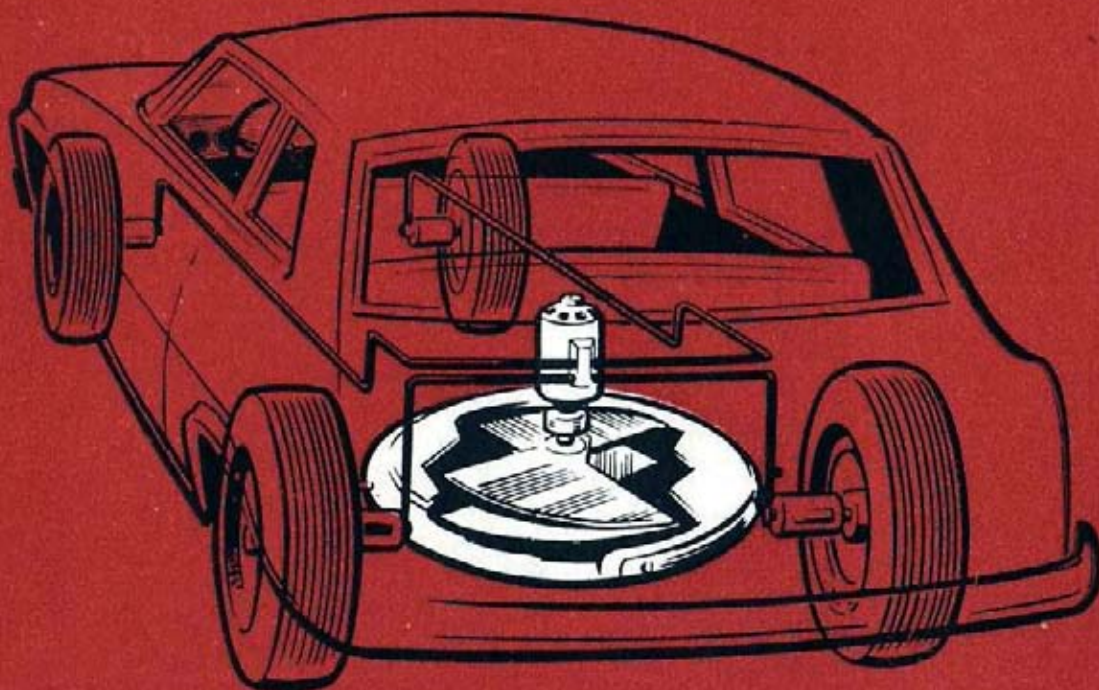


Н. В. Г У Л И А

# ИНЕРЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ



Н. В. ГУЛИА

# ИНЕРЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ



Москва «Транспорт» 1974

УДК 621.086 : 629.113

**Инерционные двигатели для автомобилей.** Гу-  
лиа Н. В. Изд-во «Транспорт», 1974, стр. 1—64.

В книге описаны современные системы и устрой-  
ства для приведения в движение автомобилей энергией  
инерционных двигателей — маховиков с соответствующей  
трансмиссией. Эти двигатели, отличающиеся высокой  
экономичностью, а главное полным отсутствием вред-  
ных выделений при работе, весьма перспективны для  
городских автомобилей. Описаны также новейшие кон-  
струкции маховиков инерционных двигателей — супер-  
маховиков, изготовленных из нитевидных или ленточ-  
ных высоко- и сверхпрочных материалов, которые,  
помимо весьма высокой удельной энергоемкости, по-  
зволяют преодолеть основной недостаток обычных ма-  
ховиков — опасность случайного разрыва; разрушение  
супермаховиков, изготовленных из волокнистых мате-  
риалов и особенно из легит, совершенно безопасно.

При создании книги использовались как совре-  
менные зарубежные материалы исследований (за ис-  
ключением данных по гиробусу Эрликон), часть из  
которых завершена только в 1971 г. и еще не опублико-  
валась в периодической печати, так и отечественные  
материалы, главным образом исследования автора.

Книга рассчитана на широкий круг инженерно-  
технических и научных работников, студентов, изобретателей и рационализаторов. Рис. 26, табл. 8,  
библ. 45.

Г  $\frac{31803-045}{049(01) - 74}$  45-74



## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время необычайно возрос интерес автомобилистов всего мира к аккумуляторным силовым агрегатам. Этот интерес появился не случайно — он вызван насущными потребностями жителей нашей планеты, в первую очередь потребностью дышать чистым воздухом.

Сегодня свыше 200 млн. автомобилей во всем мире непрерывно выбрасывают в нижние, наиболее ценные для нас, слои атмосферы громадные количества окиси углерода, соединений свинца, окиси азота и других крайне опасных для жизни веществ.

Наиболее плачевно положение жителей крупных, насыщенных автотранспортом городов. Так, почти четыре миллиона автомобилей, эксплуатируемых в Лос-Анжелесе, ежедневно выбрасывают в атмосферу города около 10 тыс. т окиси углерода, 2 тыс. т углеводородов, 530 т окиси азота и много других вредных для организма человека веществ.

Удушливый туман, нависающий над крупным городом, постоянно отравляет население, способствует бурному развитию опасных заболеваний — эмфиземы и рака легких, бронхитов, астмы, заболеваний глаз, а также многочисленных отравлений. Каждый год погибает немало людей, случайно или по халатности отравленных отработавшими газами в закрытом гараже или автомобиле.

От отработавших газов автомобилей страдают не только люди — они не щадят ни растения, ни животных. Убыток сельского хозяйства от загрязнения воздуха только в США



оценивается сотнями миллионов долларов в год. А как выразить в деньгах потерянное человеческое здоровье и жизни?

Известный английский ученый профессор Сэттон в своей книге «Вызов атмосферы» сравнивает выброс ядовитых и зловонных продуктов сгорания в атмосферу с выбросом сточных вод и помоев на улицы средневековых городов.

Американский метеоролог Нейбергер с ужасом пишет, что с увеличением числа автомобилей удушливый туман, пропитанный дымом и копотью, окутает всю землю и цивилизация исчезнет.

В городах СССР загрязнение атмосферы отработавшими газами автомобилей намного меньше. Однако планируемое к 1980 г. резкое увеличение выпуска автомобилей ставит вопросы предупреждения загрязнения атмосферы отработавшими газами в число первоочередных.

Одно из двух: или люди сделают так, что в воздухе станет меньше дыма, или дым сделает так, что на земле станет меньше людей — так характеризует сегодняшнее положение известный американский ученый Л. Баттан.

Отработавшие газы — не единственный недостаток двигателей внутреннего сгорания. Шум при работе автомобильного двигателя, низкий его к. п. д., дефицитность топлива, потребление кислорода воздуха — все это характеризует двигатель внутреннего сгорания, как силовой агрегат автомобиля, особенно эксплуатируемого в городе, с отрицательной стороны. А поэтому надо признать, что двигатель внутреннего сгорания, являвшийся двигателем прогресса и в свое время совершивший так много для нас хорошего, безнадежно морально устаревает. Несомненно, он еще десятилетия послужит людям, будет постоянно совершенствоваться, но уже сейчас пора подумать, чем в будущем заменить двигатель на автомобиле, чтобы не так сильно ощущать недостаток в этом мощном, компактном и практичном силовом агрегате.

Не останавливаясь на паллиативных решениях, надо признать, что, пожалуй, только аккумуляторный силовой агрегат может в полной мере обеспечить отсутствие вредных выбросов в атмосферу. Аккумуляторы заряжаются от мощных стационарных источников энергии, которые или практически не отравляют атмосферу (ГЭС, АЭС), или



очистку продуктов выброса которых неизмеримо легче контролировать, чем у двигателей внутреннего сгорания.

Основные современные разработки аккумуляторных силовых агрегатов для автомобилей базируются на электрохимических батареях с электродвигателями.

Однако, несмотря на огромные силы и средства, затраченные во всем мире на создание эффективных электромобилей — автомобилей с электрическим аккумуляторным силовым агрегатом, конкурентоспособной конструкции по сравнению с автомобилем с двигателем внутреннего сгорания еще не создано. Электрические аккумуляторы не могут в полной мере обеспечить автомобиль необходимой удельной мощностью, а продолжительность зарядки их очень велика.

Частые торможения и разгоны в городе значительно сокращают и без того небольшой пробег электромобиля и среднюю его скорость. Кроме того, незначительные газовыделения большинства электрохимических аккумуляторов при широком их распространении могут увеличиться до таких количеств, что со временем встанут те же проблемы, если не учитывать еще небезопасное обращение с электролитом.

Между тем уже более ста лет назад инж. В. И. Шуберский предложил использовать для движения экипажа инерционный аккумулятор — маховик, обладающий огромными потенциальными возможностями в качестве двигателя автомобиля. Маховик способен выделять огромную, практически неограниченную удельную мощность, столь необходимую для двигателя автомобиля, а срок зарядки (раскрутки) маховика может быть как угодно мал. Маховик накапливает и выделяет энергию в виде механической, именно такой, какая и нужна автомобилю для движения; срок консервации этой энергии в современных маховиках достаточно велик — более недели. Способность к эффективной рекуперации энергии при спусках и торможениях позволяет экономично использовать накопленную в маховике энергию. Маховик чрезвычайно долговечен, совершенно не выделяет никаких побочных продуктов, может стабилизировать кузов автомобиля. Инерционный аккумулятор может прекрасно дополнять двигатели внутреннего сгорания и электроаккумуляторные силовые агрегаты в так называемых «гибридных» схемах, значительно повышая эффективность силового агрегата автомобиля.



Следует отметить, что инерционные двигатели как самостоятельные, так и в «гибридных» схемах, значительно повышают экономичность автомобиля. Стоимость километра пробега автомобиля с инерционным двигателем значительно меньше, чем с любым другим типом автономного силового агрегата, в том числе и электроаккумуляторным. Инерционный двигатель в «гибридной» схеме с двигателем внутреннего сгорания позволяет более чем вдвое снизить расход топлива, повышая в то же время динамические качества автомобиля. Таким образом, сохраняя чистоту атмосферы, инерционный двигатель сохраняет нам и дефицитное топливо, запасы которого на Земле не исчерпаемы.

Долгое время существенные недостатки маховика — в основном низкая удельная энергоемкость и громадная опасность разрыва — тормозили применение инерционных двигателей для автомобилей. Современное же развитие науки и техники подготовило хорошую почву для радикального увеличения полезных свойств маховика, ставшего в самые последние годы вполне конкурентоспособным с электроаккумуляторами, а по ряду показателей и существенно превышающим их — в качестве основного двигателя аккумуляторного автомобиля.

## САМОСТОЯТЕЛЬНЫЕ ИНЕРЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

### ГИРОТРАНСПОРТ

История маховика насчитывает около пяти тысяч лет. Это один из самых древнейших механизмов на Земле.

Первый известный нам маховик откопал знаменитый археолог Леонард Вулли в 1929 г. в могильнике близ города Ур, который был расположен в Месопотамии в низовьях реки Евфрат (современный Ирак). Этот маховик представлял собой массивный диск из обожженной глины около метра в диаметре с большим отверстием в центре и поменьше близ периферии. При помощи подобных дисков в древности изготавливали гончарные изделия. При этом рабы или сам мастер непрерывно вращали диск — гончарный круг. Однако наличие небольшого отверстия близ периферии для рукоятки убеждает в том, что этот гончарный круг не подвергался непрерывному вращению. Запас кинетической энергии, обеспечивающей вращение массивного диска во время обработки изделия, поддерживается периодическим дерганием за рукоятку диска.

Прошло почти пять тысяч лет, и в 1860 г. наш соотечественник инж. В. И. Шуберский предложил использовать маховик для приведения в движение экипаж, названный им «маховозом».

В 1905 г. англичанин Ланчестер получил патент № 7949 на изобретение, имеющее отношение к «... применению для механического движения мотора в форме тяжелого, быстровращающегося маховика, с целью приведения в движение моторного экипажа» [34].

Колеса экипажа Ланчестера соединялись любой механической передачей с маховиком или даже с системой из двух маховиков, вращающихся в противоположные сторо-



ны, чтобы устранить действие вредного для экипажа гироскопического эффекта. Для разгона маховика на остановках экипажа он соединялся через вариатор с валом стационарного двигателя. Предусмотрел Ланчестер и разгон маховика встроенным электродвигателем, который подсоединялся на остановках к электрической сети.

В 1918 г. выдающимся русским изобретателем-самоучкой А. Г. Уфимцевым был запатентован созданный им инерционный аккумулятор.

В 20-х годах А. Г. Уфимцев предложил использовать маховик для приведения в движение городского транспортного средства в своем родном городе Курске. Раскручивать маховик А. Г. Уфимцев предлагал от электросети или при помощи ветродвигателя на остановках. Надо сказать, что А. Г. Уфимцев внес выдающийся вклад в дело создания инерционных аккумуляторов, намного опередив лучшие зарубежные конструкции. Один из вариантов инерционного аккумулятора А. Г. Уфимцева (патент 2290) показан на рис. 1.

Маховик аккумулятора, помещенный в вакуумную камеру для устранения потерь на трение о воздух, разгонялся электродвигателем, подключенным к сети. Затем после отключения от сети и подключения к приемнику энергии (например, электролампе) электродвигатель, работая в режиме генератора, выделял энергию маховика в виде электрического тока. Маховики А. Г. Уфимцева были очень эффективными аккумуляторами энергии для того времени. Изобретатель одним из первых применил для маховиков

диски равной прочности, вакуумную камеру вращения, гибкий подвес.

Эпоха современных инерционных двигателей для автомобилей начинается с работ швейцарской фирмы «Эрликон» над созданием маховичного автобуса — гиробуса, начало которых относится к 1945 г. В 1953 г. фирмой была выпущена серия в количестве 17 таких гиробусов, которые курсировали в Швей-

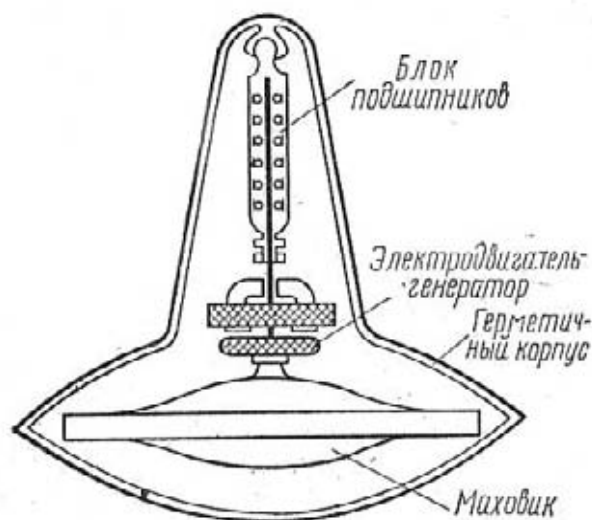


Рис. 1. Инерционный аккумулятор А. Г. Уфимцева



царии, а также в Бельгийском Конго (Киншаса) на трассах протяженностью от 4,5 до 7,7 км (рис. 2).

При изготовлении образцов этого вида транспорта фирме пришлось решать многие проблемы. К основным проблемам относились максимальное уменьшение потерь на трение при вращении маховика, обеспечение высоких динамических показателей гиробуса, а также создание простой и надежной электромеханической передачи между маховиком и ведущими колесами гиробуса.

Потери на трение в основном являются вентиляционными потерями и зависят от окружной скорости и поверхности вращающегося маховика, расстояния между маховиком и корпусом, а также от плотности и характера движения среды, в которой находится вращающийся маховик.

Эффективным средством уменьшения потерь на трение является уменьшение окружной скорости. Однако при этом для сохранения необходимой величины накапливаемой энергии потребовалось бы значительно увеличить массу маховика. Поэтому более целесообразным является помещение маховика в корпус, заполненный водородом, который в 14,4 раза легче воздуха, а коэффициент теплопередачи которого в 1,7 раза больше, чем у воздуха. Уменьшение потерь становится еще более ощутимым, если в корпусе маховика, заполненном водородом, создать предварительный вакуум. Применение водорода не только значительно снижает вентиляционные потери, но также способствует эффективному охлаждению отдельных частей электромаховичного агрегата. Расчетная мощность потерь на вращение маховика в такой среде около 2 л. с.

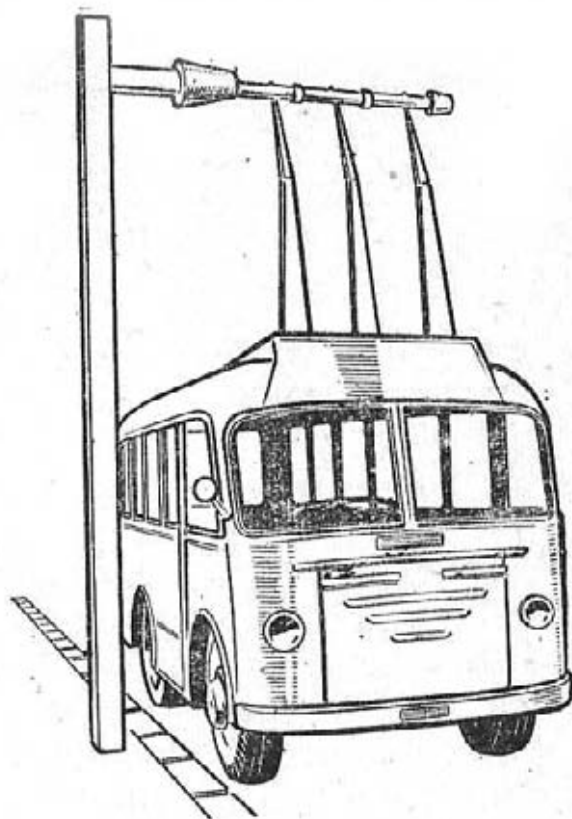


Рис. 2. Гиробус швейцарской машиностроительной фирмы «Эрликон» в процессе зарядки — раскрутки маховика



Расчеты, а также экспериментальная проверка показали, что устойчивость движения гиробуса будет достаточно высокой, если будут выдержаны следующие соотношения:

$$a = 8b; \quad a + b = 0,6l; \quad ab = 1,1 \frac{I_{\theta}}{M_{\theta}},$$

где  $a$  и  $b$  — соответственно расстояния от центра тяжести гиробуса до передней и задней оси;

$l$  — длина гиробуса;

$I_{\theta}$  — момент инерции поддресорных масс;

$M_{\theta}$  — масса поддресорных частей гиробуса.

Такие условия центровки вызваны наличием в конструкции гиробуса массивного электромаховичного агрегата, вызывающего дополнительные нагрузки на подвеску и колеса при колебаниях шасси.

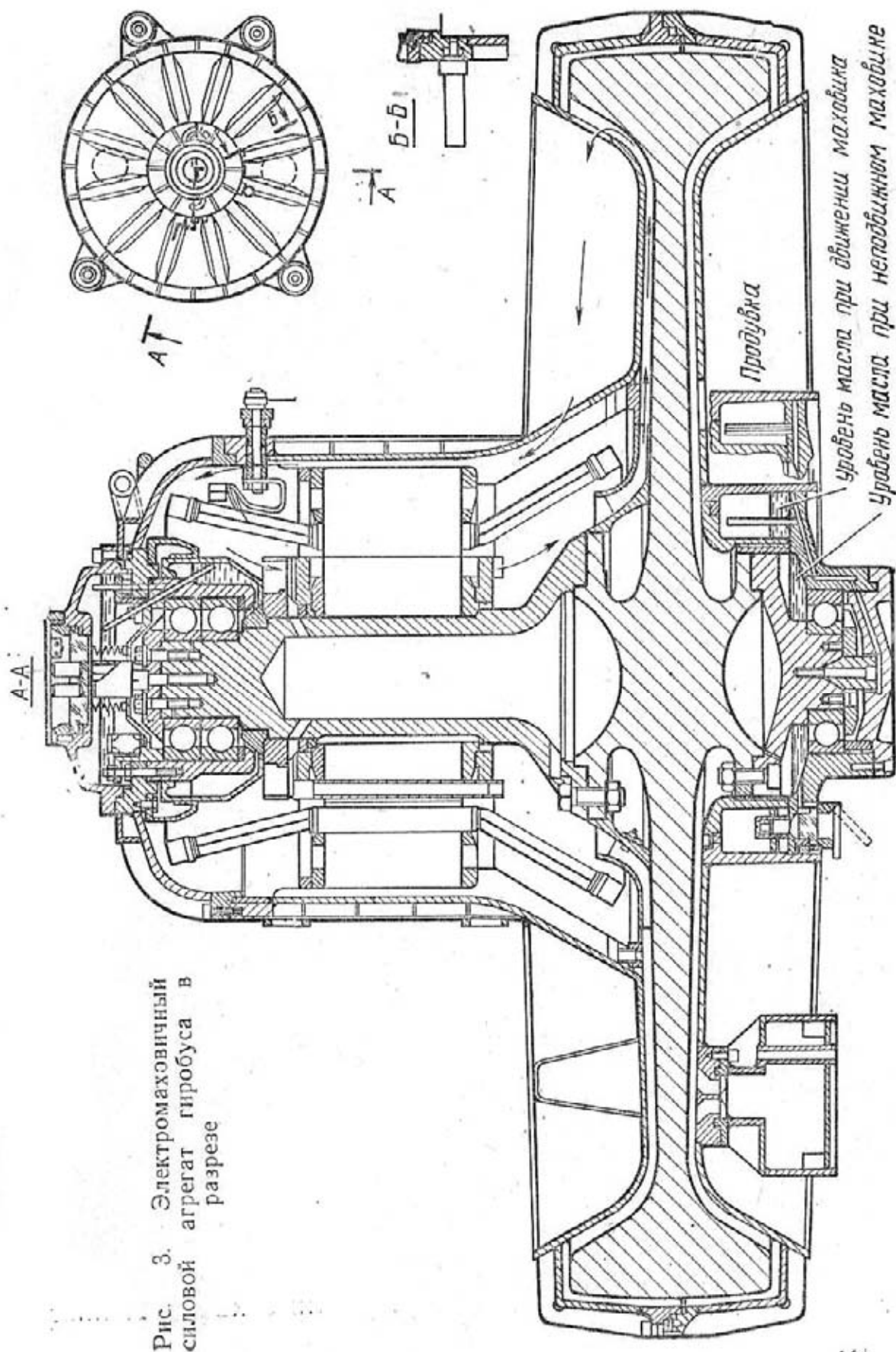
Было также установлено, что комфортабельность езды в гиробусе, помимо прочего, как и на обычных автобусах, обеспечивается при жесткости пружин передних колес в 1,26 раза больше жесткости пружин (рессор) задних колес. При этом частота вертикальных колебаний не превышает 90 колебаний в минуту.

При угловых перемещениях гиробуса и связанного с ним электромаховичного агрегата возникает прецессия — вынужденное движение маховика. В результате появляется дополнительный, так называемый гироскопический момент, который, как показали расчеты, может достигать 80—90 кгс·м. Этот момент, а также свободные колебания гиробуса относительно горизонтальной оси могут вызвать значительную нагруженность пружин подвески и подшипников трансмиссии. В связи с этим было установлено, что электромаховичный агрегат необходимо устанавливать 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 электромаховичного агрегата.

Вес гиробуса образца 1953 г. составлял 11 т без нагрузки и 16 т с полной нагрузкой. Он был рассчитан на перевозку 70 пассажиров.

Электромаховичный агрегат (рис. 3) устанавливался в центральной части гиробуса под одним из спаренных сидений.





Маховик, установленный на этом гиروبусе, имел диаметр 1626 мм и массу 1,5 т. Он был отлит из хромоникель-молибденового сплава и непосредственно соединялся с валом короткозамкнутого электродвигателя. Электромаховичный агрегат был заключен в герметичный корпус, заполненный водородом. Давление в корпусе равнялось  $0,7 \text{ кгс/см}^2$ . Конфигурация маховика при минимальной массе и максимально допустимой скорости вращения обеспечивала накопление необходимой энергии. В то же время при максимальной скорости 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.

Вал собранного электромаховичного агрегата устанавливался в трех подшипниках, один из которых, радиально-упорный, служил для восприятия осевых нагрузок. Интенсивная циркуляция водорода в корпусе обеспечивалась вентиляционным напором, который создавался вращающимся маховиком, а также центробежной крыльчаткой, укрепленной на валу агрегата. Для улучшения охлаждения ротора электродвигателя-генератора, а также облегчения циркуляции водорода через агрегат стержни короткозамкнутого ротора были выполнены полыми. Для уменьшения вентиляционных потерь корпус маховика имел обтекаемую форму, а отношение ширины к диаметру составляло всего 0,0175.

Для дополнительного охлаждения узлов электромаховичного агрегата в конструкцию была введена жидкостная система, состоящая из охлаждающей рубашки, радиатора и электровентилятора (скорость вращения 1500 об/мин).

Влага, которая могла проникнуть в агрегат во время сборки, поглощалась силикагелем, размещавшимся в двух небольших баллонах, смонтированных в агрегате.

Масса полностью собранного агрегата составляла 2,9 т. Агрегат монтировался на шасси на четырех упругих подвесках, представляющих собой резиновые блоки с размещенными в них спиральными стальными пружинами. Подвески были выполнены достаточно упругими и располагались в плоскости, проходящей через центр тяжести агрегата.

При разгоне маховика до 3000 об/мин накапливаемая им энергия составляла  $3,3 \cdot 10^6 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ , или 9 кВт·ч. Полное



время вращения маховика с 3000 об/мин до остановки (выбег) составляло 12 ч.

Действительные потери в электромаховичном агрегате с учетом потерь на трение в подшипниках были примерно в 3 раза больше потерь, полученных расчетным путем, и составляли 6 л. с. при 3000 об/мин. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что в расчетах рассматривались только потери при вращении маховика — диска. При этом не были учтены потери, вызванные вращением ротора генератора и сложной конфигурацией маховика.

Характеристика разгона маховика была такова, что при увеличении скорости с 2000 до 2925 об/мин нарастание скорости вращения маховика было прямо пропорционально времени зарядки. Степень зарядки в пределах рабочей скорости вращения маховика (2000—2920 об/мин) составляла 1 кВт·ч за 20 с.

Электроагрегаты гиробуса питались от городской сети трехфазного тока напряжением 500 В с частотой 50 Гц. Для ограничения максимальных значений величин силы тока до 350 А в электрическую цепь включались последовательно резистор и параллельно конденсаторы, что улучшало характеристику крутящего момента и разгона гиробуса. Ночью на стоянке установка заряжалась от трехфазного тока напряжением 220 В, причем скорость вращения маховика можно было доводить от 0 до 2500 об/мин за 25 мин. Окончательная зарядка и доведение скорости 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. Частотная и магнитная характеристики зависели от числа оборотов маховика.

Напряжение, питающее электродвигатель-генератор, регулировалось изменением величин емкостного сопротивления, включенного в цепь, что и обуславливало изменение величины крутящего момента. Величина напряжения регулировалась при помощи рычага регулятора напряжения, располагавшегося на рулевой колонке. Максимально допустимая величина напряжения ограничивалась специальным устройством.

Тяговый агрегат гиробуса состоял из трех тяговых электродвигателей с короткозамкнутыми роторами мощностью 73,6 кВт. Валы электродвигателей соединялись последова-



тельно между собой через одноступенчатые редукторы с передаточными числами 1,34 : 1.

Каждый электродвигатель имел две скорости вращения, что обеспечивало гиробусу шесть скоростей движения от 10 до 50 км/ч (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Номер работающего электродвигателя	Скорость гиробуса, км/ч, при включении		
	2 полюсов	4 полюсов	8 полюсов
1	50	25	—
2	40	—	10
3	32	16	—

Скорость вращения ротора электродвигателей тягового агрегата изменялась в зависимости от количества включенных полюсов, а также от схемы включения обмоток статора (треугольник, звезда, двойная звезда). В процессе пуска и эксплуатации всегда работал только один из трех тяговых двигателей.

Для уменьшения скорости и остановки гиробуса использовалось рекуперативное торможение, позволявшее увеличивать интервал между зарядками, а также значительно уменьшать износ тормозов.

Для освещения и питания приборов управления и сигнализации использовалась аккумуляторная батарея напряжением 12 В, которая заряжалась либо во время езды от электродвигателя-генератора, приводимого во вращение ременной передачей от тягового двигателя, либо на зарядной станции при помощи выпрямителей. Сжатый воздух для тормозной системы подавался в баллоны компрессором, приводимым в действие электродвигателем во время стоянки гиробуса у питающей станции. Ведущие оси приводились во вращение от электродвигателей тягового агрегата посредством карданного вала.

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 и включали основной электромагнитный выключатель питания. В таком состоянии и представлен гиробус на рис. 2.



Стоимость каждого пункта зарядки даже при наличии понижающего трансформатора составляла всего 20% стоимости 1 км воздушной контактной сети троллейбуса. Указанное обстоятельство, а также небольшие затраты при эксплуатации и ремонте гиробуса являются основными преимуществами этого вида транспорта, несмотря на то что первоначальные затраты на производство гиробуса больше, чем на производство троллейбуса таких же размеров. Суммарный к. п. д. гиробуса составлял 50%.

Было установлено, что при четырех 10-секундных остановках за пробег, равный 1,6 км, средняя скорость гиробуса составляла 22,5 км/ч.

Техническая скорость гиробуса на 10% меньше, чем у троллейбуса. Это вызвано главным образом дополнительными затратами времени на подзарядку электромаховичного агрегата. При средней скорости гиробуса 22,5 км/ч время, затрачиваемое на зарядку электромаховичного агрегата, составляло около 6,5 с на 1 км пути.

На протяжении 8 км без остановок и подъемов скорость вращения маховика снижалась с 2950 до 1800 об/мин. Однако в реальных условиях движения отдаваемая маховиком энергия (5,5 кВт·ч) при указанном снижении числа оборотов обеспечивала пробег 2,5 км. Таким образом, максимально допустимый интервал между зарядными станциями определяется допустимой величиной потери накопленной энергии, т. е. снижением скорости вращения маховика и, значит, уменьшением максимальной скорости гиробуса.

Наиболее целесообразной является эксплуатация этого вида транспорта на дорогах с ровным профилем и незначительным движением, а также при относительно редких остановках.

Подстанции для зарядки рекомендуется располагать через 1,2—2 км, что позволяет в течение 40 с восстановить запас энергии для последующего движения. Например, в Ивердоне (Швейцария) протяженность маршрута 4,5 км. Подстанции установлены на конечных остановках, и одна, промежуточная, — на линии. Остановки в среднем расположены через 400 м, а расход энергии составляет 2,2 кВт·ч на 1 км пути.

Наибольшей экономичности достигли гиробусы в бывшем г. Леопольдвиле (Киншаса — Конго), где расход энергии составил всего 1,5 кВт·ч/км. Это достигнуто увеличением



расстояния между остановками до 1 км при среднем расстоянии между зарядными станциями около 2 км.

Отделением фирмы «Локхид» (США) создана аккумуляторная установка, предназначенная для использования на гиротроллейбусах в городе Сан-Франциске [32]. Установка содержит маховик весом 314 кг с вертикальной осью вращения, выполненный из термообработанной стали и имеющий гиперболический профиль. Маховик вращается в герметически закрытом корпусе, откуда насосом откачивается воздух. На оси маховика установлен электродвигатель-генератор. Установка размещается под полом гиротроллейбуса (рис. 4) и имеет диаметр 1140 мм и высоту 570 мм. При питании троллейбуса от основной электросети маховик разгоняется до скорости 20 000 об/мин. Кинетическая энергия, запасенная маховиком, достаточна для движения гиротроллейбуса с опущенными штангами на расстояние 9,6 км. К концу этого пробега скорость вращения маховика составляет примерно 10 000 об/мин. Считается, что эта установка будет более рентабельной, чем применявшаяся в Швейцарии фирмой «Эрликон», поскольку аккумулятор может подзаряжаться на ходу, а в самой установке уменьшены потери мощности. В ближайшие годы предпо-

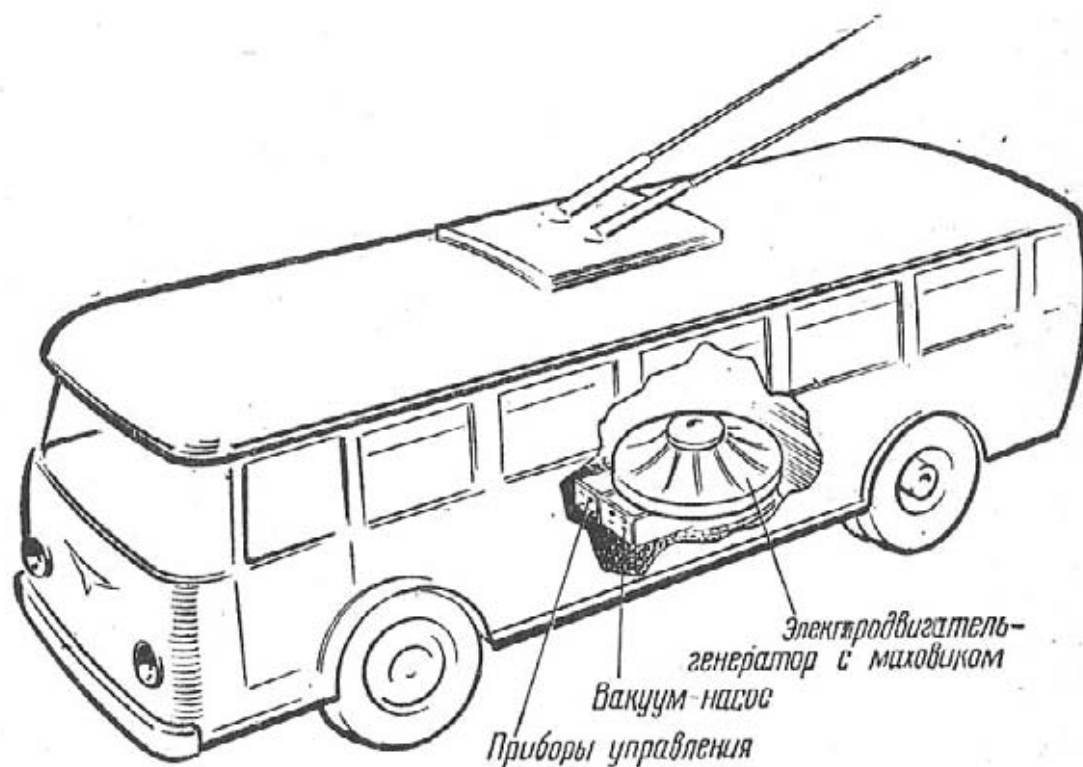


Рис. 4. Гиротроллейбус фирмы «Локхид», курсирующий в Сан-Франциске



лагается выпустить еще 350 гиротроллейбусов с электромаховичными силовыми агрегатами. Электромаховичный агрегат гиротроллейбуса показан на рис. 5.

Одним из основных вопросов, возникающих при конструировании гиробусов, является вопрос воздействия гироскопического эффекта на их ходовые свойства. Маховик обладает свойством сохранять свое начальное положение. Если отклонить его ось вперед, то он будет стремиться отклониться в сторону.

При отклонении его оси в определенной плоскости с угловой скоростью  $\omega_2$  в другой плоскости, расположенной под углом  $90^\circ$  к первой, возникает крутящий момент, равный  $M = I\omega_1\omega_2$ , где  $I$  — момент инерции маховика,  $\text{кгс}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ ;  $\omega_1$  — угловая скорость вращающегося маховика. Если же гироскоп перемещается в плоскости вращения и если гиробус поворачивается без наклона оси гироскопа, то это движение не приводит к возникновению каких-либо гироскопических сил. Поэтому гироскоп несколько не затрудняет управлять гиробусом, так как ось гироскопа при езде перемещается только параллельно самой себе. Возникает вопрос, какое действие оказывает гироскоп (в данном случае вращающийся маховик) на кузов и шасси гиробуса, когда последний берет, например, резкий подъем?

Для ответа на этот вопрос примем следующие очень неблагоприятные условия:

гиробус въезжает с обычной для городского движения скоростью 36 км/ч (10 м/с) на подъем, равный 10%, без переходного закругления (рис. 6);

гироскоп закреплен в кузове жестко (в действительности же он подвешен упруго), и кузов соединен с колесами не через упругую подвеску, а жестко. При уклоне пути с отношением 1 : 10, базе колес 5 м и скорости движения гиробуса 10 м/с последний, а вместе с ним и ось гироскопа поворачивается с угловой скоростью  $\omega_2 = 0,2 \text{ с}^{-1}$ . В нашем случае  $I = 60 \text{ кгс}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ ,  $\omega_1 = 300 \text{ с}^{-1}$ . Крутящий момент, которым гироскоп «реагирует» на поворот его оси, составит  $M = I\omega_1\omega_2 = 60 \cdot 300 \cdot 0,2 = 3600 \text{ кгс}\cdot\text{м}$ .

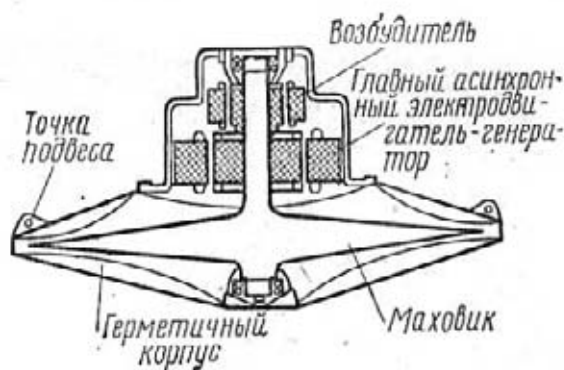


Рис. 5. Электромаховичный силовой агрегат гиротроллейбуса фирмы «Локхид»



При ширине колеи 1,8 м возникает добавочное усилие, приложенное к колесам, расположенным с одной стороны кузова, например  $K_1$  (см. рис. 6), равное  $3600 : 1,8 = 2000$  кгс; на другой стороне  $K_2$  возникает такое же усилие, но противоположно направленное. При массе грузового гиробуса 13 000 кг реакция на одной стороне гиробуса (на передние и задние колеса вместе) будет  $13\,000 : 2 = 6500$  кгс. Эта реакция увеличивается на одной стороне и снижается на другой и будет составлять соответственно 8500 и 4500 кгс. Это изменение величины реакции на 30% было бы вполне безопасно для гиробуса. При расчете были намеренно взяты неблагоприятные допущения, чтобы показать, что гироскоп даже при таких условиях не вызывает существенно вредного воздействия на гиробус.

В действительности же это изменение будет гораздо меньше по следующим соображениям.

Если принять во внимание, что на дорогах практически не встречается резких подъемов и гироскоп подвешен к раме упруго, а кроме того, колеса подвешены на упругих рессорах и снабжены упругими пневматическими шинами, то окажется, что одностороннее повышение давления на колесе в действительности составит не более 5—10%. Вследствие поддрессирования ось гироскопа не будет отклоняться так быстро, как было принято в расчете.

Наклоны кузова в поперечном направлении сопровождаются возникновением реактивного момента относительно поперечной оси; однако это имеет еще меньшее значение, так как возникающий крутящий момент при довольно большой базе между осями вызывает лишь небольшие дополнительные усилия на них. Дорожные испытания в трудных условиях (подъем до 20%, езда по снегу и при гололеде) подтвердили, что маховик не оказывает неблагоприятного влияния на ходовые свойства гиробуса.

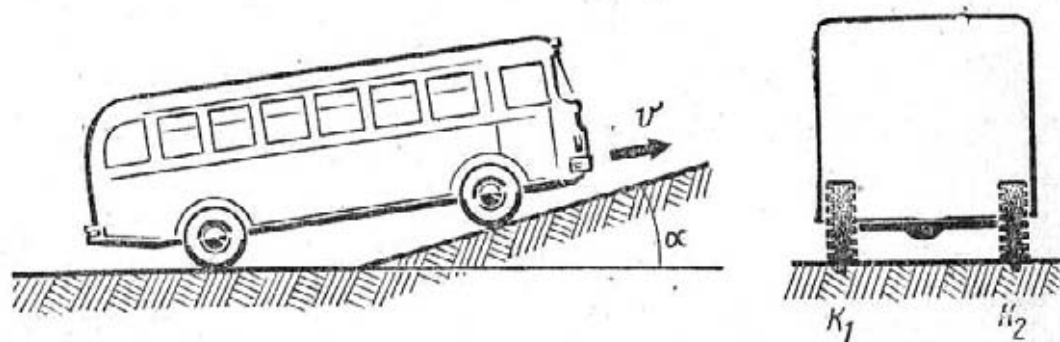


Рис. 6. Схема к определению гироскопических воздействий маховика на движущийся гиробус



Чрезвычайно интересные и перспективные работы по созданию маховичного силового агрегата были недавно проведены лабораторией прикладной физики университета им. Дж. Гопкинса (США). На основе разработанных там под руководством д-ра Д. В. Рабенхорста так называемых «супермаховиков» (о которых речь будет ниже) в США предполагается создание не только силовых агрегатов для автобусов и легковых автомобилей, но и для самолетов, подводных лодок, космических систем и пр. Перспективные супермаховики, по данным Д. В. Рабенхорста, более чем вдвое превышают по энергетическим показателям лучшие электрические аккумуляторы и гораздо эффективнее их по удельной мощности (мощности на единицу веса) и по продолжительности зарядки.

Вполне вероятно, что городской автобус явится первым «потребителем» супермаховиков, так как ярко выраженный циклический характер работы, частые перегрузки силового агрегата и торможения создают неблагоприятные условия для работы электроаккумуляторных силовых агрегатов на автобусах. При этом если гиробусы фирм «Эрликон» и «Локхид» проходили между зарядками путь всего в несколько остановок (до 10 км), то установка на них супермаховичных агрегатов позволила бы пройти весь путь от одной конечной остановки до другой без подзарядки. Это, по единодушному мнению специалистов, качественно изменило бы гиробусы, пока еще привязанные к определенному маршруту, и, безусловно, обеспечило бы «зеленую улицу» этому виду транспорта.

Кроме того, Д. В. Рабенхорст предлагает снабдить гиробус супермаховиком повышенных размеров, чтобы он смог работать без подзарядки весь день. В этом случае гиробусы можно было бы заряжать ночью, когда стоимость электроэнергии минимальна<sup>1</sup>.

Большим преимуществом гиробусов по сравнению с автобусами является то, что они совершенно не загрязняют атмосферу, бесшумны, имеют плавный ход и экономичны — энергия для пробега 100 км пути, по данным Д. В. Рабенхорста, стоила бы около 2,5 долл.

Однако наибольший интерес представляет оригинальный проект маленького городского легкового автомобиля

<sup>1</sup> По мнению автора данной брошюры, зарядка гиробусов на конечных станциях по целому ряду причин эффективнее одной зарядки в день, связанной с увеличением размеров супермаховика.



с супермаховичным двигателем. Масса автомобиля чуть более 500 кг и включает 150 кг полезного груза.

Мощность двигателя автомобиля исходя из данных по шинам и аэродинамике автомобилей США начала 70-х годов и крейсерской скорости 90 км/ч составляет около 4,5 л. с. При проектировании автомобиля предполагалось движение в течение двух часов, что составляет путь пробега 180 км, и запас энергии в маховике — 9 л. с.·ч, или 6,7 кВт·ч. Подробный анализ движения автомобиля с инерционным двигателем в городе позволил сделать следующие выводы:

1. Энергия, затрачиваемая на разгон автомобиля, в 3 раза больше энергии, затрачиваемой на преодоление расстояния, равного пути разгона, на установившейся скорости.

2. Системой рекуперативного торможения, доступной маховичным силовым агрегатам, восстанавливается 25% всей энергии<sup>1</sup>.

3. Полезно может использоваться лишь около 75% всей энергии маховика.

Исходя из этого Д. В. Рабенхорст увеличивает необходимый запас энергии, а следовательно, и общую массу супермаховика на 33%.

В качестве трансмиссии выбрана гидростатическая с приводом на четыре мотор-колеса.

Д. В. Рабенхорст отмечает, что в автомобиле с инерционным двигателем отсутствуют такие необходимые для обычного автомобиля агрегаты и системы, как сцепление, приводной вал, дифференциал, полуоси, тормозная система, аккумуляторы, стартер и генератор, система охлаждения, топливная система. Автомобиль с инерционным двигателем может 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.

Массы важнейших узлов автомобиля Д. В. Рабенхорста (рис. 7) следующие, кг: маховик — 100; корпус маховика и подвеска — 25; электродвигатель авиационного типа — 18,4; гидронасос 50 л. с. — 11,4; четыре гид-

<sup>1</sup> По другим данным (как зарубежным, так и нашим), этот процент восстановленной энергии может быть еще выше (см. «Инерционные рекуператоры и гибридные схемы»).



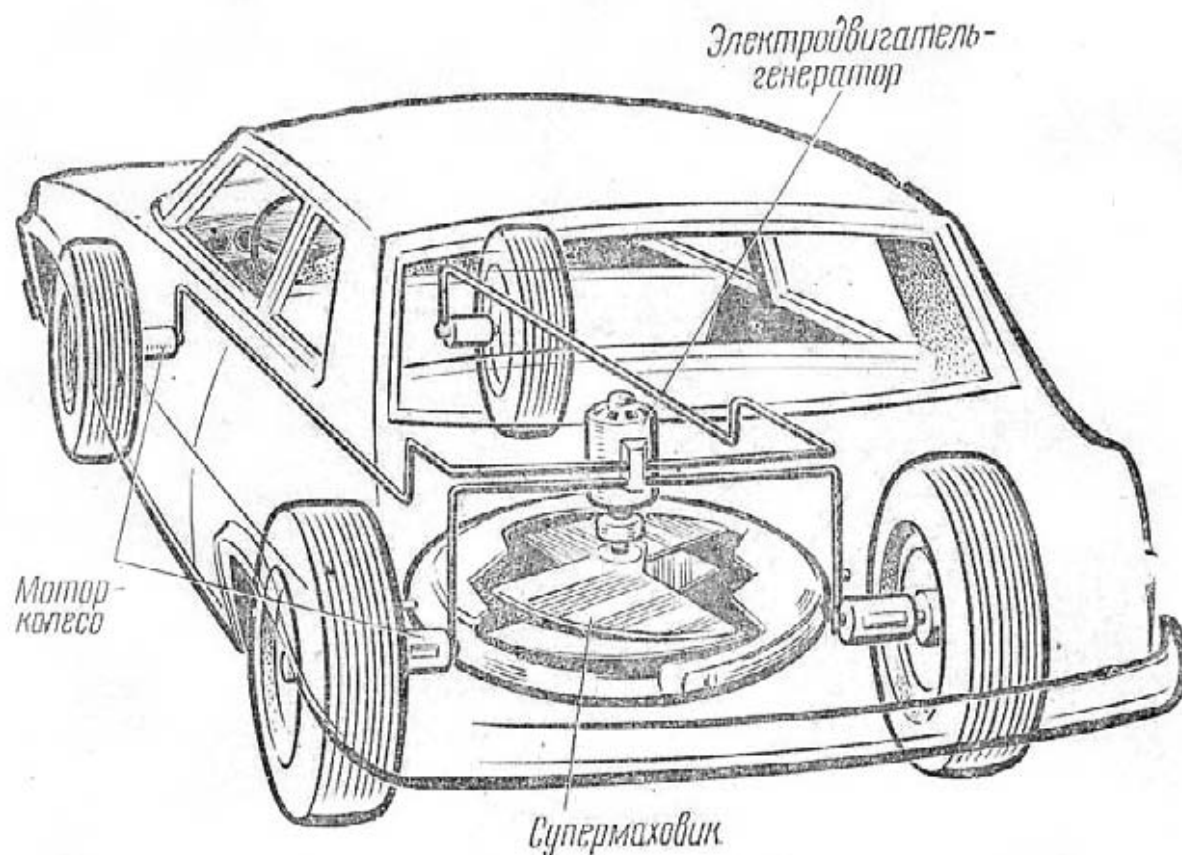


Рис. 7. Инерционный автомобиль д-ра Д. В. Рабенхорста

равлических мотор-колеса общей мощностью 50 л. с. — 10; контрольное оборудование и приборы — 9; ходовая система — 175; полезный груз — 150; кузов — 270. Итого полная масса автомобиля около 600 кг.

Эксплуатационные данные следующие: крейсерская скорость — 90 км/ч; путь пробега — 180 км; путь пробега по городу с учетом частых остановок — 170 км; максимальная скорость — свыше 110 км/ч; время разгона от 0 до 100 км/ч — 15 с; стоимость пробега — 0,6 долл. (54 коп. по курсу 1972 г.) на 100 км.

Данные маховичного силового агрегата автомобиля Д. В. Рабенхорста: объем маховика — 14 дм<sup>3</sup>; полезно используемая масса — 75 кг; полезно используемая энергия 6,7 кВт·ч; начальная скорость маховика — 23 700 об/мин; конечная скорость — 11 900 об/мин; мощность потерь — менее 0,01 л. с. Снижение потерь энергии до столь малой величины достигают помещением супермаховика в герметичный вакуумированный корпус с выводом вала через уплотнения из магнитной жидкости (рис. 8). Выбег маховика (свободное вращение) будет длиться свыше 1000 ч, или более 41 сут; выбег маховика гиробуса фирмы «Эр-



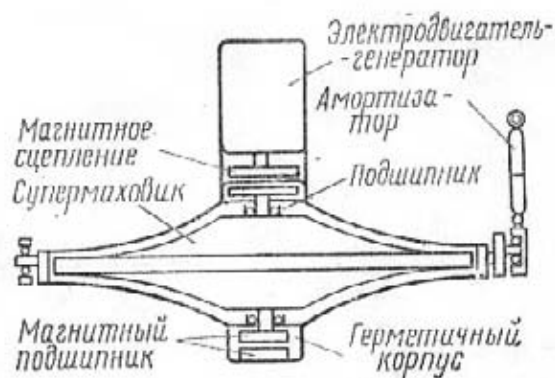


Рис. 8. Маховичный силовой агрегат автомобиля Д. В. Рабенхорста

ликон» — 12 ч, а маховика-рекуператора фирмы «Кларк» (см. «Инерционные рекуператоры и гибридные схемы») — 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. Характерно, что как электродвигатель, так и подшипники супермаховика находятся в обычных атмосферных условиях, а не в вакууме, что существенно улучшает условия их работы. Это стало возможным благодаря созданию высококонцентрированных магнитных жидкостей для герметичных уплотнений валов супермаховика.

Для предохранения от тряски и уменьшения гироскопических воздействий корпус супермаховика подвешен на упругих амортизаторах.

Новейший и совершеннейший маховичный силовой агрегат Д. В. Рабенхорста, как и агрегаты фирм «Эрликон» и «Локхид», в принципе повторяют, конечно, на более высокой ступени инерционный аккумулятор А. Г. Уфимцева. Это еще раз свидетельствует о выдающемся таланте А. Г. Уфимцева, о необходимости тщательного изучения его научно-технического наследия по инерционным двигателям.

## КОНСТРУКЦИИ МАХОВИКОВ И ЭЛЕМЕНТЫ ИХ РАСЧЕТА

Наиболее простой по конструкции маховик, но вместе с тем и наименее энергоемкий — это обод со спицами (рис. 9, а). Такие маховики изготавливаются литьем из чугуна или стали и применяются при низких окружных скоростях, чаще всего в открытой атмосфере. Надо сказать, что спицы на таком маховике только увеличивают напряжение в основном аккумулирующем элементе — ободе,



что привело к их устранению в более совершенной конструкции — обод с диском (рис. 9, б). Такой маховик выдерживает повышенные окружные скорости — обычно до 150 м/с, так как диск здесь поддерживает обод, как бы разгружая его. Однако и эта конструкция — не лучший пример использования материала маховика для целей аккумуляции энергии. Равнопрочный диск (без отверстия) с ободом (рис. 9, в и г) выдерживает уже достаточно большие окружные скорости — до 250 м/с и может накопить значительные количества энергии — до 2000 кгс·м/кг. Такие маховики уже целесообразно помещать в среду с малыми вентиляционными потерями — водород, гелий, разреженные газы и пр.

Маховик гиروبуса фирмы «Эрликон» как раз представляет собой такой равнопрочный диск с ободом.

Дальнейшее повышение удельной энергоемкости инерционного аккумулятора потребовало отказаться от обода и изготовлять маховик в виде чистого диска равной прочности (или близкого к нему гиперболического профиля), изображенного на рис. 9, д. Окружные скорости таких маховиков достигают 450 м/с, а удельная энергоемкость свыше 2000 кгс·м/кг. Эти маховики уже требуют обязательного помещения в вакуум из-за высокой окружной скорости, близкой к скорости пули

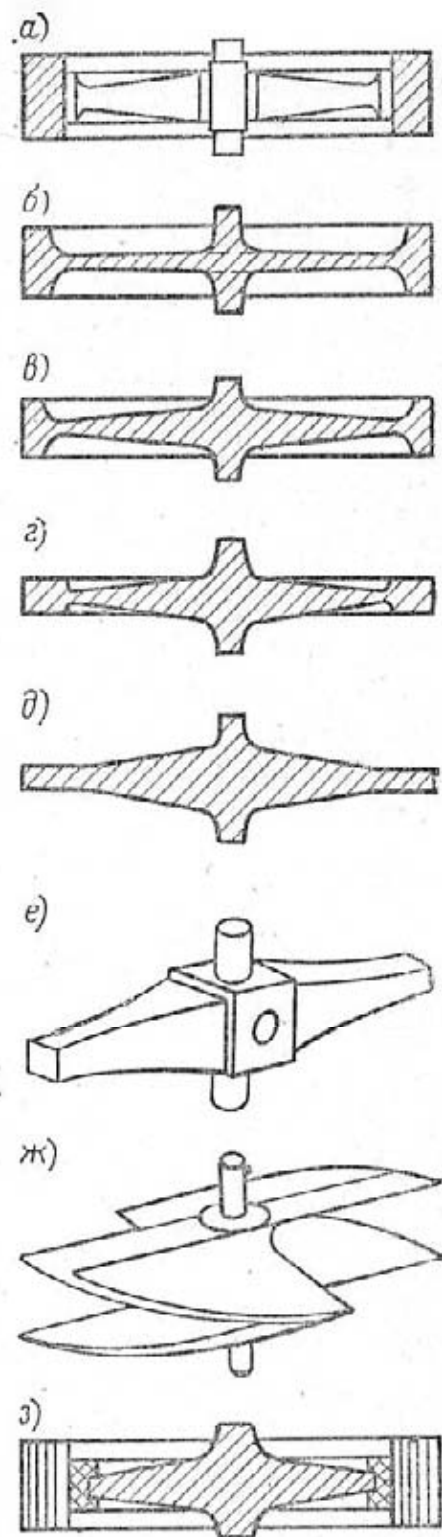


Рис. 9. Эволюция маховиков по форме и конструкции:

а — обод со спицами; б — обод с диском; в — диск равной прочности с ободом (низкоскоростной); г — диск равной прочности с ободом (высокоскоростной); д — чистый диск равной прочности; е — супермаховик стержневого типа; ж — супермаховик клинового типа; з — супермаховик ободкового типа



или снаряда. Так устроены маховики А. Г. Уфимцева, фирм «Кларк» и «Локхид». Но и таким совершенным маховикам свойственны серьезные недостатки, общие для всего класса монолитных маховиков (рис. 9, а, б, в, г, д). Первый недостаток — это невозможность резкого повышения их удельной энергоемкости из-за сравнительно малой прочности монолитных (литых или кованных) заготовок для маховиков и невозможности радикального повышения прочности таких заготовок. Второй недостаток — опасность возможного разрыва монолитных маховиков с образованием крупных осколков, обладающих большой пробивной способностью. Все это тормозит развитие монолитных маховиков и даже, несмотря на достигнутые успехи (например, фирмой «Локхид»), делает их неперспективными для инерционных аккумуляторов будущего.

Отмеченных недостатков лишены супермаховики, основные типы которых представлены на рис. 9, е, ж, з.

Термин «супермаховик», введенный Д. В. Рабенхорстом, обозначает маховик, основной аккумулирующий элемент которого изготовлен из высокопрочных слоисто-волоконистых и нитевидных материалов.

Основные свойства супермаховиков: весьма высокая удельная энергоемкость, обусловленная большой удельной прочностью слоисто-волоконистых материалов по сравнению с монолитными, и безопасность при разрыве, обеспеченная тем, что конструкция из слоисто-волоконистых и нитевидных материалов не может дать опасных крупных осколков.

Изготовление супермаховиков из указанных материалов вызывает их несколько необычные конструкции и форму.

Супермаховик по схеме рис. 9, е — стержневого типа, представляет собой стержень равной прочности при вращении его вокруг поперечной оси, изготовлен из ориентированного стеклопластика с эпоксидной связкой. Такие супермаховики разрабатывались и испытывались фирмой «Локхид» (рис. 10). Из рис. 10 видно, что разрыв такого супермаховика относительно безопасен, так как стержень из стеклопластика после разрушения превратился в размочаленную массу из стекловолокон, неспособную пробить корпус камеры вращения маховика. Удельная энергия этого супермаховика в момент разрыва — 5,5 тыс. кгс·м/кг.

Супермаховик по схеме рис. 9, ж — клинового типа, разработан Д. В. Рабенхорстом. От предыдущей конструкции он отличается большей компактностью и меньшими



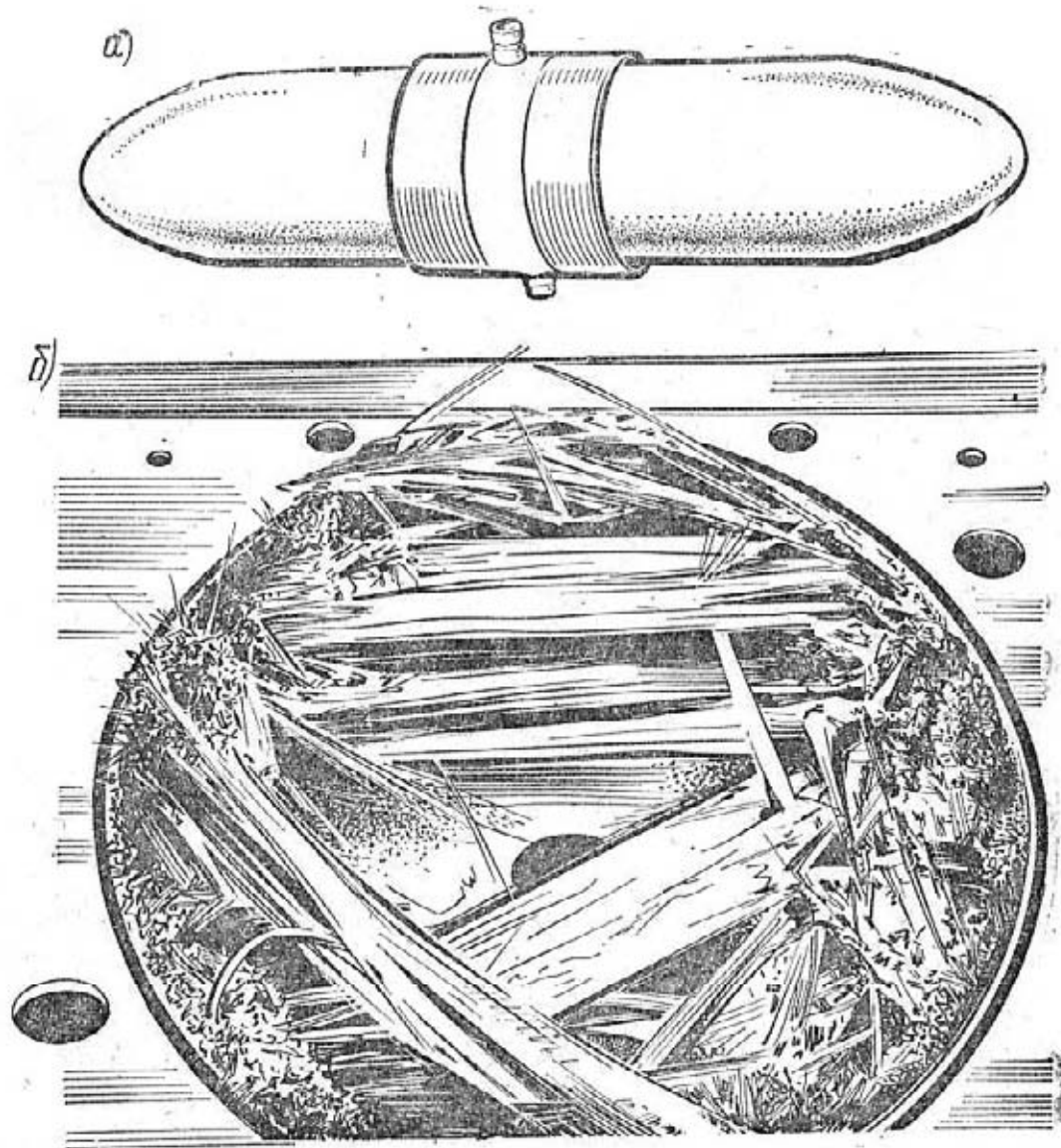


Рис. 10. Супермаховик стержневого типа фирмы «Локхид» до (а) и после (б) испытаний на разрыв от вращения

аэродинамическими сопротивлениями. В самое последнее время Д. В. Рабенхорстом изготовлены и испытаны модели супермаховиков весьма высокой энергоемкости — до 40 тыс. кгс·м/кг.

В принципе конструкции супермаховиков стержневого и клинового типа основаны на одном и том же одноосном напряженном состоянии равнопрочного тонкого стержня при вращении, так как клиновой супермаховик составлен из таких стержней, склеенных между собой.

Иначе устроен супермаховик ободкового типа (см. рис. 9, з), разрабатываемый Курским политехническим институтом, а за рубежом — фирмой «Эркрафт корпорейшн» (США). Основной аккумулирующий элемент этого супер-



маховика представляет собой обод, навитый из стальной высокопрочной ленты, проволоки, стеклонити или другого высокопрочного волокна со связкой. Основной трудностью создания такого супермаховика являлось крепление обода, сильно расширяющегося при вращении к центру. Эта трудность была преодолена установкой упругого компенсирующего элемента на стыке обода и центра.

Основные преимущества супермаховика ободкового типа из ленты — компактность, низкая окружная и угловая скорости вследствие размещения маховой массы по периферии, возможность помещения деталей и узлов передач внутри обода. Разрыв такого супермаховика совершенно безопасен, так как не приводит даже к повреждению основной массы обода. Разрушающийся, наиболее нагруженный внешний виток отходит под действием центробежных сил и трением о внутреннюю поверхность камеры вращения автоматически тормозит супермаховик. Вращение должно быть обязательно в направлении навивки обода.

Общий вид отечественного супермаховика ободкового типа, изготовленного из стальной ленты, представлен на

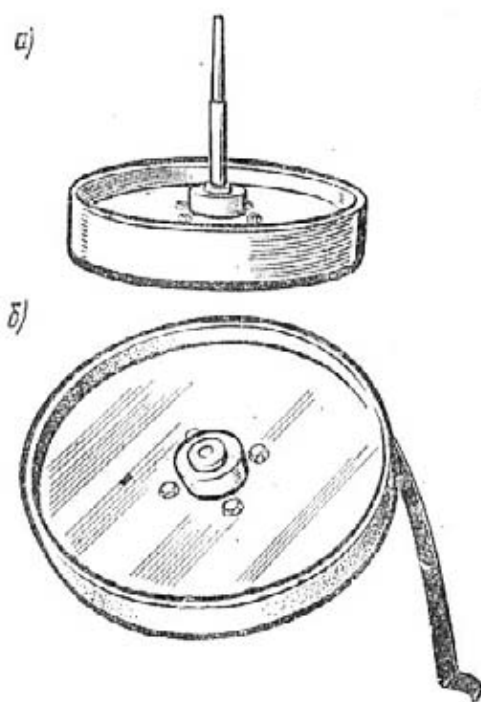


Рис. 11. Супермаховик ободкового типа, навитый из стальной пружинной ленты, толщиной 0,1 мм, до (а) и после (б) испытаний на разрыв от вращения

рис. 11, а, а после испытаний на разрыв от вращения на разгонных вакуумных стендах ЦНИИТМаш — на рис. 11, б. Из рис. 11, б видно, что разрыв внешнего витка не повредил основной маховой массы. Удельная энергоемкость такого супермаховика составила 8000 кгс·м/кг.

Были испытаны также супермаховики ободкового типа из ориентированного стеклопластика, разработанные автором в содружестве с лабораторией армированных пластиков ИХФ АН СССР, показавшие энергоемкость 11 000 кгс·м/кг. Возможно создание супермаховиков ободкового типа и существенно большей удельной энергоемкости.

Из рассмотрения напряженного состояния и энергии ма-

ховиков различных 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  $\frac{[\sigma]}{\rho}$  материала маховика имеет вид:

$$e = K \frac{[\sigma]}{\rho}, \quad (1)$$

где  $\frac{[\sigma]}{\rho}$  — отношение допускаемых напряжений к плотности данного материала (удельная прочность);  
 $K$  — коэффициент формы маховика, характеризующий ее эффективность (критерий эффективности формы).

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

Определение коэффициента формы  $K$  показывает, что для наиболее употребительных форм маховика он имеет следующие значения:

1. Диск постоянной толщины без отверстия:

$$K = \frac{2}{3 + \mu} \approx 0,6, \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $\mu \approx 0,3$ .

2. Обод с отношением внутреннего диаметра к внешнему, равным  $i$ :

$$K = \frac{1 + i^2}{(3 + \mu) \left[ 1 + i^2 \frac{1 - \mu}{3 + \mu} \right]}. \quad (3)$$

При  $i \approx 0$ , т. е. для диска с весьма малым отверстием  $K = \frac{1}{3 + \mu} \approx 0,3$ , или точно 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. Диск равной прочности, форма которого определяется по выражению

$$h = h_0 \exp \left( -\frac{\rho \omega^2 r^2}{2\sigma} \right), \quad (4)$$



где  $h$  — толщина диска на радиусе  $r$ ;

$h_0$  — толщина диска в центре;

$\rho$  — плотность материала;

$\omega$  — угловая скорость диска;

$\sigma$  — напряжения, одинаковые для всего диска.

Характерно, что форма диска равной прочности зависит от окружной скорости  $v = \omega r$  и при  $v = 0$  вырождается в диск постоянной толщины с  $K = 0,6$ . При бесконечно большой окружной скорости, как показал анализ, значение  $K$  вдвое больше и равно  $K = 1$ . При этом  $K$  практически принимает это 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:

$$F = F_0 \exp\left(-\frac{\rho \omega^2 r^2}{2\sigma}\right),$$

где  $F$  и  $F_0$  — площади поперечного сечения на радиусе  $r$  и в центре. При  $v = 0$  эта форма вырождается в стержень постоянного сечения при  $K \approx 0,3$ , а при бесконечно большой окружной скорости  $K = 0,6$ . Эти значения соответствуют диску с весьма малым отверстием и тонкому ободу. Коэффициенты формы маховиков по данным автора и по данным фирмы «Локхид» представлены в табл. 2.

Таблица 2

Форма маховика	Коэффициент формы	
	по данным автора	по данным фирмы «Локхид»
Диск с весьма малым центральным отверстием	0,3	0,305
Стержень (отдельное волокно)	0,3	0,333
» равной прочности	0,5	—
Толстый обод ( $i = 0,8$ )	0,44	0,438
Тонкий обод ( $i = 1$ )	0,5	0,5
Диск без отверстия	0,6	0,606
Конический диск	—	0,806
Диск равной прочности $\frac{h_0}{h} = 5,48$	—	0,807
» » » при бесконечно большой окружной скорости	1,0	—



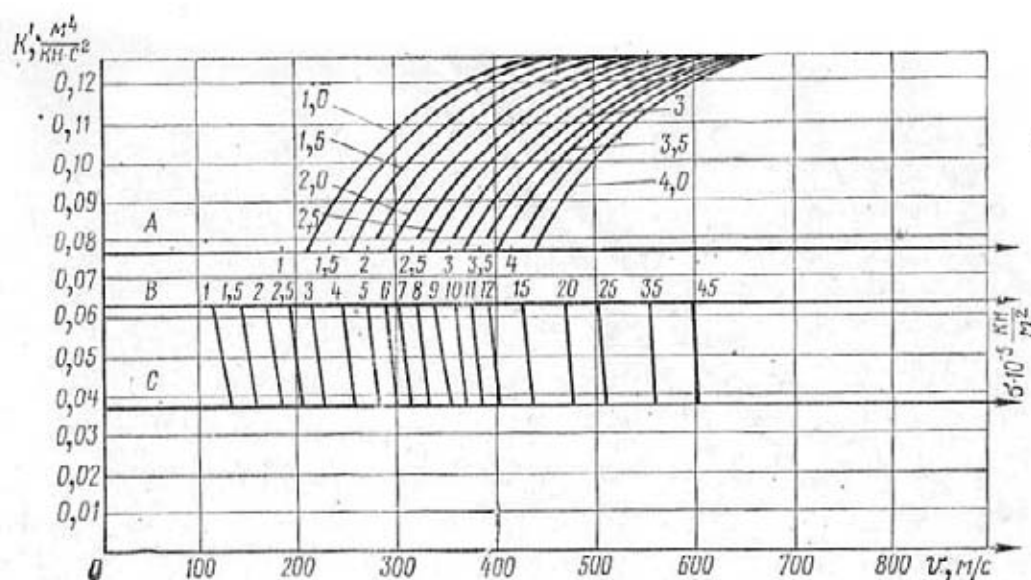


Рис. 12. Диаграмма для подбора и расчета маховиков

Итак, 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 идет диск без отверстия ( $K = 0,6$ ) и диск равной прочности ( $K = 1$ ).

Следовательно, супермаховики всех трех типов, несмотря на совершенное 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 (рис. 12).

По оси ординат отложена величина относительного коэффициента формы для стали  $K' = \frac{K}{\gamma}$  ( $\gamma$  — плотность стали —  $7850 \text{ кг/м}^3$ ), по оси абсцисс — окружная скорость маховика  $v$ , м/с. Три шкалы A, B и C характеризуют напряжения  $\sigma \cdot 10^{-5}$ ,  $\text{кг/м}^2$  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.

Расчет может проводиться в следующей последовательности. Из допускаемого значения окружной скорости, обычно лимитируемой при конструировании инерционных аккумуляторов



муляторов, восстанавливается перпендикуляр. Точки пересечения его с линиями на диаграмме непосредственно дают значения максимальных напряжений в маховиках соответствующих форм. Ординаты этих точек указывают на значения  $K'$  для этих форм. Произведение  $K'\sigma$  дает значение удельной энергоемкости  $e$  маховика этой формы. Та форма, для которой величина  $e$  будет максимальной, является оптимальной для данной окружной скорости.

Следует иметь в виду, что при скоростях до 100—150 м/с маховики можно эксплуатировать в воздушной среде атмосферного давления, при 150—250 м/с — в среде с пониженными вентиляционными потерями (водород, гелий, разреженный воздух), а при больших скоростях обязательно помещение в вакуум (форвакуум).

По приведенной 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 будет больше удельная энергоемкость.

По диаграмме можно проводить и другие расчеты, задаваясь, например, величинами допускаемых напряжений, формой и пр.

**Пример 1.** Требуется определить оптимальную форму маховика и его вес для аккумулирования энергии 50 000 кгс·м. Даны два материала: 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 значения  $v = 300$  м/с. Он пересекает шкалу  $B$  при  $\sigma = 7 \cdot 10^5$  кн/м<sup>2</sup> и  $K' = 0,063$ , а 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  $K' = 0,11$ ;  $\sigma = 1,5 \times 10^5$  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  $e = 1,1 \cdot 10^3$  кгс·м/кг. Масса маховика — 45 кг. Форма диска определяется подстановкой в формулу (4)  $v = \omega r = 300$  м/с и  $\sigma = 10^5$  кн/м<sup>2</sup>. Величины диаметра маховика и толщины в центре выбираются 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  $e = 4,4 \cdot 10^3$  кгс·м/кг. Масса маховика — 11,3 кг. Форма — тонкий обод.

**Пример 2.** Найти допускаемую окружную скорость для маховика типа тонкого обода для двух материалов: стали и стеклопласти-



ка при равных допускаемых напряжениях —  $5 \cdot 10^5$  кн/м<sup>2</sup>. Определить массу маховика для накопления 50 000 кгс·м энергии.

Для определения параметров первого маховика опускаем перпендикуляр из значения  $5 \cdot 10^5$  кн/м<sup>2</sup> на шкале *B* и получаем примерно  $v = 270$  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  $3,15 \times 10^3$  кгс·м/кг. Масса маховика — 16 кг.

Стеклопластик примерно в 3 раза легче стали, и напряжениям  $5 \cdot 10^5$  кн/м<sup>2</sup> в стеклопластике соответствовали бы напряжения  $15 \cdot 10^5$  кн/м<sup>2</sup> для стали. Окружная скорость для таких напряжений по диаграмме примерно равна 420 м/с. Удельная энергоемкость втрое выше, чем у стального маховика, —  $9,5 \cdot 10^3$  кгс·м/кг. Масса маховика — 5,4 кг.

## ИНЕРЦИОННЫЕ РЕКУПЕРАТОРЫ И ГИБРИДНЫЕ СХЕМЫ

### РЕКУПЕРИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ТОРМОЖЕНИЯ

Рабочий процесс каждой машины обязательно включает в себя разгоны и замедления. Для машин непрерывного действия эти процессы играют незначительную роль, так как их 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 же случае — ее уменьшение. Кинетическая энергия при замедлениях автомобиля 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 кинетическая энергия машины возрастает, быстро занимая преобладающую роль в энергетическом балансе. Такое же явление имеет место при снижении сопротивлений (или повышении к. п. д. трансмиссии) и уменьшении длины пути цикла.

В качестве примера рассмотрим зависимость изменения доли кинетической энергии  $E$  в общем расходе механической энергии от вышеперечисленных факторов — скоро-



рости, сопротивления движению и расстояния между остановками для городского транспорта. Кривая 1 (рис. 13) представляет зависимость изменения доли кинетической энергии  $E$  от скорости движения  $v$  км/ч при расстоянии между остановками  $S=300$  м и средней силе сопротивления движению  $P=1,5\%$  от массы автомобиля.

Кривая 2 отражает тот же процесс, но уже в зависимости от расстояния  $S$  между остановками при максимальной скорости движения 60 км/ч и том же значении силы сопротивления движению  $P$ . Наконец, кривая 3 характеризует зависимость той же величины от силы сопротивления движению  $P$  в % от массы автомобиля при постоянных скорости  $v=60$  км/ч и расстоянии  $S=300$  м между остановками. Ясно, что при повышении скорости движения с одновременным уменьшением расстояния между остановками и силы сопротивления движению доля кинетической энергии в общем расходе энергии за цикл увеличивается еще интенсивнее.

Между тем следует отметить, что как на транспорте, так и у других машин циклического действия скорость движения неуклонно повышается, сила сопротивления движению уменьшается, увеличивается к. п. д. трансмиссий; кроме того, у транспортных машин иногда желательно и уменьшение расстояния между остановками. Для современных машин циклического действия: автобусов, трамваев, троллейбусов, поездов метро, пригородных поездов, мостовых кранов и аналогичных им для наиболее эффективных циклов на совершение работы тратится около половины

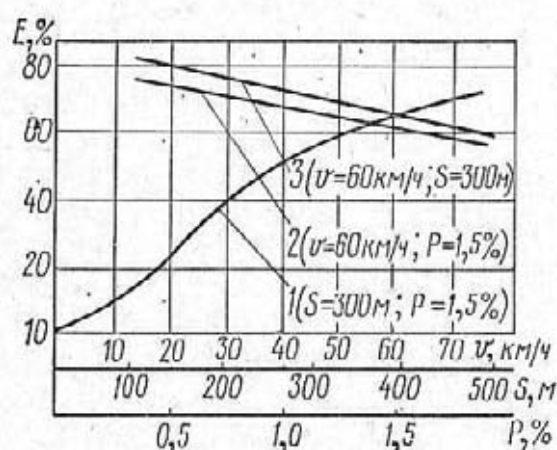


Рис. 13. Доля кинетической энергии в энергетическом балансе автомобиля в зависимости от режима движения

суммарной энергии двигателя, а остальная половина энергии переходит в кинетическую с последующим ее рассеиванием. В будущем же это соотношение, несомненно, еще более ухудшится.

Такое положение приводит к необходимости как постоянного повышения мощности двигателя для обеспечения хороших динамических качеств машины, так и применения устройств, поглощающих кинетическую энер-



гию — различных замедлителей и тормозов. В результате этого затрудняется дальнейшее повышение производительности и экономичности машин. Использование кинетической энергии циклических машин могло бы обеспечить весьма большой экономический эффект.

О резервах кинетической энергии, которые могли бы быть использованы в машинах циклического действия, упоминается в работах академика Е. А. Чудакова.

Проф. Н. К. Куликов предложил формулу для определения экономического эффекта использования энергии торможения автомобиля, %:

$$\Delta > \frac{100 \eta n v_{\max}^2}{26\,000 \psi g + (n + 1) v_{\max}^2}, \quad (5)$$

где  $\eta$  — к. п. д. силовой передачи автомобиля;  
 $n$  — число остановок на пути в 1 км;  
 $v_{\max}$  — максимальная скорость автомобиля на этом участке пути;  
 $\psi$  — коэффициент сопротивления дороги;  
 $g$  — ускорение силы тяжести, равное  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

Объективная оценка резервов кинетической энергии, обуславливающих эффективность их использования для различных машин в различных условиях их эксплуатации, требует установления особого критерия, который может быть определен из рассмотрения энергетического баланса любой движущейся машины.

Отношение энергии  $E_n$ , затраченной на полезные сопротивления к полной энергии  $E_o$ , может служить критерием для оценки резерва кинетической энергии в машине в заданных условиях:

$$\delta = \frac{E_n}{E_o}. \quad (6)$$

С улучшением использования энергии значение  $\delta$ , увеличиваясь, стремится к единице. Резерв кинетической энергии при этом соответственно уменьшается.

В качестве примера в табл. 3 приводятся значения  $\delta$  для различных циклов работы городского транспорта на пневмошинах — автобусов, троллейбусов и др. Для простоты оценки аэродинамическими сопротивлениями пренебрегаем.



Т а б л и ц а 3

Расстояние между остановками, м	Значение $\delta$ при начальной скорости 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	0,42	0,385	0,3	0,242
500	0,95	0,83	0,69	0,55	0,44	0,35	0,284

Из приведенной таблицы следует, что  $\delta$  достигает высоких значений при малой скорости и больших расстояниях между остановками. Между тем большинство современных транспортных машин работает на высоких скоростях и имеет низкое значение  $\delta$  и, следовательно, большие резервы кинетической энергии.

Использование этой энергии может дать значительный экономический эффект. Особо значительный эффект может быть достигнут при малых значениях  $\delta$ .

На практике кинетическая энергия движущихся машин частично используется рациональным управлением при свободном выбеге (накате) и динамическом преодолении подъемов.

При использовании наката кинетическая энергия транспортной машины расходуется на работу сил сопротивления на участке, называемом путем выбега или наката. Однако по ряду причин применение наката не всегда оправдано.

Кинетическую энергию транспортной машины можно также использовать для преодоления подъемов. При этом она частично аккумулируется в виде потенциальной энергии.

Ясно, что использование кинетической энергии для наката или преодоления подъемов носит частный характер, так как это далеко не всегда позволяют условия движения.

Кинетическая энергия транспортной машины может быть также использована путем рекуперативного торможения.

Рекуперативное торможение — это такой вид использования кинетической или потенциальной энергии транспортной машины, когда энергия, которая предназначалась



для рассеивания, путем соответствующих мероприятий затрачивается на совершение полезной работы.

В том случае, когда большое количество транспортных машин связано единой сетью питания (например, электрический транспорт), вероятное число тормозимых транспортных машин близко к числу разгоняющихся. Здесь принципиально возможной является отдача в сеть энергии, выделяемой при торможении и использовании ее для разгона других машин.

Это может быть осуществлено путем перевода тяговых двигателей в генераторный режим с отдачей выделяемой энергии в сеть. Однако ввиду того, что 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 последнем случае генераторы работают с большей эффективностью.

Описанный метод рекуперативного торможения практикуется лишь для большой группы машин городского транспорта, связанной единым питанием, а для машин с индивидуальным питанием непригоден.

Кинетическая энергия используется радикально в том случае, когда эта энергия может быть накоплена в аккумуляторе, находящемся на самой машине, а затем выделена для использования.

В настоящее время техника располагает различными видами аккумуляторов энергии, из которых наиболее распространены электрические, тепловые и механические.

Для накопления энергии при торможении машины аккумулятор должен обладать специфическими свойствами, которые обуславливаются кратковременным интенсивным протеканием процесса. Из рассмотрения, по-видимому, следует исключить тепловые аккумуляторы, требующие преобразования механической энергии в тепловую и обратно. Эти процессы, особенно последний, как известно, весьма трудоемки и неэффективны, а также имеют низкий к. п. д.

Электрические (электрохимические) аккумуляторы наиболее распространены в технике. Они обладают высокой удельной энергоемкостью, способностью сохранять энергию длительное время.

Основным недостатком этих аккумуляторов является их 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 все-таки принципиально пригодны для аккумуляции кинетической энергии машин, как это было отмечено академиком Е. А. Чудаковым.

Наиболее целесообразными типами аккумуляторов для этих целей являются аккумуляторы механической энергии, из которых известны статические и динамические (инерционные).

Статические аккумуляторы чаще всего представляют собой пружину, резиновый элемент или иное упругое тело. Однако энергоемкость статических аккумуляторов в тысячи раз ниже, чем у динамических того же веса. Этим объясняется неприемлемость статических аккумуляторов для накопления значительных количеств энергии.

Небольшие количества кинетической энергии могут быть накоплены в маховике инерционного рекуперативного тормоза рекуператора с резиновым упругим звеном (рис. 14).

Инерционный аккумулятор с упругим звеном подключается к трансмиссии машины при помощи фрикционной муфты. На первом этапе торможения основная часть энергии аккумулируется в упругом звене в виде потенциальной энергии. Затем по мере разгона маховика кинетическая энергия торможения вместе с аккумулированной потен-

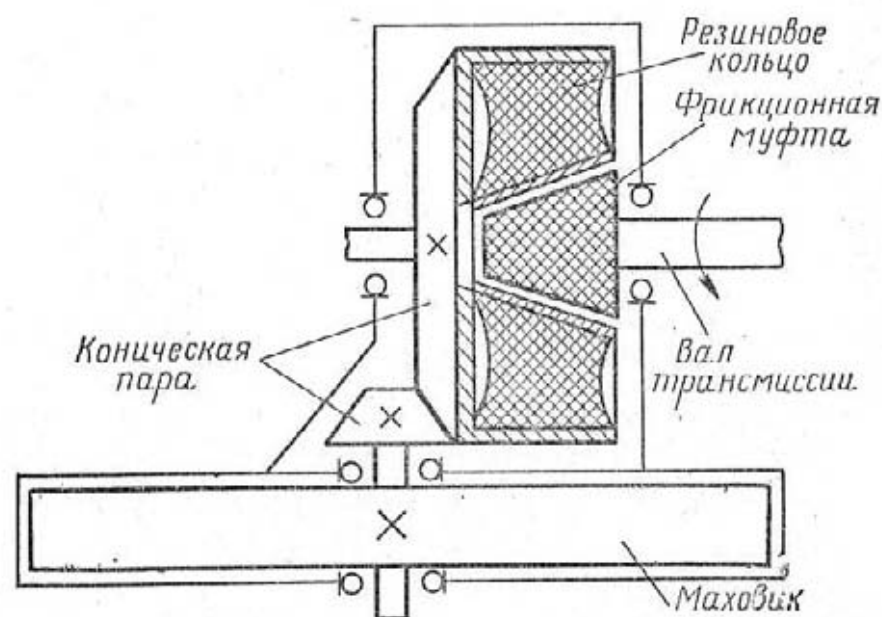


Рис. 14. Инерционный рекуператор с упругим звеном



циальной энергией упругого звена накапливается в маховике. Недостатком этого рекуператора является то, что в упругом звене должно накапливаться от 0,25 до 0,5 суммарной энергии торможения (в зависимости от скорости вращения маховика перед торможением). Ввиду малой аккумулирующей способности упругого звена такой рекуператор не может применяться при накоплении 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 деформируемостью (сжимаемостью). Однако при этом имеют место большие потери энергии, вызываемые малым к. п. д. пневмокомпрессоров и пневмодвигателей в требуемом режиме работы, а также потерей адиабатического тепла. Это обстоятельство практически исключает возможность применения пневмоаккумуляторов для накопления с последующим использованием кинетической энергии.

Из механических аккумуляторов для данной цели более эффективен инерционный аккумулятор — маховик. Наибольшая сложность в системе рекуперативного торможения маховиком заключается в приводе, соединяющем маховик, разгоняющийся при торможении, с трансмиссией и наоборот, разгоняющийся вал трансмиссии при разгоне машины с замедляющимся маховиком.

Из механических аккумуляторов для данной цели более эффективен инерционный аккумулятор — маховик.

Наибольшая сложность в системе рекуперативного торможения маховиком заключается в приводе, соединяющем маховик, разгоняющийся при торможении, с трансмиссией и наоборот, разгоняющийся вал трансмиссии при разгоне машины с замедляющимся маховиком.

Проф Н. К. Куликовым в 1951 г. была предложена схема инерционного рекуператора с планетарным приводом. Рекуператор Н. К. Куликова (рис. 15) представлял собой планетарную коробку передач с маховиком и бесступенчатым вариатором, но он не был построен из-за отсутствия прогрессивной передачи с требуемой характеристикой.

Фирмой «Кларк» (Англия) разработаны различные варианты рекуперативных тормозов, состоящих из маховиков и планетарных коробок передач.

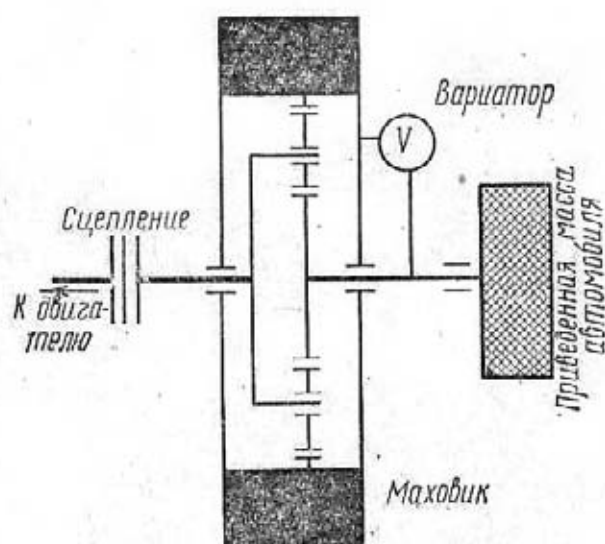


Рис. 15. Инерционный рекуператор Н. К. Куликова



Автобусный рекуперативный тормоз Гиректа фирмы «Кларк» (рис. 16) 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. Реактивный же момент, который и замедляет автобус, действует на вал двигателя. Поэтому двигатель автобуса не отключается ни при торможении, ни при разгоне.

Маховик привода весит 80 кг и вращается с максимальной скоростью до 15 000 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 до 15 тыс. об/мин. Ускорение маховика при этом достигает  $10 \text{ с}^{-2}$ .

Установленный на автобусе массой 10 т привод Гиректа позволяет тормозить со скорости 48 до 16 км/ч, а при разгоне, который продолжается около 15 с, он заменяет дополнительный двигатель мощностью 120 л. с.

При снижении скорости маховика ниже 12 000 об/мин, например при стоянке, оператор может по желанию непосредственно из кабины соединить маховик с двигателем и разогнать его.

Маховик привода Гиректа ввиду большой скорости вращения помещен в кожух с разреженной атмосферой для снижения вентиляционных потерь. Воздух из кожуха непрерывно удаляется насосом, питаю-

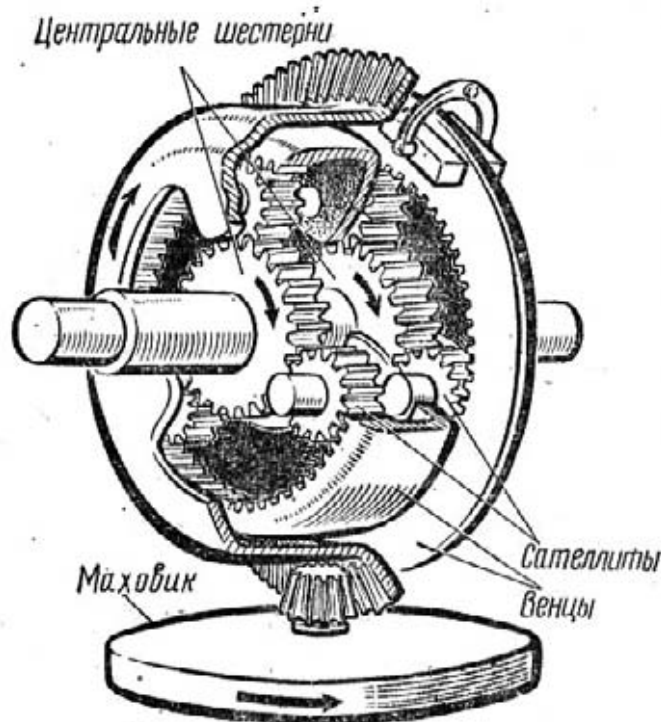


Рис. 16. Схема инерционного рекуператора Гиректа фирмы «Кларк»



шимся непосредственно от маховика. Благодаря этому разогнанный маховик может вращаться до остановки более недели. После ночной стоянки автобуса энергии маховика хватает для пуска двигателя.

Передача планетарной коробки включается автоматически при помощи электромагнитных муфт.

Следует отметить, что установка рекуперативного тормоза такого типа на автобусе позволяет экономить до 50% топлива, особенно при малых расстояниях между остановками.

Фирмой «Кларк» было также разработано гидромеханическое устройство с маховиком для рекуперативного торможения, названное Гидректа.

Гидректа представляет собой сочетание планетарного привода Гиректа с гидродинамическим трансформатором для повышения плавности и легкости управления. При этом экономические показатели Гидректа несколько ниже, чем у Гиректа, что объясняется потерями энергии в гидроприводе.

Маховик привода Гидректа имеет диаметр 0,51 м и массу 64 кг. Его максимальная скорость вращения — 20 000 об/мин. Общее время разгона неподвижного маховика до максимальных оборотов — 1 мин 40 с.

Автомобиль массой около 1200 кг, снабженный двигателем 150 л. с. и устройством Гидректа, позволяет разогнаться 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 для автомобиля. Среднее ускорение его достигало  $6 \text{ м/с}^2$ .

Рекуператоры кинетической энергии на основе маховиков и планетарных передач не обеспечивают достаточной эффективности работы из-за ступенчатого изменения передаточного отношения привода.

Кинетическая энергия движущегося автомобиля выделяется при его замедлении, а воспринимается маховиком при его ускорении. 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, протекающие через привод, вызывают потребность в его компактности и высоком к. п. д.



В этом смысле представляются перспективными новые схемы рекуператоров кинетической энергии на основе дискретного ленточного вариатора и маховика (рис. 17). Изменение передаточного отношения дискретного ленточного вариатора основано на изменении диаметров витков ленты в процессе перемотки.

Дискретный ленточный вариатор состоит из двух кассет с мотками ленты, навитой на валы с посаженными на них маховыми массами. Один из маховиков, имитирующий, например, движущуюся машину, вращается, другой остановлен, причем вся лента намотана на его валу. При намотке ленты на вал вращающегося маховика она сматывается с другого мотка и маховик разгоняется по мере перемотки ленты. В конце цикла, когда вся лента сматывается с вала маховика, последний имеет максимальную скорость. Далее цикл может повторяться.

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 к. п. д. около 0,97. Смазки вариатор не требует, а по удельной мощности (передаваемой 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.

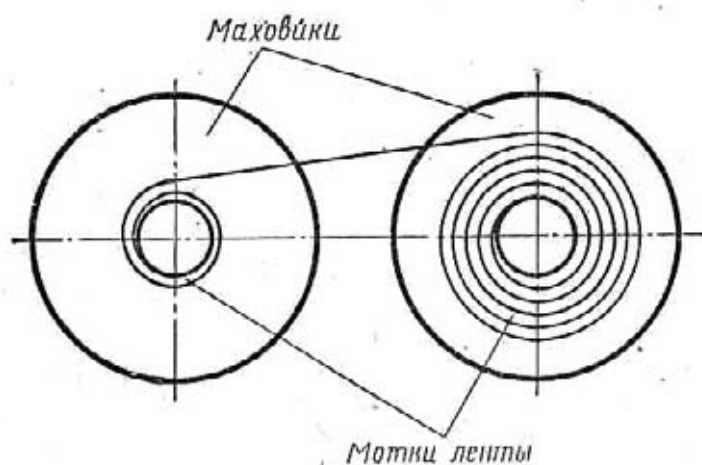


Рис. 17. Схема дискретного ленточного вариатора

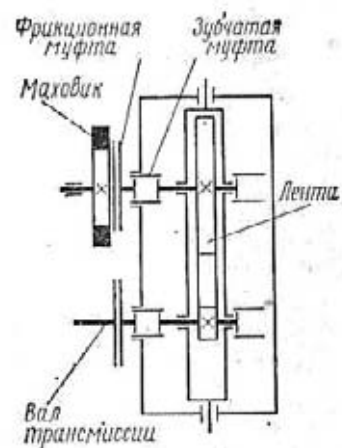


Рис. 18. Схема инерционного рекуператора с дискретным ленточным вариатором



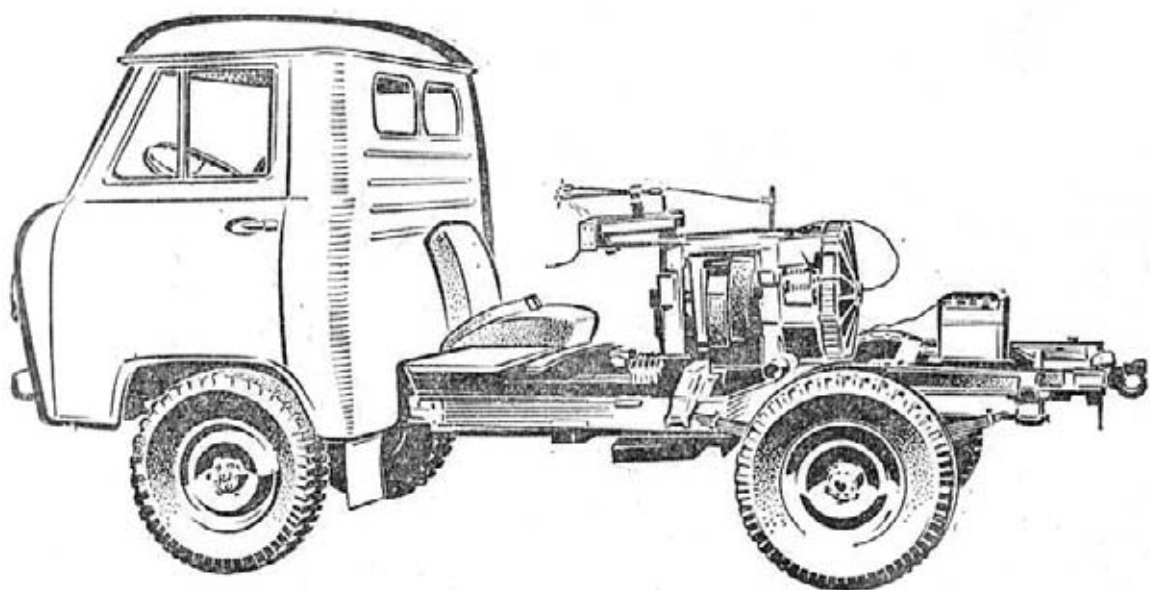


Рис. 19. Экспериментальный автомобиль с инерционным рекуператором

Схема рекуперативного тормоза с реверсированием путем переворота ленточного механизма показана на рис. 18. В этой схеме маховик связан с валом вариатора фрикционной и зубчатой муфтами; второй вал вариатора связан с колесами автомобиля точно так же. Ленточный механизм поворачивается на  $180^\circ$  с целью изменения направления намотки ленты маломощным сервоприводом.

При торможении или разгоне необходимо включение сперва обеих зубчатых муфт, а затем фрикционных. После завершения процесса следует выключать фрикционные, а затем зубчатые муфты. Последнее производится автоматически с помощью датчика степени намотки ленты и любой из систем управления автомобиля — механической, пневматической, электрической и пр.

Для проверки работоспособности рекуператора был изготовлен опытный образец, опробованный как в стендовых условиях, так и на автомобиле УАЗ-450 (рис. 19). Автомобиль УАЗ-450 был выбран в качестве экспериментального главным образом вследствие наличия двух ведущих мостов, что облегчило задачу подсоединения рекуператора к трансмиссии.

Эксперименты, проведенные на автомобиле с рекуперативным тормозом, показали принципиальную применимость данной системы рекуперирования кинетической энергии на автомобиле.

Несмотря на конструктивные недостатки испытанной системы рекуператора, она показала удовлетворительные



характеристики торможения и разгона. Автомобиль со скорости примерно 30 км/ч, т. е. со средней и даже высокой скорости регулярного торможения городских автобусов, затормаживался совершенно без участия фрикционных тормозов. Торможение было плавным, без рывков. Рекуператор в этом случае играл роль замедлителя.

Разгон автомобиля энергией, накопленной при торможении, проводился весьма плавно, намного лучше обычного разгона при помощи коробки передач.

После разгона автомобиля рекуператором включалась высшая передача.

Таким образом, автомобиль разгонялся без применения низших и промежуточных передач.

Измерение расхода топлива показало следующее: для разгона автомобиля с места до скорости 30 км/ч без участия рекуператора требовалось 28 см<sup>3</sup>, а для разгона рекуператором и двигателем совместно до той же скорости в тех же условиях требовалось всего 16 см<sup>3</sup> топлива. Таким образом, на каждом разгоне экономилось около 45% топлива. Эти показатели близки к полученным Р. Кларком на его системе рекуперативного тормоза.

Лабораторией аккумуляирования и рекуперации механической энергии Курского политехнического института совместно с ГСКБ по автобусам разработаны и испытаны

экспериментальные рекуператоры к автобусам типа ЛАЗ-695 (рис. 20).

Рекуператор устанавливается в отсеке двигателя справа от него по ходу и связывается карданным валом с передачей автобуса.

Масса рекуператора — 150 кг при массе маховика 80 кг; максимальная скорость вращения маховика — 6000 об/мин; энергоемкость рекуператора — до 60 000 кгс·м энергии.

Рекуперация энергии торможения на городских автобусах, как показал эксперимент, может обеспечить экономию

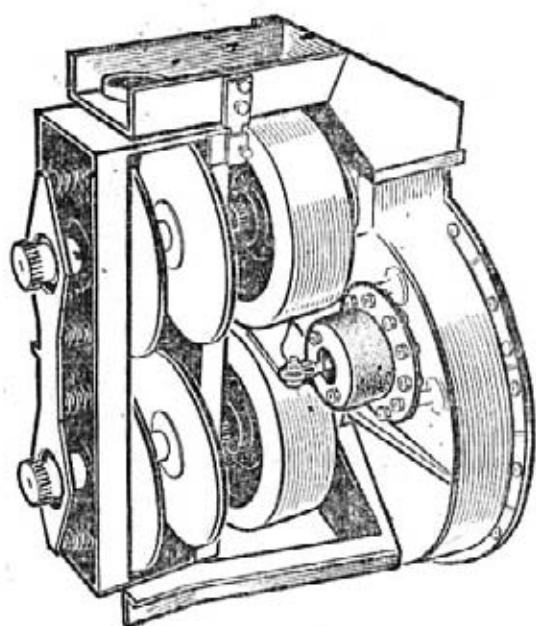


Рис. 20. Экспериментальный рекуператор к автобусу ЛАЗ-695



около 50% топлива и сохранение основных фрикционных тормозов для экстренных торможений. Значительное снижение расхода топлива и работа двигателя преимущественно на установившихся режимах существенно уменьшает выделение отработавших газов в атмосферу, особенно наиболее вредных компонентов, выделяющихся при неустановившихся режимах. Повышается интенсивность разгона автобусов, а следовательно, и его средняя скорость.

На наш взгляд, сегодня особо важное значение рекуперации энергии торможения, как и применения гибридных схем, состоит в существенном очищении атмосферы городов от чрезвычайно опасных для человека и природы продуктов неполного сгорания топлива.

### ГИБРИДНЫЕ СХЕМЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

Индивидуальные инерционные силовые агрегаты, хотя и являются перспективными для автомобилей и автобусов, требуют радикальной перестройки существующих видов транспорта. Кроме этого, создание конкурентоспособного инерционного автомобиля связано пока с определенными техническими трудностями. Поэтому в настоящее время признаны целесообразными паллиативные решения — так называемые гибридные схемы силовых агрегатов, представляющие собой совокупность двигателя внутреннего сгорания и инерционного двигателя.

Отличаясь небольшими габаритами и массой от индивидуального инерционного двигателя, инерционный силовой агрегат гибрида в значительной мере обеспечивает его положительные качества. Гибридный силовой агрегат позволяет в 2 раза и более сократить мощность основного двигателя, значительно уменьшить расход топлива, повысить динамические качества автомобиля, сократить до разумных пределов токсичность продуктов неполного сгорания топлива. При этом гибридный силовой агрегат, существенно не отличаясь от обычного двигателя по габаритам и массе, может быть установлен на автомобилях существующих конструкций без их существенной переделки.

Имея много общего с рекуператорами, гибридные силовые агрегаты более универсальны и позволяют работу в более широком диапазоне эксплуатационных условий и на более широком классе автомобилей, чем рекуператоры, но зато более сложны и дороги.



Ниже описываются результаты исследований и разработок по гибридным схемам автомобильных силовых агрегатов, выполненных отделением наземных транспортных систем фирмы «Локхид» (США). Работы велись под руководством Р. Р. Гильберта, Дж. Р. Гарвея, Г. Е. Хойера и Л. Дж. Лоусона.

Жизненная необходимость подобных исследований в настоящее время в США очевидна, так как крупные, насыщенные автомобилями города буквально задыхаются из-за отравления атмосферы отработавшими газами. Гибридные силовые агрегаты, наряду с высокой экономичностью, во много раз меньше отравляют воздух токсичными продуктами неполного сгорания топлива, чем двигатель внутреннего сгорания.

Подобные работы проводятся и в нашей стране. Это предотвратит возможность отравления атмосферы городов при резко возросшем числе автомобилей, а заодно обеспечит значительную экономию топлива.

Гибридная схема, рассмотренная фирмой «Локхид», представляет собой двигатель внутреннего сгорания, кинематически объединенный с инерционным аккумулятором (рекуператором) механической энергии, помогающим двигателю в периоды работы его на неустановившихся режимах, при которых выделение токсичных продуктов особенно велико. Маховик в гибридных схемах осуществляет рекуперативное торможение и разгон автомобиля, пускает двигатель, предотвращая холостой ход, равномерно загружает двигатель по мощности, обеспечивая благоприятный режим его работы.

Фирмой были рассмотрены возможности применения гибридных схем для следующих типов автомобилей: семейного автомобиля, городского автобуса, прокатного автомобиля и почтового фургона.

Недавнее (1970 г.) утверждение закона о сохранении чистоты воздушного бассейна в США сильно изменило подход к контролю загрязнения воздуха отработавшими газами автомобилей.

Уровни выделений (эмиссий), установленные этим законом, существенно ниже тех, которые обеспечиваются современными автомобилями. Это поставило в трудные условия владельцев заводов-изготовителей автомобилей, хорошо знающих, что им не обеспечить весьма жестких требований закона.



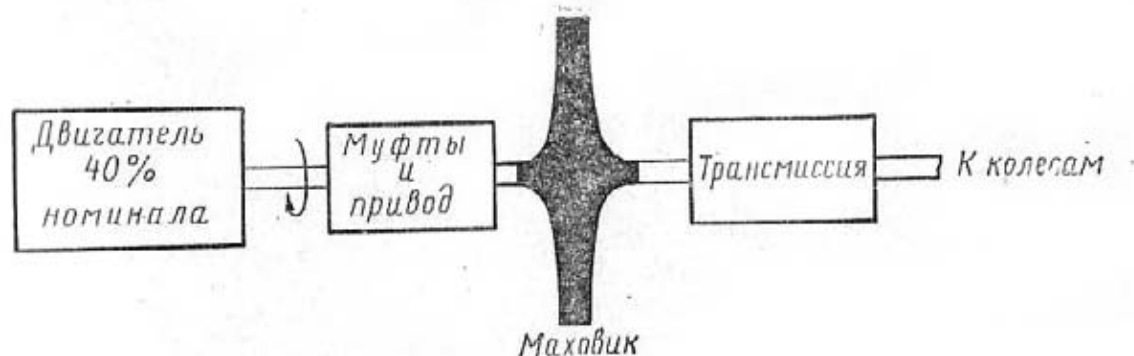


Рис. 21. Гибридная схема (двигатель внутреннего сгорания + инерционный двигатель) силового агрегата

Сравнительные данные по эмиссиям среднего современного автомобиля (выпуска 1970 г.) и требования закона чистого воздуха следующие:

Продукты сгорания . . . . .	HC	CO	NO <sub>x</sub>
Количество выделений современным автомобилем, г/км . . . . .	2,03	23,0	2,0
Количество выделений по требованию закона, г/км . . . . .	0,29	2,94	0,31

Из приведенных данных видно, что требуется почти восьмикратное уменьшение вредных выделений.

Есть два пути уменьшения вредных выделений двигателем автомобиля — сжиганием лучшего топлива и лучшим его сгоранием. Анализ различных методов осуществления этих двух мероприятий — применением электронного зажигания, различных термических реакторов и др. — показал, что они не в состоянии снизить вредные выделения до требуемых законом. Фирма решила использовать третий, по ее мнению оптимальный, путь снижения выделений — сжигание меньшего количества топлива, что достигается рекуперацией энергии торможения и выбором двигателя исходя из довольно низкой средней мощности. Это может быть обеспечено применением гибридной схемы (двигатель внутреннего сгорания + инерционный двигатель), приведенной на рис. 21, дающей следующие преимущества:

1. Снижение расхода топлива примерно вдвое за счет рекуперации кинетической энергии.

2. Уменьшение установочной мощности двигателя до 40% от номинальной, так как маховик обеспечивает автомобиль мощностью, необходимой для пуска двигателя и разгона.

3. Возможность работы двигателя главным образом на единственной точке его характеристики, отвечающей опти-



мальному режиму, когда вредные выделения значительно сокращаются.

4. Устраняются различные системы быстрого пуска двигателя и режимы холостого хода, как известно, увеличивающие токсичность отработавших газов.

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

Лучшим типом двигателя внутреннего сгорания для гибридных схем является карбюраторный, хотя усовершенствованные двигатели, работающие по циклу Ранкина, Брейтона, или модифицированные дизельные двигатели с низким уровнем вредных выделений, также пригодны для этой цели.

Фирма проанализировала режимы движения и потребление энергии для упомянутых четырех типов автомобилей, а также исследования рациональных форм и конструкций маховиков для этих автомобилей.

В результате исследований маховиков для гибридных схем были выбраны два основных типа — стальной диск равного сопротивления и супермаховик стержневого типа из ориентированного стеклопластика.

В табл. 4 даны рассчитанные на счетно-решающих устройствах параметры маховиков в виде стального диска и супермаховика стержневого типа для привода отмеченных четырех автомобилей в их типичном режиме работы только энергией маховика (без двигателя, как в гиробусах).

Таблица 4

Тип автомобиля	Энергия маховика, кгс·м	Максимальная масса системы движения*, кг	Масса маховиков, кг	
			Стальной диск, $c = 18,5 \cdot 10^3$ кгс·м/кг	Стержень из стеклопластика, $c = 20,0 \cdot 10^3$ кгс·м/кг
Семейный	$49 \cdot 10^6$	680	2650	2450
Прокатный	$6 \cdot 10^6$	275	335	300
Городской автобус	$35 \cdot 10^6$	2750	1900	1750
Почтовый	$18,4 \cdot 10^6$	770	1000	920

\* Система движения включает в себя маховик, трансмиссию, муфты, кардан, дифференциал, оси и управление.



Видно, что масса маховика получает приемлемые значения только для одного автомобиля — городского автобуса; для всех остальных она превышает даже массу всей движущей системы. Здесь уместно отметить, что фирма «Локхид» закладывала в счетно-решающие устройства теоретические данные по современным материалам и маховикам из них. Д. В. Рабенхорст предполагает повышение в перспективе удельной энергоемкости супермаховиков до  $175\,000\text{ кгс}\cdot\text{м/кг}$ . Массы маховиков по табл. 4 в этом случае соответственно были бы: 280, 34, 200 и 105 кг, что с запасом удовлетворяет самым придирчивым требованиям. Фирма «Локхид» между тем исходит из возможности создания новых систем незамедлительно. Однако первоочередной задачей, как было уже отмечено, является создание гибридных агрегатов, и поэтому все дальнейшие материалы даны в расчете только на маховики гибридов.

Параметры маховиков гибридных схем определяются 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 реактивных сопротивлений (качение, аэродинамика, уклоны и пр.).

Параметры маховиков на основе стального диска с удельной энергоемкостью  $18,5\cdot 10^3\text{ кгс}\cdot\text{м/кг}$  для гибридных схем рассматриваемых автомобилей представлены в табл. 5.

Эти параметры свидетельствуют о том, что маховик здесь занимает весьма малую часть силового агрегата и его

Т а б л и ц а 5

Тип автомобиля	Требуемая энергия маховика, $\text{кгс}\cdot\text{м}$	Масса маховика, кг
Семейный	$134\cdot 10^3$	7,2
Прокатный	$41,5\cdot 10^3$	2,2
Городской автобус	$240\cdot 10^3$	12,9
Почтовый	$56\cdot 10^3$	3,0



масса может быть без ущерба для автомобиля увеличена в 2—3 раза, а удельная энергоемкость маховика соответственно понижена в это число раз для удешевления и упрощения конструкции.

Хотя параметры маховика вполне приемлемы для каждого из рассматриваемых типов автомобилей, основной упор был сделан на городской автобус и семейный автомобиль как главных загрязнителей атмосферы.

Трансмиссия гибридного силового агрегата обоих отобранных типов автомобилей должна обеспечить следующее:

1. Плавность изменения передаточного числа. Передаточное число трансмиссии должно изменяться бесступенчато и плавно, без колебаний скорости, чтобы не вызывать нежелательных динамических нагрузок, характерных для привода с маховиком, или неустойчивости движения.

2. Широкий диапазон передаточного числа. Исходя из того, что маховик при ускорении движения автомобиля замедляется и, наоборот, при замедлении автомобиля маховик получает ускорение, для обеспечения рационального регулирования скорости автомобиля был выбран диапазон изменения передаточного числа, равный примерно 10—15.

3. Возможность рекуперации кинетической энергии. Обмен кинетической энергией между маховиком и автомобилем должен быть обратимым. Трансмиссия гибридного агрегата должна обеспечивать передачу кинетической энергии автомобиля маховику при торможении автомобиля, а энергии маховика — автомобилю при его разгоне.

4. Высокую передаваемую мощность. Чтобы обеспечить уменьшение вредных выделений двигателя, трансмиссия должна быть эффективной по всему широкому диапазону скоростей автомобиля. Мощность, передаваемая маховиком, особенно критическая, может иногда превосходить в несколько раз среднюю мощность двигателя, что необходимо учитывать при проектировании трансмиссии.

5. Совместимость с практикой. Трансмиссия маховика должна быть совместимой с текущей автомобильной практикой, если гибридные схемы войдут в производство в следующие 5 или 10 лет. Трансмиссия не должна создавать излишнего шума при эксплуатации и не требовать специальных мер для ее обслуживания и ремонта.

Основная идея управления гибридным силовым агрегатом состоит в регулировке двигателя внутреннего сгора-



ния таким образом, чтобы поддерживать сумму кинетической энергии автомобиля и маховика постоянной. Сигналы датчиков скорости маховика и автомобиля преобразуются в системе управления в значения кинетической энергии, и из суммы энергий автомобиля и маховика вычитается постоянное значение кинетической энергии полностью груженого автомобиля, движущегося с максимальной крейсерской скоростью. Эта разность энергий используется как сигнал обратной связи для регулирования мощности двигателя внутреннего сгорания, чтобы свести к минимуму разность энергий и установить постоянное значение полной кинетической энергии. Результатом этого управления явится то, что маховик будет обеспечивать энергию для разгонов автомобиля и сохранять ее во время торможений, в то время как двигатель внутреннего сгорания будет поддерживать лишь крейсерскую скорость.

Маховик может устанавливаться в гибридном силовом агрегате двумя способами: с двойной трансмиссией, как показано на рис. 21, и с единой трансмиссией, отличающейся тем, что маховик и двигатель подключены к единой трансмиссии параллельно и могут отключаться независимо. В случае двойной трансмиссии двигатель и маховик подключаются к трансмиссии автомобиля последовательно.

Двойная трансмиссия предоставляет полную управляемость агрегата, так как скорость вращения коленчатого вала двигателя может изменяться независимо от скорости маховика и автомобиля. Скорость же автомобиля из-за наличия двух трансмиссий несколько понижается.

Единая трансмиссия обеспечивает лучшие мощностные показатели, но скорость вращения коленчатого вала двигателя в этом случае непосредственно связана со скоростью маховика, т. е. маховик замедляется при ускорении автомобиля, и скорость вращения коленчатого вала двигателя также замедляется; между тем торможение автомобиля сопровождается повышением скорости вращения коленчатого вала двигателя и маховика. Двигатель при этом работает в необычном режиме. Поэтому водитель, привыкший к вождению обычного автомобиля, до приобретения навыков вождения автомобиля с гибридным силовым агрегатом будет испытывать затруднения.

Ввиду того что оба типа трансмиссий весьма близки друг к другу по сумме показателей, фирма решила применять и тот и другой тип.



Анализ известных автомобильных трансмиссий — механической, электрической, гидрокинетической и гидростатической — показал, что для гибридных силовых агрегатов больше всего подходят электрическая и гидростатическая трансмиссии. Механическая трансмиссия, наиболее компактная и экономичная из всех, была признана неподходящей из-за ступенчатости изменения передаточного числа<sup>1</sup>.

Кроме отмеченных трансмиссий, как оказалось, более чем другие, для гибридных агрегатов подходит трансмиссия с так называемым «разделением потока мощности». Часть крутящего момента идет при этом по механической передаче, а часть по гидростатической. Разделение и последующее соединение потоков мощности осуществляется дифференциальной передачей. Такие трансмиссии с разделением потока мощности очень популярны в автомобилестроении в последнее время, особенно на грузовых автомобилях.

Сравнение трансмиссий различных типов для гибридной системы семейного автомобиля и городского автобуса представлено в табл. 6.

Таблица 6

Трансмиссии	Семейный автомобиль				Городской автобус			
	Коэффициент эффективности	Объем, дм <sup>3</sup>	Масса, кг	Стоимость, долл.	Коэффициент эффективности	Объем, дм <sup>3</sup>	Масса, кг	Стоимость, долл.
Электрическая:								
единая	0,588	120	220	640	0,6254	560	920	6088
двойная	0,369	140	245	689	0,4267	600	950	6291
Гидростатическая:								
единая	0,745	115	128	403	0,7681	720	870	3335
двойная	0,626	130	132	469	0,6615	830	960	3900
С разделением мощности:								
единая	1,0	130	142	261	1,000	900	1020	2205
двойная	0,835	180	178	341	0,8495	1170	1330	2872

<sup>1</sup> Здесь уместно заметить, что разрабатываемые отечественные системы отбора мощности от маховика являются механическими и обладают специфическими свойствами, отличными от обычных трансмиссий. По диапазону регулирования и к. п. д. эти трансмиссии эффективнее гидростатических и электрических. Один из типов таких трансмиссий — дискретный вариатор — описан в предыдущем параграфе, остальные — в литературе [2].



Коэффициент эффективности здесь зависит от рекуперированности энергии и к. п. д.; он нормализован на основе равенства его единице для лучшей трансмиссии.

Как следует из материала, представленного в табл. 6, лучшей из сравниваемых трансмиссий (и для автобуса, и для семейного автомобиля) является трансмиссия с разделением потока мощности как единая, так и двойная.

Для выбора рационального типа двигателя для гибридного силового агрегата фирма проанализировала наиболее приемлемые для автомобилей карбюраторные двигатели, дизельные, газотурбинные и работающие по циклу Ранкина. Всесторонний анализ показал, что лучшим типом двигателя для гибридного силового агрегата является карбюраторный.

В табл. 7 представлены значения вредных эмиссий для карбюраторных двигателей и гибридной системы для легкового семейного автомобиля и для карбюраторных и дизельных двигателей и гибридных систем с этими двигателями для городского автобуса в сравнении с требованиями закона чистого воздуха.

Из табл. 7 видно, что все карбюраторные двигатели и лучшие дизельные в гибридной системе с маховиком удов-

Таблица 7

Наименование	Эмиссии, г/км		
	HC	CO	NO <sub>x</sub>
Стандарт для семейного автомобиля	0,29	2,94	0,31
Средние данные по двигателю семейного автомобиля (данные 1970 г.)	2,03	23,00	2,00
Данные маховичной гибридной системы семейного автомобиля:			
с лучшим карбюраторным двигателем	0,05	0,89	0,38
с худшим карбюраторным двигателем	0,43	1,60	0,70
Калифорнийский стандарт 1973 г.	6,9	10,60	15,50
Данные маховичной гибридной системы городского автобуса:			
с лучшим карбюраторным двигателем	0,337	5,80	2,40
с худшим карбюраторным двигателем	2,80	10,00	4,50
с лучшим дизельным двигателем	1,13	1,14	5,65
с худшим » » »	1,65	42,30	18,40



летворяют требованиям, предъявляемым законом чистого воздуха. Вредные выделения указанных двигателей, работающих без маховичных агрегатов, во много раз превышают стандартные требования.

Гироскопический эффект вращающегося маховика при движении автомобиля, как показали исследования, не оказывает существенного влияния на устойчивость движения и нагрузки в конструкциях автомобиля.

Исходя из того, что гироскопический момент маховика пропорционален угловой скорости, а кинетическая энергия — квадрату угловой скорости, весьма быстро вращающийся маховик будет оказывать существенно меньшие гироскопические воздействия на конструкцию, чем тяжелый, медленно вращающийся диск с тем же запасом энергии. Например, колеса семейного автомобиля будут оказывать то же гироскопическое воздействие, что и маховик гибрида для этого же автомобиля. Маховик обычного двигателя вызывает почти треть гироскопического воздействия маховика гибрида. В табл. 8 представлены максимальные значения гироскопических сил, возникающих при эксплуатации семейного автомобиля с гибридным маховичным силовым агрегатом и действующих на колеса.

Т а б л и ц а 8

Параметры	Расположение оси маховика		
	Вертикальное	Продольное	Поперечное
Сила продольного наклона, кгс	$\pm 11,4$	$\pm 45$	—
Сила поперечного наклона, кгс	$\pm 20,0$	—	$\pm 75$
Поворачивающая сила, кгс	—	$\pm 11,4$	$\pm 11,4$

Как видно из табл. 8, наименьшие гироскопические воздействия вызываются при традиционном расположении маховика с вертикальной осью вращения. При невозможности такого расположения лучше располагать ось вращения продольно, чем поперечно. Но во всех трех случаях гироскопические нагрузки на автомобиль весьма малы по сравнению с другими нагрузками и являются второстепенными. Существенно выше эти нагрузки на подшипники маховика, которые могут достигать 900 кгс при резких маневрах.

Для гибридной системы автобуса опасность воздействия гироскопических сил на подшипники меньше, так как в этом



случае есть возможность поставить более тяжелые, но и более прочные подшипники.

Фирмой весьма тщательно рассматривается возможность разрыва маховика от различных причин. При этом подчеркивается, что разрыв стального маховика очень опасен в транспортном средстве с людьми, так как осколки периферии маховика, несущиеся со сверхзвуковой скоростью, могут пробить очень толстые ограждения. Анализ этих оградительных устройств показал, что масса кольца, необходимого для ограждения, в несколько раз превышает массу самого маховика.

Рассмотрены также дефлекторные системы, отклоняющие осколки маховика вниз на дорогу. Такие системы, хотя и меньше массой, чем ограждения, не показались фирме достаточно обоснованными.

В этом отношении большое преимущество перед монолитными маховиками имеют отечественные супермаховики из стальной ленты, которые полностью безопасны при разрыве, если они даже имеют ограждение — тонкий кожух из 2-миллиметровой листовой стали. Кроме того, супермаховики перспективнее стальных дисков по удельной энергоемкости, их легче изготавливать и контролировать, они позволяют размещение внутри обода деталей трансмиссии. Окружная и угловая скорости отечественных супермаховиков значительно меньше, чем дисков фирмы «Локхид», из-за расположения основной массы на периферии. Это создает несколько иные, более благоприятные условия работы подшипников, а также уплотнений камеры вращения маховика, в которой поддерживается разрежение. Поэтому разработка и рекомендации фирмы по конструированию опор и уплотнений высокоскоростных (до 30 000 об/мин) маховиков представляют также ограниченный интерес для рассматриваемых целей.

Представляет интерес компоновка гибридного силового агрегата на легковом автомобиле и автобусе.

На рис. 22 показан автомобиль с маховиком, смонтированным вместе с двигателем. Двигатель слегка передвинут вперед, чтобы компенсировать большую длину приводной трансмиссии маховика, вмонтированного вместо гидротрансформатора. Можно заметить, что сам двигатель в этом случае будет существенно меньшим, чем без гибрида. Трансмиссия гибрида, монтируемого вместе с двигателем, показана на рис. 23.



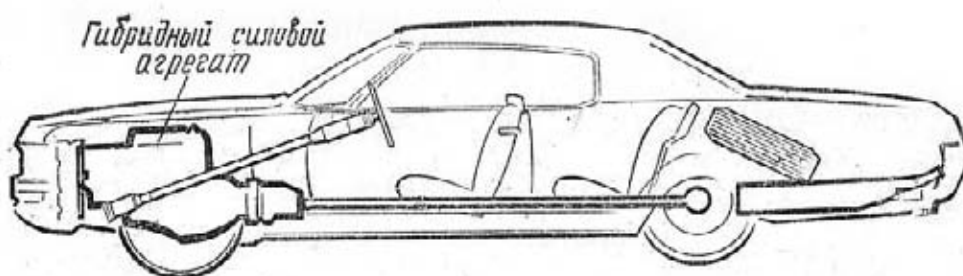


Рис. 22. Компоновка гибридного силового агрегата, смонтированного заодно с двигателем внутреннего сгорания (схема маховичной части)

На рис. 24 показан автомобиль с другим — дифференцированным расположением маховичной части гибрида. Маховик в герметичном корпусе и его трансмиссия расположены в задней части автомобиля самостоятельным, упруго подвешенным узлом. Такое расположение предоставляет больше места силовому агрегату; схема этого автономного маховичного силового агрегата представлена на рис. 25.

Аналогичным образом можно компоновать маховичную часть гибрида и на автобусах в зависимости, конечно, от переднего или заднего расположения двигателя.

Специальные заключения и рекомендации фирмы «Локхид» состоят, кратко, в следующем.

1. Привод рассмотренных автомобилей только от маховика без двигателя, исключая городской автобус, в ближайшие 5 лет, по-видимому, невозможен из-за низкой удельной энергии современных маховиков.

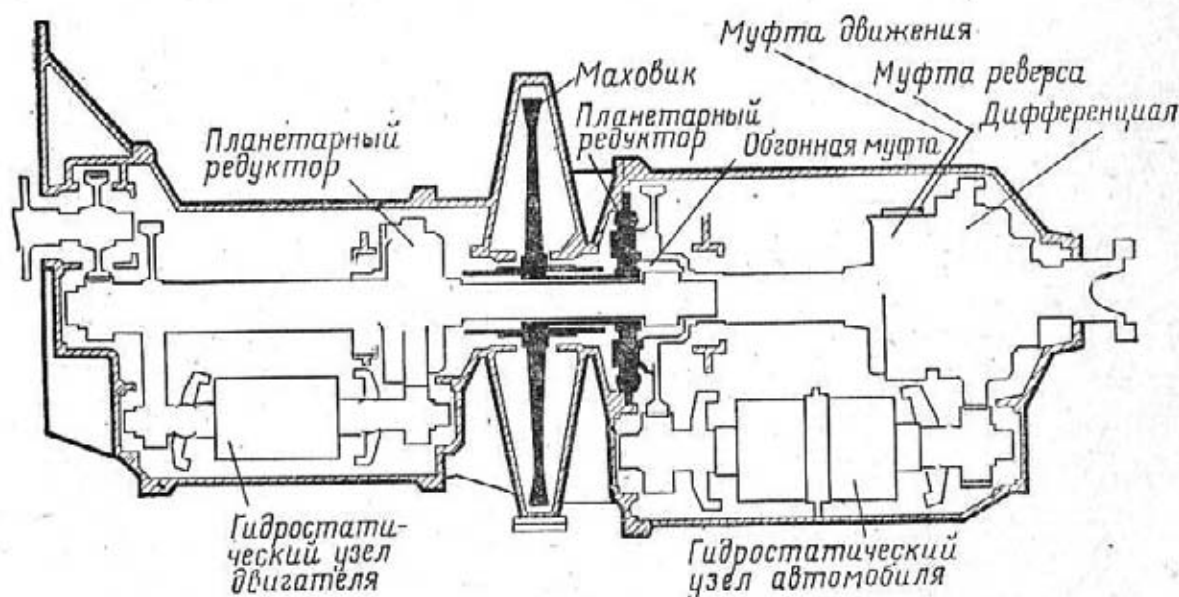


Рис. 23. Схема расположения маховичной части гибрида, смонтированного заодно с двигателем



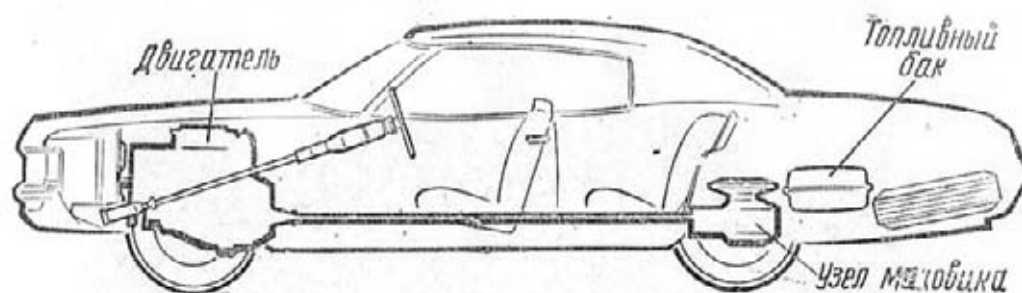


Рис. 24. Компоновка гибридного силового агрегата с раздельным расположением двигателя и маховичного агрегата

Создание автобуса с приводом от чистого маховика возможно и в настоящее время, если этот автобус будет заряжаться на конечных остановках.

2. Приведенные системы гибрида маховик — двигатель внутреннего сгорания применимы не только для рассмотренных четырех типов автомобилей, но и для большинства автомобилей вообще. Для этих систем удельная энергия маховика не является решающим фактором, так как его масса составляет порядка 1% от массы автомобиля.

3. Наилучшим типом трансмиссии из рассмотренных является гидростатическая с разделением потока мощности. Наилучший тип двигателя — карбюраторный.

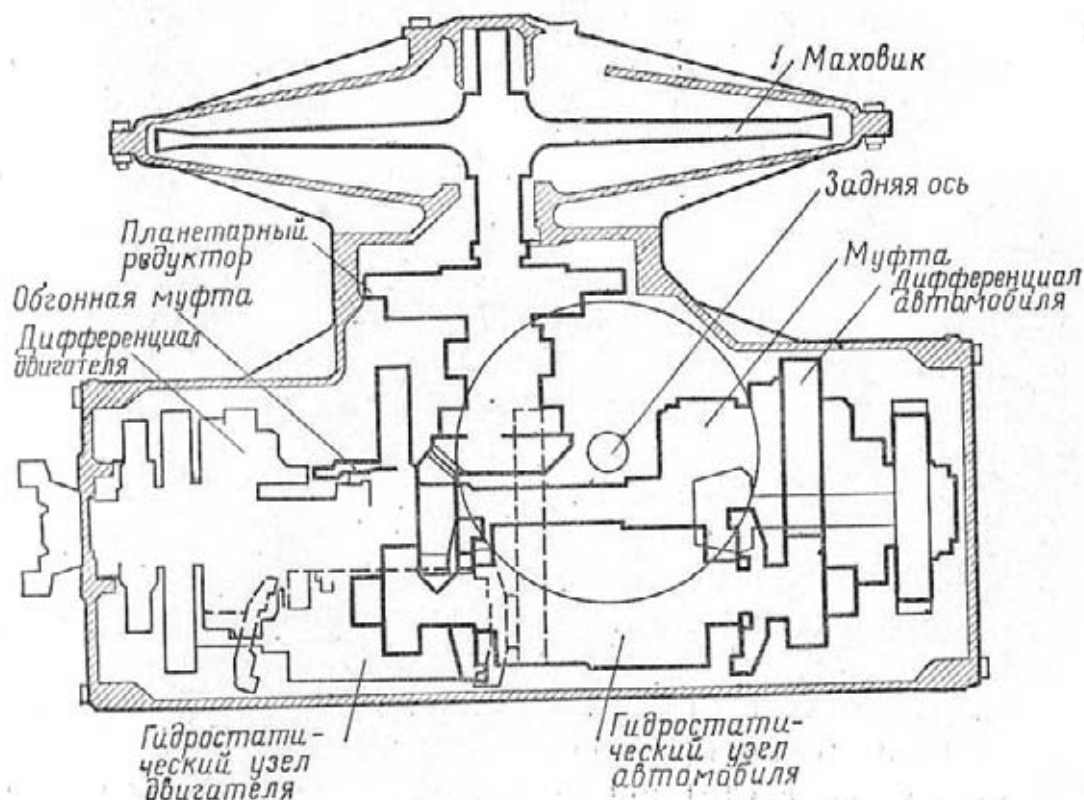


Рис. 25. Схема расположения маховичной части гибрида, установленного отдельно от двигателя



4. Приведенные системы маховичных гибридов с двигателями внутреннего сгорания обеспечивают существенно более низкие уровни вредных выделений, чем требуемые стандартом. Существенно снижаются уровни выделений и на автобусах, снабженных гибридными агрегатами. Экономичность автобуса при этом резко возрастает.

5. Гиродинамические эффекты не представляют серьезных проблем, но управляемость автомобиля с маховичным гибридом должна быть исследована особо.

Фирма «Локхид» наметила дальнейшие планы и программы исследований использования кинетической энергии маховиков для повышения эффективности автомобиля. Программа I — развитие общей системы маховичных гибридных систем рассчитана на 8 месяцев; программа II — создание гибридных систем для легкового автомобиля — на 27 месяцев. Программа III — создание реальных гибридных систем для городских автобусов — на 28 месяцев; итого на 63 месяца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Еще несколько лет назад инерционные двигатели-аккумуляторы не могли идти даже в сравнение по удельной энергоемкости и срокам консервации энергии с электрическими аккумуляторами. Инерционные двигатели представляли большую опасность в случае разрыва маховика; характеристики этих двигателей были мало приемлемы для автомобильного транспорта. Но несмотря на это, первые автобусы с инерционным двигателем — гиробусы фирмы «Эрликон» — более 20 лет успешно конкурировали с автобусами и троллейбусами в ряде городов Европы и Африки.

Сегодня по основным показателям — удельной энергоемкости и сроку консервации энергии — инерционные силовые агрегаты уже приблизились к электрическим. Разработанные отечественные конструкции супермаховиков, наряду с высокой удельной энергоемкостью, соизмеримой с этим показателем для электроаккумуляторов, обладают безопасным разрывом, что особо важно для маховичных силовых агрегатов автомобилей.

Продолжительность консервации энергии в современных маховиках уже достаточно велика — свободный выбег длится от недели (маховик Кларка) до месяца и более (супермаховик Д. В. Рабенхорста).



Разработанные трансмиссии и специфические типы маховичных приводов позволяют производить эффективный отбор механической энергии маховика, придают ему удобную «мягкую» характеристику.

По удельной мощности маховики уже давно превосходят любые типы двигателей. Известно, что когда возникает потребность в пиковых нагрузках и мощностях, всегда применяют маховики. Но важнейшим показателем, характеризующим конкурентоспособность того или иного типа аккумулятора для силового агрегата автомобиля, остается, конечно, удельная энергоемкость. Всегда отстающий по этому показателю маховик оказался при подробном изучении перспективнее других аккумуляторов.

Перспективные маховики — супермаховики — накапливают огромную удельную энергию благодаря высокой удельной прочности волокон, проволок и лент, из которых они изготовлены. И если сегодня прочность промышленных волокон, идущих на изготовление супермаховиков, не превышает  $200 \text{ кгс/мм}^2$ , то в лабораторных условиях уже несколько лет назад получены волокна прочностью  $2500—3700 \text{ кгс/мм}^2$ . Если супермаховики, изготовленные из первых материалов, уже сравнимы с серебряно-цинковыми электрическими аккумуляторами, то, изготовленные из вторых, они во много раз превысят энергоемкость самых лучших электроаккумуляторов. Естественно, что в ближайшие годы на это рассчитывать не придется, но про-

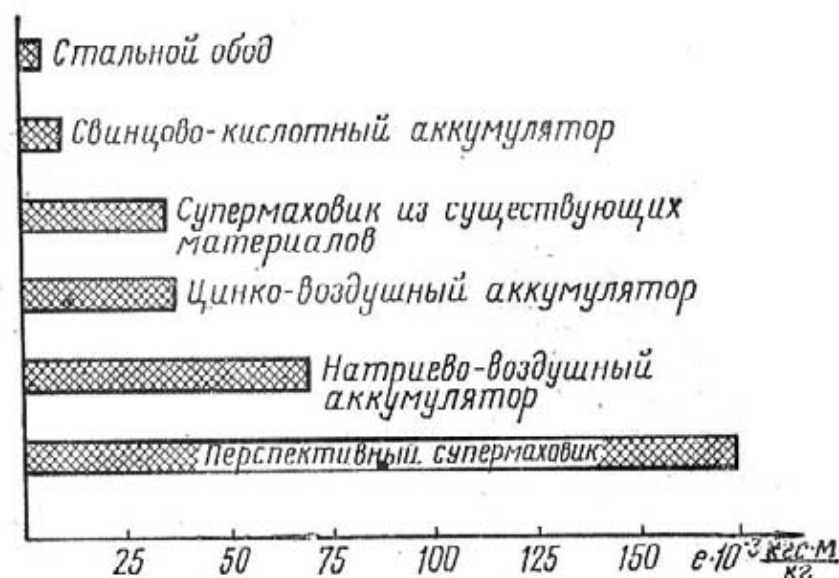


Рис. 26. Диаграмма сравнительной удельной энергоемкости аккумуляторов энергии (по Д. В. Рабенхорсту)



гресс в деле создания высокопрочных волокон так велик, что через несколько лет возможно получение и еще более прочных материалов.

Руководитель работ по супермаховикам в университете им. Дж. Гопкинса (США) Д. В. Рабенхорст характеризует сравнительную удельную энергоемкость основных типов аккумуляторов и маховиков диаграммой, представленной на рис. 26.

Из диаграммы видно, что если стальные маховики существенно отставали даже от свинцово-кислотных аккумуляторов, имеющих, как известно, невысокую удельную энергоемкость, то супермаховики из существующих материалов уже сравнимы с перспективными цинко-воздушными электрическими аккумуляторами. Перспективные супермаховики из сверхпрочных волокон более чем вдвое превышают по удельной энергоемкости лучшие из электроаккумуляторов, достигая 175 000 кгс·м/кг. Если же учесть, что маховики обладают способностью эффективной рекуперации энергии при торможениях, этот показатель в расчете на городские автомобили и автобусы можно увеличить еще практически вдвое.

Поэтому инерционные двигатели могут в недалеком будущем стать конкурентами существующих двигателей не только на автомобильном транспорте, но и на других машинах городского транспорта.

Однако на пути создания эффективного инерционного транспорта еще стоят трудности, над которыми работают создатели инерционных двигателей.

Основной вопрос — это надежность супермаховиков, обладающих высокой удельной энергией, надежность и долговечность его опор. Ведь, несмотря на то, что испытания первых супермаховиков показали хорошие результаты, экспериментального материала пока накоплено мало. А без большого количества опытных данных, гарантирующих надежность и безопасность супермаховика и его опор, устанавливать его на городском транспорте опасно. Испытания супермаховиков на специальных разгонных стендах позволят выявить оптимальную конструкцию и определить надежность перспективных типов супермаховиков. Такие испытания регулярно проводятся, и экспериментального материала становится все больше.

Главная трудность при создании рекуператоров и гибридных силовых агрегатов — это надежная и экономичная



трансмиссия. Ведь трансмиссия автомобиля, какой она является сегодня, создавалась и совершенствовалась десятки лет. А специфичность работы инерционных агрегатов не позволяет прямого переноса автомобильных трансмиссий для использования в гибридах. Особенно это относится к принципиально новым типам трансмиссий для рекуператоров, испытания которых начались недавно и где еще возникает много неожиданностей. Большие затруднения встречаются и при переоборудовании серийных автомобилей под экспериментальные, связанные с переконфигурацией большого числа агрегатов. Однако эти технические трудности не носят принципиального характера и вполне преодолимы. И можно констатировать, что настало время, когда общий уровень развития техники наших дней подготовил благоприятные условия для всестороннего и детального изучения инерционных двигателей, могущих открыть человечеству новые резервы технического прогресса.



## ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А то я н К. М., Гу л и а Н. В., Г в е л е с и а н и Л. Л., На г о р н я к Г. А. Использование энергии, погашаемой в тормозах. — «Автомобильный транспорт», 1971, № 7, с. 35—37.
2. А то я н К. М., Гу л и а Н. В. Перспективы использования новых типов механических силовых агрегатов для автобусов. — «Автомобильная промышленность», 1972, № 7, с. 40—42.
3. Гу л и а Н. В., Ра б и н о в и ч В. П. Энергоемкий аккумулятор механической энергии. — «Вестник машиностроения», 1970, № 3, с. 48—49.
4. Гу л и а Н. В. К расчету маховиков для механических аккумуляторов. — «Вестник машиностроения», 1965, № 1, с. 35—38.
5. Гу л и а Н. В. Маховик и транспорт будущего. — «Наука и жизнь», 1973, № 4, с. 17—24.
6. Гу л и а Н. В. Инерционные аккумуляторы энергии, монография. Воронеж, издательство ВГУ, 1973, 237 с.
7. Гу л и а Н. В. Стройте маховичные двигатели. — «Изобретатель и рационализатор», 1972, № 4, с. 34—36.
8. Ку л и к о в Н. К. Использование энергии торможения для повышения экономических и динамических качеств автомобиля. — «Автомобильная и тракторная промышленность», 1951, № 1, с. 18—20.
9. Машиностроение. Сборник переводов и обзор иностранной периодической литературы. Издательство И. Л., 1956, № 6, с. 55—69.
10. Ч у д а к о в Е. А. Пути повышения экономичности автомобиля. АН СССР, 1948, с. 145—150.
11. Absorben Braking Force Aids Acceleration, The Commercial Motor, October, 6, 1961, p. 323.
12. A Flywheel — driven Bus, Bus and Coach, 1951, July, p. 23.
13. A Challenge to Diesel Railcars? Gas and Oil Power, 1956, v. 51, N611, p. 53.
14. Automobile, 1971, 18/11, № 9, p. 15.
15. Clerk R. C., British Patent, № 728122.
16. Clerk R. C. — The Utilization of Flywheel Energy, S. A. E. Transactions, v. 72, 1964.
17. Chilton R., Regeneration Transmission Sistem, Pat. U. S. A., № 2, 118, 590.
18. Critchfield R., Flywheel, Pat. U. S. A. № 2, 341, 695.
19. Der erste Gyrodus, Umshau, 1951, Marz, № 5, S. 142—143.
20. D ureauhoux O., Pat U. S. A., № 3, 208, 303.



21. Electric Tractoin without current Collection, Railway Gazette, 1948, Oct. 8, № 15, p. 410.
22. Electro — Gyro — Something new under Sun, Power Generation, 1948, March, v. 92, № 3, p. 114.
23. Engineering, 1947, June 27, v. 163, N 4248, p. 540; June 20, v. 183, N 4769, p. 547; June 13, v. 183, N 4768, p. 524.
24. Electrical Times, 1947, Sept., 11, v. 112, N 2914, p. 296.
25. Electro — Technick, 1951, Marz, 5, N 3, p. S. 113—115.
26. Engineering and Minign Journal, 1951, v. 152, N 3, p. 107.
27. Engineer, 1959, v. 207, N 5384, p. 541—543.
28. E r b a n R., Driving Energy Consumer, Pat. U. S. A. N 2, 196, 064.
29. F l i c k E., Electro — gyro Andrivng, Electro — Technick, 1947, v. 2, N 20, p. 306—308.
30. F i s h e r D., Der Oerlicon — Gyrobus, S. T. Z., 1951, Mai 24, N 20 — 21, S. 416—422.
31. Flywheel Engines, Technology Review, 1950, November, v. 53, p. 16.
32. Flywheel Feasibility Study and Demonstration, Final Report, Lockheed Missiles and Space Co., Sunnivale, California, April 30, 1971, p. 1.1 — 10.2.
33. Hweizerishe Bauzeitung, 14, April, 1951, N 15, p. 198—203.
34. Lanchester F. W., British Patent 7949/1950, 1905.
35. M e y e r F. W., Hydraulic Flywheel, Pat. U. S. A., N 2, 404, 515.
36. Revue mensuelle L'Industrie des Voies Ferries et des Transport Automobiles, 1956, N 514, p. 86—89.
37. R a b e n h o r s t D. W., Primary Energy Storage and Super Flywheel, Technical Memorandum, The Johns Hopkins University, October, 1970, p. 1—56.
38. R e i n h a r t T. I., Pat. U. S. A., N 3, 296, 886.
39. R u s s e l l S. D., Flywheel, Pat. U. S. A. N 2, 474, 370.
40. S c o t t D., Transmission Flywheel Stores Energy while Braking, Automotive Industries, 1954, August I, v. III, p. 64.
41. S o h o n H, Variable Inertia Device, Pat. U. S. A., N 2, 603, 103.
42. The Gyrodus — limited use in Britain, Transport World, 1955, v. 117, N 3673, p. 46—47.
43. Tde Oerlicon Electrogyro, Automobile Engineering, December, 1955, v. 45, № 13, p. 559—566.
44. The Gyrobus in practical Form, Commercial Motor, 1950, Dec., 22, v. 92, N 2380, p. 404.
45. D v a l i R. R. G u l i a N. V. The Coiled Band Mechanism for the Recovery of the Mechanical Energy of Vehicles, The Journal of Mechanisms, New-York, 1968, N 3, U. S. A.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
Самостоятельные инерционные двигатели . . . . .	7
Гиротранспорт . . . . .	7
Конструкции маховиков и элементы их расчета . . . . .	22
Инерционные рекуператоры и гибридные схемы . . . . .	31
Рекуперирование энергии торможения . . . . .	31
Гибридные схемы автомобильных силовых агрегатов . . . . .	43
Заключение . . . . .	56
Тематический указатель литературы . . . . .	60

Нурбей Владимирович Гулиа

## ИНЕРЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Редактор Б. Б. Соловьев

Технич. редактор Т. А. Гусева

Корректор С. Н. Пафомова

---

Сдано в набор 13/XII—73 г. Подписано в печать 8/IV—74 г.

Бумага 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub> тип. № 2 Печ. л. 2 Усл. п. л. 3,36

Уч. изд. л. 3,28. Тираж 20 000 Т—01697

Изд. № 1—5 1/14 № 5835 Зак. тип. 632 Цена 10 коп.

Изд-во «Транспорт», Москва, Басманный туп., 6а

---

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при  
Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств,  
полиграфии и книжной торговли  
Москва, И-41, Б. Переяславская ул., дом 46



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗДАТЕЛЬСТВ, ПОЛИГРАФИИ И КНИЖНОЙ ТОРГОВЛИ

## ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТРАНСПОРТ»

Имеются в продаже книги и плакаты:

**ВАРШАВСКИЙ И. Л., МАЛОВ Р. В.** Как обезвредить отработавшие газы автомобиля. 1968. 128 стр. Ц. 36 коп.

**ЛАНДО С. Я.** Ремонт автомобильных деталей из алюминиевых сплавов. 1972. 39 стр. Ц. 14 коп.

**МЕЛКОВ М. П.** Твердое осталивание автотракторных деталей. Изд. 3-е, перераб. и доп. 1971. 222 стр. Ц. 1 р. 06 к.

**Методические рекомендации по научной организации труда в автотранспортных предприятиях.** 1969. 190 стр. (Гос. науч.-исслед. ин-т автомобильного транспорта. Ленинградский филиал. Госавтодорожн. КазНИПИАТ). Ц. 57 коп.

**МИЛУШКИН А. А.** Требования эксплуатации к безопасности конструкций грузовых автомобильных транспортных средств. 1972. 46 стр. (Гос. науч.-исслед. ин-т автомобильного транспорта). Ц. 11 коп.

**ТИХОНИН И. Я. и др.** Автомобильные перевозки животных. 1971. 81 стр. Ц. 23 коп.

**Нормы расхода запасных частей, материалов и инструментов на техническое обслуживание и текущий ремонт автомобилей ГАЗ-21 «Волга», ГАЗ-20 «Победа», «Москвич-407» и «Москвич-423».** 1972. 128 стр. 42 коп.

**Нормы расхода запасных частей, материалов и инструментов на капитальный ремонт автомобилей ГАЗ-21 «Волга», ГАЗ-20 «Победа», «Москвич-407» и «Москвич-413».** 1972. 142 стр. 55 коп.

**Типовые нормы времени на ремонт автомобиля «Москвич-408» в условиях автотранспортных предприятий.** 1972. 40 стр. 16 коп.



**Типовые пооперационные нормативы трудоемкости на техническое обслуживание автомобилей МАЗ-500, МАЗ-503, МАЗ-504.** 1972. 48 стр. 18 коп.

**Типовые пооперационные нормативы трудоемкости на техническое обслуживание автомобилей «Москвич-407» и «Москвич-408».** 1972. 24 стр. 11 коп.

**Типовые нормы времени на ремонт автомобилей КраЗ-256Б в условиях автотранспортных предприятий.** 1972. 48 стр. 19 коп.

**Ограждай рабочее место! Электросварка ослепляет.** Плакат. 1 л. 1972. 20 коп.

*Литература продается отделениями издательства «Транспорт» при управлениях железных дорог, центральным магазином «Транспортная книга» (107073, Б-78, Садово-Спасская ул, д 21).*

*Заказать книги и плакаты можно также непосредственно в отделе книжной торговли издательства (103092, Москва, К-92, Сретенка, д. 27/29).*

*По желанию заказчиков литература высылается по почте наложенным платежом.*



