «привязывать» несущийся аккумулятор к неподвижной оси, а уж с нее «снимать» энергию. Тут-то и появляются первые неприятности. Но давайте проделаем мысленный эксперимент: поймать аккумулятор на ходу гипотетической тонкой, невесомой, но очень прочной нитью метровой длины привяжем к оси по килограмму массы автомобиля, самолета и космического корабля. Оказавшись привязанными, массы сразу же изменят свое прежнее движение и «заходят» по кругу, натягивая нить. Вот в этом-то натяге и вся трудность — очень уж большим он получается. Если подсчитать силу натяжения нити  $F_n$ , вы-



зЫваемую движущейся по окружности радиуса  $R=1$  м массой  $m=1$  кг с принятыми ранее скоростями, то, учитывая, что

$$F_{\text{н}} = \frac{mv^2}{R}$$

1 кг массы автомобиля натянет нить с силой 7,7 кН, килограмм массы самолета — 0,77 МН, а килограмм космического корабля и с вовсе «безнадежной» силой — 1000 МН. Этого, конечно, не выдержит не только нить, но и самый прочный канат. А ведь мы считали нить невесомой. На самом же деле и она сама будет усиливать свой же натяг. Для реальных конструкций маховиков как в виде дисков, так и в виде стержней (есть и такие) напряжения в материале при вращении будут пропорциональны квадрату линейной скорости, т. е. накопленной кинетической энергии:

$$\sigma = \rho v^2.$$

Как видим, радиуса кольца в формуле нет, значит напряжения во вращающемся кольце не зависят от его размеров, а только от плотности и квадрата скорости. Если вспомнить, что

$$e = 0,5v^2, \text{ а } v^2 = \frac{e}{0,5} = 2e,$$

то

$$\sigma = 2\rho e.$$

Смысл этой формулы таков: хочешь накопить больше энергии — во столько же раз увеличивай прочность материала маховика. Такие же по смыслу зависимости получаются для маховиков любой из применяемых форм.

Для маховиков в виде однородного тела вращения

$$T = 0,5I\omega^2,$$

т. е. кинетическая энергия вращающегося тела пропорциональна моменту инерции  $I$  этого тела относительно оси вращения и квадрату угловой скорости  $\omega$  тела. Вот она — энергия, запасаемая в маховике!

Плотность же энергии во вращающемся теле равна

$$e = 0,5 \frac{I}{m} \omega^2.$$



Обычно отношение  $I/m$  для реальной формы маховика упрощается до одного коэффициента.

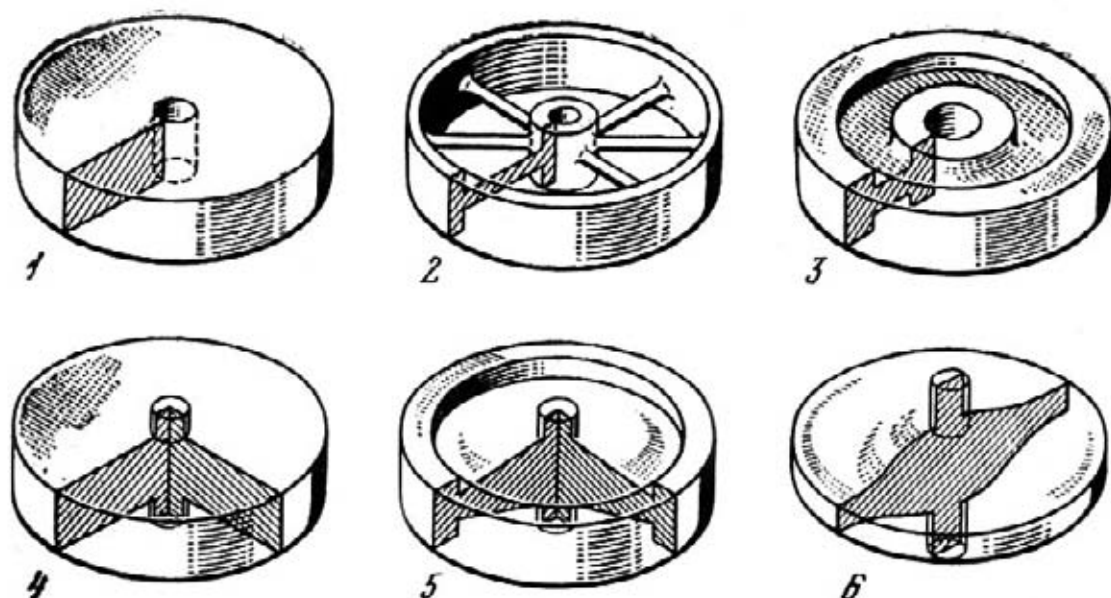
Итак, зная, каким образом накапливается кинетическая энергия во вращающемся маховике, зададимся вопросом: до какого же предела можно «накапливать» в маховике энергию? Что мешает беспредельному повышению плотности его энергии? Ответ один — прочность материала маховика. Повышая во столько-то раз плотность энергии маховика конкретной формы, мы должны «расплачиваться» таким же увеличением его прочности. В этом и заключается предел повышения плотности энергии маховика.

Изготовив, например, маховик — кольцо из стали при плотности ее  $\rho = 7,8 \text{ т/м}^3$  — и высчитав напряжения в материале, получаем, что для плотности энергии 385 Дж/кг (автомобиль) надо иметь кольцо прочностью не менее 0,6 кН/см<sup>2</sup>, для плотности энергии 38 500 Дж/кг (самолет) — 0,06 МН/см<sup>2</sup> и для 50 млн. Дж/кг (космический корабль) — 78 МН/см<sup>2</sup>. Современная техника может удовлетворить требованиям прочности материалов только для первых двух случаев. Материал же для создания гигантской плотности энергии 50 млн. Дж/кг пока еще не создан. Но только «пока»!

На плотность энергии маховика влияет не только его прочность, но и его форма. Если имеется конкретный материал, из которого надлежит изготовить маховик, то следует выбрать такую форму, которая отвечала бы максимальной плотности энергии, с учетом, конечно, ограничивающих условий — в основном допустимой окружной скорости.

Как уже говорилось, первый из известных маховиков на Земле — гончарный круг из Урского могильника — был выполнен в виде диска с центральным небольшим отверстием. Эта форма — самая невыгодная среди дискообразных маховиков. Маховики такой формы накапливают наименьшую кинетическую энергию в килограмме массы при одной и той же прочности материала. В технике сегодняшнего дня еще встречаются маховики такой «архаической» формы — обычно там, где основным преимуществом маховика считается простота изготовления. Но материал (металл) здесь расходуется очень нерационально: сделав форму маховика более совершенной, можно из такого же количества материала изготовить три маховика с тем же запасом энергии каждый.





Формы маховиков дискового типа

1 — диск с отверстием, 2 — обод со спицами, 3 — обод с диском, 4 — диск без отверстия, 5 — равнопрочный диск с ободом, 6 — равнопрочный диск без обода

По мере развития техники конструкторы маховиков стали отодвигать всю массу на периферию, т. е. увеличивать отверстие в центре, приближая его диаметр к наружному диаметру маховика. На первый взгляд такое решение достаточно логично: относя почти всю массу на периферию, удаляя ее от центра, мы увеличиваем момент инерции маховика, делая его максимально возможным. А это, в свою очередь, при одной и той же угловой скорости обеспечивает максимальную кинетическую энергию. Так была получена более рациональная форма маховика — тонкий обод со спицами. Долгое время, почти до начала нашего века, такая форма считалась пределом совершенства. Было только одно досадное обстоятельство — спицы маховика ослабляли конструкцию. Почему это происходило? При вращении обод, будучи упругим телом, расширялся под действием натяжений, спицы же, располагаясь ближе к центру, удлинялись не настолько, чтобы «поспевать» за ним, и в результате начинали его неравномерно «стягивать». Они также подвергались растягивающему действию обода и могли лопнуть. Однако выход был найден: спицам придали изогнутый вид, жесткость их была во много раз снижена, и они стали «следовать» за расширяющимся ободом, не нагружаясь сами и не нагружая собой обод. Таким образом, обод «рабо-



тал», почти как «чистое» кольцо, ничем не связанное с центром. Это понятие «чистого» кольца, или обода, работающего независимо от центра, играет существенную роль для маховиков, и в дальнейшем мы к нему вернемся.

Итак, мы как будто достигли совершенства — отодвинули всю массу маховика на периферию, максимально увеличили момент инерции, избавили обод от вредного действия спиц. А что, если это «вредное» действие не так уж вредно? Ведь спицы изгибают обод неравномерно только потому, что они прикрепляются к нему в нескольких точках. Если же спиц сделать очень много, то их изгибающее действие практически исчезнет и они будут лишь «поддерживать» обод, частично разгружая его от напряжений. В пределе увеличение числа спиц привело к замене их диском и возникновению маховика новой формы — обода с диском.

Поначалу, конечно, были споры: диск, хотя и «поддерживает» обод, весит больше, чем спицы. Что выгоднее: увеличивать прочность обода, но и вес маховика, или иметь меньшую прочность, но и меньший вес?

Попробовали — отлили маховики из одного и того же материала, взвесили, раскрутили до разрыва в специальной бронированной камере и, измерив количество накопленной энергии в момент разрыва, разделили его на массу маховика. Полученная величина плотности энергии однозначно подтвердила преимущества обода с диском. Маховики такого типа надолго завоевали первенство и применялись в конце прошлого — начале нашего века для накопления весьма больших энергий (например, в боевых торпедах). Но как маховик выгоднее всего диск особой формы, так называемый диск равной прочности, который развивает максимальную плотность энергии — втрое выше, чем диск с малым отверстием, и вдвое выше, чем самый тонкий обод. И расчеты, и экспериментальные данные показали, что для изотропного (с одинаковыми механическими свойствами во всех направлениях) материала, каким являются металлы, диск равной прочности — самая выгодная форма, обеспечивающая предельную плотность энергии. Если охарактеризовать форму маховика коэффициентом эффективности (как это и делается при расчетах) и присвоить диску равной прочности максимальный коэффициент, то диск с очень малым центральным отверстием получит 0,3; тонкий обод — 0,5;



диск без отверстия — 0,6; диск равной прочности с ободом — между 0,6 и 1 в зависимости от величины обода.

Диск равной прочности, конечно, сложен в изготовлении (хотя его форму с успехом заменяют похожей, но более простой гиперболической), не терпит никаких отверстий, раковин, волосовин, особенно в центре, эффективен только при весьма высокой окружной скорости, но зато обеспечивает минимальный вес при данном запасе энергии. А это немаловажно и часто играет решающую роль при выборе силового агрегата \*.

Маховик можно изготовить как из тяжелых материалов с большим удельным весом, так и из легких: и из свинца, и из алюминия. С первого взгляда кажется, что чем тяжелее маховик, тем больше плотность энергии в нем. Но это предположение в большинстве случаев неверно.

Рассмотрим для простоты маховик в виде тонкого обода (кольца). Мы знаем, что напряжения в тонком кольце при вращении зависят от плотности материала и квадрата окружной скорости  $\sigma = \rho v^2$ , а плотность энергии — только от квадрата окружной скорости  $e = 0,5v^2$ . Плотность энергии при этом прямо пропорциональна плотности этого материала:

$$e = 0,5 \frac{\sigma}{\rho}.$$

Таким образом, мы убеждаемся, что плотность энергии при равной прочности материала тем выше, чем легче сам материал, т. е. меньше его плотность. Точнее, плотность энергии прямо пропорциональна величине  $\sigma/\rho$  — удельной прочности материала маховика. Обозначив отношение  $\sigma/\rho$ , например, буквой  $\chi$ , получим общую формулу, характеризующую плотность энергии вращающегося кольца:

$$e = 0,5\chi.$$

Как будет показано в дальнейшем, это выражение справедливо для маховиков любой формы, только коэффициент, характеризующий форму маховика, будет другим. Для тонкого кольца он, в частности, равен 0,5. Обозначив его через  $k$ , запишем выражение, определяющее плотность

\* У нас в стране одним из первых начал применять для маховиков диски равной прочности известный изобретатель А. Г. Уфимцев: его патент на инерционный аккумулятор датирован 1918 г.



энергии маховика любой формы:

$$e = k\chi.$$

А теперь проверим сказанное для реальных материалов, из которых можно изготовить маховики: стали, свинца, алюминия, титана, магниевых сплавов, пластмассы и даже дерева и древесных пластиков. Так, у чугуна, из которого даже сейчас иногда отливают маховики, временное сопротивление (т. е. напряжение, при котором материал разрушается) равно примерно  $5 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ , а плотность — 7 тыс.  $\text{кг/м}^3$ . Удельная прочность выходит равной  $7 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Для обыкновенных углеродистых сталей эта цифра примерно вдвое, а для высокопрочных легированных сталей даже втрое выше, чем у чугуна. Итак, максимум, что мы можем «выжать» из стали, даже самой совершенной, — это  $2 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Титановый маховик сможет накопить в 1,5 раза больше энергии в единице массы, потому что его удельная прочность во столько же раз выше, чем у лучшей стали, и доходит до  $3 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Примерно такие же показатели обеспечат маховики из дюралюминия с плотностью  $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$  и из совсем легких магниевых сплавов с плотностью  $1800 \text{ кг/м}^3$ . А вот маховик из такого тяжелого материала, как медь, не накопит и десятой доли энергии стального маховика, а свинцовый — и сотой доли титанового или алюминиевого. Удельная прочность этих материалов очень низка, что объясняется малой их прочностью и в той же мере высокой плотностью. Как это ни кажется удивительным, тяжелые плотные материалы гораздо менее выгодны для изготовления маховиков, чем легкие, но прочные. Пластмассы также оказались хорошими заменителями стали: текстолитовый маховик, например, по удельной прочности, а стало быть, и по плотности энергии, не уступает стальным маховикам.

Несколько неожиданным материалом для маховиков кажется дерево или бумага. Но по данным американских ученых маховики из дерева, фанеры, склеенной в несколько слоев бумаги эффективнее стальных маховиков по плотности энергии и значительно дешевле их. Например, плотность энергии маховиков, изготовленных из древесины различных пород, такова: маховика из бамбука — 300 тыс. Дж/кг, березового маховика и из филиппинского махогона — 150 тыс., из сосны — 135 тыс., красного дере-



ва — 130 тыс., ели — 156 тыс. Дж/кг. «Чемпион» — бамбуковый маховик — почти в 10 раз превосходит по плотности энергии стальной маховик, а стоимость древесины во много раз ниже, чем металла. Хорошие показатели имеют также маховики из древесных пластиков — древесины, пропитанной особыми смолами.

Правда, легкие материалы имеют и недостаток — объем маховика получается весьма большим.

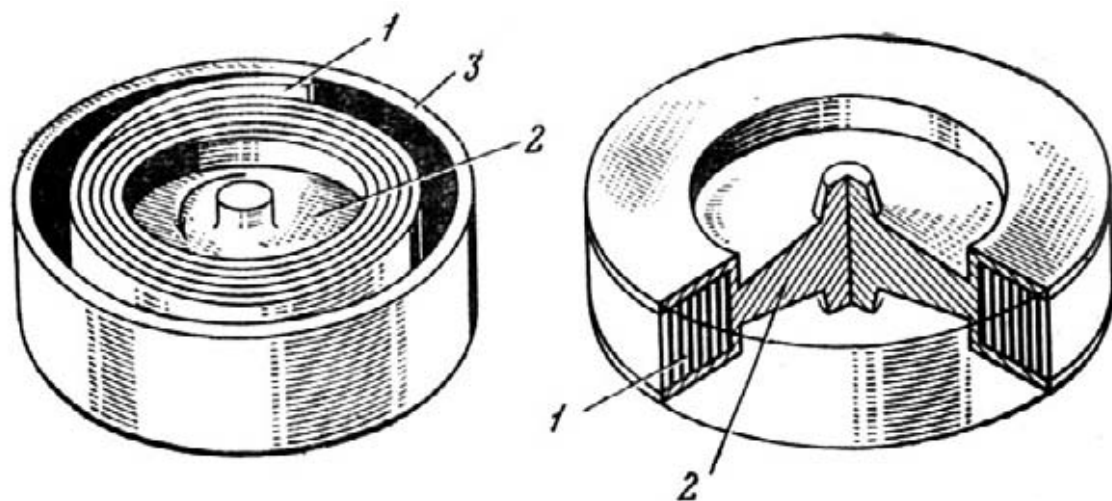
Объем маховика при равном запасе кинетической энергии в нем обратно пропорционален временному сопротивлению. Стало быть, материалы равной прочности, независимо от их плотности, обеспечат и равный объем маховика. Так, например, бамбук, алюминий и чугун имеют примерно равную прочность, и маховики равной энергоемкости из этих материалов будут одинаковы по размерам. Но алюминиевый маховик будет иметь массу в 3 раза, а бамбуковый — в 10 раз меньше, чем чугунный.

Сейчас в технике уже имеются материалы с поистине фантастической удельной прочностью — это тонкие, толщиной в несколько микрометров, волокна из стекла, кварца, бора, графита и т. д. Эти материалы в 3 раза и более легче стали, а прочность их в десятки раз больше, чем у стали. Стекло и кварц, подвергнутые специальной термообработке, могут выдерживать напряжения до 3 и 10 кН/мм<sup>2</sup> соответственно. Это втрое выше, чем у лучшей стальной проволоки, а в то же время плотность этих материалов втрое меньше, чем у стали. Маховик из упрочненного кварца в виде диска равной прочности может иметь плотность энергии свыше 5 тыс. кДж/кг, т. е. в 150 раз больше, чем стальной маховик!

Особенно же большие перспективы для маховиков открывают «сверхматериалы», предсказанные (и рассчитанные) профессором А. В. Степановым\*. По его данным, плотноупакованная модификация углерода может иметь прочность во столько раз большую по сравнению с алмазом, во сколько раз сам алмаз прочнее обыкновенного угля. При плотности 7600 кг/м<sup>3</sup> такой «сверхуглерод» выдерживает фантастическую нагрузку: 400 кН/мм<sup>2</sup>. Но еще больших результатов можно ожидать от плотноупакованной модификации азота — «металлической». При плотности 25 тыс. кг/м<sup>3</sup> этот материал должен выдержать

\* См.: Изобретатель и рационализатор, 1970, № 4, с. 24.





Маховик, навитый из ленты, и картина его разрыва в кожухе (справа)

1 — лента, 2 — центр, 3 — кожух

нагрузку в  $2800 \text{ кН/мм}^2$ . Маховик из такого материала должен обладать плотностью энергии, даже теоретически недоступной никаким другим аккумуляторам:  $60 \text{ МДж/кг}$ . Это в 800 раз больше, чем у маховика из наилучшей стали. Небольшой диск из такого материала — диаметром 30 см и толщиной 6 см — сможет обеспечить пробег автомобиля на расстояние 30 тыс. км без подзарядки.

Известно, что максимальная прочность у металла достигается, когда он имеет форму лент или проволоки. Лента или проволока, благодаря своей внутренней структуре, образованной холодной прокаткой или волочением, имеет прочность, в несколько раз превышающую прочность исходного материала. Но как изготовить маховик из ленты? Оказывается, это даже проще, чем отлить или выковать его. Берется легкий центр (например, катушка из дюралюминия или пластмассы), и на него навивается тонкая лента, предварительно смазанная клеем. Клей должен быть достаточно эластичным, чтобы заполнить зазоры между витками ленты, образованные неодинаковым расширением витков разного диаметра при вращении. При одинаковой угловой скорости и плотности ленты виток, имеющий больший диаметр, напряжен сильнее и, следовательно, сильнее деформируется, что вызывает межвитковые зазоры. И основная функция клея состоит в том, чтобы заполнять эти зазоры, не позволяя виткам «освободиться» один от другого.

Испытания такого маховика на разрыв при вращении показали, что плотность энергии в нем почти в 6 раз



выше, чем у изготовленного из высококачественной, но монолитной стали. Самое же главное — испытания показали, что маховик, навитый из ленты, совершенно безопасен при разрыве!

Выше мы говорили, что чем дальше виток ленты расположен от центра, тем сильнее он напряжен. Стало быть, первым разорваться может только этот внешний виток. К тому же он ослаблен креплением к предпоследнему витку склейкой и т. д. А, разрываясь, отслоившийся конец ленты тотчас же прижимается к внутренней поверхности кожуха и активно трется об нее, автоматически тормозя маховик. Этот последний виток ленты играет ту же роль, что и предохранительная мембрана на паровом котле — разрываясь сам, предохраняет от разрыва весь маховик. Разумеется, все сказанное относится к случаю вращения маховика в направлении навивки ленты; при противоположном направлении вращения маховик может разорваться весь, хотя и без образования опасных осколков.

Оказалось, что безопасный разрыв характерен для всех маховиков, изготовленных из слоисто-волокнистых композиционных материалов высокой прочности. Правда, такие маховики разрываются целиком (как и ленточный в случае вращения не в ту сторону), но опасных осколков, как при разрыве монолитного маховика, не образуется, и меры защиты тут гораздо проще. Маховики, изготовленные из таких композиционных материалов, накапливающие энергию с гораздо большей плотностью, чем обычные монолитные, и обладающие безопасным разрывом, получили название «супермаховиков». Таким же свойством обладают маховики из сверхпрочных стекла и кварца — при разрыве они мгновенно рассыпаются в пыль.

Несмотря на то что разновидностей супермаховиков существует достаточно много, их можно разбить на два основных типа: стержневые и ободковые. Стержневой супермаховик принципиально представляет собой стержень, вращающийся вокруг оси, перпендикулярной к его продольной оси. Ободковый же супермаховик, как и традиционный, вращается в своей плоскости вокруг центральной оси. Крепление как стержня, так и обода к центру выполняется различными способами в зависимости от типа супермаховика.



Основное различие между супермаховиками этих двух типов состоит в том, что стержневой при вращении находится в главном напряженном состоянии под действием радиальных напряжений (действующих по радиусу), а ободковые напряжения (действующие по касательной к траектории рассматриваемого вращающегося элемента), хотя и играют незначительную роль для аккумуляирования

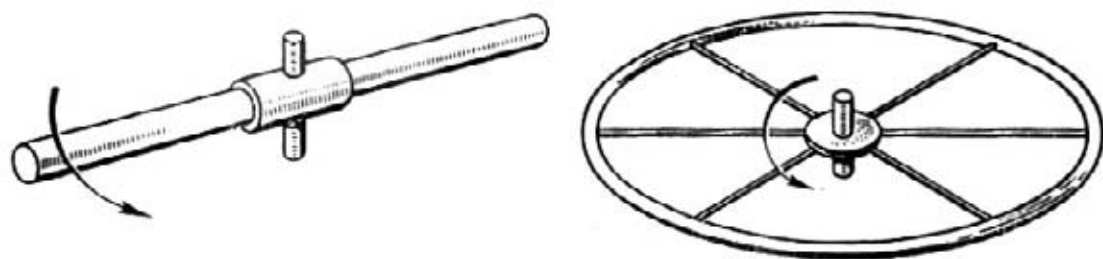


Схема стержневого (слева) и ободкового супермаховиков

энергии, зато приносят наибольший вред, расслаивая стержень. Противоположная картина у ободковых супермаховиков — наибольшие окружные напряжения играют основную роль в аккумуляировании энергии, а радиальные, хоть и незначительные, но приносят конструкции вред, расслаивая обод.

Идеальная картина была бы в случае бесконечно тонких стержня и обода — там не было бы «вредных» напряжений. Но выполнить их такими невозможно, да и невыгодно: в этом случае слишком малый объем камеры вращения (кожуха) маховика будет использоваться эффективно. Однако и толстыми их делать нельзя — расслаются. Ведь прочность одноосных композиционных материалов вдоль и поперек волокон далеко не одинакова. Конструкторам предстояло разрешить противоречие — максимально заполнить объем камеры вращения материалом, но в то же время избежать побочные «вредные» напряжения.

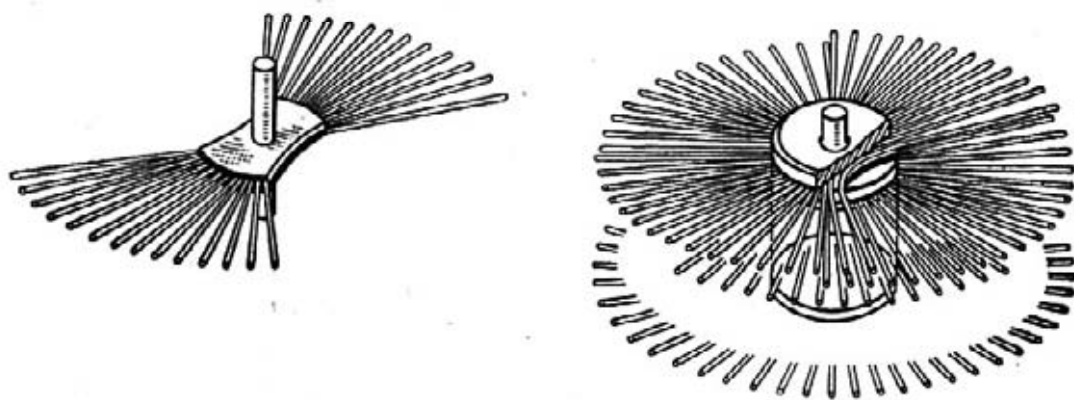
Логичнее всего, конечно, было просто «не воспринимать» эти побочные напряжения, давая супермаховику свободно расслаиваться. Так возникла щеточная конструкция стержневого супермаховика, для ободкового же такое решение было неприемлемо. Отдельные волокна



стягиваются в центре оправкой с осью на ней и приводятся во вращение. Волокна, растягиваемые, из-за напряжений при вращении, расходятся сектором, образуя некое подобие щетки. Материалом для щеточного супермаховика может служить как высокопрочная проволока, так называемая рояльная, или из бериллиевого сплава, так и различные высокопрочные волокна — нитевидный бор и графит, стеклянные и кварцевые волокна, кевлар.

Компактность щеточного супермаховика, конечно, оставляет желать много лучшего, даже если изготовить круглую оправку и расположить волокна не сектором, а распределив по всей окружности.

Стремление повысить компактность стержневых супермаховиков привело к созданию конструкций брускового типа: отдельные тонкие волокна — стержни склеиваются на основе эпоксидной или иной связки, образуя достаточно толстый брусок, стягиваемый в центре оправкой, как и щеточный супермаховик. Вращение бруска, как и отдельного стержня, — вокруг поперечной оси. Компактность супермаховика повысилась, но прочность из-за расслаивания несколько ниже, чем у щеточного. Приданием



Щеточный супермаховик. Справа — круглый супермаховик, полученный совмещением щеточных блоков

бруску формы, близкой к стержню равной прочности (насколько это можно сделать у такого анизотропного композиционного материала), плотность энергии была повышена, хотя и в ущерб компактности.

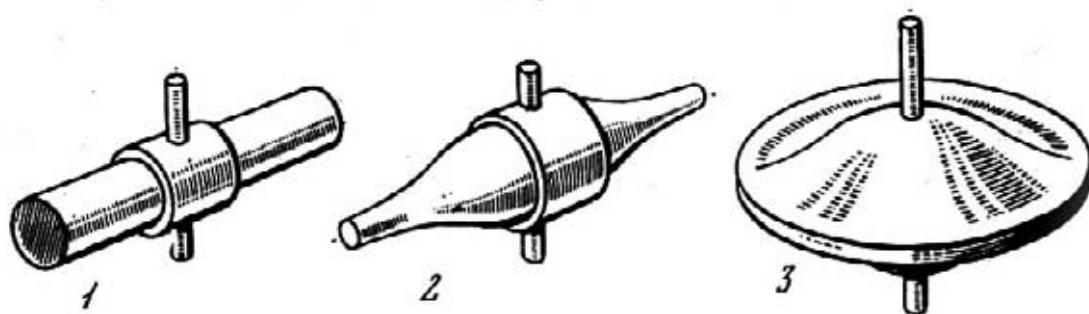
Ведущий специалист в США по супермаховикам Д. В. Рабенхорст (Университет им. Дж. Гопкинса) предложил повысить компактность стержневых супермаховиков, склеивая из отдельных стержней или полосок, составленных из волокон, диск, близкий по форме к диску



равной прочности. Этот супермаховик получил название дискового (правильнее «псевдодискового») \*. Исследованиями супермаховиков занимаются многие фирмы США, Англии, Франции, Италии, ФРГ, Японии и других стран.

Теперь об ободковых супермаховиках. Эти конструкции таят в себе большие возможности: они компактны, допускают размещение в центре вспомогательных систем и устройств (поскольку центр здесь практически свободен от нагрузок), имеют более низкую угловую и окружную скорости, чем стержневые супермаховики.

Как пример ободкового супермаховика рассмотрим ленточный маховик. Обод у него может быть навит не



**Стержневые супермаховики**

1 — стержень постоянной толщины, 2 — стержень равной прочности, 3 — псевдоизотропный диск равной прочности

только из ленты, но и из проволоки, высокопрочных волокон со связкой, как и у стержневых конструкций. При этом ободковые конструкции более технологичны, легче балансируются и при разрыве безопаснее стержневых.

Вероятность расслоения у них та же, что и у стержневых, если не выполнять обод слишком толстым, что невыгодно и с точки зрения накопления энергии.

По плотности энергии эти супермаховики соизмеримы со стержневыми: как у тех, так и у других достигнута величина 200—300 тыс. Дж/кг. Некоторое превышение плотности энергии у малых моделей супермаховиков (например, полученная Д. В. Рабенхорстом для нити из бора величина 400 тыс. Дж/кг \*\*) объясняется тем, что

\* Очень похожие на эти маховики разрабатываются Г. Г. Портновым в Институте механики полимеров АН ЛатвССР.

\*\* По японским данным, испытания стержневого маховика из специального стекловолокна с полимерной связкой показали плотность энергии 650 кДж/кг (180 Вт·ч/кг) без разрушения образца.



стержневые конструкции (в экспериментальных моделях фактически один стержень) гораздо удобнее для испытаний коротких и тонких нитей из сверхпрочных материалов, чем обод, который надо мотать из достаточно большого количества волокон, чтобы исключить влияние давления центра. Но для больших натуральных маховиков обод выгоднее стержня. В последнее время и для ободов получены весьма высокие значения удельной энергоемкости.

У нас в стране в основном исследуются ободковые супермаховики, так как мы видим в них определенные преимущества перед стержневыми, главным образом компактность и аэродинамические качества. В последнее время и американские специалисты почти полностью перешли к разработке ободковых супермаховиков, навитых из различных материалов, и в первую очередь из кевлара, который при малой плотности обладает очень высокой прочностью.

Выше мы говорили о перспективных центробежных аккумуляторах. На их основе можно сконструировать маховичные двигатели с различными свойствами, необходимыми для той или иной машины. Центробежным аккумулятором можно плавно разгонять машину и, наоборот, тормозить, аккумулируя ее кинетическую энергию. Можно построить даже такой маховик, который, расходуя энергию, например на вращение генератора, будет почти до полного выделения всей энергии сохранять постоянную частоту вращения. Для этого надо соответствующим образом перематывать ленту с наружного на внутренний моток. Свойство сохранять постоянную частоту вращения очень ценно для привода генераторов — ведь тогда они будут вырабатывать ток постоянного напряжения и частоты. Можно даже создать маховик, разгоняющийся при совершении работы. Конечно, разгон будет только до какого-то предела, после чего неминуемо должна последовать остановка (не то мы рискуем создать вечный двигатель).

Очень важным вопросом для любого аккумулятора является коэффициент полезного действия — КПД маховичных аккумуляторов, как и других машин, представляет собой отношение полезно затраченной энергии ко всей энергии, накопленной в маховике и выделенной за время работы его как двигателя. Полезно затраченная энергия — это энергия, которая пошла на совершение не-



обходимой нам работы — перекачивание колес машины, преодоление сопротивления воздуха, вращение трансмиссии и другие «полезные» сопротивления. А вся выделенная энергия складывается из той, что пошла на полезную работу, и внутренних потерь в маховичном аккумуляторе. От этих потерь и зависит КПД маховичного аккумулятора. Посмотрим, где же теряется энергия при вращении маховика.

Вращаясь, маховик приводит в движение и окружающие слои воздуха. Вокруг быстро вращающегося маховика чувствуется движение воздуха, ветерок, как от включенного вентилятора. На это, естественно, уходит энергия, а потери или сопротивления на создание «ветерка» 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 перекачивание 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 «статей» потерь энергии: на вихревые токи при вращении в поле земного магнетизма, потери на демпфирование при вибрациях, потери на звук, который обычно сопровождает вращение маховика. Эти потери, как и перечисленные выше, пренебрежимо малы по сравнению с двумя основными — вентиляционными и в опорах.

Установлено, что, помещая маховик в водородную среду, можно снизить потери почти в 10 раз, а в гелиевую — в 7 раз по сравнению с воздушной. Оказалось, что даже температура окружающей среды влияет на потери энергии. Так, при температуре  $-60^{\circ}\text{C}$  потери по сравнению с обычной комнатной температурой  $20^{\circ}\text{C}$  увеличиваются на 17%, а при температуре кипения воды  $100^{\circ}\text{C}$  уменьшаются на 11%.

Есть простая эмпирическая формула для определения мощности потерь на вентиляцию:

$$N = (0,057D^5 + 0,29D^4L)n^3 \cdot 10^{-16}, \text{ Вт}$$

( $n$  — частота вращения маховика, об/мин;  $L$  — ширина маховика, см;  $D$  — диаметр маховика, см). Если есть кожух, мощность потерь нужно уменьшить на 20%. Для маховиков, вращающихся в газовой среде нормального



давления, вентиляционные потери составляют до 85% от общих механических. Это очень много!

Как же их уменьшить? Прежде всего, конечно, рациональным выбором зазора, обеспечением максимальной гладкости поверхностей маховика и кожуха: следует избегать всякого рода изменений сечения зазора между маховиком и кожухом, выточек, шлицев, отверстий в маховике, особенно близ периферии, где окружная скорость высока. Но этими мерами много, конечно, не выиграешь.

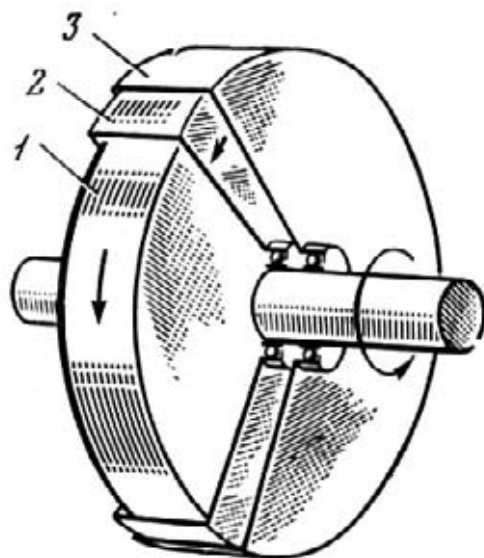
Если внимательнее приглядеться к формулам, определяющим вентиляционные потери, можно заметить, что эти потери сильно возрастают с увеличением относительной окружной скорости между маховиком и кожухом. Есть даже выражение, непосредственно связывающее мощность  $N$  потерь и относительную окружную скорость  $u$  между маховиком и кожухом:

$$N = Bu^3 D^2,$$

где  $B$  — коэффициент пропорциональности.

Стало быть, если уменьшить окружную скорость вдвое, потери упадут сразу в  $2^3$ , т. е. в 8 раз! А что, если между маховиком и кожухом поставить дополнительный легкий кожух, вращающийся с половинной скоростью маховика? Тогда относительная скорость упадет вдвое, а потери с учетом того, что трущихся о воздух поверхностей будет уже две, теоретически 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.

Но снижение потерь в 2 раза и даже в 4 раза — это



Маховик с промежуточным вращающимся кожухом

1 — маховик, 2 — вращающийся кожух, 3 — неподвижный кожух



не разрешение проблемы. Для чего нам нужно бесцельно взбаламучивать воздух и тратить на это с таким трудом накопленную энергию? Стало быть, в кожухе (камере вращения) вообще не должно быть воздуха. Вакуумирование или значительное снижение давления в камере вращения представляется наиболее радикальным и перспективным разрешением вопроса снижения вентиляционных потерь.

Но для этого камера должна быть герметичной, а из нее как-то надо вывести вращение! Тут и заключена основная трудность, разрешение которой привело к созданию ряда методов вывода мощности из герметичной камеры:

1) вывод мощности электрическим, гидравлическим или иным немеханическим методом;

2) вывод мощности механическим способом через негерметичные уплотнения с постоянной откачкой воздуха;

3) вывод вращения из герметичной камеры.

По методу первому маховик вместе с электрогенератором помещается в герметичный корпус, а энергия отводится по проводам в виде электрического тока. Несмотря на большую популярность такой схемы для маховичных двигателей, она не лишена недостатков: КПД электрической передачи невысок, схема тяжела и лишает маховичный привод большого преимущества — высокой удельной мощности.

По второму методу вал выводится из камеры вращения через обычные уплотнения, например манжетные, а воздух, который постоянно подсасывается в вакуумную камеру, непрерывно удаляется насосом. Выбег (холостой ход после разгона) такого маховика достигает недели. Но опять неудобство — нужно постоянно откачивать воздух, необходим вакуум-насос, требуется уход за ним. Вот если бы не нужно было откачивать воздух. Это достигается третьим методом. По этому методу вал выводится из герметичной камеры вращения через какую-либо герметизирующую систему. Их насчитывается несколько типов: статические и динамические жидкостные системы и системы с гибким элементом.

Перспективны магнитные уплотнения, состоящие из магнитной жидкости, находящейся в магнитном поле, создаваемом постоянными магнитами вокруг вала. Магнитная жидкость — это коллоидный раствор феррита в жид-



кости, например в керосине. Размеры частиц феррита должны быть очень малы — не более 100 ангстрем, иначе жидкость будет нестойкой.

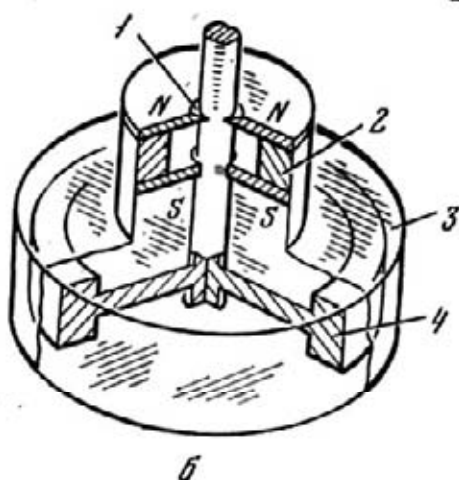
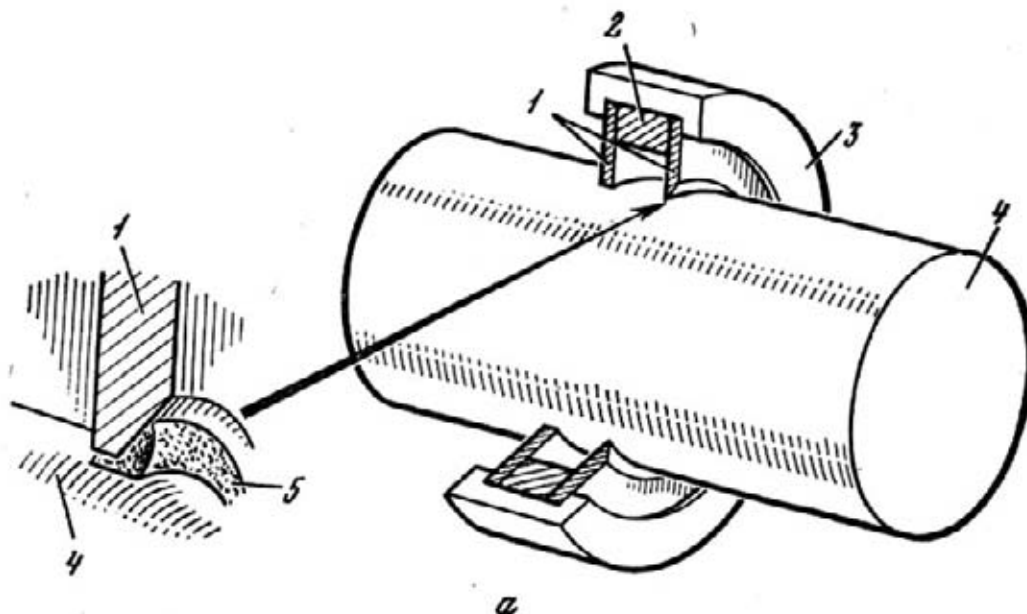
Пожалуй, перспективнее всех систем с гибким элементом системы с волновыми муфтами. Генератор волн — кулачок эллипсной формы, вращаясь, изгибает гибкий стакан, придавая ему в сечении форму кулачка-эллипса. Внешняя обойма, имея внутреннее отверстие такой же эллипсной формы, «следит» за волной, возникающей 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. К слову, волновая передача, как известно, также пригодна для передачи вращения через герметичную стенку, но, увы, только в одну сторону, так как 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 и 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 (токи Фуко) — и стенка будет нагреваться. Магнитные муфты довольно громоздки и не позволяют передачу больших крутящих моментов. Магнитную муфту нельзя использовать как муфту включения на ходу — она не «поведет» и будет лишь вибрировать. Для включения магнитной муфты надо обязательно выровнять угловые скорости обеих полу-муфт. Зато магнитные муфты хорошо передают большие угловые скорости.

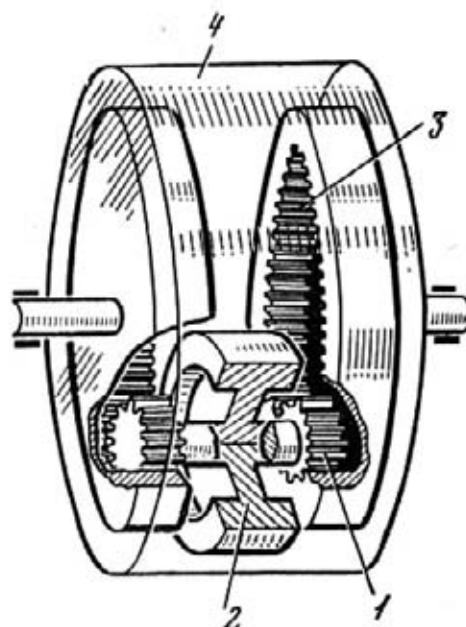
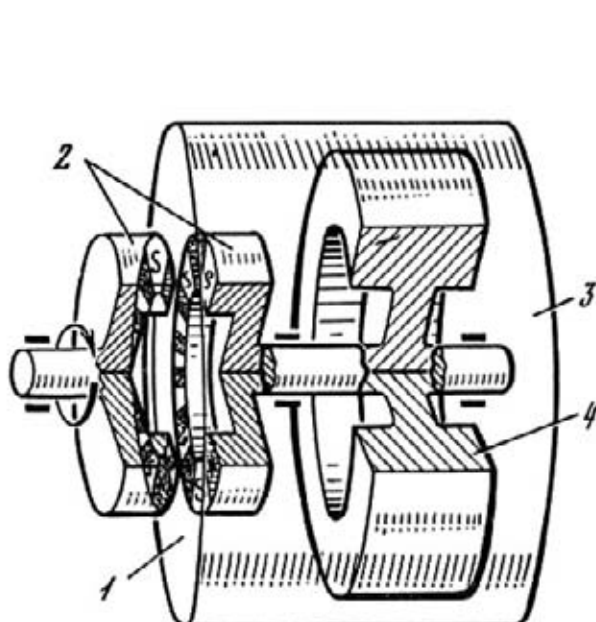
И наконец, последний способ (хотя их еще очень много) передачи вращения из герметичной камеры — через вращение самой камеры. Этот способ позволяет одновременно и передавать вращение из камеры, и существенно уменьшить угловую скорость вращения на выходном звене. Камера выполняется по диаметру большей, чем маховик, и в ней на торцах укрепляются два венца (зубчатых или гладких). На этих венцах своей осью (тоже





### Магнитное уплотнение вала

**а** — уплотнение вала с помощью магнитной жидкости (1 — полюсные наконечники, 2 — кольцевой магнит, 3 — немагнитный корпус, 4 — вал, 5 — магнитная жидкость); **б** — камера вращения маховика, уплотненная магнитной жидкостью (1 — магнитная жидкость, 2 — кольцевой постоянный магнит, 3 — камера вращения, 4 — маховик)



**Передача вращения через герметичную стенку с помощью магнитной муфты**

1 — немагнитная и непроводящая перегородка, 2 — магниты, 3 — камера вращения, 4 — маховик

**Передача вращения маховика из герметической камеры**

1 — шестерня, 2 — маховик, 3 — венец, 4 — камера вращения



зубчатой или гладкой) сидит маховик. Если начать вращать камеру на своей оси, то маховик, отклоняясь в сторону и вверх, будет стремиться скатиться вниз и, обкатываясь по венцу, будет раскручиваться. Особенно велик момент раскручивания, если венец и ось зубчатые. Раскрутив маховик, т. е. накопив в нем энергию, можно отбирать мощность от вращающейся камеры. Маховик будет отклоняться в другую сторону, но тоже вверх, и «вести» камеру. Разумеется, крутящий момент, передаваемый таким устройством, невелик, и вся конструкция громоздка. Кроме того, маховик и камера обязательно должны вращаться в вертикальной плоскости, что не всегда приемлемо. В последнее время созданы более компактные и высокомоментные подобные системы с использованием гироскопического эффекта. Но каждой системе свойственны свои специфические достоинства и недостатки, и трудно пока указать среди них наилучшую, пригодную для всех случаев.

Потери энергии в опорах, хотя и 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 единственным источником потерь энергии. К тому же с повышением вакуума в камере вращения подшипники оказываются во все более невыгодных эксплуатационных условиях и при достаточно высоком вакууме имеют весьма ограниченные несущую способность и долговечность. В вакууме, как известно, плохо держится смазка, шарики подшипников, «прилипая» к дорожкам качения, быстро выкрашиваются. Для смазки подшипников в вакууме применяют даже покрытие золотом, и то без большого успеха.

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

$$M = 0,5Gfd, \text{ Нсм,}$$

где  $G$  — вес маховика, Н;  $f$  — приведенный коэффициент трения в подшипниках качения, меняющийся примерно от 0,001 до 0,004 в зависимости от качества подшипника;  $d$  — диаметр вала под подшипником, см.

Потери энергии в опорах могут быть значительно уменьшены применением специальных подвесов махови-



ков. Для валов с вертикальной осью вращения наиболее удобным и эффективным методом снижения потерь в подшипниках является магнитное подвешивание.

На наш взгляд, наиболее приемлемым способом снижения потерь энергии в подшипниках инерционного аккумулятора является магнитное комбинированное подвешивание маховика, т. е. применение магнитной подвески с постоянными магнитами совместно с подшипниками. Эксперименты на стендах с магнитным подвешиванием маховика показали значительное снижение сопротивления в подшипниках — до 20—25 раз.

Не менее интересен шаровой ротор-маховик, применяемый для сохранения заданного положения пилотируемых космических орбитальных станций. Маховик сферической формы не имеет традиционных опор: он подвешен в магнитном поле, создаваемом шестью электромагнитами, поэтому может вращаться вокруг любой оси, проходящей через центр его массы.

В последнее время появились магнитные опоры на постоянных магнитах с присутствием диамагнетиков, что позволяет также полностью «вывешивать» маховик.

Однако наибольшую перспективу для опор маховиков, работающих в вакууме, особенно глубоком, таит явление сверхнизкого трения, открытое группой советских ученых. Оказывается, у ряда известных материалов, применявшихся и ранее 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 и непременным условием достижения сверхнизкого трения\*.

Создав сверхпрочные волокна, сверхсильные магниты, сверхнизкое трение и сверхвысокий вакуум, техника сегодняшнего дня словно позаботилась о маховичных аккумуляторах, обеспечив им блестящие перспективы.

---

\* См.: Силин А. А. Трение и его роль в развитии цивилизации. М.: Наука, 1975. Авторы открытия сверхнизкого трения (в частности, А. А. Силин и Е. А. Духовский) подтвердили техническую осуществимость создания подшипников сверхнизкого трения для маховиков с вакуумной камерой вращения. И тогда маховичные двигатели практически лишатся внутренних потерь энергии, что обеспечит им почти 100% КПД.



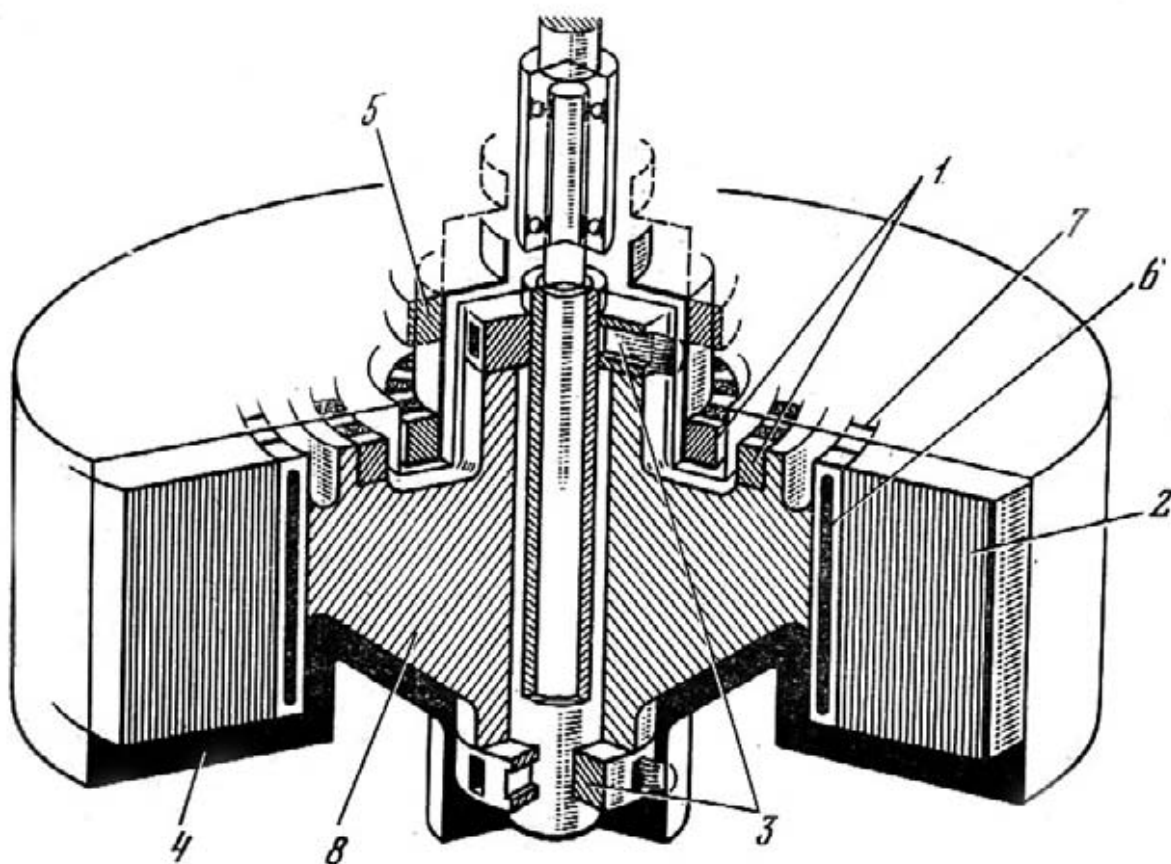
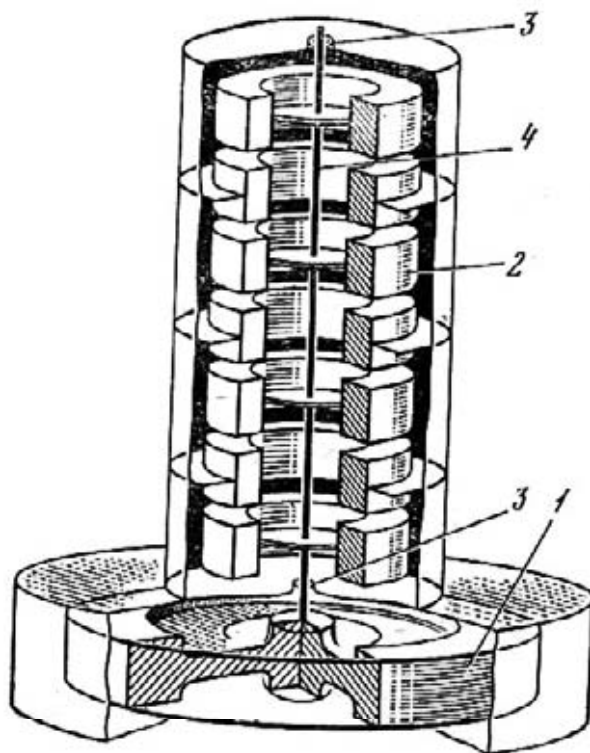
Попробуем представить маховичный аккумулятор будущего, каким бы фантастическим он ни выглядел, ориентируясь на реальные достижения науки и техники сегодняшнего дня. Не будем касаться таких узких конкретных вопросов, как трансмиссии от маховика до рабочего органа машины, использование гироскопического эффекта или

#### Схема магнитной подвески маховика

1 — маховик, 2 — магниты, 3 — подшипники, 4 — ось

#### Перспективный маховичный аккумулятор

1 — магнитная муфта, 2 — витой обод из сверхпрочных ните- и лентовидных материалов, 3 — подшипники сверхнизкого трения, 4 — вакуумная камера вращения, 5 — ведомая магнитная полумуфта (отключена), 6 — тяжелый балласт в кольцевой полости периферии центра, 7 — радиальные прорезы в периферии центра (для устранения окружной жесткости), 8 — центр





борьба с ним, способ разгона маховика и пр. Попытаемся представить лишь сердце маховичного аккумулятора, его энергетический блок. При этом не исключено, что отдельные узлы, существующие пока лишь в воображении, в жизни будут выглядеть несколько иначе.

Массивный обод, навитый из сверхпрочных волокон, обеспечивает высокую плотность накопленной энергии. Если это стальная проволока прочностью  $5000 \text{ Н/мм}^2$ , то энергия аккумулятора составит  $3 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ . Графитовое волокно или кевлар при прочности  $3150 \text{ Н/мм}^2$ , но впятеро меньшей плотности, чем сталь, обеспечат около  $10^6 \text{ Дж}$  энергии в килограмме массы. Полученные уже несколько лет назад кварцевые волокна при фантастической прочности  $37 \text{ тыс. Н/мм}^2$  и плотности, вдвое большей, чем у графита, обеспечат плотность энергии свыше  $5 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ , или  $1400 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$  на килограмм массы обода. Это огромная плотность энергии, намного превышающая даже теоретическую любых электрических аккумуляторов. А ведь в лабораториях мира разрабатываются новые, все более прочные материалы \*.

Разрыв такого маховичного аккумулятора, как показал эксперимент, безопасен.

Камера вращения маховика вакуумная, давление в ней не более  $10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$  Такое разряжение практически устраняет вентиляционные потери, а отсутствие паров воды благотворно действует на прочность витого обода.

В последнее время появились новые перспективные материалы для маховиков — монолитные, специально термообработанные сверхпрочные стекло и кварц. Благодаря термообработке и специальной подготовке поверхности они выдерживают колоссальные напряжения. Из этих материалов можно делать маховики в виде дисков равной прочности, придавая их сечению наиболее выгодную форму. По энергетическим показателям эти маховики близки к наиболее перспективным витым супермаховикам. Характерно, что разрыв их тоже безопасен — при разрушении маховик мгновенно разлетается в пыль.

Опоры, выполненные из материала, проявляющего при облучении сверхнизкое трение, например из дисульфида

\* По японским данным, новые материалы из углерода со структурой графита и алмаза обеспечивают гигантскую теоретическую плотность энергии: соответственно  $2400$  и  $4200 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ .



молибдена, обеспечивают уменьшение потерь в сотни раз по сравнению с подшипниками качения при более высокой несущей способности. Мощность, затрачиваемая на облучение подшипников сверхнизкого трения, весьма мала — меньше, чем потребляемая лампочкой карманного фонаря. Не исключается применение здесь и магнитной разгрузки опор от силы тяжести маховика. Внутренние потери в такой системе подвески настолько малы, что маховик будет вращаться с одной раскрутки многие месяцы.

Отбор мощности может производиться магнитной муфтой на основе перспективных сверхсильных постоянных магнитов, уже используемых в технике, но пока еще дорогих. При холостом ходе маховика наружная полумуфта может выводиться из магнитного взаимодействия с находящейся в камере и останавливаться. При необходимости включения муфты наружная полумуфта доводится до синхронной скорости, например гистерезисным способом (с помощью хотя бы медного кольца на полумуфте), а затем включается трансмиссия. Трансмиссия может быть любой — электрической, гидравлической, механической. Между исполнительным механизмом и выходным валом маховичного двигателя может быть установлен и центробежный аккумулятор для обеспечения желаемой рабочей характеристики.

Такой маховичный аккумулятор может служить универсальным двигателем для любых машин, не говоря уже о транспортных, особенно эксплуатируемых в городе, и может явиться основой для создания неизвестных сегодня машин, неосуществимых с двигателями сегодняшнего дня.

Долгое время недостатки маховика (в основном низкая удельная энергоемкость и громадная опасность разрыва) тормозили его применение для автомобилей. Современное развитие науки и техники подготовило хорошую почву для радикального увеличения полезных свойств маховика, ставшего в последние годы вполне конкурентоспособным (с электроаккумуляторами). По ряду показателей маховик уже сегодня существенно превосходит электроаккумуляторы. Все это позволяет предположить, что в перспективе маховик будет применяться в качестве основного и вспомогательного двигателя аккумуляторного автомобиля, а также широкой гаммы других машин и агрегатов, использующих сейчас тепловые двигатели.



## МАХОВИЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ В ТЕХНИКЕ

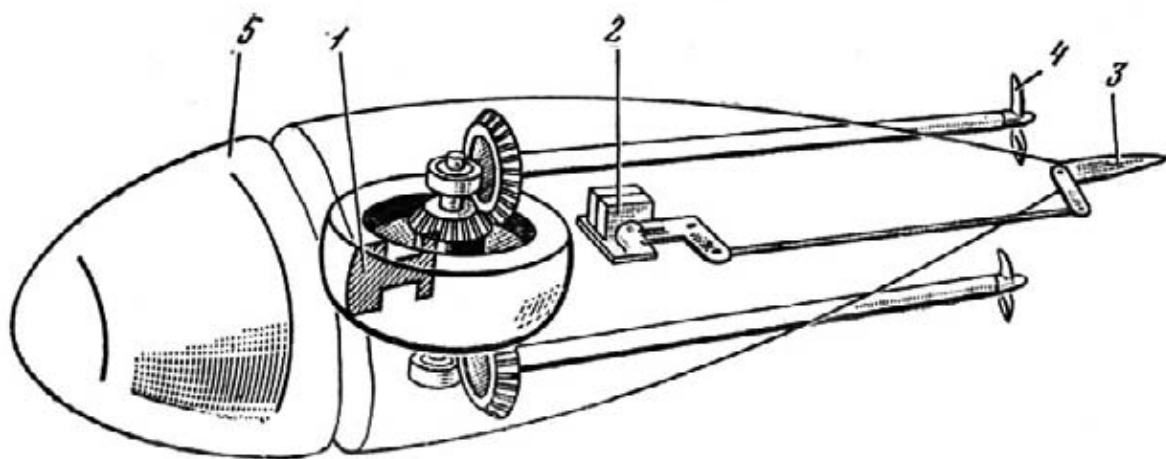
Интересным примером использования маховиков была боевая торпеда. Как и мрачные японские смертники — камикадзе, маховик доставлял груз к вражескому кораблю и, погибая сам, отправлял его на дно.

В 1870 г. американский лейтенант (позднее адмирал) Джон Адамс Хауэлл приступил к выполнению проекта, заключавшегося в усовершенствовании уже находившейся на вооружении флота США торпеды с маховичным двигателем. В 1883—1884 гг. Хауэлл создал первый вариант торпеды, в которой маховик играл роль не только двигателя и аккумулятора механической энергии, но и гироскопического стабилизатора заданного направления движения. В этом варианте торпеда Хауэлла имела диаметр 35 см и массу 120 кг. Взрывчатка массой 20 кг помещалась в носовой части. Маховик массой 45 кг разгонялся до скорости 10 тыс. об/мин, накапливал при этом около 400 тыс. Дж энергии. Торпеда с маховичным двигателем покрывала расстояние около 500 м со скоростью до 30 км/ч.

В следующем, более усовершенствованном варианте торпеда могла развивать скорость 45 км/ч, проходя путь до 1 км. Разгон производился внешним (паровым) двигателем за 30 с. Эта торпеда имела сигарообразную форму длиной 2,4 м и была обшита медным листом. Примерно в ее середине размещался стальной маховик в виде обода с диском диаметром около 31 см и толщиной 15 см. Передаточное число привода маховика к гребным винтам составляло 1,2 : 1,0. Гребные винты имели регулируемый угол наклона лопастей, зависящий от частоты вращения маховика. Направление движения торпеды корректировалось рулем, связанным с особым маятниковым стабилизирующим устройством: действие этого устройства зависело от поворота торпеды, вызываемого процессией маховика. В результате торпеда приобретала спиралеобразную траекторию с постепенно уменьшающимся радиусом, что и вело к ее столкновению с атакуемым судном.

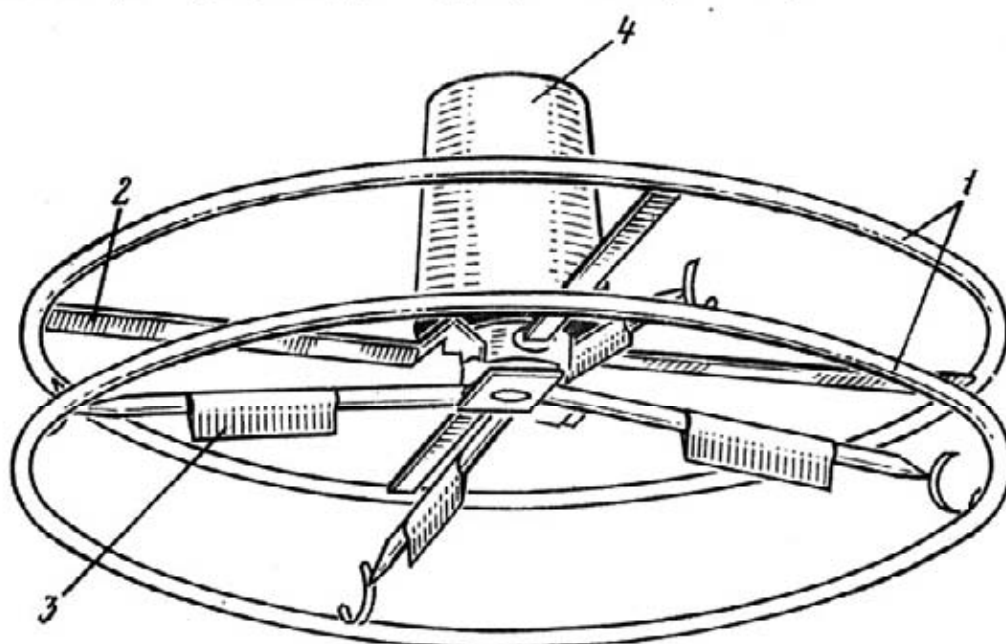
И наконец, последний вариант торпеды Хауэлла содержал маховик диаметром 45 см и массой 160 кг. При скорости 21 тыс. об/мин он накапливал энергию до  $10^7$  Дж: этого было достаточно, чтобы пройти около 1,5 км при скорости 55 км/ч.





Торпеда Хауэлла с приводом от вращающегося маховика

1 — маховик, 2 — регулятор, 3 — руль, 4 — винт, 5 — взрывчатка



Маховичный беспилотный вертолет

1 — кольцевые маховики — накопители энергии, 2 — тяговая лопасть, 3 — лопасть управления, 4 — приборы и груз

За рубежом маховики применяются для запуска самолетов с авианосцев. Для этой цели строятся специальные катапульты, разгоняющие самолет. Наиболее легким, экономичным и дешевым для такой катапульты оказался инерционный привод. Маховик, имеющий форму, близкую к форме диска равной прочности, массой 12 т разгоняется электродвигателем мощностью 900 кВт, связанным с ним обгонной храповой муфтой. Маховик установлен в массивных опорах, необходимых для восприятия гироскопических усилий от качки корабля. Тяговый барабан лебед-



ки катапульты связан с маховиком через планетарную передачу, встроенную в барабан, и гидромуфту с регулируемым наполнением. Такая катапульта позволяла производить разгон самолета «Локхид F-80» до 300 км/ч за 4,1 с при длине пробега всего около 100 м или до 400 км/ч при длине пробега 150 м.

Необыкновенно высокая надежность маховичных аккумуляторов (маховик не только не может «заглохнуть», но его и остановить невозможно, пока он не выделит всю накопленную в нем энергию) способствовала применению их на летательных аппаратах: быстрый взлет и безопасная посадка гарантировались даже при отказе всех других двигателей. Начало этому положил маховичный вертолет, построенный шотландскими специалистами в 30-х годах. Маховик, установленный на вертолете, приводил во вращение воздушный винт с регулируемым наклоном лопастей. Во время разгона маховика постоянным источником энергии — мотором — лопасти устанавливались так, что подъемная сила равнялась нулю, а маховик при этом легко и без излишних потерь энергии разгонялся мотором. После отключения мотора лопастям задавался необходимый угол атаки, и вертолет совершал вертикальный взлет. По мере сбавления оборотов маховика угол атаки винта увеличивался с сохранением тяги. Когда энергия маховика иссякала, вертолет медленно опускался.

Недавно фирмой Дорнье был построен маховичный беспилотный разведывательный вертолет. Этот вертолет, запускаемый с автомобиля, поднимает на высоту до 100 м фото- или телекамеру, удерживает ее там около минуты, а затем плавно опускается вместе с оборудованием. На базовом автомобиле имеется устройство для зарядки маховичного накопителя в течение одной минуты. Маховики в виде колец диаметром около 1,4 м раскручиваются при этом до скорости 4 тыс. об/мин.

Внутри верхнего маховика (см. рис. на стр. 91) помещаются основные лопасти несущего винта, с помощью которого осуществляется подъем вертолета, внутри нижнего — небольшие лопасти, осуществляющие боковое перемещение. Управляется вертолет с помощью электрического кабеля непосредственно из автомобиля. Сначала он быстро набирает высоту, ограничиваемую длиной кабеля, зависает на этой высоте, а затем совершает боковые перемещения согласно командам оператора. После того



как угловая скорость маховиков падает ниже критической, вертолет плавно опускается на свою площадку на автомобиле, и через минуту может быть снова запущен.

Отмечается, что такой вертолет полезен при боевых действиях в лесу или городе, где прямая видимость ограничена. К числу достоинств такого вертолета относятся простота, дешевизна, быстрый запуск и взлет\*. Расчеты показывают, что при массе каждого маховика 25 кг, вертолет при взлете обладает энергией в 2 МДж. Это позволит развить при полете мощность до 10 кВт, что достаточно для вертолета массой до 100 кг.

В настоящее время фирма «Локхид» (США), специализирующаяся на производстве летательных аппаратов и космических систем, создает спасательный вертолет с маховиком. Преимуществом этого вертолета является то, что он способен взлетать и набирать высоту в 5 раз быстрее обычного. Маховик разгоняется электродвигателем мощностью 1,5 кВт до 28 тыс. об/мин, а затем подключается к воздушному винту. Маховичный двигатель не требует охлаждения, чем выгодно отличается от обычного, и позволяет производить до девяти взлетов без подзарядки маховика, обеспечивает не только надежный взлет, но и посадку. И еще одно его положительное качество: он работает совершенно бесшумно. Это ценнейшее в городских условиях свойство двигателя могло бы позволить производить взлет и посадку вертолетов и самолетов в густонаселенных районах города. Д. В. Рабенхорст, имея в виду это свойство маховика, предлагает использовать его в качестве двигателя самолетов. Современные маховики вполне справились бы с этой задачей.

Вопросами маховичных двигателей занимается также известная американская авиационная фирма «Юнайтед эркрафт корпорейшн» — и это неспроста, поскольку маховикам в авиации принадлежит большое будущее, контуры которого обрисовываются уже сейчас.

\* Проекты аналогичных вертолетов, предназначенных для спасательных работ при пожарах, разрабатываются и в других странах. Такие вертолеты смогут доставлять тросы или средства для тушения пожаров в горящие высотные дома, не боясь ни густого дыма, ни вспышки собственного горючего. Взлет вертолета — с базовой пожарной машины. Интересно, что детские инерционные вертолеты, взлетающие после разгона от шнура, давно известны и завоевали широкую популярность у будущих авиаторов.



С помощью маховичного аккумулятора можно произвести взлет не только вертолета, но и самолета, особенно легкого. Извечная проблема легких самолетов — ограниченная мощность двигателя (90—120 кВт). Более мощный мотор позволил бы сократить разбег, дал возможность круче набирать высоту, подниматься с небольших площадок. Это то, что и требуется от легких самолетов. Однако чем мощнее двигатель, тем больше его вес и тем больше требуется для него горючего. В итоге вес машины прогрессивно растет, и самолет рискует перейти в более тяжелую «весовую категорию». Тут неоценимую помощь могут оказать маховичные аккумуляторы: ведь маховики развивают практически неограниченную мощность, а современные их конструкции имеют массу меньшую, чем у двигателя любого другого типа. Ценно и то, что маховичный аккумулятор «заряжается» энергией буквально за несколько минут. В результате маховик массой 13 кг способен в течение 20 с отдать мощность 115 кВт, а массой 57 кг — 225 кВт в течение 60 с — время, вполне достаточное для взлета.

Кроме того, в полете раскрученный маховик гарантирует определенную безопасность: при остановке мотора самолет с его помощью может лететь еще 3 мин — время, необходимое, чтобы выбрать площадку и благополучно приземлиться.

Как видим, энергии маховика достаточно, чтобы обеспечить взлет или посадку летательного аппарата. Но на тех же летательных аппаратах и на других машинах, содержащих тепловые двигатели, маховик довольно успешно применялся раньше и для запуска двигателя. Сейчас авиационные двигатели уже не заводят с помощью маховика, но конструкция маховичного или инерционного стартера может быть использована для запуска трудно заводящегося двигателя любого типа.

Инерционный стартер представляет собой маховик в виде обода с диском, соединенный через понижающую планетарную передачу, многодисковую фрикционную и кулачковую муфты с валом двигателя. Маховик приводится во вращение заводной ручкой. После его разгона включается кулачковая муфта и вал двигателя раскручивается, благодаря чему двигатель запускается. Фрикционная муфта, включенная постоянно, играет роль предохранителя.



Применяются маховики и на машинах ударного действия: ковочных, механических ножницах, прессах, дробилках, копрах. Суть их действия заключается в достаточно медленном накоплении кинетической энергии в маховике путем разгона его двигателем небольшой мощности и последующем кратковременном рабочем процессе — ударе, при котором и выделяется кинетическая энергия маховика, идущая на совершение полезной работы: ковку, резку, дробление.

Маховики позволяют преодолевать пиковые сопротивления, возникающие при прокатке металла. При этом маховик может быть соединен с прокатными валками жестко (в старых конструкциях) или через электропривод (в более новых конструкциях). Например, в энергетическом узле прокатного стана для изготовления алюминиевых листов мотор, разгоняющий маховик, имеет мощность 6 тыс. кВт. Маховик имеет диаметр 3,6 м, толщину на периферии около 30 см, массу 28 т. При 750 об/мин он накапливает энергию 120 млн. Дж. Маховик соединен с четырьмя генераторами, позволяющими развивать пиковую нагрузку 7500 кВт каждый. Ток от генераторов подается к моторам, вращающим прокатные 144-дюймовые валки. Цапфы маховика помещены в разъемные подшипники скольжения, позволяющие для снятия и замены втулок поднимать маховик вверх.

Энергоемкость маховика в зависимости от мощности электродвигателя можно выбрать по приближенному простому правилу: на 1 кВт номинальной мощности мотора следует брать  $1,5-2 \cdot 10^4$  Дж кинетической энергии маховика. Конечно, эти цифры могут быть изменены в зависимости от частоты и продолжительности подачи металла в валки.

Для сталепрокатных станов размеры и вес маховиков еще внушительнее. Например, для блюминга с двигателем мощностью 7500 кВт применяется почти пятиметровый маховик массой 82 т, а на прокатном стане металлургического завода «Серп и молот» стоит, пожалуй, самый большой в мире маховик — гигант массой в 100 т!

Но самым неожиданным применением маховиков в технологии обработки металлов является инерционная сварка. Казалось бы, что имеют общего маховик и сварка? Но оказалось, что роднящим их звеном является эффект разогрева металлов при трении их один о другой.



На этом эффекте основана сварка металлов трением, первые патенты на которую были выданы еще в конце прошлого века. Однако широкое применение сварка трением получила только сейчас.

Две детали, которые надо сварить, располагаются по одной оси и закрепляются в сварочной машине. Одна из них неподвижна, а другая приводится в быстрое вращение. Прижатые друг к другу торцы деталей разогреваются до  $1000\text{--}1300^{\circ}\text{C}$ , после чего детали должны возможно быстрее прекратить относительное вращение. Раскаленные торцы деталей при этом привариваются один к другому. Нетрудно заметить, что основной расход энергии возникает в течение весьма непродолжительного времени — при вращении свариваемых деталей, в остальное же время машина работает вхолостую или простаивает. И естественно, возникает идея использовать маховик для накопления энергии от работающего маломощного двигателя для последующего интенсивного выделения ее при сварке. Отсюда и название процесса — инерционная сварка.

В качестве примера использования маховика для временного повышения мощности машин уместно привести конструкции скрепера и экскаватора с инерционными аккумуляторами энергии. Конструкции эти экспериментальные, однако их положительные качества дают основание говорить об их несомненной перспективности.

Скрепер представляет собой землеройную машину циклического действия. Рабочий цикл ее складывается в основном из копания, когда требуются максимальные мощность и тяговое усилие машины, и транспортировки груженой и порожней машины, когда требуемые мощность и тяговое усилие незначительны. Для преодоления больших сопротивлений при копании грунта обычно используется трактор-толкач, сообщающий машине дополнительное тяговое усилие.

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте транспортного строительства (ЦНИИСе) был изготовлен опытный скрепер с инерционным аккумулятором, играющим роль вспомогательного двигателя и приводящим во вращение задние колеса скрепера при копании. Развиваемое при этом тяговое усилие достаточно для копания и заполнения ковша скрепера грунтом без помощи толкача. Разгон маховика осуществляется при холостом ходе



скрепера и избыточной мощности основного двигателя машины с помощью маломощного серводвигателя или непосредственно от колес.

Представляет интерес также конструкция силового агрегата одноковшового экскаватора, снабженного маховиком. Рабочий цикл экскаватора осуществляется при неравномерной загрузке двигателя по мощности. Маховик экскаватора накапливает энергию в период неполной загрузки двигателя с последующей отдачей ее при копании грунта — таким путем удается существенно повысить эффективность работы экскаватора. Например, для мощного экскаватора средняя нагрузка составляет 6 тыс. кВт, а пиковая может достигать до 15 тыс., причем рост ее происходит в течение считанных секунд. Наличие же маховика в силовом приводе обеспечивает около половины пиковой мощности. Фирма «Вестингауз» создала экскаваторы с электромаховичным приводом, эксплуатируемые сейчас в Австралии. В частности, удалось создать экскаватор с ковшем емкостью около 80 м<sup>3</sup> с использованием силовой установки относительно малой мощности.

Однако самым ярким примером эффективности применения маховика для преодоления пиковых нагрузок являются маховичные генераторы. При работе электрогенератора с двигателем внутреннего сгорания перегрузка агрегата может вызвать остановку двигателя. Для предотвращения этого ротор генератора снабжают маховиком, кинетическая энергия которого позволяет преодолевать временные перегрузки. Подобные генераторы с маховиками устанавливаются на телевизионных ретрансляционных станциях, а также в других случаях, когда не должно быть перерывов в подаче электроэнергии.

Очень нежелательным явлением в маховичных генераторах является падение угловой скорости при выделении энергии маховиком. Это влечет за собой не только падение напряжения, но, что еще хуже, падение частоты тока, вырабатываемого генератором. Однако использованием описанного выше центробежного аккумулятора, имеющего переменный момент инерции, можно добиться постоянной угловой скорости, а следовательно, и частоты тока при выделении большей части энергии, накопленной маховиком. В последнее время в зарубежной печати появились сообщения о генераторах переменного тока, обеспечивающих постоянную частоту в очень широком диапазо-



не угловых скоростей, что достигается подмагничиванием ротора генератора посторонним источником тока требуемой частоты. На это уходит всего несколько процентов полезной мощности, и в общем генератор имеет достаточно высокий КПД. Подобные способы получения тока постоянной частоты от генераторов с маховичным приводом, безусловно, расширяют область их применения.

И наконец, еще один интересный случай применения маховика в генераторе, когда нужно временно увеличить мощность установки почти в 100 раз. Речь идет о системе энергоснабжения установки для получения регулируемой термоядерной реакции на машинах типа «Токамак». Система представляет собой электродвигатель мощностью 1500 кВт, вращающий маховик диаметром 70 см и длиной свыше метра с частотой 6 тыс. об/мин. Накапливаемая им огромная кинетическая энергия позволяет получить импульс мощностью 100 тыс. кВт. В Принстонском университете (США) для этих же целей применяют маховик массой 96 т, накапливающий 440 МДж энергии.

Кроме чисто энергетических качеств у маховика есть еще одно привлекательное свойство, позволяющее получить при работе маховичных устройств (как это ни парадоксально) действие без противодействия.

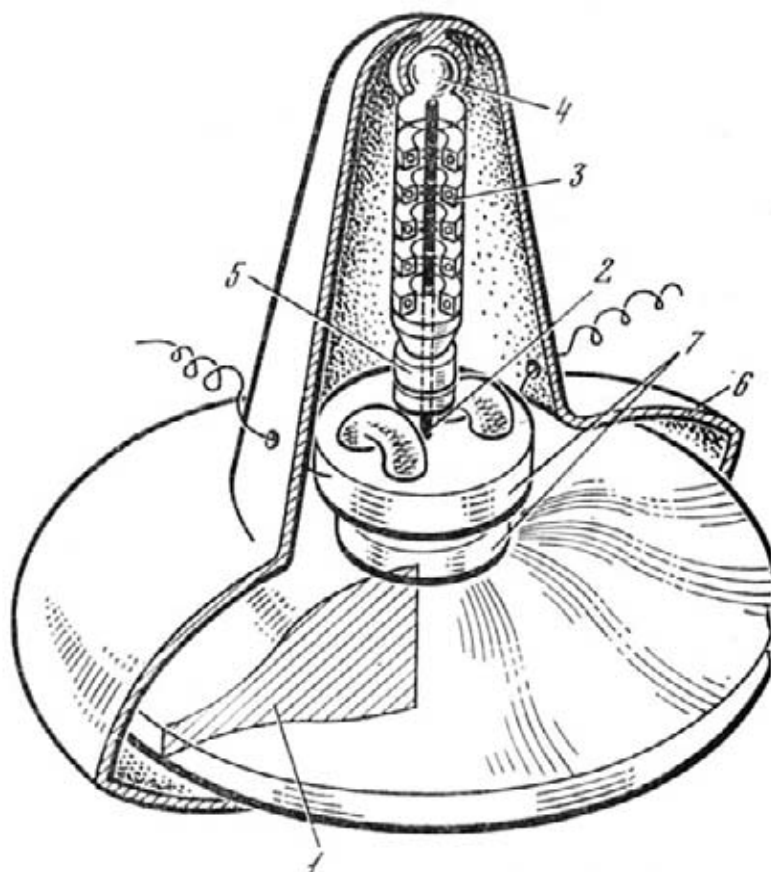
Реактивный момент, возникающий при работе дрели действует на человека. Это обстоятельство исключает пользование обычной дрелью в условиях невесомости, где реактивный момент будет вращать самого оператора. От этого недостатка свободна инерционная дрель, питающаяся энергией раскрученного маховика. Вал маховика соединен со шпинделем (патроном), в котором укреплены сверло, бор, шлифовальный круг или иной инструмент. Маховик раскручивается любым способом от источника питания, а затем дрель переносится к месту работы, где и используется накопленная энергия.

При работе дрели на оператора действует только тот ничтожно малый момент, который создается трением в подшипниках и аэродинамическими потерями. Особенно благоприятны условия для работы инерционной дрели в вакууме, где аэродинамические потери отсутствуют. Уменьшить частоту вращения выходного вала маховика можно с помощью специальных устройств, широко используемых на механических гайковертах. Они не требу-



# Инерционный аккумулятор А. Г. Уфимцева с электро- приводом

- 1 — маховик,
- 2 — вал,
- 3 — упругий подвес,
- 4 — шаровой шарнир,
- 5 — подшипник,
- 6 — кожух,
- 7 — мотор-генератор



ют опорного звена и, стало быть, не передают реактивного момента на корпус инструмента.

Рассмотрим еще одно применение маховиков — на электростанциях, неразрывно связанное с именем известного русского изобретателя Анатолия Георгиевича Уфимцева (1880—1936), которого Горький называл «поэтом техники». Изобретения Уфимцева были необычайно широкого диапазона — от керосиновых ламп до самолетов и от двигателей до лечебных поясов. Но особенно знаменит Уфимцев созданием маховичных инерционных аккумуляторов, которые он применил для ветроиспользования, хотя и отмечал их перспективность для транспортных целей. Им были разработаны аккумуляторы разных типов для ветроиспользования, проведен тщательный анализ электрических аккумуляторов, а также «водородного аккумулялирования», т. е. разложения воды путем электролиза на кислород и водород с дальнейшим их использованием (блестящее предвидение современных работ по «водородному аккумулялированию» с использованием топливных элементов!), анализ теплового аккумулялирования энергии в водяных баках и наконец инерционных аккумуляторов.

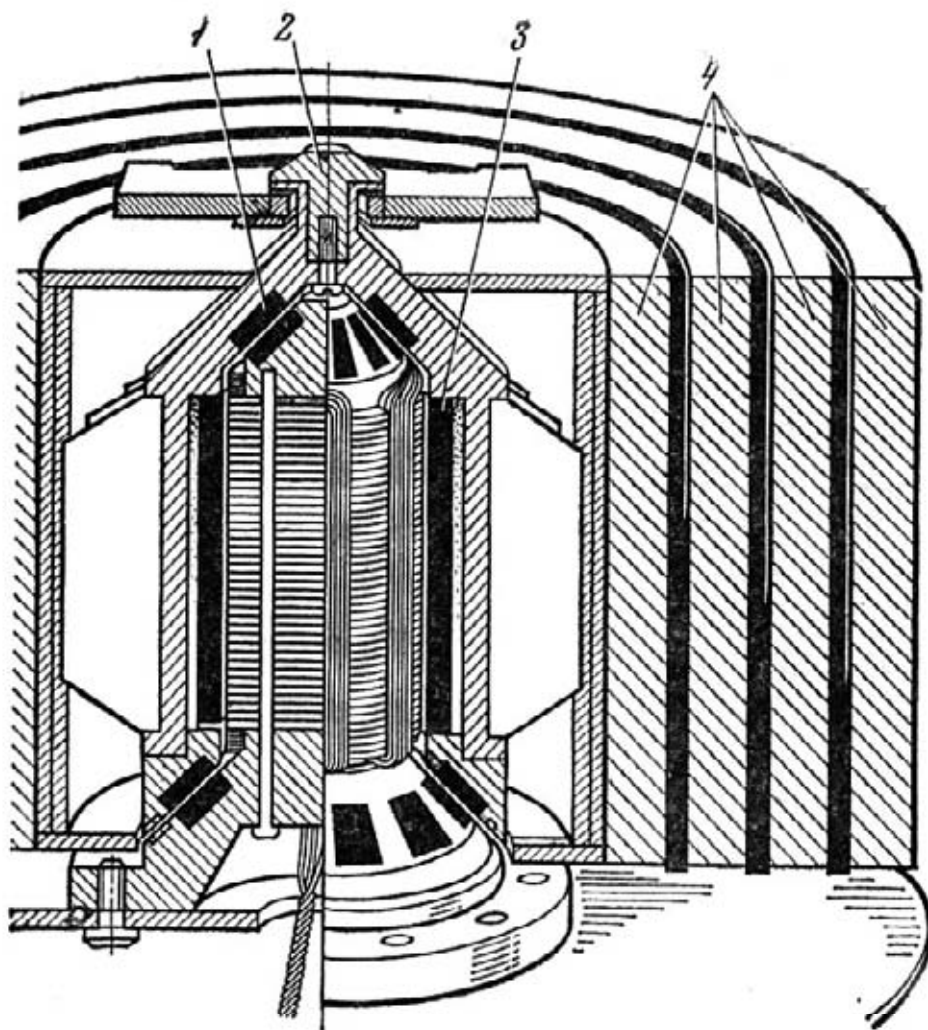


Инерционный аккумулятор, состоящий из вращающегося маховика, соединенного с электрической или механической трансмиссией, был предложен Уфимцевым в 1918 г. В 1920 г. он изготовил инерционный аккумулятор с маховиком массой 30 кг и давлением в камере вращения 2,5—3,0 мм рт. ст. После 50-минутной зарядки инерционного аккумулятора маховик вращался с частотой 12 тыс. об/мин. Затем зарядный двигатель отключался, включался генератор, и к нему подключалась электрическая пятисвечовая лампочка, которая горела в течение 3 ч. В 1924 г. Уфимцевым была построена более крупная модель инерционного аккумулятора с маховиком массой 320 кг. После зарядки он обеспечивал равномерное горение группы электрических ламп в 1000 свечей в течение часа.

Работы Уфимцева по созданию аккумулятора энергии для ветродвигателей приобрели народнохозяйственное значение. Для демонстрации действия нового аккумулятора в начале 30-х годов была построена Курская ветроэлектрическая станция, существующая и по настоящее время.

Уфимцев сделал исключительно много для создания новых типов маховичных аккумуляторов и их усовершенствования: пожалуй, в любом современном маховичном аккумуляторе есть доля его работы. Идеи Уфимцева живут, например, в проекте Р. и С. Поста (США), предусматривающем накопление энергии на электростанциях для использования ее в часы пик при помощи супермаховиков. Расчет показывает, что накопление энергии с помощью супермаховиков значительно эффективнее и экономичнее, чем применяемое в настоящее время аккумулярование с помощью подъема воды насосными установками. В проекте предусматривается накопление 20 МВт энергии в час в супермаховике массой 200 т и диаметром 5 м. Рабочая частота вращения супермаховика 3500 об/мин. Супермаховик состоит из концентрических колец, навитых из кремниевого волокна, насаженных одно на другое с небольшим зазором, заполненным эластичным веществом типа резины для предохранения от расслоения обода. Супермаховик помещен в герметичный корпус и соединен с валом генератора. Устройство работает как генератор при потребности в энергии и как электродвигатель, когда энергия накапливается в маховике. По расчетам, капитальные затраты на киловатт мощ-





Гигантский маховик для аккумуляирования энергии электростанций в ночное время

1 — магнитная подвеска, 2 — подшипники, 3 — мотор-генератор с постоянными магнитами на роторе, 4 — «слоеный» маховик

ности в этом случае будут примерно вдвое меньше, чем при гидроаккумуляировании.

Единственное, что вызывает опасение авторов проекта — это случайный разрыв супермаховиков. При его разрыве выделится энергия, эквивалентная взрыву 1000 т тринитротолуола. Поэтому энергетический агрегат должен размещаться под землей на безопасной глубине \*.

\* Однако описанные выше опыты по разрыву супермаховиков показывают, что мгновенно выделяется лишь ничтожная часть энергии, накопленной в маховике, — не более 1—2%. Остальная энергия выделяется достаточно медленно, вызывая лишь тепловой эффект. Еще менее опасен разрыв ленточных супермаховиков.



Еще большие перспективы сулят недавно разработанные за рубежом так называемые кольцевые накопители. Единственной подвижной частью кольцевого накопителя является кольцо-супермаховик, изготовленный путем навивки из высокопрочных волокон и помещенный в тороидальную вакуумную камеру вращения. Супермаховик удерживается в камере с помощью магнитных опор в нескольких точках по периметру. В этих точках-опорах размещены статоры линейного мотор-генератора, взаимодействующие с ротором, вмонтированным в кольцо. Этот мотор-генератор позволяет производить как раскрутку супермаховика, так и отбор мощности от него. Поскольку кольцевой супермаховик лишен центра, а главное — контакта центральной части с витым ободом, в нем почти полностью используется высокая прочность анизотропного материала, из которого он навит.

Если провести сравнение кольцевого накопителя с накопителем, содержащим обычный маховик в виде диска равной прочности из высокопрочной стали, то выявляется следующее. Кольцевой накопитель имеет удельный момент трения в 4 раза, а удельную мощность потерь в перспективе в 50—100 раз меньшую, чем накопитель со стальным маховиком. Выбег стального маховика — около 34 ч, а кольцевого — 750, а в перспективе — 12 тыс. ч. Удельная энергоемкость кольцевого супермаховика достигает 132 Вт·ч/кг, что соизмеримо с лучшими электроаккумуляторами\*.

У кольцевых накопителей есть одно такое преимущество, которое может позволить громадный рост удельных показателей, если их относить к массе только подвижной части накопителя, т. е. к самому супермаховику. Оказывается, можно разрывные напряжения в супермаховике через его взаимодействие с корпусом «переложить» на землю.

Суть дела состоит в следующем. Представим себе кольцевой маховик прямоугольного сечения в корпусе, который горизонтально зарыт в землю (вопросы, связанные с вывешиванием и стабилизацией этого маховика, рассматривать не будем — все они разрешены в конструкции

\* Шлибен Эрнст В. Проблемы аккумуляторов кинетической энергии (доклад на симпозиуме в г. Беркли, США, 1975 г.). М.: ВЦП, 1977, № А-39194 «д», с. 18.



кольцевого накопителя). Представим также, что на внешней цилиндрической поверхности маховика и на обращенной к ней поверхности корпуса одноименными полюсами друг к другу уложены сильные постоянные магниты. Взаимодействуя одноименными полюсами, они сжимают маховик и растягивают корпус. От корпуса это растяжение передается земле, т. е. фундаменту. Но хватит ли сравнительно небольших сил магнитов, чтобы противостоять гигантскому стремлению частей маховика удалиться от центра, а если хватит, то не будет ли этот маховик «раздавлен» в состоянии покоя?

Все дело здесь в размерах маховика: чем больше его диаметр, тем меньше могут быть магнитные силы.

По мере разгона части маховика — магниты все теснее поджимаются к соответствующим частям на корпусе, зазор между ними делается все меньше, а сила отталкивания все больше. При остановке происходит обратное явление — магниты маховика отходят от корпуса, зазор увеличивается и сила отталкивания падает, поэтому-то маховик и «не раздавливается» в состоянии покоя.

У хороших магнитов при малых зазорах сила отталкивания может превышать стократную силу тяжести вывешиваемой массы. Стало быть, нормальное ускорение частей маховика достигло бы  $100\text{ g}$ , или  $1000\text{ м/с}^2$ . Это очень небольшое ускорение для маховиков, но если подсчитать при этом скорость, например для радиуса  $16\text{ км}$ , то окажется, что она составит  $4\text{ км/с}$ , т. е. московскую кольцевую автостраду такой маховик будет обегать за  $25\text{ секунд}$ ! Удельная энергия маховика достигнет  $8 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}$ . Если же подсчитать полную энергию накопителя при сечении  $1 \times 1\text{ м}$ , то она окажется равной  $2 \cdot 10^{15}\text{ Дж}$  — это в  $200$  раз больше, чем в описанном выше гигантском сверхпроводящем накопителе. Между прочим, объем сверхпроводящего накопителя вдвое больше, чем подвижной части маховика при его сечении  $1 \times 0,5\text{ м}$ . Если же применять магниты, сила которых в  $1000$  раз превышает их силу тяжести (сила взаимодействия двух магнитов гораздо больше, чем одного магнита и стального груза), то скорость маховика достигнет  $12,6\text{ км/с}$ , удельная энергия —  $8 \cdot 10^7\text{ Дж/кг}$  ( $400\text{ тыс. МДж/м}^3$ ), а полная энергия —  $2 \cdot 10^{16}\text{ Дж}$ .

Если идти по пути уменьшения размеров накопителя и ограничиться запасом энергии в  $10^{11}\text{ Дж}$  (это крупный накопитель, обеспечивающий аккумуляирование пиковой



мощности около 30 тыс. кВт в течение часа), то при радиусе кольца 0,5 км, опоясывающего, например, по периметру территорию электростанции с ее хозяйством, сечение подвижных магнитов будет всего  $5 \times 5$  см. Если применить магниты в 10 раз слабее (т. е. дешевые и недефицитные), то падение удельной энергии можно компенсировать десятикратным увеличением сечения, т. е. площадь сечения подвижных магнитов составит примерно  $16 \times 16$  см, и прокладка кольца даже такого накопителя особых сложностей не вызовет.

## МАХОВИЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ И ТРАНСПОРТ

Перспективы использования маховичных аккумуляторов на транспортных машинах велики и заманчивы. Автономность маховичного аккумулятора, его высокая удельная мощность, выделение энергии непосредственно в виде механического вращения (именно то, что и нужно колесам!), быстрая зарядка, необыкновенно высокая надежность и долговечность — вот неполный перечень положительных свойств маховичного аккумулятора-двигателя. И нельзя сказать, чтобы эти качества маховиков обнаружились только сейчас.

Около 200 лет назад, в 1791 г., гениальный русский механик И. П. Кулибин построил знаменитую «самокатку», которая приводилась в движение человеком путем нажатия педалей. Для выравнивания же хода, преодоления небольших подъемов и неровностей был предусмотрен маховик (и немалый — около полутора метров в диаметре), расположенный в горизонтальной плоскости под полом самокатки. Изучая устройство самокатки (ее прекрасная действующая модель демонстрируется в Политехническом музее в Москве), поражаешься современности мысли Кулибина, его техническому предвидению. Предусмотрел он и рекуперативный тормоз на основе пружинных аккумуляторов, а ведь работа над этими тормозами сейчас только начинается.

В 1860 г. русский военный инженер Шуберский предложил использовать кинетическую энергию маховиков для привода так называемых маховозов, которые должны были обеспечивать въезд поездов на крутые подъемы. Маховики Шуберского, массой в сотни пудов, соединялись с ко-



лесами маховоза — обычной железнодорожной платформы — фрикционным зацеплением. Проект Шуберского поражает своей простотой, продуманностью, научным обоснованием. Технический уровень прошлого века не позволил его осуществить, а теперь благодаря наличию мощных тепло- и электровозов он потерял актуальность.

В 1905 г. англичанин Ланчестер получил патент на изобретение, имеющее отношение к «применению для механического движения мотора в форме тяжелого, быстро вращающегося маховика, с целью приведения в движение моторного экипажа». Колеса экипажа Ланчестера соединялись любой механической передачей с маховиком или с системой из двух маховиков, вращающихся в противоположные стороны, чтобы устранить действие вредного для экипажа гироскопического эффекта. Для разгона на остановках экипажа маховик соединялся через вариатор с валом стационарного двигателя. Предусмотрел Ланчестер и разгон маховика встроенным электродвигателем, который подсоединялся на остановках к электрической сети.

Оригинальный экипаж с маховиком был построен и продемонстрирован в Лондоне в 1914 г. русским инженером П. Шиловским. Машина, названная им гирокаром, имела всего два колеса и поддерживалась в устойчивом состоянии вращающимся маховиком, приводимым во вращение электромотором. Генератор, питающий электромотор, получал вращение от вала основного двигателя гирокара. Таким образом, маховик в этой машине, как и в построенном недавно фирмой «Форд» двухколесном автомобиле «Гирон» («Джирон»), использовался только для устойчивости. Этому способствовал так называемый гироскопический эффект, который всегда сопутствует вращающимся маховикам.

Не исключена возможность, что маховичные автомобили в будущем будут выполняться именно двухколесными, что значительно упростит и удешевит конструкцию машины. Двухколесный экипаж тратит меньше энергии на свое перемещение, чем четырехколесный, он гораздо маневреннее, что очень важно в условиях современного города. К тому же основной маховичный аккумулятор-двигатель можно одновременно использовать и как маховик-стабилизатор. Поэтому конструкция гирокара Шиловского не утратит своей актуальности и в будущем.



К числу маховозов принадлежат и всякого рода инерционные тележки для внутризаводских перевозок. Этот вид транспорта, пока еще очень несовершенный, получает все большее распространение на различных заводах для межцеховых и внутризаводских перевозок. Надо заметить, что инерционные тележки очень перспективны для внутризаводского транспорта с интенсивным движением по определенному маршруту. Своей дешевизной, простотой устройства и обслуживания, долговечностью, гигиеничностью они выгодно отличаются от аккумуляторных электрокаров и при рациональном использовании могут дать значительный экономический эффект.

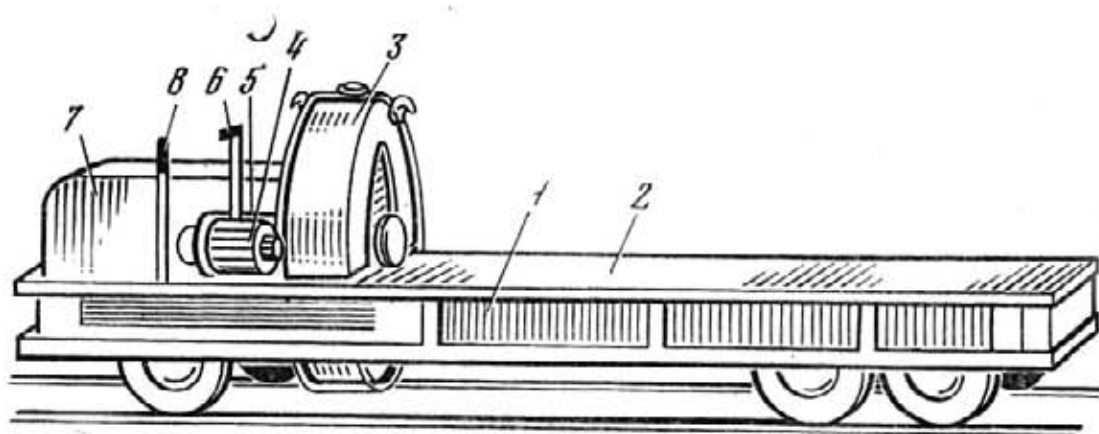
Маховик в качестве двигателя имеет еще одно ценное преимущество перед двигателями внутреннего сгорания и электродвигателями: его рабочий процесс не связан с горением или искрением, поэтому он не может вызвать воспламенения или взрыва окружающей взрыво- или огнеопасной среды. И с особым эффектом используется маховик в качестве двигателя во взрыво- и пожароопасных помещениях: в шахтах и рудниках, атмосфера которых содержит много метана, в некоторых цехах, атмосфера которых насыщена ацетоном, бензином и другими растворителями, мучной пылью и т. д.

Маховичные тележки, или, как их называют, гировозы или гиро locomотивы, во взрывобезопасном исполнении содержат механическую или гидравлическую трансмиссию от маховика к колесам и пневматический или гидравлический двигатель разгона. Электропривод здесь непригоден.

Такие гировозы эксплуатируются на взрывоопасных шахтах и рудниках для транспортировки вагонеток с углем. Разгон маховика осуществляется пневмодвигателем от сети сжатого воздуха. Пневмодвигатель имеет очень низкий КПД: 0,15—0,20 — в несколько раз ниже, чем у электродвигателя (но электродвигатель может дать искру). После разгона маховика пневмодвигатель выключается. Если гировоз еще не скоро тронется в путь, то выключается муфта маховика и его выбег (свободный ход) протекает без излишних потерь. Выбег маховиков отечественных гировозов длится около 4 ч.

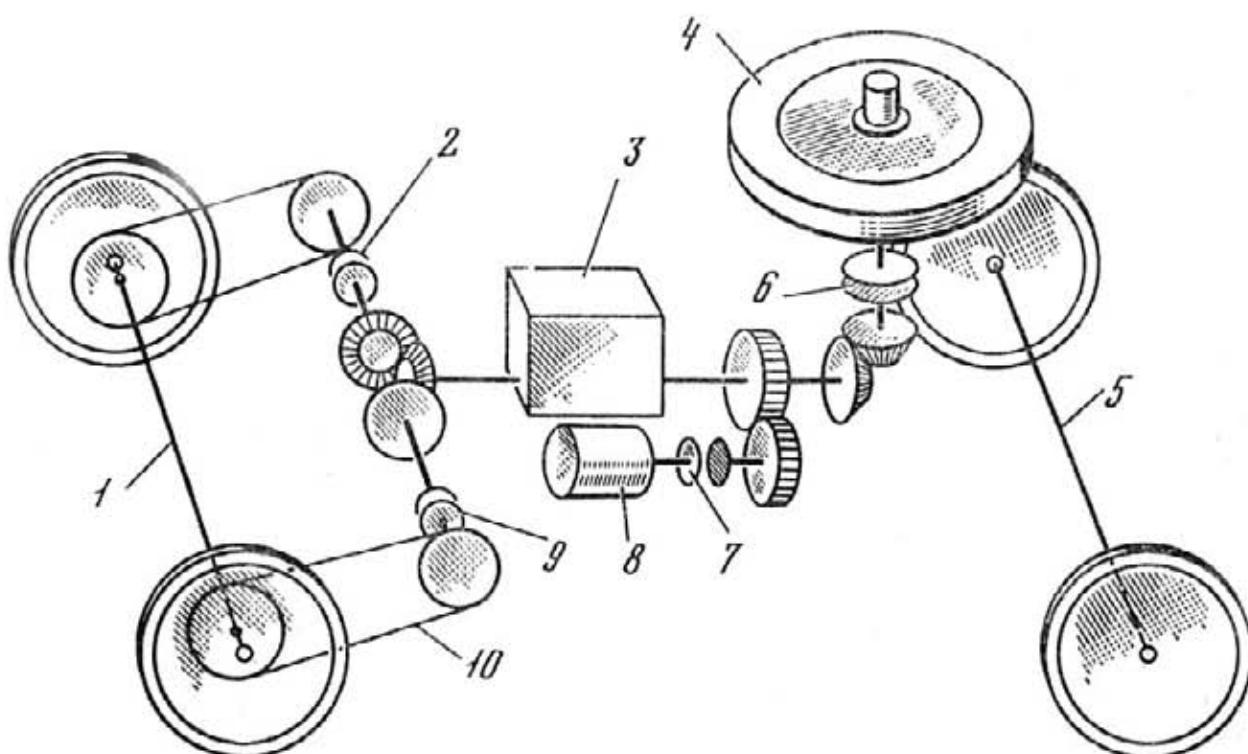
Маховик гировоза представляет собой обод из легированной хромистой стали 40Х с диском диаметром около метра и массой 1650 кг. Маховик обтачивают и стати-





**Инерционная тележка для внутризаводских перевозок**

1 — шасси, 2 — платформа, 3 — маховик, 4 — электродвигатель, 5 — коробка отбора мощности, 6 — рукоять хода и реверса, 7 — редуктор, 8 — рукоять сцепления



**Принципиальная схема привода колес гировоза от маховика**

1 — ведущая ось, 2 — муфта заднего хода, 3 — коробка передач, 4 — маховик, 5 — ведомая ось, 6 — муфта маховика, 7 — муфта разгона, 8 — пневмодвигатель, 9 — муфта переднего хода, 10 — цепная передача



чески балансируют, затем в него запрессовывают вал и подвешивают в крышке на двух шарикоподшипниках, при этом один из них воспринимает и радиальную и осевую нагрузки, ограничивая перемещение вала вверх (например, от толчков машины вверх), другой воспринимает радиальную нагрузку, как и верхний, а также и осевую, но уже вниз от веса маховика. Нижняя же часть вала маховика поддерживается одним роликоподшипником, воспринимающим только радиальную нагрузку. Вал, удлиняясь или укорачиваясь, например от перемены температуры, может скользить в этом подшипнике в осевом направлении.

Конструкторы гировозов на основе опыта с гидроредачами предложили перспективную гидротрансмиссию, работающую по обратимой схеме. Основным преимуществом этой схемы является наличие вакуума в камере вращения маховика, что позволяет не только снизить аэродинамические потери для стандартных маховиков, но и применять совершенные, высокоскоростные маховики, энергоемкость которых в 2—3 раза выше обычных. Но осуществление подобной схемы пока связано с известными трудностями.

Настоящей сенсацией было появление в 50-х годах в Швейцарии маховичного автобуса.

Эпоха современных инерционных аккумуляторов в качестве двигателей для автомобилей начинается с 1945 г. — с работ швейцарской фирмы «Эрликон» над созданием маховичного автобуса — гиробуса. В 1953 г. фирмой была выпущена серия в количестве 17 таких гиробусов, которые курсировали в Швейцарии, а также в Африке на трассах протяженностью от 4,5 до 7,7 км. Масса гиробуса составляла 11 т без нагрузки и 16 т с полной нагрузкой. Он был рассчитан на перевозку 70 пассажиров.

При угловых перемещениях гиробуса и связанного с ним электромаховичного агрегата возникает прецессия — вынужденное движение маховика. В результате появляется дополнительный гироскопический момент, который, как показали расчеты, может достигнуть 800—900 Нм. Этот момент, а также свободные колебания гиробуса относительно горизонтальной оси могут вызвать нагруженность пружин подвески и подшипников трансмиссии. В связи с этим электромаховичный агрегат, расположенный в центральной части гиробуса под одним из спаренных си-



дений, устанавливался на шасси на упругом основании. Такое устройство должно предохранять трансмиссию гиробуса от высоких ударных нагрузок при езде по неровной дороге, а также ограничивать вынужденную прецессию агрегата.

Маховик, применявшийся на этом гиробусе, откованный из хромоникельмолибденового сплава, имел диаметр 1626 мм, массу 1,5 т и непосредственно соединялся с валом короткозамкнутого электродвигателя. Электромаховичный агрегат был заключен в заполненный водородом герметический корпус с давлением 7 Н/см<sup>2</sup>. Конфигурация маховика при минимальной массе и максимально допустимой частоте вращения обеспечила накопление необходимой энергии. В то же время при максимальной частоте вращения (3000 об/мин) напряжения в маховике не превышали 30% предела прочности материала на растяжение. Отношение массы полностью нагруженного гиробуса к массе маховика составляло 10 : 1, что, по мнению фирмы, является оптимальным.

При разгоне маховика до 3 тыс. об/мин накапливаемая им энергия составляла  $3,3 \cdot 10^7$  Дж, или 9 кВт·ч. Полное время вращения маховика с 3 тыс. об/мин до остановки (выбег) равнялось 12 ч.

Действительные потери в электромаховичном агрегате с учетом потерь на трение в подшипниках были примерно в 3 раза больше расчетных и составляли 4,5 кВт при 3 тыс. об/мин. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что в расчетах рассматривались только потери при вращении маховика-диска и не были учтены потери, вызванные вращением ротора генератора и сложной конфигурацией маховика.

Электроагрегаты гиробуса питались от городской сети трехфазного тока напряжением 500 В с частотой 50 Гц. Ночью на стоянке установка заряжалась от трехфазного тока напряжением 220 В, причем частоту вращения маховика можно было доводить от 0 до 2500 об/мин. Окончательная зарядка и доведение частоты вращения маховика до 2900—2950 об/мин производились у первого пункта питания на маршрутной линии.

При подаче тока от электродвигателя-генератора на тяговые двигатели гиробуса его обмотка возбуждения питалась от конденсаторов — аккумуляторов электрической энергии. Для снижения скорости и остановки гиробуса



использовалось рекуперативное торможение, позволяющее увеличивать интервал между зарядками, а также значительно уменьшить износ тормозов. Когда гиробус подходил к пункту питания для зарядки, его подвижные токоприемники при помощи пневматического устройства поднимались для соприкосновения с питающими контактами мачты. Одновременно выдвигались два вспомогательных контакта, которые заземляли электрооборудование гиробуса, приводя в работу электромагнитный выключатель питания. Стоимость каждого пункта зарядки даже при наличии понижающего трансформатора составляла всего 20% стоимости 1 км воздушной контактной сети троллейбуса. Это обстоятельство, а также небольшие затраты при эксплуатации и ремонте гиробуса являются его основными преимуществами. Суммарный КПД гиробуса составлял 50%.

Характерно, что на гиробусе были применены аккумуляторы энергии четырех типов: главный — маховичный и вспомогательные — пневматический (баллоны со сжатым воздухом), конденсаторный и электрохимический.

Электромаховичный агрегат «Электрогиро» был применен также на маневровом гиролокомотиве, построенном швейцарской фирмой «Эрликон» совместно с английской «Сентинель». В этом гиролокомотиве массой 34 т были использованы два агрегата «Электрогиро», обеспечивающие пробег до 40 км. Управление и принцип работы гиролокомотива почти такие же, как на гиробусе.

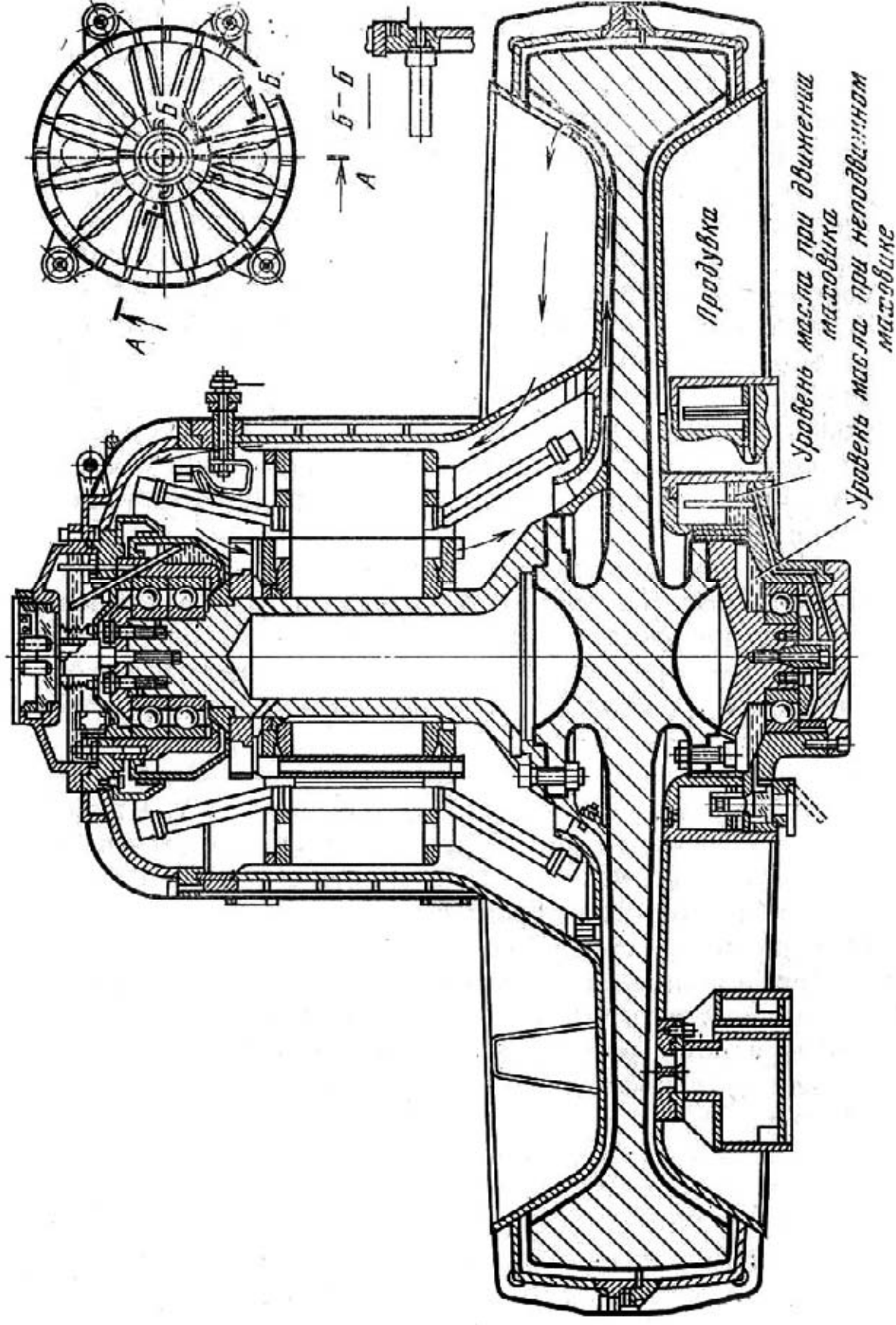
В последнее время в ряде стран (США, ФРГ, Австрия) приступили к проектированию и постройке новых гиробусов, гораздо более перспективных, чем швейцарский.



Гиробус



A-A





Оказывается, подзаряжать маховик энергией можно не только на стоянке, но и на ходу от троллейных проводов и штанг. Некоторое время гиротроллейбус (так называли этот вид транспорта) работает как обычный троллейбус, питаясь энергией от троллейных проводов. Но в то же время он подзаряжает свой маховичный аккумулятор, чтобы затем, когда уже не будет проводов, пройти около 10 км на одном маховичном двигателе. Проект такого гиротроллейбуса был разработан в 1970 г. отделением фирмы «Локхид» (США).

Маховичный двигатель из термообработанной высокопрочной стали имеет диаметр чуть больше метра, высоту около полуметра, массу 314 кг и размещается под полом салона гиротроллейбуса. Профиль маховика — гиперболический, близкий к равнопрочному диску, благодаря чему он может накопить в 10 раз больше энергии на единицу массы, чем маховик швейцарского гиробуса. Маховик откован заодно с валом, на котором сидит ротор обратимого электродвигателя переменного тока. Корпус маховика, в котором также находится и электродвигатель, вакуумирован.

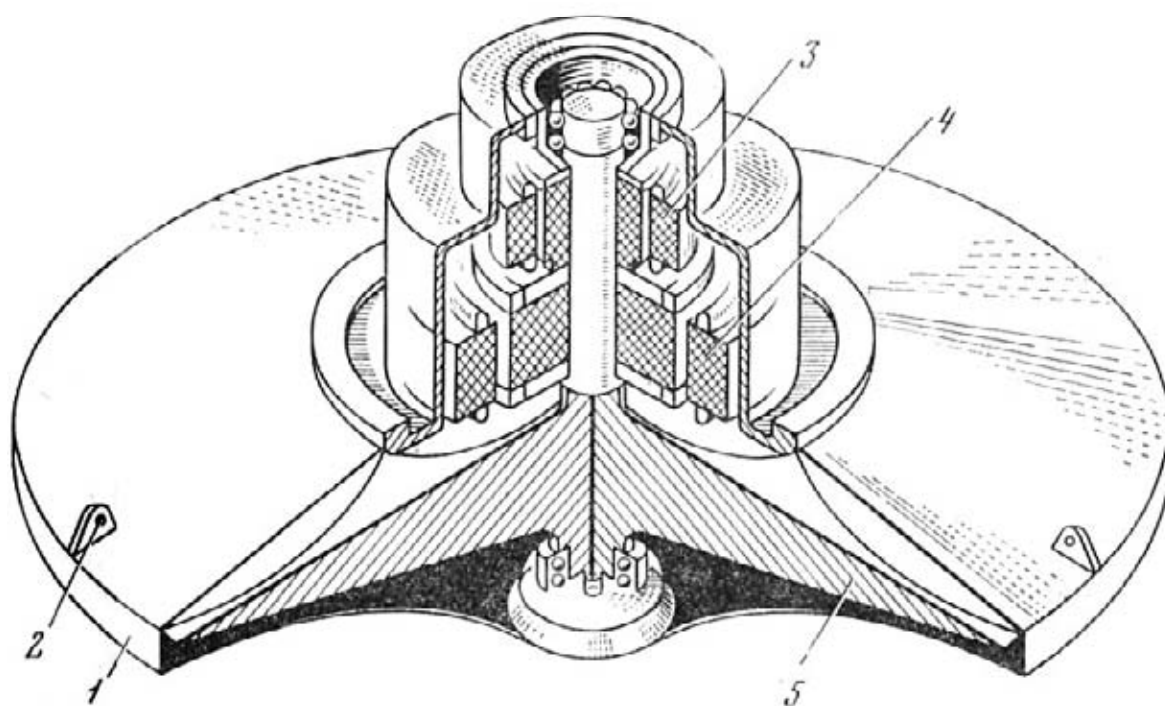
При движении машины в режиме троллейбуса маховик разгоняется до 20 тыс. об/мин, затем он выделяет энергию на движение гиротроллейбуса на расстояние около 10 км при снижении угловой скорости вдвое, т. е. до 10 тыс. об/мин. При этом выделяется три четверти всей запасенной в маховике энергии.

Интересный гибрид троллейбуса, самосвала и гировоза разработан институтом УкрНИИПроект (в г. Киеве). Чтобы не загрязнять атмосферу карьеров вредными выхлопными газами, там часто используются троллейвозы — большегрузные самосвалы с питанием от троллейных проводов. Однако троллейвоз может потерять маневренность, особенно в забое; кроме того, троллейные провода мешают при погрузке грунта экскаватором и затрудняют проведение взрывных работ в забое. Поэтому большегрузный самосвал должен хотя бы 100—200 м проходить без питания от проводов.

Был создан 25-тонный самосвал с питанием от троллейных проводов и с маховиком, который во время движения машины, как и у гиротроллейбуса, разгоняется электродвигателем. При необходимости самосвал отходит от сети и может двигаться до 400 м в груженом состоя-

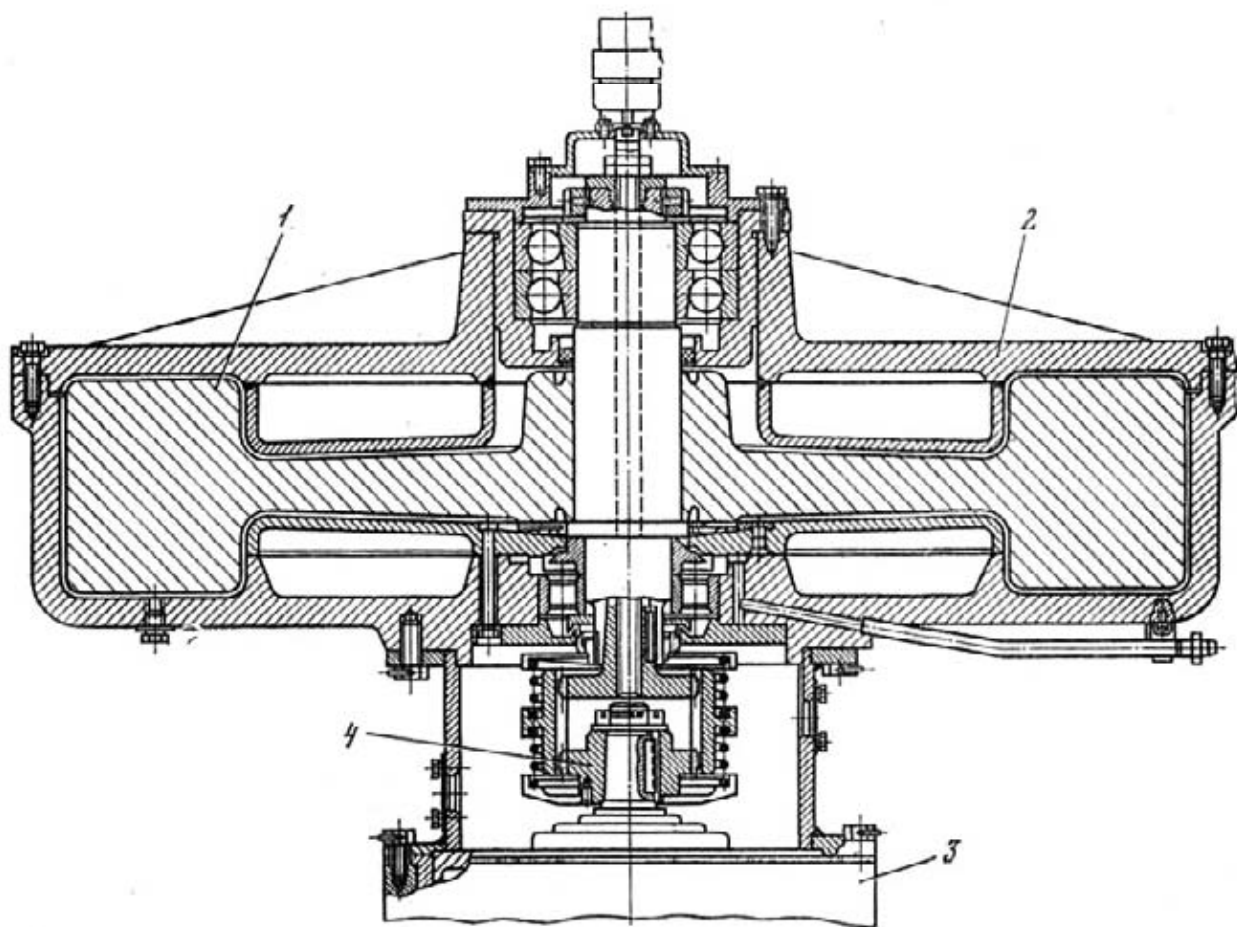
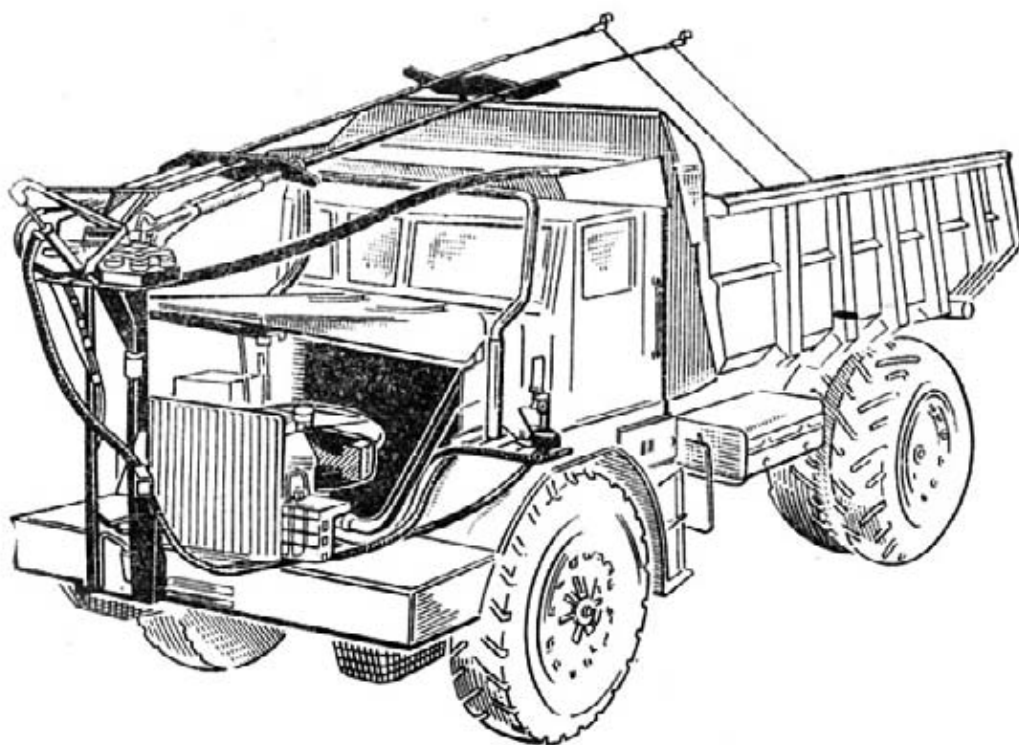


нии за счет энергии, накопленной при разгоне в маховике. Масса троллейвоза в груженом виде 55 т. Маховик диаметром 1,2 м и массой 1320 кг вращается с максимальной частотой 3500 об/мин, выделяя около 4 кВт·ч энергии при снижении угловой скорости до 1000 об/мин. Маховик соединяется с электродвигателем — генератором



**Гиротроллейбус** (1 — электродвигатель — генератор с маховиком, 2 — вакуумнасос, 3 — приборы управления) и его электромаховичный силовой агрегат (1 — герметичный корпус, 2 — точка подвеса, 3 — возбудитель, 4 — главный асинхронный двигатель-генератор, 5 — маховик)





Гиротроллейвоз и его маховичный силовой агрегат

1 — маховик, 2 — корпус, 3 — мотор-генератор, 4 — зубчатая муфта



обратимого типа мощностью около 100 кВт. КПД троллейвоза, как гировоза и гиробуса, составляет около 50%.

Следует отметить высокую эффективность таких гибридов троллейбуса и гиробуса при использовании их в качестве городского транспорта. Помимо того, что не тратится дополнительное время на подзарядку маховичного двигателя, первый разгон машины производится через троллеи от сети. В дальнейшем же энергия при торможении рекуперируется.

В новых зарубежных проектах гиротроллейбусов для Австрии масса маховика повышена до 600 кг при частоте вращения 4200 об/мин (для ФРГ 6700 об/мин), что при расходе 0,7 кВт·ч на 1 км пробега обеспечивает пробег от маховика 15 км.

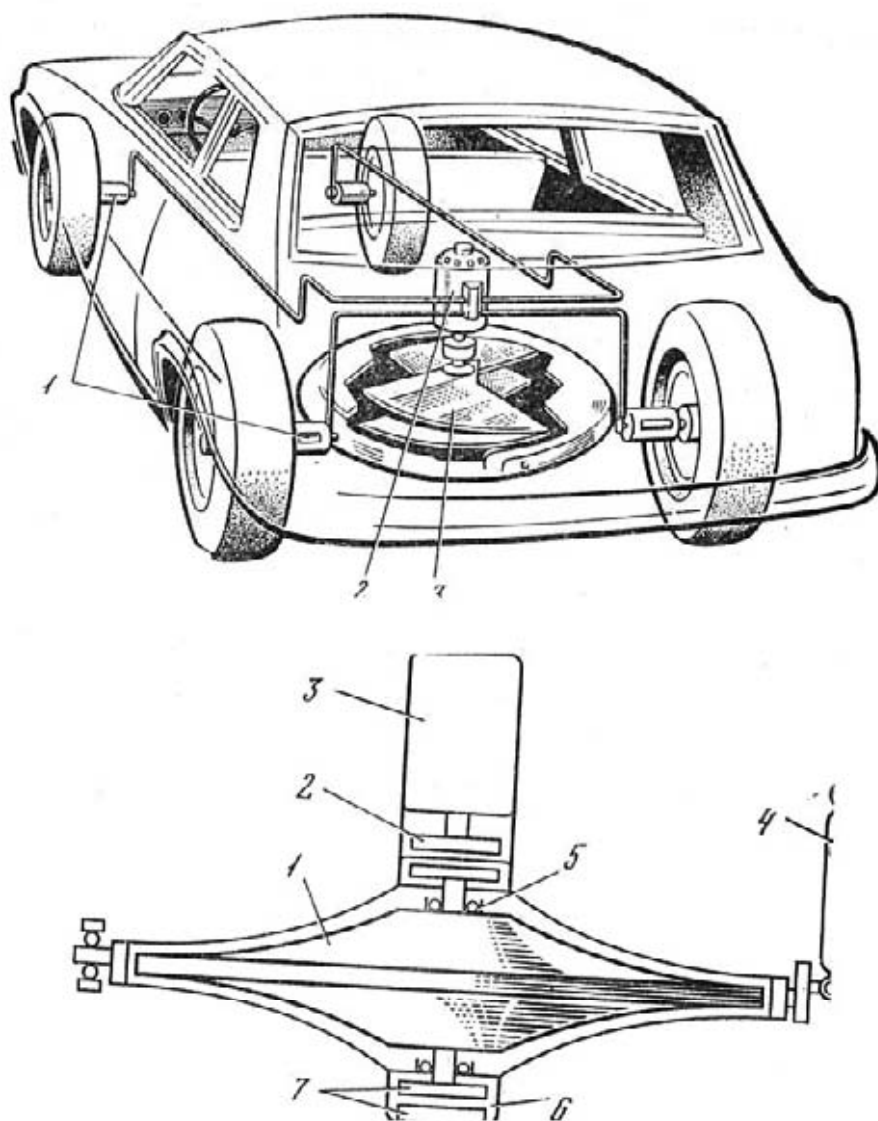
Фирмы, разрабатывающие гиробусы и гиротроллейбусы, подчеркивают, что преимуществами маховичных двигателей перед электроаккумуляторным приводом являются значительно больший срок службы, ничтожные затраты на обслуживание, быстрая зарядка, способность к большим перегрузкам и очень высокая надежность. Маховичные автомобили имеют в 6 раз больший пробег до ремонта, чем автомобили с двигателями внутреннего сгорания (при этом не затрачивается дефицитное горючее и не выделяются газы!).

Теперь поговорим о небольших маховиках и микроавтомобилях. Рассмотрим их в порядке убывания размеров и массы.

Наибольший интерес представляет оригинальный проект маленького городского легкового автомобиля конструкции Д. В. Рабенхорста с супермаховичным аккумулятором. Масса автомобиля при массе маховика около 100 кг примерно 600 кг, включая 150 кг полезного груза. Мощность двигателя автомобиля при крейсерской скорости 90 км/ч составляет около 3,35 кВт. При проектировании автомобиля предполагалось движение в течение 2 ч, что соответствует пути пробега 180 км и запасу энергии в маховике 6,7 кВт·ч.

Автор проекта отмечает, что в автомобиле с инерционным аккумулятором отсутствуют такие необходимые для обычной автомашины агрегаты и системы, как сцепление, приводной вал, дифференциал, полуоси, тормозная система, аккумуляторы, стартер и генератор, система охлаждения, топливная система. Такой автомобиль может





Маховичный автомобиль Д. В. Рабенхорста (1 — мотор-колесо, 2 — электродвигатель-генератор, 3 — супермаховик клиновидной формы) и его маховичный силовой агрегат (1 — супермаховик, 2 — магнитная муфта, 3 — электродвигатель-генератор, 4 — амортизатор, 5 — подшипник, 6 — герметичный вакуумный корпус, 7 — магнитный подпятник)

быть приведен в движение практически мгновенно, так как ускорения при разгоне весьма велики. Для разгона маховика применяется электродвигатель авиационного типа, который подключают к сети. Время разгона составляет 20—25 мин. Начальная частота вращения маховика 23 700 об/мин, конечная — 11 900 об/мин; мощность потерь менее 0,01 кВт. Снижение потерь энергии до столь малой величины достигается помещением супермаховика в герметичный вакуумированный корпус с выводом вала посредством магнитной муфты. Выбег маховика (свободное вращение) будет длиться свыше 1000 ч, или более 41 суток (для сравнения: выбег маховика гиробуса фир-

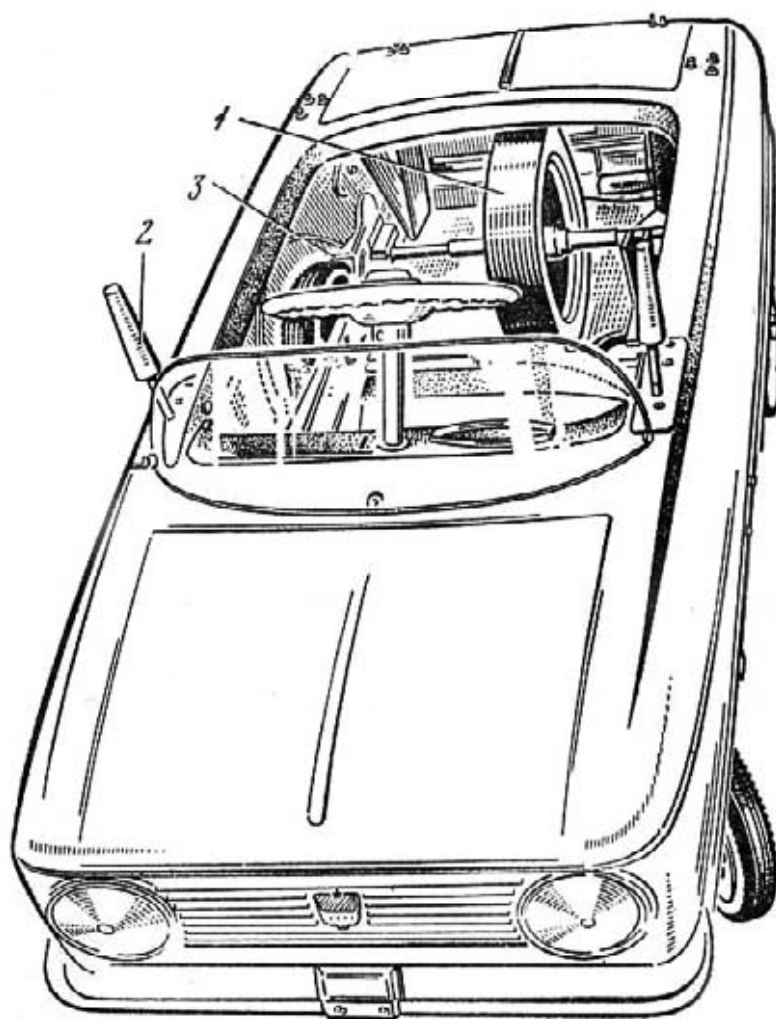


мы «Эрликон» — 12 ч, а маховика-рекуператора фирмы «Кларк» — около недели).

Подшипники супермаховика с сухой смазкой воспринимают нагрузку только гироскопическую или динамическую при тряске, а вес супермаховика воспринимается магнитной подвеской из сильных постоянных магнитов. Валы электродвигателя и супермаховика соединяются магнитной муфтой; при свободном выбеге муфта расцепляется и потери на вращение электродвигателя устраняются. Как электродвигатель, так и подшипники супермаховика находятся в обычных атмосферных условиях, а не в вакууме, что существенно улучшает условия их работы. Для предохранения от тряски и уменьшения гироскопических воздействий корпус супермаховика подвешен на упругих амортизаторах.

Опытный образец маховичного автомобиля проходит пока только 55 км с одной раскрутки маховика.

Следующим по величине (вернее, по малости) является маховичный велосипед, созданный профессором Висконсинского университета в США А. Франком. Велоси-



Маховичный микро-  
мобиль

1 — маховик,

2 — рукоять управле-  
ния.

3 — фрикционная пере-  
дача на колесо



пед, конечно, не самоцель. Благодаря опытам на этом велосипеде Франк нашел оптимальные соотношения и определил экономичность установки маховика на автомобиле. Масса маховика здесь всего 10 кг, частота его вращения 2500—3000 об/мин. Маховик соединяется с задним колесом велосипеда фрикционным конусом, контактирующим с шиной. Перемещением конуса в осевом направлении меняется диаметр его рабочей зоны, контактирующей с колесом, и вследствие этого меняется скорость движения велосипеда (существует также велосипед, маховик которого накапливает энергию при «подпрыгивании» пассажира на седле).

И, наконец, самый маленький представитель маховичных автомобилей — микромобиль для обучения детей правилам уличного движения в автогородках, разработанный под руководством автора. Один из вариантов микромобиля содержит маховик массой около 10 кг, разгоняемый электродвигателем до 6 тыс. об/мин. Маховик установлен в задней части микромобиля и, как на велосипеде Франка, контактирует при помощи фрикциона с задним колесом автомобиля. Микромобиль (еще очень несовершенный первый вариант) проходит с пассажиром до полукилометра с одной раскрутки маховика. Раскрутка же производится включением разгонного электромотора в обычную электросеть посредством штепсельной розетки и вилки.

Следует еще раз заметить, что использование маховиков на транспортных машинах только начинается и ему принадлежит большое будущее.

## РАСЧЕТ МАХОВИКОВ НА ПРОЧНОСТЬ

Из рассмотрения напряженного состояния и энергии маховиков разных форм при вращении можно сделать вывод, что для ободов, дисков и стержней (из материала с изотропными прочностными свойствами) зависимость удельной энергоемкости  $e$  от удельной прочности  $\sigma/\rho = \chi$  материала маховика имеет вид

$$e = k\chi,$$

где  $\chi$  — отношение допускаемых напряжений к плотности данного материала (удельная прочность);  $k$  — коэффи-



циент формы маховика, характеризующий ее эффективность (критерий эффективности формы).

Чем больше значение  $k$ , тем выше удельная энергоемкость маховика при данных напряжениях. Приведенное выражение приближенно справедливо и для супермаховиков, если считать напряжения в них близкими к одноосным.

Для наиболее употребительных форм маховика  $k$  имеет следующие значения:

1) для диска постоянной толщины без отверстия —

$$k = \frac{2}{3 + \mu} \approx 0,6,$$

где  $\mu \approx 0,3$ ;

2) для обода с отношением внутреннего диаметра к внешнему, равным  $i$ , —

$$k = \frac{1 + i^2}{(3 + \mu) [1 + i^2 (1 - \mu)/(3 + \mu)]};$$

при  $i=0$ , т. е. для диска с весьма малым отверстием

$$k = \frac{1}{3 + \mu} \approx 0,3$$

— вдвое меньше, чем у диска без отверстия; при  $i \approx 1$ , т. е. для тонкого обода,  $k=0,5$  и от  $\mu$  не зависит;

3) для диска равной прочности, форма которого определяется по выражению

$$h = h_0 \exp\left(\frac{-\rho \omega^2 r^2}{2\sigma}\right)$$

( $h$  — толщина диска на радиусе  $r$ ,  $h_0$  — толщина диска в центре), при  $v=0$  она вырождается в диск постоянной толщины с  $k=0,6$ ; при бесконечно большой окружной скорости значение  $k$  максимально, т. е. равно 1: практически  $k$  принимает такое значение уже при окружных скоростях 400—500 м/с, на которых эти диски обычно и эксплуатируются;

4) стержень равной прочности также является формой переменной, зависящей для данного материала от окружной скорости, —

$$S = S_0 \exp\left(-\rho \omega^2 r^2 / 2\sigma\right)$$

( $S$  — площадь сечения стержня); при  $v=0$  эта форма вы-



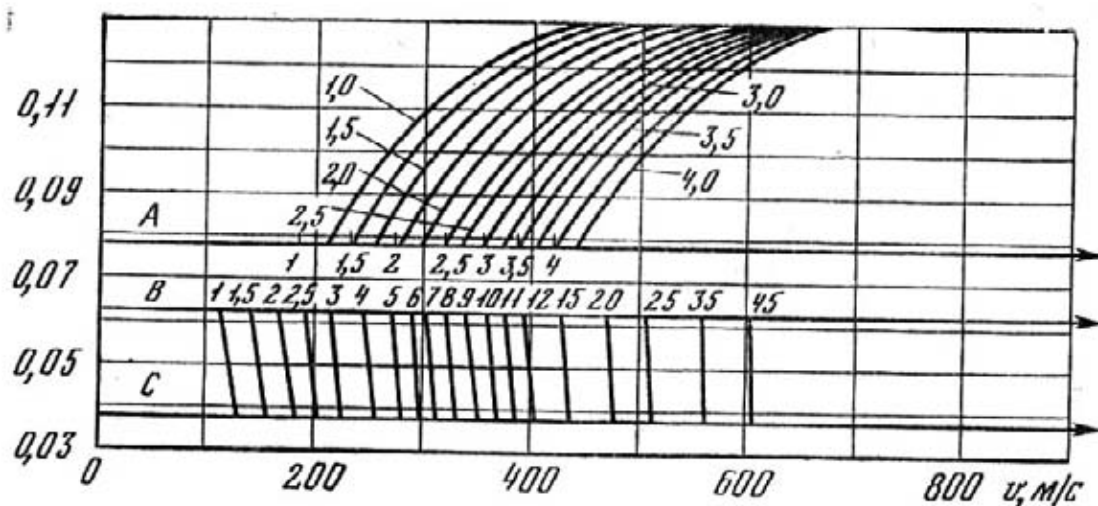


Диаграмма для расчета маховиков

рождается в стержень постоянного сечения; при бесконечно большой окружной скорости  $k=0,6$ . Эти значения соответствуют диску с весьма малым отверстием и тонкому ободу.

Наименее эффективными формами для маховиков являются диски с малыми центральными отверстиями и стержни постоянной толщины ( $k=0,3$ ), затем идут стержни равной прочности и тонкие ободы ( $k=0,5$ ), далее диск без отверстия ( $k=0,6$ ) и диск равной прочности ( $k=1$ ). Следовательно, супермаховики всех трех типов — стержневые, постоянного, переменного сечения и ободковые, несмотря на различие форм, одинаковы по рациональности, т. е. накапливают одинаковые количества энергии на единицу веса при равных напряжениях.

Для прочностно-энергетического расчета маховиков упомянутых форм может служить диаграмма  $v-k$ , построенная для стальных тел вращения. По оси ординат отложена величина относительного коэффициента формы для стали  $k'=k/\rho$  ( $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>), в м<sup>4</sup>/кН·с<sup>2</sup>; по оси абсцисс — окружная скорость маховика  $v$  в м/с. Шкалы  $A$ ,  $B$ ,  $C$  характеризуют напряжения в сотнях МН/м<sup>2</sup> соответственно для дисков постоянной толщины без отверстия, тонких ободов при  $i \approx 1$  и дисков с малым центральным отверстием ( $i \approx 0$ ). Линии, соединяющие шкалы  $B$  и  $C$ , характеризуют промежуточные значения  $i$  ( $0 < i < 1$ ). Семейство кривых в верхней части диаграммы отражает напряжения в дисках равной прочности в сотнях МН/м<sup>2</sup>.

Расчет производится в следующей последовательности. Из точки допускаемого значения окружной скорости,



обычно лимитируемой при конструировании инерционных аккумуляторов, восстанавливается перпендикуляр. Точки пересечения его с линиями на диаграмме дают значения максимальных напряжений в маховиках соответствующих форм. Ординаты этих точек указывают значения  $k'$  для этих форм. Произведение  $k'\sigma$  дает значение удельной энергоемкости  $e$  маховика этой формы. Форма, для которой величина  $e$  максимальна, является оптимальной для данной окружной скорости. Следует иметь в виду, что при скоростях до 100–150 м/с маховики можно эксплуатировать в обычной воздушной среде, при 150–250 м/с — в среде с пониженными вентиляционными потерями (водороде, гелии, разреженном воздухе), а при больших скоростях обязательно их помещение в вакуум (форвакуум).

По этой диаграмме можно рассчитать и маховики, изготовленные из других материалов, причем напряжения в маховике будут во столько раз меньше, во сколько раз новый материал легче стали, а при равных напряжениях во столько же раз больше будет удельная энергоемкость. По диаграмме можно проводить и другие расчеты, задаваясь, например, величинами допускаемых напряжений, формой и пр. Приведем два примера расчета.

1. Требуется определить оптимальную форму маховика и массу для аккумуляирования энергии  $5 \cdot 10^5$  Дж, имея сталь с допускаемыми напряжениями  $12 \cdot 10^4$  кН/м<sup>2</sup> ( $1200$  кгс/см<sup>2</sup>) и  $10^6$  кН/м<sup>2</sup> ( $10\,000$  кгс/см<sup>2</sup>). Допускаемая окружная скорость 300 м/с.

Восстанавливаем перпендикуляр из точки, соответствующей значению  $v=300$  м/с. Он пересекает шкалу  $B$  при  $\sigma=7 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup> и  $k'=0,063$ , шкалу  $A$  при  $\sigma=2,5 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup> и  $k'=0,0763$ , линии дисков равной прочности при  $\sigma=10^5$  кН/м<sup>2</sup> и  $k'=0,11$ ;  $\sigma=1,5 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup> и  $k=0,1$ ;  $\sigma=2 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup> и  $k'=0,08$ . Первому материалу соответствует лишь одна форма — диск равной прочности при  $\sigma=10^5$  кН/м<sup>2</sup>,  $k'=0,11$ ; все остальные требуют материала большей прочности. Удельная энергоемкость такого маховика  $e=1,1 \cdot 10^4$  Дж/кг, масса 45 кг. Форму диска определяют, подставляя в формулу

$$h = h_0 \exp \left( - \frac{\rho \omega^2 r^2}{2\sigma} \right)$$

$v=\omega r=300$  м/с и  $\sigma=10^5$  кН/м<sup>2</sup>. Диаметр маховика и  $h_0$  в центре выбирают конструктивно.



Второму материалу соответствуют все полученные формы, так как он достаточно прочен; максимальное же значение  $e = k' \sigma$  соответствует ободу (шкале  $B$ ) при  $\sigma = 7 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup>,  $k' = 0,063$  и  $e = 4,4 \cdot 10^4$  Дж/кг. Масса маховика 11,3 кг, форма — тонкий обод.

2. Требуется найти допускаемую окружную скорость для маховика в форме тонкого обода для двух материалов: стали и стеклопластика при равных допускаемых напряжениях  $5 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup>. Определить массу маховика для накопления  $5 \cdot 10^5$  Дж энергии.

Для определения параметров стального маховика опускаем перпендикуляр из точки, соответствующей значению  $5 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup> на шкале  $B$ , и получаем  $v \approx 270$  м/с. Удельная энергоемкость этого маховика находится без построений:

$e = k' \sigma = 0,063 \cdot 5 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, или  $3,15 \cdot 10^4$  Дж/кг. Масса маховика 16 кг.

Стеклопластик примерно в 3 раза легче стали, и значениям напряжений  $5 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup> в стеклопластике соответствуют значения  $15 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup> стали. Окружная скорость для таких напряжений по диаграмме примерно равна 420 м/с. Удельная энергоемкость втрое выше, чем у стального маховика, —  $9,5 \cdot 10^4$  Дж/кг. Масса маховика из стеклопластика 5,4 кг.

Расчет супермаховиков, навитых из ленты, а тем более волокна, очень сложен и элементарными методами его произвести нельзя. Можно лишь дать рекомендации к их расчету: например, обод, навитый из ленты на центр без натяжения со склейкой витков одного с другим, следует рассчитывать как серию концентрических колец, вставленных одно в другое с зазором для клея. При этом необходимо вычислить упругие деформации колец как по диаметру, так и по толщине при вращении и найти зазоры между ними. Найдя максимальный межвитковый зазор, возникающий при вращении, определить минимальную толщину слоя клея, чтобы он не разрушился при возникновении этого зазора. Расчет производится обычными методами сопротивления материалов.

Есть также супермаховики, где лента навивается на центр с натягом теоретически без склейки и за счет этого натяга обеспечивается плотная посадка витков одного на другой. Здесь натяг зависит от многих факторов, в том числе от конфигурации центра, и для равнопроч-



ного центра может быть приблизительно определен как половинный от натяга обычного обода — кольца при максимальной частоте вращения. Разумеется, это кольцо должно быть в точности равным по сечению отдельной ленте.

Последний виток ленты может крепиться на ободке возможно более прочным, но эластичным клеем, при этом поверх последнего витка ленты желательна навивка одного-двух слоев весьма прочной тонкой проволоки, превосходящей по прочности саму ленту. Проволока может быть навита также со склейкой, причем начало и конец ее закрепляются на щеках центра, как на катушке, или скручиваются друг с другом. Такая армировка проволокой повышает надежность крепления последнего витка ленты. Вращение такого маховика обязательно должно быть в направлении навивки ленты. Центр желательно изготавливать из легкого материала с малым модулем упругости, например дюралюминия, а также с так называемым гибким элементом.

Избежать расслоения ленты можно и другим способом: подкладывая под часть внутренних витков или под весь обод балласт — массивные, например стальные или свинцовые, подкладки в виде секторов, лент или пластмассовое кольцо, насыщенное свинцовым порошком. При вращении маховика балласт прижимает внутренние витки к внешним, препятствуя расслоению обода.

Несмотря на невысокий коэффициент формы  $k$  ленточного маховика (находящийся между значениями  $k$  для тонкого обода и диска с малым отверстием), этот маховик выигрывает из-за высокой прочности ленты по сравнению с монолитными материалами и снижения коэффициента запаса прочности. Этот коэффициент для монолитных маховиков ввиду большой опасности их разрыва принимается достаточно высоким — 3,0—3,5, а для «безопасных» ленточных маховиков может быть уменьшен до 1,5 и даже ниже. В силу этого удельная энергоемкость ленточных маховиков по сравнению с монолитными из того же материала почти на порядок больше.







## Глава III

### ТЕПЛОВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

Тепловые аккумуляторы известны человечеству с глубокой древности. Это и горячая зола, куда наши предки закапывали продукты для их тепловой обработки, и горячие камни, которые накаливали на огне, а затем бросали в сосуд с водой для ее кипячения. Утюг, который мы нагреваем на огне, а затем гладим им, — тепловой аккумулятор. Накаленные камни, которые мы поливаем водой (квасом, пивом) в столь модных нынче парилках, — тоже аккумулятор тепла. Термобигуди, которые кипятят в воде, а затем с их помощью делают прическу, — тоже тепловые аккумуляторы, причем достаточно совершенные, основанные на аккумуляции плавлением.

Итак, каждое тело, нагретое выше температуры окружающей среды, можно считать аккумулятором тепла. Это тело способно, охлаждаясь, производить работу, а следовательно, обладает энергией.

Но, как было отмечено выше, от каждого аккумулятора требуется, чтобы он запасал как можно больше энергии на единицу массы и «держал» эту энергию как можно дольше. Начнем с последнего свойства аккумулятора. Горячая вода, налитая в открытый сосуд, быстро охлаждается. Это не годится для аккумулятора. Поэтому горячую воду (и не только воду) сохраняют в горячем состоянии в термосах. Термос как аппарат, сохраняющий тепло, известен очень давно. Древнееврейские «утеплители» для пищи представляли собой два ящика, вставленные один в другой, между которыми была проложена термоизоляция — вата, опилки и пр.

Но современные термосы основаны на другом принципе. Внутри пластмассовой коробки находится так называемый сосуд Дьюара — две вставленные одна в другую колбы, соединенные лишь у горлышка. Воздух из пространства между этими колбами выкачан и, таким об-



разом, теплопередача от одной колбы к другой через конвекцию отсутствует. Кроме того, колбы покрыты зеркальным слоем — внутренняя снаружи, а внешняя изнутри для устранения теплопередачи лучеиспусканием. Поэтому тело, например жидкость, помещенная в сосуд Дьюара, долгое время сохраняет тепло (или не допускает тепло внутрь сосуда).

Как же накопить побольше энергии на единицу массы аккумулятора? Можно, конечно, повышать температуру рабочего тела: удельная энергия, запасенная телом, при этом, естественно, повышается. Но, во-первых, любой сосуд, содержащий это тело, выдерживает не беспредельные повышения температуры — выше 2—3 тыс. °С практически невозможно поднять температуру рабочего тела; во-вторых, сильно нагретое тело, даже изолированное от стенок сосуда, теряет так много энергии лучеиспусканием, что может сохранять свою температуру очень непродолжительное время (сохранение хотя бы на секунды сильно, до миллионов градусов, нагретой плазмы — неразрешенная до сих пор задача ядерной энергетики).

Однако, как почти из любого положения, и из этого есть выход. Дело в том, что при изменении фазового состояния вещества, например при кристаллизации, переходе из жидкой фазы в твердую, выделяется значительное количество энергии (теплоты). Из физики известно, что при переходе вещества из твердого состояния в жидкое, несмотря на значительное поглощение тепла, температура этого вещества остается постоянной, пока не расплавится вся масса вещества. При этом в веществе накапливается количество тепла, определяемое выражением:

$$Q = c(t_2 - t_1) + Q_{\text{пл}},$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  — начальная и конечная температура;  $c$  — теплоемкость вещества, которую в первом приближении считаем постоянной, не зависящей от температуры;  $Q_{\text{пл}}$  — теплота, аккумулированная за счет плавления, т. е. фазового перехода. Таким образом, первое слагаемое формулы — это теплота, накопленная за счет теплоемкости, а второе — за счет фазового перехода. И для многих веществ второе слагаемое существенно выше первого. Особенно ценно, что вещество, поглощая (а затем выделяя) это тепло ( $Q_{\text{пл}}$ ) не меняет температуры.



Это свойство положено в основу тепловых аккумуляторов, разработанных коллективом ученых во главе с Н. С. Лидоренко\*.

Предположим, что для какого-то процесса необходимо поддерживать температуру на уровне  $600^{\circ}\text{C}$ , и для этой цели используются тепловые аккумуляторы. В одном из них, с фазовым переходом, в качестве аккумулирующего вещества используется гидрид лития, который плавится при  $650^{\circ}\text{C}$ , а в другом — какой-либо металл, не плавящийся при этой температуре. Пусть температура нагрева аккумулятора в обоих случаях будет  $700^{\circ}\text{C}$ , а начальная —  $0^{\circ}\text{C}$ . Расчет по приведенной формуле показывает, что 1 кг гидрида лития накопит 860 ккал тепла, а 1 кг металла — около 100 ккал. Когда тепловые аккумуляторы начнут работать, т. е. отдавать накопленное тепло, то окажется, что при понижении температуры на  $100^{\circ}\text{C}$  (с  $700$  до  $600^{\circ}\text{C}$ ) у аккумулятора с фазовым переходом каждый килограмм гидрида лития отдает 680 ккал, а у аккумулятора без фазового перехода — лишь около 15 ккал. Таким образом, удельные характеристики у «плавящегося» аккумулятора почти в 45 раз выше.

Если сравнить водяной аккумулятор (термос с водой) с «плавящимся», у которого рабочим веществом служит кристаллогидрат фосфорнокислого натрия, то окажется, что удельные характеристики последнего в 6 раз выше, чем у водяного.

Сравнение по энергетическим характеристикам тепловых аккумуляторов этого типа с нефтью, углем, дровами привело к интересным данным. Теплотворная способность 1 кг нефти — 11 тыс. ккал — в 17 раз превышает тепло, которое отдаст 1 кг жидкого гидрида лития при затвердевании. Значит, всего за 17 циклов аккумулирования 1 кг практически не расходуемого вещества накапливает столько энергии, сколько ее можно получить при сжигании 1 кг нефти. Для угля и дров эти цифры соответственно составляют 10 и 3—4 цикла зарядки. Это очень высокая удельная энергоемкость для аккумулятора — на порядок большая, чем тот же показатель у лучшего супермаховика или электроаккумулятора.

Для создания «плавящихся» тепловых аккумуляторов уже много сделано. Проведены исследования, позволив-

\* См.: Лидоренко Н., Мучник Г., Трушевский С. Аккумулирование плавлением. — Наука и жизнь, 1974, № 3.



шие определить возможности многих веществ в качестве рабочего тела аккумуляторов и выбрать наиболее перспективные из них. Так, в диапазоне температур плавления от комнатной до  $100^{\circ}\text{C}$  наиболее подходящими оказались некоторые кристаллогидраты; а в диапазоне  $600\text{—}800^{\circ}\text{C}$  — гидрид лития и фторид лития; при температурах выше  $1000^{\circ}\text{C}$  — окислы бериллия, магния, алюминия, кремния, их соединения и эвтектики, а также силициды и бориды некоторых металлов. Что касается силицидов и боридов, то здесь пока нерешенной остается проблема совместимости их с конструкционными материалами, из которых делается аккумулирующее устройство, т. е. с корпусом аккумулятора.

Особую надежду авторы разработок возлагают на использование экологически безвредной солнечной энергии\*.

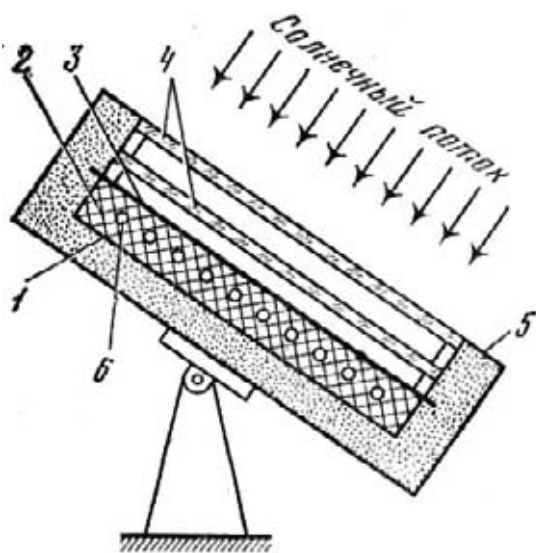
Проводятся опыты в солнечных печах с тугоплавкими металлами и сплавами, окислами, температура плавления которых достигает  $3000^{\circ}\text{C}$ . Для этих целей плотность потока солнечных лучей с помощью оптических средств увеличивается примерно в 10 тыс. раз. Простейший пример таких установок — зеркала в виде параболоидов вращения, ориентированных на Солнце, в фокусе которых помещают тепловой аккумулятор.

Элемент опытного теплового аккумулятора представляет собой короб с освещаемой площадью около  $1\text{ м}^2$ , заполненный аккумулирующим материалом и теплоизолированный со всех сторон, кроме одной, которая подвергается нагреву солнечным потоком и называется теплоприемной. На нее нанесено покрытие (например, черная эмалевая краска), хорошо поглощающее видимую часть солнечного излучения. Для предотвращения радиационных и конвективных потерь тепла над теплоприемной поверхностью расположены одно, два или три стекла — таким способом создается тепличный эффект (количество стекол определяется допустимыми потерями тепла при зарядке аккумулятора и при хранении тепла).

\* Как показывают расчеты, для бесперебойного снабжения солнечной энергией населения Земли необходим тепловой аккумулятор с рабочим веществом, обладающим скрытой теплотой плавления  $300\text{ ккал/кг}$  и массой около 400 млн. т (сейчас ежегодная добыча топлива, в расчете на условное, составляет 8 млрд. т). Этот аккумулятор можно представить, например, в виде кольца шириной 10 м и толщиной 0,5 м, опоясывающего экватор.



В дневное время теплоаккумулирующий материал за счет поглощения солнечного потока разогревается и плавится. Аккумулированная тепловая энергия может быть использована при подключении потребителя вечером или через несколько суток. В данном случае тепло отбирает вода (или воздух), пропускаемая по теплообменнику. Аккумулятор можно установить на платформу, непрерывно ориентирующуюся на Солнце, или смонтировать непод-



**Солнечный тепловой аккумулятор**

1 — короб, 2 — теплоаккумулирующий материал, 3 — покрытие, 4 — стекло, 5 — теплоизоляция, 6 — теплообменник

вижно с преимущественной ориентацией на юг (для северных широт). Такой аккумулятор за день может накопить около 6 тыс. ккал тепла, при этом его теплоаккумулирующий материал (кристаллогидрат азотнокислого никеля) нагревается до 80—85° С. Расположив необходимое количество аккумуляторов, например, на крыше здания, можно использовать их для подогрева воды, отопления или кондиционирования помещений.

Для бытовых нужд и сельского хозяйства, очевидно, более целесообразно использовать тепловые аккумуляторы с рабочей температурой не выше 100—200° С, причем начинать надо с оснащения ими удаленных хо-

зяйств, куда затруднена доставка топлива, а в дальнейшем создавать гелиотеплоцентрали. Высокотемпературные установки найдут применение в тепловых циклах, например для выработки электроэнергии.

Тепловые аккумуляторы могут служить и для бесперебойного получения электроэнергии с помощью термоэлементов. Более того, с их помощью можно получить механическую работу, например питая горячим рабочим телом двигатель Стирлинга. Известно, что этот двигатель может работать даже от тепла человеческих рук. Тем эффективнее он заработает от достаточно мощного источника энергии — теплового аккумулятора. Правда, при этом удельная энергоемкость такого «гибрида» сильно (более чем в 300 раз) упадет, достигнув уровня заурядного маховичного или электрохимического аккумулятора.



ГИБРИДНЫЕ СХЕМЫ  
С АККУМУЛЯТОРАМИ ЭНЕРГИИ

## «СИМБИОЗ» АККУМУЛЯТОРОВ

Аккумуляторы, успешно работающие в одиночку, еще лучше могут работать в паре с другим, подходящим для этой цели аккумулятором.

Мы уже говорили, что супермаховик может помочь электромобилю преодолеть его основной недостаток — малую удельную мощность. Действительно, если электрохимические аккумуляторы (по данным американских ученых) обеспечивают всего около 80 Вт/кг, а «парадной» цифрой является 150 Вт/кг, то любой маховик в состоянии обеспечить более 10 тыс. Вт/кг. Таким образом, маховик «берет на себя» переходные режимы движения электромобиля (разгоны, торможения, подъемы, обгоны), требующие высокой удельной мощности. Вместе с тем электрохимический аккумулятор хранит энергию в основном гораздо дольше маховиков, а нередко имеет и большую удельную энергоемкость (если не принимать в расчет перспективных супермаховиков).

При совместном применении в электромобиле эти два аккумулятора образуют отличный «симбиоз». Например, на основе минибуса фирмы «Мерседес» разработан 40-местный электробус, оснащенный супермаховиком. Этот электробус при движении по ровной дороге с обычной скоростью использует энергию электроаккумуляторов, а при разгонах, обгонах других машин, подъемах в гору, когда мощности электроаккумуляторов недостаточно, вступает в работу супермаховик, обеспечивая необходимые динамические качества. Наличие даже небольшого маховика (супермаховика) на электромобиле позволяет чуть ли не вдвое увеличить его пробег в городских условиях, где часты торможения и разгоны. Кроме того, электрохимический аккумулятор при отборе от него вы-



сокой мощности быстро выходит из строя, у маховика же мощность, развиваемая при зарядке или отборе энергии, практически не влияет на его долговечность: и в этом он успешно дополняет электрохимический аккумулятор.

Соединение маховиков с электродвигателями на электромобилях принципиально не отличается от их соединения с тепловыми двигателями.

Несколько иной характер носит «симбиоз» тепловых и газовых аккумуляторов.

Известно, что газ при сжатии нагревается, а при расширении теряет это тепло. Азот, выпускаемый из баллона под давлением 150 атм, имеет температуру около  $-80^{\circ}\text{C}$ . Если из баллона выпускать в атмосферу жидкую углекислоту при обычной температуре, то, расширяясь, она так охлаждается, что переходит в твердое состояние — углекислотный снег (из него получают «сухой» лед). Конечно, при расширении газ теряет много энергии, накопленной при сжатии.

Обычно при закачке газового аккумулятора не удается сохранить выделяемое при этом тепло: со временем и газ, и баллон аккумулятора охлаждаются до температуры окружающей среды. Вместе с тем тепловые аккумуляторы, обладающие огромной удельной энергоемкостью, могут достаточно долго сохранять накопленную в них тепловую энергию. Объединив эти два аккумулятора, получаем экономичный процесс использования энергии сжатого газа.

В конце прошлого века в г. Нанте (Франция) ходил трамвай, приводимый в движение энергией сжатого воздуха в баллонах. На стоянках трамвай «заправлялся» не только сжатым воздухом, но и кипятком, который выполнял роль теплового аккумулятора — нагревал расширяющийся газ, предотвращая его переохлаждение и повышая давление, что выгодно отражалось на работе всего силового агрегата пневматического трамвая.

Еще лучший результат можно было бы получить, используя высокоэнергоемкий аккумулятор плавления, описанный в предыдущей главе. Существуют приводы от газовых аккумуляторов, где выделяемая работа даже превышает работу, затраченную при закачке газа в баллон-аккумулятор. Происходит это потому, что газ по пути от баллона высокого давления к потребителю (например, пневмодвигателю) нагревается в теплообменнике, вклю-



чающем аккумулятор тепла. А так как тепло — энергия «низшего сорта», то и накопить ее можно как бросовую при деградации «высокосортных» видов энергии — электрической, механической, с получением полезной работы. В частности, это тепло может быть отобрано от системы охлаждения двигателей, реостатов управления и даже от окружающей среды при достаточно высокой ее температуре.

Очень широкое распространение имеют комбинации («гибриды») статических и динамических аккумуляторов одного и того же вида. Всем известный маятник, в том числе и балансир с пружинкой в наручных часах, — гибрид статического аккумулятора в виде поднятого груза в первом случае и закрученной пружины во втором, и динамического в виде движущейся массы в первом случае и раскрученного маховика — во втором. «Перетекание» энергии из статического аккумулятора в динамический и обратно носит колебательный характер. Действительно, маятники для того и созданы, чтобы колебаться. Период этих колебаний зависит от параметров статического и динамического аккумуляторов, входящих в гибрид.

Совершенно такой же колебательный процесс получим, объединив статический и динамический электрические аккумуляторы. Соединенные конденсатор и катушка индуктивности образуют так называемый колебательный контур. Перетекание электроэнергии из конденсатора в катушку индуктивности и обратно, как и в случае маятника, носит колебательный характер. Электрический колебательный контур — аналог маятника, поэтому и называют их часто одним и тем же термином «осциллятор», в первом случае электрический, во втором — механический. Законы колебаний механического и электрического осцилляторов аналогичны. Потери энергии в случае как механического, так и электрического осциллятора приводят к одному и тому же — колебания затухают, накопленная энергия переходит при этом в тепло.

Осцилляторы имеют очень широкое распространение в технике, играя как полезную, так и вредную роль. Колебания маятника, звучание струн, работа вибратора и множество типов колебательных контуров в радиоприборах — примеры полезного применения гибридов статических и динамических аккумуляторов. Непредусмотренные вибрации машин, часто ведущие к их разрушению, поме-



хи в работе радиоприборов, огромное количество аналогичных явлений (и даже дрожь в коленях от страха) — примеры вредного проявления этой «гибридизации».

### «СИМБИОЗ» АККУМУЛЯТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ

Рабочий процесс каждой машины, в том числе и транспортной, обязательно включает разгоны и замедления. Для машин непрерывного действия эти процессы играют незначительную роль, поскольку работа носит характер установившегося режима. Для машин же циклического действия, например городского транспорта, процессы разгона и замедления составляют значительную часть рабочего цикла. Рассматривая эти два процесса, можно заметить, что в первом случае происходит накопление кинетической энергии, во втором — ее уменьшение. При замедлениях автомобиля кинетическая энергия расходуется на его движение, а также рассеивается (диссипирует) в тормозах.

При малых скоростях машин доля кинетической энергии в общем энергетическом балансе невелика, однако с повышением скоростей она возрастает, быстро занимая преобладающую роль. Такое же явление имеет место при снижении сопротивлений движению (или повышении КПД трансмиссии) и уменьшении длины пути цикла.

Между тем как у транспортных, так и у других машин циклического действия скорость движения неуклонно повышается, сила сопротивления движению уменьшается, увеличивается КПД трансмиссий (у транспортных машин, кроме того, иногда желательное уменьшение расстояний между остановками). У современных машин циклического действия — автобусов, трамваев, троллейбусов, поездов метро, пригородных поездов, мостовых кранов и т. п. — для наиболее эффективных циклов на совершение работы тратится около половины суммарной энергии двигателя, а другая ее половина переходит в кинетическую с последующим рассеиванием. В будущем это соотношение, несомненно, еще более ухудшится.

Такое положение приводит к необходимости, с одной стороны постоянного повышения мощности двигателя для обеспечения динамических качеств машины, с другой — применения устройств, поглощающих кинетическую энергию: различных замедлителей и тормозов. В результате



этого затрудняется дальнейшее повышение производительности и экономичности машин.

Отношение энергии  $E_{\pi}$ , затраченной на полезное сопротивление, к полной энергии  $E_0$  может служить мерой для оценки резерва кинетической энергии в машине в заданных условиях:

$$\delta = \frac{E_{\pi}}{E_0}.$$

С улучшением использования энергии значение  $\delta$ , увеличиваясь, стремится к единице. Резерв кинетической энергии при этом соответственно уменьшается. В табл. 1 приведены значения  $\delta$  для различных циклов работы городского транспорта на пневмошинах — автобусов, троллейбусов и др. (для простоты оценки аэродинамические сопротивления не учитывались).

Таблица 1

Резерв кинетической энергии в транспортной машине ( $\delta$ ) при различных циклах ее работы

Расстояние между остановками, м	Начальная скорость торможения, км/ч						
	10	20	30	40	50	60	70
100	0,8	0,49	0,3	0,196	—	—	—
200	0,89	0,66	0,464	0,32	0,238	—	—
300	0,92	0,74	0,565	0,42	0,29	0,246	—
400	0,94	0,79	0,635	0,48	0,385	0,30	0,242
500	0,95	0,83	0,69	0,55	0,44	0,35	0,284

Как видим,  $\delta$  достигает высоких значений при малой скорости и больших расстояниях между остановками. Между тем современные транспортные машины работают в основном на высоких скоростях и имеют низкое значение  $\delta$ , и, следовательно, большие резервы кинетической энергии, использование которой может дать значительный экономический эффект.

Кинетическая энергия транспортной машины может быть использована путем рекуперативного торможения, т. е. предназначенную для рассеивания энергию путем соответствующих мероприятий можно затрачивать на со-



вершение полезной работы. Когда большое количество транспортных машин связано единой сетью питания (например, электрический транспорт), вероятное число тормозимых транспортных машин близко к числу разгоняющихся. Здесь принципиально возможна отдача в сеть энергии, выделяемой при торможении и использование ее для разгона других машин. Это можно осуществить путем перевода тяговых двигателей в генераторный режим с отдачей выделяемой энергии в сеть. Но поскольку режим замедления до остановки весьма неэффективен для работы генераторов, этот метод позволяет использовать всего несколько процентов кинетической энергии (торможение до остановки не следует отождествлять с торможением при движении под уклон, в этом случае генераторы работают с бóльшей эффективностью).

Радикально кинетическая энергия используется в том случае, когда она может быть накоплена в аккумуляторе, находящемся на самой машине, а затем выделена для использования.

Для накопления энергии при торможении машины аккумулятор должен иметь специфические свойства, обусловленные кратковременным интенсивным протеканием процесса. Из рассмотрения, по-видимому, следует исключить тепловые аккумуляторы, требующие преобразования механической энергии в тепловую и обратно. Эти процессы весьма трудоемки и неэффективны, а также имеют низкий КПД. Наиболее распространенные в технике электрические аккумуляторы имеют высокую удельную энергоемкость, способны длительное время сохранять энергию. Основной их недостаток — малая удельная мощность как при зарядке, так и при разрядке; кроме того, для преобразования механической энергии в электрическую и обратно требуется электродвигатель, работающий также в режиме генератора. Несмотря на это, электрические аккумуляторы принципиально пригодны для аккумуляции кинетической энергии машины.

Наиболее целесообразны для этих целей аккумуляторы механической энергии — статические и динамические. Однако энергоемкость статических пружинных аккумуляторов в тысячи раз ниже, чем динамических той же массы. Этим объясняется неприемлемость статических аккумуляторов для накопления значительных количеств энергии. Небольшие количества кинетической энергии

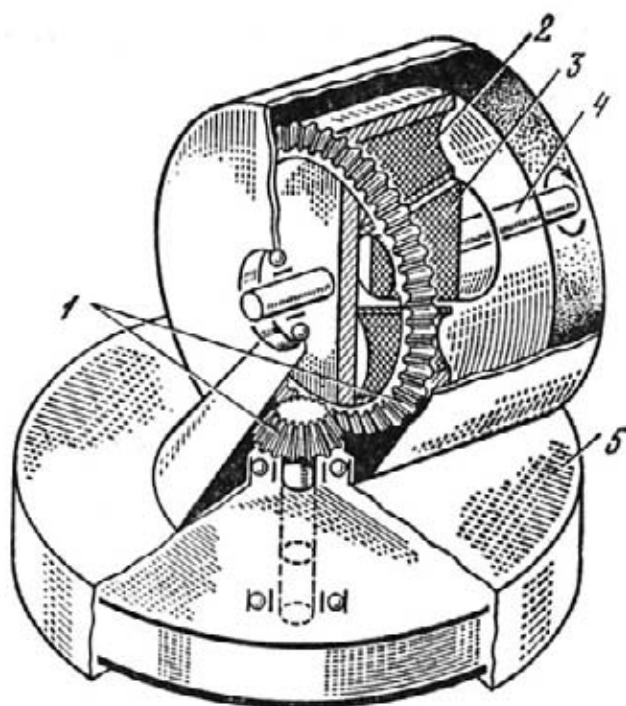


могут быть накоплены в маховике инерционного рекуперативного тормоза с резиновым упругим звеном. Инерционный аккумулятор с упругим звеном подключается к трансмиссии машины с помощью фрикционной муфты. На первом этапе торможения основная часть энергии аккумулируется в упругом звене в виде потенциальной энергии. Затем по мере разгона маховика в нем накапливается кинетическая энергия торможения вместе с аккумулярованной потенциальной энергией упругого звена. Недостатком такого рекуператора является то, что в упругом звене должно накапливаться от четверти до половины суммарной энергии торможения (в зависимости от частоты вращения маховика перед торможением). Из-за малой аккумулирующей способности упругого звена такой рекуператор не может применяться для накопления большого количества кинетической энергии.

Статические аккумуляторы могут накопить большое количество энергии только в том случае, если рабочим телом является газ, так как он обладает высокой сжимаемостью. Однако при этом имеют место большие потери энергии, обусловленные малым КПД пневмокомпрессоров и пневмодвигателей в требуемом режиме работы, а также потерей адиабатического тепла. Это практически исключает возможность применения пневмоаккумуляторов для накопления с последующим использованием кинетической энергии, если только для передачи энергии не использовать жидкость. Такие аккумуляторы называются гидрогазовыми.

Опыты, проведенные с гидрогазовыми аккумуляторами в качестве рекуператоров энергии, как у нас в стране, так и за рубежом показали хорошие результаты. Например, в Курском политехническом институте (совместно с гомельским заводом «Гидропривод») был разработан, изготовлен и испытан экспериментальный автобус с гидрогазовым аккумулятором емкостью 80 л. При торможении автобуса соединенная с его трансмиссией гидромашинка, работая в режиме насоса, закачивает в гидрогазовый аккумулятор масло, накапливая энергию в сжатом газе. Автобус при этом замедляет ход и останавливается. Для разгона автобуса накопленной энергией масло под давлением 180—200 атм поступает из гидрогазового аккумулятора в гидромашину, которая, работая в режиме двигателя, плавно и интенсивно через трансмиссию разгоняет





Маховичный рекуператор с упругим звеном

- 1 — коническая пара,
- 2 — резиновое кольцо,
- 3 — фрикционная муфта,
- 4 — вал трансмиссии,
- 5 — маховик

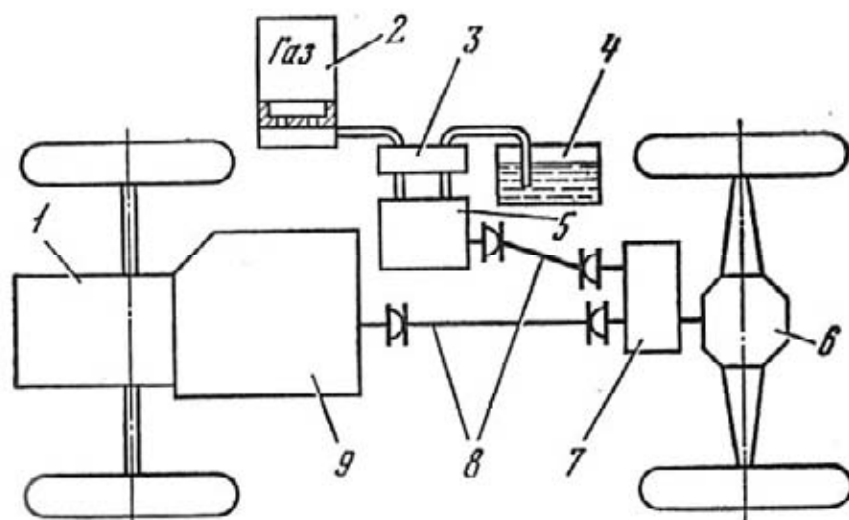


Схема рекуператора на основе гидрогазового аккумулятора

- 1 — двигатель, 2 — гидрогазовый аккумулятор, 3 — распределитель,
- 4 — бак, 5 — насос-мотор, 6 — ведущий мост автомобиля, 7 — редуктор,
- 8 — карданные валы, 9 — коробка передач

автобус. При торможении с 35—40 км/ч автобус разогнался собственной энергией без двигателя почти до 30 км/ч. У городских автобусов при этом (как по нашим, так и по зарубежным данным) экономится от 30 до 50% горючего и почти втрое снижается количество токсичных выделений.

При переходе в гидрогазовых аккумуляторах на давление до 320 атм, что отвечает сегодняшнему уровню



техники, габариты и масса гидрогазового рекуператора значительно снижаются, и он с успехом может применяться на городских автобусах уже в самом недалеком будущем (исследовательские работы в этом направлении проводятся в Курском политехническом институте и Всесоюзном конструкторско-экспериментальном институте автобусостроения в г. Львове) \*.

Однако из механических аккумуляторов для данной цели наиболее перспективен инерционный аккумулятор — маховик. Наибольшая сложность в системе рекуперативного торможения маховиком заключается в приводе.

В 1951 г. профессором Н. К. Куликовым была предложена схема инерционного рекуператора с планетарным приводом. Рекуператор Куликова представлял собой планетарную коробку передач с маховиком и бесступенчатой передачей (вариатором). Он не был построен из-за отсутствия вариатора требуемой характеристики.

Английской фирмой «Кларк» разработаны различные варианты рекуперативных тормозов, состоящих из маховиков и планетарных коробок передач. Так, автобусный рекуперативный тормоз «Гиректа» представляет собой четырехскоростную планетарную коробку передач, соединенную солнечной шестерней с двигателем автобуса, водилом сателлитов — с карданным валом, а венцом — с маховиком, аккумулирующим кинетическую энергию автобуса вместе с энергией, выделяемой работающим двигателем. При торможении автобуса, связанного трансмиссией с водилом сателлитов, на венец передачи, а стало быть, и на вал маховика, действует крутящий момент.

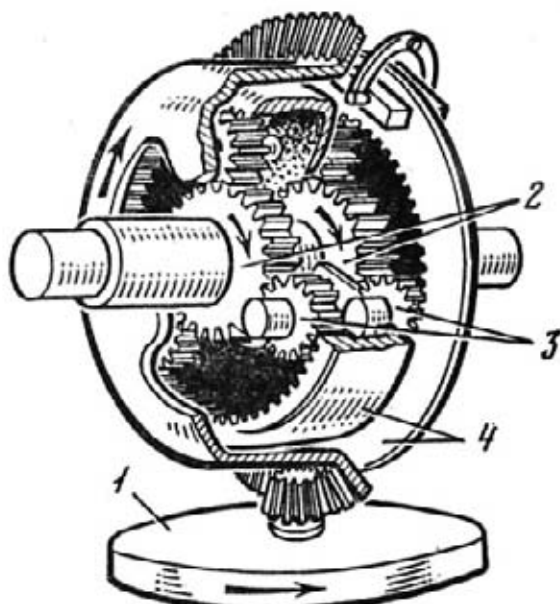


Схема маховичного рекуператора «Гиректа»

1 — маховик, 2 — центральные шестерни, 3 — сателлиты, 4 — венцы

\* Известно множество попыток использования с помощью гидрогазовых аккумуляторов энергии колебаний автомобиля. Однако эта энергия, обычно рассеиваемая в амортизаторах, так мала, что использование ее вряд ли обоснованно.



Реактивный же момент, замедляющий автобус, действует на вал двигателя. Поэтому двигатель автобуса не отключается ни при торможении, ни при разгоне.

Маховик привода имеет массу 80 кг и вращается с максимальной частотой до 15 тыс. об/мин. При диаметре маховика 0,57 м его окружная скорость достигает 450 м/с. Форма маховика близка к диску равной прочности. При торможении автобуса маховик разгоняется с 12 тыс. до 15 тыс. об/мин.

Привод «Гиректа», установленный на автобусе массой 10 т, позволяет тормозить со скорости 48 до 16 км/ч; а при разгоне, который продолжается около 15 с, он заменяет дополнительный двигатель мощностью 90 кВт. При уменьшении частоты вращения маховика ниже 12 тыс. об/мин, например при стоянке, оператор может по желанию непосредственно из кабины соединить маховик с двигателем и разогнать его.

Учитывая большую частоту вращения, маховик поместили в кожух с разреженной атмосферой для снижения вентиляционных потерь. Воздух из кожуха непрерывно удаляется насосом, питающимся непосредственно от маховика, благодаря чему разогнанный маховик может вращаться без остановки более недели. После ночной стоянки автобуса энергии маховика хватает для пуска двигателя.

Передача планетарной коробки включается автоматически с помощью электромагнитных муфт. 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». Оно 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. Маховик привода «Гидректа» имеет диаметр 0,51 м, массу 64 кг. Его максимальная частота вращения 20 тыс. об/мин, общее время разгона неподвижного маховика до максимальных оборотов 1 мин 40 с. Автомобиль массой 1200 кг, снабженный двигателем в 115 кВт и устройством «Гидректа», разгоняет-



ся с места до скорости 100 км/ч за 4,75 с, а до 145 км/ч — за 11,25 с: это очень высокие динамические показатели. Среднее ускорение достигает  $6 \text{ м/с}^2$ .

Рекуператоры кинетической энергии на основе маховиков и планетарных передач не обеспечивают достаточной эффективности работы из-за ступенчатого изменения передаточного отношения привода. Кинетическая энергия автомобиля выделяется при замедлении его движения, а воспринимается маховиком при ускорении вращения. Это вызывает необходимость соединения трансмиссии автомобиля и маховика бесступенчатой передачей с весьма широким диапазоном регулирования передаточного отношения, причем это регулирование должно проводиться достаточно быстро — ведь торможение автомобиля длится обычно всего несколько секунд.

Кроме того, высокие мощности привода вызывают потребность в его компактности и высоком КПД.

В этом смысле представляют интерес схемы рекуператоров кинетической энергии на основе дискретного ленточного вариатора и маховика. Изменение передаточного отношения дискретного ленточного вариатора основано на изменении диаметров витков ленты в процессе перемотки. Вариатор состоит из двух кассет с мотками навитой ленты, на валах которых посажены маховики. Один из них вращается, другой, с намотанной лентой, неподвижен. В процессе перемотки ленты с вала неподвижного на вал вращающегося маховика неподвижный маховик постепенно разгоняется. В конце цикла, когда вся лента смотана, он имеет максимальную скорость. Затем цикл повторяется.

Такие приводы могут обеспечить использование кинетической энергии циклических машин с очень малыми внутренними потерями за цикл. Дискретный ленточный вариатор обеспечивает варьирование передаточного числа практически в 50 раз при КПД около 0,97. Смазки вариатор не требует, а по удельной мощности (отнесенной к массе установки) он близок к зубчатым передачам.

Особенность работы рекуператора заключается в том, что лента в ленточном вариаторе при торможении и разгоне должна перематываться в разных направлениях — реверсироваться. Для этого маховик связан с валом вариатора фрикционной и зубчатой муфтами; второй вал вариатора так же связан с колесами автомобиля. Ленточный



механизм поворачивается на  $180^\circ$  для изменения направления намотки ленты маломощным сервоприводом.

Несмотря на конструктивные недостатки описанной системы рекуператора, при испытании она показала удовлетворительные характеристики торможения и разгона. Автомобиль со скоростью примерно 30 км/ч, т. е. со средней и даже высокой скоростью регулярного торможения городских автобусов, плавно, без рывков тормозился без

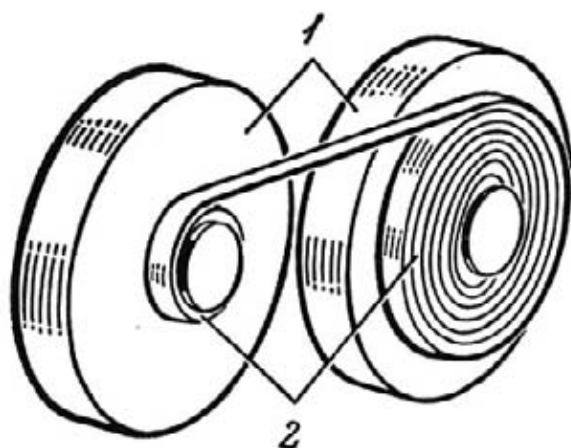


Схема дискретного ленточного вариатора

1 — маховики, 2 — мотки ленты

участия фрикционных тормозов. Рекуператор в этом случае играл роль замедлителя. Для разгона автомобиля с места до скорости 30 км/ч без участия рекуператора требовалось  $28 \text{ см}^3$  топлива, а с рекуператором и двигателем — всего  $16 \text{ см}^3$ .

Таким образом, на каждом разгоне экономилось около 45% топлива.

Использование рекуперации энергии торможения весьма эффективно в поездах

метрополитена. Недавно вышедший на линию Ньюйоркского метро метropоезд с маховичными рекуператорами экономит свыше 30% электроэнергии, что существенно отражается на энергетическом балансе города.

Надо отметить, что основная цель рекуперации энергии торможения сегодня состоит в очищении атмосферы городов от вредных продуктов неполного сгорания топлива. Этому, кроме рекуператоров энергии, способствует применение гибридов аккумуляторов и тепловых двигателей.

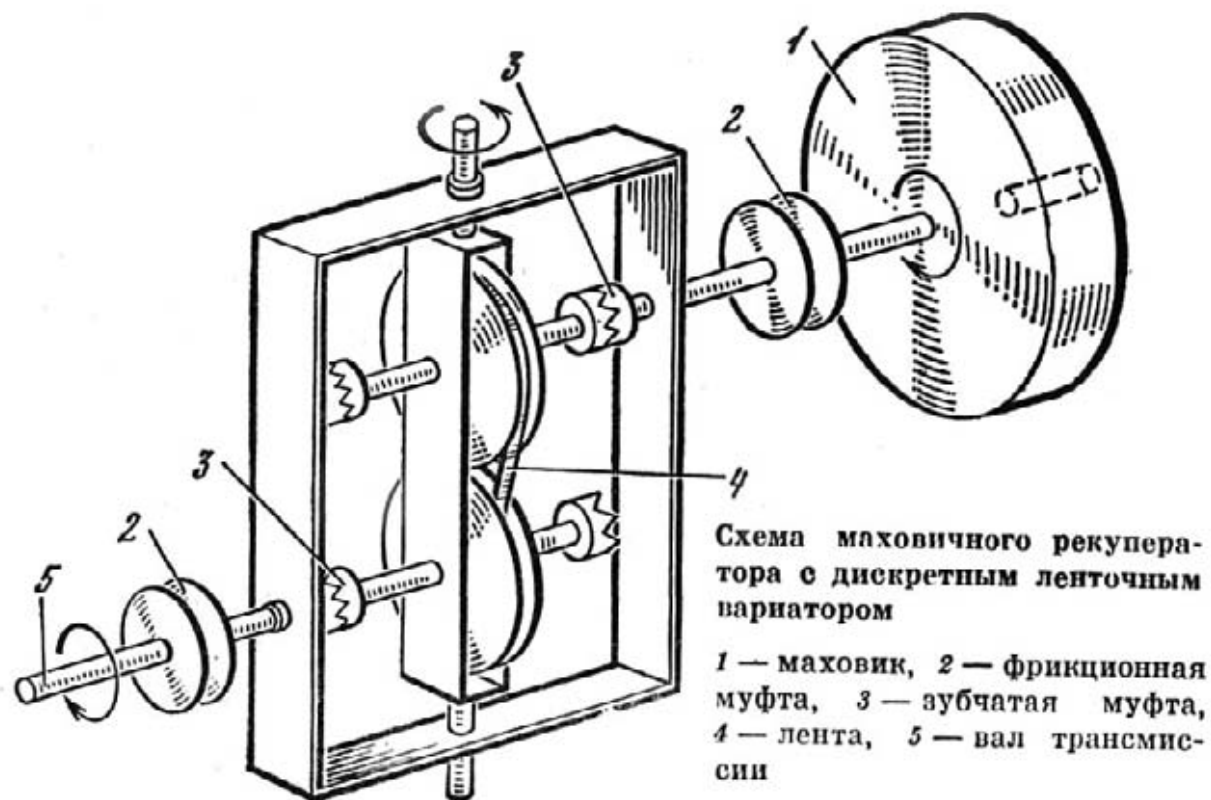
Индивидуальные инерционные силовые агрегаты, хотя и являются перспективными для автомобилей и автобусов, требуют радикальной перестройки существующих видов транспорта. Кроме того, создание конкурентоспособного инерционного автомобиля пока связано с определенными техническими трудностями. Сейчас целесообразны паллиативные решения — гибридные схемы силовых агрегатов, представляющие собой совокупность двигателей внутреннего сгорания и инерционного. Гибридный



силовой агрегат позволяет в 2 раза и более сократить мощность основного двигателя, значительно уменьшить расход топлива, повысить динамические качества автомобиля, сократить до допустимых пределов токсичность продуктов неполного сгорания топлива. Существенно не отличаясь по габаритам и массе от обычного двигателя, он может быть установлен на автомобилях сегодняшних конструкций без их серьезной переделки. Имея много общего с рекуператорами, гибридные силовые агрегаты более универсальны, применимы для более широкого диапазона эксплуатационных условий и для более широкого класса автомобилей, чем рекуператоры, но зато более сложны и дороги.

Особенно интенсивно проводятся работы по гибридным силовым агрегатам в США, где города, насыщенные автомобилями, сильно страдают из-за отравления атмосферы отработавшими газами.

Гибридная схема фирмы «Локхид» представляет собой двигатель внутреннего сгорания, кинематически объединенный с инерционным аккумулятором (рекуператором) механической энергии, помогающим двигателю в периоды работы его на неустановившихся режимах, когда выделение токсичных продуктов особенно велико. Махо-





вик в гибридных схемах служит для рекуперативного торможения и разгона автомобилей, пуска двигателя; он равномерно загружает двигатель по мощности, обеспечивая благоприятный режим его работы. Были рассмотрены возможности применения гибридных схем для наиболее распространенных типов автомобилей.

Есть два пути уменьшения вредных выделений автомобильным двигателем: сжигание лучшего топлива и лучшее его сгорание. Анализ различных методов осуществления этих путей показал, что они не в состоянии снизить вредные выделения до необходимых цифр\*. Специалисты фирмы «Локхид» пошли по третьему пути: они уменьшили количество сжигаемого топлива, что достигается рекуперацией энергии торможения и выбором двигателя (довольно низкой средней мощности). Это может быть обеспечено применением гибридной схемы: двигатель внутреннего сгорания плюс инерционный аккумулятор, что дает следующие преимущества:

- 1) расход топлива снижается примерно вдвое за счет рекуперации кинетической энергии;
- 2) установочная мощность двигателя уменьшается до 40% от номинальной, поскольку мощность, необходимую для пуска двигателя и разгона, автомобилю обеспечивает маховик;
- 3) двигатель работает главным образом на оптимальной точке характеристики, когда вредные выделения значительно сокращаются;
- 4) устраняются различные системы быстрого пуска двигателя и режимы холостого хода, увеличивающие токсичность отработавших газов.

Использование гибридных схем не накладывает ограничений на размеры и мощность двигателей; к гибридным схемам применимы все улучшения, осуществленные в автомобильных двигателях современных типов.

Наилучшим типом двигателя внутреннего сгорания для гибридных схем является карбюраторный, пригодны для этих целей также усовершенствованные двигатели, работающие по циклу Ранкина, Брейтона, Стирлинга, или

---

\* Допустимый уровень вредных автомобильных выделений (эмиссий), установленный Законом о сохранении чистоты воздушного бассейна, принятым в США в 1970 г., примерно в 8 раз ниже реально существующего там в настоящее время.

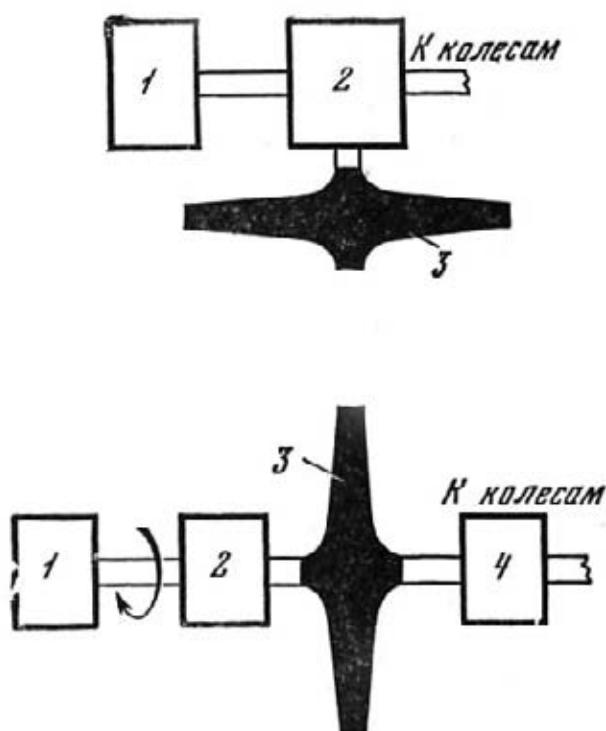


модифицированные дизельные двигатели с низким уровнем вредных выделений.

Были проанализированы режимы движения и потребление энергии для автомобилей, а также исследованы рациональные формы и конструкции маховиков. Выбраны два основных типа маховиков для гибридных схем: стальной диск равного сопротивления и супермаховик стержневого типа из ориентированного стеклопластика. Расчеты показали, что масса маховика имеет приемлемые значения только для городского автобуса: для остальных она превышает массу всей движущей системы.

Параметры маховиков гибридных схем определяют, исходя из запаса кинетической энергии, необходимой для создания максимальной скорости автомобиля. При проектировании гибрида (как, впрочем, и рекуператора) принимается целесообразным, чтобы сумма кинетических энергий маховика и автомобиля в любой момент времени была равна кинетической энергии автомобиля при максимальной скорости. Таким образом, маховик обеспечивает автомобиль мощностью, требуемой для ускорения, а двигатель внутреннего сгорания обеспечивает энергией, необходимой для преодоления всех сопротивлений (качение, аэродинамика, уклоны и пр.). Обычно маховик занимает весьма малую часть силового агрегата и его масса может быть без ущерба для автомобиля увеличена в 2—3 раза, а удельная энергоемкость соответственно снижена, что приведет к удешевлению и упрощению конструкции.

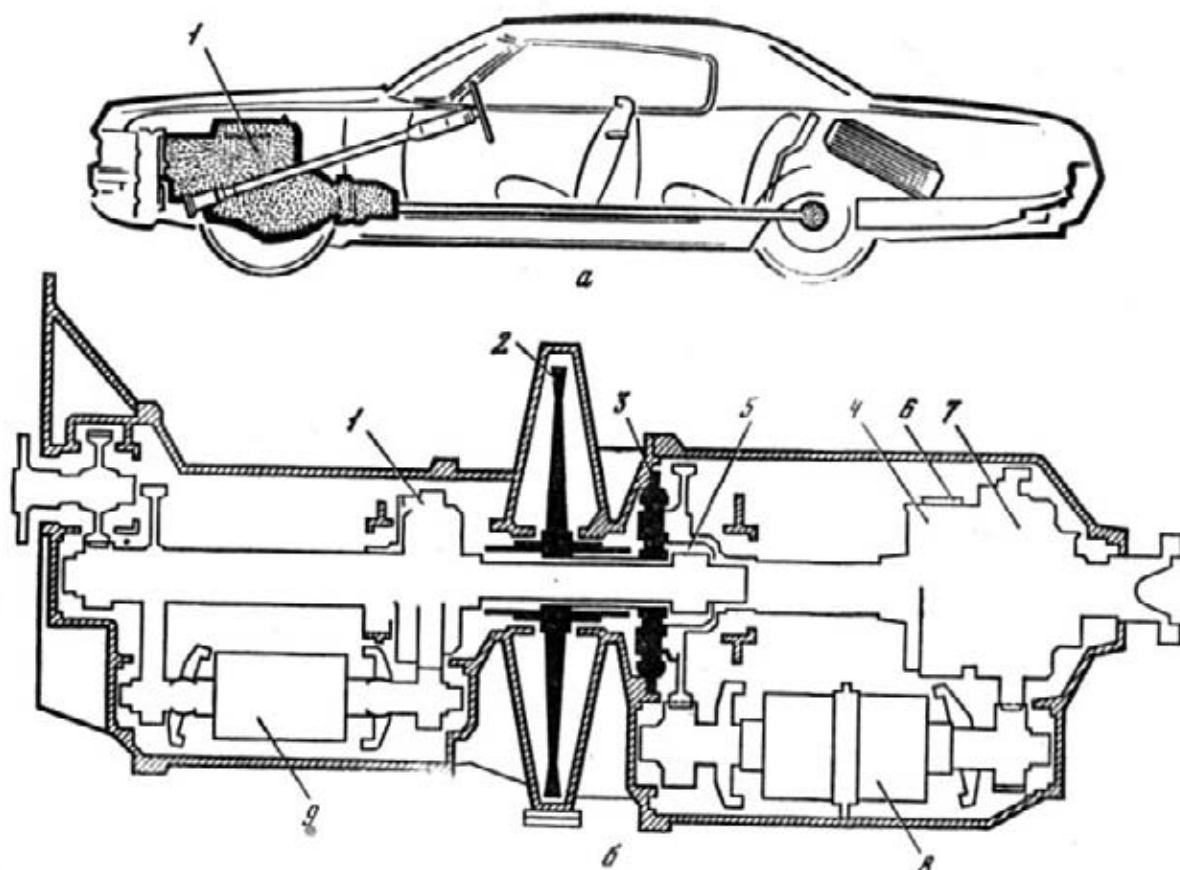
Основная идея управления гибридным силовым агрегатом состоит в регулировке двигателя внутреннего сгорания таким образом, чтобы суммарная кинетическая



Гибридные схемы силовых агрегатов с двигателем и маховиком

сверху — с единой трансмиссией (1 — двигатель, 2 — трансмиссия, 3 — маховик), снизу — с двойной (1 — двигатель, 2 — муфты и привод, 3 — маховик, 4 — трансмиссия)





Автомобиль с гибридным силовым агрегатом, смонтированным с двигателем внутреннего сгорания

*a* — компоновка маховичной части (1 — гибридный силовой агрегат), 6 — схема расположения маховичной части гибрида (1, 3 — планетарные редукторы, 2 — маховик, 4 — муфта движения, 5 — обгонная муфта, 6 — муфта реверса, 7 — дифференциал, 8 — гидростатический узел автомобиля, 9 — гидростатический узел двигателя)

энергия автомобиля и маховика поддерживалась на постоянном уровне.

Маховик в гибридном силовом агрегате можно установить с двойной трансмиссией и с единой, в последнем случае маховик и двигатель подключаются к ней параллельно и могут отключаться независимо. В случае двойной трансмиссии двигатель и маховик подключаются к трансмиссии автомобиля последовательно.

Анализ автомобильных трансмиссий — механической, электрической, гидрокинетической и гидростатической — показал, что для гибридных силовых агрегатов больше всего подходят электрическая и гидростатическая трансмиссии. Но более других подходит трансмиссия с так называемым разделением потока мощности (табл. 2), когда часть крутящего момента идет по механической передаче, а часть — по гидростатической. Для разделения и



Таблица 2

Данные по трансмиссиям разных типов для гибридной системы легкового автомобиля и городского автобуса

Трансмиссия	Легковой автомобиль				Городской автобус			
	Коэффи- циент эффektiv- ности *	Объем, дм³	Мас- са, кг	Стои- мость, долл.	Коэффи- циент эффektiv- ности *	Объем, дм³	Масса, кг	Стои- мость, долл.
Электрическая	0,588	120	220	640	0,6254	580	920	6088
	0,369	140	245	689	0,4267	600	950	6291
Гидростатическая	0,745	115	128	403	0,7681	720	870	3335
	0,626	130	132	469	0,6616	830	960	3900
С разделением мощности	1,0	130	142	261	1,000	900	1020	2205
	0,835	180	178	341	0,8495	1170	1330	2872

\* Коэффициент эффективности здесь зависит от регулируемости энергии и КПД; для лучшей трансмиссии он принят равным 1



последующего соединения потоков мощности служит дифференциальная передача. В последнее время такие трансмиссии очень популярны, особенно на грузовых автомобилях.

Анализ наиболее приемлемых для автомобилей карбюраторных и дизельных двигателей показал, что лучшим типом двигателя для гибридного силового агрегата является карбюраторный.

Все карбюраторные двигатели и лучшие дизельные в гибридной системе с маховиком удовлетворяют современным требованиям токсичности выхлопных газов. Вредные выделения этих же двигателей, работающих без маховичных агрегатов, во много раз превышают эти требования \*.

Представляет интерес компоновка гибридного силового агрегата на автомобиле. В автомобиле с маховиком, смонтированным вместе с двигателем, последний слегка передвинут вперед, чтобы компенсировать длину приводной трансмиссии маховика (сам двигатель в этом случае значительно меньше). У автомобиля с дифференцированным расположением маховичной части гибрида маховик в герметичном корпусе и его трансмиссия расположены в задней части самостоятельным упруго подвешенным узлом. При таком расположении силовому агрегату предоставляется больше места. Аналогично можно компоновать маховичную часть гибрида и на автобусах — в зависимости, конечно, от переднего или заднего расположения двигателя.

Видимо, скоро мы станем свидетелями широкого применения маховиков для гибридных схем и рекуперации механической энергии на транспортных машинах, и в первую очередь на городском транспорте, что положительно скажется на воздушном бассейне наших городов.

---

\* Кроме того, широкое применение маховиков в гибридных силовых агрегатах на транспорте даст огромную экономию нефти. Так, согласно планам американской администрации по исследованиям и разработкам в области энергетики (ЕРДА), городские автомобили и автобусы США, оснащенные гибридными силовыми агрегатами с маховиками, должны в конце 1980-х годов экономить 11,1—15,9 млн. м<sup>3</sup> нефти в год, к 1995 г. — 23 млн. м<sup>3</sup>, а к 2000 г. — 47,7—79,5 млн. м<sup>3</sup>, составляя 15% всего автомобильного парка страны.



## КАКОЙ АККУМУЛЯТОР ЛУЧШЕ?

(вместо заключения)

Хочу заранее предупредить, что этот вопрос так и останется без ответа: каждый аккумулятор энергии имеет какую-то свою наилучшую область применения. Автор может предложить лишь ориентировочные советы, где какой аккумулятор лучше использовать (советы годятся, конечно, не на все случаи жизни, да и рекомендации эти могут быстро устареть с появлением каких-либо новых источников энергии).

1. Для аварийных осветительных сетей, питания приборов и установок электроэнергией в течение длительного времени (свыше часа) и вообще, где нужна электроэнергия при достаточной компактности аккумулятора и длительном сроке консервации энергии, целесообразно применение того или иного (в зависимости от экономических соображений) типа электрохимического аккумулятора.

2. Для электромобилей, эксплуатируемых в городе, целесообразно использование гибридных схем, электрохимического и супермаховичного аккумуляторов.

3. Для рекуперации энергии торможения обычных автомобилей наиболее пригодны супермаховичные (они более компактны) или гидрогазовые (более просты и удобны в эксплуатации) аккумуляторы.

4. Для общественного городского транспорта типа автобусов, трамваев, поездов метро, а также внутризаводского транспорта наиболее перспективны супермаховичные аккумуляторы.

5. Для транспортных машин небольшого радиуса действия (внутризаводской, взрывобезопасный транспорт и др.) пригодны также комбинации газовых (гидрогазовых) аккумуляторов с тепловыми.

6. Для экологически безвредных систем сохранения и распределения энергии, а также для транспортных целей (в последнем случае совместно с маховиками для увели-



Таблица 3

Важнейшие показатели аккумуляторов энергии

Тип аккумулятора	Удельная энергоемкость, кДж/кг	Удельная мощность, Вт/кг	Долговечность при 75%-ной глубине разрядки (число циклов)
<i>Упругие аккумуляторы</i>			
стальные пружины	0,32	$>10^1$	$>10^7$
резиновые элементы	3,2	$\sim 80$	1 000—5 000
газовые (гидрогазовые)	28	$>10^4$	$>10^7$
<i>Электрохимические аккумуляторы</i>			
свинцово-кислотные	64	$\sim 80$	300—500
никель-кадмиевые	110	$\sim 80$	1 000—3 000
серебряно-цинковые	400	$\sim 150$	$\sim 1000$
серно-натриевые	600—800	$\sim 150$	—
топливный элемент при пятиминутной разрядке	15	$\sim 50$	—
топливный элемент при часовой разрядке	170	$\sim 45$	—
<i>Тепловой аккумулятор с двигателем Стирлинга</i>	8,5	—	—
<i>Маховичные аккумуляторы</i>			
стальной диск с отверстием	10	$>10^4$	$>10^5$
стальной диск равной прочности	120	$>10^4$	$>10^5$
ленточный супермаховик	120—150	$>10^4$	—
диск равной прочности из высококачественной легированной стали	200	$>10^4$	$>10^5$
перспективный супермаховик из специального стекловолокна	650	$>10^4$	—
перспективный супермаховик по Д. В. Рабенхорсту (проект)	1 750	$>10^4$	—
предполагаемые супермаховики из кварцевой нити прочностью 37 кН/мм <sup>2</sup> или монолитного термообработанного кварца прочностью 10 кН/мм <sup>2</sup>	$>5\,000$	$>10^4$	—
из алмазного волокна *	15 000	$>10^4$	—
из углерода плотноупакованной модификации	26 000	—	—
из плотноупакованного азота	60 000	—	—

\* В японском журнале «Денси гидзюцу сого кенкюдзё нхо» (1976, т. 40, № 10, 11) в обзорной статье по маховикам приводятся цифры плотности энергии супермаховиков: реально достигнутая — 178,6 Вт·ч/кг, теоретическая — 4200 Вт·ч/кг.



чения удельной мощности) и в ряде других случаев, где требуется длительное выделение электроэнергии, могут успешно применяться топливные элементы, в основном на водороде. Для накопления и использования экологически безвредной энергии пригодны и тепловые аккумуляторы плавления. Безусловно, везде, где энергию надо получить в виде тепловой, логика подсказывает применение тепловых аккумуляторов.

7. Для накопления энергии электростанций при их недогрузке (например, в ночное время) с выделением ее в часы пик в перспективе применимы батареи топливных элементов, гигантские маховичные, газовые и даже сверхпроводящие индуктивные аккумуляторы — тут все решают вопросы экономики. Пожалуй, наиболее компактными и надежными были бы супермаховичные аккумуляторы. В настоящее время для этих целей в основном строят гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС).

В табл. 3 приведены важнейшие показатели аккумуляторов — удельная энергоемкость, удельная мощность, а в некоторых случаях и долговечность — реальные и расчетные.

Некоторые авторы рассматривают как аккумулятирование энергии не только сжигание природного горючего, но и атомные, термоядерные реакции и даже аннигиляцию массы. У таких «аккумуляторов» получается гигантская удельная энергоемкость. Например, даже алкоголь (если считать его за аккумулятор энергии) может накопить 27 МДж, нефть — 40 МДж, а водород — 123 МДж в килограмме массы. Но эти огромные цифры поистине бледнеют, если речь заходит о воде как источнике аккумулятированной термоядерной энергии, литр которой в этом случае может заменить 500 л бензина. Вода тогда «накапливает» в себе  $1,8 \cdot 10^{10}$  Дж, а уран, рассматриваемый как аккумулятор энергии, —  $9 \cdot 10^{13}$  Дж на килограмм массы! А при аннигиляции массы (т. е. соединении вещества с антивеществом и превращении в энергию) в килограмме «уничтожающегося» вещества накапливается энергия в  $8,2 \cdot 10^{16}$  Дж! Однако пока это тема не для научно-популярной, а скорее, для научно-фантастической литературы.



## ЛИТЕРАТУРА

- Альтшулер В. М., Гуревич В. М. Лунные ритмы. Л.: Гидрометеопиздат, 1971, 255 с.
- Белявская М. И. Новые источники энергии. М.: Книга, 1976, 14 с.
- Гулиа Н. В. Маховичные двигатели. М.: Машиностроение, 1976, 163 с.
- Иванов В. Н. Автомобилизация и общество. М.: Знание, 1975, 63 с.
- Лидоренко Н., Мучник Г., Трушевский С. Аккумулирование плавлением.— Наука и жизнь, 1974, № 3.
- Лидоренко Н. С., Мучник Г. Ф. Экологическая энергетика.— Природа, 1974, № 9.
- Леонов Р. А. Загадка шаровой молнии. М.: Наука, 1965, 75 с.
- Отроша И. С., Сурин Е. И. Электромобили. М.: Информэлектро, 1969, 78 с.
- Патрунов Ф. Г. Использование криогенных температур. М.: Знание, 1975.
- Проблемы использования энергии маховика: Пер. с яп. М.: ВЦП, пер. № А-16926, А-16927, 1977.
- Семенов Н. Н. Энергетика будущего.— В кн.: Заглянем в будущее. М.: Знание, 1974.
- Строганов А., Эльшанский И. Чистое дыхание автомобиля. М.: Моск. рабочий, 1974, 85 с.
- Умаров Г. Д., Ершов А. А. Солнечная энергетика. М.: Знание, 1974, 62 с.
- Шишкин М., Антонов А. Сегодня и завтра геотермической энергетики.— В кн.: Земля и люди. М.: Знание, 1971.
- Эрдеи-Груз Т. Химические источники энергии. М.: Мир, 1974, 302 с.



<b>Энергетическое будущее человечества (вместо введения)</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>Глава I. Аккумуляторы электрической энергии</b> . .	<b>19</b>
Электрохимические аккумуляторы . . . . .	19
Электромобили . . . . .	37
Электростатические и электродинамические аккумуляторы . . . . .	41
Неразгаданная тайна шаровой молнии . .	46
<b>Глава II. Аккумуляторы механической энергии</b> . .	<b>52</b>
Статические механические аккумуляторы	52
Физические основы маховичных (динамических) аккумуляторов . . . . .	63
Маховичные аккумуляторы в технике . . .	90
Маховичные аккумуляторы и транспорт	104
Расчет маховиков на прочность . . . . .	118
<b>Глава III. Тепловые аккумуляторы</b> . . . . .	<b>124</b>
<b>Глава IV. Гибридные схемы с аккумуляторами энергии</b> . . . . .	<b>129</b>
«Симбиоз» аккумуляторов . . . . .	129
«Симбиоз» аккумуляторов и двигателей	132
<b>Какой аккумулятор лучше? (вместо заключения)</b> . . .	<b>147</b>
<b>Литература</b> . . . . .	<b>150</b>



**Нурбей Владимирович Гуляя**  
**НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ**

Утверждено к печати редколлегией серии  
научно-популярных изданий  
Академии наук СССР

Редактор издательства **Н. Б. Прокофьева**  
Художник **О. В. Куролентко**  
Художественный редактор **Н. А. Фильчагина**  
Технический редактор **Ф. М. Хенох**  
Корректор **Е. В. Шевченко**

**ИБ № 15349**

Сдано в набор 05.12.79.  
Подписано к печати 17.04.80  
Т-02595. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>  
Бумага типографская № 1  
Гарнитура обыкновенная  
Печать высокая  
Усл. печ. л. 7,9 Уч.-изд. л. 8,2  
Тираж 24500 экз. Тип. зак. 2587  
Цена 25 к.

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



25 к.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ  
КНИГА:

ДАВЫДОВА Л. Г., БУРЯК А. А.  
Энергетика: пути развития и  
перспективы. 10 л. 65 к.

В книге в историческом аспек-  
те рассматриваются проблемы  
недалекого прошлого и настоя-  
щего энергетики, ее перспекти-  
вы, показываются пути разви-  
тия основных направлений.  
Книга рассчитана на широкий  
круг читателей, интересующих-  
ся проблемами развития энер-  
гетики.

Заказы просим направлять по адресу:

МОСКВА В-164, Мичуринский про-  
спект 12, магазин «Книга — почтой»  
Центральной конторы «Академкнига»;  
ЛЕНИНГРАД П-110, Петрозаводская  
ул., 7, магазин «Книга — почтой»  
Северо-Западной конторы «Академ-

книга» или в ближайший магазин  
«Академкнига».

Адреса магазинов «Академкнига»:

480391 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97;  
370005 Баку, ул. Джапаридзе, 13;  
320005 Днепропетровск, проспект Гага-  
рина, 24; 734001 Душанбе, проспект Ле-  
нина, 95; 375009 Ереван, ул. Туманяна,  
31; 664033 Иркутск 33, ул. Лермон-  
това, 303; 252030 Киев, ул. Ленина,  
42; 277012 Кишинев, ул. Пушкина, 31;  
443002 Куйбышев, проспект Ленина, 2;  
192104 Ленинград Д-120, Литейный  
проспект, 57; 199164 Ленинград, Менде-  
леевская линия, 1; 199004 Ленинград,  
9 линия, 16; 103009 Москва, ул. Горь-  
кого, 8; 117312 Москва, ул. Вавилова,  
55/7; 630076 Новосибирск, Красный  
проспект, 51; 630090 Новосибирск,  
Академгородок, Морской проспект,  
22; 700029 Ташкент, Л-29, ул. Ленина,  
73; 700100 Ташкент, ул. Шота Руста-  
вели, 43; 634050 Томск, наб. реки  
Ушайки, 18; 450075 Уфа, Коммунисти-  
ческая ул., 49; 450075 Уфа, проспект  
Октября, 129; 720001 Фрунзе, бульвар  
Дзержинского, 42; 310003 Харьков,  
Уфимский пер., 4/6.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»