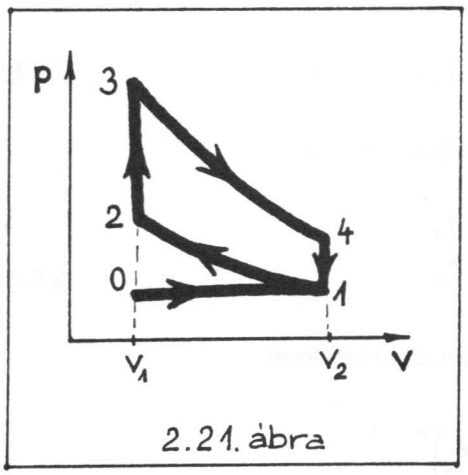
2.4.2. A termodinamika második főtétele korlátot szab a hatásfok javításának

A műszaki fejlesztés lehetőségei jóval szerényebbek, mint ezt először gondolnánk. A hőerőgépeken a hőenergiának – a termodinamika II. főtétele szerint – elvileg is csak egy bizonyos hányada alakítható át munkává.

Tudjuk, hogy adott $T_1 > T_2$ hőmérsékleti határok között a felvett hőnek legfeljebb η szorosa hasznosítható munkaként, ahol

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \tag{2.49}$$

Ez a hatásfok azonban csak a Carnot körfolyamattal érhető el, s az autók motorja az Otto, illetve Diesel körfolyamattal működik.



2.21. ábra

A 2.21. ábra az Otto motor működését mutatja. A 0-1 a szívásnak, az 1-2 a sűrítésnek, a 2-3 a robbanásnak, a 3-4 a munkavégzésnek; a 4-1 és az 1-0 pedig a kipufogásnak felel meg. Robbanáskor (2-3 szakasz) a hengerben a nyomás hirtelen megnő. Munkavégzéskor (3-4) a gázkeverék valójában hőleadás nélkül tágul. A kipufogószelep nyitásakor a nyomás gyorsan csökken (4-1 szakasz), majd az égéstermék állandó nyomás mellett távozik a hengerből (1-0 szakasz). Ezután a folyamat ismétlődik. A dízel körfolyamat ettől egyebek között abban különbözik, hogy a hengerben – majdnem állandó nyomáson – lassú égés megy végbe (2-3 szakasz).

Az Otto körfolyamat hatásfoka a következő egyszerű számítással határozható meg. Definíció szerint

$$\eta = \frac{Q_{felvett} - Q_{leadott}}{Q_{felvett}} \tag{2.50}$$

Az Otto körfolyamatban a 2-3 szakaszon történik hőfelvétel, s a 4-1 szakaszon van hőleadás. A hatásfok tehát az

$$\eta = \frac{c_v\left(T_3 - T_2\right) - c_v\left(T_4 - T_1\right)}{c_v\left(T_3 - T_2\right)} = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \cdot \frac{T_2}{T_1} \tag{2.51}$$

alakban fejezhető ki. Az adiabata egyenlet $TV^{\kappa-1}$= áll. alakja szerint a 3-4 és 1-2 folyamatra felírhatók a

$$T_3 V_1^{\kappa-1} = T_4 V_2^{\kappa-1} \tag{2.52}$$

$$T_2 V_1^{\kappa-1} = T_1 V_2^{\kappa-1} \tag{2.53}$$

összefüggések. Az egyenleteket elosztva egymással

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \tag{2.54}$$

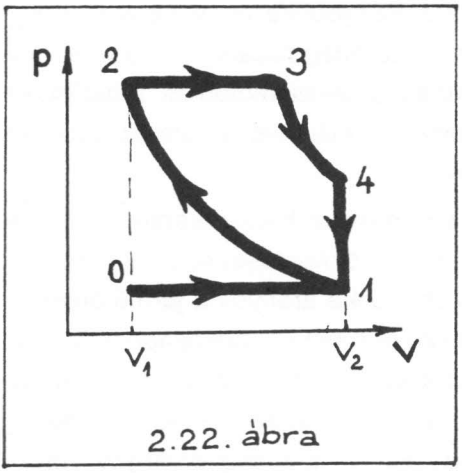
adódik, s így a hatásfok 2.54 és 2.52 felhasználásával

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa - 1}$$

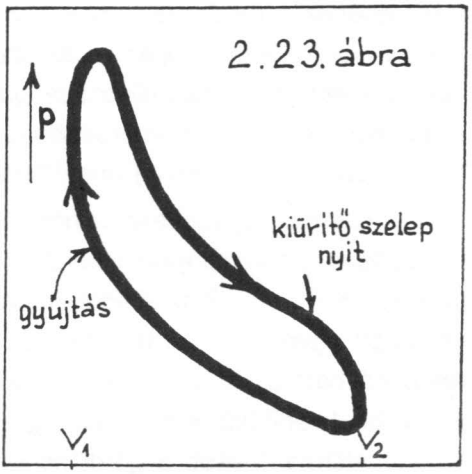
alakban is kifejezhető. Az Otto körfolyamat hatásfoka tehát nem függ a hőmérséklettől. A V_1 / V_2 arány a dugattyú által bezárt legkisebb és legnagyobb térfogat hányadosa, az ún. kompresszióviszony.

A példaként említett Skodának a kompresszióviszonya *8,5*. Ebből az adódik, hogy e motor lehető legnagyobb, azaz elvileg lehetséges hatásfoka *58* százalék.

A valóságos motornak a termikus hatásfoka ennél – említettük – mindenképpen kisebb: a valóságban az ideális körfolyamatokat nem tudjuk megvalósítani, több ok miatt sem. Nézzük az Otto-motort! Ebben szíváskor a hengerbe beáramló levegő örvényleni kezd, s emiatt mozgási energiája elvész. A valóságos gép hengereiben a sűrítés végén kisebb a nyomás, mint a tökéletes gépben, a hűtés és a tömítetlenség miatt. A tökéletes benzinmotor esetében föltettük, hogy az üzemanyag egy pillanat alatt elég. A valóságban ehhez hosszabb időre van szükség, ezért a diagramon az égési görbe (2-3 szakasz) nem párhuzamos a *p* tengellyel (2.22. ábra). A valóságban a kitágulás vonala (3-4 szakasz) is eltér az eszményitől, s a gázoknak a hengerből való eltávolítása is munkát igényel.



2.22. ábra



2.23. ábra

A valóságos motorokban méréssel veszik fel a *p-V* diagramot. A 2.23. ábra egy ilyen ún. indikátrodiagramot mutat, amelyen jól látható az eszményi Otto körfolyamat torzulása, ami a termikus hatásfokot általában *35-40 %*-ra csökkenti. A motor hasznos munkáját tovább csökkentik az egymáson elmozduló alkatrészei között keletkező súrlódási veszteségek és a segédberendezések hajtásából származó teljesítményveszteségek.

2.4.3. Hogyan csökkenthető a fogyasztás

Az autógyárak fejlesztő mérnökei és fizikusai arra törekednek, hogy a motor hatásfoka a lehető legjobban közelítse meg a tökéletes motornak a hatásfokát. A két érték közötti különbség – amint láttuk – tetemes, s ez főként a tökéletlen égésre vezethető vissza, vagyis arra, hogy az égéstérben az üzemanyag nem cserélődik ki teljesen, s hogy a motor részleges terhelésekor a benzin és a levegő keverékének az aránya eltér a kívánatostól. Az ebből származó energiaveszteség akár *15* százalékot is kitehet. A motorfejlesztők e veszteségeket az üzemanyagnak és a levegőnek a tökéletes keverésével (finomabb adagolásával) és – esetleg – több égéstérnek az alkalmazásával kívánják csökkenteni. Ezekkel a megoldásokkal a motor hatásfoka főként a jármű részleges terhelésekor javítható. (A tökéletesebb égést megvalósító – úgynevezett réteges feltöltésű – motornak a fejlesztésén több országbban is dolgoznak.) A részleges terheléshez tartozó hatásfok a motor vezérlésének a módosításával is javítható. Ez utóbbira irányul egyebek között az elektronikus gyújtás és az üzemanyag adagolásának meg a fékerőnek az elektronikus szabályozása. Javítható a benzinmotornak a hatásfoka a sűrítési viszony (a kompresszióviszony) növelésével is, ennek azonban határt szab az üzemanyag öngyulladása.

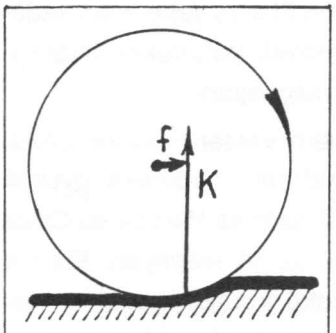
Az üzemanyag-fogyasztás nem csupán a motor hatásfokának a növelésével, hanem a kocsi menetellenállásának a csökkentésével is mérsékelhető. A gördülési ellenállás ellenében végzett munka arányos a jármű önsúlyával. Ezért egyre több alkatrész készül alumíniumból és műanyagból. S ezzel magyarázható az is, hogy a kisebb kocsik kevesebbet fogyasztanak. A keményebb felépítésű textil-, illetőleg acélradiál gumiabroncsnak *15,* illetőleg *25* százalékkal kisebb a gördülési ellenállása, mint a hagyományos abroncsoké. Ezért ezeket alkalmazva szintén energiát takaríthatunk meg, főként nagy sebességen. A köpeny nyomása is hatással van a fogyasztásra – ha a gumikat például *2,* hanem *3 bar* (atmoszféra) nyomásra töltjük fel, a gördülési ellenállás mintegy a felére csökken. A légellenállás a sebesség négyzetével, a leküzdésére fordított energia pedig a sebesség harmadik hatványával arányos mennyiség. Ezért a jármű légellenállásnak a csökkenésével – a

jármű áramvonalazásával – is jócskán csökkenthető a járművek üzemanyagfogyasztása. A lehetőségek nagyok – a mai személyautóknak a légellenállása ugyanis az elérhetőnek másfélszerese-háromszorosa. A gyorsítási munka főként a városi forgalomban nagy. Ez többnyire elkerülhetetlen. Ám a „sportos" vezető – az indokolatlan gyorsítások és fékezések miatt – tovább növeli kocsija fogyasztását, akár *25* százalékkal is, fölöslegesen. S ha már az üzemanyag pazarlásáról szó esett, hadd idézzünk fel még két dolgot: a porlasztásnak és a gyújtásnak az időszakos beállításával *5-10,* a gyári előírásnak megfelelő nyomáson tartott abroncsokkal pedig további néhány százaléknyi üzemanyag takarítható meg.

Azt, hogy mindez milyen eredményt hozhat, bizonyítják a japán kisautók: ezek *90 km/h* sebességen óránként *3,5-4 l* benzint fogyasztanak, s a benzin energiatartalmának – eszményi körülmények között – *40-45* százalékát hasznosítják, alakítják át mechanikai munkává.

3. A kerékpározás fizikája

A kereket az emberiség ősidők óta használja. A fatörzseken gördített nehéz kőtömböktől, a szekerek és hintók számtalan változatánál használjuk ki a gördülés súrlódást csökkentő hatását.



3.1. ábra

Vizsgáljuk meg a jelenség fizikai alapjait!

A gördülő kerekekkel kapcsolatos problémák megoldása során általában úgy idealizálunk, hogy feltételezzük azt, hogy a kerék csak egy pontban érintkezik az úttal. E pontban tapadási vagy csúszó súrlódás lép fel attól függően, hogy a kerék tisztán vagy csúszva gördül. Ez a szokásos leírás azonban nem ad számot a tiszta gördülés során fellépő gördülő ellenállásról!

A gördülő ellenállás magyarázatához úgy juthatunk el, ha figyelembe vesszük, hogy a gördülő kerék egy kissé mindig benyomja a talajt. A horpa-

dáson a kényszererő aszimmetrikussá válik (3.1. ábra) és ennek következtében $M = Kf$ nyomatékkal lassítja a kerék forgását. Amennyiben a kereket a tengelyénél fogva gyorsítjuk, akkor ennek az ellennyomatéknak a leküzdéséhez akkora F erő szükséges, hogy az

$$F_h \cdot r = K \cdot f$$

feltétel teljesüljön, azaz

$$F_h = K \frac{f}{r}$$

legyen.

A kapott eredmény jól tükrözi, hogy a sugár növekedésével a gördülő ellenállási erő egyre csökken. Az f hosszúság dimenziójú mennyiség értéke század vagy ezred cm nagyságrendű, így érthető, hogy a kerekes járművek használatával a súrlódási veszteségek erősen csökkennek.

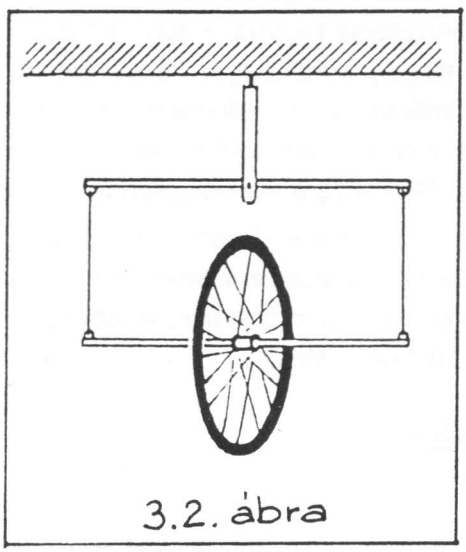
Igen érdekes azonban, hogy az emberi erővel hajtott kerekes jármű, a kerékpár a modern járművek kifejlesztésének korszakában, a múlt század végén kissé lemaradt a gépkocsik és a vasúti járművek mögött. A mai kerékpárok megalkotásában döntő lépést a coventryi Starley tette meg 1885-ben, amikor „biztonsági kerékpárján" egyforma méretű kerekeket alkalmazott, amelyek közül a hátsót láncáttétellel kellett meghajtani.

A Starley-féle kerékpárral Angliában, a modern versenysportok szülőhazájában hamarosan versenyeket kezdtek rendezni. Versenyre gyűltek össze 1889. május 18-án is Belfastban. Az abszolút esélyes Harvey du Cross dublini papírkereskedő volt, aki addig minden versenyt megnyert. Ezen a napon azonban bármennyire is igyekezett fakerekű kerékpárjával, a versenyt elveszítette. A vereség oka egy különleges kerékpár volt. A győztes gépén a belfasti John Boyd Dunlop által tervezett gumiabroncsok feszültek. Cross azonban a vereséget is saját hasznára fordította; a feltalálóval közösen részvénytársaságot alapított a gumiabroncsok forgalmazására. Ekkor vált a kerékpár milliók gyors és biztos közlekedési eszközévé.

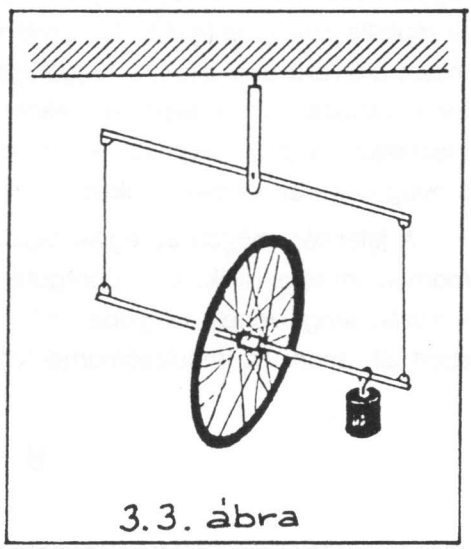
3.1. Akrobaták-e a kerékpárosok?

A ma már nevetséges kérdésre adott helytelen válasz sokáig hátráltatta a kerékpár kifejlesztését. Sokan még az 1880-as évek végén is a három- vagy négykerekű „velocipéd" fejlesztésére bíztatták az „újmódi kerekes vaspari pák konstruktőreit", mert az egy- és kétkerekű járművek állandó egyensúlyozása szerintük csak a „gimnasztikában rendkívül jártasaknak okozhat örömet".

Ma, amikor hazánkban szinte minden egészséges felnőtt ember gyermekkora óta kerékpározik, tudjuk, hogy a biciklizés nem művészet, s elsajátításához nem annyira egyensúlyozni kell megtanulni, hanem inkább azt kell elsajátítani, hogy hogyan hagyjuk a gépet szinte magától haladni. Hétköznapi tapasztalata a kezdő kerékpárosoknak az is, hogy minél gyorsabban fut alattuk a gép, annál könnyebb az egyensúlyt tartani; problémát igazán csak az indulás és megállás jelent.

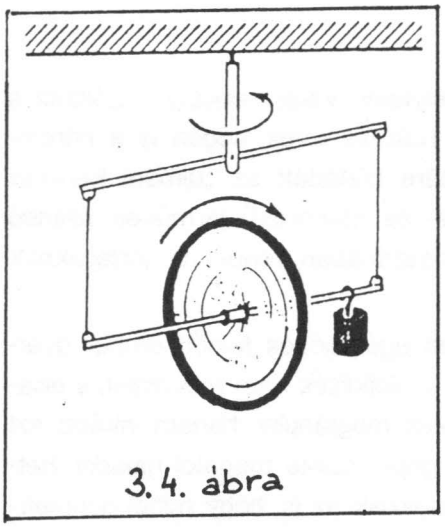


3.2. ábra



3.3. ábra

Mindezek mögött a forgó kerekek különleges tulajdonsága rejlik! A mellékes hatásoktól függetlenítve egyszerűen tanulmányozhatjuk a forgó biciklikerék mozgását a 3.2. ábrán látható elrendezésben; egy jól kiegyensúlyo-



3.4. ábra

zott biciklikereket vízszintes tengelylyel úgy függesztettünk fel, hogy a kereket tartó keret függőleges tengely körül elfordulhasson, ugyanakkor a kerék tengelye lebillenhessen. (A lebillenést a kereket tartó rudazat csuklói teszik lehetővé). A 3.3. ábra azt mutatja, hogy a tengely egyik oldalára akasztott súly hatására a nyugvó kerék tengelye ferde helyzetbe kerül. Megváltozik azonban a helyzet, ha a kereket először gyors forgásba hozzuk, s csak azután terheljük meg a tengelyt. Ekkor a kerék ahelyett, hogy lebillenne, a tartó kerettel együtt, lassú forgásba kezd a felfüggesztésen átmenő függőleges tengely körül. A forgásirányokat a 3.4. ábra mutatja. Ha a kerék forgásirányát változatlanul hagyva, a súlyt a tengely másik oldalára akasztjuk, a függőleges tengely körüli forgás iránya ellentétesre változik. A meglepő jelenséget tömören és szemléletesen úgy jellemezhetjük, hogy a forgó kerék tengelye a rá gyakorolt erő hatására mindig a nyugvó keréknél bekövetkező elmozdulás irányára merőlegesen fordul el.

A jelenség mögött az egyik legalapvetőbb fizikai törvény, az impulzusmomentum tétel rejlik. A megpörgetett kerék $\underline{N}$ impulzusmomentum vektora a kerék tengelyének irányába mutat úgy, hogy a forgásiránnyal jobbrendszert alkosson. Az impulzusmomentum tétel értelmében

$$\underline{M} = \frac{d\underline{N}}{dt}$$

ahol $\underline{M}$ a kerékre ható forgatónyomaték vektor. A 3.5. ábra szerint az $\underline{F}$ erő forgatónyomatéka a kerék síkjában van és merőleges az impulzusmomentum vektor irányára. Ez azt jelenti, hogy a tengelyre merőleges erő hatására az impulzusmomentum iránya változik meg. Az impulzusmomentum iránya