J. I. PERELMAN

Huvitav MEHHAANIKA

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS

J. I. PERELMAN

Huvitav MEHHAANIKA

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1950

Originaali tiitel:

Я. И. Перельман.

Занимательная механика

Огиз
Государственное Издательство
Технико-теоретической Литературы
Москва/Ленинград 1948

Tõlkinud V. Masing
Kaas ja tiitel Ü. Habicht.

2

EESSÕNA.

Käesolevas viiendas väljaandes, mis ilmus pärast autori surma, on meie poolt nii tekstis kui ka joonistes tehtud mõningad parandused ja muudatused. Selline parandamine ei osutunud nii lihtsaks, nagu oleks võinud algul arvata. Asi ei seisne siin mitte ainult selles, et ühe inimese teadmised on piiratud, et on raske olla eriteadlane kõigil neil aladel, peamiselt tehnikas, mida käsitletakse selles raamatus koos mehhaanikaga. Meile näib, et antud juhul põrkame kokku ka põhimõttelise raskusega. Asja olemuse selgitamiseks toome võrdluse. Jules Verne'i romaanid omavad pälvitud kuulsust: nende lugemine on noorsoole mitte ainult põnev, vaid toob lugejaile ühtlasi ka erakordset kasu. Kuid mida võib öelda tema parimast romaanist „Kaheksakümmend tuhat kilomeetrit vee all"? Kas võib näiteks Ned Land'i või Conseil'i iseloomude kirjeldust võrrelda Andrei Bolkonski ja Pierre Bezuhhovi psühholoogilise analüüsiga, mille annab L. Tolstoi teoses „Sõda ja rahu"? Kas võib laevaehitajat rahuldada see lõppkokkuvõttes pealiskaudne ja ebatäpne „Nautiluse" kirjeldus, mille me leiame Jules Verne'il, kas võib ihtüoloogi rahuldada veealuse loomariigi kirjeldus selles romaanis jne., jne? Arusaadavalt, mitte. Ja selleks polegi vajadust. Romaan noorsoole pole paljuköiteline teaduslik entsüklopeedia. Tegelaste andekas, kuid tahtlikult skematiseeritud kujutamine, loodusnähtuste ja tehnika lihtsustatud kirjeldus on niisuguses romaanis mitte ainult lubatud, vaid täiesti omal kohal.

Seesama kehtib ka „Huvitava mehhaanika” kohta. Mõnede selles kirjeldatud nähtuste igakülgne uurimine teeks suuri raskusi; seepärast keskendabki J. I. Perelman lugeja tähelepanu ainult ühe või teise füüsikaseaduse osa selgitamisele. Võib-olla on hea, et kadunud autor polnud, nagu Jules Verne'gi, spetsialist-teadlane, kuid nüüd, kus raamatu toimetamine on tulnud eriteadlaste kätte, seisneb nende ülesanne esijoones selles, et parandada otsesed ebatäpsused, säilitades niipalju kui võimalik raamatu vaimu.

Me püüdsime J. I. Perelmani raamatut täiendada mõnede meie tehnikast ja tegelikkusest võetud näidetega. Osutame eriti ülesandele metsamaterjali vedavate lotjade tüürimisest Volgal (lk. 161). See tähelepanuväärne näidis vene arukusest võeti hiljem üle Ameerika Ühendriikide poolt, kus seda hakati rakendama Mississippi jõel.

Autori materjali mõningal määral muutes pidasime niisuguse ümbertöötamise peamiseks tingimuseks säilitada esituse värskus ja huvitavus — andeka popularisaatori J. I. Perelmani väärtuslike raamatute kaks eriomadust, mille tõttu need on võitnud kõige laiemate lugejateringide poolehoiu. Toimetamisel kasutasin dotsent V. S. Štšedrovi kasulikke näpunäiteid, mille eest avaldan talle oma siirast tänu.

Prof. *I. Štaerman*

AUTORI EESSÕNAST.

Füüsika-alaste teadmiste levik ei vasta meil kahjuks veel selle teaduse erilisele tähtsusele. Eriti udused on laiades ringides kujutlused sellest füüsika osast, millega alustatakse füüsika õppimist: mehhaanikast, õpetusest liikumisest ja tungidest. Aga „kes ei tunne liikumist, see ei saa aru loodusest" (Aristoteles).

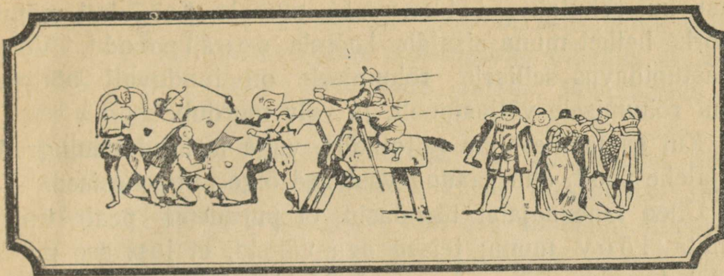
Kuigi mehhaanika küsimuste alla on paigutatud rohkesti lehekülgi ka „Huvitava füüsika" mõlemas raamatus, pidasin siiski kasulikuks pühendada mehhaanikale samas laadis kirjutatud eri raamatu.

„Huvitav mehhaanika" ei pea otstarbekohaseks tutvustada lugejat teaduse viimaste saavutustega seni, kuni pole selgitatud teaduse põhialused. Ta ei esita muide oma ainet õpiku süstemaatilisusega.

Eeldades lugejas mõningaid, kas või uduselt omandatud või pooleldi unustatud teadmisi, püüab raamat neid värskendada ja täpsustada, võttes arutusele rea ühes või teises suhtes huvitavaid mehhaanika-alaseid ülesandeid. Raamat ei pretendeeri ka mehhaanika kõigi osade ammendavale käsitlusele: paljudki huvitavad küsimused on jäänud käsitlemata, teisi on vaevalt puudutatud. „Huvitava mehhaanika" eesmärgiks on äratada uinuvat mõtet ja arendada huvi mehhaanikaga tegelemiseks; huvi tundev lugeja otsib ja omandab siis juba ise puuduvad teadmised.

Vastupidi populaarsetes raamatutes kehtivale tavale esinevad „Huvitavas mehhaanikas" matemaatilised arvutused. Ma olen teadlik vastumeelsuses, mida paljud tunnevad raamatute selliste kohtade suhtes. Ja siiski ma ei väldi arvutusi, sest pean arvutusteta omandatud füüsika-alaseid teadmisi kõikuvaiks ja praktiliselt viljatuiks. Pole mõeldav mingil määral kasulike ja kindlate teadmiste omandamine füüsikast ja eriti mehhaanikast, vältides nende teadmiste juurde kuuluvaid lihtsamaid arvutusi.

Raamatu loomisel on ammutatud materjali igalt poolt. See pole õpik, vaid vaba raamat, mille ülesandeks on huvitavate kõrvutamiste kaudu tõsta huvi aine vastu. Tuues rea näiteid mehhaanikaseaduste rakendamise kohta tehnikas, on raamatusse võetud samuti mehhaanika rakendusi spordist, tsirkuse-etendustest ja teistelt ootamatutelt aladelt. Koostades raamatut, mis peab olema huvitav kõigile, ei saa käia šabloonilist teed.



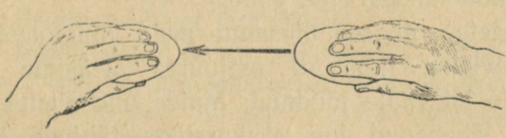
ESIMENE PEATÜKK.

MEHHAANIKA PÕHISEADUSED.

Ülesanne kahest munast.

Hoides käes muna te lööte teise munaga vastu seda (joon. 1). Mõlemad munad on ühetugevused ja põrkavad kokku ühesuguste pinnaosadega. Kumb munadest peab purunema: kas löödav või lööv?

Selle küsimuse esitas mõne aasta eest Ameerika ajakiri „Teadus ja leiutised". Ajakiri väitis, et kogemuste kohaselt puruneb sagedamini „see muna, mis l i i k u s", teiste sõnadega — l ö ö v muna.



Joon. 1. Kumb muna puruneb?

„Munakoorel," seletab ajakiri, „on kumer pind, kusjuures rõhumine mõjub löögi puhul liikumatule munale väljastpoolt; kuid on teada, et munakoor, nagu iga võlv, peab väljastpoolt tulevale rõhumisele hästi vastu. Teisiti on aga asi, kui rõhutakse liikuvale munale. Sel juhul mõjub põrke hetkel muna sisaldis koorele seestpoolt. Võlvi vastupidavus sellisele rõhumisele on tunduvalt nõrgem kui rõhumisele väljastpoolt, ja võlv murdub."

Kui sama ülesanne esitati ühe väga levinud Leningradi ajalehe poolt, olid saadud vastused õige mitmekesised. Ühed lahendajaist tõendasid, et purunema peab tingimata lööv muna; teised aga väitsid, et just see muna jääb terveks. Põhjendused näisid olevat ühteviisi tõepärased, kuid sellest kõigest hoolimata on mõlemad väited siiski täiesti ekslikud. On üldse võimatu arutlusega otsustada, kumb kahest kokkulöödavast munast peab purunema, sest lööva ja löödava muna vahel pole vahet olemas. Ei saa toetuda asjaolule, et lööv muna liigub, löödav muna on aga liikumatu. Liikumatu, kuid mille suhtes? Kui Maa suhtes, siis me ju teame, et meie planeet liigub ise tähtede keskel, tehes kümmekond mitmesugust liikumist; kõigist neist liikumistest võtavad osa nii „löödav muna" kui ka „lööv muna" ja keegi ei saa öelda, kumb neist liigub tähtede keskel kiiremini. Et ennustada munade saatust liikumise ja paigaloleku kui tunnuste järgi, tuleks abiks võtta kogu astronoomia ja määrata kummagi muna liikumine kinnistähtede suhtes. Aga seegi ei aitaks, sest üksikud nähtavad tähed liiguvad samuti ja nende kogum, Linnutee, liigub muude täheparvede suhtes.

Nagu näete, viib see ülesanne meid munadest universumi sügavikku, ilma et seejuures oleksime ülesande lahendusele lähemale jõudnud. Muide, me oleme lahendusele siiski lähenenud, kui ekskursioon tähtede keskel on meid aidanud aru saada sellest tähtsast tõest, et keha liikumine, ära märkimata mõnda teist keha, mille suhtes see liikumine toimub, on lihtsalt mõttetus. Üksik keha omaette võetult ei saa liikuda; liikuda võib vähemalt kaks keha — teineteisele läheneda või teineteisest kaugeneda. Löögil kokkupõrkavad munad on aga ühesuguses liikumises: nad lähenevad teineteisele — see on kõik, mida võime öelda nende liikumise kohta. Kokkupõrke tulemus ei sõltu sellest, kumba neist suvatseme pidada liikumatuks ja kumba liikuvaks *.

Kolmsada aastat tagasi kuulutas Galilei ühtlase liikumise ja paigaloleku relatiivsust. Seda klassikalise mehhaanika relatiivsusprintsiipi ei tohi ära vahetada Einsteini relatiivsusprintsiibiga, mis esitati alles meie sajandi algul ja mis osutub esimese printsiibi edasiarendamiseks.

Reis puuhobusel.

Öeldust järeldub, et ühtlane sirgjooneline liikumine pole eraldatav paigalolekust ümbritsevate kehade vastassuunalise ühtlase ja sirgjoonelise liikumise puhul. Öelda „keha liigub jääva kiirusega" ja „keha on paigal, aga keha ümbrus liigub ühtlaselt vastupidises suunas" tähendab väita üht ning sedasama. Rangelt võttes, me ei pea ütlema ei nii ega teisiti, vaid peame ütlema, et keha ja keha ümbrus liiguvad teineteise suhtes. Isegi meie päevil pole see mõte omandatud kaugeltki kõikide poolt, kes tegelevad mehhaanika ja füüsikaga. Siiski polnud see mõte võõras „Don Quijote" autorile, kes elas kolm sajandit tagasi ega olnud lugenud Galileid. See mõte esineb ühes Cervantese teose naljakas stseenis — kirjelduses kuulsa rüütli ja tema relvakandja reisust puuhobusel.

„ „Istuge hobuse selga," seletati Don Quijote'le. „Tuleb teha ainult üht: pöörata pulka, mis on hobuse kaelas, ja ta viib teid õhus sinna, kus teid ootab Malambruno. Et aga kõrgus ei põhjustaks teil peapööritust, tuleb sõita kinniseotud silmadega."

Mõlemal seoti silmad, ja Don Quijote puudutas pulka."

---

* Siin selgitatakse tähtsat ideed, mis on täpselt sõnastatud järgmises lõigus. Tuleb aga meeles pidada, et Maal kokkupõrkavad kehad pole tõeliselt isoleeritud. Nii näiteks võib muna sellise kiirusega liikuma panna, et õhurõhk temale osutub purustavamaks kui põrge. (Toim. märkus.)

Juuresolijad hakkasid rüütlit veenma, et ta juba kihutab läbi õhu „kiiremini kui nool".

„ „Olen valmis vanduma," ütles Don Quijote relvakandjale, „et veel kunagi oma elus pole ma ratsutanud rahulikuma kõnnakuga hobusel. Kõik läheb nii, nagu minema peab, ja tuul puhub."

„See on õige," vastas Sancho, „ma tunnen sellist värsket tuuleõhku, nagu puhuks minu peale tuhat lõõtsa."

Nii tegelikult oligi, sest nende peale puhuti mitmest suurest lõõtsast."

Cervantese puuhobune on algkujuks paljudele atraktsioonidele, mis on meie ajal välja mõeldud rahva lõbustamiseks näitustel ja parkides. Nii üks kui teine rajaneb sellele, et mehhaanilise efekti põhjal on täiesti võimatu ühtlast liikumist paigalolekust eraldada.

Terve mõistus ja mehhaanika.

Paljud on harjunud vastandama paigalolekut liikumisele nagu taevast maale ja tuld veele. Muide, see kõik aga ei takista neid vagunis ennast ööbima seadmast, hoolimata sellest, kas rong seisab või kihutab edasi. Teoorias aga vaidlevad needsamad inimesed pahatihti veendunult vastu õigusele pidada edasikihutavat rongi liikumatuks, kuid rööpaid ja maad nende all ning kogu ümbrust vastassuunas liikuvaiks.

„Kas masinisti terve mõistus lubab sellist tõlgendust?" küsib Einstein, esitades seda vaatekohta. „Masinist vastab, et ta kütab ja määrib vedurit, mitte aga ümbrust; järelikult peab ka tema töö tulemus, s. o. liikumine, ilmnema veduril."

Esimesel pilgul näib see põhjendus olevat üsna kaaluv, peaaegu otsustav. Kuid kujutlege, et rööpad on asetatud piki ekvaatorit ja rong kihutab lääne suunas, vastupidiselt Maa pöörlemisele. Nüüd jookseb ümbrus rongile vastu, ja kütet tuleb kulutada ainult selleks, et takistada vedurit tagasi liikumast, õigemini, et aidata veduril veidigi maha jääda ümbruse liikumisest ida suunas. Kui masinist sooviks, et rong ei võtaks osa Maa pöörlemisest, tuleks tal vedurit kütta ja määrida nii, nagu see oleks tarvilik umbes 2000-kilomeetrise tunnikiiruse saavutamiseks.

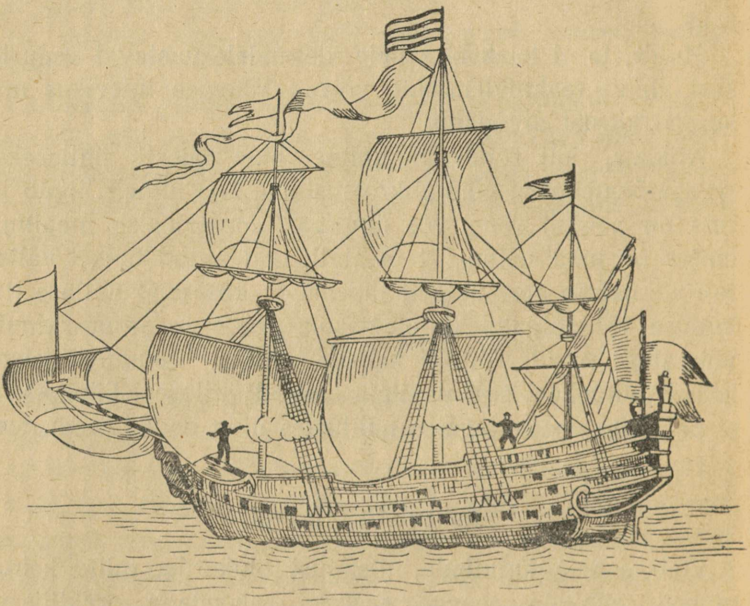
Muide, ta ei leiakski sellele ülesandele vastavat vedurit, sest ainult reaktiivlennukid võivad lähemas tulevikus niisugust kiirust arendada.

Niikaua, kui rongi liikumine jääb täiesti ühtlaseks, polegi õigupoolest võimalik otsustada, mis nimelt liigub ja mis on paigal: rong või ümbrus. Materiaalse maailma ehitus on juba selline, et ta alati, igal antud hetkel välistab võimaluse absoluutselt lahendada küsimust ühtlase liikumise või paigaloleku olemasolu kohta ja annab ainult võimaluse uurida ühtede kehade ühtlast liikumist teiste kehade s u h t e s, sest vaatleja osavõtt ühtlasest liikumisest ei peegeldu vaadeldavates nähtustes ning nende seadustes.

Kahevõitlus laeval.

Võib endale kujutleda niisugust olukorda, mille kohta mõned võib-olla peavad raskeks rakendada praktiliselt relatiivsusprintsiipi. Kujutlege näiteks, et liikuva laeva pardal on kaks laskurit, kes on suunanud teineteise vastu oma relvad (joon. 2). Kas mõlemad vastased on täiesti ühesugustes tingimustes? Kas laskuril, kes seisab seljaga käila poole, pole õigus kaevata, et tema poolt lastud kuul liigub aeglasemalt kui tema vastase kuul?

Muidugi, merepinna suhtes liigub laeva liikumisele vastassuunas lastud kuul aeglasemalt kui liikumatul laeval, kuna käila suunas lastud kuul liigub kiiremini. See kõik aga ei riku mingil määral kahevõitluse tingimusi: kuul, mis on lastud ahtri suunas, lendab temale l ä h e n e v a märklaua poole, nii et laeva ühtlasel liikumisel kuuli kiiruse puudujääk kaetakse täpselt vastutuleva märklaua kiirusega; käila suunas lastud kuul aga peab jõudma järele märklauale, mis kaugeneb kuulist kuuli kiirusele laeva liikumisest juurde tulnud kiirusega.



Joon. 2. Kumma kuul tabab vastast varem?

Lõpptulemusena liiguvad mõlemad kuulid oma märklaudade suhtes täpselt nii, nagu toimuks see liikumatul laeval.

Pole liigne lisada, et kõik öeldu kehtib ainult laeva suhtes, mis liigub sirgjooneliselt ning jääva kiirusega.

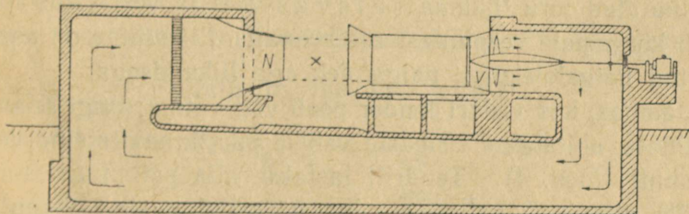
Siin on kohane esitada väljavõte sellest Galilei raamatust, milles oli esmakordselt avaldatud klassikaline relatiivsusprintsiip (see raamat, olgu öeldud, oleks oma autori peaaegu viinud inkvisitsiooni tuleriidale).

„Asuge oma sõbraga avarasse ruumi suure laeva pardal. Kui laeva liikumine on ü h t l a n e, siis te ei saa mitte mingisuguse nähtuse põhjal otsustada, kas laev liigub või on paigal. Hüpates te läbite põrandal samad vahemaad, nagu liikumatulgi laeval. Laeva kiire liikumise tõttu teie ei tee ahtri poole pikemaid hüppeid kui käila poole, kuigi teie hüppe ajal õhus olles liigub põrand teie all hüppele vastassuunas. Visates mõne eseme oma sõbrale teil pole tarvis viskel ahtrist käila poole pingutada end rohkem kui vastassuunalisel viskel ... Kärbsed lendavad kõigis suundades, eelistamata seda poolt, mis on lähem ahtrile" jne.

Nüüd on selge see vorm, milles tavaliselt väljendatakse klassikalist relatiivsusprintsiipi: „Mingis süsteemis toimuva liikumise iseloom ei sõltu sellest, kas see süsteem on paigal või liigub ta maapinna suhtes sirgjooneliselt ning ühtlaselt."

Aerodünaamiline toru.

Praktikas osutub mõnikord väga kasulikuks asendada liikumine paigalolekuga ja paigalolek liikumisega, toetudes seejuures klassikalisele relatiivsusprintsiibile. Et uurida õhutakistuse mõju läbi õhu liikuvale lennukile või autole, uuritakse tavaliselt „pöördnähtust": liikuva õhu-



Joon. 3. Aerodünaamilise toru pikilõige. Kandepinna või lennuki mudel riputatakse katseruumi (×). Õhk, mille imeb sisse ventilaator *V*, liigub nooltega näidatud suunas, tungib läbi kooniliselt kitseneva toru *N* katseruumi ja imetakse siis uuesti torusse.

voolu mõju paigalseisvale esemele. Laboratooriumis püstitatakse lai aerodünaamiline toru (joon. 3), tekitatakse selles õhuvool ja uuritakse selle voolu mõju liikumatult ülesriputatud lennuki- või automudelile. Saadud tulemused on praktikas eduga rakendatavad, kuigi nähtus tegelikult toimub otse vastupidiselt: õhk on liikumatu, lennuk või auto aga läbib teda suure kiirusega.

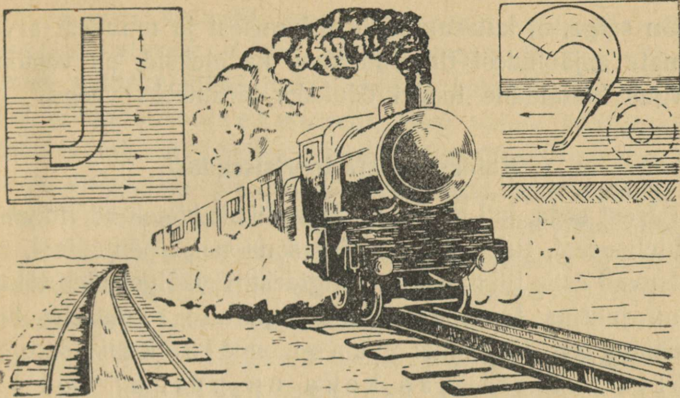
Praegu on olemas sedavõrd suuri aerodünaamilisi torusid, et neisse võib paigutada mitte ainult vähendatud mudeli, vaid tavalise suurusega lennukikere ühes propelleriga või auto. Õhu kiirust torus võib suurendada hääle kiiruseni.

Rongi täiel käigul.

Teise näite klassikalise relatiivsusprintsiibi tulemusrikka rakendamise kohta võtame raudteepraktikast. Mõnikord täidetakse tender veega rongi täiel käigul. See saavutatakse ühe üldtuntud mehhaanikanähtuse teravmeelse „ümberpööramise" abil, ja nimelt: kui veevoolusse lasta püsttoru, mille alumine ots on painutatud vastu voolu (joon. 4), siis tungib voolav vesi sellesse nõndanimetatud Pitot' torusse ja jääb selles püsima kõrgemal voolu pinnast teatava, voolukiirusest sõltuva suuruse H võrra. Raudteeinsenerid „pöörasid ümber" selle nähtuse: nad panevad painutatud toru liikuma s e i s v a s vees ja vesi torus tõuseb kõrgemale veepinnast reservuaaris. Liikumine on asendatud paigalolekuga, paigalolek aga liikumisega.

Jaamas, kus veduri tender peab vett võtma rongi seisma jätmata, ehitatakse rööbaste vahele pikk kraavitaoline veemahuti (joon. 4). Tendrilt lastakse alla painutatud toru, mille alumine lahtine ots on pööratud vastu liikumist. Vesi, tõustes torus, jookseb kiiresti edasikihutava rongi tendrisse (joon. 4, ülal paremal pool).

Kui kõrgele on võimalik vett tõsta selle omapärase võttega? Hüdromehhaanikaks nimetatava ning vedelikkude liikumisega tegeleva meh-



Joon. 4. Kuidas vedurid võtavad täiel käigul vett. Rööbaste vahele on ehitatud pikk veepaak; tendrist lastakse sellesse toru. Ülal vasakul on Pitot' toru. Toru asetamisel jooksvasse vette tõuseb veepind torus kõrgemale kui paagis. Ülal paremal — Pitot' toru kasutamine veevõtmiseks liikuva rongi tendrisse.

haanikaharu seaduste järgi peab vesi Pitot' torus tõusma samale kõrgusele, millele tõuseks keha, mis on visatud vertikaalselt üles voolava vee kiirusega; kui mitte arvestada energia kadu hõõrdumisele, keeriste tekkimisele jms., siis väljendab seda kõrgust H valem

$$H = \frac{V^2}{2g},$$

kus V on vee kiirus, g aga raskustungi kiirendus $\left(9{,}8\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}^2}\right)$. Antud juhul on vee kiirus toru suhtes võrdne rongi kiirusega; kui võtta tagasihoidlikum kiirus 36 $\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$, saame $V = 10\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}}$ *; järelikult, veetõusu kõrgus

$$H = \frac{V^2}{2 \cdot 9{,}8} = \frac{100}{2 \cdot 9{,}8} \approx 5 \text{ m}.$$

* Siin, nagu edaspidigi, tähendab $\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ kilomeetrite arvu tunnis, $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}}$ tähendab vastavalt meetrite arvu sekundis; $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}^2}$ on kiirenduse ühik, s. o. sellise ühtlaselt kiireneva liikumise kiirendus, mille puhul kiirus ühes sekundis muutub 1 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}}$ võrra.

On selge, et kui suured hõõrdumisest ja muudest arvestamata asjaoludest tingitud kaod ka oleksid, on veetõusu kõrgus küllaldane tendri edukaks täitmiseks veega.

Kuidas mõista inertsiseadust.

Pärast seda, kui oleme nii põhjalikult kõnelnud liikumise suhtelisusest, tuleb öelda mõni sõna neist põhjustest, mis kutsuvad esile liikumise — tungidest. Eelkõige tuleb tähelepanu juhtida tungide mõju sõltumatuse seadusele; selle sõnastus on järgmine: tungi mõju kehasse ei sõltu sellest, kas keha on paigal või liigub inertsi või teiste tungide mõjul.

See järeldub niinimetatud „teisest seadusest” nende kolme hulgast, milledele Newton rajas klassikalise mehhaanika. Esimene neist on inertsiseadus, kolmas — mõju ja vastumõju seadus.

Newtoni teisele seadusele on pühendatud kogu järgnev peatükk, seepärast ütleme siin selle seaduse kohta ainult mõne sõna. Seaduse mõte seisneb selles, et kiiruse muutumine, mille mõõduks on kiirendus, on võrdeline mõjuva tungiga ja ta suund ühtib tungi suunaga. Seda seadust võib väljendada valemina

$$F = m \cdot a,$$

kus F on kehasse mõjuv tung; m on keha mass ja a on keha kiirendus. Kolmest valemis esinevast suurusest on kõige raskemini arusaadav, mis on mass. Väga tihti vahetatakse see ära kaaluga, tõeliselt pole aga mass ja kaal sugugi seesama. Kehade masse võib võrrelda nende kiirenduste kaudu, mida nad saavad ühe ning sama tungi mõjul. Nagu nähtub esitatud valemist, on keha mass seda suurem, mida väiksem on tungi mõjul saadud kiirendus.

Inertsiseadus, mis näib vastuolus olevat füüsikat mitteõppinud inimese harjumuspäraste kujutlustega, on siiski kõigist kolmest seadusest kõige arusaadavam *. Ometi mõistavad mõned seda seadust hoopis vääriti. Nimelt määratletakse inertsi sageli kui kehade omadust „alal hoida oma olekut seni, kuni väline põhjus seda olekut ei muuda". Selles levinud tõlgenduses vahetatakse ära inertsiseadus põhjuslikkusseadusega, mis väidab, et midagi ei toimu (s. o. mingi keha ei muuda oma olekut) põhjuseta. Tõeline inertsiseadus ei kehti kehade igasuguse füüsikalise oleku kohta, vaid ainult paigaloleku ja liikumise kohta. Ta ütleb:

Iga keha säilitab oma paigaloleku või ühtlase ja sirgjoonelise liikumise seni, kuni tungide mõju seda olekut ei muuda.

Tähendab, iga kord, kui keha

1) hakkab liikuma,

2) muudab oma sirgjoonelise liikumise mittesirgjooneliseks või üldse liigub kõverjooneliselt,

3) lõpetab oma liikumise, aeglustab või kiirendab seda,

peame järeldama, et kehasse mõjub tung.

Kui aga ükski neist muutustest liikumisel ei esine, siis kehasse mingit tungi ei mõju, kui kiiresti keha ka liiguks. Tuleb hästi meeles pidada, et ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuv keha pole üldse tungide mõju all (või kõik kehasse mõjuvad tungid on tasakaalus). Selles seisnebki oluline vahe nüüdisaegse mehhaanika kujutluste ja vana- ning keskaja (kuni Galileini) mõttetarkade vaadete vahel. Selles küsimuses on terav erinevus tavalise ja teadusliku mõtlemise vahel.

Öeldu seletab meile muuseas, mispärast mehhaanikas vaadeldakse hõõrdumist vastu liikumatut keha kui

---

* Ta on vastuolus tavaliste kujutlustega selles osas, mis väidab, et ühtlase sirgjoonelise liikumise tekkimiseks pole tarvis mingit tungi; ekslik on aga vaade, et kui keha kord liigub, peab kehasse mõjuma tung ja et tungi kõrvaldamisel peab liikumine lakkama.

t u n g i, kuigi hõõrdumise mõjul ei saa tekkida liikumist. Hõõrdumine on tung seepärast, et ta aeglustab liikumist.

Rõhutame veel kord, et kehad ei p ü ü a säilitada oma paigalolekut, vaid lihtsalt j ä ä v a d paigale. Siin on sama erinevus nagu kahe inimese vahel, kelledest üks on visa kodusistuja, keda on raske toast välja meelitada, teine aga on juhuslikult kodus viibiv inimene, kes on valmis vähimalgi põhjusel kodunt lahkuma. Füüsikalised kehad pole oma loomult kaugeltki „kodusistujad"; vastupidi, nad on suurel määral liikuvad, sest piisab juba kaduv-väikese tungi rakendamisest, et vaba keha hakkaks selle mõjul liikuma. Väljendus „keha p ü ü a b alal hoida paigalolekut" pole kohane ka veel seetõttu, et keha, mis on paigalolekust välja viidud, ei tule iseendast sinna tagasi, vaid, vastupidi, säilitab jäädavalt talle antud liikumise (muidugi liikumist takistavate tungide puudumisel).

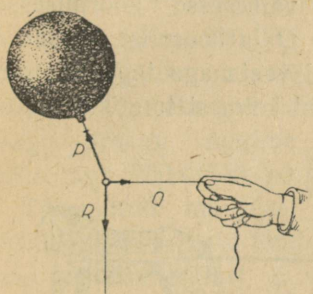
Samuti ebaõnnestunud on tihti esinev väljendus „keha avaldab vastupanu rakendatud tungile". Siis võiksime samal kaalutlusel öelda, et tee klaasis avaldab vastupanu magusaks saamisele, kui temas sulatatakse suhkrut.

Inertsiseadusega seotud arusaamatustest on kaunis suur hulk tingitud just sellest ettevaatamatust sõnast „püüab", mis on sisse pugenud füüsika- ja mehhaanikaõpikute enamikku. Ka Newtoni k o l m a s seadus, mille arutlemisele nüüd asume, tekitab õigeks arusaamiseks küllaltki raskusi.

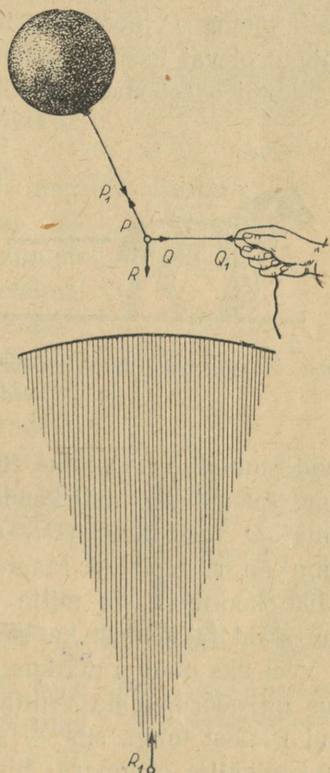
Mõju ja vastumõju.

Soovides avada ust tõmbate teda käepidemest enda poole. Teie käe lihas lähendab kokku tõmbudes oma otsad teineteisele: ta tõmbab võrdse tungiga ust ja teie keha teineteise poole. Sel juhul on täiesti selge, et teie keha ja ukse vahel toimib kaks tungi, milledest üks on rakendatud uksele, teine teie kehale. Iseenesestmõistetavalt toimub seesama ka siis, kui uks avaneb mitte teie poole, vaid vastassuunas: tungid lükkavad ust ja teie keha teineteisest eemale.

See, mida me täheldame siin lihaste tungi puhul, on kehtiv üldse igasuguse tungi kohta, sõltumatult selle olemusest. Iga pingutus mõjub kahes vastassuunas; tal on, pilt-



Joon. 5. Tungid (*P*, *Q*, *R*), mis mõjuvad mänguõhupalli koormisesse. Kus on vastumõju avaldavad tungid?

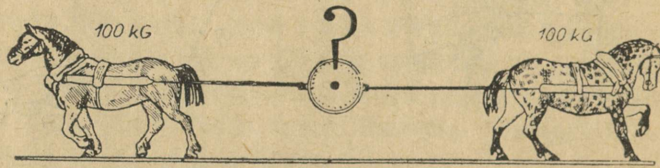


Joon. 6. Vastus eelmise joonise küsimusele: vastumõju avaldavad tungid on P_1, Q_1 ja R_1.

likult öeldes, kaks otsa (kaks tungi): üks on rakendatud kehale, millesse, nagu me ütleme, *mõjub tung*; teine ots on rakendatud kehale, mida nimetame *mõjuvaks* kehaks. Öeldut väljendatakse mehhaanikas lühidalt (isegi liiga lühidalt, et sellest selgesti aru saada) nii: „*mõju võrdub vastumõjuga*".

Selle seaduse mõte on see, et kõik tungid looduses on kaksiktungid. Igal tungi mõju avaldumise juhul peate kujutlema, et kuskil, mõnes teises kohas, on mõjumas teine tung, mis on sellega võrdne, kuid suunalt vastupidine. Need mõlemad tungid mõjuvad tingimata kahe punkti vahel, püüdes neid teineteisele lähendada või teineteisest eemaldada.

Vaadelgem (joon. 5) tunge P, Q ja R, mis mõjuvad mänguõhupalli külge riputatud väikesesse koormisesse. Palli tõmme P, nöörikese tõmme Q ja koormise raskus R näivad olevat üksiktungid. See ei vasta aga tegelikkusele: tegelikult on olemas igaühele neist kolmest tungist võrdne,



Joon. 7. Kumbki hobune tõmbab tungiga 100 kG. Kui palju näitab vedrukaal?

kuid suunalt vastupidine tung. Nimelt on tungi P vastastung rakendatud niidi kaudu õhupallile (joon. 6, tung P_1); tungi Q vastastung (Q_1) mõjub käesse; tungi R vastastung on rakendatud Maale (tung R_1, joon. 6), sest see väike koormis pole mitte ainult Maa poolt külgetõmmatav, vaid ta tõmbab ka ise Maad enda poole.

Veel üks oluline märkus. Kui me küsime, kui suur pingsus on nööril, mida venitab kaks nööri otstesse rakendatud 1-kG-st tungi, siis on see sisult sama, nagu küsiksime 10-kopikalise postmargi hinda. Vastus on juba küsimuses antud: nööri pingsus on 1 kG. Öelda, et nööri venitab kaks 1-kG-st tungi, või öelda, et nööri pingsus on 1 kG, tähendab väljendada täpselt sama mõtet. Ei saa ju ometi olla teist 1-kG-st pingsust kui see, mille põhjustab kaks vastassuunalist tungi. Unustades selle asjaolu tehakse pahatihti ränki vigu, millede kohta toome kohe näiteid.

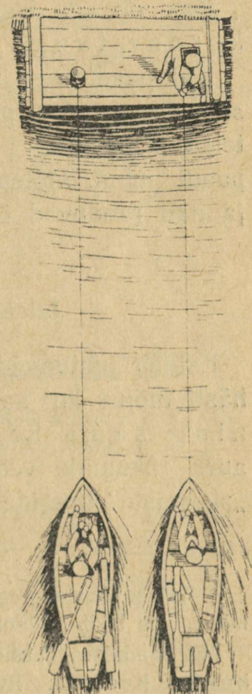
Ülesanne kahest hobusest.

Kaks hobust pingutavad vastassuundades tõmmates vedrukaalu (joon. 7), kumbki tungiga 100 kG. Kui palju näitab kaaluosuti?

Lahendus.

100 + 100 = 200 kG, vastavad paljud. Vastus on vale. 100-kG-sed hobuste tõmbetungid kutsuvad esile, nagu praegu nägime, 100-kG-se, mitte aga 200-kG-se pingsuse.

Tähendame muuseas, et kui magdeburgi poolkerasid tõmbas ühes suunas kaheksa hobust ja vastassuunas kaheksa hobust, siis ei tohi seepärast arvata, et neile mõjus 16 hobuse tõmme. Kaheksa vastumõjuva hobuse puudumisel ei oleks ülejäänud kaheksa hobust saanud poolkeradesse mingit mõju avaldada. Ühe kaheksast hobusest koosneva rühma võiks lihtsalt asendada küllaldaselt vastupidava seinaga.



Joon. 8 Kumb paat jõuab enne sadamasillani?

Ülesanne kahest paadist.

Sadamasillale järvel läheneb kaks ühesugust paati (joon. 8). Mõlemad paadimehed tõmbavad oma paati sadamasilla poole nööri abil. Esimese paadi nööri vastasots on kinnitatud sadamasillal tulba külge; teise paadi nööri vastasots on sadamasillal madruse käes, kes tõmbab paati enda poole.

Kõik kolm pingutavad end ühesugusel määral.

Kumb paat randub varem?

L a h e n d u s.

Esimesel pilgul võib näida, et kõigepealt randub see paat, mida tõmbab kaks inimest: kahekordne tung tekitab suurema kiiruse.

Kas on aga õige, et sellesse paadisse mõjub k a h e - k o r d n e t u n g?

Kui paadimees ja madrus tõmbavad nööri enda poole, siis võrdub nööri pingsus ainult ü h e mehe tõmbetungiga, teiste sõnadega, pingsus on niisama suur kui esimese paadi puhul. Mõlemaid paate tõmmatakse võrdse tungiga ja nad randuvad ü h e a e g s e l t*.

Jalakäija ja veduri mõistatus.

Esineb juhtumeid, tegelikus elus mitte harva, kus niihästi mõjuv kui ka vastumõjuv tung on rakendatud ü h e n i n g s a m a k e h a eri kohtades. Lihaste pingutus või auru rõhumine veduri silindris on selliste, niinimetatud „sisemiste" tungide näiteks. Nende erisus on selles, et nad

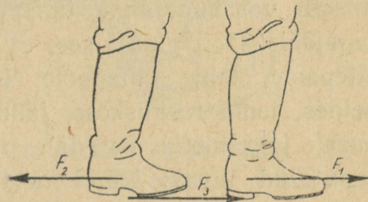
---

* Sellise lahendusega ei nõustunud üks lugejaist, kes väljendas mõtte, mis tekib võib-olla ka teistel selle raamatu lugemisel:

„Et paadid randuksid," kirjutab ta, „selleks peavad inimesed nööri k o k k u k e r i m a. Et kaks inimest kerib sama aja jooksul rohkem nööri, seepärast peab parempoolne paat randuma varem."

See lihtne põhjend näib esimesel pilgul vaieldamatuna, on aga siiski ekslik. Et anda paadile kahekordset kiirust (sest muidu paat ei randu kaks korda lühema aja jooksul) peab k u m b k i kahest tõmbajast tõmbama paati vastavalt suurendatud tungiga. Ainult niisugusel tingimusel õnnestub neil kokku kerida kaks korda rohkem nööri kui ühel kerijal (kust saaksid nad vastasel korral selleks vaba nööri?). Ülesandes on aga öeldud, et „kõik kolm pingutavad end ühesugusel määral". Kui palju need kaks ka vaeva näeksid, ikkagi ei õnnestuks neil kokku kerida rohkem nööri kui ühel mehel, kui nööride pingsus on ühesugune.

võivad muuta keha osade vastastikust asendit, muidugi sel määral, kuivõrd seda lubavad kehaosade sidemed, kuid ei saa anda keha kõigile osadele üht üldist liikumist. Tulistamisel püssist panevad püssirohugaasid, mõjudes ühes suunas, kuuli liikuma ettepoole. Samal ajal annab püssirohugaaside rõhumine, mõjudes vastassuunas, püssile liikumise tahapoole. Püssirohugaaside rõhumine kui sisemine tung ei saa nii kuuli kui ka püssi ettepoole liikuma panna.



Joon. 9. Hõõrdumistung F_3 võimaldab käimist.

Kui aga sisemised tungid pole suutelised kogu keha ümber asetama, kuidas liigub siis jalakäija? Kuidas liigub vedur? Väide, et jalakäijat abistab jalgade hõõrdumine vastu maad ja vedurit rataste hõõrdumine vastu rööpaid, ei anna veel mõistatusele lahendust. Hõõrdumine on muidugi tarvilik nii jalakäija kui ka veduri liikumiseks: on ju teada, et pole võimalik käia mööda väga libedat jääd („nagu lehm libedal jääl", ütleb levinud kõnekäänd) ja et vedur, olles libedatel rööbastel (näiteks nende jäätumise puhul), ei liigu paigast, ehkki rattad pöörlevad. Kuidas siis hõõrdumine, mis, nagu me nägime (lk. 17), aeglustab olemasolevat liikumist, saab aidata jalakäijat või vedurit kohalt liikuda?

Mõistatus leiab lahenduse üsna lihtsalt. Kaks üheaegselt mõjuvat sisetungi ei saa panna keha liikuma, sest nad ainult lähendavad teineteisele või kaugendavad teineteisest keha üksikuid osi. Mis toimub aga siis, kui mõni kolmas tung tasakaalustab või nõrgendab ühe mõju neist kahest sisetungist? Siis ei takista miski teist sisetungi keha liikuma panemast. Hõõrdumine ongi see kolmas tung, mis nõrgendab ühe sisetungi mõju ja annab sellega teisele sisetungile võimaluse keha liikuma panna.

Kujutlege, et seisate väga libedal pinnal, näiteks jääl, ja tahate kohalt liikuda. Teie pingutate end, et oma paremat jalga ettepoole tõsta. Teie keha üksikute osade vahel hakkavad mõjuma sisetungid, mis alluvad mõju ja vastumõju seadusele. Neid tunge on palju, kuid nende mõju on ligikaudu siiski selline, nagu mõjuks teie jalgadesse ainult kaks tungi, milledest üks (F_1) lükkab paremat jalga ettepoole ja teine, esimesega võrdne, kuid vastupidine tung F_2 lükkab vasakut jalga tahapoole. Nende tungide mõju tagajärjeks on ainult see, et jalad nihkuvad edasi: üks ettepoole, teine tahapoole, teie keha aga või, õigemini öeldes, tema raskuskese, jääb paigale. Asi on teisiti, kui vasak jalg toetub karedale pinnale (jääle jalgade all on raputatud liiva). Nüüd tasakaalustab vasakusse jalasse mõjuva tungi F_2 (kas täielikult või osaliselt) hõõrdumistung F_3, mis mõjub vasaku jala tallasse, paremale jalale rakendatud tung F_1 viib jala ettepoole ja kogu keha raskuskese nihkub samuti ettepoole. Käimisel, ühe jala edasiviimisel, me tegelikult tõstamegi ta üles, et kõrvaldada hõõrdumist tema ja põranda vahel, samal ajal mõjub aga teise jalga hõõrdumistung, mis takistab selle tagasilibisemist.

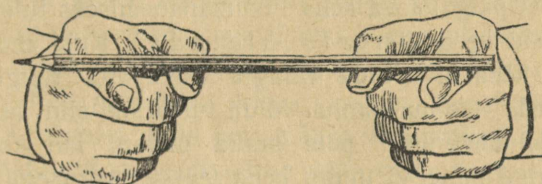
Veduriga on asi pisut keerulisem, kuid ka siin taandub küsimus sellele, et veoratastele rakendatud hõõrdumine tasakaalustab üht sisetungidest, võimaldades sellega teisel sisetungil vedurit edasi liigutada.

Kummaline pliiats.

Võtke pikk pliiats ja pange ta mõlema käe väljasirutatud nimetissõrmedele. Lähendage nüüd sõrmed teineteisele nii, et pliiats jääks rõhtasendisse. Te märkate kohe, et pliiats liugub algul üht sõrme pidi, siis teist sõrme pidi, siis jälle esimest pidi jne. Kui pliiatsi asemel võtta pikk sirge kepp, siis kordub see nähtus üsna mitu korda.

Kuidas seda imelikku nähtust seletada?

Seda aitavad seletada hõõrdumisseadused. Need ütlevad, et hõõrdumistung on liugumisel väiksem kui paigalolekus ja et hõõrdumistung T sel hetkel, kui algab liugumine, võrdub teatud arvsuurusega f, mis on iseloomustav antud



Joon. 10. Sõrmede lähendamisel teineteisele pliiats liigub vaheldumisi kord ühele, kord teisele poole.

hõõrduvate kehade puhul, korrutatud rõhumisega N, mida avaldab keha toetuspinnale. Matemaatiliselt võib seda seadust väljendada järgmise valemina:

$$T = f \cdot N.$$

Katsugem nüüd neid kahte seadust rakendades seletada pliiatsi kummalist käitumist. Kui algul pliiats asetseb nii, et tema rõhumine ühele sõrmele on suurem kui teisele sõrmele, mis peaaegu alati ongi nii, siis on ka hõõrdumistung esimesel sõrmel suurem kui teisel. See nähtub vahetult eelmisest valemist. Suurem hõõrdumistung ei võimalda pliiatsil liuguda seda pinda mööda, millele on suurem rõhumine. Kui sõrmed lähenevad teineteisele, läheneb pliiatsi raskuskese liuguvale toetuspinnale ja rõhumine siin suureneb. Liugumisel on hõõrdumistung väiksem kui paigalolekus, seepärast võib liugumine veel kaua edasi kesta. Sel hetkel, kui rõhumine liuguvale toetuspinnale on tunduvalt suurenenud, lakkab liugumine mööda seda pinda:

suurenenud hõõrdumistung paneb keha seisma. Nüüd muutub liuguvaks toetuspinnaks teine sõrm. Nähtus kordub ja mõlemad toetuspinnad hakkavad vahelduma.

Mida tähendab „inertsi ületamine".

Lõpetame peatüki arutlusega ühe küsimuse kohta, mis tekitab pahatihti väärkujutlusi. Sageli võib lugeda ja kuulda, et paigaloleva keha liikumapanemiseks tuleb kõigepealt selle keha „i n e r t s ü l e t a d a". Kuid me teame, et vaba keha ei avalda mingit vastupanu tungile, mis püüab teda liikuma panna. Mida tuleb siis siin „ületada"?

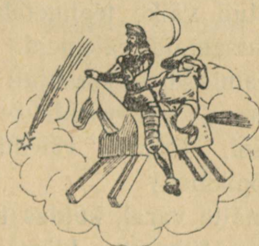
„Inertsi ületamine" pole muud midagi kui tingeliselt väljendatud mõte, et mingi keha teatava kiirusega liikuma panemiseks läheb tarvis teatavat ajavahemikku. Ükski tung, isegi kõige suurem, ei saa silmapilkselt anda kehale määratud kiirust, nii kaduv-väike kui selle keha mass ka oleks. Seda mõtet väljendab lühidalt valem $Ft = mv$, millest räägime järgmises peatükis, mis aga on loodetavasti lugejale tuttav füüsikaõpikust. On selge, et kui $t = 0$ (aeg on null), siis on massi korrutis kiirusega mv samuti null ja järelikult on ka kiirus null, sest mass erineb alati nullist. Teiste sõnadega: kui tungile F mitte anda aega oma mõju avaldamiseks, ei anna ta kehale mitte mingisugust kiirust, mingit liikumist. Kui keha mass on suur, kulub selleks võrdlemisi palju aega, et tung paneks keha märgatavalt liikuma. Meile näib, et keha ei hakka kohe liikuma, et keha nagu paneks vastu tungi mõjule. Sellest ongi tekkinud väärkujutlus, et tung peab enne keha liikumapanemist „ületama t e m a i n e r t s i".

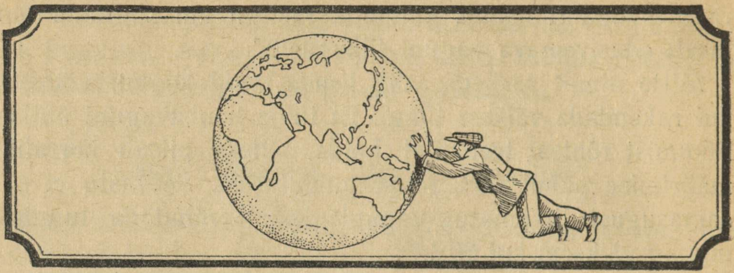
Raudteevagun.

Keegi lugejaist palub selgitada küsimust, mis seoses äsjaöelduga on võib-olla tekkinud paljudel: „Miks on raudteevagunit kohalt nihutada raskem kui säilitada ühtlaselt edasiveereva vaguni liikumist?”

Mitte ainult raskem, võib lisada, vaid koguni võimatu, kui rakendada väikest tungi. Et tühja kaubavaguni ühtlast liikumist rõhtsal teel alal hoida, selleks piisab korraliku määrimise puhul 15-kG-sest pingutusest. Seevastu ei saa samasugust liikumatut vagunit kohalt nihutada tungiga, mis on väiksem kui 60 kG.

Põhjus ei seisne mitte ainult selles, et esimeste sekundite jooksul tuleb rakendada lisatungi vaguni liikuma panemiseks antud kiirusega (see tung on võrdlemisi väike): põhjus peitub peamiselt seisva vaguni määrimise tingimustes. Liikumise algul pole määre veel ühtlaselt üle kogu laagri jaotunud ja seepärast on väga raske vagunit liikuma panna. Kui ratas on aga teinud juba ühe tiiru, on määrimise tingimused tunduvalt paranenud ja edasist liikumist alal hoida on võrratult kergem.





TEINE PEATÜKK.

TUNG JA LIIKUMINE.

Teatmetabel mehhaanikast.

Käesolevas raamatus tuleb meil mõnigi kord pöörduda mehhaanika valemite poole. Lugejaile, kes on küll mehhaanikat õppinud, kuid need seosed unustanud, on järgmisel leheküljel antud väike teatmetabel, mis võimaldab meelde tuletada tähtsamaid valemeid. See on koostatud Pythagorase korrutamistabeli eeskujul: kahe lahtri lõikumisel leitakse tulemus, mis saadakse äärtel kirjutatud suuruste korrutamisel. (Nende valemite tuletused leiab lugeja mehhaanikaõpikuist.)

Selgitame mõne näite varal, kuidas tabelit kasutada.

Korrutades ühtlase liikumise kiiruse v ajaga t, saame teepikkuse S (valem $S = vt$).

Korrutades jääva tungi F teepikkusega S, saame töö A, mis ühtlasi võrdub ka massi m ja lõppkiiruse v ruudu poole korrutisega: $A = FS = \frac{mv^2}{2}$*.

---

* Valem $A = FS$ on kehtiv ainult siis, kui tungi suund ühtib tee suunaga. Üldiselt on aga kehtiv keerulisem valem $A = FS \cos \alpha$, milles α on nurk tungi ja tee suuna vahel. Samuti on valem $A = \frac{mv^2}{2}$

Samuti nagu korrutamistabelit kasutades on võimalik leida j a g a m i s e tulemusi, nii võib ka meie tabelist saada järgmised seosed.

Ühtlaselt muutuva liikumise kiiruse v jagamisel ajaga t saame kiirenduse a (valem $a = \frac{v}{t}$).

Tungi F jagamisel massiga m saame kiirenduse a; tungi F jagamisel kiirendusega a saame aga massi m:

$$a = \frac{F}{m} \text{ ja } m = \frac{F}{a}.$$

	Kiirus v	Aeg t	Mass m	Kiirendus a	Tung F
Teepikkus S	—	—	—	$\frac{v^2}{2}$ (ühtlaselt muutuv liikumine)	Töö $A = \frac{mv^2}{2}$
Kiirus v	$2aS$ (ühtlaselt muutuv liikumine)	Teepikkus S (ühtlane liikumine)	Impulss Ft	—	Võimsus $W = \frac{A}{t}$
Aeg t	Teepikkus S (ühtlane liikumine)	—	—	Kiirus v (ühtlaselt muutuv liikumine)	Liikumis-hulk mv
Mass m	Impulss Ft	—	—	Tung F	—

õige ainult kõige lihtsamal juhul, kui keha algkiirus on null; kui aga algkiirus on v_0 ja lõppkiirus v, siis töö, mis tuleb kulutada kiiruse sellise muutuse esilekutsumiseks, on väljendatav valemina

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

Oletame, et mehhaanika-ülesande lahendamiseks on vaja välja arvutada k i i r e n d u s. Te koostate tabeli põhjal kõik valemid, milledes esineb kiirendus; kõigepealt valemid

$$aS = \frac{v^2}{2}, \quad v = at, \quad F = ma;$$

neist valemeist saate:

$$t^2 = \frac{2S}{a} \quad \text{ehk} \quad S = \frac{at^2}{2}.$$

Väljakirjutatud valemeist leidke see, mis vastab ülesande andmetele.

Kui soovite saada kõik võrrandid, millede abil võib määrata t u n g i, esitab tabel teile valikuks:

$$FS = A \text{ (töö)},$$
$$Fv = W \text{ (võimsus)},$$
$$Ft = mv \text{ (liikumishulk)},$$
$$F = ma.$$

Ei tohi tähele panemata jätta, et raskus P on samuti tung, seepärast on kõrvu valemiga $F = ma$ meie käsutuses ka valem $P = mg$, kus g on raskustungi kiirendus maapinna läheduses. Samuti järeldub valemist $FS = A$, et $Ph = A$ keha kohta, mille kaal on P ja mis on tõstetud kõrgusele h.

Tühjad ruudud tabelis näitavad, et vastavate suuruste korrutistel puudub mõte.

Veel üks tähtis märkus. Mehhaanika valemid võivad kasulikud olla ainult nende arvutajate käes, kes hästi teavad, m i l l i s t e s ü h i k u t e s tuleb väljendada valemeis esinevaid suurusi. Kui teie, arvutades tööd valemi $A = FS$ põhjal, väljendate tungi F kilogrammides ja teepikkuse S sentimeetrites, siis saate töö suuruse harva tarvitatavates ühikutes — kilogramm-sentimeetrites ja võite muidugi kergesti eksida. Et saada kohast tulemust, tuleb tung väljendada k i l o g r a m m i d e s ja teepikkus m e e t r i t e s; nüüd on töö väljendatud k i l o g r a m m - m e e t r i t e s.

Kuid teie võite tungi väljendada ka d ü ü n i d e s ja teepikkust s e n t i m e e t r i t e s; siis näitab tulemus töö suurust ergides ehk düün-sentimeetrites (düün on tung, mis võrdub $\frac{1}{980}$ G, s. o. ligikaudu 1 mG).

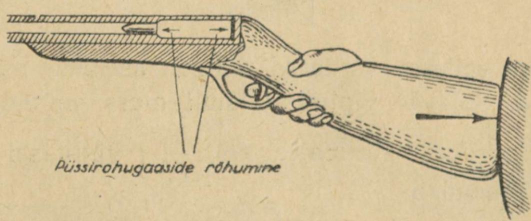
Täpselt samuti annab võrdus $F = ma$ tungi düünides ainult sel korral, kui mass on väljendatud grammides ja kiirendus ühikutes sentimeeter sekund-sekundis $\left(\frac{cm}{sek^2}\right)$.

Oskust valida mõõduühikuid ja vigadeta määrata tulemust õigetes ühikutes ei saa omandada veerandtunniga. Kellel seda oskust veel pole, sel tuleb kõigil juhtudel kasutada sentimeeter-gramm-sekund-(CGS-) süsteemi, viies saadud tulemuse, kui tarvis, üle teistele ühikutele.

Need praktilised pisiasjad on väga olulised; nende mitteteadmine võib tihti viia kõige rumalamatele vigadele.

Tulirelva tagasilöök.

Tabeli kasutamise näitena arutlegem püssi „tagasilööki”. Püssirohugaasid, mis paiskavad oma survega kuuli välja ühes suunas, lükkavad samal ajal püssi tagasi vastassuu-



Joon. 11. Miks annab püss lasul tagasilöögi?

nas, tekitades kõigile tuntud „tagasilöögi”. Kui suure kiirusega liigub tagasilööv püss? Meenutagem mõju ja vastumõju seadust. Selle seaduse põhjal peab püssirohugaaside rõhumine püssile (joon. 11) olema niisama suur kui nende rõhumine kuulile. Seejuures mõjuvad mõlemad tungid üheaegselt. Vaadates tabelisse leiame, et tungi F korrutis ajaga t võrdub „liikumishulgaga" mv, s. o. massi m ja kiiruse v korrutisega:

$$Ft = mv.$$

See võrdus on matemaatiline väljendus liikumishulga seadusele sel juhul, kui keha hakkab liikuma paigalolekust. Üldisemal kujul sõnastatakse see seadus nii: liikumishulga muutus mõne ajavahemiku jooksul võrdub kehale sama ajavahemiku jooksul rakendatud tungi impulsiga:

$$mv - mv_0 = Ft,$$

kus v_0 on algkiirus ja F on jääv tung.

Et Ft on nii kuulile kui ka püssile seesama, siis peab ka liikumishulk olema võrdne. Kui m on kuuli mass, v kuuli kiirus, M püssi mass ja V püssi kiirus, siis vastavalt äsjaöeldule

$$mv = MV,$$

millest

$$\frac{V}{v} = \frac{m}{M}.$$

Asetame sellesse võrdesse tähtede asemele numbrilised väärtused. Sõjaväe vintpüssi kuuli mass on 9,6 g, kuuli kiirus püssirauast väljumisel 880 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$; vintpüssi mass on 4500 g. Tähendab

$$\frac{V}{880} = \frac{9.6}{4500}.$$

Järelikult, püssi kiirus $V = 1{,}9\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}$. Pole raske välja arvutada, et tagasilööval püssil on „elavjõudu" 470 korda vähem kui kuulil; see tähendab, et püssi purustav energia on tagasilöögil 470 korda väiksem kui kuulil, kuigi (paneme seda tähele!) mõlema keha liikumishulk on võrdne. Oskamatut laskurit võib püssi tagasilöök siiski rängalt põrutada ja koguni vigastada.

Väli-kiirlaskekahuril, mille kaal on 2000 kG ja mis laseb välja 6-kilogrammiseid mürske kiirusega 600 $\frac{m}{sek}$, on tagasilöögi kiirus umbes niisama suur kui vintpüssil, s. o. 1,9 $\frac{m}{sek}$. Kahuri suure massi tõttu on aga selle liikumise energia 450 korda suurem kui vintpüssil ja võrdub peaaegu püssikuuli energiaga selle väljalaskmisel. Vanaaegsed kahurid veeresid väljalaskmisel tagasi. Meieaegsetel kahuritel liugub tagasi ainult toru, kuna lafett jääb paigale, kinni hoituna kahurihänna otsas oleva lafetisaha poolt. Merekahurid (mitte aga kogu laskeseadeldis) veerevad väljalaskmisel tagasi, pärast tagasilööki tulevad nad aga vastava seadme abil automaatselt jälle endisele kohale.

Tõenäoliselt on lugeja täheldanud, et läbiarutatud näidetes kehad ühesuguse liikumishulgaga ei oma ühepalju kineetilist energiat. Selles pole muidugi midagi ootamatut: võrdusest

$$mv = MV$$

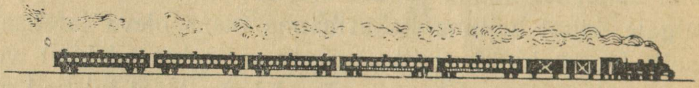
ei järgne sugugi, et

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{MV^2}{2}.$$

Teine võrdus on ainult siis õige, kui $v = V$ (selles on kerge veenduda, jagades teist võrdust esimesega). Ometi arvavad mõnikord inimesed, kes mehhaanikat hästi ei tunne, et liikumishulga võrdsus (tähendab, ka impulsi võrdsus) tingib kineetilise energia võrdsuse. On teada juhtumeid, kus leidurid, lähtudes ekslikust oletusest, et võrdsetele impulssidele vastavad võrdsed tööhulgad, püüdsid välja mõelda masinat, mis annaks tööd ilma vastava energiakuluta. See tõestab veel kord, et leidurid peavad hästi omandama teoreetilise mehhaanika alused.

Igapäevased kogemused ja teaduslik teadmine.

Mehhaanika uurimisel üllatab asjaolu, et paljudel väga lihtsatel juhtudel selle teaduse teadmised erinevad teravalt tavalistest kujutlustest. Esitame ühe ilmeka näite. Kuidas peab liikuma keha, millesse mõjub muutumatult üks ja seesama tung? „Terve mõistus" ütleb, et niisugune keha peab liikuma kogu aeg ühesuuruse kiirusega, s. o. ühtlaselt. Ja ümberpöördult, kui keha liigub ühtlaselt, siis on see iga-



Joon. 12. Rongi ühtlasel liikumisel ületab tõmbetung liikumise takistused.

päevase elu seisukohalt tunnuseks, et kehasse mõjub kogu aeg ühesuurune tung. Vankri, veduri ja teiste kehade liikumine näib seda tõendavat.

Kuid mehhaanika räägib hoopis midagi muud. Ta õpetab, et jääv tung tekitab mitte ühtlase, vaid k i i r e n e v a liikumise, sest varem kogutud kiirusele lisab tung pidevalt juurde uut kiirust. Ühtlasel liikumisel pole keha aga s u g u g i t u n g i m õ j u a l l, sest muidu ta ei liiguks ühtlaselt (vt. lk. 17).

Kas tõepoolest on tavalised vaatlused nii rängalt ekslikud?

Ei, nad pole täiesti ekslikud, nad on aga õiged ainult väga piiratud valdkonda kuuluvate nähtuste puhul. Tavaliselt vaadeldakse kehasid, mis liiguvad h õ õ r d u m i s e j a k e s k k o n n a t a k i s t u s e olemasolu tingimustes. Mehhaanika seadused on aga kehtivad v a b a l t liikuvate kehade kohta. Et h õ õ r d u m i s e g a liikuv keha omaks jäävat kiirust, selleks tuleb temale tõepoolest rakendada jääv tung. Tungi läheb aga siin vaja mitte keha liikumapanemiseks, vaid selleks, et ületada liikumise takistust, s. o. luua kehale vaba liikumise tingimused. Seepärast ongi täiesti võimalikud juhud, kus hõõrdumisega ü h t l a s e l t liikuv keha on j ä ä v a t u n g i mõju all.

Me näeme, milles patustab igapäevane „mehhaanika”: tema väited tulenevad m i t t e k ü l l a l d a s e l t t ä i e l i k k u d e s t andmetest. Teaduslikud üldistused on rajatud laiemale alusele. Teadusliku mehhaanika seadused on tuletatud mitte ainult vankrite ja vedurite, vaid ka planeetide ja komeetide liikumise põhjal. Et teha õigeid üldistusi, selleks tuleb laiendada vaatluspiirkonda ja puhastada faktid juhuslikkudest asjaoludest. Ainult sellisel viisil saadud teadmised võimaldavad avastada nähtuste sügavaid põhjusi ja võivad leida viljakat rakendust praktikas.

Edaspidi võtame arutlemisele rea nähtusi, milledes esineb selgesti seos keha liikumapaneva t u n g i ja keha poolt saadava k i i r e n d u s e vahel — seos, mis on väljendatud meie poolt juba mainitud Newtoni teises seaduses. Kahjuks omandatakse see tähtis seos mehhaanika õppimisel koolis väga ebaselgelt. Järgnevad näited on võetud küll fantastilisest olukorrast, kuid seda selgemalt tuleb esile nähtuse olemus.

Kahur Kuu peal.

Ü l e s a n n e.

Maal annab kahur mürsule algkiiruse 900 $\frac{m}{sek}$. Viige mõttes see kahur Kuule, kus kõik kehad muutuvad kuus korda kergemaks. Kui suure kiirusega lendab siin mürsk kahurist välja? (Vahe, mis on tingitud õhkkonna puudumisest Kuu peal, jäägu siin arvestamata.)

L a h e n d u s.

Selle ülesande küsimusele vastatakse sageli, et kuna plahvatuse jõud Maa ja Kuu peal on ühesuurune, Kuu peal aga mõjub plahvatus kuus korda kergemasse mürsku, siis mürsu kiirus peab seal olema kuus korda suurem kui Maal: $900 \cdot 6 = 5400 \frac{m}{sek}$. Mürsk lendab Kuu peal kahurist välja kiirusega $5{,}4 \frac{km}{sek}$.

Selline vastus on oma näilikust usutavusest hoolimata siiski täiesti ebaõige.

Tungi, kiirenduse ja kaalu vahel pole olemas seost, millest lähtub ülaltoodud arutlus. Mehhaanika valem, mis väljendab Newtoni teist seadust matemaatiliselt, seob tungi ja kiirendust m i t t e k a a l u g a, vaid m a s s i g a: $F = ma$. Mürsu mass pole aga Kuu peal üldse muutunud; ta on Kuul sama, mis ta oli Maal; tähendab, ka kiirendus, mille saab mürsk plahvatuse tagajärjel, peab olema Kuul niisama suur kui Maal; ühesuuruse kiirenduse ja ühesuuruse teepikkuse puhul peab ka kiirus olema ühesuurune (vastavalt valemile $v = \sqrt{2aS}$, kus S on mürsu tee kahuri torus).

Seega heidaks kahur Kuul mürsu välja täpselt sama kiirusega kui Maal. Teine küsimus on, kui k a u g e l e ja kui k õ r g e l e lendaks see mürsk Kuul. Sel juhul on mürsu kaalu vähenemisel juba oluline tähtsus.

Näiteks, Kuu peal asuvast kahurist kiirusega $900 \frac{m}{sek}$ väljalennanud mürsu püsttõusu kõrgus määratakse valemist

$$aS = \frac{v^2}{2},$$

mis leidub teatmetabelis (lk. 29). Et raskustungi kiirendus Kuu peal on kuus korda väiksem kui Maa peal, s. o. $\frac{g}{6}$, siis omandab valem kuju:

$$\frac{gS}{6} = \frac{v^2}{2}.$$

Siit on mürsu poolt läbitud püsttee

$$S = 6 \cdot \frac{v^2}{2g},$$

Maa peal aga (õhkkonna puudumisel):

$$S = \frac{v^2}{2g}.$$

Tähendab, Kuu peal heidaks kahur mürsu kuus korda kõrgemale kui Maa peal (õhu takistust me ei arvestanud), vaatamata sellele, et mürsu algkiirus on mõlemal juhul ühesuurune.

Lask ookeani põhjas.

Ookeani sügavamaid kohti on Mindanao saare läheduses (Filipiinide saarestikus). Selle koha sügavus on ligikaudu 11 km.

Olgu selles sügavuses laetud õhupüstol; selle silindris on õhk suure rõhu all.

Küsitakse, kas kuul lendab püstolist välja, kui suruda päästikule, arvesse võttes, et tavalistel tingimustel on kuuli kiirus niisama suur, nagu nagaanilgi, s. o. $270 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$.

Lahendus.

„Lasu" hetkel on kuul kahe vastassuunalise rõhu all: vee rõhu ja suruõhu rõhu all. Kui esimene rõhk on teisest suurem, siis kuul välja ei lenda, vastasel korral aga küll. Järelikult tuleb välja arvutada mõlemad rõhud ja neid võrrelda. Vee rõhku kuulile arvutame järgmiselt. Veesamba iga kümne meetri rõhk on ühe tehnilise atmosfääri suurune, s. o. 1 kG 1 ruutsentimeetri kohta. Järelikult on 11 000-meetrise veesamba rõhk 1100 kG ühe ruutsentimeetri kohta.

Oletame, et püstoli kaliiber (raua avause läbimõõt) on niisama suur nagu harilikul nagaanilgi, s. o. 0,7 cm. Püstoliraua õõne ristlõike pindala võrdub:

$$\tfrac{1}{4} \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}7^2 = 0{,}38 \text{ cm}^2.$$

Sellele pinnale avaldab vesi rõhumist, mis võrdub

$$1100 \cdot 0{,}38 = 418 \text{ kG}.$$

Nüüd arvutame suruõhu rõhumise. Selleks leiame kuuli keskmise kiirenduse püstolirauas (harilikel tingimustel), eeldades ülesande lihtsustamise mõttes, et kuuli liikumine on ühtlaselt kiirenev. (Tõeliselt pole see liikumine ühtlaselt kiirenev.)

Tabelist (lk. 29) leiame seose

$$v^2 = 2aS,$$

kus v on kuuli kiirus püstoliraua otsa juures, a otsitav kiirendus, S kuuli poolt torus õhu rõhu mõjul läbitud tee pikkus, s. o. püstoliraua pikkus. Asendades $v = 270 \frac{\text{m}}{\text{sek}} = 27000 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ ja $S = 22$ cm, saame:

$$27\,000^2 = 2a \cdot 22,$$

millest

$$a = 16\,500\,000 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}.$$

See suur kiirendus ei tohi meid imestama panna; läbib ju kuul harilikel tingimustel püstoliraua väga lühikese ajavahemiku jooksul. Teades kuuli kiirendust ja arvestades tema massina 7 g, arvutame sellist kiirendust andva tungi valemi põhjal $F = ma$:

$$F = 7 \cdot 16\,500\,000 = 115\,500\,000 \text{ düüni}.$$

Ühekilogrammine tung võrdub ümmarguselt ühe miljoni düüniga, tähendab, õhu rõhumine kuulile on ligikaudu 115 kG.

Seega mõjub kuulisse lasu momendil tung 115 kG, vastu aga mõjub vee rõhumine 418 kG. Siit nähtub, et kuul mitte ainult ei lenda püstolirauast välja, vaid, vastupidi, vee rõhumine surub ta veel sügavamale püstolirauasse. Niisugust rõhumist pole muidugi võimalik õhupüstolites saavutada, kuid sellist õhupüstolit, mis võiks nagaaniga võistelda, on kaasaegse tehnika tingimustes täiesti võimalik ehitada.

Maakera kohaltnihutamine.

Mehhaanikat puudulikult õppinud inimeste keskel on levinud veendumus, et väikese tungiga pole võimalik nihutada kohalt vaba keha, kui selle keha mass on väga suur. See on üks „terve mõistuse" eksitusi. Mehhaanika väidab hoopis midagi muud: iga tung, isegi väga väike, peab liikuma panema iga, isegi hiiglaraske keha, kui ainult keha on v a b a. Me oleme juba korduvalt kasutanud valemit, mis väljendab seda mõtet:

$$F = ma, \text{ millest } a = \frac{F}{m}.$$

Viimane avaldis ütleb meile, et kiirendus võib olla võrdne nulliga ainult sel juhul, kui tung F võrdub nulliga. Seepärast p e a b i g a t u n g i g a v a b a k e h a l i i k u m a p a n e m a.

Meid ümbritsevates tingimustes ei näe me igakord selle seaduse kinnitust. Põhjuseks on hõõrdumine, üldse takistus liikumisele. Teiste sõnadega, põhjuseks on asjaolu, et me puutume vähe kokku v a b a d e kehadega; peaaegu kõikide meie poolt vaadeldavate kehade liikumine pole vaba.

Et hõõrdumise olemasolu puhul panna keha liikuma, on tarvis rakendada tungi, mis oleks suurem hõõrdumistungist. Tammepuust kapp kuival tammepuust põrandal hakkab meie käte survel ainult siis liikuma, kui meie poolt rakendatud tung pole väiksem ühest kolmandikust kapi raskusest, sest tammepuu hõõrdumistung vastu tammepuud (kui hõõrduvad pinnad on kuivad) on ligikaudu 34% keha raskusest. Kui aga mingit hõõrdumist ei oleks, paneks isegi laps raske kapi liikuma, puudutades seda ainult sõrmega.

Nende väheste looduskehade hulka, mis on täiesti vabad, s. o. liiguvad hõõrdumise ja keskkonna takistuse mõjuta, kuuluvad taevakehad: Päike, Kuu, planeedid ja nende hulgas ka meie Maa. Kas see tähendab, et inimene suudaks oma lihaste tungiga Maad paigalt nihutada? Tingimata suudaks: liikudes ise, panete ta liikuma!

Näiteks, kui hüppame üles, tõugates end jalgadega Maast eemale, anname oma kehale kiirust, koos sellega aga paneme ka Maa vastassuunas liikuma. Küsimus on nüüd selles, kui suur on selle liikumise kiirus. Mõju ja vastumõju seaduse põhjal on tung, millega me rõhume Maale, võrdne tungiga, mis viskab meie keha üles. Seepärast on ka nende tungide impulsid võrdsed, ja kui see on nii, siis peavad olema võrdsed ka meie keha ja Maa liikumishulk. Tähistades Maa massi M-ga, temale antud kiiruse V-ga, inimese massi m-ga ja kiiruse v-ga, võime kirjutada:

$$MV = mv,$$

millest

$$V = \frac{m}{M} v.$$

Et aga Maa mass on mõõdetamatult suurem inimese massist, siis on ka kiirus, mille me anname Maale, mõõdetamatult väiksem sellest kiirusest, millega inimene hüppab maapinnalt üles. Me ütleme „mõõdetamatult suurem" ja „mõõdetamatult väiksem" muidugi mitte sõnasõnalises mõttes. Maa massi on võimalik mõõta* ja järelikult on võimalik antud tingimustes välja arvutada ka ta kiirus.

Maa mass M on ligikaudu $6 \cdot 10^{27}$ g, inimese massi m võtame võrdseks $60\,\text{kg} = 6 \cdot 10^4$ g. Siis suhe $\frac{m}{M}$ võrdub $\frac{1}{10^{23}}$. See tähendab, et Maa kiirus on 10^{23} korda väiksem inimese hüppe kiirusest! Olgu inimene hüpanud kõrgusele $h = 1$ m, siis saab tema kiirust määrata valemi $v = \sqrt{2gh}$ põhjal, s. o.

$$v = \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 100} \approx 440 \frac{\text{cm}}{\text{sek}},$$

ja Maa kiirus võrdub:

$$V = \frac{440}{10^{23}} = \frac{4,4}{10^{21}} \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

See on niivõrd väike suurus, et on raske seda kujutleda, kuid siiski suurus, mis erineb nullist. Et saada sellest arvust kaudsetki kujutlust, oletame, et Maa, saanud selle kiiruse, säilitab seda väga pika ajavahemiku, näiteks ühe miljardi aasta vältel (mõnesugustel andmetel võib oletada, et Maa vanus igal juhul pole väiksem sellest ajavahemikust). Kui suurele kaugusele ta liigub selle aja jooksul? Kauguse leiame valemi

$$S = vt$$

põhjal. Võttes

$$t = 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \approx 31 \cdot 10^{15} \text{ sek},$$

---

* Vt. selle kohta sama autori „Huvitavas astronoomias" (vene keeles) artiklit „Kuidas kaaluti ära Maa".

saame:

$$S = \frac{4{,}4}{10^{21}} \cdot 31 \cdot 10^{15} = \frac{14}{10^5}\ \text{cm}.$$

Väljendades seda kaugust mikronites (millimeetri tuhandikes), saame

$$S = \frac{14}{10}\ \text{mikronit}\ (\mu).$$

Niisiis, meie poolt leitud kiirus on niivõrd väike, et kui Maa liiguks sellise kiirusega ühe miljardi aasta kestel, nihkuks ta edasi ainult 1,4 mikroni võrra, s. o. palja silmaga mittemärgatava pikkuse võrra.

Tegelikult aga kiirus, mille saab Maa inimese jalgade poolt sooritatud tõukest, ei säili.

Niipea kui inimese jalad on Maast eraldunud, hakkab ta kiirus Maa külgetõmbetungi mõjul vähenema. Kui aga Maa tõmbab inimest külge 60-kG-se tungiga, siis niisama suure tungiga tõmbab ka inimene Maad külge; järelikult, üheaegselt inimese kiiruse vähenemisega väheneb ka Maa kiirus ja mõlemad kiirused muutuvad üheaegselt nulliks.

Seega võib inimene küll anda Maale lühikeseks ajaks kiirust, ehkki kaduv-väikest, kuid teda kohalt nihutada ei saa. Maad võiks inimene oma lihaste tungiga kohalt nihutada ainult sel juhul, kui tal õnnestuks leida Maaga mitte ühenduses olevat tugipunkti, nagu see on näidatud käesoleva peatüki päisvinjeti fantastilises joonistuses. Kogu oma rikkast kujutlusvõimest hoolimata pole kunstnik suutnud näidata, millele toetuvad inimese jalad.

Leiutamise eksitee.

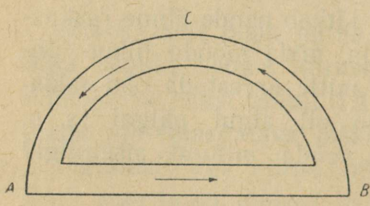
Uute tehniliste võimaluste otsingutel peab leidur oma mõttekäiku pidevalt hoidma mehhaanika rangete seaduste kontrolli all, kui ta ei taha astuda viljatu fantaseerimise teele. Ei tule arvata, et ainus üldine printsiip, mida leiduri mõte ei tohi rikkuda, on energia jäävuse seadus. On veel üks teine tähtis lause, millest mittehoolimine viib leidurid väga tihti ummikusse ja laseb neil oma jõude viljatult kulutada. See on raskuskeskme liikumise seadus.

Mainitud seadus väidab, et keha (või kehade süsteemi) raskuskeskme liikumist ei saa muuta ainuüksi sisetungide mõjul. Kui lendav mürsk lõhkeb, siis seni, kuni tekkinud killud pole veel jõudnud maani, jätkab nende ühine raskuskese liikumist sama teed mööda, mida mööda liikus lõhkemata mürsu raskuskese (kui mitte arvestada õhu takistust). Erijuhul, kui raskuskese oli algul paigal (s. o. kui keha oli paigalolekus), ei suuda mingid sisetungid raskuskeskme asendit muuta.

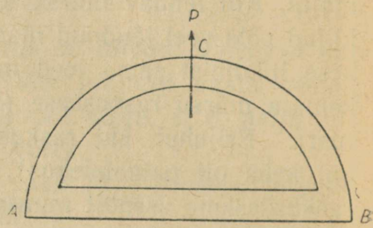
Eelmises artiklis rääkisime sellest, et maapinnal olev inimene ei suuda oma jõuga esile kutsuda isegi kõige väiksemat Maa edasinihkumist. See on seletatav raskuskeskme liikumise seadusega. Tung, millega inimene mõjub Maasse, ja tung, millega Maa mõjub inimesse, on sisetungid, järelikult nad ei saa kohalt nihutada Maa ja inimese ühist raskuskeset. Kui inimene tuleb tagasi oma endisse asendisse maapinnal, siis teeb sedasama ka Maa.

Millist laadi eksitustele võib leidureid viia arutletud seadusest mittehoolimine, näitab järgmine õpetlik näide — täiesti uuetüübilise lennumasina kavand. „Kujutlegem," ütleb leidur, „kinnist toru (joon. 13), mis koosneb kahest osast: rõhtsast sirgest osast *AB* ja selle peal olevast kõverast osast *ACB*. Torudes asetseb vedelik, mis voolab vahetpidamatult ühes suunas (voolamist põhjustab torudesse paigutatud kruvide pöörlemine). Vedeliku voolamisega toru kõveras osas *ACB* kaasneb kesktõukerõhumine toru välispinnale. Tekib teatav ülespoole suunatud tung *P* (joon. 14), millele mingi teine tung vastumõju ei avalda, sest vedeliku liikumisega sirges osas *AB* ei kaasne kesktõukerõhumist." Leidur teeb siit järelduse, et küllaldaselt suure voolukiiruse puhul peab tung P kogu aparaadi üles tõstma.

Kas leiduri mõte on õige? Isegi mehhanismi üksikasjadesse tungimata võib juba ette öelda, et aparaat ei nihku kohalt. Tõepoolest, et siin mõjuvad tungid on sisetungid, siis ei saa nad kogu süsteemi (s. o. toru koos seda täitva



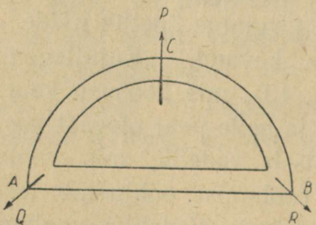
Joon. 13. Uut tüüpi „lennuaparaadi" projekt.



Joon. 14. Tung P peab aparaadi õhku tõstma.

veega ja selle voolamist tekitava mehhanismiga) raskuskeset liikuma panna. Järelikult ei saa masin üldist kulgevat liikumist. Leiduri arutluses peitub mingi eksitus, mingi oluline puudus.

Pole raske näidata, kus peitub eksitus. Kavandi autor ei võtnud arvesse asjaolu, et kesktõukerõhumine peab tekkima mitte ainult vedeliku tee kõveras osas ACB, vaid ka voolamise pöördepunktides A ja B (joon. 15). Kuigi neis punktides pole kõver tee pikk, on pöörangud seevastu väga järsud (kõveruse raadius on väike). On teada, et mida järsem on pöörang (mida väiksem on kõveruse raadius), seda tugevam on kesktõuke efekt. Selle tagajärjel peavad pöörangutel mõjuma veel tungid Q ja R, mis on suunatud väljapoole; nende tungide resultant on suunatud



Joon. 15. Miks aparaat ei tõuse õhku.

allapoole ja tasakaalustab tungi *P*. Need tungid jättis leidur tähele panemata. Kuid isegi tundmata neid tunge oleks ta võinud aru saada oma kavandi kõlbmatusest, kui ta oleks tundnud raskuskeskme liikumise seadust. Juba neli sajandit tagasi kirjutas suur Leonardo da Vinci õigesti, et mehhaanika seadused „hoiavad vaos insenere ja leidureid, et need ei lubaks endale või teistele võimatuid asju".

Kus on lendava raketi raskuskese?

Võib näida, et uusima tehnika noor ja paljutõotav võsu, rakettmootor, rikub raskuskeskme liikumise seadust. Maailmaruumisõitjad tahavad sundida raketti lendama Kuuni — lendama ainult sisetungide mõjul. Ometi on selge, et rakett viib endaga Kuule kaasa ka oma raskuskeskme. Mis saab siis niisugusel juhul meie seadusest? Raketi raskuskese oli enne tõusu Maal, nüüd on ta aga Kuul. Ilmsemat seaduse rikkumist ei saa ollagi!

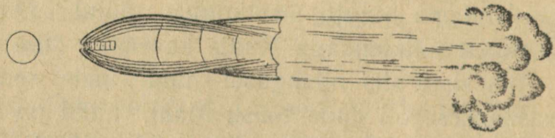
Mida võib sellisele põhjendile vastu väita? Seda, et see on rajatud arusaamatusele. Rakett ei viigi oma raskuskeset Kuule, sest Kuule lendab ainult osa raketist: ülejäänud osa, s. o. põlemisel tekkinud ained, liigub vastassuunas; seepärast jääb kogu süsteemi inertskese * sinna, kus ta oli enne raketi väljalendu.

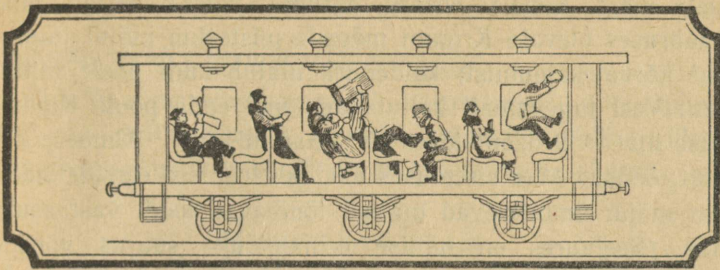
Nüüd arvestame asjaolu, et väljavoolavad gaasid ei liigu takistamatult, vaid põrkavad kokku Maaga. Sellega lülitatakse raketi süsteemi kogu Maa ja nüüd peame juba rääkima hiiglasuure süsteemi (Maa ja rakett) inertskeskme säilitamisest. Gaasivoo kokkupõrke tõttu Maaga (või selle

* Kui on jutt mitmest kehast või paljudest osadest koosnevast süsteemist, siis räägitakse mehhaanikas tihti mitte süsteemi raskuskeskmest, vaid süsteemi inertskeskmest ehk masskeskmest. Maaga võrreldes väikeste süsteemide puhul võib öelda, et inertskese ühtib raskuskeskmega.

õhkkonnaga) nihkub meie planeet veidi paigalt, tema inertskese liigub vastassuunas raketi liikumisele. Maa mass on raketi massiga võrreldes aga niivõrd suur, et piisab selle kõige väiksemast, tegelikult märkamatust paigaltliikumisest, et tasakaalustada seda Maa-rakett-süsteemi raskuskeskme paigaltnihkumist, mis tekkis raketi lennu tagajärjel Kuule. Maa eemalenihkumine on Maa ja Kuu vahelisest kaugusest niimitu korda väiksem, mitu korda Maa mass on raketi massist suurem.

Me näeme, et inertskeskme liikumise seadus ei kaota oma mõtet isegi sellises erandlikus olukorras.





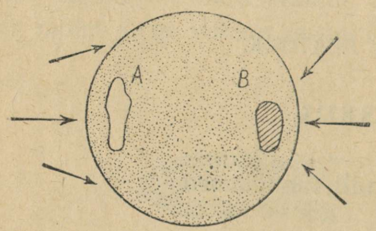
KOLMAS PEATÜKK.

RASKUS.

Loodi ja pendli tunnistused.

Lood ja pendel on kahtlemata lihtsaimad (vähemalt idee poolest) kõigist riistadest, mida teadus kasutab. Seda imekspandavam on see, et selliste primitiivsete riistadega on saavutatud tõepoolest muinasjutulisi tulemusi: tänu neile on inimesel õnnestunud tungida mõttes Maa põue, teada saada, mis toimub kümnete kilomeetrite sügavuses meie jalgade all. Seda teaduse kangelastegu suudame täielikult hinnata, kui meenutame, et Maa sügavaim puurauk pole sügavam kui 3¼ km, s. t. ei ulatu kaugeltki nende sügavusteni, milledest annab tunnistust Maa peal asetsev lood või pendel.

Mehhaanika printsiip, millel rajaneb loodi selline rakendus, on kergesti arusaadav. Kui Maa oleks ehituselt täiesti ühtlane, võiks loodi suunda mistahes punktis määrata arvutamisega. Masside ebaühtlane jaotus Maa pinna läheduses või sügavuses muudab seda teoreetilist suunda. Näiteks sunnib mäe lähedus loodi kalduma mäe poole seda tunduvamalt, mida lähemal on mägi ja mida suurem on selle mass. Simeizi observatooriumi juures näitab lood naabruses olevate Krimmi mägede püstseina mõjul tunduvat kõrvalekaldumist; kaldenurk ulatub kuni poole minutini. Veel tugevamalt kallutavad loodi enda poole Kaukasuse mäed: Ordžonikidzes 37″, Batumis 39″. Ümberpöördult, õõnsus Maa sisemuses avaldab loodisse eemaletõukavat mõju: ümbritsevad massid tõmbavad loodi vastassuunas. (Seejuures on näilise eemaletõuke suurus võrdne selle külgetõmbega, mida avaldaks loodisse ainehulk, mis täidaks õõnsuse.) Loodi kallutavad eemale mitte ainult õõnsused, vaid vastavalt nõrgemini ka selliste ainete kuhjumid, mis on väiksema tihedusega kui Maa põhimassiiv. Seepärast Moskvas, kaugel igasugustest mägedest, kaldubki lood 10″ võrra põhja poole. Nagu näeme, võib lood olla riistaks, mis aitab otsustada maapõue ehituse üle.



Joon. 16. Tühikud (A) ja tihendused (B) Maa massiivis kallutavad loodi kõrvale.

Selles suhtes veel rohkem võib anda pendel. Sel riistal on järgmine omadus: kui tema võnkeamplituud ei ületa mõnda kraadi, siis ühe võnke k e s t u s peaaegu ei sõltu amplituudist: suuremate ja väiksemate võngete kestus on võrdne. Võnke kestus sõltub siis teistest asjaoludest: pendli p i k k u s e s t ja r a s k u s t u n g i k i i r e n d u s e s t maapinna antud kohal. Valem, mis seob ühe täisvõnke kestuse T pendli pikkusega l ja raskustungi kiirendusega g, on väikeste amplituudide puhul järgmine:

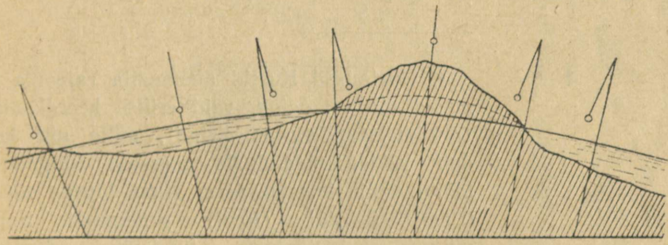
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Kui l on siinjuures võetud meetrites, siis g tuleb võtta ühikutes meeter sekund-sekundis $\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}^2}\right)$.

Kui Maa massiivi uurimisel kasutatakse „sekundpendlit", s. o. sellist pendlit, mis teeb poole täisvõnkest (ühest äärmisest seisust teise äärmisse seisu) ühes sekundis, siis

$$\pi\sqrt{\frac{l}{g}}=1 \text{ ja } l=\frac{g}{\pi^2}.$$

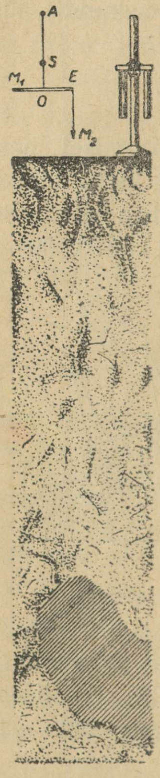
On selge, et raskustungi igasugusel muutumisel peab ka sellise pendli pikkust muutma: et pendel lööks täpselt sekundeid, tuleb teda kas pikendada või lühendada. Sel viisil võib kindlaks teha raskustungi muutusi kuni 0,0001-ni tema suurusest.



Joon. 17. Maapinna profiili ja loodi suuna skeem.

Ma ei hakka siin kirjeldama selliste, loodi ja pendliga teostatavate uurimiste tehnikat (see on palju keerulisem, kui võiks arvata). Juhin ainult tähelepanu mõnedele eriti huvitavatele tulemustele.

Tundub, et ookeani kallaste läheduses peaks lood alati kalduma mandri poole, nagu ta kaldub mägede poole. Kogemused ei õigusta seda ootust. Pendel aga tunnistab, et ookeanil ja selle saartel on raskustung suurem kui kallaste läheduses, kallaste läheduses aga suurem kui mandril, kallastest kaugel. Millest see räägib? Ilmselt sellest, et Maa aines mandrite all koosneb kergematest ainetest kui ookeanide all. Säärastest füüsikalistest faktidest ammutavad geoloogid väärtuslikke näpunäiteid küsimuse otsustamisel, missugustest kivimitest koosneb meie planeedi koor.



Joon. 18. Ülal paremal variomeeter. Ülal vasakul variomeetri ehituse skeem.

Asendamatuid teeneid osutas selletaoline uurimisvõte niinimetatud „Kurski magnetilise anomaalia" põhjuste selgitamisel. Esitan mõne rea ühe uurija aruandest selle kohta *.

„... Võib täie kindlusega väita, et maapinna all asetsevad suured külgetõmbavad massid, kusjuures nende masside läänepiiri ... võib suure täpsusega kindlaks määrata. Ka näib olevat

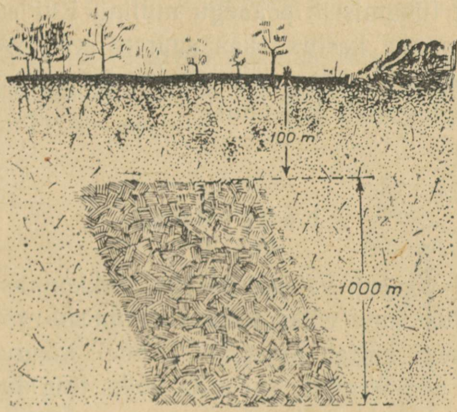
---

* Uurimised Kurski anomaalia rajoonis toimusid mitte loodiga, vaid erilise keerdkaaluga (niinimetatud variomeetriga), mille niit keerdub kokku maa-aluste masside külgetõmbe mõjul. Selle imestusväärse riista täpsus võrdub 0,000 000 000 001 (10^{-12}) grammist! Suurte mägede külgetõmmet „tunneb" variomeeter 300 km kauguselt. Järgnevalt riista lühike kirjeldus (prof. P. M. Nikiforovi artiklist Kurski anomaalia kohta):

„Aparaadi peamiseks osaks on keerdkaal, mis on skemaatiliselt kujutatud joonisel 18. Kaalukang M_1E, valmistatud peenikesest alumiiniumtorust, on umbes 40 cm pikk: kangi ühe otsa külge on kinnitatud silindrikujuline 30-grammine kuldkehake M_1, kangi teise otsa riputatakse peenikese traadiga EM_2 kullast viht M_2, mis kaalub samuti 30 g. Kaalukang on riputatud 60—70 cm pikkuse väga peenikese plaatina-iriidiumniidi külge. Kaitseks õhu konvektsioonvoolude vastu on keerdkaal ümbritsetud kolmekordse metallkattega. Aparaadis on kaks keerdkaalu, mis on teineteise suhtes pööratud 180° võrra. S on tasapeegel."

tõenäoline, et need massid laiuvad peamiselt ida suunas, kusjuures idapoolne nõlv on laugem kui läänepoolne."

On teada, kui suurt tööstuslikku tähtsust omistatakse neile hiiglasuurtele rauamaagivarudele, mis on avastatud Kurski anomaalia rajoonis; neid arvatakse olevat kümneid miljardeid tonne ja nad moodustavad poole kogu maailma varudest. Esitan veel mõningaid tulemusi raskustungi anomaaliate (normist kõrvalekaldumise) uurimisest Uurali idapoolsetel nõlvadel (uurimine teostati 1930. aastal Leningradi astronoomide poolt):



Joon. 19. Kurski anomaalia põhjus: umbes tuhandemeetrise paksusega rauamaagilademik saja meetri sügavuses.

„Zlatousti läheduses on raskustungi suurim maksimum, mis vastab Uurali mäeaheliku kristalliinse massiivi tõusule.

Teine maksimum Kozõrevost ida pool näitab maa-aluse mäeaheliku lähedust maapinnale.

Kolmas maksimum Miškinost ida pool vihjab jällegi ürgsete kivimite lähenemisele maapinnale.

Ja lõpuks neljas maksimum Petropavlovskist lääne pool näitab raskete kivimite lähenemist maapinnale."

Meie ees on kaks paljudest näidetest füüsika praktilise rakendamise kohta teistel, näivalt temast üsna kaugel seisvatel aladel.

Pendel vees.

Ülesanne.

Kujutlege, et seinakella pendel võngub vees. Pendli läätsel on voolujooneline kuju, mis vähendab veetakistuse mõju pendli liikumisele peaaegu nullini. Kui suur on sellise pendli võnke kestus: kas suurem või väiksem kui õhus? Lihtsamalt öeldes: kas pendel võngub vees kiiremini või aeglasemalt kui õhus?

Lahendus.

Et pendel võngub vähetakistavas keskkonnas, siis näib, et pole põhjust, mis võiks tema võnkumiskiirust tunduvalt muuta. Ometi näitab katse, et pendel võngub sellistes tingimustes aeglasemalt, kui seda võiks tingida keskkonna takistus.

See esimesel pilgul mõistatuslik nähtus leiab endale seletuse vee üleslükkes vette asetatud kehadele. Üleslüke nagu vähendaks pendli kaalu, ilma et ta mass seejuures muutuks. Tähendab, vees on pendel just niisugustes tingimustes, nagu oleks ta viidud teisele planeedile, kus raskustungi kiirendus on väiksem. Eelmises artiklis toodud valemist $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ järeldub, et raskustungi kiirenduse g vähenemisel peab võnkekestus T suurenema: pendel hakkab võnkuma aeglasemalt.

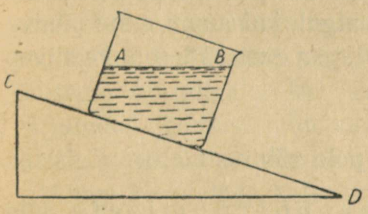
Kaldpinnal.

Ülesanne.

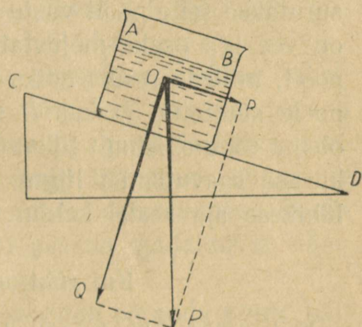
Anum veega seisab kaldpinnal (joon. 20). Niikaua kui anum püsib paigal, on veenivoo AB temas muidugi rõhtne. Siis aga hakkab anum mööda hästi määritud pinda CD allapoole liuguma. Kas anuma liugumisel allapoole jääb veenivoo anumas rõhtsaks?

Lahendus.

Katse näitab, et veenivoo anumas, mis liigub **hõõrdumiseta** mööda kaldpinda, on paralleelne selle pinnaga. Seletame, miks on see nii.



Joon. 20. Anum veega liigub mööda kaldpinda alla. Kuidas asetub veenivoo?



Joon. 21. Joonisel 20 antud ülesande lahendus.

Iga osakese raskust (joon. 21) võib kujutleda lahutatuna kaheks komponenttungiks Q ja R. Tung R paneb vedeliku ja anuma osakesed liikuma mööda kaldpinda CD; seejuures avaldavad vedeliku osakesed anuma seintele niisama suurt rõhumist nagu paigalolekuski (sest vee ja anuma liikumiskiirus on võrdsed). Tung Q aga surub vee osakesed vastu anuma põhja. Kõigi üksikute tungide Q mõju veesse on sama, mis raskustungi mõju iga paigaloleva vedeliku osakestesse; veenivoo asetub risti tungi Q suunaga, s. o. rööbiti kaldpinnaga.

Kuidas aga asetub veenivoo paagis, mis (näiteks hõõrdumise tõttu) liugub ühtlaselt mööda kaldpinda alla? On kerge veenduda, et niisugusel korral peab veenivoo paagis seisma mitte kaldu, vaid rõhtsalt. See järeldub juba asjaolust, et ühtlane liikumine ei saa muuta mehhaaniliste nähtuste käiku, võrreldes paigalolekuga (klassikaline relatiivsusprintsiip).

Kas see aga järeldub ka varemtoodud seletusest? Muidugi. Anuma ühtlase liikumise puhul mööda kaldpinda ei saa seinte osakesed mingit kiirendust; anumas asetseva vedeliku osakesed aga, olles tungi R mõju all, surutakse selle poolt vastu anuma eesmist seina. Järelikult on vee iga osake mõjustatud kahe suruva tungi, R ja Q poolt, millede resultandiks ongi osakese vertikaalselt allapoole suunatud raskus P. Seepärast peabki veenivoo siin olema rõhtne. Ainult liikumise algul, kui anum enne püsiva kiiruse saavutamist liigub kiirenevalt*, on veenivoo lühikese aja kestel kaldu.

Kui rõhtjoon pole rõhtne.

Kui mööda kaldpinda ilma hõõrdumiseta alla liuguvas anumas või paagis oleks vee asemel inimene vesiloodiga, siis ta täheldaks väga imelikke nähtusi. Ta keha oleks surutud vastu anuma kallakat põhja täpselt samuti nagu paigaloleku puhul vastu rõhtsat pinda (ainult väiksema tungiga). Tähendab, sellele inimesele muutub anuma kallakas põhi näivalt rõhtsaks. Vastavalt on ka kõik suu-

---

* Tuleb meeles pidada, et keha ei saavuta ühtlast liikumist silmapilkselt: üle minnes paigalolekult ühtlasele liikumisele, ei saa keha vältida kas või väga lühiajalist kiireneva liikumise olekut.

nad, mida ta enne liikumise algust pidas rõhtsaiks, muutunud talle nüüd kallakateks. Tema silmadele avaneks ebatavaline pilt: majad ja puud seisaksid kaldu, tiigi pind oleks kallakas, kogu maastik oleks viltu. Kui imestunud „reisija" ei usuks oma silmi ja asetaks paagi põhjale vesiloodi, siis ka see riist näitaks, et põhi on rõhtne. Lühidalt: sellele inimesele poleks „rõhtsuund" rõhtne selle sõna tavalises mõttes.

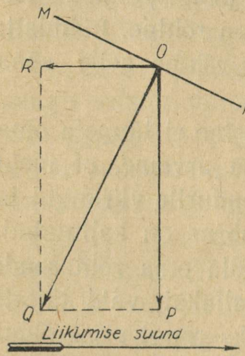
Tuleb märkida, et üldse iga kord, kui me ei tunneta oma keha kõrvalekaldumist püstsuunast, me arvame, et meid ümbritsevad esemed on kaldasendis. Lendurile viirangul ja inimesele karussellis näib, et kogu ümbrus on kallutatud.

Rõhtne põrand võib teie jaoks kaotada oma rõhtasendi isegi sel juhul, kui te liigute mitte kallakat, vaid täiesti rõhtsat pinda mööda. See esineb näiteks rongi sissesõidul jaama või jaamast väljumisel — üldse neil teeosadel, kus vagun liigub aeglustuvalt või kiirenevalt.

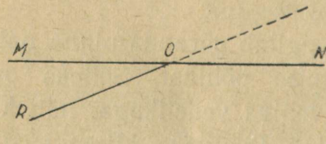
Kui rong hakkab oma käiku aeglustama, võime täheldada imelikku nähtust: meile näib, et vaguni põrand madaldub rongi liikumise suunas ja et me laskume allapoole, kui sammume vagunis rongi liikumise suunas, ja tõuseme kõrgemale, kui sammume vastassuunas. Rongi väljumisel jaamast näib vaguni põrand madalduvat liikumisele vastupidises suunas.

Võime korraldada katse, mis selgitab põranda pinna näiliku rõhtasendist kõrvalekaldumise põhjust. Selleks on tarvis, et vagunis oleks taldrik veniva vedelikuga, näiteks glütseriiniga: vedeliku pind võtab liikumise kiirenemiste ajal kallaka asendi. Kahtlemata olete mõnelgi korral midagi taolist täheldanud vagunite vihmaveerennidel: kui rong vihma ajal läheneb jaamale, jookseb vesi vagunikatuste rennidest ettepoole, rongi lahkumisel jaamast aga tahapoole. Selle põhjuseks on asjaolu, et vee pind tõuseb selle ääre juures, mis on rongi kiirenduse suunale vastupidine.

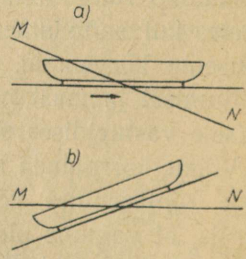
Selgitagem nende huvitavate nähtuste põhjust, vaadeldes neid seejuures mitte väljaspool vagunit oleva paigalviibiva vaatleja, vaid vagunis sõitva vaatleja seisukohalt, kes võtab osa kiirenevast liikumisest ja järelikult peab end vaadeldavate nähtuste suhtes paigalolevaks. Kui vagun liigub kiirenevalt, meie aga oletame, et oleme paigal, siis tunneme vaguni tagumise seina survet (või istme kaasatõmbavat mõju) enda kehasse nii, nagu me ise suruksime seina (või tõmbaksime kaasa istet) niisama suure tungiga. Me oleme nagu kahe tungi mõju all: need on tung R (joon. 22), mis on suunatud vaguni liikumisele vastu, ja raskustung P, mis meid surub vastu põrandat. Nende tungide resultant Q



Joon. 22. Missugused tungid mõjuvad kehadesse liikuma hakkava rongi vagunis?



Joon. 23. Miks liikuma hakkava vaguni põrand näib olevat kallakas?



Joon. 24. Miks voolab liikuma hakkavas vagunis vedelik üle taldriku tagumise ääre?

mõjub selles suunas, mida me niisuguses olukorras peame püstsihiks. Suund MN, mis on risti meie püstsihiga, saab meile rõhtsihiks. Järelikult näib meile endine rõhtsiht OR

rongi liikumise suunas tõusvana ja vastassuunas madalduvana (joon. 23).

Mis toimub niisugustes tingimustes vedelikuga taldrikul? Uus „rõhtsiht" ei ühti vedeliku esialgse nivooga, vaid tal on suund *MN* (joon. 24, *a*). See on näitlikult kujutatud joonisel, kus nool näitab vaguni liikumise suunda. Kõigist nähtustest, mis esinevad vagunis selle liikumahakkamisel, on kerge saada kujutlust, kui oletada, et vagun on kaldunud allapoole vastavalt „rõhtjoone" uuele suunale (joon. 24, *b*). Nüüd on selge, mispärast vesi peab voolama üle taldriku (või veerenni) tagumise ääre. Teile on nüüd samuti arusaadav, mispärast peavad vagunis seisvad inimesed kalduma tahapoole (vt. selle peatüki päisvinjetti). Seda kõigile tuntud asjaolu seletatakse harilikult sellega, et jalad hakkavad koos vaguni põrandaga liikuma, keha ja pea on aga alles paigal.

Taolist seletust pooldas ka Galilei, nagu nähtub järgmisest katkendist:

„Olgu veega täidetud anumal ebaühtlane kulgev liikumine, mille kiirus kord suureneb, kord väheneb. Ebaühtlase liikumise tulemused on järgmised. Vesi pole sunnitud anuma liikumist jagama. Anuma kiiruse vähenemisel säilitab ta oma saadud liikumise ja voolab anumas ettepoole, kus tekib kuhjumine. Kui, ümberpöördult, anuma kiirus suureneb, jääb vesi, säilitades aeglasema liikumise, maha ja anuma tagumises osas tekib märgatav veetõus."

Niisugune seletus pole üldiselt mitte halvemas kooskõlas faktidega kui varemtoodu. Teadusele on aga väärtuslik selline seletus, mis pole mitte ainult kooskõlas faktidega, vaid annab ka võimaluse neid k v a n t i t a t i i v s e l t käsitada. Antud juhul tuleb meil seepärast eelistada varemtoodud seletust — nimelt, et põrand meie all lakkab olemast rõhtne. See annab võimaluse arvutada nähtust kvantitatiivselt, mida tavaline vaatekoht ei võimalda. Kui näiteks rongi kiirendus jaamast lahkumisel on $1 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}^2}$, siis on võimalik nurka *QOP* (joon. 22) uue ja vana püstsihi vahel kergesti välja arvutada kolmnurgast QOP, milles $QP : OP = 1 : 9{,}8 \approx 0{,}1$ (tung on võrdeline kiirendusega):

$$\tan \angle QOP = 0{,}1; \quad \angle QOP \approx 6^0.$$

Tähendab, vagunis ülesriputatud lood kaldub ärasõidu hetkel 6^0 võrra kõrvale. Põrand jalgade all nagu kalduks samuti 6^0 ja liikudes mööda vagunit saame sama aistingu, nagu kõndides 6^0-se kallakuga teel. Nende nähtuste selgitamise tavaline viis poleks võimaldanud meil selliseid üksikasju kindlaks teha.

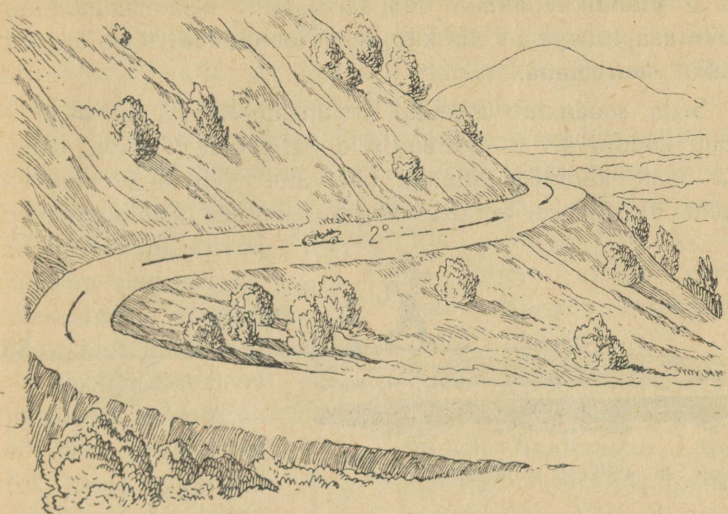
Kahtlemata on lugeja täheldanud, et erinevus kahe seletuse vahel on tingitud ainult erinevusest kahe vaatekoha vahel: tavaline seletus käsitleb nähtusi väljaspool vagunit paigaloleva vaatleja seisukohast, teine seletus aga kiirenevas liikumises osaliseks oleva vaatleja seisukohast.

Magnetiline mägi.

Kalifornias on mägi, mille kohta kohalikud autosõitjad väidavad, et tal olevat magnetilised omadused. Asi seisneb selles, et tee väikesel, 60 m pikkusel osal võib mainitud mäe jalamil täheldada ebatavalist nähtust. See teeosa on kallakas. Kui kallakut mööda allapoole sõitval autol mootor välja lülitada, siis hakkab masin veerema tagasi, s. o. kallakut mööda üles, otsekui alludes mäe „magnetilisele külgetõmbele".

Arvati, et see mäe hämmastav omadus on täiesti kindlaks tehtud, ja vastavas kohas ilutses tee äärde ülespandud silt selle nähtuse kirjeldusega.

Siiski leidus inimesi, kellele näis kahtlasena, et mägi võiks autosid külge tõmmata. Kontrollimiseks teostati selle teeosa nivelleerimine. Tulemus oli ootamatu: see, mida kõik pidasid tõusuks, osutus hoopis l a n g u k s 2^0-se kallakuga. Selline lang võib väga heal maanteel auto tõesti mootoritagi veerema panna.



Joon. 25. Ekslikult magnetiliseks peetav mägi Kalifornias.

Mägismail on sellised nägemispetted üsna tavalised ja tekitavad rohkesti legendaarseid lugusid.

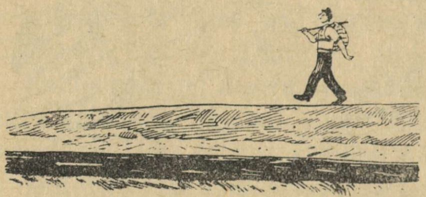
Jõed, mis voolavad mäkke.

Nägemispettega võib seletada ka reisijate jutustusi jõgedest, mis voolavad kallakut mööda üles. Toon selle kohta väljavõtte ühe füsioloogi, prof. Bernsteini raamatust „Meeled".

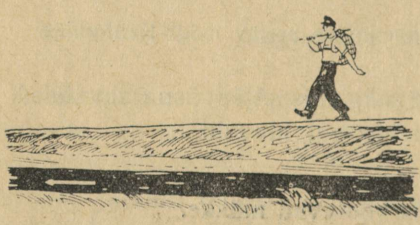
„Paljudel juhtudel kaldume eksima, kui tuleb otsustada, kas antud siht on rõhtne või kallakas üles- või allapoole. Minnes näiteks nõrgalt tõusvat teed mööda ja nähes mõningal kaugusel teist, esimesega ristuvat teed, kujutleme teise tee tõusu järsemana, kui ta tegelikult on. Hiljem veendume imestusega, et teine tee pole kaugeltki nii järsk, nagu algul arvasime."

Seda illusiooni seletatakse sellega, et me võtame tee, mida mööda läheme, põhitasapinnaks, mille suhtes peame teisi suundi kallakaiks. Me samastame teda ebateadlikult rõhttasapinnaga ja siis kujutleme loomulikult teise tee kallakut suuremana.

Seda soodustab asjaolu, et lihasmeele kaudu meie ei taju kõndimisel 2—3-kraadiseid kallakuid. Moskva, Kiievi ja teiste künklike linnade tänavatel võib sageli tekkida neid illusioone, millest räägib teadlane-füsioloog. Veel huvitavam on teine nägemispete, mis võib esineda ebatasastes kohtades: oja näib voolavat mäkke!



Joon. 26. Väikese kallakuga tee piki oja.



Joon. 27. Teekäijale näib, et oja voolab ülespoole.

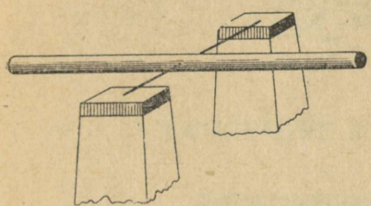
„Minnes mööda pisut kallakat teed rööbiti ojaga (joon. 26), millel on veel väiksem lang, s. t. mis voolab peaaegu rõhtsalt, näib meile sageli, et oja voolab kallakut mööda üles (joon. 27). Ka sellel juhul peame tee suunda rõhtsaks, sest oleme harjunud seda tasapinda, millel me seisame, võtma aluseks teiste tasapindade kallakuse määramisel" (Bernstein).

Ülesanne raudvarvast.

Raudvarb on täpselt keskelt läbi puuritud. Läbi augu on pistetud peenike tugev varras, mille ümber varb võib pöörelda nagu telje ümber (joon. 28). Millisesse asendisse jääb varb seisma, kui ta on pandud pöörlema?

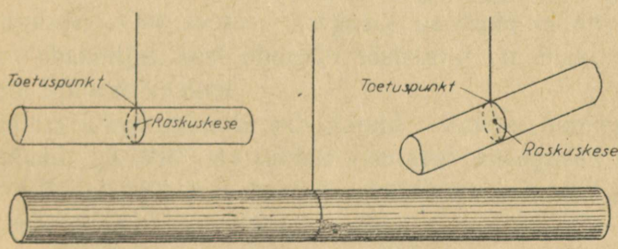
Sageli vastatakse, et varb jääb seisma rõhtasendis, et see on „ainus asend, milles ta säilitab tasakaalu”. Vaevalt usutakse, et varb, mis toetub raskuskeskmele, peab säilitama oma tasakaalu m i s t a h e s asendis.

Miks näib sellise lihtsa ülesande õige lahendus paljudele ebausutavana? Seepärast, et tavaliselt kujutletakse katset kepiga, mis on keskkohtapidi üles riputatud: säärane kepp asetub rõhtsalt. Siit tehaksegi liialt rutuline järeldus, et ka teljele toetuv varb peab säilitama tasakaalu ainult rõhtasendis.



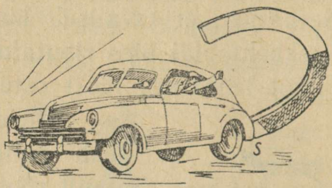
Joon. 28. Varb on teljel tasakaalustatud. Millises asendis ta peatub, kui panna ta pöörlema?

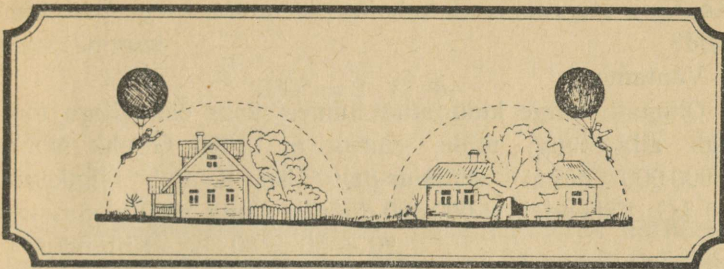
Kuid ülesriputatud kepp ja toetuv varb ei ole ühesugustes tingimustes. Läbipuuritud varb, mis toetub raskuskeset läbivale teljele, on nii-öelda ükskõikses tasakaalus. Ülesriputatud kepil on aga toetuspunkt mitte raskuskeskmes, vaid sellest k õ r g e m a l (joon. 29). Niiviisi ülesriputatud keha on tasakaalus ainult



Joon. 29. Mispärast võtab keskkohtapidi ülesriputatud kepp rõhtasendi?

siis, kui ta raskuskese asetseb samal püstjoonel toetuspunktiga, s. o. kui kepp on rõhtasendis; kallutamisel nihkub raskuskese püstsihist kõrvale (joon. 29). See harjumuspärane pilt takistabki nõustumast asjaoluga, et rõhtteljel asetsev varb võib olla tasakaalus ka kaldasendis.





NELJAS PEATÜKK.

LANGEMINE JA VISKAMINE.

Seitsmepenikoorma-saapad.

Need muinasjutulised saapad muutuvad nüüd tõelisteks üpris omapärasel kujul: keskmiste mõõtmetega reisukohvrina, milles on väikese õhupalli kest ja seadis vesiniku saamiseks. Mistahes hetkel võtab sportlane kohvrist õhupalli kesta, täidab selle vesinikuga ja muutub viiemeetrise läbimõõduga õhupalli omanikuks. Kinnitanud end selle palli külge, võib inimene sooritada hiiglahüppeid kõrgusse ja kaugusse. Oht sootuks kõrgusse kanduda ei ähvarda säärast õhusõitjat, sest õhupalli tõstetung on siiski veidi väiksem inimese kaalust.

Maailma kõrgusrekordi püstitanud esimese nõukogude stratostaadi „SSSR" startimisel osutasid niisugused õhupallid („hüppurid") meeskonnale olulise teene: nad aitasid vabastada õhupalli sassiläinud nööre.

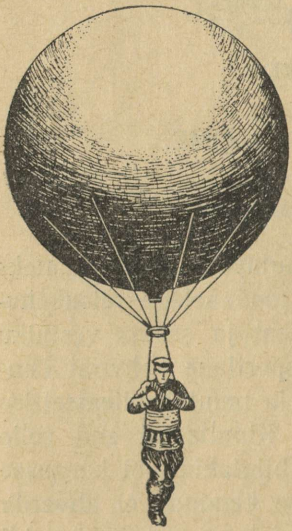
On huvitav välja arvutada, kui kõrgeid hüppeid võib sportlane sellise hüppur-palliga teha.

Olgu inimese kaal ainult 1 kG võrra suurem õhupalli tõstetungist. Teiste sõnadega, palliga varustatud inimene kaaluks nagu 1 kG, s. o. 60 korda vähem normaalkaalust.

Kas õnnestub tal sooritada ka 60 korda kõrgemaid hüppeid?

Vaatame.

Õhupalli külge kinnitatud inimest koos õhupalliga tõmbab alla tung, mille suurus on 1000 G ehk umbes 1 000 000 düüni. Hüppur-pall ise kaalub ligikaudu 20 kG. Tähendab, 1 000 000-düünine tung mõjub massisse $20 + 60 = 80$ kg. Kiirendus a, mille saab 80-kg-ne mass 1 000 000-düünise tungi mõjul, võrdub:



Joon. 30. Hüppur-pall.

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1\,000\,000}{80\,000} \approx 12 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}.$$

Normaalsetes tingimustes ei saa inimene hüpata kõrgemale kui 1 m. Vastava algkiiruse v saame valemist $v^2 = 2gh$:

$$v^2 = 2 \cdot 980 \cdot 100 \frac{\text{cm}^2}{\text{sek}^2},$$

millest

$$v \approx 440 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

Õhupalli alla kinnitatud inimene annab hüppel oma kehale niimitu korda väiksema kiiruse, mitu korda inimese mass koos õhupalliga on suurem inimese massist. (See järeldub valemist $Ft = mv$; tung F ja ta mõju kestus t on mõlemal juhul ühesuurused; tähendab, ühesugune on ka liikumishulk mv; siit on selge, et kiirus muutub pöördvõrdeliselt massiga.) Seega algkiirus hüppel õhupalliga võrdub:

$$440 \cdot \frac{60}{80} = 330 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

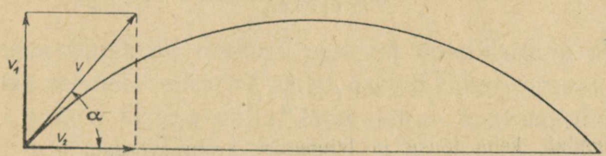
Kasutades valemit $v^2 = 2ah$ on nüüd kerge arvutada hüppe kõrgust:

$$330^2 = 2 \cdot 12 \cdot h,$$

millest

$$h \approx 4500 \text{ cm} = 45 \text{ m}.$$

Seega, maksimaalsel pingutusel, mille tagajärjel harilikes tingimustes tõuseks sportlase keha 1 m kõrgusele, hüppab inimene õhupalliga 45 m kõrgusele.



Joon. 31. Kuidas lendab horisondi suhtes kaldu visatud keha.

On huvitav arvutada selliste hüpete kestust. Hüpe 45 m kõrgusele kiirenduse puhul 12 $\frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$ peab kestma (valem $h = \frac{at^2}{2}$)

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}} = \sqrt{\frac{9000}{12}} \approx 27 \text{ sek}.$$

Et üles hüpata ja tagasi langeda, selleks kulub aega 54 sek.

Säärased aeglased sujuvad hüpped on muidugi tingitud kiirenduse väiksusest. Ilma õhupallita võiksime sedasama läbi elada ainult mingisugusel pisikesel asteroidil, kus raskustungi kiirendus on tunduvalt (60 korda) väiksem kui meie planeedil.

Nii äsjateostatud kui ka järgnevates arvutustes jätame õhutakistuse täielikult kõrvale. Teoreetilises mehhaanikas tuletatakse valemid, mis võimaldavad arvutada suurima tõusu kõrguse ja kestuse, arvesse võttes ka õhutakistust. Suurima tõusu kõrgus ja ka aeg liikumisel õhus osutuvad tunduvalt väiksemaks kui liikumisel õhutühjas ruumis.

Huvitav on teha veel üks arvutus — määrata suurima hüppe kaugus. Kaugushüppe sooritamiseks peab sportlane endale andma tõuke teatava nurga all horisondi suhtes. Andku ta seejuures oma kehale kiirus v (joon. 31). Lahutame selle kaheks komponendiks: püstkomponendiks v_1 ja rõhtkomponendiks v_2. Need võrduvad vastavalt:

$$v_1 = v \sin \alpha; \quad v_2 = v \cos \alpha.$$

Keha liikumine üles lõpeb t sekundi pärast ja siis

$$v_1 = at,$$

millest

$$t = \frac{v_1}{a}.$$

Tähendab, keha tõusu ja langemise kestus võrdub:

$$2t = \frac{2 \cdot v \cdot \sin \alpha}{a}.$$

Kiirusega v_2 liigub keha rõhtsuunas ühtlaselt kogu selle aja, mille vältel ta tõuseb ja langeb. Selles ajavahemikus läbib keha kauguse

$$S = 2v_2t = 2v \cos \alpha \cdot \frac{v \sin \alpha}{a} = \frac{2v^2}{a} \sin \alpha \cos \alpha = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{a}.$$

See ongi hüppe kaugus.

Kõige suuremaks osutub see, kui $\sin 2\alpha = 1$, sest nurga siinus ei või olla suurem ühest. Siit $2\alpha = 90^0$ ja $\alpha = 45^0$. Tähendab, õhutakistuse puudumisel teeb sportlane kõige kaugema hüppe siis, kui ta hüppab maapinnalt 45^0-se nurga all. Selle kaugeima hüppe suuruse saamiseks asetame valemisse

$$S = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{a}$$

suurused

$$v = 330 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}, \quad \sin 2\alpha = 1; \quad a = 12 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}.$$ Saame:

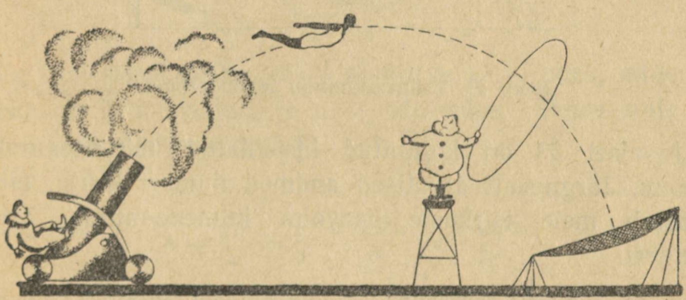
$$S = \frac{330^2}{12} \approx 90 \text{ m}.$$

Püsthüpped umbes 45 m kõrgusele ja hüpped 45°-se nurga all 90 m kaugusele võimaldavad hüpata üle mitmekorruseliste majade *.

Te võite teha samalaadseid katseid miniatuuris, riputades mänguõhupalli külge paberist „sportlase”, mille kaal oleks veidi suurem õhupalli tõstetungist. Kerge tõuke puhul hüppab see kujuke kõrgele ja langeb siis alla. Kuid hoolimata väikesest kiirusest etendab õhutakistus sel juhul tunduvamat osa kui tõelise sportlase hüpete puhul.

Inimene-mürsk.

Inimene-mürsk on tsirkuse eeskava õpetlikumaid numbreid. See seisneb selles, et artist asetub kahuritorusse, heidetakse sellest lasuga välja, läbib kõrge kaarekujulise tee

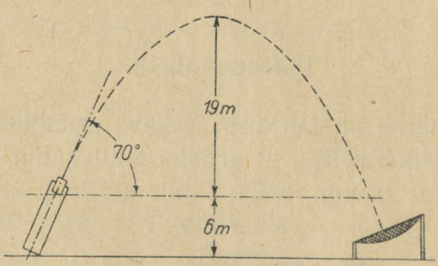


Joon. 32. Inimene-mürsk tsirkuses.

ja kukub võrgule 30 m kaugusel kahurist (joon. 32). Analoogilist numbrit oleme kõik näinud tuntud filmis „Tsirkus”, milles naisartist teeb lennu kahurist tsirkuse kupli alla.

* On kasulik meeles pidada, et üldse suurim viskekaugus, kui viskenurk on püstsuuna suhtes 45°, võrdub sama algkiiruse puhul tõusu kahekordse kõrgusega.

Sõnad kahur ja lask tuleks meil paigutada jutumärkidesse, sest siin pole ei tõelist kahurit ega tõelist lasku. Ehkki kahuritoru suudmest paiskub välja suitsupilv, ei heida artisti kahurist välja püssirohuplahvatus. Suits on ainult efekt, et pealtvaatajaid hämmastada. Tegelikult on siin liikumapanijaks vedru, mille päästmisega üheaegselt ilmub ka butafoorne suits: tekib meelepete, et inimenemürsk on välja lastud püssirohulaengu jõul.



Joon. 33. Inimese-mürsu lennu skeem.

Joonisel 33 on kujutatud kirjeldatud tsirkusenumbri skeem. Järgnevalt arvulised andmed numbri kohta, mida teostab meie tsirkuste osavaim inimene-mürsk, artist Leinert.

Kahuri kaldenurk	70°
Lennu suurim kõrgus	19 m
Kahuritoru pikkus	6 „

Suurt huvi pakuvad meile need täiesti erakordsed tingimused, milledes on artisti organism selle numbri sooritamisel. Lasu momendil mõjub tema kehasse rõhumine, mis on tajutav suurendatud raskusena. Siis, vaba lennu ajal, on artist näivalt kaalutu *. Lõpuks, võrgule kukkumise

* Vt. sama autori raamatuid: „Huvitav füüsika II", Tartu, 1949, ja „Planeetidevahelised reisud" (vene keeles), 9. trükk, 1934.

hetkel, mõjub artistisse jälle suurendatud raskus. Eespoolnimetatud artist talus seda kõike tervist kahjustamata. On huvitav täpselt kindlaks määrata need tingimused, sest tulevased universumireisijad, kes julgevad asuda reisule maailmaruumi rakett-laeval, peavad läbi elama samataolised aistingud.

Artisti liikumise esimeses faasis, mis toimub veel kahuri sees, huvitab meid „kunstliku raskuse" suurus. Me saame selle teada, kui arvutame välja keha kiirenduse kahuritorus. Selleks on tarvis teada keha poolt läbitud teed, s. o. kahuri pikkust, ning kiirust selle tee lõpul. Kahuritoru pikkus on teada — see on 6 m. Kiiruse võime aga välja arvutada, teades, et see on kiirus, millega tuleb visata vaba keha, et ta tõuseks 19 m kõrgusele.

Eelmises artiklis saime valemi

$$t = \frac{v \sin \alpha}{a},$$

kus t on tõusu kestus, v — algkiirus, α — nurk, mille all keha on üles visatud, ja a — kiirendus. Peale selle on meil teada tõusu kõrgus h.

Et

$$h = \frac{gt^2}{2} = \frac{g}{2} \cdot \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{g^2} = \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g},$$

võime arvutada kiiruse v:

$$v = \frac{\sqrt{2gh}}{\sin \alpha}.$$

Valemis esinevate tähtede väärtused on meile teada: $g = 9{,}8 \frac{\text{m}}{\text{sek}^2}$, $\alpha = 70^0$. Mis puutub tõusu kõrgusesse h, siis, nagu nähtub joonisest 32, peame selleks võtma $25 - 6 = 19$ m. Seega, otsitav kiirus

$$v = \frac{\sqrt{19{,}6 \cdot 19}}{0{,}94} = 20{,}6 \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

Niisuguse kiirusega väljub artisti keha kahurist ja järelikult on niisama suur ka kiirus kahuritoru suudmes. Rakendades valemit $v^2 = 2aS$, saame

$$a = \frac{v^2}{2S} = \frac{20{,}6^2}{12} \approx 35 \frac{\text{m}}{\text{sek}^2}.$$

Me saime teada, et artisti keha kiirendus kahuritorus on $35 \frac{\text{m}}{\text{sek}^2}$, seega ligikaudu $3\frac{1}{2}$ korda suurem normaalsest raskustungi kiirendusest. Seepärast tunnebki artist ennast lasu hetkel $4\frac{1}{2}$ korda tavalisest raskemana: ta normaalkaalule on lisandunud $3\frac{1}{2}$-kordne „kunstlik kaal” *.

Kui kaua kestab suurendatud kaalu tajumine? Valemist

$$S = \frac{at^2}{2} = \frac{at \cdot t}{2} = \frac{vt}{2} \text{ saame:}$$

$$6 = \frac{20{,}6 \cdot t}{2},$$

millest

$$t = \frac{12}{20{,}6} \approx 0{,}6 \text{ sek.}$$

Tähendab, enam kui pool sekundit tunneb artist, et ta kaalub mitte 70 kG, vaid umbes 300 kG.

Nüüd läheme tsirkusenumbri t e i s e faasi — artisti vaba lennu juurde õhus. Siin huvitab meid lennu kestus; kui palju aega artist üldse ei taju oma kaalu?

Eelmises artiklis tegime kindlaks (lk. 66), et sellise lennu kestus võrdub:

$$\frac{2v \sin \alpha}{a}.$$

Asetades tähtede asemele meile teadaolevad väärtused leiame, et lennu otsitav kestus võrdub:

$$\frac{2 \cdot 20{,}6 \cdot \sin 70^0}{9{,}8} \approx 3{,}9 \text{ sek.}$$

Täieliku kaalutuse tajumine kestab umbes 4 sekundit.

* See pole täiesti õige, sest „kunstlik kaal” mõjub püstsuuna suhtes 20^0-se nurga all, normaalkaalul on aga püstsuund. Siiski pole vahe suur.

Lennu *kolmandas* faasis määrame, nagu tegime esimeseski faasis, „kunstliku kaalu" suuruse ja faasi kestuse. Kui võrk asetseks kahuritoru suudme kõrgusel, satuks artist võrku kiirusega, mis võrdub lennu algkiirusega. Võrk on aga paigutatud veidi madalamale ja seepärast on artisti kiirus siin veidi suurem; vahe on aga väga väike, ja et mitte arvutusi keerukaks teha, me seda vahet ei arvesta. Järelikult võime eeldada, et artist satub võrku kiirusega $20{,}6\,\frac{\text{m}}{\text{sek}}$. Mõõtmine näitab, et võrku kukkumisel artist painutab seda alla 1,5 m võrra. Tähendab, kiirus $20{,}6\,\frac{\text{m}}{\text{sek}}$ muutub nulliks teepikkusel 1,5 m. Valemist $v^2 = 2aS$ saame

$$20{,}6^2 = 2a \cdot 1{,}5,$$

siit kiirendus

$$a = \frac{20.6^2}{2 \cdot 1{,}5} \approx 141\,\frac{\text{m}}{\text{sek}^2}.$$

Leidsime, et artistil on võrku alla painutades kiirendus $141\,\frac{\text{m}}{\text{sek}^2}$, s. o. 14 korda suurem raskustungi kiirendusest. Mõninga aja vältel ta tunneb end oma normaalkaalust 15 korda raskemana! See erakordne olukord kestab siiski ainult

$$\frac{2 \cdot 1{,}5}{20{,}6} \approx \frac{1}{7}\,\text{sek}.$$

Isegi tsirkuseartisti karastatud organism ei taluks kahjustamatult oma kaalu 15-kordset suurenemist, kui see olukord kestaks veidi kauem. Sest 70 kG kaaluv inimene omandab tonnise kaalu! Sellise koormuse kestev mõju peaks inimese puruks vajutama, igal juhul aga võtma temalt võimaluse hingata, sest lihased ei suudaks „tõsta" niivõrd rasket rinnakorvi.

Palliheite-rekord.

Ülesanne.

Kolhooside-sovhooside oblastispartakiaadil Harkovis 1934. aastal püstitas kehakultuurlane Sinitskaja kahe käega palli heites uue üleliidulise rekordi: 73 m 92 cm. Kui kaugele peab kehakultuurlane palli heitma Leningradis, et seda rekordit lüüa?

Lahendus.

Näib, et vastus on lihtne: pall tuleb heita kas või ühe sentimeetri võrra kaugemale. Kui kummalisena see ka mõnele sportlasele võib näida, kuid selline vastus on ebaõige. Kui keegi heidaks palli Leningradis isegi viie sentimeetri võrra lähemale, on ta, õigesti hinnates, löönud Sinitskaja rekordit.

Tõenäoliselt aimab lugeja, milles siin asi seisneb. Heite kaugus sõltub raskustungi kiirendusest, raskustung aga on Leningradis suurem kui Harkovis. Pole õige võrrelda saavutusi mõlemas kohas, arvestamata raskustungi kiirenduste vahet: Harkovis on kehakultuurlane looduse poolt asetatud soodsamatesse tingimustesse kui Leningradis.

Peatume teoorial. Keha, mis on visatud horisondi suhtes nurga α all kiirusega v, lendab kaugusele *

$$S = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Raskustungi kiirenduse g suurus on eri kohtades erinev, olles näiteks

Arhangelski	laiusel	(64°30′)	982 $\frac{cm}{sek^2}$
Leningradi	„	(60°)	981,9 „
Harkovi	„	(50°)	981,1 „
Kairo	„	(30°)	979,3 „

* Arvutuste lihtsustamiseks jätame õhutakistuse arvestamata.

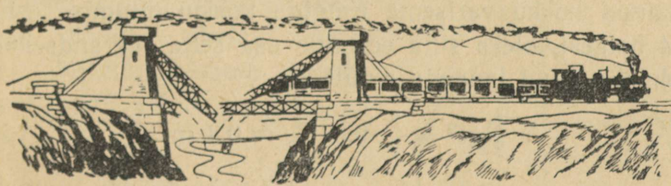
Esitatud heitekauguse-valemist on näha, et võrdsete muude tingimuste puhul on see kaugus pöördvõrdeline suurusega g. Lihtne arvutus näitab, et jõupingutus, mille inimene sooritab, heites palli Harkovis 73 m 92 cm kaugusele, võimaldaks teistes kohtades sama palli heita järgmistele kaugustele:

Arhangelskis	73 m 85 cm
Leningradis	73 „ 86 „
Kairos	74 „ 5 „

Seega selleks, et lüüa Leningradis Harkovi naissportlase rekordit 73 m 92 cm, tuleb ületada kaugus 73 m 86 cm. Kairo sportlane, kes kordab Harkovi rekordit, jääb aga tõeliselt sellest maha 13 cm võrra, kuna Arhangelski kehakultuurlane, heites palli 7 cm võrra lähemale kui Sinitskaja, tõeliselt kordab tema rekordit.

Hapral sillal.

Romaanis „80 päevaga ümber maailma" jutustab Jules Verne ühest mõtlemapanevast juhtumist. Rippuv raudtee-



Joon. 34. Episood sillaga Jules Verne'i romaanis.

sild Kaljumäestikus ähvardas kokku variseda rikutud kandjate tõttu. Sellest hoolimata otsustas vahva masinist reisijaterongi üle silla viia.

„Aga sild võib ju sisse langeda!"

„See ei tähenda midagi; kui sõita täiel aurul, on meil võimalik sillast üle sõita."

Rong sõitis edasi uskumatu kiirusega. Kolvid tegid 20 käiku sekundis. Võllid suitsesid. Rong nagu poleks rööpaid puudutanudki. Kiirus oli hävitanud raskuse... Sild ületati. Rong oli „hüpanud" ühelt kaldalt teisele. Aga vaevalt oli rong jõe ületanud, kui sild varises suure müringa vette."

Kas see lugu on usutav? Kas võib „kiirus hävitada raskuse"? Me teame, et raudtee muldkeha kannatab kiirel sõidul rohkem kui aeglasel; seepärast ongi ette kirjutatud, et nõrkadel kohtadel tuleb sõita aeglaselt. Antud juhul päästis aga kiire sõit. Kas see on võimalik?

Osutub, et kirjeldatud juhtum on tõenäoline. Teatavates tingimustes võis rong vältida katastroofi, hoolimata sellest, et sild tema all varises kokku. Kogu asi seisneb selles, et rong ületas silla väga lühikese aja jooksul. Sellise lühikese aja kestel sild lihtsalt e i j õ u d n u d kokku variseda...

Olgu esitatud näitlik arvutus. Reisijaterongi veduri veoratta läbimõõt on 1,3 m. „Kolvi kakskümmend käiku sekundis" annavad veorattale 10 täispööret, s. o. 10 korda 3,14 · 1,3. See on 41 m; selline on kiirus sekundis. Kiire mäestikujõgi polnud tõenäoliselt lai; silla pikkus oli, ütleme, 10 m. Tähendab, rong ületas silla kohutava kiirusega, s. o. $\frac{1}{4}$ sekundi jooksul. Isegi siis, kui sild oleks hakanud kokku varisema rongiga kokkupuutumise esimesest hetkest, oleks silla eesmine osa selle veerandsekundi jooksul võinud langeda ainult

$$\frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \cdot 9{,}8 \cdot \frac{1}{16} \approx 0{,}3 \text{ m},$$

see on 30 cm. Sild ei murdunud kohe mõlemast otsast, vaid algul sellest otsast, kuhu rong peale sõitis. Sel ajal, kui see sillaosa hakkas langema, vajudes esimesi sentimeetreid, oli vastasots alles kaldaga ühenduses. Nii võis rong (olles väga lühike) jõuda vastaskaldale enne, kui kokkuvarisemine oli sinna ulatunud. Selles mõttes tulebki mõista romaanikirjaniku piltlikku väljendust: „Kiirus oli hävitanud raskuse."

Episoodi ebausutavus seisneb hoopis teises asjaolus: selles, et „kolvid tegid 20 käiku sekundis", andes kiiruse 150 kilomeetrit tunnis. Sellist kiirust ei suutnud tolleaegne vedur arendada.

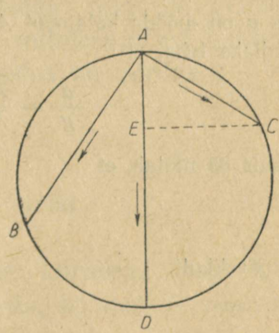
Tuleb märkida, et midagi kirjeldatud juhtumi taolist teevad mõnikord uisutajad: nad riskivad kiiresti ületada jääkatte õhukesed kohad, mis aeglasel liikumisel kindlasti murduksid.

Samuti tuleb silmas pidada seda, et piltlik väljendus „kiirus hävitas raskuse" on kehtiv ka liikumise puhul kumeral sillal. Siingi vähendab kiiruse suurenemine liikuva keha rõhumist sillale.

Kolm teed.

Ülesanne.

Püstseinale on joonestatud ring (joon. 35), mille läbimõõt on 1 m. Ringi ülemisest punktist *A* lähevad mööda kõõle *AB* ja *AC* rennid. Punktist *A* pannakse üheaegselt liikuma haavliterad: üks langeb alla vabalt, kaks teist liuguvad hõõrdumiseta ja veeremata mööda siledaid renne alla. Milline kolmest haavliterast jõuab esimesena ringjoonele?



Joon. 35. Ülesanne kolmest haavliterast.

Lahendus.

Et tee renni *AC* mööda on kõige lühem, siis võib arvata, et seda renni mööda liuguv haavlitera jõuab esimesena ringjoonele. Teine koht võistluses kuulub nähtavasti renni *AB* mööda liuguvale haavliterale ja lõpuks viimasena jõuab ringjoonele püstsuunas langev haavlitera.

Katse näitab nende järelduste ekslikkust: kõik haavliterad jõuavad ringjoonele s a m a a e g s e l t!

Põhjus on selles, et haavliterad liiguvad erineva kiirusega: kõige kiiremini liigub vabalt langev haavlitera, ja renne mööda liuguvatest haavliteradest on kiirem see, mis liigub mööda järsema kallakuga renni. Näeme, et mööda pikemaid teid liiguvad haavliterad kiiremini, ja võib tõestada, et suuremast kiirusest tingitud eelis katab täpselt pikemast teest tingitud kaotuse.

Tõepoolest, püstsuunas AD on langemise kestus t (kui mitte arvestada õhutakistust) määratav valemiga

$$AD = \frac{gt^2}{2},$$

millest

$$t = \sqrt{\frac{2AD}{g}}.$$

Liikumise kestus t_1 mööda kõõlu, näiteks mööda kõõlu AC, võrdub

$$t_1 = \sqrt{\frac{2AC}{a}},$$

kus a on mööda kaldjoont AC toimuva liikumise kiirendus. On kerge kindlaks teha, et

$$\frac{a}{g} = \frac{AE}{AC} \quad \text{ja} \quad a = \frac{AE \cdot g}{AC}.$$

Joonis 35 näitab, et

$$\frac{AE}{AC} = \frac{AC}{AD}$$

ja, järelikult,

$$a = \frac{AC}{AD} \cdot g.$$

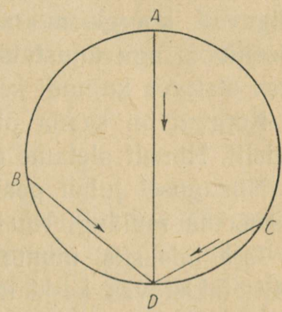
Tähendab,

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot AC}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot AC \cdot AD}{AC \cdot g}} = \sqrt{\frac{2AD}{g}} = t.$$

Seega, $t = t_1$, s. o. liikumine kõõlu ja läbimõõdu ulatuses on ühesuguse kestusega. See kehtib muidugi mitte ainult kõõlu AC, vaid üldse iga kõõlu kohta, mis on tõmmatud punktist A.

Sama ülesande võib esitada ka teisel kujul. Kolm keha liigub raskustungi mõjul mööda vertikaaltasapinnas asetseva ringi kõõle AD, BD ja CD (joon. 36). Liikumine algas punktides A, B ja C üheaegselt. Milline keha jõuab esimesena punkti D?

Lugejal pole nüüd raske iseseisvalt tõestada, et kehad peavad jõudma punkti D üheaegselt.



Joon. 36. Galilei ülesanne.

Praegu läbiarutatud ülesanne on esitatud ja lahendatud Galilei poolt raamatus „Vestlused kahest uuest teadusharust" (venekeelne tõlge on olemas); selles raamatus esitatakse esmakordselt vaba langemise seadused, mis on avastatud Galilei poolt.

Sealt leiame tõestuse teoreemile, mille Galilei sõnastas nii: „Kui pealpool horisonti asetseva ringi kõrgeimast punktist on ringjoonele tõmmatud mitmesugused kaldjooned, siis neid mööda langemise kestus on võrdne."

Ülesanne neljast kivist.

Torni tipust heideti ühesuuruse kiirusega neli kivi: üks — püsti üles, teine — püsti alla, kolmas — rõhtsuunas paremale, neljas — rõhtsuunas vasakule.

Milline kuju on sellel nelinurgal, mille tippudes asetsevad kivid langemisel? Õhutakistust mitte arvestada!

L a h e n d u s.

Enamik lugejaist asub selle ülesande lahendamisele arvamusega, et langevad kivid peavad asetsema sellise nelinurga tippudes, mille kuju meenutab paberlohet. Arutatakse nii: ülesvisatud kivi kaugeneb lähtepunktist aeglasemalt kui allavisatud kivi; kõrvalevisatud kivid aga liiguvad kõverjooni mööda teatava keskmise kiirusega. Seejuures aga unustatakse arvestada kiirust, millega langeb otsitava kujundi keskne punkt.

Kergem on saada õiget vastust, kui arutada küsimust teisiti. Nimelt oletame esialgu, et raskust üldse ei ole. Niisugusel juhul peaksid neli visatud kivi igal hetkel asetsema muidugi ruudu tippudes.

Aga mis siis muutub, kui paneme mõjuma raskuse? Mittetakistavas keskkonnas langevad kõik kehad ühesuuruse kiirusega. Seepärast langeb meie neli kivi raskustungi mõjul ühepalju, s. o. ruuduga toimub rööplüke, ruut jääb ruuduks.

Niisiis, visatud kivid asetsevad ruudu tippudes.

Praegu läbiarutatud ülesandele on lähedane

ülesanne kahest kivist.

Torni tipust visati kaks kivi kiirusega 3 meetrit sekundis: üks — püsti üles, teine — püsti alla.

Kui suure kiirusega nad kaugenevad teineteisest?

Õhutakistust mitte arvestada!

L a h e n d u s.

Arutades samuti nagu eelmises ülesandes, tuleme kergesti õigele vastusele: kivid kaugenevad teineteisest kiirusega $3 + 3$, s. o. $6 \frac{m}{sek}$. L a n g e m i s e kiirus ei oma siin imelikul kombel mingit tähtsust. Vastus on sama mistahes taevakeha — Maa, Kuu, Jupiteri jt. — puhul.

Pallimäng.

Ü l e s a n n e.

Mängija viskab palli oma vastasmängijale, kes on temast 28 m kaugusel. Pall lendab 4 sekundit. Milline oli palli tõusu maksimaalne kõrgus?

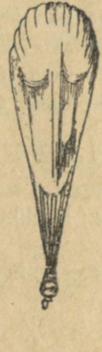
L a h e n d u s.

Pall lendas 4 sekundit, liikudes seejuures üheaegselt rõht- ja püstsuunas. Tähendab, tõusule ja langemisele kulus 4 sekundit, neist tõusule 2 sekundit ja langemisele 2 sekundit (mehhaanikaõpikutes tõestatakse, et püstviske puhul võrdub tõusu kestus langemise kestusega). Järelikult, pall langes kõrguselt

$$S = \frac{gt^2}{2} = \frac{9{,}8 \cdot 2^2}{2} = 19{,}6 \text{ m}.$$

Niisiis oli palli suurim tõus umbes 20 m. Mängijatevahelist kaugust (28 m) meie ei kasutanudki.

Sedavõrd mõõdukate kiiruste puhul võib õhutakistuse arvestamata jätta.



VIIES PEATÜKK.

RINGLIIKUMINE.

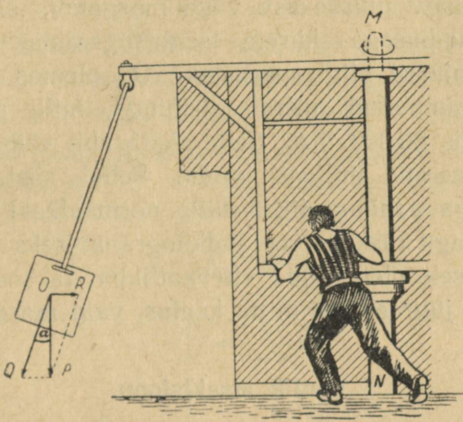
Lihtne võte raskemaks muutumiseks.

Me soovitame tihti oma haigetele tuttavatele „kaalus juurde võtta". Kui asi seisneks ainult selles, siis võiks kaalu suurenemist saavutada väga kiiresti ka ilma tugevdatud toitmiseta ja oma tervise eest hoolitsemiseta — tarvitseb ainult istuda karussellile. Karussellil sõitjad harilikult ei aimagi, et nad saanis istudes muutuvad raskemaks. Lihtne arvutus annab meile lisaraskuse suuruse.

Olgu (joon. 37) MN see telg, mille ümber tiirlevad karusselli saanid. Kui karussell pöörleb, siis tema külge riputatud saan, püüdes koos sõitjaga liikuda inertsi tõttu mööda puutujat ja järelikult kaugeneda teljest, võtab joonisel 37 näidatud kaldasendi. Reisija kaalu P lahutame kaheks komponendiks: üks neist, R, on suunatud rõhtsalt telje poole ja selle kui tsentripetaal- ehk kesktõmbetungi ülesanne on hoida keha ringliikumises; teine tung, Q, on suunatud piki nööri ja surub reisijat vastu saani: seda tungi tajubki reisija kaaluna. „Uus kaal" on, nagu näeme, suurem normaalkaalust P ja võrdub $\frac{P}{\cos\alpha}$. Et leida P ja Q vahel oleva nurga α suurust, peame teadma tungi R suurust. See on tsentripetaaltung; järelikult, selle poolt antud kiirendus

$$a=\frac{v^2}{r},$$

kus v on saani raskuskeskme kiirus, r aga on ühtlase ringliikumise raadius, s. o. saani raskuskeskme kaugus teljest MN. Olgu see kaugus 6 m ja karusselli tiirude arv minutis 4; tähendab, ühes sekundis teeb



Joon. 37. Karusselli elav jõumasin. On näidatud tungid, mis mõjuvad saanisse.

saan $\frac{1}{15}$ täispöördest. Siit saani ringliikumise kiirus

$$v = \frac{1}{15} \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 6 \approx 2{,}5 \ \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

Nüüd leiame tungi R poolt tekitatud kiirenduse:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{250^2}{600} \approx 104 \ \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}.$$

Et tungid on võrdelised kiirendustega, siis

$$\tan \alpha = \frac{104}{980} \approx 0{,}1; \quad \alpha = 6^0.$$

Me tegime kindlaks, et „uus kaal" $Q = \frac{P}{\cos \alpha}$.

Tähendab,

$$Q = \frac{P}{\cos 6^0} = \frac{P}{0{,}994} = 1{,}006 \ P.$$

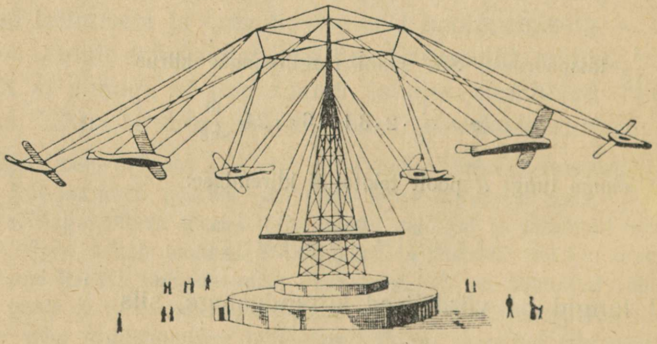
Kui inimene tavalistes tingimustes kaalus 60 kg, siis on praegu tema kaalu juurdekasv umbes 360 g.

Kuna harilikul, võrdlemisi aeglaselt tiirleval karussellil on kaalu näiv juurdekasv vähe märgatav, siis võib ta väikese raadiusega kiirete tsentrifugaalmasinate puhul tõusta mõnikord hiiglasuurusteni. On olemas selline seadis — niinimetatud „ultratsentrifuug", mille pöörlev osa teeb minutis 80 000 tiiru. Selle riista abil võib kaalu suurendada veerand miljonit korda! Sellel riistal uuritava vedeliku iga vähimgi tilk, mille normaalkaal on 1 mG, muutuks nagu raskeks veerandkilogrammiseks kehaks.

Tõenäoliselt olete nüüd ettevaatlikum ja soovitate oma tuttavatele juurdevõttu mitte kaalus, vaid massis.

Ohtlik atraktsioon.

Ühte Moskva parki kavatseti ehitada uus atraktsioon. Oli projekteeritud midagi ringkiige taolist, mille köite



Joon. 38. Karussell lennukitega.

(või varraste) otstele taheti kinnitada lennukimudelid. Kiirel pöörlemisel peavad köied eemale viskuma ja tõstma „lennukeid" neis istuvate reisijatega. Ehitajad soovisid anda karussellile niisuguse tiirude arvu, et köied või vardad oleksid peaaegu rõhtsalt välja sirutunud. Projekti ei teostatud, sest selgus, et reisijate tervis oleks olnud ohustamata ainult niikaua, kuni köiel on üsna märgatav kalle horisondi suhtes. Kui suur kõrvalekaldumine püstsuunast on köiele äärmine, seda võib kergesti välja arvutada, lähtudes asjaolust, et inimese organism talub häireteta ainult oma kaalu kolmekordset suurenemist.

Siin vajame joonist 37, mida kasutasime eelmises artiklis. Me soovime, et kunstlik kaal Q ei ületaks loomulikku kaalu P üle kolme korra, nii et ainult äärmisel juhul oleks kehtiv võrdus

$$\frac{Q}{P} = 3;$$

et

$$\frac{Q}{P} = \frac{1}{\cos\alpha},$$

siis

$$\frac{1}{\cos\alpha} = 3 \text{ ja } \cos\alpha = \frac{1}{3} \approx 0{,}33,$$

millest

$$\alpha = 71^0.$$

Seega köis ei tohi püstasendist kõrvale kalduda rohkem kui 71^0 ja, tähendab, ei tohi rõhtasendile läheneda rohkem kui 19^0 kaugusele.

Joonis 38 kujutab seda laadi atraktsiooni. Te näete, et köite kalle ei ulatu siin kaugeltki piirväärtuseni.

Raudteekäänakul.

Keegi füüsik jutustab: „Istudes raudteevagunis, mis liikus mööda kurvi, märkasin äkki, et tee läheduses olevad puud, majad ja vabrikukorstnad võtsid kallaka asendi."

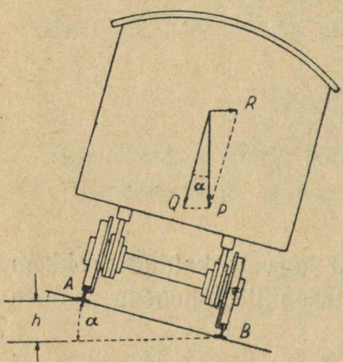
Taolisi nähtusi täheldavad mõnikord reisijad rongi liikumisel suure kiirusega.

Põhjust ei tule otsida selles, et välimised rööpad on käänakutel asetatud kõrgemale kui sisemised ja et seetõttu vagun liigub kurvil veidi viltuses asendis. Kui vaguniaknast välja sirutuda ja vaadata ümbrust mitte läbi kallutatud aknaraami, jääb illusioon püsima.

Pärast eelmistes artiklites öeldut pole vist tarvis hakata selle nähtuse põhjust pikemalt seletama. Lugeja tõenäoliselt juba aimab, et vagunis rippuv lood võtab kallaka asendi sel hetkel, mil rong hakkab „võtma" kurvi. See uus püstsiht asendab reisijal endist; seepärast ongi kõik, mis enne oli püstsihiline, muutunud reisijaile viltuseks *.

Püstjoone uut sihti võib kergesti määrata joonise 39 põhjal. Siin tähistab P raskustungi ja R kesktõmbetungi. Komponenttung Q asendab reisijal raskustungi; kõik kehad vagunis langevad selles suunas. Nurka α uue ja vana püstsihi vahel määratakse võrrandist

$$\tan\alpha = \frac{R}{P}.$$



Joon. 39. Vagun liigub kurvil. Missugused tungid mõjuvad temasse? All — rööbastee kallaku ristlõige.

Et aga tung R on võrdeline $\frac{v^2}{r}$-ga, kus v on rongi kiirus, r käänaku kõverusraadius, ja tung P on võrdeline raskustungi kiirendusega g, siis

$$\tan\alpha = \frac{v^2}{r} : g = \frac{v^2}{rg}.$$

Olgu rongi kiirus 18 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$ $\left(65\ \frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$ ja kõverusraadius 600 m. Siis

$$\tan\alpha = \frac{18^2}{600\cdot 9{,}8} \approx 0{,}055,$$

millest

$$\alpha \approx 3^0.$$

Seda näivat püstsihti ** me hakkame paratamatult pidama püstsihiks, tõeliselt püstised esemed aga näivad

---

* Et Maa pöörlemise tagajärjel maapinna punktid liiguvad mööda kaari, siis pole lood ka „kõval maal" suunatud täpselt meie planeedi keskpunkti poole, vaid kaldub väikese nurga võrra sellest suunast kõrvale. (Leningradi laiusel — 4′, aga 45. paralleelil kõige rohkem — 6′ võrra. Poolusel ja ekvaatoril pole üldse kõrvalekaldumist.)

** Õigemini „ajutist püstsihti" antud vaatleja suhtes.

meile kallutatuina 3^0 võrra. Sõidul St.-Gotthardi mägiraudteel selle arvukate kurvidega näevad reisijad ümbritsevaid püstiseisvaid esemeid kallutatuna mõnikord 10^0 võrra.

Et vagun oleks kurvil tasakaalus, selleks peab väline rööbas asuma seesmisest kõrgemal suuruse võrra, mis vastab püstjoone uuele suunale. Näiteks äsjavaadeldud käänaku puhul peab väline rööbas olema seesmisest kõrgem suuruse h võrra. Leiame h võrrandist

$$\frac{h}{AB} = \sin \alpha,$$

kus AB on rööbaste vahekaugus, mis on ligikaudu 1,5 meetrit; $\sin \alpha = \sin 3^0 = 0{,}052$. Tähendab,

$$h = AB \sin \alpha = 1500 \cdot 0{,}052 \approx 80 \text{ mm}.$$

Väline rööbas peab olema seega 80 mm võrra seesmisest kõrgemal. On kergesti arusaadav, et see kõrgendus vastab ainult teatavale kindlale kiirusele, kuid teda ei saa muuta vastavalt rongi kiirusele; käänakute ehitamisel võetakse seepärast arvesse liikumisel kõige sagedamini esinev kiirus.

Jalakäijatele sobimatu tee.

Seistes raudteekäänakul märkame vaevalt, et väline rööbas on sisemisest kõrgem. Hoopis teissugune on jalgrataste tee velodroomil: siin on käänakutel palju väiksem kõverusraadius; et aga kiirus on siiski võrdlemisi suur, kujuneb ka kaldenurga suurus üsna tunduvaks. Kui kiirus on näiteks 72 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ $\left(20 \frac{\text{m}}{\text{sek}}\right)$ ja raadius 100 m, siis kaldenurk, mille suuruse me määrame valemist

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{rg},$$

võrdub:

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{rg} = \frac{400}{100 \cdot 9{,}8} \approx 0{,}4,$$

millest

$$\alpha \approx 22^0.$$

On arusaadav, et säärasel teel ei saa jalakäija püsida. Jalgrattur tunneb aga ainult sellisel teel end täiesti stabiilsena. Huvitav raskuse paradoks! Samal viisil ehitatakse ka spetsiaalsed teed autovõistlusteks.

Tsirkustes võib sageli näha veelgi paradoksaalsemaid trikke, kuid ka need on täielikus kooskõlas mehhaanika seadustega. Tsirkuses keerleb jalgrattur lehtris („korvis"), mille raadius on 5 või vähemgi meetrit; kiiruse puhul $10 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ peab lehtri seinte kalle olema väga järsk:

$$\tan \alpha = \frac{10^2}{5 \cdot 9{,}8} \approx 2{,}04,$$

millest

$$\alpha \approx 63^0.$$

Pealtvaatajaile näib, et ainult erakordne osavus ja kunst aitavad artistil end hoida niisugustes ebaloomulikkudes tingimustes; tegelikult aga on see antud kiiruse puhul kõige püsivam asend *.

Kallutatud Maa.

Kes on juhtunud nägema, kui järsult kaldub küljele lennuk, tehes rõhtsõlme (viirangut), sellel loomulikult tekib mõte neist tõsistest ettevaatusabinõudest, mida lendur peab tarvitusele võtma, et mitte lennukist välja kukkuda. Kuid tegelikult lendur ise ei tunnegi, et masin on viltu — temale näib, et masin on õhus rõhtasendis. Selle asemel

* Jalgratturite trikkidest vt. ka „Huvitav füüsika II", Tartu, 1949.

ta tunneb midagi muud: esiteks ta tunneb suurenenud raskust, teiseks ta näeb, et kogu nähtav maastik on kaldasendis.

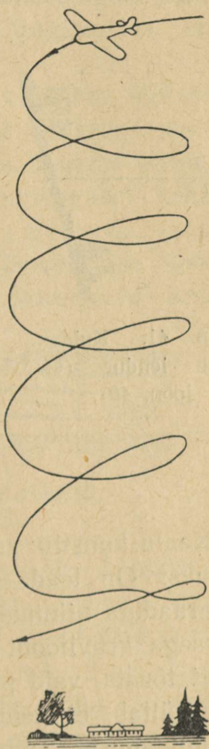
Teeme umbkaudse arvutuse selle kohta, kui suure nurga võrra võib lenduri jaoks rõhtpind viirangu sooritamisel „kalduda" ja kui suureks võib saada tema „suurenenud raskus".

Võtame arvulised andmed tegelikust elust: lendur sooritab kiirusega $216 \frac{\text{km}}{\text{h}} \left(60 \frac{\text{m}}{\text{sek}}\right)$ kruvijoone, mille läbimõõt on 140 m (joon. 40). Kaldenurga α leiame võrrandist

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{r} : g = \frac{60^2}{70 \cdot 9{,}8} \approx 5{,}2,$$

millest $\alpha \approx 79^0$. Teoreetiliselt peab sellele lendurile maapind olema mitte ainult „viltu", vaid isegi peaaegu „püsti", moodustades püstsihiga ainult 11^0-se nurga.

Tegelikult, vist füsioloogiliste põhjuste tõttu, paistab maapind neil juhtudel kallutatuna nurga võrra, mis on mõningal määral väiksem ülalarvutatud nurgast (joon. 41).



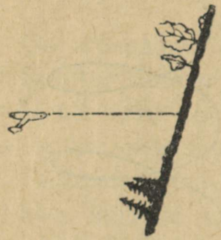
Joon. 40. Lendur lendab mööda kruvijoont.

Mis puutub „suurenenud raskusse", siis selle suhe loomuliku raskusega võrdub (joon. 39) nende suundade vahelise nurga koosinuse pöördsuurusega. Sama nurga tangens võrdub

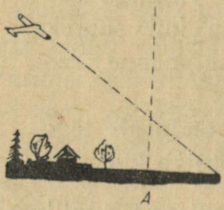
$$\frac{v^2}{r} : g = 5{,}2.$$

Tabelitest leiame vastava koosinuse 0,19 ja selle pöördväärtuse 5,3.

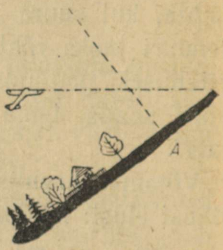
Tähendab, sellist viirangut sooritav lendur surutakse vastu istet 5 korda tugevamini kui sirgjoonelisel lennul, seega tundub lendurile, et ta on umbes viis korda raskem.



Joon. 41. Kuidas näeb **lendur** (vt. joon. 40).



Joon. 42. Lendur lendab mööda suure raadiusega kõverat (520 m) kiirusega $190 \frac{km}{h}$.



Joon. 43. Kuidas näeb lendur (vt. joon. 42).

Kaalu kunstlik suurenemine võib saada lendurile saatuslikuks. On teada juhtum, kus lendur, sooritades oma aparaadiga niinimetatud stooporit (langemine väikese raadiusega kruvijoont mööda), ei saanud mitte ainult istmelt tõusta, vaid polnud suuteline kättki liigutama. Arvutus näitab, et tema kehakaal oli suurenenud 8 korda! Ainult suurima pingutusega suutis ta end hukust päästa.

Miks jõed looklevad.

Juba ammusest ajast on teada, et jõgedel on kalduvus roomava ussi taoliselt loogelda. Ei tule arvata, et see looklemine on alati tingitud maapinna reljeefist. Maakoht võib olla täiesti tasane, kuid jõgi ikkagi lookleb. See asjaolu näib üsna mõistatuslikuna: tundub, et niisuguses kohas peaks jõgi loomulikult voolama sirgjooneliselt.

Lähem vaatlus toob siiski esile ootamatu asjaolu: sirge suund on isegi tasandikul voolavale jõele kõige vähem püsiv ja seetõttu ka kõige vähem tõenäoline. Sirget suunda saab jõgi alal hoida ainult ideaalsetes tingimustes, mis tegelikult kunagi ei esine.

Kujutlegem jõge, mis voolab e n a m - v ä h e m ühtlases pinnases päris sirgjooneliselt. Näitame, et niisugune suund kaua ei säili. Juhuslike põhjuste, näiteks pinnase ebaühtluse tõttu kõverdub jõe vool veidi mingisugusel kohal. Mis toimub edasi? Kas jõgi õgvendab ise oma voolusuuna? Ei, kõverdumine suureneb. Kõverdumise kohal (joon. 44) hakkab vesi, liikudes mööda kõverjoont, kesk-

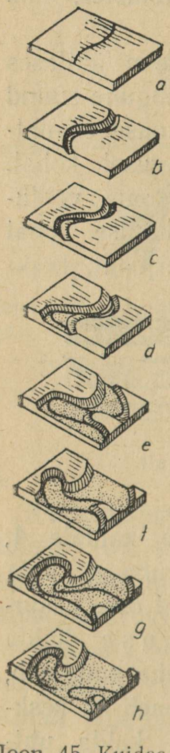
Joon. 44. Jõe vähimgi looge kasvab pidevalt.

tõuketungi tõttu survet avaldama nõgusale kaldale *A*, hakkab seda uhtma, taandudes samal ajal kumera kalda *B* poolt. Jõe õgvendamiseks oleks tarvis olnud otse vastupidist: k u m e r a kalda uhtmist ja n õ g u s a kalda äärest eemaldumist. Uhtmise tõttu nõgusus üha suureneb, looke kõverus samuti, aga sellega koos suureneb ka kesktõuketung, mis omakorda suurendab nõgusa kalda uhtmist. Nagu näete, piisab vähimagi kääru tekkimisest — ja kohe hakkab see käär tagasihoidmatult suurenema.

Et veevool on nõgusa kalda juures kiirem kui kumera kalda juures, siis pinnaseosakesed, mis liiguvad koos veega, sadestuvad kumera kalda lähedal, kuna nõgusal kaldal, ümberpöördult, toimub suurendatud uhtmine, mille tagajärjel jõgi muutub siin üha sügavamaks.

Sel põhjusel muutub kumer kallas lausikuks ja veelgi kumeramaks, nõgus kallas aga järsemaks.

Et juhuslikud põhjused, mis tingivad jõe esialgse väikese looke, on peaaegu vältimatud, siis on vältimatu ka käänakute tekkimine. Käänakud suurenevad vahetpidamatult ja annavad küllaldase ajavahemiku vältel jõele iseloomuliku looklevuse. Neid lookeid nimetatakse „meandriteks". See sõna on tuletatud Maiandrose jõe (Väike-Aasia lääneosas) nimest. Maiandrose jõgi oma ussitaolise vooluga hämmastas inimesi juba vanaajal ja nii on tema nimest tekkinud üldnimi.

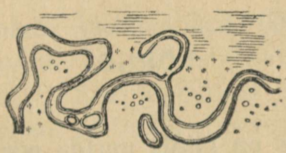


Joon. 45. Kuidas jõesängi kõverus järk-järgult iseendast suureneb.

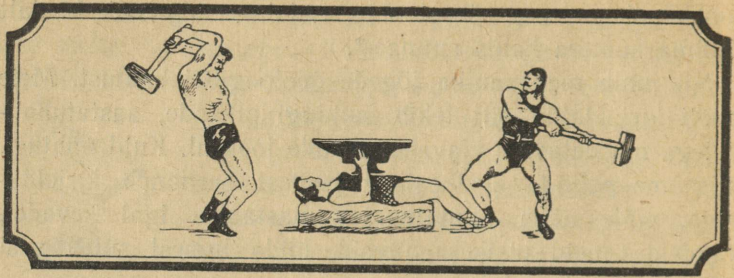
Huvitav on jälgida jõeloogete edasist saatust. Jõesängi kuju järkjärgulised muutused on lihtsustatult näidatud joonisel 45, *a—h*. Joonisel 45 *a* on teie ees vaevalt märgatav jõe kõverus, järgmisel joonisel 45 *b* on veevool nõgusat kallast juba veidi välja uhtnud ja laugest kumerast kaldast veidi taandunud. Joonisel 45 *c* on jõesäng veelgi enam laienenud, joonisel 45 *d* on aga tekkinud juba lai org, millest jõesäng hõivab ainult väikese osa. Joonistel 45 *e*, *f* ja *g* on jõeoru arenemine veel kaugemale läinud; joonisel 45 *g* on jõesängi looge juba nii suur, et on peaaegu tekkimas ling. Lõpuks, joonisel 45 *h* näete, kuidas jõgi murrab endale teed läbi koha, kus lookleva jõesängi osad on teineteise lähedal, ja muudab seal oma sängi, jättes väljauhetud oru nõgusasse ossa järele niinimetatud soodi ehk „vanajõe" — seisva veekogu endises jõesängis.

Lugeja ise taipab, mispärast jõgi enda poolt tekitatud lausikus orus ei voola selle keskel või piki üht kallast, vaid lookleb kogu aeg ühest äärest teise, nõgusalt kaldalt lähima kumera kalda suunas *.

Nii juhib mehhaanika jõgede geoloogilist saatust. Meie poolt kirjeldatud pilt tekib muidugi pikkade, aastatuhandetega mõõdetavate ajavahemikkude jooksul. Kuid nähtust, mis oma paljude üksikasjade poolest sarnaneb kirjeldatuga, võite näha miniatuurses mastaabis igal kevadel, vaadeldes neid pisikesi niresid, mida lumest sulav vesi tekitab kõvastunud lumesse.



* Me ei puudutanud siin üldse Maa pöörlemise mõju, mis avaldub selles, et põhjapoolkera jõed uhavad tugevasti oma paremat kallast, lõunapoolkera jõed aga vasakut kallast. Vt. selle kohta minu raamatut „Huvitav astronoomia" (vene keeles), 4. trükk, 1946, 1. peatükk.



KUUES PEATÜKK.

PÕRGE.

Miks on tähtis uurida põrget.

See osa mehhaanikast, milles räägitakse kehade põrkest, õpilastele tavaliselt ei meeldi. See omandatakse aeglaselt, kuid unustatakse kiiresti, kusjuures jääb järele ainult halb mälestus kohmakate valemite kogumist. Siiski pälvib see osa suurt tähelepanu. Oli kord aeg, kus kahe keha põrkega püüti seletada kõiki muid loodusnähtusi.

Kuulus XIX sajandi loodusteadlane Cuvier kirjutas: „Jättes kõrvale põrke ei saa me endale luua selget kujutlust põhjuse ja selle toime vahel olevast seosest." Nähtust peeti seletatuks alles siis, kui õnnestus selle põhjusena vaadelda molekulide põrkeid.

Tõsi küll, püüe seletada maailma, lähtudes sellest alusest, ei andnud tagajärgi: suur hulk nähtusi — elektri- ja optikanähtused, külgetõmbumine jt. — ei lase endid niisugusel viisil seletada. Siiski etendab põrge loodusnähtuste seletamisel veel praegugi tähtsat osa. Meenutagem kineetilist gaasiteooriat, mis käsitab väga suurt hulka nähtusi kui vahetpidamatult kokkupõrkavate molekulide korrapäratut liikumist. Peale selle tuleb meil peaaegu igal sammul igapäevases elus ja tehnikas tegemist teha kehade põrkega. Masinate ja seadeldiste koostusosad, milledesse mõjub põrge, arvestatakse sellise tugevusega, et nad suudaksid põrkel tekkinud koormustele vastu pidada. Ilma mehhaanika selle osa tundmiseta pole võimalik läbi saada.

Põrke mehhaanika.

Tunda kehade põrke mehhaanikat tähendab osata ette ära arvata, missugune on põrkest osavõtnud kehade kiirus pärast põrkamist. See lõppkiirus sõltub sellest, kas kokkupõrganud kehad on mitte-elastsed (mitte-tagasipõrkavad) või elastsed.

Mitte-elastsete kehade puhul omandavad mõlemad kokkupõrganud kehad pärast põrget ühesuuruse kiiruse: kiiruse suurus saadakse kehade massi ja esialgse kiiruse põhjal segamisreegli alusel.

Kui segatakse 3 kg kohvi, mis maksab 8 rubla kg, ja 2 kg kohvi, mis maksab 10 rubla kg, siis on segu kg hind

$$\frac{3 \cdot 8 + 2 \cdot 10}{3 + 2} = 8{,}8 \text{ rubla.}$$

Kui mitte-elastne keha massiga 3 kg ja kiirusega 8 $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ põrkab kokku teise mitte-elastse kehaga, mille mass on 2 kg ja mis jõuab esimesele järele kiirusega 10 $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, siis on mõlema keha lõppkiirus leitav täpselt samuti:

$$u = \frac{3 \cdot 8 + 2 \cdot 10}{3 + 2} = 8{,}8 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

Üldkujul: mitte-elastsete kehade kokkupõrkumisel, kui kehade mass on m_1 ja m_2, kiirus v_1 ja v_2, on nende lõppkiirus pärast kokkupõrkamist

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Kui kiiruse v_1 suunda loeme positiivseks, siis märk $+$ kiiruse u ees näitab, et kehad liiguvad pärast põrget kiiruse v_1 suunas: märk — näitab vastupidist suunda. See on kõik, mida tuleb meeles pidada mitte-elastsete kehade põrke kohta.

Elastsete kehade põrge ei toimu nii lihtsalt: sellised kehad mitte ainult surutakse kokkupuutumiskohas kokku (nagu mitte-elastsed kehadki), vaid nad ka laienevad pärast põrget, taastades oma esialgse kuju. Selles põrke teises faasis kaotab järelejõudev keha oma kiirusest veel niisama palju, kuipalju ta kaotas põrke esimeses faasis, ja keha, millele jõuti järele, saab kiirust juurde veel niisama palju, kuipalju ta seda sai juurde põrke esimeses faasis. Kiirema keha kahekordne kiiruse kaotus ja aeglasema keha kahekordne kiiruse juurdekasv — see ongi oluliselt kõik, mida tuleb meeles pidada elastse põrke korral. Kõik muu on viidav matemaatilistele arvutustele. Olgu kiirema keha kiirus v_1, teise keha kiirus v_2, kehade mass vastavalt m_1 ja m_2. Mitte-elastsete kehade puhul liiguks pärast põrkumist kumbki neist kiirusega

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Esimese keha kiiruse kaotus oleks $v_1 - u$; teise keha kiiruse juurdekasv oleks $u - v_2$. Me teame, et elastsete kehade kokkupõrkamisel kiiruse kaotus ja juurdekasv kahekordistuvad, s. o. nad võrduvad $2(v_1 - u)$ ja $2(u - v_2)$. Tähendab, lõplik kiirus u_1 ja u_2 on pärast elastset põrget järgmised:

$$u_1 = v_1 - 2(v_1 - u) = 2u - v_1,$$
$$u_2 = v_2 + 2(u - v_2) = 2u - v_2.$$

Jääb ainult asetada nendes avaldistes u asemele selle väärtus (vt. ülal).

Oleme läbi arutanud põrke kaks äärmist juhtu: täiesti mitte-elastsete kehade ja täiesti elastsete kehade põrke. Kuid on veel võimalik vahepealne juhtum: kokkupõrkavad kehad pole täiesti elastsed, s. t. ei taasta pärast põrke esimest faasi täielikult oma esialgset kuju. Selle juhu juurde tuleme veel tagasi; esialgu piisab läbiarutatu teadmisest.

Elastse põrke pilt on määratav järgmise lühikese reegliga: pärast põrget eemalduvad kehad teineteisest sama kiirusega, millega nad lähenesid teineteisele enne põrget. See järeldub üsna lihtsatest kaalutlustest. Lähenemise kiirus enne põrget on $v_1 - v_2$. Kaugenemise kiirus pärast põrget on $u_2 - u_1$.

Asetanud u_2 ja u_1 asemele nende väärtused, saame:

$$u_2 - u_1 = 2u - v_2 - (2u - v_1) = v_1 - v_2.$$

See omadus on tähtis mitte ainult seepärast, et ta annab elastsest põrkest näitliku pildi, vaid ka veel teises suhtes. Valemite tuletamisel me rääkisime „tõugatavast" ja „tõukavast" kehast, vaadeldes nende liikumist muidugi mõne kolmanda, nende liikumisest mitte osa võtva keha suhtes. Selle raamatu esimeses peatükis (meenutagem ülesannet kahest munast) selgitati, et tõukava ja tõugatava keha vahel pole mingit vahet: nende osad võib ümber vahetada, ilma et nähtuse pilt seejuures muutuks. Kas on see õige ka antud juhul? Kas ei anna varem saadud valemid teissuguseid tulemusi, kui kehade osad ümber vahetada?

On kerge näha, et valemitest saadud tulemused sellisel vahetusel põrmugi ei muutu. Jääb ju ühe või teise vaatekoha puhul kehade kiiruse vahe enne põrget muutumatuks. Järelikult ei muutu ka kiirus, millega kehad pärast põrget teineteisest eemalduvad ($u_2 - u_1 = v_1 - v_2$). Teiste sõnadega: kehade lõpliku liikumise pilt jääb endiseks.

Toon mõned huvitavad arvulised andmed absoluutselt elastsete kerade põrke kohta. Kaks teraskera, kummagi läbimõõt umbes 7,5 cm (umbes piljardipalli suurused), põrgates kokku kiirusega 1 $\frac{m}{sek}$, surutakse teineteise vastu tungiga 1500 kG, kiiruse puhul 2 $\frac{m}{sek}$ aga tungiga 3500 kG. Niisugusel põrkel on kokkupuute ringikujulise pinna raadius esimesel juhul 1,2 mm, teisel juhul 1,6 mm. Põrke kestus mõlemal juhul on umbes $\frac{1}{5000}$ sekundit. Põrke lühiajalisusega on seletatav see, et selline suur rõhk (15—20 tonni ruutsentimeetri kohta) ei purusta kerade materjali.

Muide, põrke kestus on nii lühike ainult väikeste kerade puhul. Arvutus näitab, et planeedisuuruste (raadius = = 10 000 km) teraskerade puhul, mis põrkavad kokku kiirusega 1 $\frac{cm}{sek}$, peab põrke aeg võrduma 40 tunniga. Kokkupuuteringi raadius on seejuures 12,5 km ja tung, millega kerad teineteise vastu surutakse, umbes $400 \cdot 10^{12}$ tonni!

Õppigem tundma oma palli.

Need kehade põrke valemid, millega tutvusime eelmistel lehekülgedel, on praktikas otseselt vähe rakendatavad. Nende kehade hulk, mida võiks praktikas küllaldase täpsusega lugeda „täiesti mitte-elastseteks" või „täiesti elastseteks", on väga piiratud. Kehade rõhuv enamik ei kuulu ei ühtede ega ka teiste hulka: nad on „mitte täiesti elastsed". Võtame palli. Kartmata vanaaja valmikirjutaja pilget me küsime endalt: milline on pall? Kas ta on mehhaanika seisukohalt täiesti elastne või mitte täiesti elastne?

On olemas lihtne võte palli elastsuse proovimiseks: pall lastakse teatavalt kõrguselt kukkuda kõvale alusele. Täiesti elastne pall peaks samale kõrgusele tagasi hüppama.

See järeldub elastse põrke valemist

$$u_1 = 2u - v_1 = \frac{2(m_1v_1 + m_2v_2)}{m_1 + m_2} - v_1.$$

Rakendades seda valemit palli kohta, mis põrkab vastu liikumatut alust, võime aluse massi m_2 lugeda lõpmata suureks, tema kiirust aga nulliks: $m_2 = \infty$, $v_2 = 0$. Enne kui asetame need väärtused eelmisse valemisse, teisendame selle, jagades murru lugejat ja nimetajat m_2-ga:

$$u_1 = \frac{2\left(\frac{m_1}{m_2}v_1 + v_2\right)}{\frac{m_1}{m_2} + 1} - v_1.$$

Pärast asendamist saame:

$$u_1 = \frac{2\left(\frac{m_1}{\infty}v_1 + 0\right)}{\frac{m_1}{\infty} + 1} - v_1.$$

Et $\frac{m_1}{\infty} = 0$, siis murd muutub nulliks, ja valem võtab kuju:

$$u_1 = -v_1.$$

Seega peab pall aluselt tagasi põrkama sama kiirusega, millega ta alusega kokku puutus. Langedes aga kõrguselt H, saab keha kiiruse, mis võrdub

$$v = \sqrt{2gH}, \quad \text{millest} \quad H = \frac{v^2}{2g}.$$

Kiirusega v püsti üles visatud keha tõuseb kõrgusele

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Tähendab, $h = H$: pall peab üles hüppama kõrgusele, millelt ta alla kukkus.

Mitte-elastne kera ei hüppa üldse tagasi (see selgub füüsikalistest kaalutlustest; selles võib aga ka kergesti veenduda, kui valemis teha vastavad asendamised).

Kuidas aga peab käituma m i t t e t ä i e s t i e l a s t n e pall? Et selles selgusele jõuda, vaatame lähemalt elastse põrke pilti. Pall jõuab aluseni; puutepunktis ta surutakse kokku ja tung, mis seda teeb, vähendab palli kiirust. Seni on pall käitunud nii, nagu oleks käitunud ka mitte-elastne keha; tähendab, palli kiirus on sel momendil u ja kiiruse kaotus $v_1 - u$. Kokkusurutud koht hakkab aga kohe taastuma; seejuures avaldab pall muidugi rõhumist seda taastamist takistavale alusele; tekib jälle tung, mis mõjub pallisse ja vähendab selle kiirust. Kui pall seejuures taastab täielikult oma endise kuju (s. t. kui toimuvad vastupidises järjekorras kõik samad kuju muutumise etapid, mis esinesid palli kokkusurumisel), siis peab uus kiiruse kaotus võrduma eelmise kaotusega ehk $v_1 - u$, järelikult peab täiesti elastse palli kiirus vähenema $2(v_1 - u)$ võrra ning olema

$$v_1 - 2(v_1 - u) = 2u - v_1.$$

Kui ütleme, et pall pole „täiesti elastne", siis tahame õigupoolest öelda, et ta ei taasta täielikult oma kuju pärast selle muutumist välistungi mõjul. Tema kuju taastamisel mõjub tung, mis on väiksem sellest tungist, mis tema kuju muutis, ja vastavalt sellele on ka kiiruse kaotus taastamisfaasis v ä i k s e m selle esialgsest kaotusest; siis see ei ole $v_1 - u$, vaid moodustab ainult teatava osa sellest, mille tähistame lihtmurruga e (elastsuskoefitsient). Niisiis on kiiruse kaotus elastse põrke esimeses faasis $v_1 - u$, teises faasis aga $e(v_1 - u)$. Kiiruse üldine kaotus on $(1 + e)(v_1 - u)$ ja kiirus u_1 pärast põrget on

$$u_1 = v_1 - (1 + e)(v_1 - u) = (1 + e)u - ev_1.$$

Kiirus u_2, mida omab tõugatav keha (antud juhul alus), mille pall vastumõjuseaduse põhjal tõukab eemale, peab olema, nagu lihtne arvutus näitab,

$$u_2 = (1 + e)u - ev_2.$$

Mõlema kiiruse vahe $u_2 - u_1$ võrdub $ev_1 - ev_2 = e(v_1 - v_2)$, kust leiame, et elastsuskoefitsient

$$e = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2}.$$

Vastu liikumatut alust põrkava palli puhul $u_2 = (1 + e)u - ev_2 = 0$, $v_2 = 0$. Järelikult

$$e = \frac{u_1}{v_1}.$$

Aga u_1 on tagasihüpanud palli kiirus, mis võrdub $\sqrt{2gh}$, kus h on hüppe kõrgus, $v_1 = \sqrt{2gH}$, kus H on kõrgus, millelt pall kukkus. Tähendab,

$$e = \sqrt{\frac{2gh}{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}}.$$

Seega leidsime võtte, kuidas määrata palli elastsuskoefitsienti e, mis näitab, millisel määral erinevad palli omadused täiesti elastse keha omadustest: tuleb mõõta kõrgus, millelt keha langeb alla, ja kõrgus, millele keha tõuseb pärast põrget; ruutjuur nende suuruste suhtest ongi otsitav koefitsient.

Joon. 46. Hea tennispall peab hüppama umbes 140 cm kõrgusele, kui lasta teda langeda 250 cm kõrguselt.

Spordimääruste kohaselt peab hea tennispall, mis langeb 250 cm kõrguselt, üles hüppama 127—152 cm kõrgusele. Tähendab, tennispalli elastsuskoefitsient peab olema

$$\sqrt{\frac{127}{250}} \text{ ja } \sqrt{\frac{152}{250}}$$

piirides, seega 0,71 kuni 0,78.

Peatume keskmise suuruse 0,75 juures, s. t. väljendudes vabalt, võtame palli, „mis on elastne 75%", ja teeme sellega mõned sportlastele huvitavad arvutused.

Esimene ülesanne: kui kõrgele hüppab pall teisel, kolmandal ja järgmistel kordadel, kui ta langeb kõrguselt H?

Me teame, et esimesel korral pall hüppab kõrgusele, mis on määratav valemist

$$e = \sqrt{\frac{h}{H}}.$$

Kui $e = 0{,}75$ ja $H = 250$ cm, saame:

$$\sqrt{\frac{h}{250}} = 0{,}75,$$

siit $h \approx 140$ cm.

Teisel korral, s. t. langedes kõrguselt $h = 140$ cm, tõuseb pall kõrgusele h_1, kusjuures

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_1}{140}},$$

millest $h_1 \approx 79$ cm.

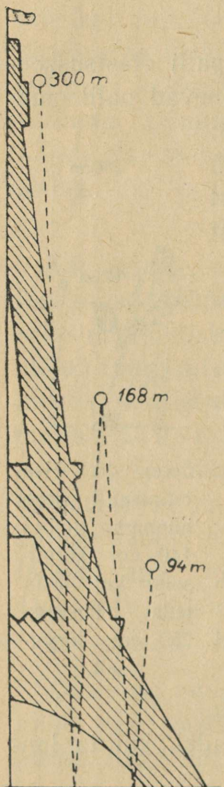
Kolmanda tõusu kõrguse h_2 leiame võrrandist

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_2}{79}},$$

millest $h_2 \approx 44$ cm.

Edasised arvutused toimuvad samal viisil.

Olles alla langenud Eiffeli torni kõrguselt (300 m), tõuseb selline pall esimesel korral 168 m kõrgusele, teisel korral 94 m kõrgusele jne. [siin pole arvestatud õhutakistust, mis antud juhul (suure kiiruse tõttu) peab olema üsna suur].



Joon. 47. Kui kõrgele hüppaks pall, mis lastakse kukkuda Eiffeli tornist.

Teine ülesanne: kui kaua üldse hüppab pall, mis langeb kõrguselt H?

Me teame, et

$$H = \frac{gT^2}{2}; \quad h = \frac{gt^2}{2}; \quad h_1 = \frac{gt_1^2}{2}.$$

Järelikult

$$T = \sqrt{\frac{2H}{g}}; \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad t_1 = \sqrt{\frac{2h_1}{g}}.$$

Hüpete kestus võrdub

$$T + 2t + 2t_1 + 2t_2 + \ldots\ldots\ldots,$$

s. t.

$$\sqrt{\frac{2H}{g}} + 2\sqrt{\frac{2h}{g}} + 2\sqrt{\frac{2h_1}{g}} + \ldots\ldots$$

Pärast mõningaid teisendamisi, mis on lugeja-matemaatiku poolt kergesti iseseisvalt teostatavad, saame otsitavale summale avaldise

$$\sqrt{\frac{2H}{g}}\left(\frac{2}{1-e}-1\right).$$

Asendades $H = 250$ cm, $g = 980 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$, $e = 0{,}75$, saame palli hüpete kogukestusena 5 sekundit.

Kui lasta pallil langeda Eiffeli torni kõrguselt, siis kestaks üleshüppamine (õhutakistuse puudumisel) umbes 1 minuti, täpsemalt 54 sekundit, muidugi sel juhul, kui pall jääb langemisel terveks.

Palli langemisel mõnemeetriselt kõrguselt pole kiirus suur, seepärast pole ka õhutakistuse mõju tunduv. Tehti säärane katse: pall elastsuskoefitsiendiga 0,76 lasti kukkuda 250 cm kõrguselt. Õhutakistuse puudumisel oleks ta pidanud teisel korral üles hüppama 84 cm kõrgusele; tegelikult hüppas ta aga 83 cm kõrgusele; nagu näeme, õhk takistavat toimet peaaegu ei avaldanud.

Kriketiväljakul.

Kriketipall lendab vastu liikumatut palli. Toimub põrge, mida mehhaanikas nimetatakse „otseseks" ja „keskseks". See on selline põrge, mis toimub tõukava tungi rakenduspunkti läbiva diameetri sihis.

Mis toimub kummagi palliga pärast põrget? Mõlemad kriketipallid omavad võrdset massi. T ä i e l i k u m i t t e - e l a s t s u s e korral oleks nende kiirus pärast põrget ühesuurune, võrdudes lööva palli poole kiirusega. See järeldub valemist

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2},$$

milles $m_1 = m_2$ ja $v_2 = 0$.

Ümberpöördult, kui pallid oleksid täiesti elastsed, siis lihtne arvutus (mille teostamine jäägu lugeja ülesandeks) näiteks, et pallid v a h e t a k s i d o m a k i i r u s e: tõukav pall jääks pärast põrget seisma, enne liikumatu pall hakkaks aga põrke suunas liikuma tõukava palli kiirusega. Umbes sama toimub ka (elevandiluust) piljardipallide põrkel. Nendel pallidel on suur elastsuskoefitsient (elevandiluul on $e = \frac{8}{9}$).

Kriketipallidel on aga tunduvalt väiksem elastsuskoefitsient ($e = 0,5$). Seepärast erinebki põrke tulemus äsjasaadud tulemustest. Pärast põrget jätkavad mõlemad pallid liikumist, mitte aga ühesuuruse kiirusega: tõukav pall jääb tõugatavast pallist maha. Lähemaid üksikasju saame kehade põrke valemeist.

Olgu elastsuskoefitsient (kuidas teda leida, see on lugejale teada eelnenust) e. Eelmises artiklis leidsime pallide kiirustele u_1 ja u_2 pärast põrget järgmised avaldised:

$$u_1 = (1 + e)u - ev_1; \quad u_2 = (1 + e)u - ev_2.$$

Siin, nagu varemateski valemites,

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Kriketipallide puhul $m_1 = m_2$ ja $v_2 = 0$.
Asendades saame:

$$u = \frac{v_1}{2}; \quad u_1 = \frac{v_1}{2}(1 - e); \quad u_2 = \frac{v_1}{2}(1 + e).$$

Peale selle on kerge veenduda, et

$$u_1 + u_2 = v_1; \quad u_2 - u_1 = ev_1.$$

Nüüd võime täpselt ennustada põrkavate kriketipallide saatuse: tõukava palli kiirus jaotub mõlema palli vahel nii, et tõugatav pall liigub tõukavast pallist kiiremini osa e võrra viimase esialgsest kiirusest.

Võtame näite. Olgu $e = 0,5$. Niisugusel juhul saab algul liikumatu pall $\frac{3}{4}$ tõukava palli esialgsest kiirusest ja viimane liigub tõugatavale pallile järele ühe neljandikuga oma esialgsest kiirusest.

„Kiirusest — jõud".

Säärase pealkirja all ilmus L. N. Tolstoi „Esimeses lugemikus" järgmine jutustus:

„Kord sõitis raudteel väga kiiresti üks masin (rong). Kuid ülesõidukohal, just raudteel, seisis hobune raske koormaga. Mees ajas hobust, hobune aga ei suutnud koormat kohalt nihutada, sest ratas oli alt ära tulnud. Konduktor hüüdis masinistile: „Peata," masinist aga ei täitnud käsku. Ta taipas, et mehel ei õnnestu hobust vankriga liikuma panna ega ka vankrit ümber pöörata; masinat aga ei saa nii kiiresti seisma panna. Ta ei hakanudki rongi peatama, vaid kihutas täie hooga vankrile peale. Mees jooksis vankrist eemale. Masin pühkis vankri ja hobuse laastudena teelt ja liikus kordagi rappumata edasi. Siis ütles masinist konduktorile: „Nüüd tapsime ainult hobuse ja lõhkusime vankri; kui ma aga oleksin sind kuulda võtnud, oleksime tapnud iseendid ja kõik reisijad. Kiirel sõidul viskasime kõrvale vankri, tõuget tundmata, aeglasel sõidul aga oleksime ise rööbastelt kõrvale paiskunud."

Kas on võimalik seda sündmust seletada mehhaanika seisukohalt? Meil on siin tegemist mitte täiesti elastsete kehade põrkega, kusjuures tõugatav keha (vanker) oli kuni põrkeni paigalolekus. Tähistades rongi massi ja kiiruse m_1 ja v_1, vankri massi ja kiiruse vastavalt m_2 ja $v_2 = 0$, rakendame meile juba tuntud valemeid:

$$u_1 = (1 + e)u - ev_1; \quad u_2 = (1 + e)u - ev_2,$$

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Jaganud viimase avaldise murru lugeja ja nimetaja m_1-ga, saame:

$$u = \frac{v_1 + \frac{m_2}{m_1} v_2}{1 + \frac{m_2}{m_1}}.$$

Suhe $\frac{m_2}{m_1}$ (vankri massi suhe rongi massiga) on kaduvväike; võttes selle asemele nulli, saame

$$u \approx v_1.$$

Tähendab, rong jätkab pärast põrget liikumist endise kiirusega; reisijad ei tunne mingit tõuget (kiiruse muutust).

Mis aga toimub vankriga? Ta kiirus pärast põrget, $u_2 = (1 + e)u = (1 + e)v_1$, ületab rongi kiiruse ev_1 võrra. Mida suurem oli rongi kiirus v_1 enne põrget, seda suurem on vankri poolt äkki pärast põrget omandatud kiirus ja seda suurem on ka põrkejõud, mis hävitab vankri. Sellel on antud juhul oluline tähtsus; õnnetuse vältimiseks on tingimata vaja ületada vankri hõõrdumine; põrke mitteküllaldase energia korral oleks vanker rööbastele jäädes võinud olla tõsiseks takistuseks.

Seega, suurendades rongi kiirust, toimis vedurijuht õigesti: tänu sellele suutis rong, ise vapustust saamata, kõrvaldada oma teelt vankri. Tuleb märkida, et Tolstoi jutustus käib tolle aja võrdlemisi aeglaste rongide kohta.

Inimene-alasi.

See tsirkusenumber avaldab tugevat muljet isegi ettevalmistatud vaatlejale. Artist heidab maha; ta rinnale pannakse raske alasi ja kaks jõumeest hakkavad raskete vasaratega täiest jõust seda taguma.

Tahestahtmata imestad, kuidas saab elav inimene kahjustamatult taluda säärast põrutust.

Kuid elastsete kehade põrke seadused ütlevad, et mida raskem on alasi, võrreldes vasaraga, seda väiksema kiiruse ta saab põrkel, s. t. seda vähem on tunda põrutust.

Meenutagem tõugatava keha kiiruse valemit elastsel põrkel

$$u_2 = 2u - v_2 = \frac{2(m_1 v_1 + m_2 v_2)}{m_1 + m_2} - v_2.$$

Siin on m_1 vasara mass, m_2 alasi mass, v_1 ja v_2 — nende kiirus enne põrget. Eelkõige me teame, et $v_2 = 0$, sest enne põrget oli alasi paigal. Tähendab, meie valem omandab kuju:

$$u_2 = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{2v_1 \cdot \frac{m_1}{m_2}}{\frac{m_1}{m_2} + 1}$$

(me jagasime lugeja ja nimetaja m_2-ga). Kui alasi mass m_2 on väga suur, võrreldes vasara massiga m_1, siis on murd $\frac{m_1}{m_2}$ väga väike ja teda pole tarvis nimetajas arvestada. Alasi kiirus pärast põrget on siis

$$u_2 = 2v_1 \cdot \frac{m_1}{m_2},$$

s. t. ta moodustab kaduv-väikese osa vasara kiirusest v_1 *.

Vasarast näiteks 100 korda raskema alasi puhul on kiirus 50 korda väiksem vasara kiirusest:

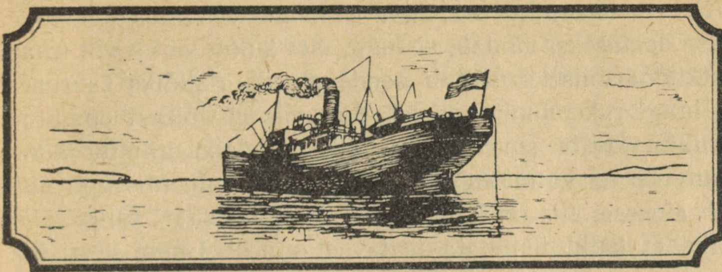
$$u_2 = 2v_1 \cdot \frac{1}{100} = \frac{1}{50} v_1.$$

Sepad teavad praktika põhjal, et kerge vasara löök ei andu edasi sügavale. Nüüd on arusaadav, miks alasi all lamavale artistile on kasulik, et alasi oleks võimalikult raske. Kogu küsimus seisneb ainult selles, kuidas hoida ennast kahjustamata rinnal niisugust koormust. See on võimalik sel juhul, kui alasi alusele anda selline kuju, mis puutuks kehaga tihedalt kokku suurel pinnal, mitte aga ainult üksikutes piiratud kohtades. Siis jaotub alasi kaal suurele pinnale ja iga ruutsentimeetri kohta ei osutu koormus just väga suureks. Alasi aluse ja inimese keha vahele pannakse pehme vahekiht.

---

* Me käsitasime vasarat ja alasit kui täiesti elastseid kehi. Lugeja võib sama laadi arvutuse põhjal veenduda, et tulemus muutub vähe, käsitades mõlemat keha kui mitte täiesti elastseid.

Artistil pole mingit mõtet petta pealtvaatajaid alasi kaalu arvel; küll aga on mõtet petta neid vasara kaalu arvel; seepärast on võimalik, et tsirkuse vasarad pole nii rasked, nagu nad näivad. Kui vasar on seest tühi, siis ei muutu selle löök vaatlejate silmis vähem hävitavaks, alasi põrutused aga nõrgenevad võrdeliselt vasara massi vähenemisega.



SEITSMES PEATÜKK.

MÕNDA TUGEVUSEST.

Ookeanisügavuste mõõtmisest.

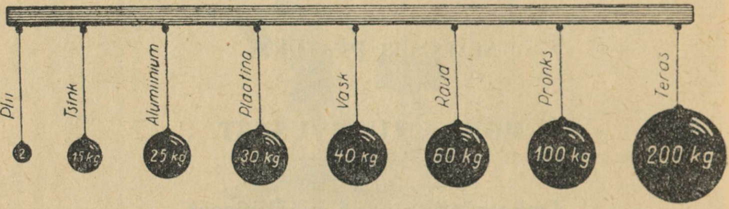
Ookeani keskmine sügavus on umbes 4 km, üksikutes kohtades on aga ookeani põhi kaks ja enamgi korda sügavamal. Nagu juba öeldud, on suurim sügavus umbes 11 km. Et mõõta niisugust sügavust, tuleb ookeani lasta enam kui 10 km pikkune traat. Sellisel traadil on aga tunduv kaal; kas ta ei katke iseenda raskusest?

Küsimus pole liigne; arvutus kinnitab selle asjakohasust. Võtame 11 km pikkuse vasktraadi; tähistame traadi läbimõõdu D-ga (sentimeetrites). Säärase traadi ruumala on $\frac{1}{4}\pi D^2 \cdot 1\,100\,000$ cm³. Et aga 1 cm³ vaske kaalub vees ümmarguselt 8 G, siis meie traat kaalub vees

$$\tfrac{1}{4}\pi D^2 \cdot 1\,100\,000 \cdot 8 = 6\,900\,000\ D^2\ \text{G}.$$

Näiteks traadi 3-mm-se ($D = 0{,}3$ cm) jämeduse puhul on see koormus 620 000 G ehk 620 kG. Kas sellise jämedusega traat peab vastu umbes $\frac{5}{8}$-tonnisele koormusele? Siin peame veidi kõrvale astuma ja andma ruumi küsimusele neist tungidest, mis tõmbavad katki traate ja varbu.

See mehhaanika osa, mida nimetatakse materjalide tugevuse õpetuseks, väidab, et tung, mis kulub varva või traadi katkitõmbamiseks, sõltub nende ainest, ristlõike suurusest ja tungi rakendamise viisist. Sõltuvus ristlõikest on lihtne: kuimitu korda suureneb ristlõike pindala, niimitu korda suureneb ka katkitõmbamiseks vajalik tung. Mis aga puutub ainesse, siis on katseliselt leitud, kui suurt tungi läheb vaja, et katki tõmmata teatavast ainest 1-mm²-se ristlõikega varba. Tehnika-alastes teatmeteostes on tavaliselt esitatud selle katkitõmbava tungi suuruste tabel. Ta on näitlikult kujutatud joonisel 48. Seda vaadates näete, et näiteks pliitraadi katkitõmbamiseks (1-mm²-se ristlõike puhul) läheb vaja 2-kG-st tungi, vasktraadi puhul 40-kG-st, pronkstraadi puhul 100-kG-st jne.



Joon. 48. Kui suured koormised tõmbavad katki mitmesugusest metallist traadi (ristlõige on 1 mm²).

Tehnikas pole aga lubatav, et varvad ja juhtrauad oleksid nii suurte tungide mõju all. Selline konstruktsioon poleks kindel. Piisab vähimast, silmale märgatamatust materjali rikkest või väikesest ülekoormusest põrutuse või temperatuuri muutuse tagajärjel — ja varvad katkevad, juhtrauad murduvad, ehitis variseb kokku. Tarvilik on nn. „tugevuse varu", s. t. on tarvis, et mõjuvad tungid moodustaksid ainult teatava osa katkitõmbavast koormusest — neljandiku, kuuendiku või kaheksandiku — vastavalt materjalile ja selle kasutamise tingimustele.

Pöördugem nüüd tagasi alatud arvutuse juurde. Kui suur tung võib katki tõmmata vasktraadi, mille läbimõõt on D cm? Traadi ristlõikepind on $\frac{1}{4}\pi D^2$ cm^2 ehk $25\pi D^2$ mm^2. Vaadanud meie näitlikule tabelile, leiame, et 1-mm^2-se ristlõikega vasktraadi tõmbab katki 40-kG-ne tung. Tähendab, meie traadi katkitõmbamiseks piisab tungi suurusest $40 \times 25\pi D^2 = 1000\pi D^2$ kG $= 3140\ D^2$ kG.

Traat ise aga, nagu arvutusest leidsime, kaalub 6900 D^2 kG, seega peaaegu $2\frac{1}{2}$ korda rohkem. Näete, et vasktraat ei kõlba ookeanisügavuste mõõtmiseks isegi siis, kui mitte arvestada tugevuse varu: 5-km-se pikkuse puhul ta katkeb omaenese kaalust.

Kõige pikemad loodid.

Üldiselt on igal traadil olemas niisugune pikkuse piirväärtus, mille puhul ta katkeb omaenese kaalust. Lood ei saa olla kuitahes pikk: on olemas pikkus, millest pikem ta ei tohi olla. Traadi jämeduse suurendamine siin ei aita: läbimõõdu kahekordistamisel võib traat kanda neljakordset koormust, aga ka traadi kaal suureneb 4 korda. Pikkuse piirväärtus ei olene traadi jämedusest (jämedus pole olu-line), vaid ainest: raua puhul on tal üks, vase puhul teine, plii puhul kolmas väärtus. Selle piirväärtuse arvutamine on väga lihtne; pärast eelmises artiklis tehtud arvutust on see lugejale arusaadav ilma pikema selgituseta. Kui traadi ristlõike pindala on s cm^2, pikkus L km ja 1 cm^3 kaal ϱ G, siis kogu traat kaalub $100\,000 sL\varrho$ G; koormus aga, millele ta suudab vastu panna, on $1000Q \times 100s = 100\,000Qs$ G, kus Q on katkitõmbav koormus 1 mm^2 kohta (kG-des). Tähendab, äärmisel juhul

$$100\,000Qs = 100\,000sL\varrho;$$

siit saame pikkuse piirväärtuse km-tes

$$L = \frac{Q}{\varrho}.$$

Selle lihtsa valemi põhjal on kerge välja arvutada mistahes ainest tehtud niidi või traadi pikkuse piirväärtust. Vasele leidsime varem pikkuse piirväärtuse v e e s; väljaspool vett on see veel väiksem ja võrdub

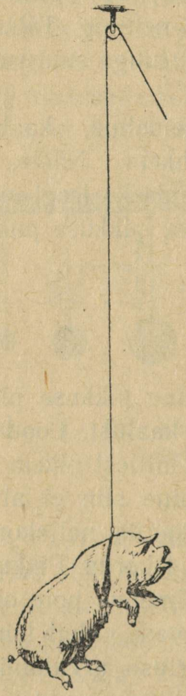
$$\frac{Q}{\varrho} \approx 4{,}4 \text{ km}.$$

Toome pikkuse piirväärtused mõnest teisest materjalist traatide puhul:

plii	200 m
tsink	2,1 km
raud	7,5 „
teras	25 „

Praktiliselt aga ei saa kasutada nii pikki loode; see tähendaks neid lubamatult koormata. Neid võib koormata ainult katkitõmbava koormuse teatava osani: näiteks raua ja terase puhul ¼-ni. Tähendab, rauast lood ei tohi olla pikem kui 2 km, teraslood pikem kui 6¼ km.

Vettelaskmise korral võib loodi pikkuse piirväärtust — raua ja terase puhul — suurendada ⅛ võrra. Aga sellestki ei piisa, et jõuda ookeani põhjani selle kõige sügavamates kohtades. Et teha vastavaid mõõtmisi, tuleb kasutada eriti tugevaid terasesorte *.



Joon. 49. Traat kroomnikkelterasest peab vastu koormusele 250 kG iga mm² kohta.

Kõige tugevam materjal.

Nende ainete hulka, mis taluvad tõmmet eriti hästi, kuulub kroomnikkelteras:

* Viimasel ajal määratakse meresügavusi ilma traadist loodita: selleks kasutatakse hääle peegeldumist veekogu põhjast (kajaloodi). Selle kohta vt. J. I. Perelmani „Huvitav füüsika I", Tartu, 1948, X peatükk.

selleks, et katki tõmmata sellest terasest 1-mm^2-se ristlõikega traati, läheb vaja 250-kG-st tungi.

Te saate paremini aru, mida see tähendab, kui heidate pilgu juurdelisatud joonisele 49: peenike terastraat (läbimõõt on pisut suurem kui 1 mm) hoiab ülal rasket orikat. Säärasest traadist valmistataksegi sügavusmõõtjate loodinöörid. Et 1 cm^3 terast kaalub vees 7 G ja lubatud koormus 1 mm^2 kohta on sel juhul $\frac{250}{4} = 62$ kG, siis sellest terasest loodi äärmine pikkus võib olla

$$L = \frac{62}{7} = 8,8 \text{ km.}$$

Ookeani põhi on aga sügavaimas kohas veelgi kaugemal. Seepärast tulebki, soovides jõuda ookeani põhja suurimate sügavusteni, arvestada väiksemat tugevusvaru ja järelikult väga ettevaatlikult käsitseda loodinööri.

Samad raskused esinevad ka õhuookeani „sondeerimisel" „lohedega", mis on varustatud iseregistreerivate aparaatidega. Näiteks juhul, kui lasta lohe tõusta 9 km kõrgusele või veel kõrgemale, tuleb traadil vastu panna mitte ainult omaenese raskusele, vaid ka rõhumisele, mida tuul avaldab talle endale ja lohele (lohe mõõtmed on 2 × 2 m).

Mis on tugevam juuksekarvast?

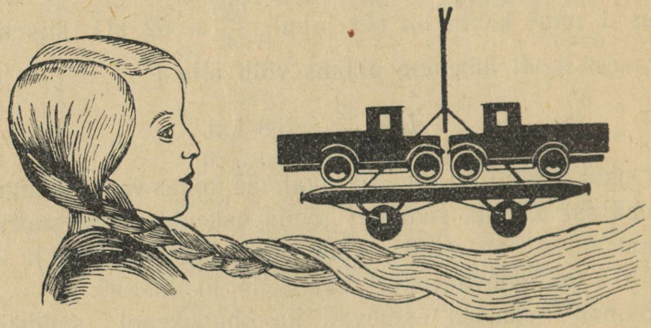
Esimesel pilgul näib, et inimese juuksekarv võib tugevuse poolest võistelda ainult ämblikuvõrguga. See pole aga nii; juuksekarv on tugevam mõnestki metallist! Tõepoolest, juuksekarv oma kaduv-väikese, 0,05-mm-se jämeduse juures hoiab ülal 100 G. Arvutame, kui palju see „teeb välja" 1 mm^2 kohta. Ringikesel läbimõõduga 0,05 mm on pindala

$$\tfrac{1}{4} \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}05^2 \approx 0{,}002 \text{ mm}^2,$$

seega $\frac{1}{500}$ mm^2. Tähendab, $\frac{1}{500}$-mm^2-sele pindalale tuleb

100-G-ne koormus; 1-mm²-se pinna kohta tuleb 50 000 G ehk 50 kG. Vaadates tugevuste tabelit (joon. 48) te veendute, et inimese juuksekarv tuleb tugevuse poolest paigutada vase ja raua vahele...

Niisiis, juuksekarv on tugevam pliist, tsingist, alumiiniumist, plaatinast ja vasest, olles nõrgem ainult rauast, pronksist ja terasest!



Joon. 50. Kui suurt koormist võib ülal hoida naise juuksepats?

Mitte alusetult — kui uskuda romaani „Salammbô" autorit — ei pidanud vanad kartaagolased naiste juuksepatse parimaks viskemasinate nöörvedrude materjaliks.

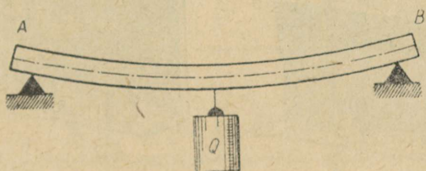
Seepärast ei tohigi teid imestada joonis 50, mis kujutab naise juuksepatsi poolt ülalhoitavat raudteeplatvormi kahe veoautoga; on kerge välja arvutada, et 20 000 juuksekarvast koosnev pats võib ülal hoida 20-tonnist koormist.

Miks tehakse jalgratta raam torudest.

Missugust eelist tugevuse poolest omab toru massiivse varvaga võrreldes, kui toru rõngakujulise ristlõike pindala võrdub varva ristlõike pindalaga? Mitte mingisugust niikaua, kui on jutt vastupidavusest tõmbele või survele: nii toru kui ka varb tõmmatakse katki ja purustatakse ühesuuruse tungiga. Kui aga jutt on vastupidavusest painutavatele tungidele, siis on vahe väga suur: varba on tunduvalt kergem painutada kui toru, mille rõngakujulise ristlõike pindala on niisama suur kui varval.

Sellest asjaolust kirjutas väga ilmekalt juba tugevusõpetuse rajaja Galilei. Loodan, et lugeja ei tee mulle etteheiteid liigse poolehoiu pärast sellele tähelepanuväärsele teadlasele, kui toon veel kord väljavõtte tema teosest. Ta kirjutab oma teoses „Vestlused ja matemaatilised tõestused kahe uue teadusharu kohta" järgmist:

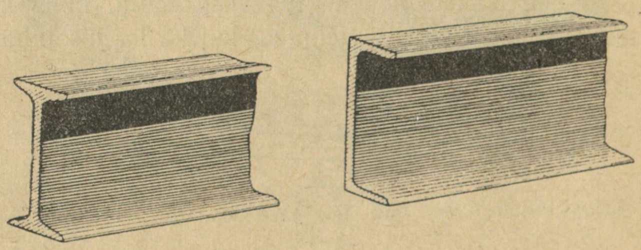
„Ma tahaksin lisada mõned märkused nende õõnsate ehk seest tühjade tahkete kehade tugevuse kohta, mida kasutab niihästi meisterlikkus (tehnika) kui ka loodus tuhandel



Joon. 51. Varva paindumine.

viisil. Nendes kehades saavutatakse ilma kaalu suurenemiseta tugevuse tõusu väga suurel määral. Seda on kerge näha lindude luude ja pilliroo puhul, milledel hoolimata nende kergusest on suur painde- ja murdetugevus. Kui kõrs, mille otsas on varrest raskem viljapea, oleks sama ainehulga juures massiivse ehitusega, siis oleks ta painde ja murde suhtes tunduvalt nõrgem. On tegelikkuses täheldatud ja ka katseliselt tõestatud, et seest tühi kepp, samuti ka puit- või raudtoru, on tugevam sama pikkuse ja sama kaaluga massiivsest kehast, mis peab olema paratamatult peenem. Meisterlikkus leidis sellele asjaolule rakenduse odade valmistamisel, tehes need suurema tugevuse ja ka suurema kerguse saavutamiseks õõnsad."

Selle põhjus muutub arusaadavaks, kui vaatleme lähemalt neid pingeid, mis tekivad varva painutamisel. Mõjugu oma otstele toetuva varva *AB* (joon. 51) keskkohale koormis *Q*. Koormise mõjul paindub varb allapoole. Mis toimub seejuures? Varva ülemised kihid on kokku surutud, alumised, vastupidi, on pikenenud, mingi keskmine („neutraalne") kiht aga säilitab oma pikkuse. Varva pikenenud osas tekivad venimist takistavad elastsustungid, surutud osas — kokkusurumist takistavad tungid. Nii ühed kui ka teised püüavad varba õgvendada, ja olenevalt varva läbipaindumise määrast (kui mitte ületada nn. „elastsuspiiri")



Joon. 52. Kaksis-T- ja U-kujulise läbilõikega tala.

see vastupanu paindele seni üha suureneb, kuni on tekkinud niisugune pinge, mida koormis *Q* ei suuda ületada; siis paindumine peatub.

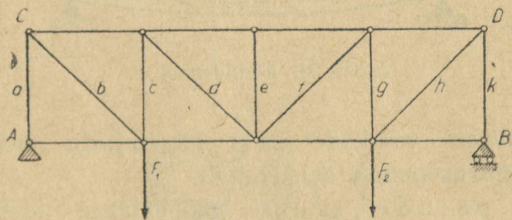
Te näete, et suurimat vastumõju paindele avaldavad sel juhul varva kõige ülemine ja kõige alumine kiht: keskmised kihid võtavad sellest osa seda vähem, mida lähemal nad on neutraalsele kihile.

Seepärast on otstarbekas anda tala lõikele selline kuju, et suurem osa materjalist oleks neutraalsest kihist võimalikult kaugel. Säärane materjali jaotus on teostatud näiteks kaksis-T- ja U-kujulise ristlõikega talades, mis on kujutatud joonisel 52.

Muide, tala keskkoht ei tohi olla liiga õhuke: ta peab vältima tala servade nihkumist teineteise suhtes ning kindlustama tala vastupidavuse.

Materjali kokkuhoiu mõttes on turvik veelgi täiuslikum vorm kui kaksis-T-kujuline raud. Turvikus (joon. 53) on üldse kõrvaldatud kogu neutraalse kihi läheduses olev ja seepärast vähe koormatud materjal. Massiivse materjali asemel on võetud tarvitusele varvad *a*, *b*, ..., *k*, mis seovad turviku vöösid *AB* ja *CD*. Eelnenust on lugejale selge, et koormiste F_1 ja F_2 mõjul surutakse turviku ülemine vöö kokku, kuna alumine venib pikemaks.

Nüüd on lugejale selge ka torude eelis, võrreldes massiivse varvaga. Lisan arvulise näite. Olgu antud kaks ühe-



Joon. 53. Turvik asendab tugevuse mõttes massiivset tala.

pikkust ümmargust tala, üks massiivne, teine torukujuline, kusjuures toru rõngakujulise ristlõike pindala on niisama suur kui massiivse tala ristlõike pindala. Mõlema tala kaal on muidugi samuti ühesuurune. Paindetugevuses on aga vahe väga suur: arvutus näitab, et torukujulise tala * (painde-) tugevus on suurem 112% võrra, s. t. rohkem kui kaks korda.

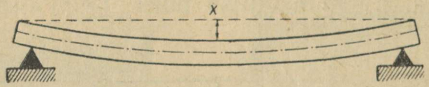
---

* Sel juhul, kui toru sisemine läbimõõt võrdub massiivse tala läbimõõduga.

Mõistujutt seitsmest kepist.

„Seltsimehed, meenutage vihta: tõmbad ta lahti — ja murrad vitsa-kaupa katki; kui oled ta aga kokku köitnud, katsu siis teda murda!"
Serafimovitš („Keset ööd").

Kõigile on tuttav vanaaegne mõistujutt seitsmest kepist. Et veenda poegi üksmeelselt elama, andis isa neile katki murda seitsmest kepist koosneva kimbu. Pojad katsusid seda teha, kuid asjatult. Siis võttis isa kimbu, tõmbas selle lahti ja murdis kepid üksikult kerge vaevaga katki.



Joon. 54. Paindenool *x*.

On huvitav vaadelda seda mõistujuttu mehhaanika, nimelt tugevusõpetuse seisukohalt.

Varva p a i n d e suurust mõõdetakse mehhaanikas paindenoolega x (joon. 54). Mida suurem on varva paindenool, seda lähemal on murdumise hetk. Paindenool väljendatakse järgmise valemiga:

$$\text{paindenool } x = \frac{1}{12} \cdot \frac{Pl^3}{\pi E r^4},$$

milles P on varvasse mõjuv tung; l on varva pikkus; $\pi = 3{,}14\ldots$; E on arv, mis iseloomustab varva materjali elastsusomadusi; r on ümmarguse varva raadius.

Rakendame valemit keppide kimbu kohta. Kimbu seitse keppi asetusid kõige tõenäolisemalt nii, nagu on näidatud selle peatüki lõppvinjetil, kus on näha kimbu ristlõige. Muidugi on selline kimp ainult ligikaudselt võrreldav massiivse varvaga (selleks peab ta olema kõvasti kokku seotud), meie aga ei otsigi siin rangelt täpset lahendust.

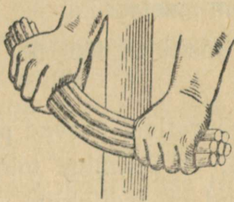
Nagu jooniselt nähtub, on kimbu läbimõõt korda kolm suurem üksiku kepi läbimõõdust. Näitame, et üksikut keppi on palju kordi kergem painutada (seega ka murda) kui kogu kimpu. Selleks, et saada mõlemal juhul ühesuurune paindenool, tuleb ühe kepi puhul tarvitada tungi p, kogu kimbu puhul aga tungi P. Seos p ja P vahel järeldub võrrandist

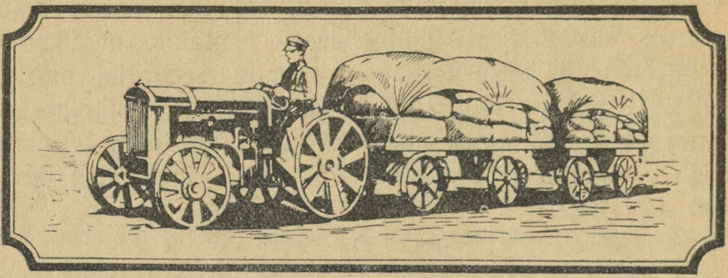
$$\frac{1}{12} \cdot \frac{pl^3}{\pi k r^4} = \frac{1}{12} \cdot \frac{Pl^3}{\pi k (3r)^4},$$

millest

$$p = \frac{P}{81}.$$

Näeme, et isal tuli rakendada küll seitse korda järjest, kuid umbes kaheksakümmend korda väiksemat tungi kui poegadel.





KAHEKSAS PEATÜKK.

TÖÖ, VÕIMSUS, ENERGIA.

Mida paljud tööühikust ei tea.

„Mis on kilogramm-meeter?"

„Ühe kilogrammi tõstmise töö ühe meetri kõrgusele," vastatakse tavaliselt.

Sellist tööühiku määratlust peavad paljud ammendavaks, eriti siis, kui lisada, et tõstmine toimub maapinnal. Kui ka teie lepite esitatud määratlusega, siis on teile kasulik läbi arutada järgmine ülesanne, mille esitas aastat kolmkümmend tagasi kuulus füüsik prof. O. D. Hvolson ühes matemaatika-ajakirjas.

„Püsti seatud kahurist, mille pikkus on 1 m, lendab välja 1 kG raskune kuul. Püssirohugaasid mõjuvad ainult ühe meetri ulatuses. Et kogu ülejäänud tee ulatuses on gaaside rõhumine kuulile võrdne nulliga, siis järelikult nad tõstsid 1 kG ühe meetri kõrgusele, s. o. nad tegid tööd ainult 1 kilogramm-meetri. Kas tõesti on gaaside töö nii väike?"

Kui see oleks nii, siis võiks läbi saada ka ilma püssirohuta, heites kuuli inimese käte jõul. On selge, et selliselt kaalutledes tehakse jäme viga.

Milles seisneb viga?

Viga seisneb selles, et tehtud tööd hinnates me võtsime arvesse ainult ühe väikese osa sellest ja jätsime kõrvale töö kõige tähtsama osa. Me ei arvestanud seda, et kuulil on pärast kahuritoru läbimist k i i r u s, mida tal enne väljalasku polnud. Tähendab, püssirohugaaside töö ei seisnenud mitte ainult kuuli tõstmises 1 m kõrgusele, vaid ka märkimisväärse kiiruse andmises kuulile. Seda arvestamata jäänud tööhulka on kerge määrata, teades kuuli kiirust. Kui see on 600 $\frac{m}{sek}$, s. t. 60 000 $\frac{cm}{sek}$, siis kuuli 1-kg-se (1000 g) massi puhul on tema kineetiline energia

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1000 \cdot 60\,000^2}{2} = 18 \cdot 10^{11} \text{ ergi.}$$

Erg on düün · sentimeeter (1 düüni töö ühe sentimeetri pikkusel teel). Et 1 kilogramm-meeter on ligikaudu $1\,000\,000 \cdot 100 = 10^8$ düün · sentimeetrit, siis kuuli liikumise energia varu võrdub:

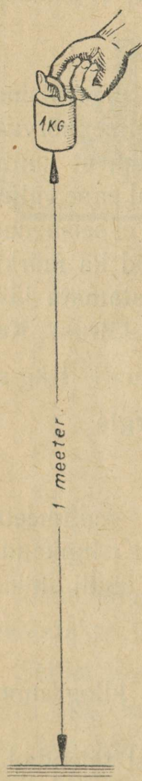
$$18 \cdot 10^{11} : 10^8 = 18 \cdot 10^3 \text{ kGm.}$$

Nii suur osa tööst jäi arvestamata ainult kilogrammmeetri mõiste ebatäpse määratluse tõttu!

Nüüd on ilmne, kuidas tuleb seda määratlust täiendada: K i l o g r a m m - m e e t e r o n 1 kG-se, a l g u l l i i k u m a t u k o o r m i s e t õ s t m i s e t ö ö m a a p i n n a l 1 m k õ r g u s e l e, t i n g i m u s e l, e t t õ s t m i s e l õ p u l o n k o o r m i s e k i i r u s n u l l.

Kuidas teha kilogramm-meeter tööd.

Näib, et siin ei tohiks olla raskusi: tarvitseb võtta 1-kG-ne kaaluviht ja tõsta see 1 m kõrgusele. Aga kui suure tungiga tuleb vihti tõsta? Ühekilogrammise tungiga seda ei saa tõsta. Tung peab olema s u u r e m kui 1 kilogramm: vihi kaalu ja selle tungi vahe ongi liikumapanevaks tungiks. P i d e v a l t mõjuv tung aga annab tõstetavale vihile k i i r e n d u s e; seepärast ongi meie vihil pärast tõstmist mõnesugune kiirus (kiirus pole null) ja, tähendab, tehtud töö pole 1 kGm, vaid on s u u r e m.



Joon. 55. Kuidas teha tööd, mis on täpselt üks kilogrammmeeter?

Kuidas tuleb siis toimida, et 1-kG-se vihi tõstmisel 1 m kõrgusele teha tööd t ä p s e l t üks kGm? Vihti võib tõsta järgmiselt. Tõstmise algul tuleb viht alt üles suruda tungiga, mis on suurem ühest kG-st. Andnud niiviisi vihile teatava kiiruse alt üles, tuleb vähendada või täiesti lõpetada käe rõhumine ja anda vihile võimalus liikuda aeglustuvalt. Seejuures tuleb hetk, mil käe rõhumine lõpeb, valida nii, et viht, liikudes aeglustuvalt, jõuaks 1 m kõrgusele täpselt sel hetkel, mil ta kiirus on null. Toimides niiviisi, s. t. rakendades vihile mitte jäävat 1-kG-st tungi, vaid tungi, mis muutub 1 kG ületavast suurusest ühest kilogrammist väiksema suuruseni, me saame teha töö, mis võrdub täpselt 1 kGm-ga.

Kuidas arvutada tööd.

Praegu nägime, kuivõrd keerukas on 1 kGm töö tegemine, tõstes 1 kG kaaluga keha 1 m kõrgusele. Seepärast on parem mitte kasutada seda näiliselt lihtsat, tõepoolest aga väga ebamäärast kilogramm-meetri määratlust.

Palju sobivam on teine, arusaamatusi mittetekitav määratlus: k i l o g r a m m - m e e t e r on 1-kG-se t u n g i töö 1-m-se tee ulatusel, kui tungi suund ühtib tee suunaga*.

Viimane tingimus, suundade ühtivus, on tingimata vajalik. Kui seda mitte arvestada, võib töö arvutamisel tekkida ränki vigu.

Et võrrelda jõumasinaid nende töövõime suhtes, tuleb võrrelda tööd, mida nad teevad sama ajavahemiku jooksul. Kõige sobivam on võtta ajaühikuks üks sekund. Sel viisil tuuakse mehhaanikasse eriline töövõime suurus, mida nimetatakse võimsuseks. Võimsuse all mõistetakse jõumasina poolt ühe sekundi jooksul tehtud tööd. Tehnikas on võimsuse ühikutena tarvitusel 1 kilogramm · meeter/sekundis $\left(1 \frac{\text{kGm}}{\text{sek}}\right)$ ja hobujõud, mis võrdub 75 $\frac{\text{kGm}}{\text{sek}}$.

Lahendame näiteks järgmise ülesande.

850 kG kaaluv auto liigub kiirusega 72 kilomeetrit tunnis mööda rõhtsat ja sirget teed.

Määrata auto võimsus, kui takistus liikumisele on 20% tema kaalust.

Määrame kõigepealt autot liikuma paneva tungi suuruse. Ühtlasel liikumisel võrdub see tung täpselt takistusega, see on

$$850 \cdot 0{,}2 = 170 \text{ kG}.$$

* Mõni lugeja võib-olla esitab vastuväite, et ka sel juhul võib tee lõpp-punktis olla kehal teatav kiirus, mida tuleb arvestada. Siit tuleks nagu järeldada, et 1-kG-ne tung teeb 1 m pikkusel teel töö, mis on suurem kui 1 kGm. On täiesti õige, et tee lõpp-punktis on kehal olemas teatav kiirus. Tungi töö aga seisnebki selles, et ta annab kehale teatava kiiruse, teatava kineetilise energia varu, nimelt 1 kGm. Kui seda ei toimuks, kaotaks energia jäävuse seadus oma kehtivuse: saadaks vähem energiat, kui seda kulutati. Asi on teisiti, kui keha tõstetakse vertikaalselt üles: 1 kG kaaluga keha tõstmisel 1 m kõrgusele suureneb keha potentsiaalne energia 1 kGm võrra, peale selle saab aga keha veel kineetilist energiat: näib, nagu saadaks energiat rohkem, kui seda kulutati.

Nüüd määrame auto poolt ühe sekundi jooksul läbitud tee pikkuse. See on

$$\frac{72 \cdot 1000}{3600} = 20 \text{ m}.$$

Et liikuma paneva tungi suund ühtib liikumissuunaga, siis, korrutades tungi suuruse ühes sekundis läbitud tee pikkusega, saame auto poolt ühes sekundis tehtud töö, seega võimsuse:

$$170 \cdot 20 = 3400 \ \frac{\text{kGm}}{\text{sek}}.$$

Hobujõududes on see ligikaudu

$$3400 : 75 = 45{,}33 \text{ HJ}.$$

Traktori tõmme.

Ülesanne.

Traktori võimsus on 10 HJ. Arvutada tema tõmbetung iga järgmise kiiruse puhul:

esimene kiirus on	2,45	$\frac{\text{km}}{\text{h}}$
teine „ „	5,52	„
kolmas „ „	11,32	„

Lahendus.

Et võimsus $\left(\frac{\text{kGm}}{\text{sek}}\right)$ võrdub ühes sekundis tehtud tööga, s. t. antud juhul tõmbetungi (kG-des) ja ühes sekundis läbitud tee pikkuse (m-tes) korrutisega, siis saame esimese kiiruse puhul võrrandi

$$75 \cdot 10 = x \cdot \frac{2{,}45 \cdot 1000}{3600},$$

kus x on traktori tõmbetung. Lahendanud võrrandi, leiame, et $x \approx 1100$ kG.

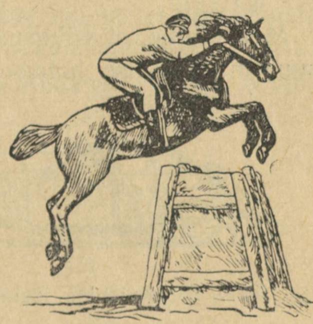
Samal viisil leiame, et tõmme teise kiiruse puhul on 490 kG, kolmanda kiiruse puhul 240 kG.

„Terve mõistuse" mehhaanika kiuste osutub tõmme seda suuremaks, mida väiksem on liikumise kiirus.

Elusad ja mehhaanilised jõumasinad.

Kas inimesel võib olla hobujõu-suurune võimsus? Teiste sõnadega, kas ta saab ühes sekundis teha 75 kGm tööd? Arvatakse, ja täiesti õigesti, et inimese võimsus normaalsetes töötingimustes on umbes üks kümnendik hobu-

Joon. 56. Kui inimene näitab võimsust 1 hobujõud.



Joon. 57. Kui hobune näitab võimsust 7 hobujõudu.

jõust, s. t. võrdub 7—8 $\frac{\text{kGm}}{\text{sek}}$. Kuid erakordsetes tingimustes võib inimene lühikese aja jooksul ilmutada ka tunduvalt suuremat võimsust. Kiiresti joostes trepist üles me teeme tööd rohkem kui 8 $\frac{\text{kGm}}{\text{sek}}$. Kui me tõstame igas sekundis oma keha kuue trepiastme võrra, siis — kui kaalume 70 kG ja astme kõrgus on 17 cm — teeme tööd

$$70 \cdot 6 \cdot 0{,}17 = 71 \text{ kGm},$$

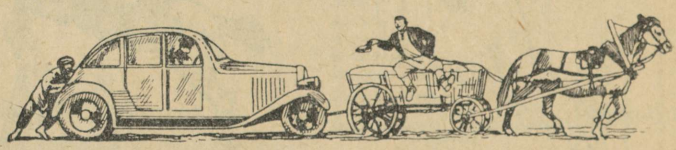
s. o. peaaegu 1 HJ, tähendab, ületame hobust võimsuse poolest $1\frac{1}{2}$ korda. Muidugi, nii pingsalt saame töötada ainult mõne minuti, siis tuleb meil puhata. Kui arvestada neid tegevuseta vahemikke, siis ei ületa meie võimsus keskmiselt 0,1 HJ.

Mõni aasta tagasi märgiti lühimaajooksu (90 m) võistlustel juhtum, kus jooksjal oli võimsus $550 \frac{\text{kGm}}{\text{sek}}$, s. o. 7,4 HJ.

Ka hobune võib suurendada oma võimsust kümme ja enam korda. Tehes näiteks 1 sekundi jooksul hüppe ühe meetri kõrgusele teeb 500-kG-ne hobune 500 kGm tööd (joon. 57), see aga vastab võimsusele

$$500 : 75 = 6{,}7 \text{ HJ}.$$

Meenutame, et võimsus üks hobujõud on poolteist korda suurem keskmise hobuse võimsusest, tähendab, vaadel-



Joon. 58. Kui elus jõumasin on eelistatav mehhaanilisele.

daval juhul on meil tegemist võimsuse enam kui 10-kordse suurenemisega.

See elavate jõumasinate võime suurendada lühikeseks ajaks mitmekordselt oma võimsust annab neile suure eelise mehhaaniliste jõumasinatega võrreldes. Heal tasasel maanteel on 10-hobujõuline auto muidugi eelistatavam kui kahehobusesõiduk. Liivasel teel aga jääb selline auto abitult kinni, kuna hobustepaar, kes hädakorral saab oma võimsust suurendada kuni 15 ja enam hobujõuni, tuleb tee raskustega hästi toime. „Mõnelt seisukohalt," ütles sel puhul keegi füüsik, „on hobune harukordselt kasulik masin. Selle masina tõhususest meil ei olnud selget kujutlust enne, kui ilmusid autod ja tekkis tarvidus tavalise kahe hobuse asemel rakendada neid 12 või 15, et auto ei jääks kinni iga künka taha."

Sada jänest ja üks elevant.

Vastandades elavaid ja mehhaanilisi jõumasinaid tuleb tingimata silmas pidada siiski veel üht tähtsat asjaolu. Mitme hobuse pingutused ei liitu aritmeetilise liitmise reeglite järgi. Kaks hobust tõmbab jõuga, mis on väiksem ühe hobuse kahekordsest jõust, kolm hobust — jõuga, mis on väiksem ühe hobuse kolmekordsest jõust, jne. See tuleneb sellest, et mitu koos rakendatud hobust ei kooskõlasta oma pingutusi ja osalt koguni takistavad üksteist. Praktika on näidanud, et hobuste võimsus vastavalt nende arvule rakendis on järgmine:

Hobuste arv rakendis	Iga hobuse võimsus	Koguvõimsus
1	1	1
2	0,92	1,9
3	0,85	2,6
4	0,77	3,1
5	0,70	3,5
6	0,62	3,7
7	0,55	3,8
8	0,47	3,8

Niisiis, 5 koos töötavat hobust ei anna viiekordset jõudu, vaid ainult 3½-kordse; 8 hobust annab jõu, mis ületab ühe hobuse jõu ainult 3,8-kordselt, koos töötavate hobuste arvu edasine suurendamine annab aga veel halvemaid tulemusi.

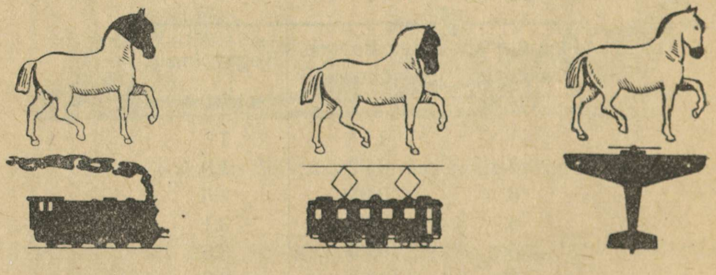
Siit järeldub, et näiteks 10-hobujõulise traktori tõmmet ei saa tegelikult asendada 15 töötava hobuse tõmbega.

Üldse, mitte mingisugune hobuste arv ei saa asendada üht isegi võrdlemisi nõrgajõulist traktorit.

Prantslastel on vanasõna: „Sajast jänesest ei saa üht elevanti." Samasuguse õigusega võime öelda: „Sada hobust ei asenda üht traktorit."

Inimkonna masin-orjad.

Olles ümbritsetud igalt poolt mehhaaniliste jõumasinatega ei saa me sageli selgesti aru, kui võimsad on need meie „masin-orjad", nagu neid tabavalt nimetas V. I. Lenin. Mehhaanilise jõumasina kõige tähtsam erinevus elavast on suure võimsuse keskendamine väikesse mahtu. Kõige võimsam „masin", mida tundis vanaaeg, oli tugev hobune või elevant. Võimsuse suurenemist saavutati tollal ainult loomade arvu suurendamisega. Ühendada aga paljude hobuste töövõime ühte jõumasinasse — see on ülesanne, mille lahendas alles uusaja tehnika.

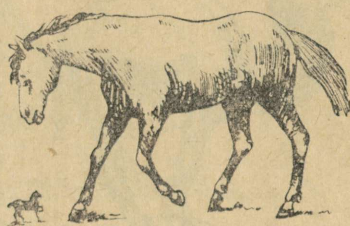


Joon. 59. Hobuse kujutise must osa näitab piltlikult, kui suure kaaluosa kohta tuleb üks hobujõud mitmesugustes mehhaanilistes jõumasinates.

Sada aastat tagasi oli võimsaimaks masinaks 20-hobujõuline aurumasin, mis kaalus 2 tonni. Iga hobujõu kohta tuli 100 kG masina kaalu. Samastame lihtsuse mõttes 1-hobujõulise võimsuse ühe hobuse võimsusega. Hobuses on meil siis üks hobujõud 500 kG kaalu kohta (hobuse keskmine kaal), mehhaanilises jõumasinas aga üks hobujõud 100 kG kaalu kohta. Aurumasin oleks nagu ühendanud viie hobuse võimsuse ühte organismi.

Parim suhe võimsuse ja kaalu vahel on meil ajakohases 2000-hobujõulises veduris, mis kaalub 100 tonni. 4500-hobujõulises elektriveduris, mis kaalub 120 tonni, tuleb üks hobujõud juba 27 kG kaalu kohta.

Suurt edu ses suhtes näitavad lennukimootorid. 550-hobujõuline mootor kaalub ainult 500 kG: siin tuleb üks hobujõud ümmarguselt ühe kG kaalu kohta *. Joonisel 59 on need vahekorrad kujutatud piltlikult: mustaks tehtud osa hobuse kujutises näitab, kui suure kaalu kohta tuleb üks hobujõud vastavas mehhaanilises jõumasinas.



Joon. 60. Lennukimootori ja hobuse kaalu vahekord ühesuuruse võimsuse puhul.

Veel ilmekam on joonis 60: siin on kujutatud väike ja suur hobune, esimese kaduv-väike teras-„lihaste" kaal võistleb elavate jõumasinate lihaste hiiglakaaluga.

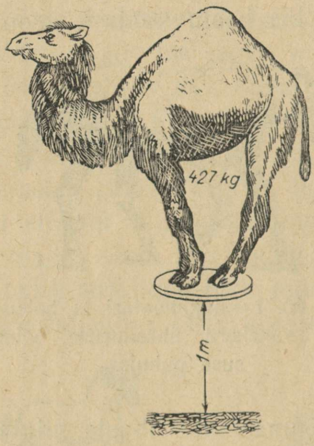
Joon. 61. 2-liitrise silindrimahuga lennukimootori võimsus on 162 hobujõudu.

Lõpuks, joonis 61 esitab kujukalt võrdlemisi väikese lennukimootori võimsust: 162 hobujõudu 2-liitrise silindrimahu juures.

---

* Mõnedes nüüdisaegsetes lennukimootorites langeb kaal ühe hobujõu kohta kuni $\frac{1}{2}$ kG-ni ja veelgi madalamale.

Viimane sõna selles võistluses ei ole kaasaegse tehnika poolt veel öeldud *. Me ei saa kütteainest kätte kogu selles peituvat energiat. Selgitagem endale, kui suur töövaru on varjul ühes kilokaloris soojuses. Üks kilokalor ehk nn. suur kalor on soojushulk, mis kulub ühe liitri vee soojendamiseks 1^0 võrra. Täielikult, 100%-liselt mehhaaniliseks energiaks muundatuna annaks see meile 427 kGm tööd, s. t. selle energia kulul võiks tõsta 427-kG-se koormise ühe meetri kõrgusele (joon. 62). Kaasaegsete soojusmasinate kasutegur on aga ainult 10—30%: igast põlemisel saadud kilokalorist nad saavad teoreetilise 427 kGm asemel ainult umbes sada kilogramm-meetrit.



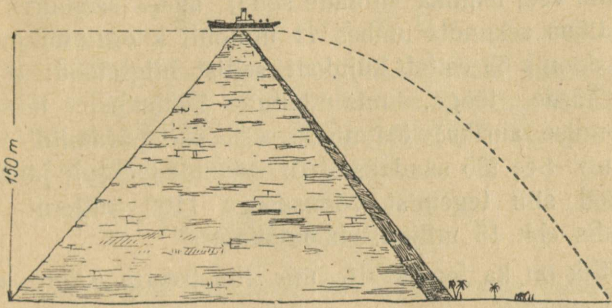
Joon. 62. Mehhaaniliseks tööks muundatud kalor võib tõsta 427 kG ühe meetri kõrgusele.

Milline kõigist mehhaanilise energia allikatest, mis on loonud inimese leidlikkus, on kõige võimsam? Tulirelv.

Kaasaegne püss, mis kaalub umbes 4 kG (püssi tegevate osade peale tuleb sellest ainult umbes pool), annab lasul 400 kGm tööd. See ei näi olevat kuigi palju, kuid me ei tohi unustada, et kuul on püssirohugaaside mõju all ainult sel lühikesel ajavahemikul, mil ta liigub püssitorus, seega umbes ühe kaheksasajandiku sekundi jooksul. Et jõumasinate võimsust mõõdetakse ühes sekundis tehtava

* Antud momendil on esimene koht rakett-mootoril, mis võib anda, tõsi küll, lühikese ajavahemiku jooksul, võimsust kuni sadu tuhandeid hobujõude.

tööga, siis, arvestades püssirohugaaside tööd samuti ühe täissekundi kohta, saame püssilasu võimsusele tohutu suure arvu — $400 \cdot 800 = 320\,000 \frac{\text{kGm}}{\text{sek}}$ ehk 4300 HJ.



Joon. 63. Kindlusekahuri mürsu energiaga võib tõsta 75 tonni kõige kõrgema püramiidi tipule.

Lõpuks, jagades selle võimsuse püssi tegevate osade kaaluga (2 kG), leiame, et siin tuleb üks hobujõud mehhanismi kaalu väga väikese osa — poole grammi

Joon. 64. Suure merekahuri mürsu energiale vastava soojushulgaga võib sulatada 36 tonni jääd.

kohta! Kujutlege miniatuurset hobust kaaluga pool grammi: see põrnikasuurune kääbus võistleb võimsuse poolest tõelise hobusega!

Kui jätta kõrvale relatiivsed arvud ja esitada küsimus absoluutse võimsuse kohta, siis lööb kahur kõik rekordid. Kahur heidab 900-kG-seid mürske kiirusega 500 $\frac{m}{sek}$ (ja see pole veel tehnika viimane sõna), andes seejuures ühes sajandikus sekundis umbes 11 miljonit kilogramm-meetrit tööd. Joonis 63 esitab kujukalt sellist hiiglatööd: see on samaväärne tööga, mis kulub 75-tonnise koormise (75-tonnise auriku) tõstmiseks Cheopsi püramiidi tippu (150 m). See töö saadakse 0,01 sekundi jooksul; järelikult on meil siin tegemist võimsusega 1100 miljonit kGm sekundis ehk 15 miljonit hobujõudu.

Näitlik on ka joonis 64, mis illustreerib suure merekahuri energiat.

Kaalumine altvedamisega.

Ebaausad müüjad kaaluvad mõnikord kaupa nii: viimane, tasakaalustamiseks vajalik portsjon ei asetata kaalukausile, vaid lastakse sinna kukkuda teatavalt kõrguselt. Kaalukang kaldub kauba poolel tugevasti alla, viies kergeuskliku ostja eksitusse.

Kui ostjal oleks kannatust oodata, kuni kaalukang jääb seisma, siis näeks ta, et kaubast ei piisa tasakaalustamiseks.

Põhjuseks on asjaolu, et langev keha avaldab alusele rõhku, mis on suurem tema kaalust. See selgub järgmisest arvutusest. Langegu kaalukausile 10 g 10 cm kõrguselt. See 10 g jõuab kaalukausini energiavaruga, mis võrdub tema raskuse ja langemise kõrguse korrutisega:

$$0{,}01 \text{ kG} \cdot 0{,}1 \text{ m} = 0{,}001 \text{ kGm}.$$

Kogutud energiavaru kulub selleks, et langetada kaalukaussi, ütleme, 2 cm võrra. Tähistame sel juhul kaalukausisse mõjuva tungi F-ga. Võrrandist

$$F \cdot 0{,}02 = 0{,}001$$

saame

$$F = 0{,}05 \text{ kG} = 50 \text{ G}.$$

Seega kauba osa, mis kaalub 10 G, annab kaalukausile kukkudes sellele peale oma kaalu veel lisarõhu 50 G. Ostjat on tüssatud 50 G võrra, kuigi ta lahkub leti eest kindlas usus, et kaup on kaalutud õigesti.

Aristotelese ülesanne.

Kaks aastatuhat enne seda, kui Galilei rajas (1630. aastal) mehhaanika alused, kirjutas Aristoteles oma „Mehhaanika probleemid". 36 küsimuse hulgas, mida käsitletakse selles teoses, leidub järgmine:

„Millest see tuleb, et puutükki vigastab väga vähe, kui asetada temale suure koormisega kirves; kui aga tõsta ilma koormiseta kirves ja sellega lüüa puutükki, lõhastub viimane? Langev koormis on sel juhul ometi palju väiksem rõhuvast koormisest."

Seda ülesannet ei suutnud Aristoteles tolle aja mehhaanika segaste teadmiste juures lahendada. Sellega ei tule toime võib-olla ka mõnedki lugejaist. Vaatleme seepärast kreeka mõttetarga ülesannet lähemalt.

Kui suur on kirve kineetiline energia sel hetkel, kui ta puuga kokku puutub? See koosneb esiteks tollest energiast, mis kogunes kirvesse, kui inimene teda tõstis, ja teiseks energiast, mille sai kirves allalaskuval liikumisel. Kaalugu kirves 2 kG ja olgu ta tõstetud 2 m kõrgusele; kirve tõstmisel kogunes temasse $2 \cdot 2 = 4$ kGm energiat. Allalaskuv liikumine toimub kahe tungi mõjul: raskustungi ja käte lihaste pingutuse mõjul. Kui kirves langeks ainult raskustungi mõjul, oleks tal langemise lõpul niisama palju kineetilist energiat, kui palju ta sai tõstmisel, seega

4 kGm. Käte jõud kiirendab kirve liikumist allapoole ja annab talle kineetilist energiat juurde; kui käte pingutus liikumisel üles ja alla jäi ühesuuruseks, siis võrdub langemisel saadud lisaenergia tõstmisel kogutud energiaga ja on seega 4 kGm. Niisiis on kirvel puuga kokkupõrkamise hetkel energiat 8 kGm.

Edasi, jõudnud puuni, tungib kirves sellesse. Kui sügavale? Oletame, et 1 cm sügavuseni. Lühikesel 0,01-m-sel teel väheneb kirve kiirus nullini ja järelikult kõik kogutud energia kulutatakse täielikult. Teades seda pole raske välja arvutada kirve rõhumist puule. Tähistanud selle tungi F-ga, saame võrrandi

$$F \cdot 0{,}01 = 8,$$

millest tung $F = 800$ kG.

See tähendab, et kirves tungib puusse 800-kG-se tungiga. Pole ju midagi imestamisväärset, et selline tõhus, kuigi nähtamatu koormis lõhub puu tükkideks.

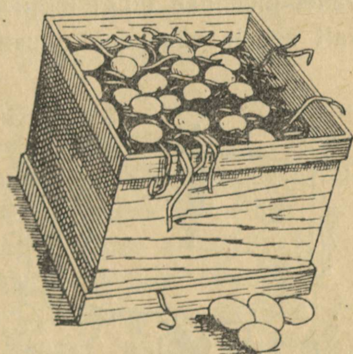
Nii on Aristotelese ülesanne lahendatud. Kuid ta esitab meile uue küsimuse: inimene ei saa ju puud lõhkuda vahetult oma lihaste jõuga; kuidas saab ta siis kirvele anda seda jõudu, mida tal endal ei ole? Põhjus on selles, et neljameetrisel teel kogutud energia kulub 1-cm-sel teel. Kirves on „masinaks" isegi sel juhul, kui teda ei kasutata kiiluna (sepavasar).

Läbiarutatud vahekorrad selgitavad, miks vasara toime asendamisel pressidega peavad pressid olema väga tugevad: näiteks 150-tonnisele vasarale vastab 5000-tonnine press, 20-tonnisele vasarale 600-tonnine press jne.

Mõõga toimet seletatakse samade põhjustega. Muidugi, suur tähtsus on sellel, et tungi mõju on siin keskendatud terale, millel on kaduv-väike pind; rõhumine 1 cm^2-le on väga suur (sadu atmosfääre). Tähtis on aga ka hoog: enne lööki läbib mõõga ots tee, mille pikkus on meetrit poolteist, aga ohvri kehas on see kõigest kümne sentimeetri ümber. 1,5-meetrisel teel kogutud energia kulub 10—15-kordselt lühemal teel. Võitleja käe jõud suureneb sel põhjusel 10—15-kordselt. Muidugi on ka tähtis, kuidas mõõka käsitseda: võitleja mitte ainult ei löö, vaid löögi hetkel ka tõmbab mõõka enda poole. Selle tagajärjel mõõk raiub ja ühtlasi ka lõikab. Katsuge leivapäts jaotada kaheks osaks ainult löögi mõjul; te veendute, kuivõrd see on lõikamisest raskem.

Habraste esemete pakkimine.

Habraste esemete pakkimisel tarvitatakse õlgi, laaste, paberit ja teisi taolisi materjale. On arusaadav, milleks seda tehakse: selleks, et kaitsta neid esemeid purunemise eest. Aga kuidas kaitsevad õled ja laastud esemeid purunemise eest? Vastus, et nad „nõrgendavad" põrkeid põrutuste puhul, ütleb sama, mis on öeldud juba küsimuses. Tuleb leida selle nõrgendava toime põhjused.



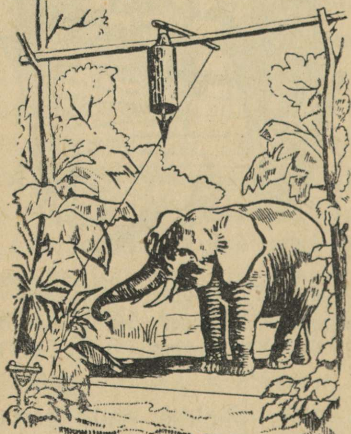
Joon. 65. Mispärast pannakse munade pakkimisel nende vahele laaste?

Neid on kaks. Esimene on see, et vahekiht suurendab habraste esemete vastastikuse kokkupuutumise pinda: ühe eseme terav serv või nurk surub teist eset läbi pakkimismaterjali mitte enam joont mööda ega ühes punktis, vaid tervet riba või pinda mööda. Tungi mõju jaotub suuremale pinnale ja sellepärast rõhk vastavalt väheneb.

Teise põhjuse mõju ilmneb ainult põrutuste puhul. Kui kast habraste nõudega saab tõuke, siis iga ese selles hakkab liikuma; liikumine lakkab aga kohe, sest naaberesemed takistavad seda. Liikumise energia kulub nüüd kokkupõrkavate esemete vastastikusele painutamisele, mis võib sageli lõppeda esemete purunemisega. Et tee, millel siin energia kulub, on väga lühike, siis peab pealesuruv tung olema väga suur, sest selle korrutis tee pikkusega (FS) ongi kulutatud energia hulk.

Nüüd on pehme vahematerjali toime arusaadav: ta pikendab tungi mõju teed (S) ja järelikult vähendab rõhuva tungi (F) suurust. Ilma vahematerjalita oleks see tee väga lühike: klaas või munakoor võib purunemata painduda ainult kaduv-väikese suuruse võrra, mida võib mõõta millimeetri kümnendikkudega. Õle-, laastu- või paberikiht sissepakitud esemete kokkupuutuvate osade vahel pikendab tungi mõju teed kümneid kordi ja vastavalt sellele vähendab niisama palju kordi tungi suurust.

Selles ongi teine ning peamine põhjus, miks pehme vahekiht kaitseb hapraid esemeid.

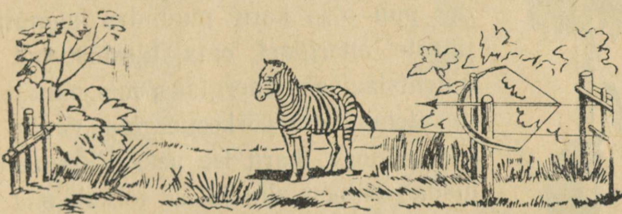


Joon. 66. Elevandipüünis Aafrika metsas.

Kelle energia?

Joonistel 66 ja 67 on kujutatud püünised, mida kasutavad neegrid Ida-Aafrikas. Puudutades maapinna kohale tõmmatud nööri laseb elevant oma seljale kukkuda raske puupaku, mis on varustatud terava harpuuniga. Leidlikuma ehitusega on püünis, mis on kujutatud joonisel 67: nööri puudutav loom päästab lahti noole, mis tungib ohvri kehha.

On arusaadav, kust siin saadakse energia, mis looma tabab: see on püünise ülesseadnud inimese muundatud energia. Kõrgusest langev puuklots tagastab energia, mis kulutati selle tõstmisel teatavale kõrgusele. Teise püünise laskev vibupüss tagastab energia, mis kulutati küti poolt vibunööri pinguletõmbamisel. Mõlemal juhul loom ainult



Joon. 67. Iselaskev püünis (Aafrikas).

vabastab kogutud potentsiaalse energia varu. Et püünist uuesti kasutada, tuleb see uuesti „laadida".

Hoopis teine lugu on püünisega, millest räägitakse üldtuntud jutustuses karust ja puupakust. Ronides puud mööda üles, et jõuda mesipuuni, juhtus karu kokku ülesriputatud puupakuga, mis takistas ronimist (joon. 68). Ta lükkas takistuse eemale; puupakk kaldus kõrvale, tuli aga kohe endisele kohale tagasi, andes loomale kerge löögi. Karu tõukas pakku tugevamini; puupakk tuli uuesti tagasi, andes loomale juba tugevama hoobi. Üha suureneva raevuga hakkas karu pakku eemale tõukama, aga ka pakk hakkas tagasi tulles karule üha tugevamaid hoope andma. Nõrgestatuna võitlusest kukkus karu lõpuks puu alla maasse löödud teravatele vaiadele.

See teravmeelne püünis ei nõua „laadimist". Alla visanud esimese karu, võib ta kohe sama teha teisega, siis kolmandaga jne., ilma et inimene siin osa võtaks. Kust saadakse siin see löökide energia, mis paiskab karu puult alla?

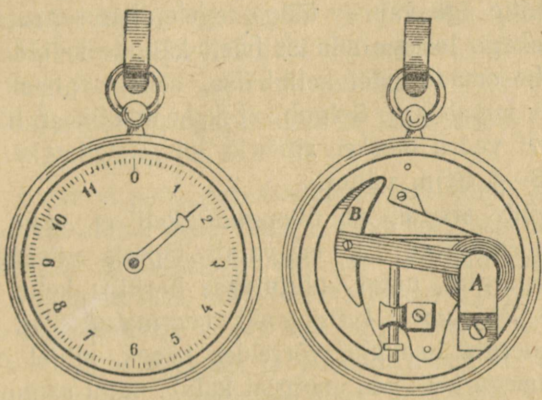
Antud juhul tehakse töö looma enda energia arvel. Karu ise heitis end puult alla ja ise torkas end vaiadega läbi. Tagasi lükates ülesriputatud puupakku ta muundab oma lihaste energia ülestõstetud paku potentsiaalseks energiaks, mis muundub hiljem langeva paku kineetiliseks energiaks. Ronides puu otsa karu muundas samuti osa lihaste energiast oma ülestõstetud keha potentsiaalseks energiaks, mis pärast avaldus tema kere põrkeenergias vastu vaiu. Ühe sõnaga, karu ise peksab ennast, ise heidab ennast alla ja ise torkab end vaiadega läbi. Mida tugevam on loom, seda tõsisemalt saab ta sellise heitluse tagajärjel kannatada.

Joon. 68. Karu heitluses ülesriputatud puupakuga.

Ennast ise üleskeeravad mehhanismid.

Kas tunnete väikest riista, mida nimetatakse s a m m u m õ õ t j a k s? Ta on suuruselt ja kujult taskukella taoline. Teda kantakse taskus ja ta ülesandeks on automaatselt loendada samme. Joonisel 69 on kujutatud selle riista numbrilaud ja sisemine ehitus. Mehhanismi peamiseks osaks on punkti *A* ümber pöörleva kangi *AB* otsa külge kinnitatud väike koormis *B*. Harilikult on koormis joonisel näidatud asendis; nõrk vedru hoiab teda riista ülemises osas. Igal sammul jalakäija keha ja sellega koos ka sammumõõtja veidi tõuseb ja seejärel vajub. Inertsi tõttu ei järgne aga koormis *B* kohe tõusvale riistale, vaid, ületades vedru elastsust, jääb alumisse asendisse. Sammumõõtja allalaskumisel nihkub koormis samal põhjusel üles. Seetõttu teeb kang AB iga sammu jooksul kahekordse võnke, mis hammasratta abil paneb osuti numbrilaual liikuma ja registreerib sellega jalakäija samme.

Kui teilt küsitakse, mis on sammumõõtja mehhanismi käivitamise energiaallikaks, osutate muidugi eksimatult



Joon. 69. Sammumõõtja ja selle mehhanism.

inimese lihaste tööle. Oleks aga väär arvata, et sammumõõtja ei nõua jalakäijalt energia lisakulu, et jalakäija ju „käib niikuinii" ega tee sammumõõtja pärast mingeid lisapingutusi. Ta teeb paratamatult lisapingutuse, mis väljendub sammumõõtja tõstmises teatavale kõrgusele ja seejuures selle raskustungi kui ka koormist B hoidva vedru elastsustungi ületamises.

Sammumõõtja viib mõttele ehitada taskukell, mis pannakse käima inimese igapäevaste liigutustega. Selline kell on juba leiutatud. Seda kantakse käel, mille vahetpidamatud liigutused tõmbavad kella vedru üles, ilma et omanikul oleks tarvis sellele mõelda. Piisab niisuguse kella kandmisest käel mõne tunni vältel, et teda üles keerata enam kui ööpäeva kestuseks. Kell on väga mugav: ta on alati üles keeratud, säilitades vedrul ühesuguse pinge, mis tagab kella õige käigu: kella keres ei ole läbiminevaid avasid, mis soodustaksid tolmu kogunemist mehhanismisse ja mehhanismi niiskumist; peamine paremus aga seisneb ikkagi selles, et pole tarvis muretseda kella perioodilise üleskeeramise eest. Näib, et selline kell on kõlblik lukkseppadele, rätsepatele, pianistidele ja eriti masinakirjutajatele, mitte aga vaimse tööga tegelejatele. Arutades selliselt me aga laseme silmist hästi käivate kellade mehhanismi ühe omaduse: et kell käiks, selleks piisab märkamatustki impulsist. Selgub, et kahest-kolmest liigutusest on küllalt vedru üleskeeramiseks ning kella käigushoidmiseks 3—4 tunni vältel.

Kas võib arvata, et niisugune kell ei vaja käiguks omaniku energiat? Ei, ta vajab täpselt niisama palju lihaste energiat, nagu kulutatakse hariliku kella üleskeeramiseks. Niisuguse kella poolt koormatud käe liigutus nõuab energia lisakulu, võrreldes käega, millel on tavalise ehitusega kell: osa energiat kulub, nagu sammumõõtja puhulgi, vedru elastsuse ületamiseks.

Räägitakse, et ühe äri omanik Ameerikas olevat tulnud mõttele oma äri ukse liikumist ära kasutada selleks, et üles keerata kasulikku majapidamistööd tegeva mehhanismi vedru. Äriomanik arvas, et ta on leidnud tasuta energiaallika, sest ostjad „niikuinii avavad ust". Tegelikult tuli aga külastajal ukse avamisel teha lisapingutus ülestõmmatava vedru elastsuse ületamiseks. Lihtsalt öeldes, äriomanik sundis iga ostjat tegema natuke tööd tema majapidamises.

Kummalgi nimetatud juhul pole meil, täpselt võttes, tegemist ennast ise üleskeeravate mehhanismidega, vaid mehhanismidega, mida inimene keerab üles oma lihaste energiaga enesele märkamatult.

Tule saamine hõõrumisega.

Kui otsustada kirjelduste järgi raamatutes, on tule saamine hõõrumisega väga lihtne toiming. Ometi pole sugugi nii kerge seda teha. Nii jutustab Mark Twain oma katsetest tegelikult rakendada taolisi raamatuis esitatud juhendeid:

„Igaüks meist võttis kaks pulgakest ja hakkas neid teineteise vastu hõõruma. Kahe tunni pärast olime jääkülmaks muutunud, samuti ka pulgakesed (see toimus talvel). Me vandusime rängalt indiaanlasi, kütte ja raamatuid, kes olid meid oma nõuannetega alt vedanud."

Samasugusest ebaedust räägib ka teine kirjanik — Jack London („Merihundis"):

„Olin lugenud palju merehädaliste mälestusi: kõik need inimesed katsetasid selle viisiga, kuid tagajärjetult. Meenutan ajalehe kirjasaatjat, kes oli reisinud Alaskas ja Siberis. Kohtasin teda kord tuttavate juures, kus ta jutustas oma katsetest tuld saada ühe pulga hõõrumisega vastu teist. Ta jutustas lõbusalt ja jäljendamatult sellest ebaõnnestunud katsest. Lõpuks ta ütles: „Lõunamerede saarte elanik võib-olla oskab seda teha; võib-olla saavutab edu ka malailane. Kindlasti aga ületab see valge inimese võimed." "

Jules Verne väljendab „Saladuslikus saares" täpselt sama mõtet. Järgnevalt vestlus elutarga meremehe Pencroffi ja nooruki Harberti vahel:

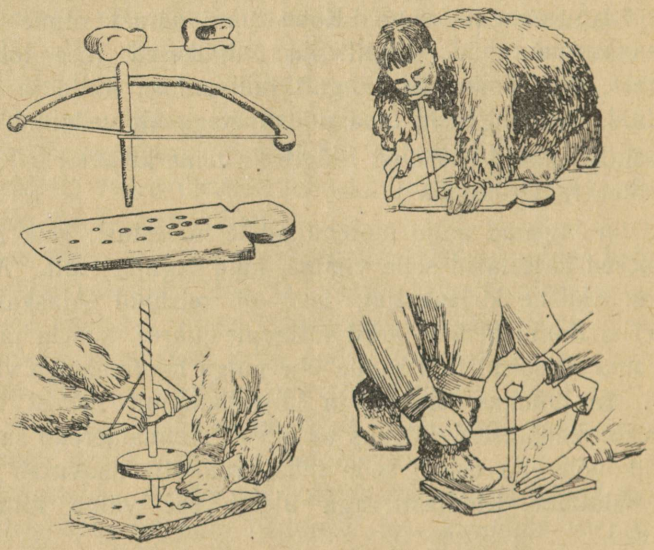
„ „Me võiksime saada tuld, nagu ürginimesed, ühe puutüki hõõrumisega vastu teist."

„Noh, mu poiss, eks sa katsu; vaatame, kas saavutad sel viisil midagi peale käte veriseks hõõrumise."

„See lihtne võte on ju Vaikse ookeani saartel ometi väga levinud."

„Ma ei vaidle vastu," vastas meremees, „arvan aga, et metsinimestel on selleks eriline vilumus. Olen nii mõnigi kord edutult katsunud sel viisil tuld saada, ja eelistan sellepärast kindlasti tikke." "

„Pencroff," jutustab Jules Verne edasi, „katsus siiski kahe kuiva puutüki hõõrumisega tuld saada. Kui tema ja neeger Nabi poolt kulutatud kogu energia oleks muundatud soojuseks, oleks sellest jätkunud ookeaniauriku katelde



Joon. 70. Kuidas tegelikult saadakse hõõrumisega tuld.

keema ajamiseks. Tulemus oli aga negatiivne: puutükid vaevalt soojenesid, igatahes vähem kui katse sooritajad.

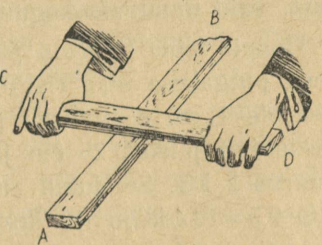
Pärast tunniajalist tööd nõrgus Pencroff higist. Pahaselt viskas ta puutükid minema.

„Ennem usun, et kesk talve tuleb kuumus, kui seda, et metsinimesed sellisel viisil tuld saavad," ütles ta. „Võibolla on kergem süüdata oma peopesad, hõõrudes neid teineteise vastu." "

Ebaõnnestumise põhjus seisneb selles, et asja kallale ei asutud nii, nagu tarvis. Enamik loodusrahvaid saab tuld mitte pulga lihtsa hõõrumisega, vaid lauakese puurimise teel teravaks tehtud pulgaga.

Vahe nende viiside vahel selgub üksikasjalisemal arutlusel.

Liikugu pulgake *CD* (joon. 71) edasi-tagasi mööda pulgakest *AB*, tehes sekundis 25-cm-sel vahemaal kaks käiku. Pulgakesi teineteise vastu suruvate käte tungi hindame 2-kG-seks (arvud on meelevaldsed, kuid tõenäolised). Et puu hõõrumisel vastu puud on hõõrdumistung umbes 40% puutükke teineteise vastu suruvast tungist, siis tööd tegev tung on antud juhul $2 \cdot 0{,}4 = 0{,}8$ kG ja töö 50-cm-sel teepikkusel on $0{,}8 \cdot 0{,}5 = 0{,}4$ kGm. Kui see mehhaaniline töö muunduks täielikult soojuseks, siis saadaks $0{,}4 \cdot 2{,}3 = 0{,}92$ väikest kalorit *. Millisele puumassi ruumalale antakse see soojus? Puu on halb soojusjuht; seepärast ei tungi hõõrumisega tekitatud soojus puusse kuigi sügavale. Olgu soojendatava kihi paksus ainult 0,5 mm **; hõõrutav pindala on 50 cm, korrutatud puudutava pinna laiusega, mis olgu 1 cm. Tähendab, hõõrumisel saadud soojusega soojenev puu ruumala on



Joon. 71. Raamatutes kirjeldatav tulesaamise viis hõõrumise abil.

$$50 \cdot 1 \cdot 0{,}05 = 2{,}5 \text{ cm}^3.$$

* Muundudes täielikult soojuseks, annab üks kilogramm-meeter 2,3 väikest kalorit.

** Edasisest lugeja näeb, et tulemus muutub vähe, kui võtta kihi paksus suuremana.

Sellise ruumalaga puutüki aine hulk on umbes 1,25 g. Et puu soojusmahtuvus on 0,6 $\frac{\text{cal}}{\text{g}}$, siis ta soojeneb

$$\frac{0{,}92}{1{,}25 \cdot 0{,}6} \approx 1^0 \text{ võrra.}$$

Tähendab, kui poleks soojuse kadu jahtumise tõttu, siis hõõrduv pulgake soojeneks igas sekundis umbes 1^0 võrra. Et aga kogu pulgake on õhu jahutava mõju all, siis peab jahtumine olema üsna suur. Seepärast on täiesti õigustatud Mark Twaini väide, et pulgakesed ei soojenenud, vaid muutusid koguni jääkülmaks.

Hoopis teine lugu on puurimisel (joon. 70). Olgu pöörleva pulgakese otsa ristlõike pindala 15 mm^2 ja mingu see ots 1 cm sügavuselt puusse. Olgu poogna (2 käiku sekundis) pikkus 25 cm ja seda pöörlema paneva tungi suurus 2 kG. Sel juhul on töö ühe sekundi kestel samuti $0{,}8 \cdot 0{,}5 = 0{,}4$ kGm ja tekkinud soojushulk 0,92 väikest kalorit. Kuid puu soojendatav ruumala on siin tunduvalt väiksem kui esimesel juhul: $0{,}15 \cdot 1 = 0{,}15$ cm^3, puu mass selles ruumalas $= 0{,}075$ g. Tähendab, pulga temperatuur hõõrumisnõos peab teoreetiliselt tõusma ühes sekundis

$$\frac{0{,}92}{0{,}075 \cdot 0{,}6} \approx 20^0$$

võrra.

Sellist (või sellele lähedast) temperatuuri tõusu võib tõepoolest saavutada, sest puurimisel on puu soojendatav osa jahtumise eest hästi kaitstud. Puu süttimistemperatuur on 250^0, ja et soojendada pulgakest selle temperatuurini, kulub kirjeldatud viisi puhul

$$250^0 : 20^0 \approx 12 \text{ sek.}$$

Meie arvutuse usaldatavust kinnitab see, et, nagu tõendavad etnoloogid, osavad „tulepuurijad" Aafrika neegrite seas saavad tuld mõne sekundi jooksul *. Muide, kõigile on teada, kui sageli süttivad põlema vankrite halvasti määritud teljed: põhjus on sel juhul sama.

Lahustatud vedru energia.

Te painutasite terasvedru kõveraks. Teie poolt kulutatud töö muundus pinguloleva vedru potentsiaalseks energiaks. Te saate kulutatud energia tagasi, kui lasete sirgeks tõmbuval vedrul tõsta koormist, veeretada ratast jms.; osa energiat saadakse tagasi kasuliku töö näol, osa aga kulub kahjulikkude takistuste (hõõrdumise) ületamiseks. Ükski erg energiat ei kao jäljetult.

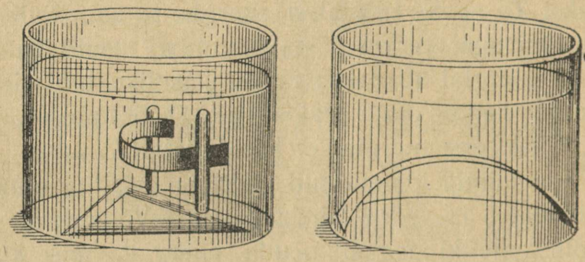
Teie aga toimite painutatud vedruga teisiti: panete ta väävelhappesse ja vedru lahustub siin. Võlgnik on kadunud: pole kelleltki tagasi nõuda energiat, mis kulutati vedru painutamiseks. Energia jäävuse seadus oleks nagu rikutud.

Kas on see nii? Mispärast õieti peame arvama, et antud juhul on energia jäljetult kadunud? Ta võis ilmneda kineetilise energia kujul sel hetkel, mil happe poolt söövitatud vedru puruneb, pannes liikuma oma tükid ja ümbritseva vedeliku. Ta võis muunduda ka soojuseks, tõstes vedeliku temperatuuri. Pole aga alust oodata mõnevõrragi märgatavat temperatuuri tõusu. Tõepoolest, olgu kokkupainutatud vedru otsad teineteisele lähendatud, võrreldes õgvendatud olekuga, 10 cm (0,1 m) võrra. Olgu vedru pingsus 2 kG; tähendab, vedru painutanud tungi k e s k m i n e suurus on 1 kG. Siit järeldub, et vedru potentsiaalne energia võrdub $1 \cdot 0{,}1 = 0{,}1$ kGm. Sellele vastab soojus-

* Peale puurimise kasutavad loodusrahvad veel teisigi tule saamise viise hõõrumise teel — „tulesaha" ja ka „tulesae" abil. Mõlemal juhul on soojendatavale puumassile — puujahule — kindlustatud kaitse jahtumise eest.

hulk $2{,}3 \cdot 0{,}1 = 0{,}23$ väikest kalorit. Selline tühine soojushulk võib kogu lahuse temperatuuri tõsta ainult kraadi väikese, praktiliselt märgatamatu murdosa võrra.

Ometi on võimalik, et painutatud vedru energia muundub ka elektri- või keemiliseks energiaks; viimasel juhul ilmneks see vedru kiiremas sööbimises (kui tekkinud keemiline energia hõlbustab terase lahustumist) või selle protsessi aeglustumises (vastupidisel juhul).



Joon. 72. Painutatud vedru lahustamise katse.

Milline loetletud võimalustest esineb tegelikult, seda võib näidata ainult katse.

Selline katse ongi tehtud.

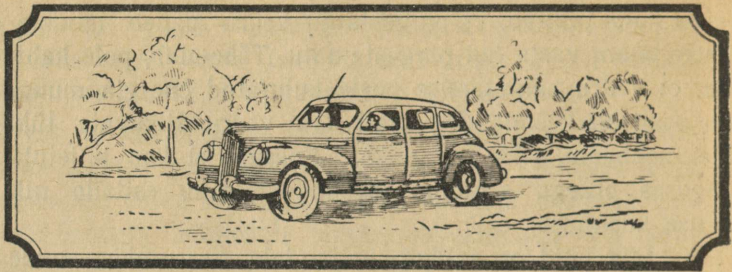
Teraseriba asetati painutatud olekus klaasanuma põhja kahe, teineteisest poole sentimeetri kaugusele kinnitatud klaaspulgakese vahele (joon. 72, vasakul). Teises katses toetus vedru oma otstega vastu anuma seinu (joon. 72, paremal). Anumasse valati väävelhapet. Teraseriba murdus varsti pooleks ja vedru mõlemad osad jäid happesse kuni täieliku lahustumiseni. Katse kestus — vedru asetamisest happesse kuni mõlema osa lahustumiseni — mõõdeti täpselt. Siis korrati katset samasuguse ribaga p a i n u t a m a t a olekus. Kõik muud tingimused olid täpselt samad kui esimesel katsel. Ilmnes, et pingestamata vedru lahustumiseks kulus v ä h e m aega.

See katse näitab, et pingestatud vedru paneb lahustamisele enam vastu kui pingestamatu. Tähendab, pole kahtlust, et vedru painutamise peale kulutatud energia muundub osaliselt keemiliseks, osalt aga vedru liikuvate tükkide mehhaaniliseks energiaks. Energia ei kao jäljetult.

Seoses praegu arutatud ülesandega võib esitada niisuguse küsimuse:

„Sületäis puid on viidud neljandale korrusele; puude potentsiaalne energia on suurenenud. Kuhu läheb see potentsiaalse energia ülejääk, kui puud ära põlevad?"

Lahendust pole raske leida, kui meenutada, et põlemisel muundub puude aine põlemissaadusteks, milledel, sest et nad on tekkinud teataval kõrgusel maapinnast, on rohkem potentsiaalset energiat kui juhul, mil nad tekivad maapinna tasemel.



ÜHEKSAS PEATÜKK.

HÕÕRDUMINE JA KESKKONNA TAKISTUS.

Kelgumäelt.

Ülesanne.

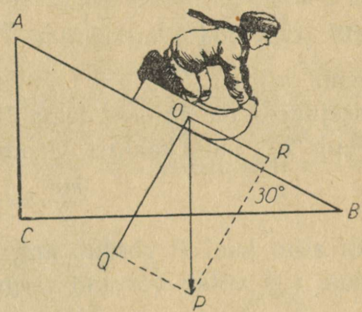
Kelgumäelt, mille kallak on 30^0 ja pikkus 12 m, liugleb alla kelk ning liigub siis edasi rõhtsal pinnal.

Kui kaugel ta peatub?

Lahendus.

Kui kelk libiseks jääl ilma hõõrdumiseta, siis ta ei peatuks kunagi. Kelk aga liigub hõõrdumisega, mis pole küll kuigi suur: raua vastu jääd hõõrdumise koefitsient on 0,02. Seepärast liigub kelk ainult seni, kuni hõõrdumise peale on täielikult kulutatud see energia, mis oli temasse kogunenud mäest allalibisemisel.

Et välja arvutada tee pikkus, selleks määrame, kui palju energiat kogunes kelku mäest allaliugumisel. Kõrgus AC (joon. 73), millelt kelk alla liigub, võrdub poole AB-ga (täisnurkses kolmnurgas on 30^0-se nurga vastaskaatet pool hüpotenuusist). Tähendab, $AC = 6$ m. Kui kelgu kaal on P, siis kelgu poolt saadud kineetiline energia kelgumäe jalal on hõõrdumise puudumisel $6P$ kGm. Lahutame raskuse P kaheks komponendiks: teega ristiasetsevaks Q-ks ja teega paralleelseks R-ks. Hõõrdumine on 0,02 osa tungist Q, mis võrdub $P \cos 30^0$, seega $0{,}87\ P$. Järelikult, hõõrdumise ületamine kulutab energiat $0{,}02 \cdot 0{,}87P \cdot 12 = 0{,}21P$ kGm; kogunenud kineetiline energia on



Joon. 73. Kui kaugele libiseb kelk?

$$6P - 0{,}21P = 5{,}79P \text{ kGm}.$$

Kelgu edasisel liikumisel mööda rõhtsat teed, mille pikkus olgu x, on hõõrdumistungi töö võrdne $0{,}02Px$ kGm. Võrrandist

$$0{,}02Px = 5{,}79P$$

saame $x = 290$ m: libisenud alla kelgumäelt, läbib kelk rõhtsat teed umbes 300 m.

Väljalülitatud mootoriga.

Ülesanne.

Mööda rõhtsat maanteed kiirusega 72 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ kihutava auto mootor lülitati välja. Kui pika tee võib auto nüüd läbida, kui hõõrdumistegur on 2%?

L a h e n d u s.

Ülesanne on eelmise sarnane, kuid auto poolt kogutud energiavaru arvutatakse siin teisiti. Auto liikumisenergia (ta „elavjõud") on võrdne $\frac{mv^2}{2}$, kus m on auto mass ja v tema kiirus. See töö tagavara kulutatakse teepikkusel x, seejuures on autosse tema liikumisel teepikkusel x mõjuv tung 2% auto kaalust. Saame võrrandi

$$\frac{mv^2}{2} = 0{,}02Px.$$

Et auto kaal P võrdub mg, kus g on raskustungi kiirendus, siis võtab võrrand järgmise kuju:

$$\frac{mv^2}{2} = 0{,}02mgx;$$

siit leiame otsitava kauguse:

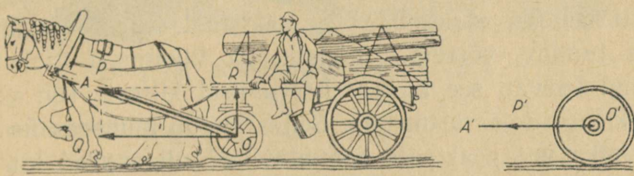
$$x = \frac{25v^2}{g}.$$

Lõpptulemuses ei esine auto mass; tähendab, teepikkus, mille läbib auto pärast mootori väljalülitamist, ei sõltu auto massist. Asendades $v = 20 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ja $g = 9{,}8 \frac{\text{m}}{\text{sek}^2}$ leiame, et otsitav teepikkus on ligikaudu 1000 m; auto läbib siledal teel terve kilomeetri. Sellise suure teepikkuse saime seepärast, et me ei arvestanud õhutakistust, mis kiiruse suurenedes kiiresti kasvab.

Vankri rattad.

Mispärast on enamikul vankreil esirattad väiksemad kui tagarattad, isegi siis, kui esitelg pole pööratav ja esirattad ei tarvitse ulatuda vankrikere alla?

Et leida õige vastus, selleks tuleb küsimus esitada teisiti: küsida mitte seda, miks esirattad on väiksemad, vaid seda, miks tagarattad on s u u r e m a d. Esirataste väikeste mõõtmete otstarbekus peaks olema selge: nende rataste telje madal asend annab aisadele ja trengidele kallaku, mis kergendab hobusel vankri väljatõmbamist teelohkudest. Joonis 74 selgitab, miks aisa *AO* kaldasendi puhul hobuse tõmbetung *OP*, mis on lahutatav komponentideks *OQ* ja *OR*, annab püsti üles suunatud tungi (*OR*), mis kergendab hobusel koorma väljatõmbamist lohust. Aisade rõhtasendi puhul (joon. 74, paremal) ei saada püsti üles suunatud tungi; vankrit on nüüd raskem lohust välja tõmmata. Hästi korrashoitavatel teedel, kus ebatasasusi ei ole,



Joon. 74. Mispärast on väikesed esirattad kasulikud?

pole ka esitelje madal asend tarvilik. Mis puutub autodesse ja kahe rattaga jalgratastesse, siis nendel tehti juba varem rattad ühesuurustena.

Asugem nüüd ülesande küsimuse juurde: miks tagarataste läbimõõt pole niisama suur kui esiratastel? Põhjuseks on see, et suured rattad on väikestest kasulikumad, sest h õ õ r d u m i n e on nende puhul väiksem. Veereva keha hõõrdumistung on pöördvõrdeline raadiusega. Siit on selge tagarataste suure läbimõõdu otstarbekus.

Mille peale kulub vedurite ja aurikute energia?

Vastavalt „terve mõistuse mehhaanikale" kulutavad vedurid ja aurikud oma energiat liikumiseks. Tegelikult aga kulub veduri energia ainult esimese veerandminuti jooksul enda ja rongi liikumapanekuks, kogu ülejäänud ajal (rõhtsal teel) kulub energia aga ainult selleks, et ületada hõõrdumist ja õhutakistust. Võib öelda, et trammielektrijaama energia kulub täielikult selleks, et soojendada linna õhku — hõõrdumistungi töö muundub soojuseks. Kui poleks kahjulikke takistusi, siis rong, saavutanud esimese 10—20 sekundi jooksul kiiruse, liiguks rõhtsal teel inertsi mõjul edasi määramata kaua ilma energia kuluta.

Me oleme juba varem rääkinud, et ühtlane liikumine toimub ilma tungi abita ja järelikult ka ilma energia kuluta. Kui aga ühtlase liikumise puhul toimub energia kulutamine, siis kulub see ühtlast liikumist takistavate põhjuste ületamiseks. Aurikute võimsad masinad on vajalikud ainult selleks, et ületada vee takistust. See takistus on väga tunduv, võrreldes takistusega liikumisel maismaal, pealegi kasvab see kiiruse kasvamisel kiiresti (on võrdeline kiiruse teise astmega). Selles peitub muuseas ka põhjus, miks vee peal pole saavutatavad nii suured kiirused nagu maismaal *. Sõudja võib kerge vaevaga anda paadile kiiruse 6 $\frac{km}{h}$; kui ta aga tahab kiirust suurendada 1 $\frac{km}{h}$ võrra, tuleb tal kogu oma jõud kokku võtta. Et kerge võidusõidupaat liiguks kiirusega 20 $\frac{km}{h}$, selleks läheb aga juba tarvis hästi treenitud, kogu jõust sõudvat kaheksaliikmelist meeskonda.

Et vee takistus liikumisele kasvab kiiresti kiiruse suurenemisega, siis kasvab väga kiiresti ka vee võime kehasid kaasa viia. Kohe vestleme sellest üksikasjalisemalt.

Vee poolt kaasaviidavad kivid.

Uhtes ja lõhkudes kallast kannab jõgi ise rusu varisemiskohast oma sängi teistesse kohtadesse. Vesi veeretab

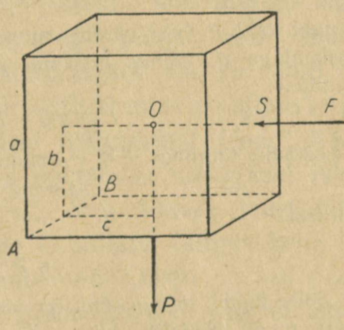
---

* Öeldu ei kehti nende veesõidukite (nn. liugpaatide) kohta, mis libisevad mööda veepinda, vette peaaegu mitte vajudes; et vesi siin võrdlemisi vähe takistab, siis võivad liugpaadid arendada väga suurt kiirust.

mööda põhja kive, mis sageli on üsna suured; see võime hämmastab paljusid. Imestatakse, kuidas võib vesi kive kaasa viia. Tõsi küll, seda ei tee mitte iga jõgi. Aeglaselt

Joon. 75. Mäestikujõgi veeretab kive.

voolav tasandikujõgi võib kaasa viia ainult peenikesi liivaterasid. Kuid piisab juba väikesest kiiruse kasvust, et veevoolu kaasatõmbevõime üsna tunduvalt suureneks. Kahekordse kiiruse puhul on jõgi võimeline kaasa tõmbama mitte ainult liivaterasid, vaid juba üsna suuri veerkive. Mäestikujõgi, mille kiirus on veel kaks korda suurem, kisub juba kaasa kilogrammiseid ja raskemaidki munakaid. Kuidas neid nähtusi seletada?



Joon. 76. Tungid, mis mõjuvad kivisse voolavas vees.

Me puutume siin kokku huvitava järeldusega mehhaanika seadusest, mis väidab, et voolu kiiruse suurenemine n korda võimaldab voolul tõmmata kaasa n^6 korda raskemaid esemeid.

Näitame, mispärast esineb siin selline — looduses väga haruldane — võrdelisus kuuenda astmega.

Lihtsuse mõttes oletame, et jõe põhjal lasuv kivi on kuup, serva pikkusega a (joon. 76). Tema külgtahusse S mõjub tung F (jooksva vee surve). See tung püüab kuupi pöörata ümber serva AB. Sellele vastu toimib tung P — kuubi kaal vees, mis takistab kuubi pöördumist ümber selle serva. Et kivi jääks tasakaalu, selleks peavad mehhaanika seaduste järgi tungide F ja P momendid telje AB suhtes olema võrdsed. Tungi momendiks telje suhtes nimetatakse tungi suuruse korrutist tema rakenduspunkti kaugusega teljest. Tungi F moment võrdub Fb-ga, tungi P moment võrdub Pc-ga (joon. 76). Aga $b = c = \frac{a}{2}$. Järelikult jääb kivi paigale ainult siis, kui

$$F \cdot \frac{a}{2} \leqslant P \cdot \frac{a}{2}, \quad \text{s. o.} \quad F \leqslant P.$$

Edasi rakendame valemit

$$Ft = mv,$$

kus t on tungi mõju kestus, m on selle vee mass, mis võtab osa survest t sekundi jooksul, v on voolu kiirus.

Hüdrodünaamikas tõestatakse, et veejoa rõhumine vee liikumise suunaga ristiolevale pinnale on võrdeline selle pinna suurusega ja voolu kiiruse ruuduga. Tähendab,

$$F = ka^2v^2.$$

Kuubi kaal P vees võrdub ruumalaga a^3, mis on korrutatud ta aine erikaaluga d, miinus niisama suure veeruumala kaal (Archimedese seadus):

$$P = a^3d - a^3 = a^3(d - 1).$$

Tasakaalu tingimus $F \leqslant P$ omandab kuju:

$$ka^2v^2 \leqslant a^3(d - 1),$$

millest

$$a \geqslant \frac{kv^2}{(d - 1)}.$$

Selle kuubi serv a, mis on võimeline vastu panema voolule kiirusega v, on võrdeline kiiruse teise astmega. Kuubi kaal aga, nagu me teame, on võrdeline tema serva kolmanda astmega (a^3). Järelikult, veega kaasaviidavate kivikuupide kaal suureneb võrdeliselt voolu kiiruse kuuenda astmega, sest $(v^2)^3 = v^6$.

Selles seisnebki eelnimetatud seadus. Me tuletasime seaduse kuubikujuliste kivide kohta, seda seadust pole aga raske tuletada ka ükskõik millise kujuga kehade kohta. Meie tuletus on ligikaudne ja omab seepärast ainult orienteerivat tähtsust. Kaasaegne hüdrodünaamika annab sellele küsimusele põhjendatuma lahenduse.

Illustratsiooniks sellele seadusele kujutlegem kolme jõge: teise jõe kiirus olgu kaks korda suurem esimese jõe kiirusest, kolmanda jõe kiirus olgu aga veel kaks korda suurem. Teiste sõnadega, jõgede kiiruse suhe on 1 : 2 : 4. Esitatud seaduse põhjal on nende jõgede poolt kaasaviidavate kivide kaalu suhe $1 : 2^6 : 4^6 = 1 : 64 : 4096$. Siit järeldub, et kui aeglane jõgi viib kaasa ¼-G-seid liivaterasid, siis kaks korda kiirem jõgi võib juba kaasa viia 16 G kaaluvaid kivikesi, veel kaks korda kiirema vooluga mäestikujõgi saab aga juba veeretada kive, millede kaal on mitu kilogrammi.

Vihmatilkade kiirus.

Vihmajugade kaldjooned liikuva vaguni aknaruutudel räägivad tähelepanuväärsest nähtusest. Siin toimub kahe liikumise liitumine rööpküliku reegli põhjal, sest vihmatilgad võtavad alla langedes samaaegselt osa ka rongi liikumisest. Pange tähele, et resultantliikumine on siin sirgjooneline. Üks liidetavatest liikumistest (rongi liikumine) on ühtlane. Mehhaanika õpetab, et niisugusel juhul peab ka teine liidetav liikumine, s. o. tilkade langemine, olema ühtlane. Tulemus on ootamatu: langev keha liigub ühtlaselt! See kõlab paradoksina. Ometi on see paratamatu järeldus kaldjoonte sirgjoonelisusest vaguni aknaruutudel; kui vihmatilgad langeksid kiirenevalt, oleksid need jooned kõverjooned (ühtlaselt kiireneva liikumise puhul paraboolide kaared).

Niisiis, vihmatilgad ei lange kiirenevalt nagu langev kivi, vaid ühtlaselt. Põhjuseks on asjaolu, et õhutakistus tasakaalustab täielikult tilga raskuse, mis põhjustab kiirenemist. Kui seda ei oleks, kui õhk ei takistaks vihmatilkade langemist, siis oleksid selle tagajärjed meile üsna viletsust toovad. Vihmapilved hõljuvad tihti 1—2 km kõrgusel;

langedes mittetakistavas keskkonnas 2000 m kõrguselt alla, jõuaksid tilgad maapinnale kiirusega

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 2000} \approx 200 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}}.$$

See on revolvrikuuli kiirus. Olgugi et kuulid pole siin tinast, vaid ainult veest, millel on 10 korda vähem kineetilist energiat, siiski arvan, et ka selline tulistamine pole kuigi meeldiv.

Kui suure kiirusega jõuavad vihmatilgad tegelikult maani? Me hakkame arutama seda küsimust, enne aga seletame, miks tilgad liiguvad ühtlaselt.

Takistus, mida õhk avaldab langevasse kehasse, ei jää keha kogu langemisaja vältel samaks. Ta suureneb langemiskiiruse suurenemisega. Esimestel hetkedel, mil langemiskiirus on väga väike *, pole üldse tarvis õhutakistust arvestada. Edaspidi langemiskiirus kasvab, ja sellega koos ka õhutakistus, mis pidurdab kiiruse kasvu **. Langemine jääb kiirenevaks, kiirenduse suurus aga on väiksem kui vabal langemisel. Kiirenduse vähenemine jätkub ja muutub praktiliselt võrdseks nulliga: sellest momendist alates keha liigub ilma kiirenduseta, s. o. ühtlaselt. Ja et kiirus nüüd enam ei kasva, siis ei kasva ka õhutakistus: ühtlane liikumine jääb püsima, liikumine ei muutu ei kiirenevaks ega aeglustuvaks.

Tähendab, õhus langev keha hakkab alates teatavast hetkest liikuma ühtlaselt. Veetilkade puhul jõuab see hetk kätte üsna peatselt. Vihmatilkade lõppkiiruse mõõtmised on näidanud, et see on väga väike, iseäranis väikestel tilkadel. Tilkade puhul kaaluga 0,03 mG võrdub kiirus

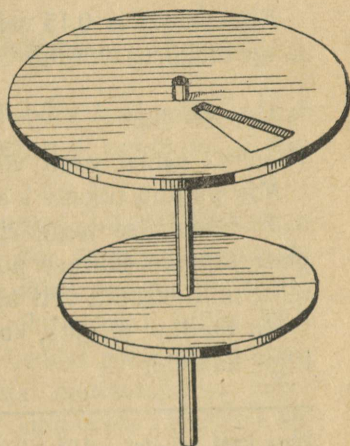
* Sekundi esimese kümnendiku jooksul läbib vabalt langev keha ainult 5 cm.

** Kiiruse puhul mõnest meetrist sekundis kuni umbes 200 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sek}}$ kasvab õhutakistus võrdeliselt kiiruse r u u d u g a.

1,7 $\frac{m}{sek}$, 20 mG-ste tilkade puhul 7 $\frac{m}{sek}$ ja kõige jämedamate tilkade puhul — kaaluga 200 mG — on kiirus 8 $\frac{m}{sek}$; suuremat kiirust pole vaatlustel saadud.

Väga teravmeelne on vihmatilkade kiiruse määramise viis. Riist (joon. 78) koosneb kahest kettast, mis on kinni-

Joon. 77. Kallakad vihmaveenired vaguniaknal.



Joon. 78. Riist vihmatilkade kiiruse määramiseks.

tatud ühise püsttelje külge. Ülemises kettas on kitsas sektorikujuline läbilõige. Riist viiakse vihmavarju all vihma kätte, pannakse kiiresti pöörlema ja eemaldatakse siis vihmavari. Läbides ava langevad vihmatilgad alumisele, kuivatuspaberiga kaetud kettale. Ajavahemikus, mille jooksul tilk liigub ketaste vahel, on kettad pöördunud teatava nurga võrra, ja alumisele kettale langenud tilkade jäljed pole otse ülemise ketta läbilõike vastas, vaid veidi tagapool. Olgu tilga jälg näiteks ringjoone ümbermõõdu kahekümnendiku osa võrra tagapool, kettad aga tehku 20 tiiru minutis; ketastevaheline kaugus olgu 40 cm. Nende andmete põhjal pole raske määrata tilga langemise kiirust: tilk läbib vahemaa ringide vahel (0,4 m) ajavahemikus, mille jooksul 20 tiiru minutis tegev ketas pöördub ühe kahekümnendiku osa võrra täispöördest. See ajavahemik võrdub

$$\frac{1}{20}:\frac{20}{60}=0{,}15 \text{ sek.}$$

Ajavahemikus 0,15 sek. läbib tilk 0,4 m; tähendab, tilga langemiskiirus võrdub

$$0{,}4:0{,}15=2{,}6\ \frac{\text{m}}{\text{sek}}.$$

(Täpselt samal viisil võib määrata kuuli kiirust.)

Mis puutub tilkade k a a l u s s e, siis see määratakse tilkade langemise tagajärjel kuivatuspaberile tekkinud märgade täppide suuruse põhjal. Enne aga tehakse kindlaks, mitu milligrammi vett imab 1 cm² paberit.

On huvitav jälgida, kuidas muutub tilga kiirus vastavalt tilga kaalule.

Tilga kaal mG-des	0,03	0,05	0,07	0,1	0,25	3	12,4	20
Raadius mm-tes	0,2	0,23	0,26	0,29	0,39	0,9	1,4	1,7
Kiirus $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$-tes	1,7	2	2,3	2,6	3,3	5,6	6,9	7,1

Raheterad langevad suurema kiirusega kui vihmatilgad. Seda asjaolu ei tule seletada muidugi mitte sellega, et raheterad on veest tihedamad (just ümberpöördult: vesi on tihedam), vaid sellega, et nende mõõtmed on suuremad. Aga ka nemad langevad maapinna läheduses jääva kiirusega.

Isegi lennukilt allaheidetud šrapnellikuulid (tinast kerakesed, läbimõõduga umbes 1,5 cm) jõuavad maapinnale jääva ja üsna mõõduka kiirusega; seepärast on nad peaaegu ohutud — nad ei suuda läbi lüüa isegi pehmet kübarat. Selle asemel samalt kõrguselt allaheidetud rauast „nooled" kujutavad endast hirmuäratavat relva, mis on võimeline inimese keha pikuti läbi lööma. See on seletatav asjaoluga, et „noole" 1-cm²-se ristlõike pinnale tuleb palju suurem mass kui ümmargusel kuulil; „noole" ristkoormus, nagu ütlevad suurtükiväelased, on suurem kui kuulil, ja tänu sellele ületabki „nool" edukamalt õhutakistust.

Kehade langemise mõistatus.

Selline üldtuntud nähtus, nagu kehade langemine, annab meile õpetliku näite järsust erinevusest tavaliste ja teaduslikkude kujutluste vahel.

Inimesed, kes ei tunne mehhaanikat, on veendunud, et rasked kehad langevad kiiremini kui kerged. See vaade, mis ulatub kuni Aristoteleseni ja mida tunnistati kõikide poolt pika rea sajandite jooksul, kummutati alles XVII sajandil kaasaegse füüsika rajaja Galilei poolt. Selle suure loodusuurija ja ka populariseerija mõttekäik on teravmeelne. „Ilma katseteta, lühikese, kuid veenva arutluse abil võime selgesti näidata, kui ebaõige on väide, et raskemad kehad liiguvad kiiremini kui kergemad kehad, mis koosnevad ühest ning samast ainest . . . Kui meil on kaks langevat keha, millede loomulik kiirus on erinev, ja me ühendame kiiremalt liikuva keha aeglasemalt liikuvaga, siis peab selge olema, et kiiremini langeva keha liikumine mõnevõrra aeglustub, teise keha liikumine aga mõnevõrra kiireneb. Kui see on nii ja kui ühtlasi on õige, et suurem kivi liigub, ütleme, kiirusega kaheksa „kraadi" (leppeline ühik), teine, väiksem kivi aga kiirusega neli „kraadi", siis neid ühendades peame saama kiiruse, mis on väiksem kui kaheksa „kraadi"; kuid kaks ühendatud kivi moodustavad uue keha, mis on suurem sellest esialgsest kehast, mille kiirus oli kaheksa kraadi; tulemus on järelikult see, et raskem keha liigub väiksema kiirusega kui kergem keha; see aga räägib vastu meie eeldusele. Te näete, et oletusest, mille kohaselt raskemad kehad liiguvad suurema kiirusega kui kergemad, ma sain teha järelduse, et raskemad kehad liiguvad aeglasemalt."

Nüüd teame kindlasti, et õhutühjas ruumis langevad kõik kehad ühesuuruse kiirusega ja et kehade erineva kiiruse põhjuseks langemisel õhus on õhutakistus. Kuid siin tekib järgmine kahtlus: õhutakistus liikumisele sõltub ainult keha kujust ja suurusest; seepärast näib, et kaks suuruse ja kuju poolest ühesugust, kuid erineva kaaluga keha peaksid langema ühesuuruse kiirusega: nende kiirused, mis õhutühjas ruumis on isekeskis võrdsed, peaksid õhutakistuse tõttu vähenema ühesugusel määral. Ühesuuruse diameetriga raud- ja puitkera peaksid langema ühteviisi. See järeldus aga ilmselt ei vasta faktidele.

Kuidas pääseda sellest vastuolust teooria ja praktika vahel?

Kasutame mõttes p ü s t i seatud aerodünaamilist toru (esimene peatükk). Sellesse on riputatud ühesuuruste mõõtmetega raud- ja puitkera, milledele avaldab mõju alt üles liikuv õhuvool. Teiste sõnadega, me p ö ö r a s i m e ü m b e r kehade langemise õhus. Kumma kera viib õhuvool kiiremini üles? On selge, et kuigi mõlemale kerale mõjuvad võrdsed tungid, ei saa kerad võrdset kiirendust: kerge kera saab suurema kiirenduse (vastavalt valemile $F = ma$). Rakendades seda esialgsele, mitte ümberpööratud nähtusele, näeme, et kerge kera peab langemisel raskest m a h a j ä ä m a. Teiste sõnadega, raudkera peab õhus langema kiiremini kui temaga ruumalalt võrdne puitkera. Öeldu seletab muuseas ka seda, mispärast suurtükiväelased omistavad nii suurt tähtsust mürsu ristkoormusele, s. o. mürsu massi sellele osale, mis tuleb iga 1 cm^2 kohta, millele mõjub õhutakistus (vt. lk. 157).

Toome veel järgmise näite. Kas olete vahel, seistes mäel, meelelahutuseks kive alla visanud? Sel juhul pidite märkama, et suuremad kivid läbivad viskel üldiselt pikema tee kui väiksemad kivid. Seletus on lihtne: niihästi suur kui ka väike kivi kohtab oma teel ühesuguseid takistusi, suur kivi aga, omades suuremat energiavaru, ületab kergemini need takistused, mis aeglustavad väiksemat kivi.

Pärivoolu.

Ma olen kindel, et paljudele on täiesti uus ja ootamatu see väide, et kehade ujumisel jões pärivoolu on palju sarnasust langemisega õhus. Ollakse arvamusel, et aerudeta ja purjedeta paat ujub jõel voolu kiirusega. Selline arvamus on siiski ekslik: paat liigub voolust k i i r e m i n i ja seejuures seda kiiremini, mida raskem ta on. See tõsiasi on hästi teada kogenud parvemeestele, on aga täiesti võõras paljudele füüsikutele. Pean tunnistama, et minagi kuulsin sellest alles hiljuti.

Arutame üksikasjalisemalt seda paradoksaalset nähtust. Esimesel pilgul näib arusaamatuna, kuidas pärivoolu ujuv paat saab teda kandvast voolust ette jõuda. Tuleb aga silmas pidada, et jõgi ei kanna paati nii, nagu konveieri liikuv lint tema peal olevaid toodete üksikosi. Vesi jões kujutab endast kaldpinda, mida mööda kehad iseseisvalt liugudes liiguvad üha k i i r e n e v a l t; vesi on aga hõõrdumise tõttu vastu põhja ja kaldaid saavutanud ü h t l a s e liikumise. On selge, et peab vältimatult tulema hetk, mil suureneva kiirusega liikuv paat j õ u a b v o o l u s t e t t e. Sellest hetkest alates hakkab vesi paadi liikumist juba p i d u r d a m a, nagu seda teeb õhk kehade langemisel. Lõpptulemuseks on — samadel põhjustel nagu õhuski — see, et liikuv keha saavutab teatava lõpliku kiiruse, mis enam ei kasva. Mida kergem on vees ujuv keha, seda varemini saavutatakse see jääv kiirus ja seda väiksem on see kiirus; ümberpöördult, voolus liikuma pandud raske keha saavutab suurema lõppkiiruse.

Siit järeldub, et näiteks paadist vette kukkunud aer peab paadist m a h a j ä ä m a, sest ta on paadist tunduvalt kergem. Nii paat kui ka aer liiguvad voolust kiiremini, raske paat aga jõuab kergest aerust ette. Seda kõike võibki näha tegelikkuses, eriti silmapaistvalt aga kiire vooluga jõgedes.

Et kõike äsjaseletatut näitlikult illustreerida, selleks toome ühe ränduri huvitava jutustuse:

„Ma võtsin osa ekskursioonist Altais ja siin tuli mul laskuda mööda Bija jõge, selle lähtest Teletskoje järvest kuni Biiski linnani. Sõit kestis 5 ööpäeva. Ärasõidu eel tähendas keegi ekskursantidest parvemehele, et meid on parvel üsna palju.

„Pole viga," vastas meie taat, „seda kiiremini sõidame."

„Kuidas? Kas me siis ei uju voolu kiirusega?" avaldasime imestust.

„Ei, m e u j u m e v o o l u s t k i i r e m i n i; mida raskem on parv, seda kiiremini ta ujub."

Me ei uskunud. Taat soovitas meil, kui teele asume, parvelt vette visata laaste. Seda me tegimegi, ja tõepoolest osutus, et laastud jäid meist kiiresti maha.

Taadi sõnade õigsus ilmnes sõidu ajal veelgi ilmekamalt. Ühes kohas sattusime veekeerisesse. Väga kaua tegime seal ringe, enne kui meil õnnestus sellest välja pääseda. Meie ringlemise algul kukkus parvelt vette puust vasar ja ujus kiiresti edasi (mööda jõepinda väljaspool keerist. — J. P.).

„Pole viga," ütles taat, „küllap jõuame talle järele; me oleme ju raskemad."

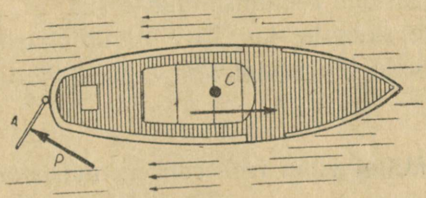
Kuigi me jäime üsna kauaks keerisesse, täitus see ennustus siiski.

Teisal nägime enda ees parve; see oli meie omast kergem (oli sõitjateta). Me jõudsime talle varsti järele ja temast ette."

Kuidas tüür juhib laeva?

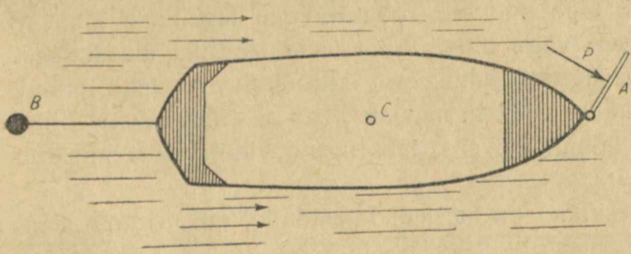
Kõigile on teada, et väike tüür juhib suure laeva liikumist. Kuidas see toimub?

Liikugu laev (joon. 79) mõne masina jõul noolega näi-



Joon. 79. Kui laeva paneb liikuma jõumasin, siis kinnitatakse tüür laeva ahtrisse.

datud suunas. Selle asemel, et vaadata laeva liikumist vee suhtes, võib oletada, et laev on paigal, vesi aga liigub laevale vastu. Vesi rõhub tüürile *A* tungiga *P*, mis pöörab



Joon. 80. Kui laeva liikumine on voolust aeglasem, siis tuleb tüür kinnitada laeva käila.

laeva ümber raskuskeskme *C*. Mida suurem on laeva kiirus vee suhtes, seda paremini ta alistub tüürile. Kui laev vee suhtes ei liigu, siis pole teda võimalik tüüriga pöörata.

Jutustame ühest tähelepanuväärsest viisist, mida kasutati kunagi Volgal suurte, vooluga liikuvate parvetamislotjade juhtimisel. Tüür oli kinnitatud laeva käila ja neil juhtudel, kui lotja tuli pöörata, heideti laeva ahtrist köie otsas vette koormis, mis lohises mööda põhja. Selle koormise olemasolu tegigi suure laeva juhitavaks. Mispärast? Seepärast, et lodi metsamaterjaliga liigub siis veest aeglasemalt; vee suhteline liikumine toimub lodja liikumise suunas ja vesi avaldab rõhumist tüürile suunas, mis on vastupidine sellele suunale, kui laev liigub masina jõul veest kiiremini. Selle tähelepanuväärse viisi leiutajaks on rahvas ise.

Millal vihm teeb rohkem märjaks?

Ülesanne.

Selles peatükis on tulnud palju kõnelda vihmatilkade langemisest. Luban endale seepärast esitada lõpuks lugejale ülesande, mis pole küll otseselt seotud peatüki teemaga, kuid on siiski tihedas seoses vihma sadamise mehhaanikaga.

Me lõpetame selle peatüki ühe tegelikust elust võetud, näiliselt väga lihtsa, kuid üsna õpetliku ülesandega.

Missugusel juhul otse alla sadava vihma puhul saab teie kübar rohkem märjaks: kas siis, kui seisate liikumatult ühel kohal, või siis, kui liigute vihma käes niisama kaua aega?

Ülesannet on kergem lahendada, kui esitame selle teisel kujul:

Vihm sajab püstsuunas. Missugusel juhul langeb vagunikatusele ühes sekundis rohkem vihmavett: kas siis, kui vagun seisab, või siis, kui vagun liigub?

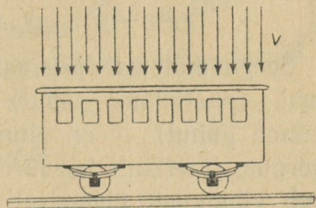
Ma olen esitanud seda ülesannet nii ühel kui ka teisel kujul mitmele mehhaanikaga tegelevale isikule ja olen saanud erinevaid vastuseid. Ühed soovitasid kübara säästmiseks vihma all rahulikult paigal seista, teised, vastupidi, soovitasid joosta nii kiiresti kui võimalik.

Kumb vastus on õige?

L a h e n d u s.

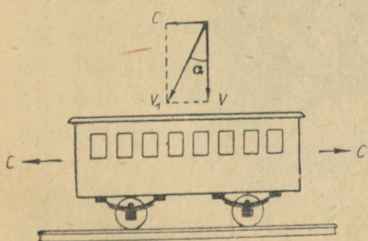
Arutame ülesannet teises redaktsioonis, nimelt vagunikatuse suhtes.

Kui vagun on paigal, siis langeb tema katusele vihmatilkade näol igas sekundis nii palju vett, kui palju mahub sellesse püstprismasse, mille põhjaks on vagunikatus ja kõrguseks arvu poolest tilkade püstlangemise kiirus V (joon. 81).

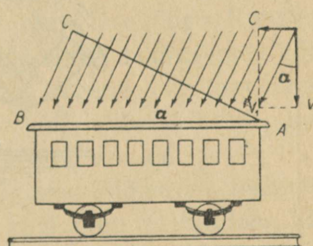


Joon. 81. Liikumatule vagunile otse alla sadav vihm.

Raskem on arvutada vihmavee hulka, mis langeb l i i k u v a vaguni katusele. Toimime järgmiselt. Kujutleme, et vagun liigub kiirusega C, ja ka langevate vihmatilkade kogum on saanud maa suhtes sellise liikumise, mis on võrdne ja vastupidine vaguni tõelisele liikumisele. Siis muutub vagun maa suhtes liikumatuks,



Joon. 82. Seesama, kui vagun liigub.



Joon. 83. Liikuva vaguni katusele sadav vihm.

vihmatilgad aga võtavad selle liikumatu vaguni suhtes osa kahest liikumisest: püstlangemisest kiirusega V ja rõhtsast, vagunile vastusuunatud edasinihkumisest kiirusega C. Resultantkiirus V_1 on vaguni katusega kaldu; teiste sõnadega, vagun näib olevat kaldu sadava vihma all (joon. 82).

Nüüd on selge, et liikuva vaguni katusele ühes sekundis langevate tilkade kogum mahub täielikult kaldprismasse, mille põhjaks on endiselt vaguni katus (joon. 83), kuid mille külgservad moodustavad püstsirgega nurga α ja võrduvad V_1-ga. Selle prisma kõrgus võrdub

$$V_1 \cos \alpha = V.$$

Seega mõlemal prismal, milledest oli jutt — püstprismal (püstvihma puhul) ja kaldprismal (kaldu sadava vihma puhul) — on ühine põhi (vagunikatus) ja võrdne kõrgus, järelikult ka võrdne ruumala. Mõlemal juhul langeb vihmavett ühepalju! Järelikult saab teie kübar ühteviisi märjaks, vaatamata sellele, kas seisate vihma all liikumatult pool tundi või jooksete vihma käes niisama kaua.

KÜMNES PEATÜKK.

MEHHAANIKA ELUSLOODUSES.

Gulliver ja hiiglased.

Kui loete „Gulliveri reisudes" hiiglastest, kes olid 12 korda pikemad normaalsest inimesest, siis kujutlete neid muidugi ka 12 korda tugevamatena. Ja ka selle teose autor ise varustas oma brobdingnagid imeväärse jõuga. Kuid see on täiesti ekslik ja vastuolus mehhaanika seadustega. Võib kergesti veenduda, et hiiglased ei saanud olla harilikust inimesest 12 korda tugevamad, vaid, ümberpöördult, nad pidid olema niisama palju kordi n õ r g e m a d.

Seisku kõrvuti Gulliver ja hiiglane. Mõlemad tõstavad oma parema käe. Gulliveri käe kaal olgu p, hiiglase käe kaal P. Esimene tõstab oma käe raskuskeskme kõrgusele h, teine kõrgusele H. Tähendab, Gulliver teeb tööd ph, hiiglane aga PH. Leiame seose nende suuruste vahel. Hiiglase käe kaal P on Gulliveri käe kaalust p suurem niimitu korda, kuimitu korda on suurem käe ruumala, see on 12^3 korda. Kõrgus H on suurem h-st 12 korda. Seega

$$P = 12^3 p,$$
$$H = 12h.$$

Siit $PH = 12^4 ph$, seega tarvitab hiiglane käe tõstmiseks jõudu 12^4 korda rohkem kui normaalne inimene. Kas hiiglane omab ka vastavalt suuremat töövõimet? Selleks asume mõlema olendi lihaste jõudu võrdlema. Kõigepealt loeme läbi füsioloogia kursusest vastava koha *:

„Paralleelkiulise lihase puhul sõltub kõrgus, milleni tõstetakse raskus, kiudude pikkusest, seejuures sõltub tõstetava keha raskus kiudude arvust, sest raskus jaotub nende vahel. Seepärast suudab kahest ühesuguse pikkuse ja ühesuguste omadustega lihasest suuremat tööd teha see, millel on suurem ristlõige, ja kahest ühesuuruse ristlõikega lihasest see, mis on pikem. Kui aga võrdluseks on võetud kaks eri pikkuse ja eri ristlõikega lihast, siis suuremat tööd saab teha see, millel on suurem ruumala, s. o. millesse mahub rohkem ruumalaühikuid."

Rakendades öeldut meie juhul järeldame, et hiiglase töövõime peab olema Gulliveri omast 12^3 (lihaste ruumala suhe) korda suurem. Tähistades Gulliveri töövõimet w-ga ja hiiglase oma W-ga, saame seose

$$W = 12^3 w.$$

Tähendab, hiiglane oma kätt tõstes peab tegema tööd 12^4 korda rohkem kui Gulliver, ta lihaste töövõime ületab aga Gulliveri töövõime ainult 12^3 korda. On selge, et tal on seda liigutust 12 korda raskem teha kui Gulliveril. Teiste sõnadega, hiiglane on Gulliverist suhteliselt 12 korda nõrgem; ühe hiiglase võitmiseks läheb tarvis armeed, mis ei koosne mitte 1728 (s. o. 12^3) normaalinimesest, vaid ainult 144 inimesest.

Kui Swift oleks soovinud, et tema hiiglased oleksid oma liikumises niisama vabad kui tavalise kasvuga inimesed, oleks ta pidanud oma brobdingnagid varustama lihastega, millede maht oleks pidanud olema 12 korda suurem, kui

---

* Foster'i „Füsioloogia õpperaamat".

seda nõuab proportsionaalsus. Selleks oleks nende lihaste läbimõõt pidanud olema $\sqrt{12}$, seega umbes $3\frac{1}{2}$ korda suurem kui proportsionaalselt ehitatud inimese kehas. Peale selle peaksid luud, mis neid jämenenud lihaseid kannaksid, olema vastavalt massiivsemad. Kas Swift mõtles sellele, et tema fantaasia poolt loodud hiiglased oleksid pidanud oma kaalukuse ja kohmakuse poolest sarnanema jõehobudega?

Miks jõehobu on kohmakas.

See pole juhuslik, et just jõehobu tuli mulle meelde. Selle looma massiivsust ja kohmakust on kerge seletada eelmises artiklis öelduga. Looduses ei saa olla olendit, kes

Joon. 84. Jõehobu luustik (paremal) kõrvu lemmingu luustikuga, kusjuures jõehobu luude pikkus on vähendatud selle närilise luude pikkuseni. Paistab silma jõehobu luude ebaproportsionaalne massiivsus.

suurte mõõtmete juures oleks ka graatsiline. Võrdleme jõehobu (pikkus 4 m) väikese närilise lemminguga (pikkus 15 cm). Nende keha väliskuju on ligikaudu sarnane, ent me juba nägime, et geomeetriliselt sarnased, kuid suuruselt erinevad loomad ei saa omada ühesugust liikumisvõimet.

Kui jõehobu lihased geomeetriliselt sarnaneksid lemmingu lihastega, siis oleks jõehobu lemmingust suhteliselt nõrgem

$$\frac{400}{15} \approx 27 \text{ korda.}$$

Et jõehobu võiks liikuvuses lemminguga võistelda, selleks peaksid tema lihased olema 27 korda suuremad sellest mahust, mida nõuab proportsionaalsus, tähendab, lihaste läbimõõt peaks olema suurem $\sqrt{27}$, see on 5 korda. Vastavalt peaksid jämedamad olema ka niisugustele lihastele toeks olevad luud. Nüüd on arusaadav, miks jõehobu on selline kohmakas lihahunnik ja miks tal on nii massiivne luustik. Joonis 84, millel on kujutatud kummagi looma luustik ja piirjoon ühesuurustena, veenab meid öeldus. Järgmine tabel kinnitab seda loomariigis kehtivat üldist seadust, mille põhjal luustik peab moodustama seda suurema protsendi looma kaalust, mida suurem on loom.

Imetajad	Luustiku kaal %-des	Linnud	Luustiku kaal %-des
Karihiir	8	Põialpoiss . . .	7
Koduhiir	8,5	Kodukana . . .	12
Küülik	9	Hani	13.5
Kass	11,5		
Koer (keskmise suurusega)	14		
Inimene	18		

Maismaaloomade kehaehitus.

Maismaaloomade kehaehituse paljud iseärasused leiavad endale loomuliku seletuse selles lihtsas mehhaanika seaduses, mis ütleb, et jäsemete töövõime on võrdeline nende pikkuse kolmanda astmega, aga töö nende juhtimiseks — neljanda astmega. Seepärast, mida jämedam on loom, seda lühemad on tema jäsemed — jalad, tiivad, tundlad. Pikki jäsemeid näeme ainult kõige väiksematel maismaaloomadel. Kõigile tuntud ämblikulaadne pikkjalg võib olla selliste pikajalaliste olendite näiteks. Mehhaanika seadused ei takista selliste vormide teket, kui nende mõõtmed on väga väikesed. Sellesarnase, ütleme, rebasesuuruse looma olemasolu oleks aga võimatu: jalad ei peaks keha raskusele vastu ja ei oleks võimelised liikuma. Ainult ookeanis, kus looma kehakaal on tasakaalustatud vee üleslükkega, võivad olelda taolised loomavormid; näiteks omab süvamere krabi makroheira poolemeetrise kehaläbimõõdu juures kolme meetri pikkusi jalgu.

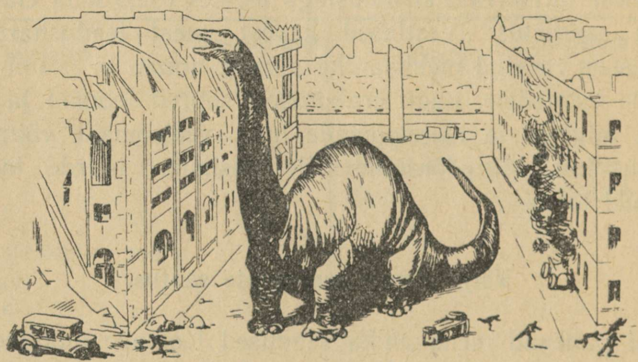
Sama seaduse mõju avaldub ka üksikute loomade arenemises. Täiskasvanud isendil on jäsemed alati lühemad kui lootel; keha kasv jõuab jäsemete kasvust ette, mille tõttu tekib sobiv vahekord lihaskonna ja edasiliikumiseks vajaliku töö vahel.

Nende huvitavate küsimustega tegeles esimesena Galilei. Oma raamatus „Vestlused kahest uuest teadusharust", milles on rajatud mehhaanika alused, annab ta ruumi sellistele teemadele, nagu erakordselt suured loomad ja taimed, hiiglase ja mereloomade luud, veeloomade võimalik suurus jms. Me pöördume selle küsimuse juurde tagasi peatüki lõpus.

Väljasurnud imeelukate saatus.

Nii panevad mehhaanika seadused loomade mõõtmetele teatava piiri. Suurendades looma absoluutset jõudu vähendab suur kasv kas tema liikuvust või tingib ta luustiku ja lihaste ülemäärase massiivsuse. Nii esimene kui ka teine asjaolu seab looma toiduhankimise suhtes ebasoodsatesse tingimustesse. Looma toidutarve suureneb koos kehamõõtmete suurenemisega, toiduhankimise võimalused aga vähenevad (vähenenud liikuvus). Alates looma teatavast suurusest ületab tema toidutarve lõpuks selle hankimise võimalused. Niisugune liik on määratud väljasuremisele. Ja me näemegi, kuidas eelmiste geoloogiliste ajastikkude hiiglaloomad tõepoolest kaovad üksteise järel eluareenilt. Looduses esinenud suuremõõtmeliste vormide kogu mitmekesisusest on meie päevini elanud ainult mõned vähesed. Suurimad olendid, näiteks hiiglaroomajad, ei osutunud eluvõimelisteks. Nende põhjuste hulgas, mis tingisid Maa ürgaja hiiglaste väljasuremise, oli ülaltoodud seadus üheks kõige tähtsamaks põhjuseks. Vaal ei saa arvesse tulla: ta elutseb vees, tema raskus on tasakaalustatud vee rõhumisega tema kehale ja kõik äsjaöeldu ei kehti tema kohta (vt. kümnenda peatüki päisvinjetti).

Võime esitada küsimuse: kui suured mõõtmed on organismi elule niivõrd ebasoodsad, miks siis evolutsioon ei läinud loomavormide vähenemise suunas? Põhjuseks on see, et suured vormid on väikestest siiski absoluut-



Joon. 85. Ürgsete geoloogiliste ajastikkude hiiglaloom praegusaegse linna tänaval.

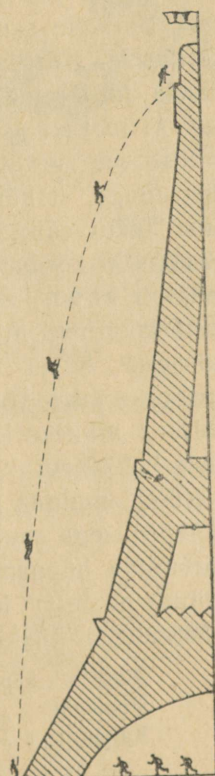
selt tugevamad, kuid suhteliselt neist nõrgemad. Pöördudes uuesti tagasi Gulliveri reisude tegelaste juurde me näeme, et ehkki hiiglasel on 12 korda raskem tõsta oma kätt kui Gulliveril, on hiiglase poolt tõstetav koormis siiski 1728 korda suurem; vähendades seda koormist 12 korda, s. t. tehes ta jõukohaseks hiiglase lihastele, saame siiski koormise, mis on 144 korda suurem Gulliverile jõukohasest koormisest. Nüüd on arusaadav, milline tähelepanuvääriv eelis on suurtel loomadel võitluses väiksemate loomade vastu. Kuid suur kasv, mis on kasulik võitluses vaenlaste vastu, seab looma ebasoodsatesse tingimustesse muus suhtes (toiduhankimine).

Kes hüppab paremini?

Paljusid paneb imestama kirbu hüppe kõrgus (kuni 40 cm), mis ületab üle saja korra ta keha kõrguse; tihti väljendatakse arvamust, et inimene võib võistelda kirbuga ainult siis, kui ta suudaks hüpata 1,7 m · 100, s. o. 170 m kõrgusele.

Arvutus mehhaanika põhjal taastab inimese reputatsiooni. Lihtsuse mõttes oletame, et kirbu keha on geomeetriliselt inimese keha sarnane. Kui kirp kaalub p kG ja hüppab h m kõrgusele, siis ta teeb igal hüppel tööd ph kGm. Inimene aga teeb hüppel PH kGm tööd, kui P on tema keha kaal ja H hüppe kõrgus (õigemini tema raskuskeskme tõusu kõrgus). Et inimene on kirbust umbes 300 korda kõrgem, siis võib tema kehakaaluks võtta $300^3\ p$ ja järelikult inimese töö hüppel võrdub $300^3\ pH$. See on suurem kirbu tööst

$$300^3 \cdot \frac{H}{h} \text{ korda.}$$



Joon. 86. Kui inimene hüppaks nii nagu kirp...

Inimese ja kirbu töövõime suhteks peame võtma 300^3 (vt. lk. 166). Seepärast on meil õigus nõuda inimeselt 300^3 korda suuremat energiakulu.

Kui aga

$$\frac{\text{inimese töö}}{\text{kirbu töö}} = 300^3,$$

siis peab kehtima võrdus

$$300^3 \cdot \frac{H}{h} = 300^3, \quad \text{millest } H = h.$$

Järelikult on hüpete sooritamise osavuses inimene võrdne kirbuga ka sel juhul, kui ta suudab tõsta oma keha raskuskeskme samale kõrgusele nagu kirp, s. o. 40 cm kõrgusele. Niisuguseid hüppeid me sooritame ilma pingutuseta ja järelikult me ei jää hüppamisosavuses kirbust sugugi maha.

Kui see arvutus ei näi küllaldaselt veenvana, siis meenutage, et hüpates 40 cm kõrgusele tõstab kirp ainult oma kaduv-väikest kaalu. Inimene aga tõstab 300^3, s. o. 27 000 000 korda suuremat raskust. Kakskümmend seitse miljonit kirpu, kes hüppavad üheaegselt, võiksid üheskoos tõsta koormise, mis on võrdne inimese kehakaaluga. Ainult niisugust hüpet — 27 000 000-lise kirpude armee ühishüpet — tuleb võrrelda ühe inimese hüppega. Ja siis on võrdlus inimese kasuks, sest inimene võib hüpata kõrgemale kui 40 cm.

Nüüd muutub arusaadavaks, miks looma mõõtmete vähenemisega suureneb tema hüpete relatiivne kõrgus. Kui kõrvutada hüppamiseks ühtviisi kohanenud (tagajäsemete ehituse poolest) loomade hüppeid nende loomade kehamõõtmetega, siis saame järgmised arvud:

Ritsikas	hüppab	30-kordse	kehapikkuse	kõrgusele
Hüpikhiir	„	15	„	„	„
Känguru	„	5	„	„	„

Kes lendab paremini?

Kui soovime õigesti võrrelda mitmesuguste loomade lennuvõimet, peame meeles pidama, et tiivalöögi mõju on tingitud õhutakistusest; viimane aga oleneb tiiva liigutuste võrdse kiiruse puhul selle pinna suurusest. Tiiva pind suureneb looma mõõtmete suurenemisel võrdeliselt joonsuurenemise t e i s e astmega, ülestõstetav koormis (kehakaal) aga suureneb võrdeliselt joonsuurenemise k o l m a n d a astmega. Seepärast suurenebki lendava looma mõõtmete suurenemisel koormus tiiva 1 cm^2-le. Hiiglastemaa kotkad („Gulliveri reisudes") pidid oma tiibade igal cm^2-l kandma 12-kordset koormust, võrreldes harilikkude kotkastega, ja olid muidugi palju halvemad lendajad kui liliputlaste maa miniatuursed kotkad, kellede koormus oli 12 korda väiksem normaalsest koormusest.

Joon. 87. Jaanalind Madagaskari väljasurnud raitlinnu (*Aepyornis*) luustiku kõrval. Vasakul on võrdluseks kana.

Üle minnes kujutletavatelt loomadelt tõeliste juurde toome järgmised arvulised andmed tiiva 1 cm^2-le tuleva koormuse kohta (sulgudes looma kaal):

P u t u k a d.

Kiil (0,9 G)	0,04 G
Kedrik (liblikas) (2 G)	0,1 „

L i n n u d.

Kaldapääsuke (20 G)	0,14 G
Pistrik (260 G)	0,38 „
Kotkas (5000 G)	0,63 „

Me näeme, et mida suurem on lendav loom, seda suurem koormus tuleb ta tiibade 1 cm^2 kohta. On selge, et linnu keha suurenemisel peab olema piir, mille ületamisel lind ei suuda end enam tiibade abil õhus hoida. Pole juhuslik, et kõige suurematel lindudel puudub lennuvõime. Sellised lindudemaailma hiiglased, nagu inimese-suurune kaasuar, jaanalind (2,5 m) või veel suurem Madagaskaril elanud väljasurnud raitlind (*Aepyornis*)* (5 m), pole võimelised lendama; küll aga lendasid nende kaugemad, mitte nii suured eellased, kes hiljem harjutuse vähesusel kaotasid selle võime ja said seega võimaluse oma kasvu suurendada.

Ohutu kukkumine.

Putukad võivad ohutult kukkuda selliselt kõrguselt, millelt meie ei riskiks alla hüpata. Püüdes pääseda jälitamisest heidavad mõned neist loomadest end kõrge puu okstelt alla ja kukuvad maa peale täiesti vigastamatult. Kuidas seda seletada?

Kui väikese mahuga keha põrkab kokku takistusega, siis lõpetavad keha kõik osakesed oma liikumise peaaegu korraga; seepärast keha ühed osad ei avaldagi rõhumist teistele. Teissugune on aga suure keha langemine: kui ta alumised osad lõpetavad põrkamisel oma liikumise, siis ülemised osad veel jätkavad liikumist ja avaldavad alumistele osadele suurt rõhumist. Selles seisnebki see „põrutus", mis on hävitav suurte loomade organismile. 1728 liliputlast, kukkudes puult hõreda vihmana, kannataksid vähe; kui aga need liliputlased kukuksid tiheda tombuna, siis ülemised muljuksid alumised puruks. Normaalse kasvuga inimene kujutab endast nagu 1728-st liliputlasest koosnevat tompu. Teine väikeste olendite ohutu kukkumise põhjus peitub nende kehaosade suures painduvuses. Mida õhem on varb või plaat, seda rohkem ta painduvb tungi mõjul. Putukas on oma joonmõõtmeilt sadasid kordi väiksem mõnest suurest imetajast; seepärast, nagu

* Uusimate uurimuste järgi elas see liik veel XVII sajandi algul.

näitavad tugevusõpetuse valemid, on nende kehaosade paindumine põrkel niisama palju kordi suurem. Meie aga teame juba, et kui põrke energia kulub sadasid kordi pikemal teel, siis on ka põrke hävitav toime niisama palju kordi nõrgem.

Miks puud ei kasva taevani.

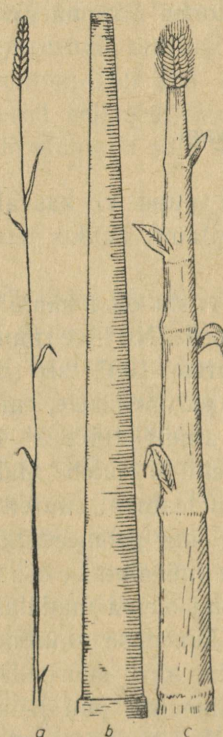
„Loodus on hoolitsenud selle eest, et puud ei kasvaks taevani," nii ütleb saksa vanasõna. Vaatame, kuidas teostub see „hoolitsus".

Kujutlegem puutüve, mis peab hästi vastu oma kaalule. Olgu ta joonmõõtmed suurenenud 100 korda Nii tüve ruumala kui ka kaal suurenevad seejuures 100^3, see on 1 000 000 korda. Tüve vastupidavus purunemisele, mis sõltub ta ristlõikest, suureneb aga ainult 100^2, s. o. 10 000 korda. Tüve ristlõike pinna 1 cm^2-le tuleb nüüd 100-kordne koormus. On selge, et kasvu teataval suurenemisel peab puu (kui ta ainult säilitab oma geomeetrilise kuju) ise oma raskuse mõjul purustama oma alumise osa *. Et mitte murduda, selleks peab kõrge puu olema madalast puust ebaproportsionaalselt jämedam. Jämeduse suurenemine suurendab aga muidugi puu kaalu, s. o. suurendab omakorda ka puu koormust alusele. Tähendab, puu jaoks peab olema niisugune kõrguse piir, mille ületamisel edasine kasv muutuks võimatuks ja puu murduks. Seepärast puud „ei kasva taevani".

Meid hämmastab õlekõrre erakordne tugevus. Näiteks rukki puhul on kõrre pikkus 1,5 m, jämedus aga ainult 3 mm. Ehituskunsti saledaim toode on vabrikukorsten, mille pikkus ulatub 140 m-ni, keskmine läbimõõt on aga 5,5 m. Ta kõrgus ületab jämeduse 26-kordselt, kuna rukkikõrrel

* Peale juhu, mil tüvi omab ülespoole peenenedes niinimetatud võrdse vastupanuga samba kuju.

on see suhe 500. Siin ei tohi aga siiski näha tõestust sellele, nagu oleksid looduse tooted mõõtmatult täiuslikumad inimese loomingust. Arvutus (mida me keerukuse tõttu siin ei esita) näitab, et kui loodusel tuleks luua 140 m pikkune tüvi ja see peaks ehituselt sarnanema rukkikõrrega, siis peaks selle tüve läbimõõt olema umbes 3 m: ainult sel juhul oleks sellel tüvel rukkivarre tugevus. See tulemus erineb vähe sellest, mis on saavutatud inimese tehnika poolt.



Joon. 88. Rukkikõrs (*a*), vabriku korsten (*b*) ja kujutletav 140 m pikkune vars (*c*).

Taimevormide ebaproportsionaalset jämenemist nende pikkuse suurenemisel võib jälgida rea näidete varal. Kui rukkikõrre pikkus ($1\frac{1}{2}$ m) ületab jämeduse 500-kordselt, siis bambusroo (30 m) puhul on see suhe 130, männi (40 m) puhul 42, eukalüpti (130 m) puhul 28.

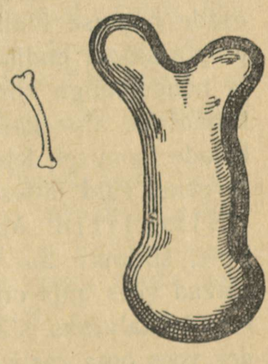
Galilei raamatust.

Raamatu selle osa lõpetame väljavõttega mehhaanika rajaja Galilei teosest „Vestlused kahest uuest teadusharust".

„S a l v i a t i. Me näeme selgesti, et mitte ainult kunstil, vaid ka loodusel endal on võimatu piiramatult suurendada oma toodete mõõtmeid. Nii on võimatu ehitada hiiglalaevu, -paleesid, -templeid, millede aerud, mastid, talad, raudkinnitised, ühe sõnaga, kõik osad oleksid täiesti vastupidavad. Teiselt poolt ei suuda isegi loodus luua ülemäära suuri puid, sest nende oksad murduksid oma erakordselt suure raskuse tõttu. Täpselt samuti ei saa kujutleda inimese, hobuse või mõne teise elusolendi liiga suurt luustikku, mis suudaks vastu pidada ja vastaks oma ülesandele. Erakordse suuruse võiksid loomad saavutada ainult sel juhul, kui aine, millest koosnevad nende luud, oleks tavaliste luude ainest tunduvalt tugevam ja vastupidavam või kui luud muutuksid suurenedes proportsionaalselt jämedamaiks, mille tõttu loomad oma kehaehituse ja välimuse poolest näiksid erakordselt paksudena. Seda märkas oma terava pilguga juba luuletajagi (Ariosto oma eeposes „Raevutsev Roland"), kes hiiglast kirjeldades ütleb:

Tal hiiglakasv teeb jäsemed nii jämedateks,
Et välimuselt koletist ta meenutab.

Näitena öeldu kohta esitan ma teile joonise luust, mida on pikendatud ainult kolm korda, jämeduse poolest aga suurendatud sedavõrd, et ta võiks suuremale loomale olla niisama otstarbekas, nagu on väiksem luu väikesele loomale. Te näete, kui ebaproportsionaalselt jäme näib niisugune suurendatud luu. Siit on selge, et see, kes sooviks väga suures hiiglases säilitada inimese kehaliikmete hariliku proportsiooni, peaks leidma luude ehituseks mõne muu sobivama ja tugevama aine või peaks leppima sellega, et suur keha oleks väiksema tugevusega kui hariliku inimese keha: mõõtmete erakordse suurenemise tagajärjeks oleks see, et keha surutaks kokku ja purustataks omaenese raskuse poolt. Ümberpöördult, me näeme, et vähendades kehade mõõt-



Joon. 89. Jäme luu võiks olla niisama otstarbekas suurele loomale, nagu on väike luu kolm korda väiksemale loomale.

meid me ei vähenda samas proportsioonis kehade vastupidavust; väiksemate kehade vastupidavus suhteliselt koguni suureneb; ma arvan, et väike koer võib oma seljal kanda kaht või kolme endataolist koera, kuna hobune saaks vaevalt oma seljal kanda teist endasuurust hobust.

Simplitio. Mul on küllalt põhjust kahelda teie poolt öeldu õigsuses: nimelt esinevad suured kehamõõtmed kaladel, näiteks vaal * on suuruselt, kui ma ei eksi, võrdne kümne elevandiga, aga ometi püsib tema keha koos.

Salviati. Teie kahtlus, sinjoore Simplitio, paneb mind meenutama veel üht algul minu poolt kõrvalejäetud tingimust, mille puhul hiiglased ja muud hiiglasuured olendid võivad elada ja liikuda mitte halvemini kui väikesed loomad. Selle asemel et suurendada jämedust ja tugevust luudel ning teistel kehaosadel, mille ülesandeks on nii nende eneste kui ka teiste nende külge kinnitatud kehaosade raskuse ülalhoidmine, võib, jättes luude ehituse ja proportsiooni endiseks, tunduvalt vähendada luude eneste ja nende külge kinnitatud ning nende poolt ülalhoitavate kehaosade aine kaalu. Seda viisi ongi loodus kasutanud kalade loomisel, tehes nende luud ja kehaosad mitte ainult kergeks, vaid jättes need koguni kaaluta.

Simplitio. Ma näen hästi, mille poole kaldub teie kõne, sinjoore Salviati. Teie tahate öelda, et kuna kalad elavad vees, mis oma raskuse tõttu teeb temasse asetatud kehad kaalutuks, siis aine, millest koosnevad kalad, kaotades vees oma raskuse, võib koos püsida luid koormamata. Sellest aga ei piisa mulle, sest kuigi oletada, et **kalade luud pole keha poolt koormatud**, omab nende luude eneste aine muidugi kaalu. Kes siis võib väita, et vaala roie, tubli palgi suurune, on ilma kaaluta ega lähe vees põhja. Teie teooria põhjal ei saaks selliseid suuri kehasid, nagu on vaalal, üldse olelda.

---

* Galilei ajal arvati vaal kalade hulka. Tegelikult on aga vaal imetaja, kes hingab kopsudega; seda õpetlikum on tõik, et vaal on veeloom.

S a l v i a t i. Et paremini vastata teie väiteile, selleks esitan teile algul küsimuse: kas olete kunagi näinud vaikses ja liikumatus vees kalu, kes ei lasku põhja, ei tõuse veepinnale ega tee mingeid liigutusi.

S i m p l i t i o. See on kõigile tuntud nähtus.

S a l v i a t i. Kui aga kalad võivad viibida vees ilma vähimagi liigutuseta, siis see on vaieldamatuks tõestuseks, et kogu nende keha maht võrdub oma erikaalult veega; et nende kehades on olemas veest raskemaid osi, siis tuleb paratamatult järeldada, et on olemas ka veest kergemaid osi, mis loovad tasakaalu. Et luud on raskemad, siis liha ja mõned teised elundid peavad olema veest kergemad, ja need oma kergusega võtavadki luudelt nende kaalu. Niisiis on vees kehtiv olukord vastupidine sellele, mida me näeme maismaaloomadel: kuna viimastel luud peavad kandma niihästi iseenda kui ka liha raskust, hoiab liha veeloomadel ülal mitte ainult iseenda, vaid ka luude raskust. Seepärast pole siis midagi imetaolist selles, et hiiglaloomad võivad küll elada vees, mitte aga maismaal, s. o. õhus.

S a g r e d o. Sinjoore Simplitio arutlused, tema poolt ülestõstetud küsimus ja vastus sellele meeldisid mulle väga. Ma järeldan sellest, et kui üks neist hiiglakaladest kaldale tõmmata, siis ta ei saaks kuigi kaua elada, sest ühendus luude vahel katkeb ja keha hävib" *.

* Vt. sellest Perelmani raamatus „Füüsika igal sammul" — „Miks vaalad elavad meres".

SISUKORD.

Vastutav toimetaja H. Marran.
Keeleline toimetaja E. Uuspõld.
Tehniline toimetaja H. Kohu.

Ladumisele antud 31. VIII 1950. Trükkimisele antud 15. XII 1950. Trükiarv 3 500. Paber 54×84, 1/16. Trükipoognaid 11,5. Formaadile 60×92 kohaldatud trükipoognaid 9,43. Arvutuspoognaid 7,98. MB-10074. Trükikoda „Hans Heidemann", Tartu, Vallikraavi 4. Tellimise nr. 2506.

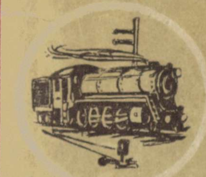
Hind rbl. 4.40

ru

Rbl. 4.40

J. I. PERELMAN — HUVITAV MEHHAANIKA

J. I. PERELMAN




Huvitav MEHHAANIKA



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS