

EESTI PÕLLUMAJANDUSE AKADEEMIA

A.REINTAM

PÕLLUTÖÖMASINATE TEOORIA  
JA  
TEHNOLOOGILISE ARVUTUSE  
ALUSED

①

ÜLDISI KÜSIMUSI JA  
TEATMEMATERJALE

TARTU 1970



EESTI PÕLLUMAJANDUSE AKADEEMIA  
PÕLLUTÖÖMASINATE KATEEDER

A.REINTAM

PÕLLUTÖÖMASINATE TEORIA  
JA  
TEHNOLOOGILISE ARVUTUSE  
ALUSED

①

ÜLDISI KÜSIMUSI JA  
TEATMEMATERJALE



Tartu Ülikooli Raamatukogu  
ARHIIVKOGU

TARTU 1970

Эстонская сельскохозяйственная академия  
Кафедра сельскохозяйственных машин  
г. Тарту, ул. Рийа, 12  
А. Рейнтам

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

I

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
На эстонском языке

Tartu Ülikooli Raamatukogu  
ARHIIVKOGU

## S A A T E K S

"Ühiskonnateadustes nõuame üliõpilastelt suure hulga algallikate läbilugemist, eriainetes piirdume konspektliku õpikuga. Õpikult nõuame kindlat vastavust programmile; kas antud alal teadus rohkem ka ütleb, sellest ei teki üliõpilasel mingit ettekujutust. Kas ei võiks õpikut asendada pisut ulatuslikum käsiraamat, mis aitaks ka praktikul oma teadmisi värskendada? Pisut ulatuslikuma käsiraamatuga töötades õpiks üliõpilane oma programmi abil paremini orienteeruma, mida on tarvis meeles pidada, millest tuleb ainult aru saada. Praktikule aga oleks sellisest raamatust kaugelt rohkem kasu ja vististi ei nõuaks sellised raamatud ka igal aastal uustrükki." See TRÜ teadusala prorektori J. Tammeoru poolt avaldatud (vt. "Kuidas koolitada paremat spetsialisti". Aja-  
leht "Edasi", 13. mail 1969. a.) mõte on olnud käesoleva sarja - "Põllutöömasinate teooria ja tehnoloogilise arvutuse alused" - koostamise oluliseks tõukejõuks. Nimetatud sari on esimeseks sellealaseks eestikeelseks väljaandeks. See koosneb kümnest üksikosast (-vihikust), millest igaüks kannab alapealkirja vastavalt käsitletavate masinate liigile:

- I. Üldisi küsimusi ja teatmematerjale
- II. Mullaharimismasinad
- III. Külvi- ja väetamismasinad
- IV. Heina ja silo koristamise masinad
- V. Teravilja koristamise masinad
- VI. Teravilja koristusjärgse töötlemise masinad
- VII. Kartuli ja söödajuurvilja koristamise masinad
- VIII. Lina koristamise ja töötlemise masinad
- IX. Taimekaitsemasinad
- X. Põllutöömasinate automatiseerimine.

Et nimetatud sarja koostamisel on juhitud kõrgemate põllumajanduslike õppeasutuste inseneriteaduskondade õppeprogrammist aines "Põllutöomasinad", siis on see mõeldud kasutamiseks õppevahendina põllumajanduse mehhaniseerimise ala üliõpilastele, eeskätt aga kaugõppe- ja õhtuse osakonna vastava ala üliõpilastele. Materjali esitamise laadi kujundamisel on aga arvestatud ka neid, kes iseseisvalt soovivad tundma õppida põllutöomasinate loomise teoreetilisi aluseid.

Sarja koostamisel kasutatud kirjandus on toodud iga osa kohta eraldi vastava vihiku lõpus, kusjuures selle esitamise järjekord viitab üksikute allikate tähtsusele.

Nõudlikule lugejale võib tunduda, et nii mõnegi selles sarjas puudutatud küsimuse käsitus on vahest liiga primitiivne. Olgu märgitud, et koostaja ei olegi võtnud eesmärgiks esitada sügavalt teaduslikke seisukohti. Seda seepärast, et enne küsimuste sügavalt teadusliku käsitlusega tutvumist peab lugeja antud ala vastu tervikuna huvi tundma. Niisiis on käesoleva sarja üheks põhiliseks eesmärgiks üliõpilastes huvi äratamine põllutöomasinates toimivate protsesside vastu, ilma milleta pole mõeldav tehniliselt täiuslike ja töövõimeliste masinate loomine. On muidugi arusaadav, et sarja kõikides üksikosades esitatud küsimuste teoreetilise käsitluse ning sadade võrrandite päheõppimine ja meelespidamine on võimatu. Ja kui keegi seda püüakski teha, siis on see isegi viga. Sest pole ju üliõpilane "anum, mida on tarvis täita teadmistega", vaid "tõrvik, mida on tarvis süüdata. On selge, et tõrvik ei hakka põlema, kui puudub kütus ... Kasvatuse üks tähtsamaid ülesandeid seisneb selles, et õpetada inimesi mõtlema" (akadeemik A. D. Aleksandrov). Seega - edaspidi esitatavat materjali ei tule mitte pähe õppida, küll aga tuleb seda mõista ja sellest aru saada. Sellel eesmärgil on kõik teoreetilised tuletused püütud anda võimalikult üksikasjaliselt ja samm-sammult.

Niisiis, kokkuvõtteks: põllutöomasinate teooria ja tehnoloogilise arvutuse aluste tundmaõppimise eesmärgiks on mõistmine, aga mitte arvude ja valemite meeldejätmise.

Käesolevas osas antakse ülevaade põllutöomasinate teooria ja tehnoloogilise arvutuse tähtsusest ning olemusest, selle ajaloolisest arenemisest ja akadeemik V. P. Gorjatskini

kui põllutöömasinate loomise teoreetiliste aluste väljatöötaja ajaloolisest pärandist. Tema väljapaistvad tööd on olnud peamisteks allikateks ka põllumajandusliku mehhaanika aluste ja materjalide töötlemisprotsesside käsitlemisel. Viimase osana on ära toodud katseandmetel põhinev teatmematerjal, mis on vajalik põllutöömasinate projekteerimise käigus. Nimetatud andmed on kogutud väga paljudest kirjanduslikest allikatest (kirjanduse loetelusse pole neid lülitatud), kusjuures tühjad kohad tabelites viitavad sellele, et koostajal pole õnnestunud neid andmeid leida. Loodame kõikide lugejate kaasabile nende tühimikkude jooksvaks likvideerimiseks. Samuti võtame tänuga vastu kõik arvamused ja märkused koostatava sarja "Põllutöömasinate teooria ja tehnoloogilised alused" nii sisu kui ka materjali esitamise laadi kohta.

## S I S U K O R D

1. PÖLLUTÖÖMASINATE TEORIA JA TEHNOLOOGILISE ARVUTUSE	
AINE .....	8
1.1. Põllutöömasinate töötamistingimuste spetsiifilised iseärasused .....	8
1.2. Põllutöömasinate loomise põhietapid ja teooria ning tehnoloogilise arvutuse osatähtsus selles ..	11
1.3. Uurimistöö meetodid. Põllutöömasinate teooria ja tehnoloogiline arvutus induktiivse teadusliku uurimismeetodi komponendina .....	13
1.4. Põllutöömasinate teooria olemus, tähtsus, eesmärk ja ülesanded .....	18
1.5. Põllutöömasinate teooria ajaloolisest arenemisest	22
1.6. V. P. Gorjatškin - põllutöömasinate loomise teo- reetiliste aluste rajaja .....	27
2. PÖLLUMAJANDUSLIKU MEHHAANIKA ALUSED .....	37
2.1. Protsesside üldskeem .....	37
2.1.1. Protsessi peamised elemendid ja nende hinnang..	37
2.1.2. Integraalkõver - normaalselt kulgeva protsessi seaduspärasus .....	42
2.2. Põllutöömasinate masside ja kiiruste valik ning masina veotakistuse muutumise üldine seaduspära- sus .....	46
3. PÖLLUMAJANDUSLIKUD MATERJALID JA NENDE TÖÖTLEMIS- PROTSESSID .....	52
3.1. Põhimõisteid materjalidest ja nende omadustest ..	52
3.2. Materjalide mehhaanikalised mudelid ja reoologi- lised võrrandid. Relaksatsioon .....	55
3.3. Muld põllumajandusliku materjalina .....	65
3.3.1. Muld kui uurimisobjekt .....	65

3.3.2. Muld kui materjal .....	66
3.3.3. Muld kui taimede kasvukeskkond .....	74
3.3.4. Muld kui liikumistee .....	79
3.4. Materjalide töötlemisprotsesside mehhaanika ja lõök .....	81
3.5. Materjalide purustamise teooriast .....	85
3.5.1. Purustamise protsessi iseloomustus .....	85
3.5.2. Pingeolukord ja pingering .....	87
3.6. Puistematerjalide voolamise seaduspärasused .....	92
3.6.1. Puistematerjalide punkrist väljavoolamise protsess .....	92
3.6.2. Puistematerjali vertikaalsetes torudes ja punkrites liikumise diferentsiaalvõrrand ...	95
3.6.3. Puistematerjali hüdraulilise voolamise diferentsiaalvõrrand .....	99
4. PÖLLUTÖÖMASINATE UNIVERSAALSETE SÕIMEDE TEOORIA JA TEHNOLOOGILINE ARVUTUS .....	102
4.1. Vertikaalsete punkrite tehnoloogiline arvutus tingimusel $dQ/dz = 0$ .....	102
4.2. Šarniirse nelilülikmehhanismi analüütiline arvutus .....	104
4.3. Traktori rippseadme tehnoloogiline arvutus .....	108
4.3.1. Hüdrauliline rippüsteem, selle osad ja nende tüübid .....	108
4.3.2. Rippseadme kinemaatika ja parameetrite valik .....	112
4.4. Rataste teooria ja tehnoloogiline arvutus .....	123
4.4.1. Ratta veeremise protsess .....	123
4.4.2. Põhiseos ratta konstruktiivsete parameet- rite määramiseks .....	130
4.4.3. Ratta veerehõõrdetegur ja veeretakistus ..	134
5. TEATMEMATERJALE .....	140
5.1. Mahu- ja erikaalud .....	140
5.2. Dünaamilised hõõrdetegurid .....	145
5.3. Põllumajanduslike materjalide osakeste geomeetri- lised mõtted ja hõljumiskiirused .....	150
5.4. Põllumajanduslike kultuuride keskmised külvis- normid .....	152
5.5. Põhi- ja kõrvalsaakide kaalulised suhted .....	153
K i r j a n d u s .....	154

# 1. PÖLLUTÖÖMASINATE TEOORIA JA TEHNOLOOGILISE ARVUTUSE AINE

## 1.1. Põllutöömasinate töötamistingimuste spetsiifilised iseärasused

Põllutöömasinad väljendavad kõige eredamalt insenerlike teadmiste rakendamist põllumajanduses. Insener põllutöömasinate alal peab arvestama, et põllumajandusliku ja tööstusliku tootmise vahel on terve rida olulisi erinevusi. Üheks kõige tähtsamaks erinevuseks on see, et põllutöömasinad töötlevad looduslike materjale, mistõttu alati peame silmas pidama bioloogilist faktorit. Selle faktori praktiline arvestamine on leidnud oma väljenduse agrotehnilistes nõuetes, mis esitatakse ühe või teise tööoperatsiooni täitmisele. Nii siis on agrotehnika primaarne, masin aga kui selle täitja - sekundaarne. Et agrotehnilised nõuded töötatakse välja vastavalt töödeldava materjali bioloogilistele iseärasustele, siis pole ka agrotehnika muutumatu sisuga mõiste. Agrotehniliste võtete muutmine dikteerib järelikult muutusi põllutöömasinate konstruktsioonis ja tema töö tehnoloogias. Muutuda võivad mitte ainult agrotehnilised nõuded, vaid ka valmistoodangu kvaliteedi näitarvud.

Teiseks oluliseks iseärasuseks on, et põllumajanduslikud tootmisprotsessid jagunevad oma füüsilise olemuse poolest kahte gruppi - mobiilseteks ja statsionaarseteks. Mobiilseteks tootmisprotsessideks nimetatakse niisuguseid, kus tehnoloogiline tööoperatsioon teostatakse masinate (nii töö- kui ka jõumasina) edasilikumisel. Siia kuuluvad mis tahes liiki põllutööd ning transporttööd. Statsionaarsed tööprotsessid teostatakse masinate paigal seis-

tes. Niisuguste hulka kuuluvad saagi töötlemise ning hoidla-  
tesse paigutamise operatsioonid, aga ka osa loomakasvatussaa-  
duste tootmise operatsioonid (näiteks lüpsmine). Mobiilseid  
tootmisprotsesse iseloomustab ka see, et masinate töötamiseks  
vajalik energiaallikas tuleb viia tehnoloogilise operatsiooni  
toimumise kohale, statsionaarsete protsesside korral aga  
viiakse töödeldav produkt tööoperatsiooni teostamise kohale.  
Sellest tulenevalt on mobiilsete tootmisprotsesside mehha-  
niseerimine tunduvalt keerukam. Seda tingivad ka kuus järgmist  
iseärasust.

Valdavalt enamikku põllutöid iseloomustab nende s e-  
s o o n s u s, kusjuures suure ja kvaliteetse saagi tagami-  
seks peavad üksikud operatsioonid olema teostatud võimalikult  
l ü h i k e s t e p e r i o o d i d e jooksul. Seetõttu  
on masinate koormamine ajaliselt suhteliselt väike, s. t. et  
ühte liiki masin töötab aastas normaalselt kõigest 10...20  
päeva.

Edasi, tööde sesoonsus ja nende tegemise väga lühike  
periood, aga ka põllutöömasinate eriliikide a r v u k u s  
toob kaasa veel ühe iseärasuse - põllutöömasinatel töötava-  
tel töölistel on m a d a l k v a l i f i k a t s i o o n.  
Seda väidet tuleb ilmselt selgitada. Oletame, et traktoristi-  
le kinnistati uus traktor, millega ta töötab kuni selle kasu-  
tamiskõlbmatuks muutumiseni (näiteks 6...8 aastat). Ühe aasta  
vältel tuleb tal aga traktorile taha haakida (või riputada)  
väga paljusid erinevat liiki (rääkimata eritüüpidest!) põllu-  
töömasinaid - alates adrast ja lõpetades kartulivõtmismasina-  
ga. Niisuguses olukorras on täiesti loomulik, et traktorist  
on kõrgesti kvalifitseeritud spetsialist oma traktori tund-  
mises, kuid tema teadmised põllutöömasinate alal on pealis-  
kaudsed. Veel enam, on üsna loogiline, et see puudus säilib  
ja isegi süveneb niikaua kuni põllumajanduses pole küllaldast  
spetsialiseerumist. Tõsi, mõningane spetsialiseerumine on juba  
olemas traktorite võimsuste erinevuse (veojõuklassid) näol.

Oluliseks iseärasuseks põllumajanduslikus tootmises on  
ka masinate t ö ö t a m i s t i n g i m u s t e v ä g a  
l a i d i a p a s o o n. Selle asemel, et seista kindlal  
alusel kinnises ruumis, peavad mobiilsed põllutöömasinad töö-

tama ebatasasel põllul, poris, liivas, tolmus, kividel, kusjuures ka meteoroloogilised tingimused (temperatuur, niiskus jms.) muutuvad laiades piirides. Töötamistingimused on muutuvad mitte ainult ajas vaid ka ruumis - ka ühel ja samal põllul on mullastikutingimused erinevad; ka ühel ja samal päeval on meteoroloogilised tingimused muutlikud, põhjustades ka mulla füüsikalise-mehaanikaliste omaduste muutumise.

Niisiis, töötamistingimusi kui kompleksset mõistet ise loomustavad väga paljud üksteisest sõltumatult muutuvad tegurid, mis üksikult võttes kujutavad endast j u h u s l i k k e s u u r u s i. Niisuguste juhuslike suuruste kogumina peabki käsitlema põllutöömashinate poolt töödeldavat materjali (muld, terad jne.). See asjaolu on kõikide eespool nimetatud spetsiifiliste iseärasuste matemaatiliseks üldistuseks, mis muudab põllutöömashinates toimivate protsesside teoreetilise kirjeldamise ja masinate konstrueerimise äärmiselt komplitseerituks (vt. ka p. 1.2.).

Ülalnimetatud iseärasused nõuavad, et põllutöömashin peab olema:

- 1) lihtsalt käsitav,
- 2) universaalse konstruktsiooniga,
- 3) vastupidav ja
- 4) odav.

Esimene nõue tuleneb nendega töötavate tööliste madalast kvalifikatsioonist, teine - töötamistingimuste laialt diapsoonist, kolmas - rasketest töötamistingimustest ja neljas kasutamise perioodilisusest ning lühiajalisusest. Põllutöömashina odavuse tagab valmistamise lihtne tehnoloogia ja odavate materjalide kasutamine. Masin peab odav olema ka selle moraalse vananemise ohu tõttu - põllutöömashinate konstruktsioonide pidev täiustamine toob kaasa uute täiuslikumate masinate ilmumise, mistõttu endine, kuigi tehniliselt töökorras masin, lülitatakse eksploatatsioonist välja.

Nagu eelnevast nähtub, sisaldavad loetletud nõuded vastuoksusi. Inseneride ülesandeks ongi neist kuldsete keskteele leidmine, mis on võimalik masinas toimivate protsesside kompleksse optimeerimisega. See aga omakorda on mõeldav ainult nende protsesside teoreetilise uurimise, analüüsimise ja kirjeldamise alusel.

## 1.2. Põllutöomasina loomise põhietapid ja teooria ning tehnoloogilise arvutuse osatähtsus selles

Mis tahes teaduse ja teadusliku uurimistöö eesmärgiks on tõe leidmine. See protsess toimub järg-järgult, pikkamööda ja pidevalt, sest iga probleem koosneb paljudest küsimustest, iga küsimus aga sisaldab osakese tõest. Küsimuse, aga järelikult ka probleemi ammendatus sõltub sellest, kuidas me oleme ta püstitanud, missugustest vaatekohtadest oleme lähtunud ja missuguseid oletusi oleme seejuures teinud. Seetõttu, kasutades mingeid teisi lähtepunkte ja eeldusi, võime ühele ja samale probleemile või küsimusele saada ka mõnevõrra erineva vastuse. Seega kujutab küsimuse lahend endast osakest suhtelisest tõest, mis peegeldab inimkonna teadmisi antud valdkonnas. Teaduse ja tehnika arenguga täienevad võimalused tunnetada ühe või teise probleemi olemust sügavamalt, mistõttu tuntud suhteline tõde kuulub täiustamisele. Nii toimub suhtelise tõe pidev arenguprotsess ja absoluutse tõe leidmine on kujuteldav vaid tunnetusprotsessi lõpmatusena. Teaduse ja tehnika tormilise arengu tõttu ei saa me kunagi öelda, misugune on teaduslik tõde homme.

Dialektilise materialismi kursusest teame, et mis tahes suhtelise tõe kujundamine toimub elava kaemuse (tunnetamise, vaatlemise), abstraktse mõtlemise ja praktikas kontrollimise kaudu. Niisamasuguseid põhietappe läbib ka põllutöomasina loomise või täiustamise protsess, koosnedes järgmistest alaeappidest:

- 1) loodava või täiustatava masina tehnoloogilise funktsiooni ja masinale esitatavate agrotehniliste nõuete täpne kirjeldamine;
- 2) masina töötamise põhimõttelise skeemi visandamine;
- 3) masina töötamise tehnoloogilise ja arvutusskeemi väljatöötamine;
- 4) tehnoloogilise arvutuse tegemine;
- 5) tugevusarvutuse tegemine koos detailide dimensioneerimisega ja kujundamisega;
- 6) tööjooniste valmistamine;

7) katseeksemplari valmistamine ja

8) katsetamine reaalses töötamistingimustes.

Loetletud küsimuste lahendamisega lõpeb esimene tsükkel masina konstrueerimisel. Edasi hakkab kõik suuremal või vähe-  
mal määral korduma, kuid nüüd juba "kõrgemal tasemel". Katse-  
tamise käigus kogutud vaatlusandmed ja registreeritud para-  
meetrid analüüsitakse, tehakse vajalikud täiendavad arvutused,  
vajaduse korral muudetakse masina konstruktsiooni, valmista-  
takse täiustatud eksemplar ja jällegi katsetatakse. Niisugu-  
ne täiustamise protsess kulgeb, piltlikult öeldes, mööda spi-  
raali, kusjuures spiraali ühele keerule vastab tsükkel ühest  
katsetamisest teiseni. On ilmne, et selliste tsüklite koguarv,  
kuni masina masstoodangusse andmiseni, sõltub kõikide üksik-  
etappide ja -küsimuste lahendamise põhjalikkusest, sügavusest  
ja täpsusest. Peab märkima, et kõige lihtsam on likvideerida  
möödalaskmisi ja ebatäpsusi tugevusarvutuses, kõige raskem  
aga tehnoloogilise arvutuse käigus tehtud vigade parandamine.  
Seetõttu peatume tehnoloogilise arvutuse olemusel ja ülesanne-  
tel pisut pikemalt.

Põllutöömasina (aga ka mis tahes teise masina) puhul on  
põhiliseks nõudeks sellele masinale esitatud tehnoloogilise  
funktsiooni nõuetekohane (kvaliteetne) täitmine antud tööta-  
mistingimustes, võimaldades ühtlasi peamiste tehnoloogiliste  
parameetrite reguleerimist soovitud piirides. Nii näiteks on  
adra tehnoloogiliseks funktsiooniks künniviilu pööramine koos  
selle samaaegse kobestamisega. Adra töötamistingimused sõltu-  
vad mullastikulistest iseärasustest (savine, liivane, liivsavi-,  
saviliiv-, mustmuld; mulla tihedus, niiskus), põllu kivisu-  
sust ja umbrohtumusest, aga ka põllu tehnoloogilisest seisun-  
dist (tüüstik, kesa, sööt, jäätmaa). Adra reguleeritavaks teh-  
noloogiliseks parameetriks on künnisügavus.

Masina tehnoloogilise funktsiooni täitjateks on tema töö-  
organid, tehnoloogiliste parameetrite muutmine aga tagatakse  
vastavate reguleerimismehhanismide poolt. Tööorganite ja regu-  
leerimismehhanismide kujundamine ning nende põhimõõtmete (näi-  
teks adra hõlma kuju ja põhimõõtmed; mehhanismide lülide oma-  
vaheline asetus ja mõõtmed) ning töörežiimi põhiliste para-  
meetrite (näiteks adra edasiliikumiskiirus sõltuvalt hõlma

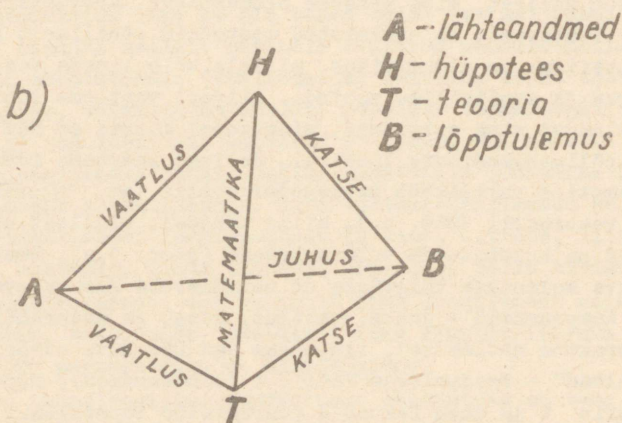
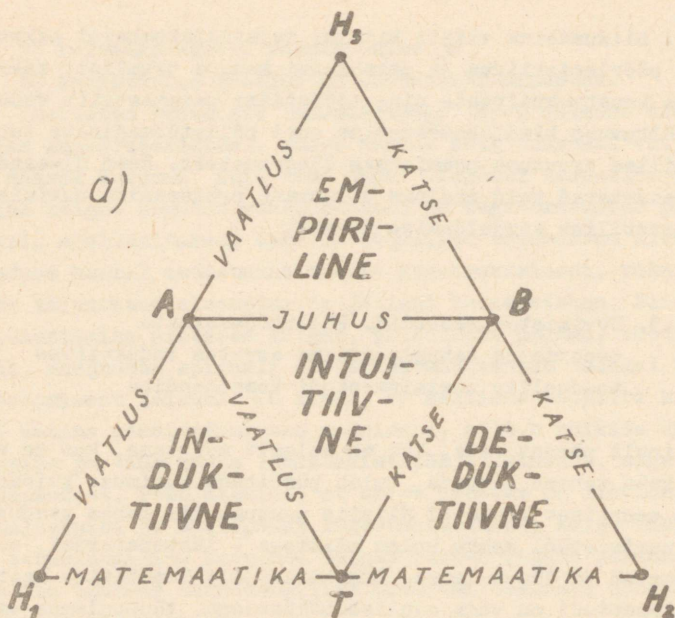
kujust; niidumasina vikati kiirus; teraviljakombaini peksu-  
trumli pöörlemiskiirus ja peksukorvi kaugus trumlist) määra-  
mine ja konstruktiivsete ning töörežiimi parameetrite vahe-  
lise sõltuvuse kindlaksmääramine ongi põllutöomasinate teh-  
noloogilise arvutuse peamisteks ülesanneteks. Need ülesanded  
on lahendatavad vaid masinas toimuvate protsesside uurimise  
ja teoreetilise kirjeldamise alusel.

### 1.3. Uurimistöö meetodid. Põllutöomasinate teooria ja tehnoloogiline arvutus induktiivse teadusliku uurimismeetodi komponendina

Ainult pärast seda, kui me selgelt mõistame, kus me asu-  
me ja kuhu tahame sattuda, tuleb püstitada küsimus: kuidas  
läbida eesseev teelõik? Niisiis puutume mis tahes teadus-  
likul uurimistööl kokku kolme mõistega - lähtematerjal, uuri-  
mise meetod ja lõpptulemus. Lähtematerjali kasutamise meetod  
(uurimismeetod) on väga olulise tähtsusega, lõpptulemus aga  
sõltub sellest, mida tehakse olemasoleva lähtematerjaliga.

Teatavasti on uurimistöö meetodeid põhiliselt kaks -  
induktiivne ja deduktiivne, millele võib lisada veel intui-  
tiivse ja empiirilise meetodi. Allpool vaatleme lühidalt nen-  
de olemust ning selgitame, missugusel määral on nad kasutata-  
vad põllutöomasinate loomisel. Selleks kasutame füüsik E.  
Bliamptise uurimistöö tetraeedermudelit (vt. "Noorte HÄäl",  
22. veebruaril 1969. a.), mille kohaselt ülalloeletatud mee-  
todid on kujutatavad kolmnurkadena (joon. 1,a). Meetodit ku-  
jutava kolmnurga külgedeks on uurimistöös kasutatavad etapid  
või komponendid - juhus, vaatlus, katse ja matemaatika (s. t.  
abstraktne mõtlemine), tippudeks aga üksikute etappide "pii-  
ritulbad" - teadaolevad faktid A (lähteandmed), hüpotees H,  
teooria T ja uued faktid B (uurimistöö lõpptulemus). Jättes  
kolmnurga ABT paigale ning pöörates selle kolme külje ümber  
üles teised kolmnurgad, saamegi uurimistöö tetraeedermudeli  
(joon. 1,b).

Nagu selgub jooniselt 1,a, iseloomustavad empiirilist  
meetodit juhus, vaatlus ja katse. Samad komponendid on oma-



Joon. 1. Uurimistöö meetodid ja tetraeedrimudel.

sed ka intuiitiivsele meetodile. Erinevus seisneb aga selles, et empiirilise meetodi korral püstitatakse vaatluse põhjal hüpotees  $H_3$ , mida kontrollitakse katsetega; intuiitiivse meetodi puhul aga töötatakse vaatlusandmete põhjal välja teooria  $T$ , mida kontrollitakse katseliselt. Et ühiseks küljeks on neil juhul, siis pole nende meetodite kasutamisel välditud ka täieliku ebaõnnestumise võimalus.

Kuigi empiirilisel ja intuiitiivsel meetodil on ühised komponendid, on nende kasutamisevõimalused täiesti vastandlikud - empiirilist meetodit kasutavad algajad uurijad, intuiitiivset saavad kasutada aga vaid geeniused. Sest ainult geenius oskaks vaatlusandmete najal üles ehitada täieliku teooria ja seejärel saada eksperimentaalselt kontrollitud uued faktid  $B$ . Empiirilise meetodi puhul mängivad olulist osa kogemuslikud teadmised, mis teatavasti talletuvad meeleorganiite abil.

Ülaltoodu põhjal võib väita, et nii empiirilist kui ka intuiitiivset meetodit võib vaid tinglikult nimetada teaduslikuks.

Induktiivset ja deduktiivset meetodit iseloomustavaiks komponentideks on vaatlus, katse ja matemaatika. Erinevuseks on aga nende etappide läbimise järjekord. Deduktiivse meetodi korral on uurimise teeks  $AH_2B$ , s. t. et kogutakse suur hulk vaatlusandmeid, mille matemaatilise läbitöötlemise järel püstitatakse hüpotees (tehakse järeldus), viimast kontrollitakse katseliselt. Selle meetodi puuduseks on asjaolu, et vaatlusandmete kogujal peab olema küllaltki kõrge intuitsioon (lõik  $AT$  piirneb intuiitiivse meetodiga). Ainult sel juhul võib deduktiivne meetod vilja kanda. Vastasel juhul aga eksisteerib alati võimalus, et kogutakse väga palju mittevajalikke (mitteolulisi) andmeid, vajalike ja oluliste andmete hulk aga osutub puudulikuks.

Induktiivse meetodi korral on uurimise teeks  $AH_1TB$ . See tähendab, et vaatluste põhjal püstitatakse hüpotees  $H_1$ , mille matemaatilise uurimise põhjal töötatakse välja probleemi teoreetilised alused  $T$ . Alles seejärel organiseeritakse eksperimentaalne kontroll, mis on lõpptulemuse  $B$  kui suhtelise tõe kriteeriumiks.

Loomulikult on vaadeldud meetodite geomeetriline kujutamine idealiseeritud, sest uurimisteed kulgevad mööda tetraeedri servi ja tippu. Tegelikult on uurimisteed kujutletavad ka mööda tahke ja isegi läbi tetraeedri sisemuse. Üks on aga selge - induktiivne meetod on kõige sügavamalt teaduslik; süstemaatiline lähenemisviis mööda uurimisteed AHTB on alati võimalik ja enamikus uurimistöodes on see osutunud edukaks.

Vaadeldes nüüd uurimismeetodeid põllutöomasina loomise seisukohalt, võime öelda järgmist.

Empiiriline meetod, baseerudes vaatluse (elava kaemuse) põhjal organiseeritud eksperimendil, ei võimalda tungida asjade olemusse, sest inimese kõrgeim tunnetusvorm - abstraktsed loogiline mõtlemine - leiab siin vaid minimaalset konkreetset rakendamist. Empiiriline meetod oli peamiseks meetodiks põllutöomasinate arengu algperioodil, mil tegemist oli lihtsate ja primitiivsete tööriistadega. Selle meetodi kasutamist tingis ka tolelaegse teaduse madal arengutase. Põllutöomasinate kasutamise sesoonsus ja lühiajalisus aga lükkasid järgmise uurimistsükli ikka ja jälle edasi ühe aasta võrra. See kõik põhjustas uurimistöode madala efektiivsuse ja lõpptulemuseks oli põllutöomasinate väga aeglane areng. Järelikult ei vasta empiiriline meetod enam kaasaja teaduse ja tehnika tormilisele arenemisele ja on seetõttu kasutatav vaid erandjuhtudel, üksikute mitteoluliste täiustuste tegemisel. Ja lõpuks, empiirilist meetodit iseloomustab kokkuvõtlikult järgmine ütlus: "... kui teaduslikud teadmised oleksid lihtsalt katsetulemuste kokkuvõtted, muutuks teadus varsti niisama selgusetuks ja raskestimõistetavaks kui loodus, millest ta lähtub" (J. Bernal). Saadud teadmiste rakendamiseks ja uute ammutamiseks tuleb nad intensiivse mõttetöö viljana üksteisega seostada (vt. deduktiivne meetod).

Intuitiivne meetod, nagu eespool selgus, on erandlik nähtus ja seetõttu ei saa seda pidada kuigi kindlaks. Loomulikult on ajaloos esinenud (ja esineb ka edaspidi) üksikuid fenomene, kes ka mõningaid põllutöomasinate alaseid küsimusi on lahendanud nimetatud meetodil. Kuid üldiselt pole see mõeldav, eriti kaasaja ühtlustunud haridusliku taseme tingimustes.

Deduktiivset meetodit, mille aluseks on tohtu hulk vaatlus- ja katseandmeid, võib iseloomustada prantsuse füüsiku ja filosoofi H. Poincare'i ütlusega, et faktide kogu sarnaneb teadusega niisama palju kui kivihunnik majaga. Katse ja vaatluse kaudu saadud materjalist tõelise teadushoone loomiseks läheb vaja mitmekülgset mõttetööd. Deduktiivse meetodi korral on selleks mõttetööks andmete matemaatiline läbitöötamine ja üldistamine. See meetod on ainuõige juhuslike protsesside uurimisel, mille aluseks on statistiline materjal. Arvestades seda, et põllutöömásináte töötámistíngímusi iseloomustab üksikute tegurite muutumise juhuslikkus, on see meetod ka põllutöömásináte loomisel olulise táhtsusega. Kuid tulemuseks peab olema mitte ainult masina konstrueerimine, vaid ka selle masina töötámisprotsesside teoreetiliste aluste loomine. Seda seepárást, et deduktiivse meetodi tee láheb üle hüpoteesi  $H_2$  (joon. 1,a). Hüpotees on aga suures osas oletus, mida tuleb muuta usaldusväärsemaks. Vastasel juhul, s. t. teooriasse kaldumata, formuleeritakse küll hüpotees ja tehakse eksperiment, kuid lõpptulemusena ei tõestata ega saada mitte midagi. Seetõttu pole mitte midagi imelikku, kui deduktiivse uurimismeetodi abil loodud põllutöömásinále luuakse teooria tagantjärele. See on vajalik selleks, et masina edasisel táiustámisel anda uurijale võimalus õigesti ja loogiliselt mõelda, et varustada teda analüüsimaterjalidega. Põllutöömásináte loomisel on deduktiivne meetod olnud suure táhtsusega hilisemas minevikus ja tal on küllalt suur osatáhtsus ka tänapáeval. Kuid teaduse ja tehnika kiire arengu tõttu on ta oma aja juba ára elanud. Seetõttu võib seda meetodit kaasajal nimetáda teaduslikuks ainult tingimisi.

Ainuõigeaks uurimisteeks tuleb pidada induktiivset meetodit. Táielikult kehtib see väide ka põllutöömásináte loomise kohta. Induktiivse meetodi tee  $AH_1TB$  (joon. 1,a) láhtub vajalike láhteandmete hulgast. Párást láhteandmete analüüsi ja hoolikaid vaatlusi pústitatakse vaatlusandmeid korrastav ja seletav hüpotees. Ja nüüd astub táie jõuga tegevusse matemaatika, tugevdades ja üldistades hüpoteesi. Sellise abstraktse loogilise mõtlemisprotsessi tulemusena valmib teooria T. "Minu arvates teadus sealt algabki, kus juba abstraktsioonidega

tegeldakse," on märkinud aradeemik H. Haberman. Teooria loomine on mõeldav ainult masina töötamisel toimuvate kõikide protsesside olemuse mõistmise ja nende teoreetilise kirjeldamise alusel. Teoreetilised alused aga võimaldavad juba teadlikult organiseerida ja juhtida eksperimenteerimise protsessi ja sellest saadud täiendavate faktide arvestamisel välja töötada meetodid ja võtted masina tehnoloogiliseks arvutuseks. Niisiis on põllutöömashinate teooria ja tehnoloogiline arvutus induktiivse kui ainuõige teadusliku uurimismeetodi vajalikuks ja möödapääsmatuks komponendiks, tema üheks oluliseks etapiks. Seejuures ei ole muidugi tähtsusetu ka uurija intuitsioon - erinevad uurijad jõuavad eesmärgile erineva tähenäosusega. Selge on aga, et on vaja usinust vaatlustel, sügavust ja põhjalikkust arutlusel ja täpsust ning objektiivsust katsetamisel. Selleks kõige on vaja teadmisi ja oskusi.

#### 1.4. Põllutöömashinate teooria olemus, tähtsus, eesmärk ja ülesanded

Kõige üldisemas mõttes kujutab põllutöömashin endast mehhaanilist süsteemi. Süsteem on aga üksikute elementide või objektide kogum, milles need elemendid on pidevas vastastikuselises sõltuvuses ja regulaarses koostöös antud ülesande täitmise eesmärgil. Põllutöömashina poolt töödeldavaks materjaliks on elava looduse üks või teine esinemisvorm. Järelikult on masinasse suubuv materjal juhuslikult muutuvate omaduseliste parameetritega. Masina töö tulemusel peab aga sellest väljume valmis- või pooltoode, mille omaduselised parameetrid on meile poolt ette antud. Nii näiteks suubub kartulikombaini muldamass koos umbrohu, kivide, mugulate ja pealsetega. Missuguse osa sellest massist moodustab üks või teine komponent, on üldjuhul teadmata. Veel enam, igal komponendil on oma eripärased omadused ja tunnused. Kartulikombaini töö tulemusena aga tahame kätte saada kõik mugulad, soovitatav isegi sorteerituna mitmesse suuruseklassi, mida me oleme võimelised eelnevalt ette määrama. Niisiis peab põllutöömashin muutma juhusliku sisendmaterjali meile soovitud tunnustega väljundproduk-

tiks. See on väga keeruline ja komplitseeritud ülesanne, mille lahendamiseks ei piisa elavast kaemusest kui igasuguse tunnetuse alusest. Kaemus, vaatlus ja kogemus ükski ei võimalda tungida asjade ja nähtuste olemusse. "Inimliku kogemuse peab töötleva ja üldistama inimese kõrgeim tunnetusvorm - abstraktselt loogiline mõtlemine" (A. Koppel. Meetod füüsikas. "Horisont" nr. 7, 1968.). Niiviisi on sündinudki põllutöömashinate teooria. Loomulikult ei rahuldu kaasaja nõuded teooriaga, mis vaid üldistab kogemust, vaid on nõudnud ka uute meetodite kasutuselevõtmist. "Ürginimlik uudishimu ja tõetsimise tarve koos praktilise vajadusega sünnitasidki teaduse meetodi" (A. Koppel). Nii on kujunenud põllutöömashinate teooria kui teadus, mis ühelt poolt töötleb ja üldistab sajandite vältel kogutud kogemusi ja teadmisi, teiselt poolt aga töötab välja uusi tunnetusmeetodeid ja rakendab neid. Seejuures tugineb ta peaaegu kõikidele teoreetilistele teadustele (füüsika, keemia, matemaatika, mehhanika, tõenäosusteooria jms.) ja rakendab neid ühe konkreetse probleemi lahendamiseks. Samal ajal peab igal momendil arvestama ka bioloogilist tegurit kui elu alust looduses. Niisiis on põllutöömashinate teooria teoreetiliste teaduste keerukas kompleks, tema eesmärk aga on rakenduslik - olemasolevate mashinate täiustamine ja uute loomine. Põllutöömashinate teooria kui teaduse rakendusliku osa moodustavad mashinate tehnoloogilise arvutuse alused, mis kujutavad endast üldise teooria konkretiseeringut. Niisugune konkretiseering nõuab aga, et teooria oleks võimalikult üldine ja täpne. Viimane omakorda eeldab, et mõistetakse kõiki looduses ja mashina töö käigus esinevaid nähtusi ja protsesse. Ja mitte ainult eeldab mõistmist, vaid nõuab ka nende nähtuste ja protsesside teoreetilist kirjeldamist. Seetõttu on põllutöömashinate teooria kursuse tundmaõppimise põhieesmärgiks arusaamine, mõistmine ja abstraktselt mõtlemise arendamine. Võiksime seda formuleerida ka deviisidega: "arvutuste eesmärgiks on mõistmine, aga mitte arvud" ja "enne kui lahendada ülesanne, mõtle, mida teha selle lahendiga" (R. W. Hamming).

Olgu märgitud, et väga sageli tavatsetakse väita, et põllutöömashinaid ei ole konstrueeritud ega konstrueerita teooria alusel, et põllutöömashinate loomine on vaid katseline protsess.

Kui ka lugeja on sellisel arvamusel, siis soovitame veelkord tähelepanelikult läbi lugeda ja läbi mõtelda eelmine punkt.

Põllutöomasinate teooria ja tehnoloogilise arvutuse aluste väljatöötamine on samasugune nagu iga teine sügavamaid teadmisi nõudev ülesanne. Seetõttu võib selle üles ehitada USA Stanfordini ülikooli professori G. Polya poolt soovitatud skeemi kohaselt (G. Polya. Kuidas lahendada ülesannet. Kirjastus "Valgus". Tallinn, 1967.). Selle skeemi kohaselt jaguneb ülesande lahendamise protsess nelja etappi.

Esiteks, ülesandest arusaamine. Selleks tuleb endale esitada järgmised küsimused. Mis on otsitavaks? Mis on antud? Milles seisnevad ülesande tingimused? Kas tingimused on piisavad? Või on nad vastuolulised? Pärast nende küsimustele vastuse leidmist, tuleb koostada arvutusskeem ning püüda tingimusi üles kirjutada.

Teiseks, on tarvis koostada lahendusplaani. Kõigepealt püüdke selgusele jõuda, kas olete näinud samasugust ülesannet või sellele analoogilist? Vaadeldge otsitavat ja püüdke meenutada tuntud ülesannet, milles oli samasugune otsitav. Kui teate niisugust, analüüsige ja võrrelge seda lahendamisele kuuluvaga. Võib-olla saab kasutada selle lahendamise meetodit? Selleks peavad vastavad protsessid olema sarnased, analoogilised. Kui te ühekorraga ei ole võimelised koostama antud ülesande lahendusplaani, pöörduge tagasi probleemi sõnastuse juurde ja püüdke koostada sellega seostatav, kuid jõukohasem ülesanne. Näiteks üldisema või erijuhu kohta. Kas otsitav on siis määratud? Kuidas ta muutub? Kas ei teki ilmne vastuolu loogikaga või reaalse protsessiga? Kui mõttekääk on loogiline (kontrolliks esitage iga seisukoha kohta küsimus: mispärast? ja leidke vastus), täitke koostatud lahendusplaani.

Kolmandaks, lahendusplaani täitmine. Kontrollige seejuures iga sammu. Kas selle sammu õigsus on teile selgelt näha? Kas saate selle õigsust kontrollida? Või tõestada? Kas koostatav lahend sisaldab kõiki vajalikke tingimusi?

Neljandaks, uurige saadud lahendit. Kas lahend on üldine või kehtib ühel erandjuhul? Missugune see on? Kas saate kontrollida tulemust? Kas ei saaks lahendit lihtsamini leida?

Nagu selgub, on kõik need neli etappi üksteisega tihedalt läbiõimunud aktiivse loogilise mõtlemise protsess. Peab veel lisama, et ülesanne tuleb algusest lõpuni lahendada sümbolite (tähistuste) abil. Alles lahendi kontrollimiseks võime kasutada arve, sest nende abil on kergem orienteeruda tulemuse reaalsuses. Enne seda aga kontrollime lõpplahendit üksikute mõõtühikute kooskõlastatuse seisukohalt.

Lahend on reaalne, kui see sisaldab masina tööprotsessi mõjutavaid parameetreid (siinjuures on lahendina mõeldud võrrandit või võrratust). Põhilisteks parameetriteks on põllutöomasinal kolme liiki suurused: konstruktiivsed (geomeetrilised), töörežiimi (kinemaatilised) ja töötamistingimusi väljendavad parameetrid.

Põllutöomasinate korral on nendes toimivate protsesside komplitseeritusest tingituna paratamatu probleemi mõningane idealiseerimine, lihtsustamine. Uuritakse nähtuse mingit aspekti, külge või tingimust, mis kas laseb end eraldi võetuna kergemini uurida või oluliselt ei mõjuta ülesande lahendit. Igal juhul tuleb aga selles suhtes olla ettevaatlik, sest sel teel võivad kaotsi minna seosed kõrvalleheidetud aspekti ja tervikliku nähtuse vahel. Seepärast ei tohi lihtsustamisega rutata, s. t., võib teha seda alles siis, kui üldlahendi (võrrandi) kuju muutub ülearu kohmakaks või kui me ei oska seda enam üldkujul edasi arendada.

Põllutöomasinate teooria korral esineb paratamatu nähtena üksikute parameetrite muutumise erinev suund. Niisugune nähe väljendab vastuolulisust nende parameetrite vahel. Ja seegi on loomulik, sest ka reaalsel maailma ja loodust iseloomustavad vastuolud. Ilmekaks illustratsiooniks toome siinkohal matemaatikaõpetaja Blohmi juhise Verner Holtile (D. Noll. Werner Holti seiklused. II. "Eesti Raamat", Tallinn, 1968, lk. 269): "Tehke endale diferentsiaal selgeks! Kui te mõistate seda sügavat vastuolu, mis diferentsiaalvõrrandi olemuses peitub, siis hakkate te ka looduse olemust mõistma! ... Ajapikku te veendute, et kõiki põhilisi looduseadusi võib ainult diferentsiaalvõrranditega väljendada ..., olgu see siis elementaarosake, laine või kosmose struktuur: igasugune oluline seos on diferentsiaalvõrrandina formuleeritud." Selgemini on raske

õelda ja kinnitada diferentsiaalvõrrandite osatähtsust ka põllutöömasinate teoorias ning matemaatika (loe: teooria) osatähtsust põllutöömasinate loomisel.

### 1.5. Põllutöömasinate teooria ajaloolisest arenemisest

"Samal ajal kui inimene võib vahetult koondada oma mõistuse jõu, kinnitada kogu oma tähelepanu ühele mõttele, ei ole ta ilma tööriista abita võimaline koondama oma füüsilist jõudu ühele esemele, ühes punktis. Tööriist võimaldab inimesele rakendada oma jõudu suuruselt ja suunalt muudetud kujul vastavalt töö tingimustele.

Käed on lihtsamaks, kuid erakordselt universaalseteks tööriistadeks, millega loodus on inimese varustanud; kunstlikud tööriistad aga annavad inimesele võimaluse kasutada ka koduloomade jõudu, masinate abil aga ka elutu looduse jõudu...." Nii kirjutab V. P. Gorjatškin 1913. a. (vt. järgmine punkt). Ja edasi: "Inimesed tunnetasid, et primitiivse tööriista jämedakoelises, kõhvakas kujus peitub see, mis aitas tal vabaneda looduse sõltuvusest, ja inimene ümbritses tagasihoidliku tööriista sügava austuse ja pühaduse oreooliga... Adra mis tahes osa vargust loeti samaväärseks mõrvaga ..."

Esimeste põllutööriistade ilmumine on seotud perioodiga, millal inimene, läbinud jahipidamise ja karjakasvatavliku eluviisi, läks üle paiksele eluviisile. On loomulik, et esimesed primitiivsed põllutööriistad kujutasid endast mullaharimise riistu - terava otsaga ork, primitiivne puitlabidas, primitiivne kõblas ja maakirves. Need olid mullaharimise käsööriistad, mille töö tehnoloogilist protsessi iseloomustas perioodilisus: ork, kepp-oda ja labidas töötavad surve, kõblas ja maakirves aga löögi põhimõttel. Suurema tootlikkuse saavutamiseks asendus löökriist primitiivsete veetavate tööriistadega. Selleks hakati kasutama koduloomade jõudu, ja primitiivsest käsikõblast tekkivad otsaga kõverast oksast - sai alguse esimene algeline ader. Iidse adra kujutised pärinevad juba II aastatuhandest e. m. a. Sellest ajast on säili-

nud vana-egiplaste ja babüloomlaste loodud kujutised, joonised Põhja-Itaalia ja Egea-Rootsi kaljudel ning Vana-Hiinas. Adia leiutaja müütilisi nimesid on paljud kreeklastele Tripolemos egiptlastel Osiris, hispaanlastel Hatis, hiinlastel Ching-nuong.

Et ader on ajalooliselt vanim põllutööriist, siis on täiesti loomulik, et ka põllutöömasinate teooria areng on alguse saanud adrast. Kastatubandete vältel arendati ja täiustati adra põlvest põlve kantud kogemuste varal, kusjuures seda stimuleeris ka tootmis- ja kaubasuhete areng. Esialgu oli adral vaid üks ülesanne - mulla kobestamine -, kusjuures kobestamise kvaliteedile, - tehti ju seda tööd metsast põletatud alemaa kändude ja juurikate vahel-, ei olnud võimalik eriliselt nõudeid esitada. Küll aga oli vaja tõsta kobestamise töötootlikkust. Selle tagamiseks pöörati tähelepanu adra juhtimise vastupidavuse ja liikumise stabiilsuse küsimustele. Niisiis algas adra konstruktsiooni areng esialgu üldise ehituse skeemi muutumise ja täiustamise nool, aga mitte tööorgani konstruktsiooni arenguna. Alles hiljem, kui põlluks nimetati juba antud konkreetset maatükki, oli igal aastal ühelt ja samalt maatükilt saadavate saakide kindlustamiseks vaja parandada ka mulla kobestamise kvaliteeti. Nii sai uueks huviobjektiks adra tööorgan. Kui teritatud oks kujutas endast lihtsat kiilu, mis võimaldas mullaosakeste nihutamise peamiselt vertikaalsuhtes, siis nüüd tekkis vajadus mullaosakeste ruumiliseks ümberpaigutamiseks, s. t. tarvidus künnikihti pöörata ja kobestada. Niiviisi hakkas arenema hõlm kui adra tööorgani tööpinna peamine detail, millel peale mulla kobestamise on täita veel teine ülesanne - kamar ümber pöörata. Primitiivne hõlm kujutas endast adra liikumissuhte suhtes kaldu asetatud tasapinnalist serviti lauda, mida hiljem vooliti nõgusaks ja kaeti plekiga.

Niiviisi stimuleerisid inimõtte arengut praktilised vajadused. Ja kuigi me veel ei saa rääkida probleemide teoreetilise käsitlusest, näitas see siiski abstraktse mõtlemise osatähtsust ja väärtust põllutööriistade arengus.

Kuni 18. sajandi keskpaigani ei leitud ühtegi kirjaliku vihjet hea adra iseloomulikele tunnustele. Huvitav on mär-

kida, et suure tõuke adra arenguks ja täiustamiseks andis hispaanlase Joseph Locatelli nn. külviader, mida demonstree-  
riti 1636. a. Viinis ja mis oli varustatud lusikatega külvi-  
võlliga. Tõukeks oli ka reaskülvimasina ja rootoräkke leiu-  
tamine madalmaalase Ietro Tulli poolt 1730. a. ning esimese  
kännüriistade vabriku ehitamine šoti kellassepa James Smalli  
poolt Berkwickshire'is. Sellele järgnes 1752. a. Leipzigis  
ilmunud esimene teadaolev teoreetiline töö sakslase Hoffman-  
ni sulest: "Eine theoretische Betrachtung des Pfluges. Ver-  
hältnis der Zuglinie zu den arbeitenden Teilen". Eriti suur  
tähtsus oli inglase Bailey 1795. a. kirjutatud ja New-Castle'is  
trükitud teoreetilisel tööil "An essay on the construction of  
the plough deduced from mathematical principles and experi-  
ments", mida täie õigusega võib lugeda põllutöömashinate teoo-  
ria esiklapseks. Selles töös selgitas Bailey mullaharimise  
peamise ülesande ja adra põhiülesande - künniviilu pööramise  
põhimõtte. Sellest lähtudes konstrueeris ta hõlma väänatud  
viilu järgi. Selleks lõi ta taimejuurtega tihedalt läbi  
kasvanud kamarast ristkülikukujulise ristlõikega künniviilu,  
mille ühte otsa väänas selle algasendist  $135^{\circ}$  võrra, imiteeri-  
des niiviisi hõlma tegevust viilu pööramisel. Selliselt pöö-  
ratud viilu alumise tahu järgi ta ehitaski esimese vinthõlma.  
Niisuguse hõlma töö oli suunatud viilu väänamisele selle piki-  
telje ümber ja ta pööras viilu ilma küllaldase kobestamiseta.  
Bailey avalias seisukoha ka künniviilu paksuse ja laiuse va-  
nekorra kohta.

Seega on vinthõlm ajalooliselt vanim hõlma tüüp, olles  
tänapäevani kasutatav Inglismaal, kus kerged külmad vahelduvad  
soojade perioodidega ning selle tagajärjel toimub künniviilu  
loomulik murenemine.

Üheaegselt Bailey vinthõlmaga hakati soovitada ka teisi  
hõlmatüüpe. Põhja-Ameerika Ühendriikide president Jefferson  
soovitas hõlma tööpinnana kasutada hüperboolset paraboloidi  
(1797. a.), slaavlastel vennad Veverkad aga nn. rüchadlohõl-  
ma (1825. a.) ning itaallased Lawbruschini ja Ridolphi vindi  
pinda - helikoidi (1830. a.). Hüperboolne paraboloid tekib  
sirge liikumisel mööda kahte ruumis paiknevat sirget, jäädes  
samal ajal paralleelseks mingi tasapinnaga. Helikoid moodustub

sirge liikumisel mööda sellega risti asuvad horisontaalset liikumatut sirget, kusjuures liikuva sirge (moodustaja) kalde-nurk horisontaaltasapinna suhtes pidevalt suureneb. Sellise põhimõtte järgi kujundati nn. inglise hõlmad, kusjuures liikuva sirge asemel kasutati kõveraid (kumerusega küntud maa poole). Nn. ruchadlohõlm kujutas endast liikumissihiga nurga all asetatud silindripinda. Niisugune pind painutas künniviilu ümber tema pöiktelje, millega tagataksegi künniviilu intensiivne kobestamine. Samal ajal aga jääb viilu pööramine mitteküllaldaseks. Arvatakse, et nimetus "ruchadlo" tuleneb Vana-Poola sõnast "ruch" (liikumine), slaavi sõnadest "rušitj" (purustama), "ryč" (labidas) ja "rydlo" (spetsiaalse kujuga pind). Niisiis kujutab ruchadlohõlm endast silinderhõlma, mida esmakordselt nimetas 1831. a. poeet Jaroslav Langer ajakirjas "Tšehhoslav". Ruchadlohõlma täiustas ja töötas sellest välja nn. kultuurhõlma saksa lüksepp H. Eckert, kelle esimesed töökojad avati Berliinis 1845. a.

Eespool nimetatud Bailey teoreetilisel tööil oli sedavõrd suur tähtsus, et 1805. a. tõlgiti see ka saksa keelde ning ilmus Berliinis nimetusega "Der bestmögliche Pflug auf Erfahrung und mathematische Grundsätze gestützt". Edasi hakkas üha sagedamini ilmuma adra teooria alaseid töid. Nime-tame siinkohal mõningaid autoreid, märkides sulgudes tööde ilmumise aasta: austerlane Schuck (1809), sakslane Dombasle (1823), itaallane Lawbruschini (1832), sakslased Rau (1834) ja Engerth (1848), prantslane Sarazin (1853), sakslane Lauter (1854), prantslane Grandvoinet (1855, 1866 ja 1882), sakslased Segnitz (1855), Schneitler ja Andree (1861), Perels (1866), Braungart (1866 ja 1878), prantslased Casanova (1861) ja Mangon (1875), venelased Koroljov (1878) ja Zelinski (1885), prantslane Ringelmann (1892, 1894 ja 1895), sakslased Fritz (1883), Föppl (1893), Rezek (1896, 1897), Simony (1897), Gerstl (1897) ja Thallmayer (1897), venelane Tšebõšev (1897) ja prantslane Ledebure (1898). Alates 1898. a. võttis põllutöomasinate teooria küsimused põhjalikule uurimisele vene teadlane V. P. Gorjatškin, kelle tööd varjutasid kõikide tema kaasaegsete samalaadsed uurimused (üksikasjalikumalt vt. järgmises punktis).

Nagu ülaltoodud loetelust selgub, on põllutöomasinate (eeskätt atrade) teooria küsimustega möödunud sajandil eriti intensiivselt tegeldud Saksamaal. See on ka mõistetav, esiteks oli see tingitud Saksamaa keskest asendist Euroopas, ja teiseks, sel ajal toimus Saksamaal hoogne kapitalistlikest suhetest tulenev teaduse ja tehnika areng. Seetõttu kerkis seal esile terve rida ettevõtlikke praktilisi põllumehi ja oskustöölisi. Elukõige tuleb neist nimetada põllumeest ja seppa Rudolph Sacki, kellel on suuri teeneid eeliku ja kamara eraldiga kultuuradra väljatöötamisel. Juba 1863. a. avas R. Sack adraehituse töökojad Leipzgis.

Arvatavasti oli konkurentsil oma osa selles, et samal ajal (18.-19. sajandil) pöörati Inglismaal tähelepanu teistele põllutöomasinatele. Nii on teada, et šotlased James Cook, Andrew Meikle ja Patrick Bell leiutasid vastavalt külvimasina (1785), viljapekusmasina (1786) ja viljalõikamismasina (1826). Inglise Newbold aga valmistas esimese metalladra (1797), mille osade vahetatavuse väljatöötamise au kuulub tema kaasmaalasele James Woodile (1819). Inglise James Oliver esimesena valmistas karastatud tööpinnaga adra (1853) ning töötas välja adra töösügavuse regulaatori.

Mis puutub Ameerika Ühendriikidesse, siis iseloomustab seda laiahaardeline loov töö kõikide põllutöomasinate osas. Ameerika põllutöomasinate ehitamise ajalool ei ole niisugust takerdumist vanade vormide ja tootmisviiside külge nagu see üldiselt oli omane Euroopale. Uute tingimuste ja olukordade mõjutusel töötati välja põllutööriistade ja -masinate uued vormid, suure põhjalikkusega valiti materjalid ja toimusid intensiivsed otsingud uute tootmisviiside osas. Masinate uute vormidena ilmusid 1864. a. F. Davenporti istmega adrad, G. Moore ja W. Casaday asendasid 1876. a. kopeersuusa rattaga, 1844. a. ilmusid mitmehõlmalised Smithi adrad, Molini tehas kolmele rattale toetuvad istmega adrad. Viimastest arenesid edasi ka traktori jõul töötavad haakeadrad, mis esmakordselt võeti kasutusele Ameerikas 20. sajandi algul. Muide, ka rippmasinate (sealhulgas atrade) sünnimaaks on Ameerika Ühendriigid, kus ettevõtja G. Fergusonil poolt töötati välja kolmepunktiline rippseade traktorile.

## 1.6. V. P. Gorjatškin - põllutöömasinate loomise teoreetiliste aluste rajaja

Vaatamata suhteliselt arvukaile teaduslikele uurimistöödele atradest, oli põllutöömasinate projekteerimine kuni 19. sajandi lõpuni kõige primitiivsemal tasemel. Masinaid loodi kogemuste ja fantaasia alusel, ilma igasuguse insenerliku arvutusega. Masinate katsetamine seisnes vaid nende töötamise välises vaatluses, ilma teaduslik-tehnilisest vaatevinklist lähtumata. Kuigi põllutöömasinate alal töötas palju andekaid inimesi, oli nende tegevus kaugel teadusest. See aga põhjustas põllumajandusliku tehnika väga aeglase arengu ja selle tunduva mahajäämuse tööstuses kasutatavast. Esimesena püüdis sellist olukorda komplekselt muuta vene teadlane V. P. Gorjatškin, keda õigustatult loetakse põllumajanduslike masinate loomise teoreetiliste aluste rajajaks.

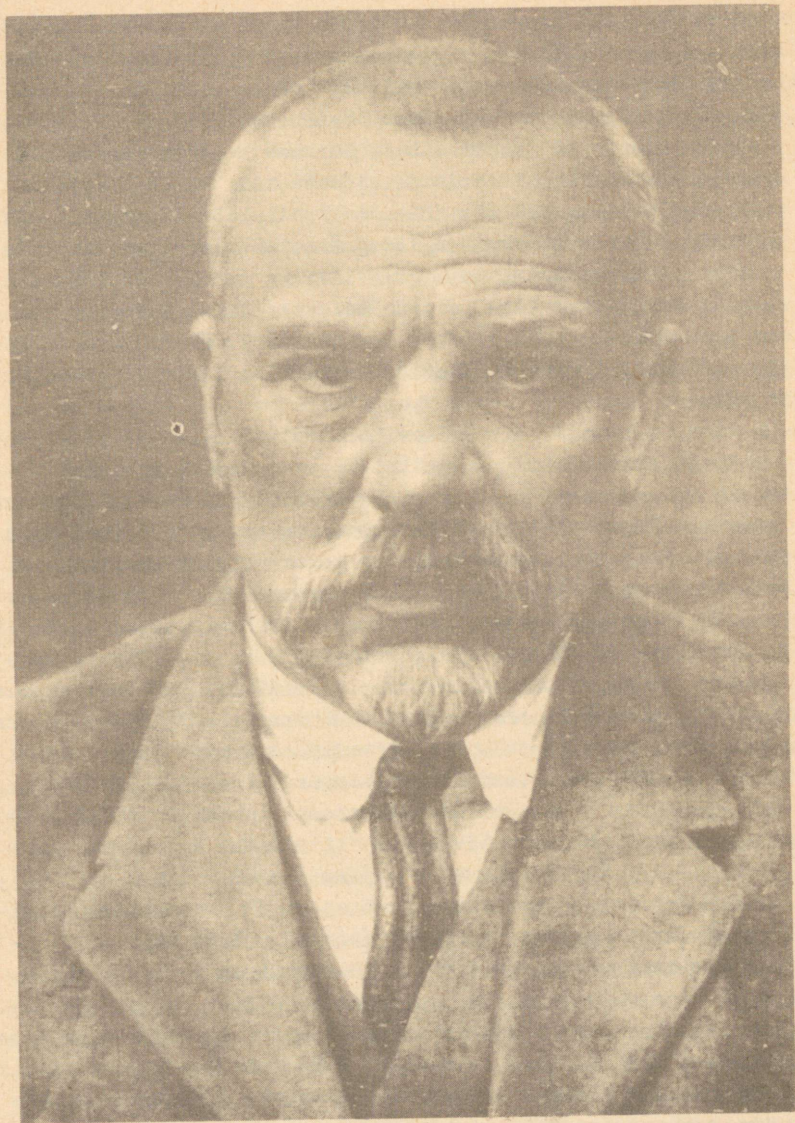
Vassili Prohhorovitš Gorjatškin sündis 29. (17.) jaanuaril 1868. a. mäetööstuse meistri perekonnas 11. lapsena. 1878. a. astus ta Moskva II gümnaasiumi, mille lõpetamise järel 1886. a. siirdus edasi õppima Moskva Ülikooli loodusteaduskonna füüsika-matemaatika osakonda. Pärast selle lõpetamist 1890. a. õppis ta mõned kuud Peterburi Tehnoloogia Instituudis, minnes seejärel üle Moskva Kõrgemasse Tehnikakooli, mille lõpetas 1894. a. Muide, V. P. Gorjatškini diplomitöös oli uuritavaks objektiks vedur. Huvi selle vastu tekkis ilmselt seetõttu, et tema isa ja vend töötasid pikka aega Moskvast Troitski raudtee töökodades.

1894. a., pärast tehnikakooli lõpetamist, tehti V. P. Gorjatškinile ettepanek asuda tööle Moskva Põllumajanduse Instituuti (hilisem Petrovski Põllumajanduse Akadeemia, nüüdne Moskva K. A. Timirjazevi nim. Põllumajanduse Akadeemia) ning lügeda kursust "Õpetus põllutöömasinatest ja riistadest ning mootoritest". Tulevane õpetlane võttis pakutud koha vastu, misjärel Maaviljeluse Departament (ministeerium) suunas ta kahele pikaajalisele komanderingule. Venemaa põllumajandusliku masinaehituse olukorraga tutvus V. P. Gorjatškin kuue kuu vältel; välismaal (Saksamaal ja Prantsusmaal) viibis ta aga üks aasta ja seitse kuud, tutvudes nii põllumajandusliku

masinaehituse kui ka masinakatsetusjaamade tööga ning kõrge-  
ma haridusega põllumajanduse spetsialistide ettevalmistamise  
organiseerimise küsimustega. Selle komandeeringu vältel veen-  
dus V. P. Gorjatškin selles, et ka Lääne-eesrindlikes riiki-  
des pole rajatud põllutöömasinate loomise ja katsetamise tea-  
duslikke aluseid. Tõsi, leidusid mõningad uurimused adrahõl-  
made geomeetria, lõikusmasinate nugade kinemaatika jms. alal.  
Kuid neile ei pööratud küllaldast tähelepanu ning need ei si-  
saldanud endas ka põllutöömasinate õpetuse tunnuseid. Kõrge-  
mates õppeasutustes antav õpetus põllutöömasinatest oli kir-  
jeldava masinaõpetuse iseloomuga. Selles puudusid teoreeti-  
liste teadmiste sugemed, mis on vajalikud masinate tehnolo-  
gilise protsessi ja nende ehitamise mehhaanika aluste mõist-  
miseks. Ei räägitud midagi masinate poolt teostatavate teh-  
noloogiliste protsesside olemusest ja seaduspärasustest. Jut-  
tu ei olnud ka masinate ja mehhanismide struktuurist, kine-  
maatikast, staatikast ja dünaamikast, mis kõik moodustavad  
masinate tööprotsesside teoreetilise aluse. V. P. Gorjatš-  
kin jõudis järeldusele, et niisugune kirjeldav masinaõpetus  
ei saa olla uute põllutöömasinate loomise ja olemasolevate  
täiustamise teaduslikuks aluseks. Seetõttu, pöördunud 1896. a.  
tagasi kodumaale ja asunud tööle Moskva Põllumajanduse Ins-  
tituudi põllutöömasinate õpetuse kateedrisse, seadis ta en-  
dale eesmärgiks suure ja tänuväärse töö - põllutöömasinate  
õpetuse teoreetiliste aluste väljatöötamise.

Kõigepealt oli vaja süstematiseerida olemasolevad and-  
med põllutöömasinatest, seejärel aga välja selgitada põhikü-  
simused üht või teist liiki masina tööprotsessi tundmaõppi-  
miseks, avada masinate mehhaanikaline olemus ja leida alused  
nende teooria ja tehnoloogilise arvutuse ülesehitamiseks. Vas-  
tavalt sellele võib V. P. Gorjatškini loomingulise tee jaota-  
da kolme põhietappi.

Esimene etapp hõlmab perioodi 1894...1905. a., mil V.  
P. Gorjatškin kogus andmeid põllutöömasinatest ja süstematiseeris neid. Andmeid sai ta loomingulistel komandeeringutel  
kodu- ja välismaal (1894...1896) ning põllutöömasinate ja  
-riistade näitustel Moskva Põllumajanduse Ühingu kuulus  
Butõrski talumajandis aastatel 1896, 1897, 1898, 1903, 1908,



Vassili Prohhorovič Gorjatškin  
29. (17.) I 1868. a. - 22. IX 1935. a.

1909 ja 1910. Alates 1897. a. võttis V. P. Gorjatškin aktiivselt osa nende näituste organiseerimisest ja eksponeeritava-te masinate katsetamisest. 1903. a. peale aga töötas ta näituse ekspertkomisjoni esimehena. Samal ajal alustas V. P. Gorjatškin tööd ka põllutöömasinate ehituse selgitamise alal füüsika ja mehhaanika põhiprintsiipide alusel. Nende uurimiste tulemused avaldas ta töös "Peajooni põllutöömasinatest", aga ka üliõpilastele ettekantud loengutes. Märkimist väärib eriti tema uurimus "Hõlm. Adra graafilisest teooriast" (1898. a.), mis oli kirjutatud väga paljude hõlmade profileerimisel kogutud katseandmete alusel. 1905. a. võttis V. P. Gorjatškin osa põllutöömasinate spetsialistide rahvusvahelisest kongressist Belgias.

Teisel etapil, mis hõlmas perioodi 1906...1916. a., pühendus V. P. Gorjatškin peamiselt eksperimentaalse uurimise meetodite täiustamisele ja teooria väljatöötamiseks vajalike katseandmete kogumisele. Seda perioodi iseloomustavad tema tööd põllutöömasinate katsetamise aruannete süstematiseerimise ja katseseadmete täiustamise ja loomise alal. Nii koostas ta atlase lõikusmasinate kohta, kirjutas väiksemahulised tööd "Viljapeksumasinad", "Teraviljakuiivadid" (1907. a.), "Tuuliksorteerid" (1908), "Dünaamiline käepide" (1908), "Mõõteriist reaskülvikute katsetamiseks" (1910), "Mõõteriistad" (1915), "Adra ajaloost" (1913...1916). Eraldi vajab märkimist tema originaalne töö "Niidumasinad, lõikusmasinad, isesidujad" (1910...1913. a.), mis atlasena kujutas endast olemasolevate lõikusmasinate konstruktsioonide süstematiseeritud kogumikku. Akadeemik V. A. Želigovski sõnade järgi (1968. a.) oli see "esimene omataoline ja kuni käesoleva ajani ei oma maailma tehniline kirjandus sellesarnast väljaannet". Tõuke nimetatud atlase koostamiseks andis 1910. a. Butõrski majandis korraldatud lõikusmasinate näitus. Kolme aasta pärast, s. o. 1913. a., organiseeris V. P. Gorjatškin oma kateedri juurde masinakatsetusjaama, mis sai tema teaduslikuks kooliks ja eksperimentaalsete uurimiste baasiks. Jaama kasutada oli 6 ha suurune maatükk, tema masinapark aga koos muuseumi eksponaatidega koosnes umbes 200-st kodu- ja välismaisest põllutöömasinast. Teiste hulgas töötas nimetatud jaamas ka praegune akadeemik

V. A. Želigovski. Samal 1913. a. anti V. P. Gorjatškinile professori kutse.

Iseloomulik on, et kõikides eespoolnimetatud töödes vaates V. P. Gorjatškin põllutöömasinaid senini hoopis tundmatust vaatevinklist. Seda väljendab kujukalt tema ettekanne põllutöömasinate ehitamise ja katsetamise põhiülesannetest, mis ilmus H. S. Ledentsovi nimelise katseliste teaduste ja nende praktilise kasutamise ühingu teaduslike tööde kogumikus 1913. a.: "... katseliste teaduste hulgas on ka niisugune nagu maaviljeluslik mehhaanika, mille sisu jääb paljudele selgusetuks; võimalik, et tuleb oodata ka küsimust, kas üldse arvestada maaviljelusliku mehhaanika kui teadusega, ja kas ei kujuta see oma sisult, nagu mõned arvavad, lihtsalt juhtivate firmade masinate koondkataloogi... Seepärast, eitamata küll põllutöömasinate ja riistade tohutut praktilist tähtsust, kalduvad paljud ikka vaatama põllutöömasinatele ja -riistadele kui liiga väikestele, analoogiliselt vaatele mitmesugustele koduse majapidamise seadmetele ja riistadele... Põllumajanduslik masinaehitus, olles praktikute käes, ei toetu teaduslikule pinnale. Seni ajani ei ole ühtki vene- ega võõrkeelset raamatut põllutöömasinate ja -riistade konstruktiivsete vormide ja arvutuse tundmaõppimiseks. Seetõttu on põllumajandusliku masinaehituse üldine tase väga madal ja jätab kurva mulje." Toodud väljavõtte põhjal on arusaadav, miks juba oma teadusliku tegevuse teisel aastakümnel avaldas V. P. Gorjatškin ka mitmed teoreetilised uurimused "Lõikusmasinate teooria" (1909. a.), "Peksutrumli teooria" (1910), "Inertsjõud ja nende tasakaalustamine" (1914), "Sarnasuse põhimõtte ja homogeensus" (1914). Peale selle ilmus tema sulest hulk töid, milles antakse meetodid põllutöömasinate kinemaatika, staatika ja dünaamika ülesannete lahendamiseks analüütilise mehhaanika ning mehhanismide ja masinate teooria põhivõrrandite ja -seaduste põhjal. Ereda joonena läbib kõiki põllutöömasinate-alaseid töid nõue, mille V. P. Gorjatškin formuleeris juba 1898. a.: "Mis tahes tööriista teooria peab vastuse andma kahele küsimusele: 1) missugune peab olema tööriista töötava osa kuju töö kvaliteedi kõige täiuslikumaks tagamiseks; 2) millised peavad olema tööriista koostisosade (töö-

tavate ja mittetöötavate) mõttmed ja asendid, et võimalikult väikese jõukuluga tagataks nende kõige mugavam juhtimine. Esimene osa teooriast on geomeetrilise ehk, õigemini, kinemaatilise iseloomuga... Teine osa teooriast - mehhaanikalise ehk, täpsemini, dünaamilise iseloomuga..."

V. P. Gorjatškini teene on ka see, et Venemaal kujunes uus eriala - põllutöömashinate insener. Nimelt oli Moskva Põllumajanduse Instituudis esialgselt kaks osakonda - agronoomia- ja inseneriosakond. Viimases valmistati ette hüdrotehniliste seadmete ning maade kuivendamise ja niisutamise ala spetsialiste. Selle osakonna baasil loodigi algul põllutöömashinate sektsioon, millest hiljem (1915. a.) kujundati omaette osakond nimetusega "põllumajandusliku masinaehituse osakond". Selle osakonna materiaalseks baasiks oli instituudi juures tegutsev masinakatsetusjaam koos oma tagasihoidlike töökodadega. Otsekohe pärast uue osakonna seaduslikku tunnustamist tekkis vajadus ka laiemal ja tugevama materiaal-tehnilise baasi järele. Seetõttu avaldas V. P. Gorjatškin koos professor V. R. Viljamsiga mõtte luua põllutöömashinate eksperimentaaltehas sama instituudi juurde. Ametlikult fikseeriti see seisukoht Instituudi Nõukogu istungi protokollis 18. oktoobril 1916. a. See sai teoks aga alles 1928. a., mil instituudi masinakatsetusjaamast moodustati Üleliiduline Põllumajandusliku Masinaõpetuse Teadusliku Uurimise Instituut (nüüdne ВИСОМ)

Kolmas etapp V. P. Gorjatškini loomingulises töös haarab perioodi aastast 1917 kuni tema surmani 1935. a. Seda perioodi iseloomustab viljakas tegevus põllutöömashinate teoreetiliste aluste väljatöötamise alal. Teetähiseks ja juhtivaks tööks kujunes seejuures tema kuulus uurimus, mis ilmus 1919. a. nimetuse all "Maaviljeluslik mehhaanika I", mille tiitellehel oli sulgudes selgitav pealkiri "Maaviljelusmasinate ja riistade teooria alused". (Vahemärkusena mainime, et tol ajal nimetati ka põllumajandust juhtivat ministeeriumi maaviljelusministeeriumiks.) See töö oli pöördepunktiks kogu põllutöömashinate õpetuse käsitlemisel. Esmakordselt oma arengu ajaloos said põllutöömashinad ja riistad sügava, igakülgse ja tõeliselt teadusliku analüüsi objektiks. V. P. Gorjatškini mehhaaniku- ja matemaatikutalent aitasid tal tunnetada ja avada iga

masina mehhaanilise olemuse, mida senini polnud mõistnud isegi need, kes ise tegelesid põllutöömashinade ja riistade loomise ning täiustamisega. Nii oligi sündinud uus teadus, mida V. P. Gorjatškin nimetas "Maaviljeluslikuks mehhaanikaks" ja mis ka kaasajal pole minetanud oma aktuaalsust ja fundamentaalsust. Ka V. P. Gorjatškin nägi seda ette, kirjutades: "Oma ülesannete külluse ja mitmekesisuse tõttu saab maaviljeluslik mehhaanika tulevikus kõige huvitavamaks mehhaanikaks paljude teiste oma kaasvendade seas." A. Dubrovski sõnade kohaselt "vaatleb V. P. Gorjatškin tema poolt loodud teadust vahendajana mehhaanika ja loodusteaduste vahel, nimetades seda elava ja elutu keha mehhaanikaks". Seetõttu on mõistetav, et Gorjatškin pidas täiesti lubamatuks et "insener-konstruktorid piirduksid tehnikute passiivse rolliga" (A. M. Kirjuhhiin).

"Maaviljeluslik mehhaanika" tõi V. P. Gorjatškinile kuulsust mitte ainult kodu-, vaid ka välismaal. 1919. a. määrati ta Moskva Põllumajanduse Akadeemia (enne Moskva Põllumajanduse Instituut) rektoriks, 1920. a. aga akadeemia "revolutsioonilise juhtkolmiku" liikmeks. Sellel kohal töötas ta kuni 1922. a., mil rektoriks sai professor V. R. Viljams. Samal ajal jätkas V. P. Gorjatškin intensiivset teaduslikku tegevust, rakendades maaviljelusliku mehhaanika põhimõtete rakendamist kõikide tema poolt uuritavate masinaliikide käsitlemisel. Nimetame vaid mõningaid neist: heinapressid (1923. a.), adra veotakistus (1924) peksutrummel (1924), adra teooria (1927), traktoriatrade veotakistus (1929), lõiketeeooria (1930), lõikeaparaadi nugade teooria (1932), põllutöömashinade ja riistade masside ja kiiruste teooria (1935), tasapinnalise nelilülikmehhanismi analüütiline arvutus (1935), löögiteooria põllutöömashinade ja riistade seisukohalt (1935) ja palju muud. Üksikasjaliku ülevaate kõigest annavad V. P. Gorjatškini "Teoste kogu", mis esmakordselt ilmus 7-köitelisena aastatel 1937... 1949. Teistkordselt anti need välja kolmeköitelisena 1955. a. tema õpilase B. D. Lutšinski toimetusel, mille teine trükk ilmus 1968. a. Paljud V. P. Gorjatškini tööd nägid trükivalgust alles pärast tema surma.

V. P. Gorjatškinil on suuri teeneid ka põllumajanduse mehhaniseerimise kui eriala väljakujundamisel. Eespool oli ju-

ba nimetatud, et tema initsiatiivil sai eluõiguse põllumajandusliku masinaehituse osakond Moskva Põllumajanduse Instituudi inseneriteaduskonnas (1915.a.). Sellest osakonnast kasvas hiljem välja kahe osakonnaga - melioratsiooni-hüdrotehnika ja maaviljeluse mehhaanika - inseneriteaduskond. 1928. a. moodustati maaviljeluse mehhaanika osakonnast eraldi teaduskond, nüüd juba K. A. Timirjasevi nimelises Moskva Põllumajanduse Akadeemias. Selle teaduskonna baasil organiseeriti 1930. a. Moskva Põllumajanduse Mehhaniseerimise ja Elektrifitseerimise Instituut, mis nüüd kannab uut nime - V. P. Gorjatškini nimeline Moskva Põllumajandusliku Tootmise Inseneride Instituut. Ei olnud sugugi juhuslik, et maaviljeluse mehhaanika kui tehniline teaduskond sündis agronoomilise kallakuga põllumajanduse akadeemias. Selles väljendus V. P. Gorjatškini poolt sageli toonitatud mõte - põllumajanduslike operatsioonide teostamine mehhaaniliste vahenditega peab juhinduma agronoomilistest kriteeriumidest ning maaviljelusliku mehhaanika arenemiseks on vajalik üheaegselt nii tehnilise kui ka agronoomilise mõtte koostöö. Kaasajal on maaviljeluslik mehhaanika kui teadus muutunud väga laiahaardeliseks ja võime teda kõhklematult nimetada "põllumajanduslikuks mehhaanikaks", mis on teadus mitte ainult põllutöomasinatest, vaid hõlmab mis tahes masinate (traktorid, loomakasvatusefarmide mehhaniseerimise masinad) ja põllumajanduslike materjalide vahelisi seoseid.

V. P. Gorjatškin oma kuulsa tööga "Maaviljeluslik mehhaanika" ei loonud mitte üksnes aluse õpetusele põllutöomasinatest, vaid tõestas ühtlasi ka seda, missugust sügavat, omapärast ja tõsist uurimisobjekti nad endast kujutavad ja missugust keerulist teaduslikku aparati (matemaatilises ja tehnilises mõttes) on vaja nende tundmaõppimiseks. "Maaviljeluslik mehhaanika" näitas ka mehhaanika ebapiisavust põllutöomasinate toimivate protsesside sügavaks teoreetiliseks kirjeldamiseks. Ja lõpuks sai selgeks, et "mitte põllumajanduslikud masinad ei ole primitiivsed, vaid primitiivsed on meie vaated neile kui mingile elementaarsele" (V. A. Želigovski).

Kõigest eelpooltoodust kokkuvõtet tehes näeme, et V. P. Gorjatškini teaduslik tegevus oli äärmiselt mitmekesine, läbimõeldult süsteemikindel, harvanähtavalt viljakas ja süga-

valt teaduslik. Ta jättis hindamatu pärandi maailma teaduse ja tehnika varasalve, mis on leidnud ka väärilist hindamist. Akadeemik V. R. Viljamsi tabava määrangu järgi oli enne V. P. Gorjatškinit eksisteerinud põllumajanduslik masinaõpetus "süsteemitu empirismi, fantaasia ja eklektismi valdkonnas". 1932. a. valiti V. P. Gorjatškin NSV Liidu Teaduste Akadeemia auliikmeks ja üleliidulise akadeemia *ВАСХНИЛ* tegevliikmeks. Vene NFSV teenelise teadlase aunimetus anti talle 1935. a.

V. P. Gorjatškini teaduslike tööde üldmaht moodustab üle 300 autoripoogna. Osa sellest nägi trükivalgust alles pärast tema surma. Akadeemik Vassili Prohhorovitš Gorjatškin suri 22. septembril 1935. a. kopsuvähki.

Omades ülevaate V. P. Gorjatškini teaduslikust tegevusest on küllaltki huvipakkuv vaadelda selle edu põhjusi. Kõigepealt märgime, et V. P. Gorjatškini õpetajaks ja suunanäitajaks oli väljapaistev vene teadlane ja mehhaanika koolkonna rajaja Nikolai Jegorovits Žukovski, tema silmapaistvamaiks õpilasteks aga akadeemikud I. I. Artobolevski, N. D. Lutšinski, V. A. Želigovski ja professor G. I. Bremer.

V. A. Želigovski iseloomustab V. P. Gorjatškinist järgmiselt.

V. P. Gorjatškini isamajas valitsesid "karmid ja ranged seadused, vähe oli soojust ja lahkust. See jättis teatud jälje tulevase teadlase iseloomule ja tekitas temas kuiva tooni inimeste poole pöördumisel. Kuid see väline kuivus ja karmus põimus temas erakorralise headuse ja heasoovlikkusega nende vastu, kelles ta märkas võimeid, huve ja püüdeid teadusele ja iseseisvale teaduslikule mõtlemisele. Samal ajal ei sallinud ta igasugust fantaseerimist, milleni laskuvad mitteküllaldaste teadmistega inimesed, kes küsimuse tundmaõppimise ja teadusliku uurimise asemel püstitavad mitte millelegi tuginevaid seisukohti. Igasugusesse küllalt põhjendatud oletusse suhtus ta aga suure huviga... Oma eitavat suhtumist millessegi või kellessegi väljendas ta lakooniliselt, tihti ainult ühe, kuid väga väljendusriikka ja iseloomustava fraasiga. Tema kriitilised märkused olid sageli väga ootamatud ja omapärased. Olles nõudlik teiste vastu, oli ta aga eriti nõudlik enda suhtes. See joon oli temasse istutatud isa ja ema pere-

kondades juurdunud range töömeeleolu poolt ...."

Akadeemik N. D. Lutšinski aga kirjutab: "V. P. Gorjatškin tegevuse edukust soodustas tema erakordselt suur isiklik mõju oma lähikondlastele. See tugines mitte ainult üldtunnustatud teaduslikule üleolekule, vaid ka tema ebatavaliselt tõhelepanelikule suhtumisele inimestesse, kellede ta kannatlikult ja püsivalt otsis seda parimat, mis neis oli ... Alati jälgis ta oma nooremate kaastöötajate tööd ja hoidmata kokku aega ning jõudu kuulas ja arutles nende, olgugi vähetähtsaid, teaduslikke ettekandeid. Selle tulemusena sai alati selgeks iga üksiku osa üldises töös ning igaüks tunnetas oma isiklike saavutuste õiglast ja heasoovlikku hinnangut..."

Professor G. I. Bremeri sõnade kohaselt "ei pretendeerinud V. P. Gorjatškin kunagi rohkemale kui olla spetsialist tehnilise distsipliini alal. Tema mõistuse üldistav jõud seisnes selles, et matemaatikat vaatles ta füüsiku pilguga, mehaanikale füüsikas vaatas ta kui insener, aga kogu teadust selle kompleksuses - nagu visa mõtleja, aga mitte kui kitsa tehnilise distsipliini spetsialist... Oma iseloomult ja suhtlemiselt inimestega oli ta üsna omapärane. Tema valimisest NSVL TA akadeemikuks said paljud tema lähikondlased teada alles nekroloogist ... V. P. Gorjatškin nõudis lakoönilisust teaduslikes töödes. Vastuväitele, et väljajäetud lõigud muudavad esitatu vähen arusaadavaks, vastas ta kunagi: "Kellel tarvis, see saab aru, aga kellel vaja pole - ongi hea, et ei mõista." Hämmastavad olid V. P. Gorjatškini suhted temale alluvate teaduslike töötajatega. Igaühele andis ta täieliku iseseisvuse, tema juhised olid pigem nõuanded. Pooleldi naljatoonis ütles ta kunagi liiga pealetükkivale inimesele: " T e a d u s o n n a g u m e r i . A l g a j a t u l e b h e i t a v e t t e . U j u b v ä l j a - õ p i b ä r a . U p u b . p o l e k a h j u ."

## 2. PÖLLUMAJANDUSLIKU MEHHAANIKA

### ALUSED

#### 2.1. Protsesside üldskeem

##### 2.1.1. Protsessi peamised elemendid ja nende linnang

Nagu juba eespool öeldud, on kõikidel looduses toimuvatel protsessidel juhulik loomus. Seejuures on lõpptulemist mõjutavaid tegureid või elemente väga palju, milledest antud nähtuse iseloomustamiseks tuleb eraldada olulised. Seega taandub mis tahes protsessi uurimine olemuse ja nähtumuse probleemile. Dialektilise materialismi kursusest teame, et olemus on eseme või protsessi püsiv sisemine ja peamine külg või nende kogum, nähtumus aga olemuse väline külg, olemuse ilming. Igasugune olemus sisaldab endas suurt hulka nähtumusi; igas nähtumuses väljendub osake olemust, üks nähtumus ei ammenda olemust, vaid iseloomustab selle üksikut külge. Järelikult ei lange nähtumus kunagi kokku olemusega. "Kui see oleks nii, siis oleks igasugune teadus üleliigne" (K. Marx). Niisiis - teaduse (või probleemi teadusliku uurimise) ülesanne selles seisnebki, et nähtumuste tagant leida olemust.

Igasugust nähtumust võib vaadelda avaldatuna mingi peamise elemendi kaudu. Seejuures on "... vaja tõestada, et valitud elemendid on ühelt poolt küllaldased, teiselt poolt aga vajalikud" (V. P. Gorjatškin). Nii valis I. Newton mehhaanika ülesehitamiseks kehade füüsikaliste omaduste mitmekesisusest ainult massi, R. Decartes ruumi tundmaõppimiseks kolm ristiasetsevat sihti, G. Galilei aga nägi kehade langeamise seaduspärasustes peamise tegurina õhu takistust. Mobiilse põllumajandusliku agregaadid tootlikkus sõltub väga palju deat tegureist, kuid peamiste elementidena on selles masina haardelaius ja liikumise kiirus.

V. P. Gorjatškin väitis, et mis tahes nähtuse arenemi-

seas (s. o. protsessiks) on vajalik kolme põhielemendi olemasolu, ja nimelt, peavad olema: energiaallikas, energia vastuvõtja ja energia akumulaator. Põllutöomasinate seisukohalt vaadatudena on need elemendid konkretiseeritavad järgmiselt: jõumasin (näit. traktor), töömasin (näit. ader) ja töödeldav materjal (näit. muid). Seega on näiteks kündmise protsess (kõige üldisemas mõttes) traktori poolt arendatava energia üleandmine mullale adra vahendusel. Olgu märgitud, et mehhaanika üldse on samuti üles ehitatud kolmele elemendile: energia, materja ja liikumine (mass, ruum ja aeg). Nähtuse või protsessi tundmaõppimiseks on kõigepealt vaja anda hinnang neile põhielementidele, s. t. hinnata energiaallika töövõimelisust, energia vastuvõtja vastuvõtlikkust ja energia akumulaatori energeetilist mahutavust.

Energiaallika töövõimelisust iseloomustab tema poolt antav energia (töö, võimsus), mis teatavasti avaldub kahe suuruse korrutisena:

energia	töö	võimsus
$\frac{mv^2}{2}$ ,	$Ds$ ,	$Pv$ ,
$\frac{J\omega^2}{2}$ ,	$M\varphi$ ,	$M\omega$ .
	$pV$ ,	

Siin:  $m$  - mass;  
 $J$  - inertsmoment;  
 $v$  - joorkiirus;  
 $\omega$  - nurkkiirus;  
 $D$  - jõud;  
 $M$  - jõu moment;  
 $p$  - rõhk;  
 $s$  - teepikkus;  
 $\varphi$  - nurk;  
 $V$  - ruumala.

Looduses esinevates protsessides toimub energia ülekandmine ühelt objektilt teisele mitte pideva vooluna, vaid võn-

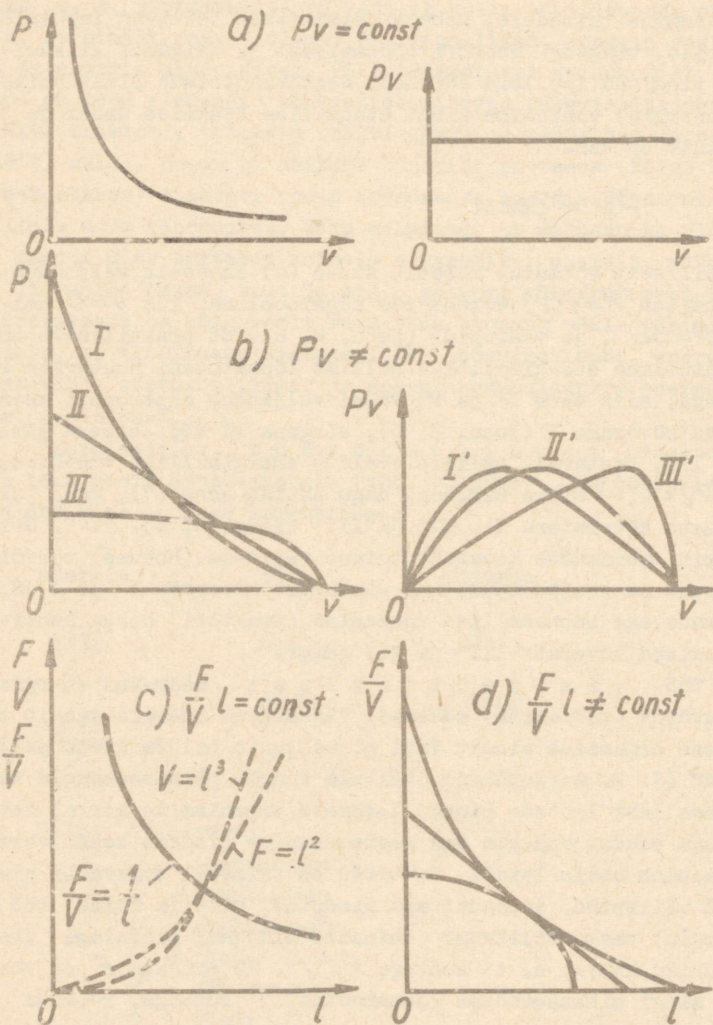
kumisea, lainetusena, impulssidega (näiteks päikese energia ülekandmine taimedele, hobuse sammumisel tekkivad impulsid vankrile, traktori mootori töötamisest ja käiguosa liikumisest tingitud impulsid adrale). Seetõttu toimub pidev võimsuse (energia) võnkumine mingi staatilise keskmise ümber ja järelilikult on seos

$$Pv = \text{const} \quad (1)$$

praktiliselt võimatu. Tõesti, seose (1) kohaselt väljendub funktsioon  $P=f(v)$  võrdhaarse hüperboolina, kus  $v=0$  korral  $P=\infty$ , ja vastupidi (joon. 2, a). Et praktiliselt on võimatu luua energiaallikat nullist lõpmatuseni muutuvate suurustega, siis seos  $P$  ja  $v$  vahel väljendub hüperbooli asemel nõrgusa kõverana I (joon. 2, b), sirgena II või kumera kõverana III. Vastavalt sellele avaldub energiaallika töövõimelisus  $Pv=f(v)$  mitte sirgena, nagu näitab seos (1), vaid paraboolsete kõveratena I', II' ja III' (joon. 2, b). V. P. Gorjatškini uurimuste kohaselt toimub veolooma (hobuse) töövõimelisuse ja veojõu muutumine vastavalt kõverate I' ja I järgi, kuna aga mehhaanilise veomasina (traktori) kohta kehtivad muutumised kõverate III' ja III järgi.

Töö vastuvõtlikkust määravad energia vastuvõtja (töomasina) mõõtmed. "Igasugune energia tungib töötavasse organisse ainult läbi pinna, kuid hiljem levib selle mahus" (V. P. Gorjatškin). Näiteks tungib päikeseenergia taimedesse läbi lehtede pinna, loomsete organismide korral satub toiduga saadav energia aga seedeorganite pindade kaudu verre, mis kannab selle laiali. Seetõttu on taimedel tugevasti arenenud välispind, loomadel aga sisepind. Niisiis võime töö (energia) vastuvõtlikkust hinnata üldjuhul pindalaga ühe mahuühiku kohta, s. t. suhtega  $F/V$ . Et pindala  $F$  on võrdeline mingi pikkusemõõtmega (joonmõõtmega)  $l$  ruuduga, ruumala  $V$  aga kuubiga, siis

$$\frac{F}{V} \cong \frac{l^2}{l^3} \cong \frac{1}{l} .$$



Joon. 2. Energiaallika (jõumasina) töövõimelisus ( a ja b ) ning energia vastuvõtja (töomasina) töö vastuvõtlikkus ( c ja d ).

Kui

$$\frac{F}{V} = \frac{1}{l}$$

ehk

$$\frac{F}{V} l = 1 = \text{const}, \quad (2)$$

siis võimalik energia juurdevool  $F/V = f(l)$  on kujutatav võrdhaarse hüperboolina (joon. 2, c). See näitab, et mõtme  $l$  väiksuse korral on energia vastuvõtlikkus  $F/V$  erakordselt suur, suure mõtme  $l$  korral aga vastupidi. See seaduspärasus on hästi mõistetav, kui kujutleda elava organismi kasvu - kasvu alguses on organismi mõõtmed väikesed, kuid energia suure vastuvõtlikkuse tõttu toimub edasine kasvamine kiiresti, seejärel aga mõõtmete suurenemise tõttu kasvamine aeglustub. Ette rutates võime siit analoogia põhjal teha oletuse, et sama tendents kehtib ka mehhaaniliste süsteemide kohta, s. t. et väiksemate mõõtmatega masinatel on töö vastuvõtlikkus suurem kui suuregabariidilistel. Ja tõepoolest, sest töö vastuvõtlikkus on ju sisuliselt energia kasutatatus, mida oleme harjunud väljendama kasutegurina.

Praktiliselt aga pole seos (2) päris täpselt jälgitav, sest  $l = 0$  korral saame  $F/V = \infty$ . Seetõttu on reaalses süsteemides funktsioon  $F/V = f(l)$  erinev hüperboolist ja üldjuhul kujutatav kas nõgusa või kumera kõverana, või ka sirgena (joon. 2, d). Siit teeme olulise järelduse: funktsiooni  $F/V = f(l)$  muutumise võimalused on analoogilised funktsiooniga  $P = f(v)$  (joon. 2, b). See tähendab, et on võimalik tagada jõumasina  $[P = f(v)]$  ja töomasina  $[F/V = f(l)]$  täielik vastavus.

Eespooltoodu põhjal on võimalik käsitleda ka lühidalt põllutöomasinate masside ja kiiruste vahetõrka. On arusaadav, et tehnoloogilise protsessi kvaliteetse täitmise eesmärgil peab tööorganite ja ka mootori mass peale vajaliku ja küllaldase suuruse olema ka selliselt valitud, et massi ühe ühiku kohta langeks võimalikult rohkem mehhaanilist energiat. Et nii tööl kui ka energial on sama sisu, siis võime kirjutada järg-

mise võrdelisuse tingimuse:

$$Pl \doteq mv^2, \quad (3)$$

kus  $l$  - mingi pikkusmõõt;

$m$  - mass.

Korrutades tingimuse (3) mõlemaid pooli kiirusega  $v$  ja jagades korrutisega  $ml$ , saame:

$$\frac{pv}{m} \doteq \frac{v^3}{l}. \quad (4)$$

Seos (4) näitab, et mis tahes süsteemi energetiline võimsus massi ühe ühiku kohta on võrdeline liikumiskiiruse kuubiga ja pöördvõrdeline tööorganite mõõtmatega. See tähendab, et ühesuguse kiiruse korral on jõu- või töömasina suhteline võimsus seda suurem, mida väiksemad on masina mõõtmed. Antud tendents kehtib ka elavate organismide kohta - röövlind on inimesest suhteliselt tugevam, inimene hobusest jne. Peale selle väljendab seos (4) ka teise tuntud tõiga: väiksema massiga loomad on suhteliselt kiiremad.

Mis puutub viimasesse elemendis - energia akumulaatori energetilises mahutavusse, siis taimsetes ja loomsetes produktides akumulatsioon energiat hinnatakse toiteväärtuse kaudu kaloritega. Mõnel juhul võib seda hinnata toitvuse efektiivsuse järgi (näiteks terved ja jahvatatud terad). Analooiliselt töövõimelisuse ja töö vastuvõtlikkusega võib oletada, et energia akumulatsioon on suhteliselt suurem peeneteralistel materjalidel (näit. jahu) kui jämedatel (terad). Kuid omaette probleem on energia akumulatsioon mulla töötlemisel. Ilmselt on see seotud mulla ainese ja pooride vahelise mahu vahekorraga (struktuursus), mida lähemalt vaatleme punktis 3.3.3.

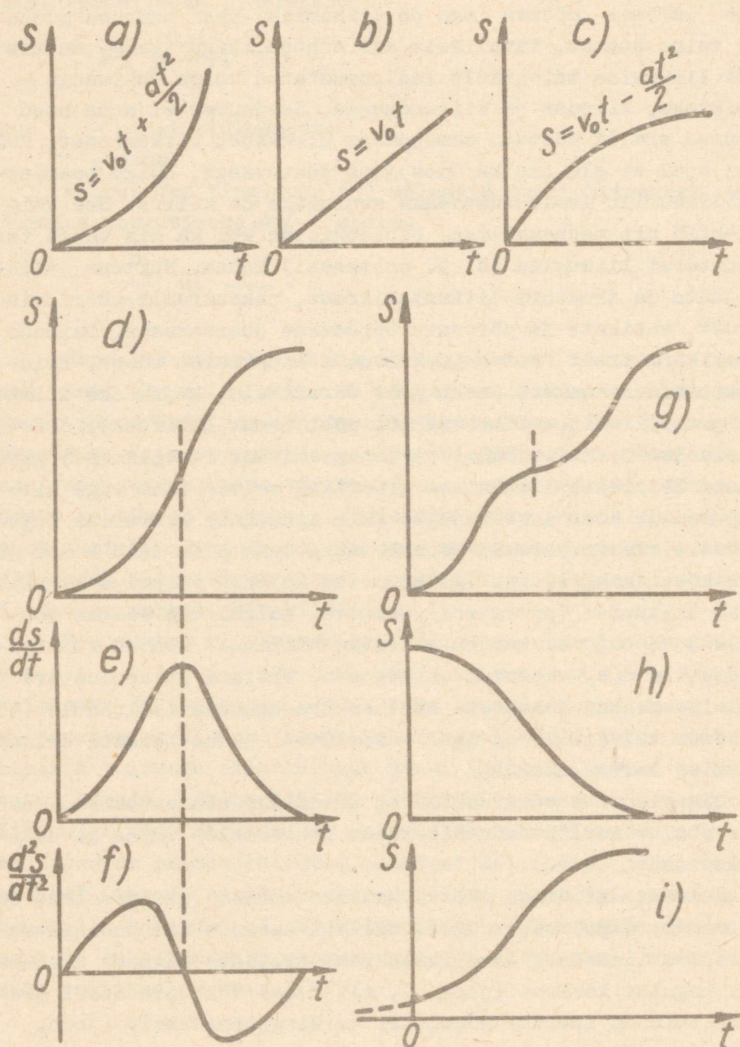
### 2.1.2. Integraalkõver - normaalselt kulgeva protsessi seaduspärasus

Igasugune protsess ei ole midagi muud, kui liikumine.

Kõige laiemas mõttes aga on liikumine ühe suuruse muutumine teise suhtes, tavaliselt aja suhtes. Nagu teada, on mis tahes liikumine täielikult iseloomustatud kolme suurusega - teepikkuse, kiiruse ja kiirendusega. Seejuures ei anna need suurused eraldi võetuna ammendavat ülevaadet liikumisest, kuid samal ajal ei ole nad ka ühesuguse tähtsusega. Kõige peamiseks liikumist iseloomustavaks suuruseks on kiirus. See väide kehtib nii mehhaanilise, bioloogilise kui ka mis tahes teise süsteemi liikumise (s. t. protsessi) kohta. Näitena võib tuua auto ja traktori liikumiskiirust, peksutrumli pöörlemiskiirust, vasikate ja põrsaste ööpäevast juurdekasvu, taimede kasvamise kiirust, toodangu kasvu, elatustaseme tõusu, hoiusumma protsentuaalset kasvu jms. Järelikult, kujutades liikumist graafiliselt, võime rääkida põhilisest (kiiruse), diferentsiaalsest (kiirenduse) ja integraalsest (teepikkuse) graafikust. Erinevate liikumiste graafikud võivad olla väga mitmesugused ja keerulise kujuga. Kuid igasuguse keerulise kujuga kõvera elementaarseks koostisosaks saab olla vaid kumer ja nõgus kõver ning sirge. Igauks neist kolmest võimalusest väljendab liikumise (protsessi) erinevat kulgu. See selgub jooniselt 3 a, b ja c, kus on esitatud kõikidele tuntud funktsioonid  $S = y(t)$  vastavalt kiireneva, ühtlase ja aeglustuva liikumise kohta. Vaatamata nähtuse ühesugusele iseloomule (tõusev kõver või sirge) on igal vaadeldaval juhul täiesti erinev liikumise karakteristik.

Olgugi, et toodud näited on küllaltki elementaarsed, on nende abil võimalik anda mis tahes protsesside ühine ja üldine skeem.

Selleks, et mingi nähtus hakkaks arenema protsessiks, on vaja mingit impulssi, tõuget. Sellega kaasneb aga positiivse kiirenduse ilmumine. Järelikult peab protsess alguses arenema mööda nõgusat kõverat (joon. 3, a). Edasi võib protsessi arenemine toimuda inertsil mõjul, s. t. sirgjooneliselt (joon. 3, b), aga lõppemiseks on vaja aeglustust (negatiivset kiirendust). Seega kulgeb protsessi lõppfaas kumera kõvera järgi (joon. 3 c). Ühendades need üksikud etapid, saame protsessi graafilise kujutusena nn. integraalkõvera (joon. 3, d). Olgu märgitud, et terminit "integraalkõver" õigustab selle kõvera



Joon. 3. Integraalkõvera elemendid (a, b, c) ja protsesside kulgmine normaalse (d), kahekordse (g), vastupidise (h) ja lõpmatuselt algava (i) integraalkõvera järgi.

integraalmärgi kaju, aga ka sisu - integraalkõver saadakse kiiruse kui põhigraafiku integreerimisel. Niisiis väljendab igasuguse lõpetatud protsessi integraalset graafikut integraalkõver, põhi- ehk kiirusgraafikut nn. jaotuskõver (joon. 3, c) ja diferentsiaalset graafikut laineline kõver (joon. 3, f). Viimane näitab, et protsesside toimumisele on omane kiiruse võnkuv muutumine. See on ka kooskõlas punktis 2.1.1. tooduga, sest kutsub ju protsessi kulgemise kiirenduse esile impulssidena (lainetusena) juurdevoolav energia.

Oma välisilmelt võivad integraalkõverad olla kas sümmeetrilised või ka kallutatud ühele või teisele poole. Mõnel puhul võib protsess väljenduda nn. kahekordse integraalkõverana (joon. 3, g) või isegi mitmekordsena, mitmeastmelisena. Niisugustel juhtudel on tegemist protsessidega, mis enne lõppemist saavad uue impulsi, kusjuures oma loomuselt võivad need impulsid olla täiesti erinevad sellest, mis kutsus esile protsessi arenema hakkamise (näiteks algab teravilja puhastamise ja sorteerimise protsess eraldamisega sõelte abil, edasi asub tegevusse ventilaator ja lõpuks triöör).

Protsessi kulgemine võib toimuda ka nn. vastupidise (pööratud) integraalkõvera korras (joon. 3, h), s. t. protsess algab mingilt konkreetset väärtuselt ja algul aeglasemalt, hiljem läheneb kiirenevalt nullile. Niisugune kulg on omane vananemisprotsessile.

Joon. 3, i kujutatud nn. miinus lõpmatuselt algava integraalkõveraga võib kujutada elusorganismide kasvamise protsessi. Seejuures kujutab kõvera negatiivne osa (punktir) taimsete organismide puhul idanemisprotsessi, loomsete organismide puhul aga loote arenemist.

Eeltoodust selgub, et kuigi integraalkõvera kui protsessi arenemise graafilise kujutuse saamisel lähtusime kõverjoonete matemaatilistest kujudest ja mehhaanikas tuntud liikumise seadustest, kehtib protsessi üldine skeem ka bioloogiliste ja füsioloogiliste süsteemide kohta.

On täiesti loogiline, et normaalselt peaks protsessi arenemine algama nullpunktist, s. t. graafikul koordinaatide alguspunktist. Niisugune on protsessi kõige loomulikum käik.

Mingi protsessi eksperimentaalsel uurimisel saame inte-

graafikõvera katselisel teel. Seejuures tuleb arvestada protsessi olemusega, pidades silmas ülalöeldut - protsessi normaalset kulgu iseloomustab tema algamine nullist. Kui katseandmed annavad siksakilise kõvera, tuleb samuti põhjalikult süveneda protsessi olemusse. Vastasel juhul võime kalduda ühte kahest äärmusest: omistame sakkidele liigset tähendust, või siis vastupidi, meelevaldselt joonestame sujuva kõvera. Tuleb meeles pidada, et üldjuhul kujuneb mis tahes katseline kõver saksakilisena, kui:

1) suure ebatäpsusega määratud katseandmete graafiliseks kujutamiseks on valitud liiga suur mõõtkava;

2) ebasobivalt on valitud koordinaadid, s. t. kui otsitakse sõltuvust mittevastavate (sõltuvus ei ole otsene) suuruste vahel;

3) jäetakse arvestamata mingi oluline tegur või arvestatakse mingi juhusliku teguriga. See viga esineb kõige sagedamini ja on ühtlasi kõige raskemini kõrvaldatav.

## 2.2. Põllutöomasina masside ja kiiruste valik ning masina veotakistuse muutumise üldine soaduspärasus

Põllutöomasinates toimuvate protsesside kulgemises on määrava tähtsusega mitte ainult masina ja tema tööorganite, vaid ka töödeldava materjali massid ja kiirused.

Nagu juba eespool oli öeldud, peab põllutöomasina tööorganite ja ka jõuallika massid valima nii, et tehnoloogilise protsessi kvaliteetseks täitmiseks oleksid massid mitte ainult vajaliku ja küllaldase suurusega, vaid et ühe massiühiku kohta tuleks ka võimalikult rohkem mehhaanilist energiat. Et aga mehhaaniline energia avaldub massi ja kiiruse kaudu, siis järelikult on oluline tähtsus ka kiirusel. Töökiiruste valik on määratud eelkõige tehnoloogilise protsessi olemuse ja iseloomuga. Mõnel juhul on vajalik jõu aeglane levimine töödeldavas massis, mistõttu tuleb kasutada suuri masse ja väikesi kiirusi (näit. heina pressimine), mõnel juhul on aga nõutav vastupidine olukord (näit. heina niitmine). Kui-

gi mõningal juhul pole masside ja kiiruste vahekorid eriti tähts, räägivad suuremate töökiiruste kasutamise poolt järgmised asjaolud:

1) tootlikkuse suurenemine,  
2) energia suurem kontsentratsioon töömasina massi ühele ühikule,

3) liikumise suurem ühtlus, sest teatavasti on kiiremat liikumist alati raskem muuta kui aeglast.

Samal ajal ei või aga kiirus ületada mingit piirväärtust. Seda piiravad järgmised asjaolud, mis järelikult räägivad suuremate töökiiruste vastu.

1. Suurem liikumiskiirus kutsub esile takistusjõudude suurenemise, mis omakorda tingivad energiaallika suurema võimsuse. Näiteks, kui künniagregaadi kiiruse suurenemisel kaks korda suureneb adra veotakistus 25% võrra, siis traktori vajalik veovõimsus suureneb kaks ja pool korda:  $N_2 = P_2 v$ ;  $N_2 = 1,25 P \cdot 2v = 2,5 P v = 2,5 N_1$ .

2. Tunduvalt suurenevad löökkkoormused. Et põllutöomasinate tööprotsessid on valdavas enamuses seotud just löökkkoormustega, siis on see asjaolu väga tähtis. Seejuures tekkivate inertsjõudude võimsus on kuupsõltuvuses kiirusest (vt. p. 2.1.1.). Nii näiteks on kindlaks tehtud, et edasi-tagasi liikuva vikatiga löikeaparaadi töötamisel kulub enamik energiat inertsjõudude ületamiseks.

3. Töökiirus on piiratud töödeldatava materjali omadustega. Nii näiteks viib kombaini peksutrumli pöörlemiskiiruse ülemäärane suurenemine terade purustamisele.

4. Suurem töökiirus nõuab ka masina detailide valmistamisel kvaliteetsemate materjalide kasutamist (võrdle p. 1.1.).

5. Suurem töökiirus esitab suurendatud nõudmisi masinaid teenindavale personalile, nõuab nende kõrgemat kvalifikatsiooni (võrdle p. 1.1.).

6. Suurt töökiirust piiravad põllutöomasinate töötamistingimuste eripärasused, nagu põllu ebatasasus, muldade kivisus jms., millega kaasnevad kahjulikud vibratsioonid ja löögid.

Nagu eeltoodust selgub, ei ole põllutöomasinate kiiruste ja masside vahekorra probleem mitte ainult nende masinate

tehnoloogilise arvutuse, vaid ka tugevusarvutuse ning masinapargi eksploatatsiooni probleem. Asudes selle probleemi lahendamisele, peame loomulikult alustama tehnoloogilisest arvutusest, millega tagame masina tehnoloogilise funktsiooni nõuetekohasuse. Seejuures tuleb lähtuda masina poolt töödeldavatest põllumajanduslikest materjalidest ja nende töötlemisprotsessi mehhaanikast, nn. agromehhaanikast. (Neid küsimusi käsitleme üksikasjalikumalt järgmises punktis, s. o. p. 3.). Mis puutub masinate tugevusarvutusse, siis toimub see täielikus vastavuses üldise tugevusõpetuse põhimõtetega.

Masinapargi eksploatatsiooni seisukohalt on oluline tähtsus töömasina veotakistuse ja jõumasina veojõu sõltuvusel töökiirusest. Peatume sellel küsimusel kõige üldisemalt.

V. P. Gorjatškini õpetuse kohaselt võib mis tahes tööprotsessis eristada kolme liiki takistusjõude: 1) kahjulikud takistusjõud (hõõrdejõud), mis tööprotsessiga paratamatult kaasnevad ja praktiliselt ei sõltu tööorgani ja materjali suhtelisest kiirusest (töökiirusest); 2) materjali töötlemisel tekkiv deformatsioonitakistus, mis üldjuhul sõltub kiirusest; 3) materjali töötlemisel tekkiv osakeste ühest kohast teise paiskamise takistus, mis kindlasti sõltub kiirusest. Määrame need olenevused.

Et deformatsioonitakistuse  $R_d$  töö on võrdeline deformeeritava materjali kineetilise energiaga, siis kasutades seost (3), saame

$$R_d \doteq \frac{mv^2}{l}$$

ehk, arvestades, et mass on võrdeline ruumalaga, s. t. pikkusmõõdu kuubiga, siis

$$R_d \doteq l^2 v^2. \quad (5)$$

Niisiis on deformatsioonitakistus võrdeline kiiruse ruuduga.

Juhime tähelepanu asjaolule, et tavaliselt vaadeldakse deformatsiooniprotsesse staatilistena, s. t. tingimusel

$v = \text{const}$  . Sel juhul saame seosest (5):

$$R_0 \doteq l^2$$

ehk

$$\frac{R_0}{l^2} = \text{const} .$$

Deformatsiooniga kaasneb osakeste nihkumine üksteise suhtes. Nihkumine on ka osakeste ümberpaiknemine, ühest kohast teise paiskamine. Erinevuseks on aga nihkumise ulatus ning ka protsessi iseloom. Deformatsioon on üldjuhul pidev protsess, osakeste ümberpaiskamine aga mittepidev, s. t. löögiprotsess. Pidev ja löögiprotsess erinevad jõu mõjumise ajavahemiku pikkuse poolest. Selle täpne piiritlemine on loomulikult võimatu ja seetõttu on ka pideva ja mittepideva protsessi eristamine tinglik. Vastavalt sellele on põllumajanduslike materjalide töötlemise põhiliseks mõisteks jõuimpulsi mõjumise määr, mida kõige paremini väljendab seos jõu impulsi ja liikumishulgaga vahel:

$$P \Delta t = \Delta(mv) . \quad (6)$$

Kui masina tööorgan kohtub töödeldava materjali elementaar-massiga  $\Delta m$  ja lühikese ajavahemiku  $\Delta t$  vältel annab sellele kiiruse  $v$  , siis saame seose (6) alusel määrata löögiprotsessi takistuse

$$R_{yg} = \frac{\Delta m}{\Delta t} v . \quad (7)$$

Et  $\Delta m = \rho \Delta V$  ja  $\Delta V = F \Delta s$  , kus  $\rho$  on tihedus,  $F$  - pindala ja  $\Delta V$  ning  $\Delta s$  vastavalt elementaarne ruumala ja nihkumise teepikkus, siis võime seose (7) kirjutada kujul:

$$R_{yg} = \rho F \frac{\Delta s}{\Delta t} v = \rho F v^2 . \quad (8)$$

Seos (8) näitab, et materjali osakeste ühest kohast teise paiskamise takistusjõud on võrdeline kiiruse ruuduga.

Niisiis, mis tahes tööprotsessis tekivad takistusjõud avaldub:

$$R = R_0 + R_2 + R_{yg} , \quad (9)$$

kus  $R_0$  - kahjulik takistusjõud;

$R_2$  - takistusjõud materjali deformeerimiseks;

$R_{yg}$  - takistusjõud materjali osakeste ümberpaikamiseks.

Lähtudes seostest (5) ja (8) on avaldis (9) kirjutatav järgmiselt:

$$R = R_0 + Av^2 , \quad (10)$$

kus parameeter  $A$  arvestab tööorgani konstruktsiooni ja töödeldava materjali omadusi.

Võrrand (10) väljendab üldisemal kujul töömasina (põllu- töömasina) tööorgani takistusjõu olenevust liikumiskiirusest. See kehtib nii mobiilse kui ka statsionaarse masina ükskõik millise tööorgani kohta.

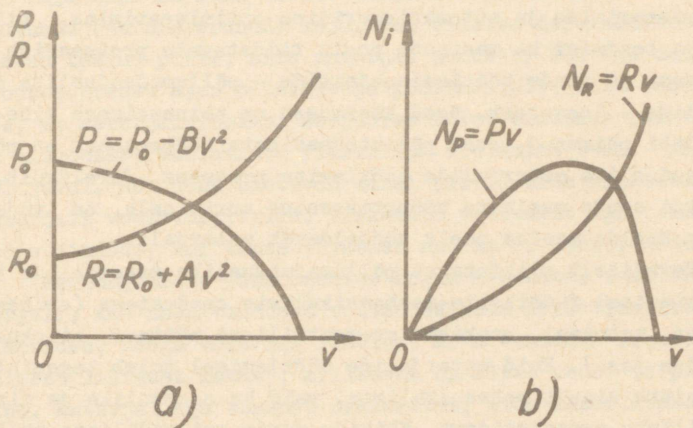
Nimetatud võrrand kujutab endast tõusvalt kulgevat ruutparabooli. Seega, töökiiruse suurenemisega kaasneb takistusjõu suhteliselt kiire kasv. Kui aga töökiiruse suurenemist vaadelda jõumasina seisukohalt, siis p. 2.1. esitatud põhjal on olukord vastupidine - töökiiruse suurenemisega väheneb jõumasina (mootori, traktori) poolt arendatav aktiivjõud  $P$  (vt. joon. 2, b). Järelikult kujutab funktsioon  $P = f(v)$  langevalt kulgevat kõverat, mille analüütilisel avaldisel on seosega (10) analoogiline kuju. Põhiliseks erinevuseks on seejuures vastupidine märk kiirust sisaldava liikme ees:

$$P = P_0 - Bv^2 , \quad (11)$$

kus parameetrid  $P_0$  ja  $B$  väljendavad jõumasina (traktori) konstruktiivseid iseärasusi ja töötamistingimusi.

Kujutades seoses (10) ja (11) olevad suurused graafiliselt (joon. 4), näeme, et tingimusele  $P = R$  vastab kiiruse mingi kindel väärtus. Ühe kindla jõumasina seisukohalt on see teoreetiliselt maksimaalseks töökiiruseks antud töömasina töö-

tamistingimuste korral. Töömasina seisukohalt on aga maksimaalse töökiiruse leidmine väga keeruline ülesanne, sest selle määrab tehnoloogiline operatsioon ja masina tööorganite konstruktiivne lahendus koos viimaste geomeetriliste parameetritega (kõige ilmekamaks näiteks on kändmine hõlmatrada; vt. käesoleva sarja II osa "Mullaharimismasinad" p. 1.3.5.). Seetõttu on mis tahes põllumajandusliku agregaadid projekteerimise kõige loogilisem käik järgmine: uurida töödeldavat materjali, kirjutada selle töötlemisprotsessi matemaatiline avaldis, fikseerida protsessile ja lõpp-produktile vastavad agrotehnilised nõuded, kujundada ja projekteerida tööorgan ning määrata vastav maksimaalne ja optimaalne töökiirus. Alles seejärel on võimalik asuda jõumasina projekteerimisele.



Joon. 4. Põllutöömasina veotakistuse  $R$  ja jõumasina (traktori, mootori) veojõu  $P$  (a) ning vastavate võimsuste  $N_i$  (b) sõltuvus töökiirusest  $v$ .

### 3. PÖLLUMAJANDUSLIKUD MATERJALID JA NENDE TÖÖTLEMISPROTSESSID

#### 3.1. Põhimõisteid materjalidest ja nende omadustest

Kui piirduda arvamusega, et põllumajandusinseneri põhiliseks ülesandeks on käsitöö asendamine kompleksse mehhaniseerimisega, siis piisab peamiselt põhjalikest masinaehitusalastest teadmistest. Kui aga eesmärgiks seada komplekssem mehhaniseerimise ja automatiseerimise optimeerimine, siis on vaja teadmisi ka masinate poolt täidetavate protsesside olemusest ja nende töötlemisobjektide - põllumajanduslike materjalide - loomusest. Need küsimused on teineteisega tihedalt läbi põimunud, sest põllutöömasinate tööprotsess on põllumajanduslike materjalide töötlemise protsess. Järelikult, enne kui asuda masinate tööprotsesside uurimisele, on vaja tunda õppida masina poolt töödeldavat materjali.

Tavaliselt piirdatakse põllumajanduslike materjalide iseloomustamisel füüsikalise-mehaanikaliste omadustega (erikaal, tihedus, mahukaal, osakeste geomeetrilised mõõtmed, niiskesisaldus jms.). Kuid materjalide töötlemisel tuleb tegemist teha mitte ainult mehaanikaliste, vaid ka soojuslike ja difusiooniliste protsessidega. Kõikide nende erilaadiliste protsesside kulgemine on aga määratud materjalide struktuurilise-mehaanikaliste omadustega, mille loomusele mehhanika vastust ei anna.

Kujutlegem näiteks järgmist katset: mingilt kõrguselt kukub lauale kolm keha - teraskuulike, plastiliinist kerake ja veetilk. Näib, et katse on puhtmehaanikaline, mille kohta kehtib Newtoni II seadus  $G = mg$  ( $P = ma$ ). Et vaba langemise kiirendus  $g$  on kõikide kehade puhul ühesugune, siis vaadeldud kolm keha käituvad kukkudes täiesti ühtviisi. Koh-

tumine lauaga on aga erinev: teraskvõlke pöörab kõrgelt te  
gasi, plastiliinkerake deformeerub ja kleepub lauale, veetilk  
aga valgub laua pinnal laiali. Sellele nähtusele mehhaanika  
vastust ei anna. Selle ülesande lahendab reoloogia.

Termin "reoloogia" tuleneb kreekakeelsest sõnast "ρεω"  
- voolamine. Kaasajal aga kasutatakse seda terminit laiemas  
mõttes - reoloogia on füüsika ala, mis tegeleb materjalide  
deformeerumise uurimisega. Ülalmainitud katses sai teraskuu-  
like elastse deformatsiooni, plastiliinkerake plastilise (jää-  
va) deformatsiooni, veetilk aga voolamise (voolamine on ka  
deformeerumine). Vastavalt sellele ongi elastsus, plastili-  
sus ja viskoossus materjalide põhilisteks reoloogilisteks omad-  
usteks. Neile lisandub veel tugevus - materjali vastupanu  
purunemisele.

Elastsus on keha omadus taastada oma välisjõudude mõjul  
muutunud (deformeerunud) kuju. Kui elastse deformatsiooni töö  
ületab teatud piiri, siis materjal puruneb. Kui aga deformat-  
sioon suureneb ajas pidevalt ja pöördumatult, siis tähendab,  
see, et materjal voolab. Seejuures tuleb eristada plastilist  
ja viskoosset voolamist. Plastiline voolamine tekib ainult  
sel juhul, kui jõud ületavad mingi piiri, mida nimetatakse  
materjali voolavuspiiriks. Viskoosne voolamine aga toimub mis  
tahes jõudude, kui tahes väikesed nad ka ei oleks, mõjul.

Reoloogiliste põhiomaduste kogum moodustab reaalse ma-  
terjali, kus need omadused võivad esineda kõikvõimalikes va-  
riantides. Seega võib iga reaalselt keha vaadelda koosnevana  
kolmest lihtsast kehast, milledeks on kõva, vedel ja plasti-  
line. Materjal aga koosneb osakekestest, mida käsitletakse keha-  
dena ja vaadeldakse keha ruumielementidena. Enamik reaalseid  
materjale kujutavad endast dispersseid süsteeme, mis koosne-  
vad kahest või enamast faasist. Valdavat faasi nimetatakse  
keskkonnaks. Nii võib reoloogia seisukohalt dispersseid süs-  
teeme jagada kolmeks - soolideks, geelideks ja süldiks. Sooli-  
d on tahke keha dispersioon vedelikus, kusjuures nad käitu-  
vad vedelikena (sest keskkonnaks on vedelik). Geelid on vede-  
liku dispersioon tahkes kehas; nad käituvad kõva keha ja ve-  
delike vahepealsetena (näiteks liivsavimuld, hea betoon).  
Sültjas dispersne süsteem on tahke keha omadustega.

Põllumajanduslike materjalidena ongi meil tegemist mitmesuguste heterogeensete või polüdisperssete süsteemidega, mis koosnevad mitmest faasist või erineva molekulkaaluga biopolümeeridest. Seejuures on määrav tähtsus dispersioonikeskkonna ja -faasi vahelistel seostel. Et põllumajanduslike materjalide peamiseks dispersioonikeskkonnaks on vesi, siis olenevad nende omadused vee ja aineseosakeste vaheliste seoste tübist ja üldse veesisaldusest (niiskusest). Vesi on materjalides nii sideaineks kui ka plastifikaatoriks.

Taimsete ja loomsete materjalide molekulstruktuure on nelja peamist tüüpi: kerajad (e. globulaarsed), kiudjad (e. fibrillaarsed), vöötjad ja jämedastruktuurilised (kristallid), milliste osatähtsus eri anatoomilistes või bioloogilistes ühikutel on erinev. Kiudjas struktuur on omane taimedele, vöötjas aga loomsetele materjalidele. Niisuguse struktuuri moodustab molekulide ahel, kusjuures piki ahelat on seotised tugevamad kui molekulide vahelisest toimest tingitud põikseotised. Seetõttu on sellise struktuuriga materjali omadused pikisuunas lähedased tahkete kristalliliste kehade, põiksuunas aga vedelike omadustele.

Nagu eeltoodust selgub, ei saa materjalide töötlemise protsesside vaatlemisel piirduda ainult füüsikalise-mehaanikaliste omadustega, vaid arvestada tuleb ka reoloogiliste ja struktuurilis-mehaanikaliste omadustega. Loomulikult on oluline tähtsus ka materjali keemilisel koostisel ja bioloogilistel iseärasustel. Kõiki neid küsimusi uurib komplekselt teadusharu, mida nimetatakse füüsikalise-keemiliseks mehhaanikaks. Seejuures arvestatakse töödeldava (deformeeritava) keha koostist, struktuuri, keskkonna koostist ja adsorptsioonilist ning keemilist toimet, temperatuuri, pingeolukorra intensiivsust ja iseloomu. Materjalide niisuguse uurimise alusel saame tema efektiivseks töötlemiseks valida terve protsesside kompleksi (mehaanilised, termilised, füüsikalise-keemilised jt.). Füüsikalise-keemilise mehhaanika tähtsamaks koostisosaks on reoloogia - teadus disperssete süsteemide diformatsiooniomadustest, mis moodustab põllutöömashinate tehnoloogilise arvutuse ühe väga olulise külje. Olgu lõpuks märgitud, et kuni viimase ajani on põllumajanduslike materjalide füüsikalise-keemilisele

### 3.2. Materjalide mehhaanikalised mudelid ja reoloogilised võrrandid. Relaksatsioon

Põllumajanduslike materjalide töötlemisel on üheks sagedamini esinevaks protsessiks deformeerimine. Seetõttu on siin reoloogia kui teadusharu poolt püstitatavate mitmesuguste kehade deformeerimise ja voolamise ajalise kulgemise üldiste seaduspärasuste tundmine küllaltki suure tähtsusega.

Deformatsiooniks nimetatakse materiaalse keha osakeste suhtelist nihkumist, kusjuures säilib keha pidevus, terviklikkus. Deformatsiooni kutsub esile koormus, mis mingite toereaktsioonide mõjul moodustab sisejõudude süsteemi. Nisuguses olukorras tekkinud pingete ja deformatsiooni omavahelise seose määrabki kindlaks reoloogia kui deformatsiooni rüüsika, kusjuures saadavaid sõltuvusi nimetatakse reoloogilisteks võrranditeks. Reoloogiliste võrrandite koostamiseks kasutatakse mehhaanikalisi mudeleid. Et materjalide põhilisteks reoloogilisteks omadusteks on elastsus, plastilisus ja viskoossus (vt. eelmine punkt), siis igähte neist omadustest võib vaadelda ideaalse abstraktse kehana, mis kannavad nende esmakordselt kasutuselevõtjate nimesid: ideaalne elastne, nn. Hooke'i (1935...1703. a.) keha; ideaalne plastiline, nn. St. Venanti (1797...1886. a.) keha; ideaalne vedelik, nn. Newtoni (1642...1726. a.) vedelik.

Neid kehi on mugav kujutada järgmiste mehhaanikaliste mudelite abil:

1) elastset keha (Hooke'i keha) kujutab spiraalvedru (joon. 5, a), millel

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (12)$$

kus  $\epsilon$  - deformatsioon;

$\sigma$  - pinge;

$E$  - elastne jäikus (elastsusmoodul).

2) plastilist keha (s. t. Venanti keha) kujutab kuivhõõr-

duuse elementi (raskus tasasel pinnal), millel

$$P = F, \quad (13)$$

kus  $P$  - raskusele toetuspinnaga paralleelselt mõjuv aktiivjõud;

$F$  - raskuse pinnal nihkumisel tekkinud hõrdejõud.

3) vedelikulist elementi (Newtoni keha) kujutab viskoosse õliga täidetud silinder, milles on lõtkuga (või avadega) kolb (joon. 5,b), kusjuures

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma}{\eta}, \quad (14)$$

kus  $\dot{\epsilon}$  - deformatsiooni muutumise kiirus ajas;  
 $\eta$  - vedeliku viskoossus.

Et reaalsel kehadel on põhiliste reoloogiliste omaduste mis tahes kombinatsioon, siis järelikult võime neid vaadelda ka kui kombinatsioon eeltoodud lihtsatest kehadest. Ühendades lihtsaid kehi kujutavad mehhaanikalised mudelid järjestikku, paralleelselt või kombineeritult võime koostada mehhaanikalise mudeli mis tahes tuntud või tundmatu struktuuriiga materjali kohta. Kasutades seejuures lihtsate kehade reoloogilisi võrrandeid (12), (13) ja (14), saame niiviisi koostada ka uuritava materjali reoloogilise võrrandi.

Reaalse materjali (keha) üldine deformatsioon koosneb tõelisest ja hilinevast elastsest ning viskoossest-voolavast (taastumatust) deformatsioonist. Viimase kaudu avaldub ka keha plastilisus. Seetõttu võib materjali mehhaanikalise mudelit kujutada koosnevana kahast lihtsa keha mudelist - spiraalvedrust (joon. 5,a), mis väljendab elastsust, ja õliga täidetud silindris asuvast lõtkuga kolvist (joon. 5,b), mis väljendab plastilisust ring viskoossust.

Mehhaanikaliste mudelite kasutamisel on reoloogiliste võrrandite koostamisel soovitatav meeles pidada järgmist. Elementide järjestikusel ühendamisel on kogudeformatsiooni suurus võrdne üksikelementide deformatsioonide summaga. Paralleelsel ühendamisel aga on sama seaduspärasus kehtiv pingete kohta, s. t. süsteemi kogupinge on võrdne üksikelementides tekkivate pingete summaga. Peale selle tuleb silmas pida-

da, et deformatsiooni ei iseloomusta mitte ainult koormamine, vaid ka koormusest vabastamine.

Arvestades ülaltoodut, koostame näitena joonisel 5 toodud mudelite kui kehade (või materjalide) reoloogilised võrandid kahe piirkonna - konstantse koormuse momentaalse rakendamise ( $\sigma = \text{const}$ ) ja koormusest järsu vabastamise ( $\dot{\sigma} = 0$ ) kohta (vt. kõrvalasuvad graafikud).

Joonisel 5,a esitatud mudel vastab elastsele kehale, kusjuures piirkondade  $\sigma = \text{const}$  ja  $\dot{\sigma} = 0$  kohta saame seosest (12) vastavalt

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \text{const} \quad (15)$$

ja

$$\dot{\varepsilon} = 0 . \quad (16)$$

Joon. 5,b esitatud mudel vastab plastilis-viskoossele kehale, kusjuures piirkondade  $\sigma = \text{const}$  ja  $\dot{\sigma} = 0$  kohta saame seosest (14) vastavalt

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta} = \text{const} \quad (17)$$

ja

$$\dot{\sigma} = 0 , \quad (18)$$

milledest vastavalt

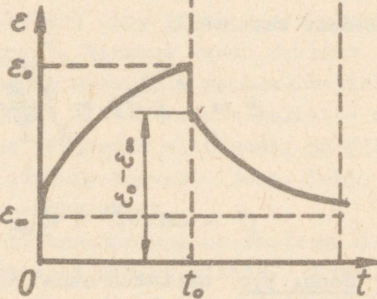
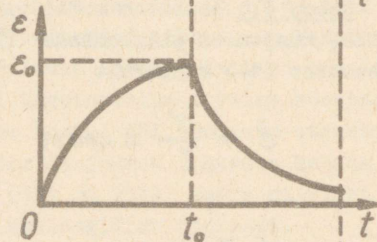
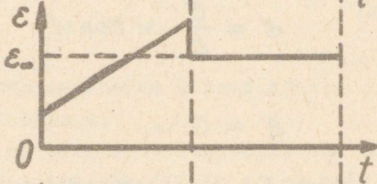
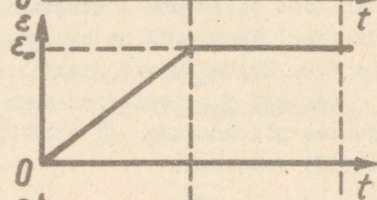
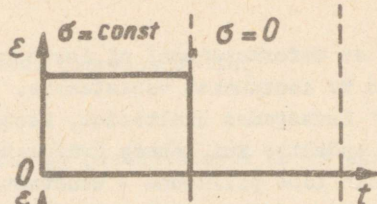
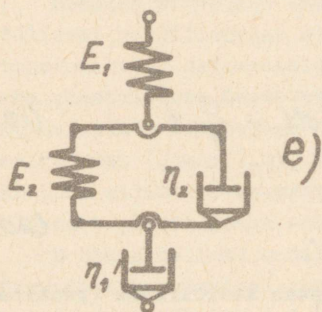
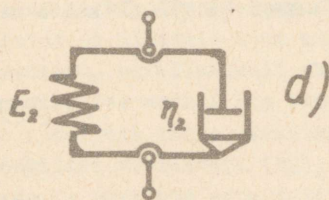
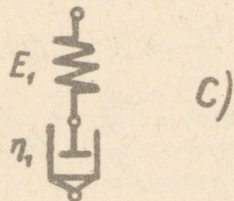
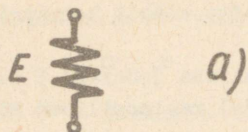
$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon} dt = \int_0^t \frac{\sigma}{\eta} dt = \frac{\sigma}{\eta} t \quad (19)$$

ja

$$\varepsilon = \text{const} = \varepsilon_{\infty} . \quad (20)$$

Joon. 5,c esitatud mudel vastab keerulisele (reaalsele) materjalile, kusjuures elementide järjestikuse ühendamise tõttu võime üldjuhul kirjutada:

$$\varepsilon = \varepsilon_E + \varepsilon_{\eta} . \quad (21)$$



Joon. 5. Deformatsiooniprotsessi kujutavad mehhaanikalised mudelid.

Joonisel 5 esitatud kehade ja materjalide mehaanikaliste mudelite reoloogilised võrrandid koormuse momentaalsel rakendamisel ( $\sigma = const$ ) ja koormusest järsul vabastamisel ( $\sigma = 0$ )

Skeemi tähtis Joonisel 5	$\sigma = const$		võrrandi number	$\sigma = 0$		võrrandi number
	reoloogiline võrrand $\epsilon = f(t)$			reoloogiline võrrand $\epsilon = f(t)$		
a	$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = const$		(15)	$\epsilon = 0$		(16)
b	$\epsilon = \frac{\sigma}{\eta} t$		(19)	$\epsilon = \epsilon_{\infty} = const$		(20)
c	$\epsilon = \sigma \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t \right)$		(22)	$\epsilon = \epsilon_{\infty} = const$		(23)
d	$\epsilon = \frac{\sigma}{E_2} \left( 1 - e^{-E_2/\eta_2 t} \right)$		(32)	$\epsilon = \epsilon_0 e^{-E_2/\eta_2 (t-t_0)}$		(26)
e	$\epsilon = \sigma \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left( 1 - e^{-E_2/\eta_2 t} \right) \right]$		(37)	$\epsilon = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_0 - 2\epsilon_{\infty}) e^{-E_2/\eta_2 (t-t_0)}$		(40)

Piirkonna  $\sigma = \text{const}$  kohta saame seosest (21) reoloogilise võrrandi, arvestades võrrandeid (15) ja (19):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t . \quad (22)$$

Piirkonnas  $\dot{\sigma} = 0$  aga kehtivad seosed (16) ja (20), mistõttu võrrand (21) avaldub:

$$\varepsilon = \text{const} = \varepsilon_{\infty} . \quad (23)$$

Joon. 5,d esitatud keerulise (reaalse) materjali mudeli kohta saame elementide paralleelse ühendamise tõttu

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_{\eta} . \quad (24)$$

Asendades siia pinged avaldistest (15) ja (17), saame piirkonna  $\sigma = \text{const}$  jaoks:

$$\sigma = E_2 \varepsilon + \eta_2 \dot{\varepsilon} \quad (25)$$

ehk, avaldades selle kujul

$$\dot{\varepsilon} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = \frac{\sigma}{\eta_2} , \quad (26)$$

näeme, et võrrand (26) kujutab endast esimest järku mittehomogeenset diferentsiaalvõrrandit, mille üldlahend avaldub (märgime siinkohal selgituseks, et homogeensete ja mittehomogeensete diferentsiaalvõrrandite lahendamise käik on üksikasjalikult selgitatud ka käesoleva sarja kolmandas osas "Külvi- ja väetamismasinad", punktis 3.4.3.):

$$\varepsilon = C_1 e^{\lambda t} + C_2 . \quad (27)$$

Parameetri  $\lambda$  määramiseks lahendame homogeensele võrrandile

$$\dot{\varepsilon} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = 0 \quad (28)$$

vastava karakteristliku võrrandi

$$\lambda + \frac{E_2}{\eta_2} = 0,$$

mille lahendina saame:

$$\lambda = - \frac{E_2}{\eta_2} . \quad (29)$$

Parameetri  $C_2$  määramiseks asendame  $\epsilon = C_2 = \text{const}$  ja  $\dot{\epsilon} = 0$  võrrandis (26):

$$\frac{E_2}{\eta_2} C_2 = \frac{\sigma}{\eta_2} ,$$

millest

$$C_2 = \frac{\sigma}{E_2} . \quad (30)$$

Konstandi  $C_1$  leidmiseks aga asendame algtingimused  $t=0$  ja  $\epsilon = 0$  üldlahendis (27), arvestades ka seost (30):

$$0 = C_1 + \frac{\sigma}{E_2} ,$$

millest

$$C_1 = - \frac{\sigma}{E_2} . \quad (31)$$

Kui nüüd asendada  $\lambda$ ,  $C_1$  ja  $C_2$  vastavalt nende avaldistega (29), (31) ja (30), saame üldlahendi (27) kujul:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-E_2/\eta_2 t}) . \quad (32)$$

Tuletame meelde, et seose (32) saime piirkonna  $\sigma = \text{const}$  kohta. Deformatsiooni  $\epsilon$  avaldise piirkonnale  $\sigma = 0$  saame aga, vastavat tingimust arvestades, võrrandist (26):

$$\dot{\epsilon} + \frac{E_2}{\eta_2} \epsilon = 0 . \quad (33)$$

See kujutab endast esimest järku homogeenset diferentsiaalvõrrandit üldlahendiga

$$\varepsilon = C_3 e^{\lambda t} . \quad (34)$$

Et võrrand (33) on absoluutselt samane võrrandiga (28), siis järelikult seoses (34) esinev parameeter  $\lambda$  avaldub samuti seosega (29). Konstandi  $C_3$  aga saame lahendist (34), asendades selles  $t = t_0$  ja  $\varepsilon = \varepsilon_0$  (vt. joon. 5, d graafikut):

$$\varepsilon_0 = C_3 e^{\lambda t_0} ,$$

millest

$$C_3 = \varepsilon_0 e^{-\lambda t_0} . \quad (35)$$

Lahendades nüüd koos seosed (29), (34) ja (35) saame:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-E_2/\eta_2 (t-t_0)} . \quad (36)$$

Joon. 5, e kujutatud keerulise (reaalse) materjali mudel koosneb joon. 5, c ja d esitatud mudelitest, mis on omavahel ühendatud järjestikku. Järelikult on selle kogudeformatsioon võrdne üksikmudelite deformatsioonide summaga. See tähendab, et piirkonna  $\sigma = \text{const}$  jaoks kehtiva reoloogilise võrrandi saame võrrandite (22) ja (32) paremate poolte liitmisel:

$$\varepsilon = \sigma \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-E_2/\eta_2 t}) \right] , \quad (37)$$

kuna aga piirkonnale  $\sigma = 0$  saame võrrandi seoste (23) ja (34) liitmisel:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + C_3 e^{\lambda t} . \quad (38)$$

Nagu selgub graafikult joon. 5, e, vastab ajamomendile  $t = t_0$  deformatsioon  $\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ . Asetades need tingimused

avaldisse (38), saame

$$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty = \varepsilon_\infty + C_3 e^{\lambda t_0},$$

millest leiame konstandi  $C_3$  :

$$C_3 = (\varepsilon_0 - 2\varepsilon_\infty) e^{-\lambda t_0}. \quad (39)$$

Lahendades nüüd koos võrrandid (29), (38) ja (39), saamegi otsitava avaldise:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - 2\varepsilon_\infty) e^{-E_2/\eta_2 (t-t_0)}. \quad (40)$$

Ülal tuletatud reoloogilised võrrandid on koondatult esitatud tabelis 1.

Viimane võrrand (40) iseloomustab deformatsiooni hääbumise ajalist kulgu, kui mudel vabastada koormusest.

Pärast keha mingit seisundit välja kutsunud tegurite tegevuse lakkamist toimuvat üleminekuprotsessi, mille järel saabub tasakaaluseisund, nimetatakse üldiselt relaksatsiooniks. Materjalide deformeerimisel on see nähtus tingitud nende viskoossusest (sisehõõrdumisest). Materjali iseloomustavat suurust  $\eta/E$  nimetatakse relaksatsiooniajaks. Relaksatsiooniaeg näitab kui palju kulub aega, võrreldes tasakaaluseisundiga, antud suuruse alghälbe vähenemiseks. Metalidel on üleminekuage tähtsuselt väike ja relaksatsiooni protsessidest ei räägita. Kui üleminekuage ei ole tähtsuselt väike, siis jäävad üleminekuperioodil süsteemi muutused maha välisjõu muutustest ning perioodilise koormuse (vibratsiooni) puhul esineb hüstereesinähtus. Polümeerides (nende hulka võib arvata ka taimsed ja loomsed materjalid) näiteks võivad relaksatsiooniprotsessid kesta mõnikord isegi päevi ja kuid. Võrdluseks võib tuua, et toatemperatuuril toimuvad relaksatsiooniprotsessid harilikes vedelikes  $10^{-8} \dots 10^{-10}$  sekundi jooksul.

Relaksatsiooninähtused esinevad deformeerimisel praktiliselt alati, ja ka allpool voolemisspiiri. Kui koormamiskiirus on suurem kui relaksatsioonikiirus, siis areneb põhili-

selt elastne deformatsioon. Teatava koormamiskiiruse korral võib viskoosne-elastne keha puruneda nagu jäik keha. Seda nähtust peab arvestama otstarbeka töörežiimi loomisel näiteks mulla harimisel. Siit ka mullateadlaste seisukoht - "mulla füüsikalise küpsuse seisund (oleneb niiskusest ja järelikult ka viskoossusest) on ühtede atrade ja künnikiiruste puhul üks, aga teiste puhul teine, sest nende tegurite muutumine tekitab erinevusi energiakulus ja künniviilu murenemises" (P. U. Bah-tin).

Relaksatsiooninähtusega on seletatav ka olukord, et põl-lutöomasina veeretakistus ei ole korrelatsioonis mulla kõva-dusega. Suurema huumusesisalduse puhul on veeretakistus väik-sem ja taastuv deformatsioon suurem. Huumusrikastes muldades on biogeense faasi ja järelikult polümeersete ainete ning sel-lest tingitud kõrgelastse deformatsiooni osatähtsus küllaltki suur ning jääkdeformatsioon väheneb.

Kõiki pingeid ja deformatsioone, mis ei relakseeru aja puudusel, nimetatakse külmutatuiks või sisemisteks. Kui defor-meerida juba eelnevalt deformeeritud materjale, võib vaja min-na hoopis kõrgemaid pingeid. Sellega võib seletada mitmesugus-te materjalide omaduste muutumist termilistes menetlustes.

Kõigi protsesside relaksatsiooninähtustel on üldine loo-mus, sest nende aluseks on süsteemi osakeste soojusliikumine. Nii saame relaksatsioonikiirust suurendada keha temperatuuri tõstmisega, mis avaldub sisehõõrdumise vähenemises ja vedeliku viskoossuse vähenemises mudeli (joon. 5, e) amortisaatorites  $\eta_2$  ja  $\eta_1$ , eriti just esimeses. Niiskusesisalduse suurene-misel väheneb ka materjali viskoossus, mida arvestame peami-selt  $\eta_1$ -ga. Võrdlemisi järsk omaduste muutumine toimub tem-peratuuril 40...50°C niisuguste materjalide puhul, nagu hein, turvas, põhk jms., mida tuleb seletada relaksatsiooniprotses-side kiirenemisega ja ka vee omaduste muutumisega.

Tegelikult on reaalsetes materjalides toimuvad protses-sid märksa keerulisemad ja mitmekesisemad, kui seda saab pos-tuleerida keerukaimagi mudeli abil. Igal materjalil, mis koos-neb erineva suurusega molekulidest, on näiteks terve relaksat-siooniahela spekter. Poorsete materjalide pressimisel muutub nende struktuur, väheneb gaasilise faasi hulk. Polümeeridel

toimub makromolekulide vananemine ja seotiste tugevnemine ning kõrgelastete deformatsioonide ajaline üleminek mittetaastuvateks. Viimane nähtus on seotud üksikute struktuurielementide purunemisega ja ka molekulide raskuskeskmete nihkumisega.

### 3.3. Muld põllumajandusliku materjalina

#### 3.3.1. Muld kui uurimisobjekt

Kõikide teiste põllumajanduslike materjalide kõrval on mullal eriline koht, sest ta on taimekasvatussaaduste kui põllumajanduslike materjalide tootmise keskkonnaks. Seetõttu on muld mitmesuguste teaduste ja distsipliinide (maaviljelus, taimekasvatus, mullateadus jms) uurimisobjektiks. Et muld on mullaharimismasinate poolt töödeldavaks materjaliks, siis on ta ka põllumajandusinseneri paratamatuks huviobjektiks.

On loomulik, et iga eriala käsitleb ja vaatleb mulda oma spetsiifilisest seisukohast. Põllumajandusliku mehhaanika vaatevinklist on muld mitte ainult kui passiivne ja surnud materjal, mis avaldab mehhaanilist vastupanu masinate tööorganeile, vaid ka kui elav keskkond, mille ehitus ja mehhaaniline koostis sõltub masinate tööorganite (ja mitte ainult tööorganite) mõjumisest sellele. Põllul liikudes ja töötades avaldavad masinate käiguosad ja tööorganid mullale mehhaanilist mõju. Iga sugune mehhaaniline mõjutamine aga kutsub mis tahes materjali puhul esile deformatsiooni, mille tagajärjel tekivad materjalis pinged. Eespool oli juba märgitud, et kui elastse deformatsiooni töö ületab teatud piiri, siis materjal puruneb. Paljude põllumajanduslike materjalide töötlemise eesmärgiks ongi nende purustamine (näit. terade jahvatamine jahuks). Teatud määral esineb purustamine ka mulla töötlemisel. Kuid see peab toimuma selliselt ja niisugusel määral, et tagatud oleks taimele eluks soodsad tingimused. Niisugused tingimused avalduvad väga paljude ja keeruka loomuga omadustena, millele määratlemine üheväärtuseliselt on peaaegu võimatu. Sest nagu enamikku põllumajanduslikest materjalidest, iseloomustab ka mulda mehhaanilise koostise mitmekesisus, füüsikaliste ja mehhaanikaliste omaduste mittekonstantsus ja muutuvus laiades piiri-

des ning bioloogiliste protsesside kulgemise pidevus. Kõik see tingib mulla uurimisel spetsiifilise iseloomu.

Erinevalt homogeenetest materjalidest (näiteks metallidest) ei saa me mulla puhul rääkida elastsusest selle sõna füüsikalises mõistes. Seoses sellega niisugused mehhaanikaliste omaduste parameetrid nagu elastsusmoodul, voolavuspiir, lubatud pinge jms. ei iseloomusta mulla vastupanu. Selleks, et otsustada mulla vastupanu üle mitmesuguste mõjutuste suhtes, tuleb kasutada spetsiifilisi näitarve, mis iseloomustaks tema töödeldavust.

Kui teadusel metallide vastupanust on lõppeesmärgiks välja töötada võtted konstruktiivsete elementide arvutamiseks tugevusele, jäikusele, siis põllumajanduslike materjalide korral on eesmärgiks välja töötada kõige soovimamad meetodid ja režiimid nende tehnoloogiliste omaduste loomiseks. Mulla tehnoloogilisteks omadusteks on ühelt poolt selle mehhaanikalised ja füüsikalised, teiselt poolt aga ka bioloogilised omadused, keemiline koostis ja struktuur.

V. P. Gorjatškini järgi tuleb mulda kui töötlemisobjekti uurida kolmeast seisukohast: 1) mulla materjal, mulla koostis, ehitus ja seisukord, 3) mulla omadused.

Mulla materjali all mõistab ta erinevate suurustega osakeste vahetõrget, mõõtmeid ja raskust, s.t. mehhaanilist koostist. Sellest olenevalt jagunevad mullad erinevaks liikideks (liivmullad, savimullad jt.).

Peale mineraalsete osakeste sisaldab muld ka vett, keemilisi elemente jne. Mulla ehitust iseloomustab osakeste paigutus, poorsus, tihendus, tükilisus, mis kõik määravad mulla veemahutavuse. Mulla seisukorda näitab niiskus.

Kõik eeltoodud mõisted määravad mulla füüsikalise-mehhaanikalised, agrotehnilised ja tehnoloogilised omadused.

### 3.3.2. Muld kui materjal

Mulda kui põllumajanduslikku materjali iseloomustavad paljud omadused, mida võib jaotada järgmistesse gruppidesse:

- 1) mehhaanikalised (mehhaniline koostis, kõvadus ehk

tilkus, tugevus, hõrdeomadused, abrasiivsus);

2) füüsikalised (erikaal, mahukaal, sidusus, niiskus, plástilisus, elastsus, kleepuvus);

3) keemilised (keemiline koostis, happesus);

4) agronoomilised (toiteainete sisaldus, struktuursus);

5) eksploatatsioonilised (eritakistus, kivisus).

M e h a a n i l i s t k o o s t i s t iseloomustatakse mineraalosakeste fraktsioonidesse jaotumise kaudu nende geometriliste mõõtmete (läbimõõdu) järgi, kusjuures iga fraktsiooni osatähtsust väljendatakse protsentides (tabel 2). Seejuures kannab iga fraktsioon kui mulla mehhaaniline element oma nime (tabel 3).

T a b e l 2

Mulla mehhaaniline koostis protsentides  
kogumahust (V. P. Gorjatškini järgi)

Mulla tüüp	Osakeste läbimõõt mm						
	alla 0,001	0,001... 0,005	0,005 0,010	0,01 0,05	0,05 0,25	0,25 1,00	üle 1,00
Saviliiv	0,95	3,85	2,93	6,55	63,13	22,12	1,01
Liivsavi	10,69	4,40	19,50	15,50	16,42	33,50	2,99
Mustmuld	30,10	15,23	7,76	33,91	8,10	0,27	4,63

T a b e l 3

Mulla mehhaaniliste elementide klassifikatsioon

Mulla elementaarosakeste	
Läbimõõt mm	nimetus

rahvusvaheline

alla 0,000?

kolloidid

0,0002...0,0020	savi
0,002...0,006	tolm
0,006...0,200	peenike liiv
0,2...2,0	jäme liiv
2,0...6,0 ja üle	kruus

N. A. Katšinski järgi

alla 0,0001	kolloidid
0,0001...0,0010	muda
0,001...0,050	tolm
0,05...1,00	liiv
1,0...3,0	kruus
3,0...20,0 ja üle	kivid
üle 0,01	"füüsikaline liiv"
alla 0,01	"füüsikaline savi"

Kõvadus iseloomustab mulla tugevust. Kõvaduseks (tihkuseks) nimetatakse mulla omadust avaldada vastupanu sellesse mingi keha (koonus, silinder, kera) surumisel. Kõvadust mõõdetakse rõhuühikutes. Üldjuhul avaldub see järgmise seosega:

$$H = \frac{P}{F} = qh, \quad (41)$$

- kus  $P$  - mulla vastupanu surumisele (jõuühikutes);  
 $F$  - mullasse surutava plunžri (keha) aluse ristlõikepind;  
 $q$  - mulla ruumaljumistegur; praktiliselt  $q = 0,1...9,0 \text{ kg/cm}^3$ , kusjuures alumine piir vastab värskele künnile, ülemine aga tallatud teele;  
 $h$  - plunžri mullasse surumise sügavus.

Mulla kõvaduse määramiseks kasutatakse spetsiaalseid seadmeid. Levinumaid on akadeemik Gorjatškini kõvadusemõõdik (tihedusemõõdik). Selles registreeritakse plunžri mullasse tungimise sügavus ja seadmesse kuuluva vedru deformatsioon isekirjutava seadmega, kusjuures survejõud määratakse vedru

eelneva tarerimisega määratud mõõtkava abil. See juhul aval-  
dub kõvadus järgmiselt:

$$H = \frac{h_2 \lambda}{F} , \quad (42)$$

kus  $h_2$  - isekirjutava seadmega fikseeritud kõvadusdiagrammi  
ordinaat (pikkusühikut);

$\lambda$  - vedru mõõtkava (jõuühikut pikkusühiku kohta);

$F$  - plunžeri ristlõikepind.

N. A. Katšinski järgi klassifitseeritakse mullad vastavalt nende kõvadusele järgmiselt:

$H > 10^4 \text{ kN/m}^2$  ( $100 \text{ kg/cm}^2$ ) - ülikõva,

$H = (5 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$  ( $50 \dots 100$ ) - kõva,

$H = (3 \dots 5) \cdot 10^3$  " ( $30 \dots 50$ ) - tihe,

$H = (2 \dots 3) \cdot 10^3$  " ( $20 \dots 30$ ) - tihedavõitu,

$H = (1 \dots 2) \cdot 10^3$  " ( $10 \dots 20$ ) - pehme,

$H < 10^3$  " ( $10$ ) - ülipehme.

Mulla kõvadus väheneb tema niiskuse suurenemisega.

Mulla hõõrdedomadusi iseloomustavad selle sise- ja välishõõrdetegurid, mille väärtused sõltuvad mitte ainult mulla mehhaanilisest koostisest, vaid väga olulisel määral ka niiskusest. Kui niiskusesisaldus on väike, siis mull ei kleepu selles liikuva keha (metalli) pinnale ja hõõrdeteguri väärtus on suhteliselt väike. Niiskuse suurenemisel suureneb mulla kleepuvus, mistõttu hõõrdeteguri väärtus kasvab kiiresti kuni mingi maksimumväärtuseni. Katsed on näidanud, et sellele maksimumväärtusele vastab mulla suhteline niiskus 80...90%. Niiskusesisalduse edasisel suurenemisel hõõrdetegur väheneb, sest kontaktpunktides ilmub vaba vesi, mis täidab määride osa.

G. N. Sineokovi järgi võib arvutustes kasutada järgmisi mulla ja metalli vahelisi hõõrdeteguri väärtusi:

$f = 0,25 \dots 0,35$  - liivmullad,

$f = 0,35 \dots 0,50$  - savimullad,

$f = 0,50 \dots 0,70$  - sidused mullad,

$f = 0,60 \dots 0,90$  - rasked liivsavimullad.

Muldade sisehõõrdetegur väärtus muutub liirides  
0,3 ... 0,7.

A b r a s i i v s u s e k s nimetatakse mulla omadust tekitada tema suhtes libisevate pindade abrasiivset kulumist. Abrasiivne kulumine sõltub suurel määral mulla füüsikalismehhaanikalistest omadustest. Eriti intensiivne on kulumine muldade korral, millo koostist iseloomustab "füüsikalise liiva" (osakesed läbimõõduga üle 0,01 mm) suur sisaldus. Seda seepärast, et liivas sisaldub kvartsi, mis on mulda moodulavatest mineraalidest kõige kõvem. Mulla abrasiivseid omadusi hinnatakse praktiliselt mullaharimismasinatööorganite töötavate elementide raske vähenemise kaudu. Nii näiteks on **ВНЕСОМ**: andmetel adratera kulumine (raskuse vähenemine) ühe hektari künnisel järgmine:

- 0,02...0,30 N ( ~ 0...30 G ) - savimullad,
- 0,30 ...1,00 N ( ~ 30...100 ) - saviliivmullad,
- 1,00...4,50 N ( ~ 100...450 ) - liivmullad.

Abrasiivne kulumine suureneb mulla kõveduse (tihkuse) suurenemisega. Mis puutub mulla niiskusesse, siis on täheldatud, et kõige väiksem on abrasiivne kulumine absoluutsel niiskusel 14...18%.

Mulla e r i k a a l sõltub selle koostisse kuuluva to mineraalide ja orgaaniliste ainete erikaalust. Keskmiselt on muldade erikaal piirides 24...28 kN/m<sup>3</sup> (2,4...2,8 t/m<sup>3</sup>), turvasmullal aga 12...13 kN/m<sup>3</sup>.

Mulla m a h u k a a l sõltub selle erikaalust ja osakeste paiknemisest (s. t. ehitusest, struktuurist). See on olemas mahukaal ka kibiide paiknemise sügavusest ja töötlusastmest. Kobedate ja orgaaniliste ainete poolest rikaste muldade mahukaal võib olla väiksem kui 10 kN/m<sup>3</sup>. Värske künnikihil on mahukaal keskmiselt 10...11 kN/m<sup>3</sup>, tihedal künnikihil aga 12...14 kN/m<sup>3</sup> ning künnikihtialustel mullakihtidel 16...13 kN/m<sup>3</sup>.

Mulla eri- ja mahukaalu vahelist suhet võib hinnata mulla poorsuse järgi. Mullas sisalduva õhu hulk kõigub suurtes piirides, keskmiselt moodustab aga 20...30% kogumahust.

N i i s k u s on mulla füüsikaline omadus, millest

sõltuvalt muutuvad ka tema mehhaanikalised omadused. Nii näiteks võib liiskusest olenevalt üks ja sama muld olla kas kõva või pehme. Kasutatakse absoluutse, suhtelise ja mahulise niiskuse mõisteid, mis avalduvad vastavalt:

$$W_a = \frac{G_b}{G_{cn}} 100 = \frac{G_{mn} - G_{cn}}{G_{cn}} 100 \% , \quad (43)$$

$$W_{ot} = \frac{W_a}{W_H} 100 \% ; \quad (44)$$

$$W_{00} = W_a \gamma , \quad (45)$$

kus  $W_a, W_{ot}, W_{00}$  - vastavalt absoluutne, suhteline ja mahuline niiskus;

$G_b$  - mullaproovis oleva vee raskus;

$G_{mn}, G_{cn}$  - vastavalt märja ja kuiva mulla raskus (s. t. mullaproovi raskus enne ja pärast kuivatamist);

$W_H$  - mulla niiskus kõige väiksema niiskusemahutavuse korral (protsentide kaalust);

$\gamma$  - mulla mahukaal.

Vee hulka, mida muld on võimeline neelama kuni küllastumiseni, nimetatakse täielikuks niiskusemahutavuseks.

Igal mullal on oma nn. optimaalne niiskus, s. t. niiskus, mille korral on muld töötlemiseks küps (tabel 4). Olgu aga märgitud, et optimaalse niiskuse väärtus on suhteline suurus, see sõltub töötlemise operatsioonist (kündmine, kultiveerimine jne.), tööorgani tüübist ja kujust ning tööorgani liikumise kiirusest mulla suhtes (tabel 5).

Muldade optimaalne absoluutne niiskus (%)

M u l d	M. H. Pigulevski järgi	N. A. Katšinski järgi	
		optimaalne	lubatud
Paske liivsavi	15...26	-	-
Keskmine liiv- savi	13.. 24	18...22	11...29
Kerge liivsavi	11...22	16...19	10...26
Saviliiv	8...18	12...15	8...20
Liivane	4...13	-	-

Tabel 5

Muldade optimaalne niiskus (protsentides täielikust veemahutavusest) olenevalt adra liikumiskiirusest (P. U. Bahtini järgi)

Põllu tehniloogiline seisund	Adra kiirus m/s		
	1,06	1,25	1,46
3-aastane heinkamar	73,9	86,0	90,7
Oratüüstik	64,9	72,2	74,3
Taliniisu tüüstik	60,0	66,7	74

Mulla p l a s t i l i s u s on selle võime deformeeruda välisjõudude mõjul. Plastilisust väljendatakse arvuga mis kujutab endast plastilise oleku piirniiskuste vahet  $N_2-N_4$  kusjuures  $N_2$  on mulla niiskus (protsentides mulla kuivainest) selle vo-lavuspiiril ja  $N_4$  - niiskus mulla üleminekul kõvaks k haks (seda iseloomustab olukord, kui rulda saab vee-retada 3 mm läbimõõduga rulli). Savi plastilisus on 15...27, liivsavil 7...15, keskmisel liivsavil 1...7 ja mitteplastilistel muldadel 0...1. Piirniiskuste väärtused on näiteks

laske savimulla korral  $W_1 = 26\%$ ,  $W_2 = 53\%$ , keskmisel liiv-  
savil aga  $W_1 = 18\%$ ,  $W_2 = 33\%$ .

Mulla e l a s t s u s on võime taastada oma esialgne  
kuju ja mõtmed pärast deformatsiooni esilekutsunud jõudude  
mõju katkestamist. J. V. Lukanini järgi moodustavad mulla esma-  
kordsel koormamisel elastsed deformatsioonid 30...50% kogu  
deformatsioonist, teisel koormamisel aga kuni 70...80%.

Mulla k l e e p u v u s on mulla osakeste võime klee-  
puća omavahel ja kõvadele kehadele. See tuleneb veekile moo-  
dustumisest kontaktpindadel, kuid samuti molekulaarsetest mõ-  
judest. Mulla kleepuvust iseloomustatakse jõuga (pinnaühiku  
kohta), mida on vaja rakendada kleepunud mulla ärrarebimiseks.  
Kleepuvus suureneb mulla disperssuse suurenemisega: savimul-  
lad on kleepuvamad kui liivmullad. Väikseima niiskusemahuta-  
vuse korral jaotatakse mullad sõltuvalt kleepuvuse astmest järg-  
mistatse kategooriatesse:

- $>15 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}^2$  - piirviskoosne;
- $(5...15) \cdot 10^{-2} \text{ N/m}^2$  - tugevalt viskoosne;
- $(2...5) \cdot 10^{-2} \text{ N/m}^2$  - keskmiselt viskoosne;
- $(0,5...2,0) \cdot 10^{-2} \text{ N/m}^2$  - nõrgalt viskoosne;
- $(0,1...0,5) \cdot 10^{-2} \text{ N/m}^2$  - mure, püde.

Mulla k e e m i l i n e k o o s t i s ja h a p p e -  
s u s ei mõjuta olulisel määral põllutöömashinate töötamis-  
tingimusi. Ülevaade nendest omadustest antakse agronoomilis-  
tes kursustes. Samuti kuulub mullateaduse ja üldise maavilje-  
luse valdkonda mulla t o i t e a i n e t e s i s a l d u s  
kui omadus, mis sõltub mulla keemilisest koostisest. Mulla  
s t r u k t u u r s u s on üheks kõige tähtsamaks agronoo-  
miliseks omaduseks, mis väga suurel määral sõltub mullahari-  
mismashinate tööorganite tööst. Seetõttu peatume sellel küsi-  
musel pikemalt järgmises punktis.

Mulla e r i t a k i s t u s e k s nimetatakse selle  
vastupanu rehhaanilisele töötlemisele. Järelikult saab erita-  
kistuse arvvaärtusest rääkida vaid seoses töötleva mullahari-  
mismashina ja selle tööorgani tüübiga. Eritakistust kündmisel  
väljendatakse jõuga künniviilu ristlõikepinna ühe ühiku koh-

ta (vt. käesoleva sarja II osa "Mullaharimismasinad", tabel 4), teiste mullaharimistööde korral aga jõuga haardelaiuse ühe ühiku kohta.

Mulla k i v i s u s e hindamiseks kasutatakse mitmesuguseid tunnuseid. Kivisust hinnatakse:

1) kivide protsentuaalse hulga järgi töödeldavas kihis (N. A. Katšinski järgi):

- kive alla 0,5% - mittekivine,
- " 0,5...5,0% - nõrgalt kivine,
- kive 5,0...10,0% - keskmiselt kivine,
- " üle 10% - tugevasti kivine;

2) kivide mahulise koguse järgi (tabel 6);

3) kündmist mõjutavate kivide arvu järgi (tabel 6).

T a b e l 6

Muldade kivisus (K. Kildema järgi)

Kivisuse aste	Kivide kogus m <sup>3</sup> /ha		Küandmist mõjutavate kivide arv tk/ha
	nähtavaid	kokku 25 cm paksuses pinnaühikis	
Väga tugev (5)	üle 23	üle 70	üle 2000
Tugev (4)	7...23	20...70	500...2000
Keskmine (3)	2...7	7...20	200...500
Nõrk (2)	1...2	2...7	50...200
Väga nõrk (1)	alla 1	alla 2	alla 50

### 3.3.3. Muld kui taimede kasvukeskkond

Olla taimedele kasvukeskkonnaks on mulla kõige tähtsam funktsioon. Et taimed võtavad mullast toitaineid juurte kaudu, siis oleneb saadava energia hulk mitte ainult toitainete sisaldusest mullas, vaid ka juurekava arenemise võimalus-

test. Eespool oli juba öeldud, et energia juurdepääs elusorganismi toimub läbi pinna (vt. p. 2.1.1.). Järelikult on taime poolt mullast võetav energia seda intensiivsem, mida suurem on taime juurekava kogupindala. Et juuspeened narmasjuured saaksid soodsalt areneda ja tungida mullaosakeste vahele, selleks peab mullal olema ka soodne geomeetriline ehitus. Mulla geomeetrilist ehitust nimetatakse struktuuriks. Seega tuleb mulla struktuuri all mõista mehhaaniliste elementide kogumike (agregaatide) omavahelist asetust ja suuruslikku vahet. Struktuursus - see on mulla omadus laguneda üksikuteks tükikesteks, mis kujutavad endast struktuurset ühikut kui mullamaterjali liitunud kogumit. Mulla struktuuri iseloomustab struktuuriagregaatide kuju ja suurus, nende poorsus, bioloogiline stabiilsus, mehhaaniline tugevus ja vastupidavus vee lahustavale toimele. Agregaatide suuruse järgi eristatakse järgmisi struktuure:

- üle 10 mm - megastruktuur,
- 10...0,25 mm - makrostruktuur,
- 0,25...0,01 mm - jäme mikrostruktuur,
- alla 0,01 mm - peen mikrostruktuur.

Agronoomilisest seisukohast on kõige suurem tähtsus makrostruktuuril.

Ilmselt on struktuuragregaatide suurusest ja nende omavahelisest asetusest sõltuv ka nn. mulla poorsus, mis on oluline bioloogiliste protsesside toimumise ja mulla veemahutavuse seisukohalt. Seega on struktuursuse kaudseks näitarvuks ka vee läbilaskvus, kapillaarvee tõusmise kiirus ja tihendatavus sademete mõjul, s. o. loomulik tihendatavus.

Niisiis on mulla struktuursuse tagamine mullaharimismasinatega üheks tähtsamaks ülesandeks. Kuidas seda saavutada, selle mõistmiseks peame kõigepealt struktuursust kui mulla geomeetrilist ehitust teoreetiliselt kirjeldama.

Kui oletada, et mulla struktuuragregaatideks on ühesuguse läbimõõduga kerakesed, siis on võimalik nende tiheda paiknemise kaks varianti - paralleelsete ridadena (joon. 6,a) ja malekorras (joon. 6,b). Vaadeldes kerakeste niisugust paigutust ühes kuupmahus, võime avaldada pooride kogumahu  $\Sigma V_n$ :

$$\Sigma V_n = V_k - \Sigma V_w, \quad (46)$$

kus  $V_k$  - kuubi maht;  
 $V_w$  - ühe kerakese maht.

Kasutades skeemi joonisel 6, a avaldub seos (46):

$$\begin{aligned} \Sigma V_n' &= a^3 - n^3 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \\ &= (nd)^3 - \frac{4}{3} \pi \left(\frac{nd}{2}\right)^3 = \\ &= \left(1 - \frac{\pi}{6}\right) (nd)^3 = \\ &= 0,477 a^3, \end{aligned} \quad (47)$$

kus  $a$  - vaadeldava kuubi serva pikkus;

$n$  - kerakeste arv ühes reas;

$d$  - kerakeste läbimõõt.

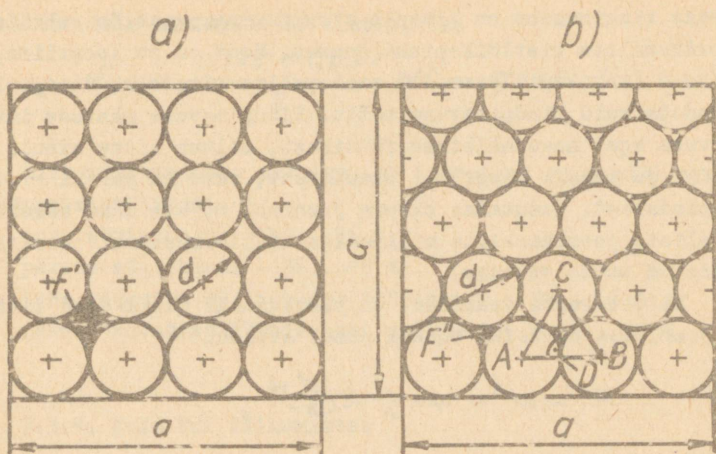
Nagu näha, saab seosest (47) teha mõnevõrra ootamatu järelduse: paralleelsete ridadena paiknevate kerakeste (mullaagregaatide) korral ei sõltu nende vaheliste pooride kogumaht kerakeste suurusest (läbimõõdest). Jagades võrrandi (47) mõlemad pooli kuubi mahuga  $V_k = a^3$ , selgub, et sellisel paigutamisel moodustab pooride maht 47,7% vaadeldavast kogumahust.

Vaatleme nüüd, kas analoogiline järeldus kehtib ka malekorras paiknevate kerakeste puhul.

Nagu selgub jooniselt 6, b, on kerakeste horisontaalkihtide arv  $a/\bar{CD}$ . Seega kuubis asuvate kerakeste üldarv on  $n^2 a/\bar{CD}$  ( $n$  - kerakeste arv ühes horisontaalreas), seos (46) aga avaldub

$$\begin{aligned} \Sigma V_n'' &= V_k - \Sigma V_w = \\ &= a^3 - \frac{n^2 a}{\bar{CD}} \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3. \end{aligned} \quad (48)$$

Et kolmnurk  $ABC$  on võrdkülgne, siis  $\bar{CD} = \bar{AC} \sin 60^\circ = d \sin 60^\circ = 0,866 d$ . Pidades veel silmas, et  $a = nd$ , saame võrrandi (48) kirjutada kujul:



Joon. 6. Kerakujuliste mullaagregaatide korrapärase tiheda paiknemise variandid.

$$\begin{aligned} \Sigma V_n'' &= (nd)^3 - \frac{n^3 d}{0,966 d} \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \\ &= \left(1 - \frac{\pi}{6 \cdot 0,966}\right) (nd)^3 = 0,376 a^3. \quad (49) \end{aligned}$$

Seos (49) näitab, et ka malekorrast paiknemise korral ei sõltu pooride maht kerakeste lähimõõdust, vaid moodustab 39,6 % vaadeldavast kogumahust.

Ülaltoodust saame teha kokkuvõtte: mulla poorsus ei sõltu struktuuragregaatide suuruselt, vaid ainult nende paiknemise korrast. Kuid, kuigi poorsus on mulla struktuursuse üheks näitarvuks, ei saa me teha järeldust, nagu poleks osakeste suurus üldse tähtis. Nimelt annab muld taimejuurtele toitaineid (energiat) läbi pinna. Mulla struktuurosakeste kogupindala aga on kindlasti sõltuv osakeste suuruselt - mida väiksemad on osakesed, seda suurem on nende kogupindala. Kuid misugune on osakeste optimaalne suurus? Sest väga väikeste osakeste korral on tegemist juba tolmustunud mullaga, mis täidab kõik struktuuragregaatide vahelised alad ja kogu muld muutub struktuurituks, kaotab viljakuse. Üheks osakeste suurus mää-

ravaks tingimuseks on ilmselt struktuuragregaatide vaheliste poorikanalite ristlõikepinna suurus. Sest on ju loogiline, et niiskuse (nn. kapillaarvesi) saab mullas altpoolt ülespoole suunduda vaid pindpinevuse tõttu. Pindpinevuse nähtuse intensiivsus aga, nagu mäletame füüsikast, sõltub mitte ainult vedeliku ja kanali materjali omadustest, vaid ka kanali ristlõike pindalast. Kasutades skeemi joonisel 6, avaldame kerakeste vaheliste poorikanalite minimaalse ristlõikepinna (joonisel 6 täidetud musta värviga).

Ei ole raske veenduda, et poorikanali minimaalne ristlõike joon. 6, a esitatud skeemi puhul avaldub

$$F' = d^2 - 4 \cdot \frac{1}{4} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2,$$

joon. 6, b esitatud skeemi korral aga

$$\begin{aligned} F'' &= \frac{1}{2} \overline{AB} \cdot \overline{CD} - 3 \cdot \frac{1}{6} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \\ &= \frac{1}{2} d^2 \sin 60^\circ - \frac{\pi}{2} \left(\frac{d}{2}\right)^2. \end{aligned}$$

Pärast teisendamist saame vastavalt:

$$F' = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) d^2 = 0,215 d^2, \quad (50)$$

$$F'' = \left(\frac{0,866}{2} - \frac{\pi}{8}\right) d^2 = 0,041 d^2. \quad (51)$$

Kui me nüüd teaksime kapillaarvee soodsaks liikumiseks vajaliku mullakanalikese ristlõikepinna suurust, siis seoste (50) ja (51) abil saaksime määrata mulla struktuuragregaatide vastava läbimõõdu osakeste paralleelsete ridadena ja malekorras paiknemise puhul.

On selge, et reaalsed mullaosakesed on erineva suurusega ja nende omavaheline paigutus on korrapäratu. Kuid on tõenäoline, et korralikult haritud struktuurse mulla puhul võime olukorda vaadelda joonisel 6 toodud variantide vahepealsena. Sel juhul, opereerides aritmeetiliste keskmiste väärtustega, saame poorsuseks

$$V_{n, cp} = \frac{47,7 + 39,6}{2} = 43,65 \% \quad (52)$$

ja mullakanali minimaalseks ristlõikeks

$$F_{cp} = \frac{0,215 + 0,041}{2} d^2 = 0,128 d^2. \quad (63)$$

Illustreerimiseks märgime, et katsetega on saadud poorsuse järgmisi väärtusi:

enne sügiskünda - 47...56 %;

pärast sügiskünda - 56...65 %;

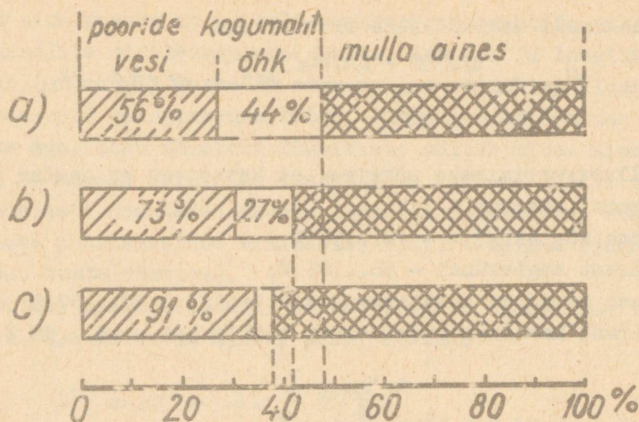
enne kevadist külvieelset töötlemist - 50...57 %;

pärast kevadist külvieelset töötlemist - 48...59 %.

### 3.3.4. Muld kui liikumistee

Seoses põllumajanduslike tööde mehhaniseerimisega on muld saanud veel ühe olulise funktsiooni - ta pole mitte ainult taimedele kasvukeskkonnaks, vaid ka väga rasketele masinatele liikumisteeks. Need kaks funktsiooni on teineteisega vastuolus: taimed nõuavad kobedat struktuurset mulda, masinate liikumisel aga muld tihendatakse ja purunevad struktuuragregaadid. Tagajärjeks on pooride mahu vähenemine (joon. 7) ja mulla järkjärguline tolmustamine, mis halvab õhu- ja veerežiimi mullas ning vähendab mulla viljakust. Tallatud ja tihenenud muld vajab järelkobestamist, mis sisuliselt pole muud kui mehaaniline töötlemine. See omakorda toob kaasa struktuuragregaatide lõhkumise ja mullaosakeste peenestamise. Niisiis toimub protsess nagu ahelreaktsioon. Seoses sellega on kaasaja maailma põllumajanduses üles kerkinud tõsine probleem, mis on sünnitanud mullaharimise tehnoloogias uue suuna - mulla minimaalne töötlemine. Olenevalt tingimustest ja olukorrast võib minimaaltöötlemisel kui üldsuunal olla palju eri variante. Tähtsamad neist on järgmised:

- 1) kündmine koos külvamisega,
- 2) künnijärgne mullaharimine koos külvamisega,
- 3) külvamine traktori jälge,
- 4) mulla ribastöötlemine,
- 5) mulla keemiline töötlemine,
- 6) multšimine.



Joon. 7. Traktorirataste tallamise mõju mulla poorsusele ja vesi ning õhuga täidetud pooride vahekorrale (W. Sõhis järgi). *a* - muld ilma tallamata; *b* - tallatud kummidega 15-30, rõhk kummis 45 kN/m<sup>2</sup>; *c* - tallatud kummidega 12,75-28, rõhk kummis 160 kN/m<sup>2</sup>.

Toodud loetelu osimesed kaks võtet seisnevad sisuliselt kompleksagregaatide kasutamises, millega saavutatakse paljude tööoperatsioonide tegemine agregaadid ühe töökäiguga. Seejuures eelistatakse kasutada aktiivseid mullaharimistööorganeid (pöörlevad, vibreerivad jms).

Külvamine traktori jälge seisneb selles, et värskelt küntud või kultiveeritud põllul liigub vahelharitava kultuuri seemet muldaviiv seemendi vahetult traktori ratta jäljes.

Mulla ribastöötlemisel töödeldakse vaid ribad külvamisina seemendite ees, seemendite vahele jäävad ribad aga jäetakse kobestamata. Ribastöötlemise üheks alaliigiks on külvamine kündmata kõrrepõllule.

Mulla keemiline ehk "nulltöötlemine" põhineb herbitsiidide kasutamises, mis hävitavad mullas kõik taimed, seejärel aga kiiresti haihtuvad ja lagunevad. Antud võtte võimaldab töödelda põldu ka ribadena, kasutamata seejuures mitte mingisugust mehhaanilist töötlemist.

Multšimine (inglisekeelsest sõnast "mulch" - pehkinud õled või puulehed) on võtte, kus põllu pind kaetakse peenestatud põhukihiga, mis kaitseb mulda kuivamise eest ning kõdunedes loob soodsad tingimused mikroorganismide tegevuseks. Niisugune muld ei vaja enam mehhaanilist kobestamist.

On kindlaks tehtud, et masinate poolt tekitatud tallamise mõju ulatub isegi kuni 2 m sügavusele, mida me mehhaanilisel teel vaevalt oleme võimelised kõrvaldama. Loomulikud bioloogilised protsessid, mis seda mõju kaotavad, aga toimuvad väga aeglaselt. Tallamise mõju oleneb ka mulla niiskusest - niiskuse suurenemisel mõjub tallamine sügavamalt.

Halvasti mõjub ka masinate käiguosade (rattad, roomik) libisemine. 15...20%-lise libisemise puhul purustatakse kapillaarid ja vee- ning õhurežiim halveneb. Seetõttu peab töötamine toimuma mulla soodsal niiskusel ning tuleb vältida masina kiiruse järske muutusi, järske pöördeid ja tagada traktorile õige koormusrežiim.

Muld kui liikumistee on probleem, mis hõlmab väga paljusid kompleksset lahendamist nõudvaid küsimusi. Selle alahindamine maksab valusasti kätte eriti stepitingimustes, kus suurt osa etendab ka tuuleerosioon.

### 3.4. Materjalide töötlemisprotsesside mehhaanika ja löök

Põllumajanduslike materjalide töötlemisprotsessid, mida täidavad põllutöomasinad, põhinevad deformeerimisel, purustamisel, löögil ja võnkumisel. Seejuures on põhiliseks protsessiks deformeerimine kui purustamise ja löögi paratamatu kaasnähe. (Deformatsiooniprotsessist andsime ülevaate juba punktides 3.1. ja 3.2.).

Deformatsioon ja sellega kaasnev purustamine esineb järgmistes tehnoloogilistes operatsioonides: mullaharimine (künnimine, kultiveerimine, äestamine, libistamine, randaalimine, kõrre koorimine), külvamine (seemendite tööga kaasnev), taime niitmine ja peenestamine (heinaniitmine, silo koristamine ja peenestamine, teravilja koristamine, lina kitkumine,

kartuli ja juurvilja koristamine), taimede kasvuaegne hooldamine (harvendamine, salkamine, umbrohu hävitamine), jahu jahvatamine, kartuli pudrustamine, hekseldamine jms.

Löögi toimel tekitatud deformatsioon ja sellele järgnev purunemine esineb teravilja peksmisel, kõikides perioodiliselt toimuvates löikeprotsessides (niitmine standardse edasi-tagasi liikuva vikatiga, silo purustamine, põhu hekseldamine, juurvilja peenestamine, mullaharimine mullafreesidega), lina kopardamisel ja ropsimisel jms.

Võnkumine on peamine seaduspärane, millele rajanevad materjalide segamine ja separeerimine.

Erinevus löögiga ja löögita toimuvate tööde vahel on tinglik ning seisneb tööd sooritava jõu mõjumise kiiruses. Niiöelda mittelöögilise tegevuse puhul muutuvad kiirused pidevalt. See tähendab, et lõpmata väikese ajavahemiku jooksul muutuvad ka kiirused lõpmata väikese suuruse võrra, mistõttu mittelöögilise tegevuse graafik kujutab endast sujuvat kõverat.

Kui mingi massi  $m$  kiirus muutub kiirusest  $v$  kuni kiiruseni  $v + \Delta v$ , siis selle massi kineetilise energia muutumine avaldub:

$$\Delta E = \frac{m(v + \Delta v)^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = mv\Delta v + \frac{m(\Delta v)^2}{2}. \quad (54)$$

Mittelöögilisel tegevusel, s. o. kiiruse  $\Delta v$  lõpmata väikesel muutumisel ajaelemendi  $\Delta t$  jooksul, on liige  $\frac{1}{2} m(\Delta v)^2$  lõpmata väike ja võrreldes liikmega  $mv\Delta v$  tühise tähtsusega, mistõttu võime selle jätta arvestamata. Sel juhul energia (töö) ühes ajaühikus kui võimsus avaldub:

$$N = m \frac{\Delta v}{\Delta t} v = mav = P v. \quad (55)$$

Löögi puhul aga, s. t. seose (54) viimast liiget arvestades saame:

$$N = m \frac{\Delta v}{\Delta t} v + \frac{1}{2} m \frac{\Delta v}{\Delta t} \Delta v =$$

$$= m \frac{\Delta v}{\Delta t} \left( v + \frac{1}{2} \Delta v \right) = P \cdot \left( v + \frac{1}{2} \Delta v \right). \quad (56)$$

Seoste (55) ja (56) võrdlemisel selgub, et löögi puhul on jõu  $P$  võimsus suurem. Seetõttu kasutatakse viimasel ajal paljudel juhtudel jõu sujuva mõjumise asemel perioodiliselt mõjuvat jõudu, s. t. vibratsiooni, mis sisuliselt on perioodiliselt mõjuvad löögid (vibratsioonkultivaator, vibratsioonkartulivõtmismasin jt.).

Töö  $\frac{1}{2} m (\Delta v)^2$  kulub keha deformeerimiseks ja sageli nimetatakse seda deformatsioonitöök. Jõu sujuval (löögita) mõjumisel on deformatsioon tühine ning nimetatud deformatsioonitöö kulub liikumisele. Löögi korral on deformatsioon tunduv. Kui tegemist on täielikult elastsete kehadega, siis pärast deformatsiooni taastub keha esialgne kuju ning seetõttu tekib samasuguse impulsi vastupidine löök. Põllumajanduslikud materjalid on aga väheelastsed.

Põllutöömashinate töötamisel on küllalt sage olukord, et lööki saav keha (materjal) ja lööki andev keha (tööorgan) liiguvad löögi protsessis ühes ja samas suunas (näiteks viljapeksumasina või kombaini peksutrummel ning pekstav viljakiht). Liikugu kaks keha massidega  $M$  ja  $m$  ühes suunas algkiirustega vastavalt  $V_0$  ja  $v_0$ , kusjuures  $V_0 > v_0$ . Kahe keha kohtumisel (löögil) nende kiirused muutuvad ning pärast lööki liigub keha  $M$  kiirusega  $V$ , keha  $m$  aga kiirusega  $v$ . Järelikult, tähistades kehade kokkupõrke momendi kiiruse tähega  $u$ , võime tõukeimpulsi kui liikumishulkade muutused kirjutada järgmiselt (elastse löögi korral):

$$\left. \begin{aligned} P \Delta t &= M(V_0 - u), \\ P \Delta t &= m(u - v_0), \\ P \Delta t &= M(u - V), \\ P \Delta t &= m(v - u). \end{aligned} \right\} (57)$$

Võrranditest (57) saame võrduse

$$MV_0 - mv_0 = (M+m)u = MV + mv, \quad (58)$$

mis näitab, et liikumishulk enne lööki, löögi ajal ja pärast lööki jääb konstantseks. Asetades seosest (58) saadava  $u$  avaldise

$$u = \frac{MV_0 + mv_0}{M+m} = \frac{MV + mv}{M+m} \quad (59)$$

süsteemi (57) esimesse ja kolmandasse võrrandisse, saame jõu impulsi  $P\Delta t$  avaldistele anda uued kujud:

$$\left. \begin{aligned} P\Delta t &= M(V_0 - u) = M\left(V_0 - \frac{MV_0 + mv_0}{M+m}\right) = \frac{Mm}{M+m}(V_0 - v_0), \\ P\Delta t &= M(u - V) = M\left(\frac{MV + mv}{M+m} - V\right) = \frac{Mm}{M+m}(v - V). \end{aligned} \right\} (60)$$

Võrranditest (60) selgub, et löögiprotsessi kui nähtust võib vaadelda ka nii: enne lööki liigub suhteline mass  $\frac{Mm}{M+m}$  kiirusega  $V_0 - v_0$ , pärast lööki aga kiirusega  $v - V$ .

Süsteemist (60), sest impulsid  $P\Delta t$  on võrdsed, saame, et

$$V_0 - u = u - V \quad (61)$$

ja

$$V_0 - v_0 = v - V. \quad (62)$$

Seosest (61) ja ka süsteemist (57) järeldub, et kokkupõrkeomendi kiirus  $u$  on alg- ja lõppkiiruste aritmeetiline keskmine, s. o.

$$u = \frac{V_0 + V}{2} = \frac{v_0 + v}{2}, \quad (63)$$

seosest (62) aga, et kokkupõrkavate kehade alg- ja lõppkiiruste summad on võrdsed, s. o.

$$V_0 + V = v_0 + v. \quad (64)$$

### 3.5. Materjalide purustamise teooriast

#### 3.5.1. Purustamise protsessi iseloomustus

Vaatamata materjalide purustamise üha kasvavale tähtsusele mitte ainult põllumajanduses, vaid ka tööstuses, on purustamise protsessi teoreetiline kirjeldamine välja töötatud mitteküllaldase tasemeni, arvukate eksperimentaalsete uurimiste andmed on aga peaaegu üldse üldistamata. Eriti kehtib öeldu põllumajanduslike materjalide kohta. Tõsi, materjalide purustamine oleneb nende tugevusest, kusjuures õpetus materjalide tugevusest nagu üldine materjaliõpetuski baseerub üksikasjadeni väljatöötatud tugevusteoorial, mida edukalt kasutatakse insener-konstruksioonide arvutamisel. Kuid kõik see kehtib homogeensete materjalide kohta. Põllumajanduslikud materjalid on aga mittehomoogeensed, nende füüsikalise-mehaanikalised omadused pole püsivad, samuti pole ühtlane nende koostis. Niisugusel juhul on võimatu arvutada pingestatud olukorda ja seepärast kaotab mõtte ka katse, mis peaks näitama tugevuse väärtuste vastavust arvutuslikule pingeolukorrale. Peale selle, tugevusõpetuses kasutatakse tugevuspiiride kindlaksmääramisel kindla korrapärase kujuga proovikehi. Et aga põllumajanduslik materjal on oma olemuselt korrapäratu kujuga kehade koosseis väga ebaühtlaste ja pidevalt muutuvate omadustega kogum, siis selles tekkivate pingete arvutamine on võimatu. Seepärast on täiesti loomulik, et põllumajanduses lahendatakse materjalide purustamise probleemid pikaajaliste katsetega kogutud kogemuste abil, s. t. katsemasina konstrueerimisel lähtutakse tingimusest, et tegemist on homogeense materjaliga, hõlsemate täpsustuste ja täiustuste aluseks aga on katsetamine reaalses olukorras.

Muide, põllumajanduslike ja tööstuslike materjalide töötlemisel on veel üks oluline erinevus. See, mis tööstuslikul tootmisel moodustab jäägi (näiteks metalli laastud), on põllumajanduses põhiproduktiks (näiteks kobestatud või purustatud künniviil, jahu, hekslid jms.).

Vaatleme nüüd purustamise protsessi üldiselt.

Mis tahes materjalile mis tahes tööorganiga mõjumisel tekivad selles pingestatud olukord ja deformatsioonid, seda

igas sihis ja suunas. Kohaliku tugevuspiiri ületamine tähendab sisejõudude purunemist nihke, habra murdumise või nende koosmõjul. Nihe tekib puutepingete, habras murdumine aga tõmbepingete tagajärjel. Seejuures täheldatakse ka materjali struktuurseid muutusi, eelkõige aga murdepinnas. Purustamise nähtusele eelneb pragude tekkimine, milleks üldjuhul on neli põhjust:

- 1) materjalis on juba nn. loomulik algpragu,
- 2) materjalis esineb ebanormaalne sisepingeolukord,
- 3) algpõhjuseks pragude tekkimisel on materjali välispiina kaudu arenenud keemiline reaktsioon (näit. korrosioon),
- 4) praod tekivad välisjõudude mõjul kujunenud pingeolukorra tõttu.

Kui kolm esimest põhjust mingi materjali puhul täielikult puuduvad, siis toimub purunemine molekulaarse tugevuse piiril, mille puhul  $\sigma/E \approx 10^{-4}$  ( $\sigma$  - tõmbepinge,  $E$  - elastusmoodul). Enamasti aga, nagu on tähele pandud, on materjali tugevuspiir (tõmbele) tunduvalt väiksem molekulaarsest tugevusest, mis viitab sellele, et loomulike algpragude ja sisepingete ebanormaalne olukord on tavaline nähtus. Et algpragude asetus, kuju ja pikkus ning sisepingeolukord on juhusliku loomusega, siis ka katsetamisel saadud tugevuspiiri väärtuste suhteliselt suur kõikumus on seaduspärane nähe. Loomulikult on nimetatud põhjuste osatähtsus seda suurem, mida suurem on uuritava materjali proovikeha või osakene. Sellest järeldeb, et materjali tugevus kasvab osakeste vähenemisega.

Välisjõududest pingeolukorra tekkimise mehhaanikalisteks alusteks võivad olla järgmised süsteemid ehk mehhanismid:

- 1) osakene allutatakse koormusele kahe kõva pinna vahel, milleks võivad olla masinate tööorganid või muud osad (näiteks aktiiv- ja passiivtera lõikamisel, veskikivid jahu jahvatamisel jms.);

- 2) osakesele antakse koormus ühe kõva keha poolt, milleks võib olla masina tööorgan või muu osa (näiteks mullaharimismasina tööorgani mõjumine mullale, käsivikatiga niitmine, lina kupardamine ja ropsimine jms.); seejuures purustamise energia määrab tööorgani kineetiline energia, mistõttu koormuse andmise kiirus peab olema tunduvalt suurem kui esimesel

juhul ja purustamine toimub löökkoormuse mõjul;

3) osakene ei saa koormust üheltki kõvalt kehalt, pinge materjalis tekib selle liikumisel ümbritsevas keskkonnas või osakese enda liikumisest tingituna (näiteks osakese pöörlemisel tekkiva tsentrifugaaljõu mõjul, nagu koore eraldamine koorelahuti abil).

### 3.5.2. Pingeolukord ja pingering

Välisjõudude mõjumisel põhjustatakse kehas sisejõud, mille komponentideks on normaaljõud (risti pinnaga) ning nihkejõud (mõjub piki pinda). Vastavalt normaaljõu toimele nimetatakse teda täpsustavalt kas tõmbe- või survejõuks. Kehast või materjalist eraldatud osa suhtes on sisejõud välisjõududeks. Sisejõu intensiivsust pinna mingis punktis nimetatakse pingeks, kusjuures sisejõu komponentide vastavad pingekomponendid on: normaalpinge  $\sigma$  (täpsustavalt tõmbepinge ja survepinge) ja nihkepinge  $\tau$ . Pingete märgid vastavad sisejõudude märkidele - tõmbepinge loetakse positiivseks ja survepinge negatiivseks, kuna aga nihkepinge märk sõltub teljestiku asendist. Pinge on vektoriaalne suurus, kusjuures liituvad ainult ühel pinnal samas punktis mõjuvad pinged. Pingeolukord (keha pingestatus mingis punktis) on määratud kolmel ristpinnal mõjuvate pingetega. Seejuures on peapindadeks need, kus nihkepinged puuduvad. Peapindadel mõjuvaid normaalpingeid nimetatakse peapingeteks. Üldjuhul on kolm üksteisega risti asetsevat peapinda (sest ruum on kolmemõõtmeline), mistõttu ka ruumilises pingeolukorras on kolm peapinget. Niisugune nn. ruumipingus on vaadeldav tasapinguse (tasapinnaline pingeolukord) kaudu. Seega on tasapingus olukord, kus pinged mõjuvad kõikidel pindadel ühes tasandis. Sel juhul on peapingeid kaks, mida võib tähistada vastavalt nende mõjumise sihile  $\sigma_x$  ja  $\sigma_z$  (või  $\sigma_x$  ja  $\sigma_y$  või  $\sigma_y$  ja  $\sigma_z$ ). Tasapingust on ülevaatlik iseloomustada nn. pingeringi (Mohri ringi) abil, mis erinevatel pindadel ühes tasandis mõjuvaid pingeid võimaldab määrata graafiliselt. Pingeringi ehitamine selgub järgnevalt.

Kui homogeenest materjalist eraldada kolmnurk  $ABC$  (joon

8, a), siis kahe peapinge  $\sigma_x$  ja  $\sigma_z$  mõjumise tõttu kutsutakse esile pinged mis tahes kaldpinnas (näiteks sihis  $AB$ ) normaalpinge  $\sigma$  ja nihkepinge  $\tau$  näol. Selleks, et vaadeldava materjali ühe ühiku paksune kolmnurk oleks tasakaalustatud pingeolukorras, peavad ilmselt kehtima järgmised võrdused:

$$\overline{AB}\sigma = \overline{BC}\sigma_x \cos \frac{x}{2} + \overline{AC}\sigma_z \sin \frac{x}{2},$$

$$\overline{AB}\tau = \overline{BC}\sigma_x \sin \frac{x}{2} - \overline{AC}\sigma_z \cos \frac{x}{2}.$$

Et aga

$$\overline{BC} = \overline{AB} \cos \frac{x}{2},$$

$$\overline{AC} = \overline{AB} \sin \frac{x}{2},$$

siis saame

$$\sigma = \sigma_x \cos^2 \frac{x}{2} + \sigma_z \sin^2 \frac{x}{2}, \quad (65)$$

$$\tau = \sigma_x \sin \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2} - \sigma_z \sin \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2}. \quad (66)$$

Asendades seoses (65)  $\cos^2 \frac{x}{2} = 1 - \sin^2 \frac{x}{2}$ , saame

$$\sigma = \sigma_x - (\sigma_x - \sigma_z) \sin^2 \frac{x}{2}$$

ehk, kirjutades selle kujul

$$\sigma = \sigma_x - (\sigma_x - \sigma_z) \left( \frac{1}{2} \sin^2 \frac{x}{2} + \frac{1}{2} \sin^2 \frac{x}{2} + \frac{1}{2} \cos^2 \frac{x}{2} - \frac{1}{2} \cos^2 \frac{x}{2} \right),$$

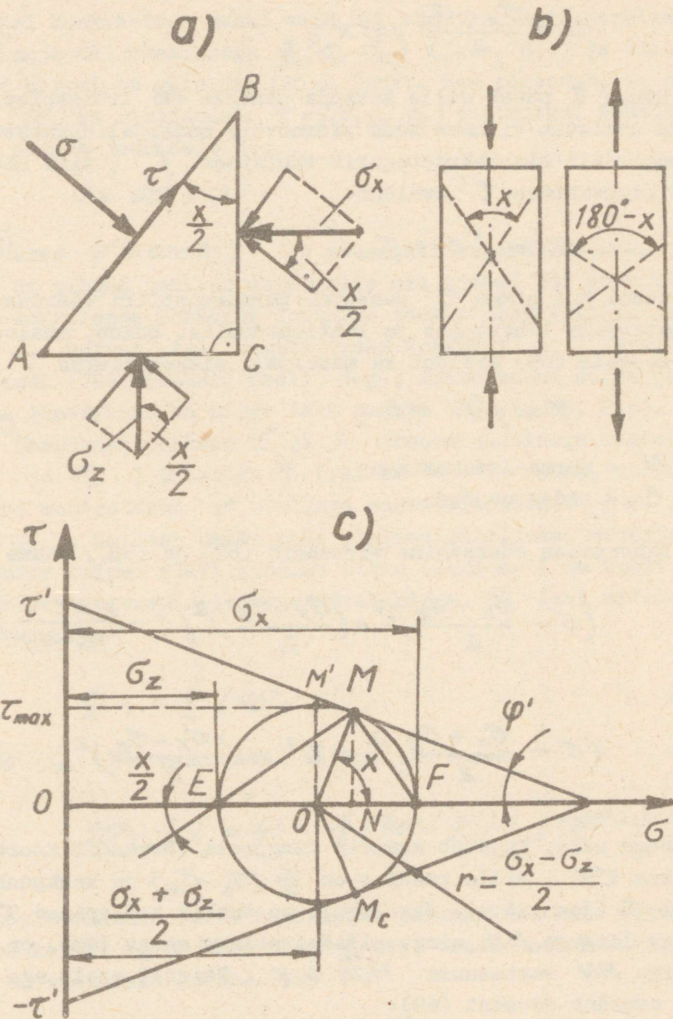
saame

$$\sigma = \sigma_x - \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} (\sin^2 \frac{x}{2} - \cos^2 \frac{x}{2} + 1),$$

millest pärast mõningaid teisendusi:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \cos x. \quad (67)$$

Võrrandi (66) teisendamiseks korrutame ja jagame selle parema poole mõlemaid liikmeid arvuga 2. Seetõttu saame selle esitada kujul:



Joon. 8. Materjalide purunemise arvutuskeem ( a ), proovikeha-  
 de purunemisskeem ( b ) ja purunemispingete graafilise  
 kujutamise ( c ).

$$\tau = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \sin x. \quad (68)$$

Pinge  $\tau$  püüab esile kutsuda pindala  $AB$  libisemise. Se-  
da aga takistab viimase seos piirnevate materjaliosakestega.  
Kui materjali sisehõõrdetegurit tähistada  $f'$ , siis nihke-  
pinge koguväärtus  $\tau'$  avaldub:

$$\tau' = f'\sigma + \tau. \quad (69)$$

Juhul kui pinge  $\tau'$  saavutab purunemisiipi väärtuse, toi-  
mub materjali lõhenemine ja lahtimurdumine. Muide, analoogili-  
selt seosele (69) avaldub ka materjali nihketakistus  $T$ :

$$T = f'N + C, \quad (70)$$

kus  $N$  - normaalreaktsioon;  
 $C$  - sidestusjõud.

Lahendades süsteemina võrrandid (67) ja (68), saame

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{2\tau}{\sigma_x - \sigma_z}\right)^2\right]$$

ehk

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2. \quad (71)$$

Nagu näha, kujutab avaldis ringjoone võrrandit koordinaa-  
distikus  $\tau\sigma$ , mille raadius on  $\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z)$  ja keskpunkt asub  
teljel  $\sigma$  (joon. 8, c). Järelikult on tekkiv nihkepinge  $\tau$  ku-  
jutatav lõiguga  $MN$  ning, pidades silmas seost (68), on sel-  
le lõigu  $MN$  vastasnurk  $\widehat{MON} = X$ . Teiselt poolt aga pin-  
ge  $\tau$  avaldub seosest (69):

$$\tau = -f'\sigma + \tau', \quad (72)$$

mis koordinaadistikus  $\tau\sigma$  kujutab endast sirge võrrandit tõu-  
suga  $-f' = -\operatorname{tg} \varphi' = \operatorname{tg} (180^\circ - \varphi')$ . Et pingel  $\tau$

on ühel konkreetsel juhul vaid üks väärtus, siis järelikult ka ringjoonel raadiusega  $\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z)$  (joon. 8,c) ja ülalnimetatud sirgel on vaid üks ühine punkt. See tähendab, et sirge  $\tau = f(\sigma)$  on ringjoonele  $\tau = f(\sigma, \sigma_x, \sigma_z)$  puutujaks. Seetõttu, nagu selgub jooniselt 8,c

$$\chi = 90^\circ - \varphi', \quad (73)$$

kusjuures  $\varphi' = \arctg f'$  on materjali sisehõrdenurk.

Et pinged tekivad materjalis nii tõmbel kui ka survel, siis kokkuleppe kohaselt loetakse tõmmed positiivseks (märgiga +), survet aga negatiivseks (märgiga -). Korrutades võrrandi (72) mõlemaid pooli  $-1$ -ga, saame seose surve jaoks, mille graafikuks on sirge läbi punkti  $M_c$  (joon. 8,c).

Ühendades punktid  $E$  ja  $F$  (koordinaatidega vastavalt  $\sigma_z$  ja  $\sigma_x$ ) punktiga  $M$  (või ka  $M_c$ ), näeme, et need sirged moodustavad  $\sigma$ -teljega vastavalt nurgad  $\frac{1}{2}\chi$  ja  $90^\circ - \frac{1}{2}\chi$ . Sellest saame teha olulise järelduse: materjali purunemine toimub alati kindlas sihis (Coulomb'i ja Mohri järgi), kusjuures purunemispind moodustab pinge  $\sigma_z$  (kui miinimumi) sihiga nurga

$$\frac{1}{2}\chi = \frac{1}{2}(90^\circ - \varphi'), \quad (74)$$

pinge  $\sigma_x$  (kui maksimumi) sihiga aga nurga

$$90^\circ - \frac{1}{2}\chi = 90^\circ - \frac{1}{2}(90^\circ - \varphi') = \frac{1}{2}(90^\circ + \varphi'). \quad (75)$$

Seetõttu eraldub surve tagajärjel purunemisel kaks teravkoonust, tõmbe korral aga - kaks tõmpkoonust. Nende koonuste tipunurgad on vastavalt (joon. 8,b)

$$2 \frac{1}{2}\chi = \chi = 90^\circ - \varphi'$$

ja

$$2(90^\circ - \frac{1}{2}\chi) = 180^\circ - \chi = 90^\circ + \varphi'.$$

Loomulikult, deformatsioonid võivad olla väga mitmesugused. Nendeks on tõmme, surve, nihe, vääne ja paine, kuid peamisteks loetakse vaid tõmmet ja survet, ülejäänud on aga tulemuslikud. Nii on paine tõmbe ja surve keerukas kombinatsioon, nihe ja vääne aga on vaadeldav tõmbe ja survena piki diagonaale. Puhta nihke korral on aga normaalpinge  $\sigma$  võrdne nulliga. Väände korral on normaalpinge võrdne tõmbe- ja survepingete (mõjuvad ristiasetsevates diagonaalides) aritmeetilise keskmisega  $\frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z)$ , millele, nagu nähtub jooniselt 8, c, vastab ekstreemne (maksimaalne) nihkepinge  $\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z)$ . Järelikult on maksimaalne nihkepinge kujutatav lõiguga, mis on võrdne pingeringi raadiusega. Sel juhul nurk  $\widehat{MEO} = \frac{\alpha}{2} = 45^\circ$ , mis tähendab seda, et väände korral moodustab purunemispind nii teljega  $X$  (tõmbe sihiga) kui ka teljega  $Z$  (surve sihiga) nurga  $45^\circ$ . Sellest tuleneb, et väändepinge mõõtmiseks tuleb traatandurid võllile liimida nii, et anduri traatide siht moodustaks võlli teljega nurga  $45^\circ$ .

### 3.6. Puistematerjalide voolamise seaduspärasused

#### 3.6.1. Puistematerjalide punkrist väljavoolamise protsess

Paljudel juhtudel töötavad põllutöömasinate tööorganid keskkonnas, mida üldiselt võime nimetada puistematerjalideks. Siia kuuluvad muld, kultuuride seemned, jahu, mineraalväetised, peenestatud haljasmass jms. Peale selle on põllumajanduses tegemist niisuguste puistematerjalidega nagu liiv, kruus, killustik, tsement jt.

Puistematerjalidega töötamiseks ettenähtud masinate lahutamatuks koostisosaks on mitmesuguse kujuga punkrid, mahutid, kastid, kolud ja torud. Vaatamata nende küllaltki suurele osatähtsusele põllumajanduslikus tootmises (külvikute külvisekastid, teraviljakombaini terapunker, puhastus-sorteerimismasinate ja kuivatite söötekolud ja toititorud, salved aitades, transpordivahendite veokastid) ja näilisele konstruktiivsele lihtsusele on nende tööprotsessi teooria vähe uuritud. Enamasti

vaadeldakse punkrite arvutuses selle seintele ja põhjale mõjuvaid jõude neis sisalduvate materjalide staatilises olukorras. Puistematerjalide punkrist väljavoolamist kui nende töö tehnoloogilist protsessi on uuritud vaid mõne üksiku autori poolt (L. V. Gjatšev).

Põhilisteks ülesanneteks on voolamisprotsessi teoreetiline kirjeldamine puistematerjalide liikumisel

- 1) kinnistes mahutites (torud, punkrid),
- 2) lahtistes mahutites (kanalid, kastid, rennid),
- 3) materjalis liikuvate kehade suhtes (segistid, mullaharimismasinade tööorganid).

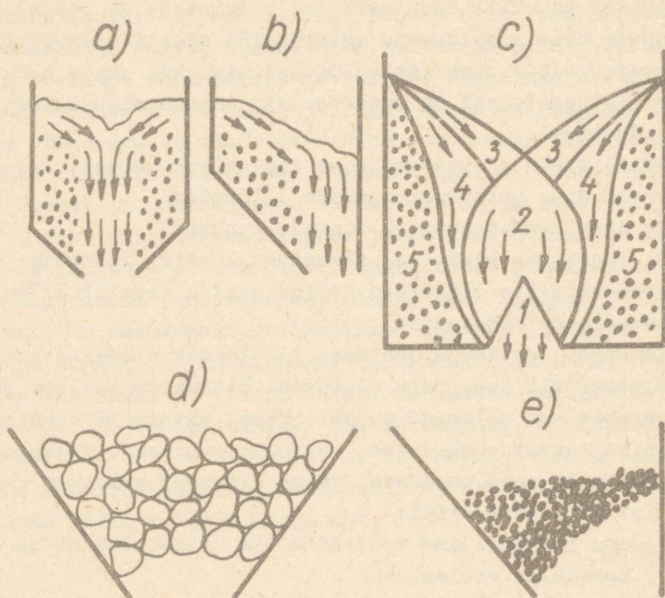
Kõikidel loetletud juhtudel täheldatakse osakeste liikumist materjali kogu mahu ulatuses. Liikumise iseloom ja seaduspärasused aga sõltuvad suurel määral materjali füüsikalismehhaanikalistest omadustest, osakeste suurusest ja kujust. Jättes kõrvale need omadused, võime üldjuhul eristada kahte tüüpilist liikumise liiki:

- 1) nn. hüdrauliline voolamine ehk lausvoolamine ja
- 2) normaalne voolamine.

Hüdrauliliseks nimetatakse niisugust voolamist, kus materjali pealispind jääb horisontaalseks. Hüdrauliline voolamine ei ole omane enamikule reaalsele puistematerjalidele, kuid, nagu selgub edaspidi, põhimõtteliselt erineb ta vähe normaalset voolamisest.

Normaalne voolamisprotsess on omane reaalsele materjalidele. Punkrist väljavoolamine toimub nii, nagu sekemaatiliselt on näidatud joonisel 9, a ja b. Nii väljavooluava sümmeetrilisel kui ka külgsel paigutusel alustab liikumist ava kohal asuv vertikaalne samm. Selle tagajärjel moodustub materjali pealispinnal lehter, mida mööda osakesed valguvad ava kohal vertikaalsihis alla liikuvasse samblasse. Kui väljavooluava asub punkri vertikaalseina kõrval (joon. 9, b), siis moodustuv lehter on ebasümmeetriline kujuga.

Kui väljavoolamise protsessi vaadelda algmomensid alates, siis toimub see joonisel 9, c toodud numbrite järjekorras. Kõige enne valgub välja materjali osa 1, mille tagajärjel hetkeliselt moodustub koonusekujuline tühimik. Raskuse mõjul valguvad sellesse tühimikku osakesed alast 2, millel on ligikau-



Joon. 9. Puistematerjalide punkrist väljavoolamise normaalse protsessi skeem (a, b, c) ja kuplite ning võlvide moodustumine (d, e).

du ellipsoidi kontuurid. Seejärel hakkavad liikuma osakesed alast 3, moodustades pealispinnale lehtrikujulise süvendi. Ja lõpuks valguvad välja osakesed alast 4, kusjuures selle protsessi lõppedes tekib alasse 5 jäänud osakeste tõttu lehter. Ala 5 moodutab "surnud" tsooni.

Sageli võib täheldada puistematerjalide punkrist väljavoolamise protsessis häireid. Selle põhjuseks on väljavoolava kohal tekkivad võlvid ja kuplid (joon. 9, d ja e). Eriti esineb niisugune nähe tükilise materjali puhul (kartulimugulad, kivisüsi). Võlvide ja kuplite tekkimist peeneteraliste

materjalide korral põhjustab nende hügroskoopsus, mille tagajärjel tekib materjali paakumine (pulbrilised mineraalväetised). Selle likvideerimiseks kasutatakse mehhaanilisi segisteid, vibraatoreid või suruvaid seadmeid. Kuid seejuures võib tekkida ka vastupidine efekt - segamine, mis sisuliselt tähendab materjali mehhaanilist mõjutamist, võib hügrokoopse niiske pulbrilise materjali muuta plastiliseks massiks; vibreerimine ja surumine aga tihendavad materjali, mistõttu ka paakumise oht kasvab. Seepärast peab niisugusel juhul rangelt arvestama materjali füüsikalisi-mehhaanilisi omadusi.

### 3.6.2. Puistematerjali vertikaalsetes torudes ja punkrites liikumise diferentsiaalvõrrand

Et põhimõtteliselt on punker vertikaalse teljega ning muutuva ristlõikega lühike ja jäme toru, siis puistematerjali liikumine nii punkris kui ka vertikaalsetes torudes on kirjeldatav ühise teoreetilise seaduspärasusega.

Vaadeldes vertikaalses muutuva ristlõikega torus asuvat materjali elementaarkihti paksusega  $dz$  (joon. 10), võime sellele mõjuvad jõud grupeerida järgmiselt:

1) raskusjõud  $dG$ ;

2) kihi liikumist soodustav aktiivne välisjõud

$$dP_z = (P_z + dP_z) - P_z \quad (\text{kihi aktiivkoormus});$$

3) kihi liikumist takistav jõud  $dR_z$ , mis kujutab endast toru või punkri seinte summaarse reaktsiooni vertikaalset komponenti;

4) kihti liikuma panev jõud  $dm \frac{dz^2}{dt^2} = dm \ddot{z}$ ,

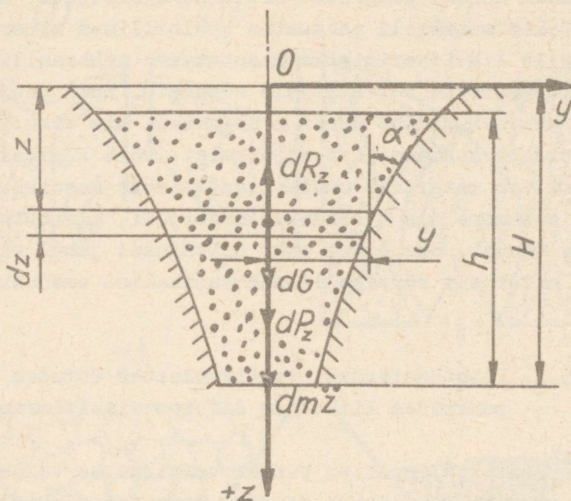
kusjuures  $dm$  on vaadeldava kihi mass.

Seega avaldub materjali elementaarkihi liikumise võrrand järgmiselt:

$$\bar{r} dm \ddot{z} = dG \mp dP_z \pm dR_z$$

ehk, korrutades võrrandi mõlemad pooli  $\bar{r}^{-1}$ -ga, saame

$$dm \ddot{z} = \bar{r}^{-1} dG + dP_z - dR_z, \quad (76)$$



Joon. 10. Skeem puistematerjali vertikaalsetes punkrites ja torudes liikumise diferentsiaalvõrrandi koostamiseks.

kus ülemine märk vastab materjali liikumisele üles, alumine - alla (vt. kasutatud koordinaadistik, joon. 10).

Ei ole raske mõista, et võrrandis (76) esinevad suurused võime avaldada järgmiselt:

$$dm = \rho F dz, \quad (77)$$

$$\ddot{z} = \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{Q}{F} \right) = \frac{F \frac{dQ}{dt} - Q \frac{dF}{dt}}{F^2}, \quad (78)$$

$$dG = \gamma' F dz, \quad (79)$$

$$dR_z = k P_z dz, \quad (80)$$

kus  $\rho$  - materjali tihedus;  
 $F$  - vaadeldava ristlõike pindala;

$\frac{1}{2}$  - materjali  $Z$  -telje sihiline kiirus vaadeldavas ristlõikes;

$Q$  - materjali vooluhulk vaadeldavas ristlõikes (kuupühikut ajaühikus);

$\gamma'$  - materjali mahukaal;

$k$  - üldistatud takistustegur.

Arvestades seoseid (77)...(80), saab võrrand (76) kuju:

$$\frac{\rho F dz}{F^2} \left( F \frac{dQ}{dt} - Q \frac{dF}{dt} \right) = \\ = \bar{\gamma} \gamma' F dz + dP_z - k P_z dz. \quad (81)$$

Jagades võrrandi (81) mõlemad pooli kihi paksusega  $dz$  ja arvestades, et

$$\frac{dF}{dt} = \frac{dz}{dt} \cdot \frac{dF}{dy} \cdot \frac{dy}{dz} = \frac{1}{2} \frac{dF}{dy} \operatorname{tg} \alpha = \frac{Q}{F} \frac{dF}{dy} \operatorname{tg} \alpha,$$

saame

$$\rho \frac{dQ}{dt} - \rho \frac{Q^2}{F^2} \frac{dF}{dy} \operatorname{tg} \alpha = \bar{\gamma} \gamma' F + \frac{dP_z}{dz} - k P_z, \quad (82)$$

kus  $\alpha$  on punkri (toru) külgselina kaldenurk vertikaali suhtes (vaadeldava kihi kohal; joon. 10).

Võrrand (82) on puistematerjali voolamisprotsessi teoreetiliseks kirjelduseks mis tahes kujuga vertikaalsetes telgsümmeetrilistes punkrites või torudes. Tuletame meelde, et ülemine märk vastab materjali liikumisel üles, alumine aga alla (materjali ülesliikumine on antud juhul mõeldav vaid pneumaatilise transpordi korral).

Nagu võrrandist (82) selgub, sõltub voolamisprotsess, mida iseloomustab eeskätt ristlõiget läbiva voolu hulk  $Q$ , vaadeldavast ajamomendist  $t$  (s. t. kas punker on täis või osaliselt tühjenenud), ristlõike suuruselt  $F = f(z)$  antud kohal ning selle kujust (seda väljendab  $dF/dy$ ) ja muutumise kiirusest ( $\operatorname{tg} \alpha$ ), vaadeldava ristlõike koormusest  $P_z$  ja selle asukohast ( $dP_z/dz$ ), materjali füüsikalise-mehhaanikalistest omadustest (tihedusest  $\rho$ , mahukaalust  $\gamma'$ ) ning materjaliosakeste suuruselt, kujult ja hõõrdeomadustest nii

omavahel kui ka punkri seinä pinnal, mida kõike arvestab üldis-  
tatud takistustegur  $k$ . L. V. Gjatševi järgi võib teguri  $k$   
ligikaudseks määramiseks kasutada järgmist seost:

$$k = \frac{P_0}{G_M h}, \quad (83)$$

kus  $G_M$  - punkris asuva materjali raskusjõud;  
 $P_0$  - punkri põhjale mõjuv jõud;  
 $h$  - punkris asuva materjalisamba kõrgus.

Teguri  $k$  arvulistest väärtustest annab ülevaate tabel 7.

Pole raske veenduda selles, et puistmaterjalide normaal-  
set voolamist kirjeldava diferentsiaalvõrrandi (82) kasutami-  
ne praktilistes arvutustes on väga tülikas, sest selle lahend-  
mis tahes muutuva parameetri ( $Q, F, P_2$ ) suhtes on äärmiselt  
keerulise kujuga. Seetõttu kasutatakse normaalse voolamisprot-  
sessi asemel mõnevõrra lihtsamat, ja nimelt, hüdraulilist voo-  
lamist. Ülevaate sellest saame järgmistes punktides esitada  
alusel.

T a b e l 7

Üldistatud takistusteguri  $k$  mõningaid arvulisi väärtusi  
silindrikujulise punkri korral (L. V. Gjatševi järgi)

Punkri mater- jal	Materjali- samba kõr- gus $h$ [m]	N i s u t e r a d		H e r n e t e r a d	
		suhe $P_0 / G_M$	tegur $k$ [ $\frac{1}{m}$ ]	suhe $P_0 / G_M$	tegur $k$ [ $\frac{1}{m}$ ]
teras	0,178	0,745	3,44	0,485	9,35
	0,356	0,595	3,19	0,351	7,40
	0,534	0,484	3,14	0,269	6,77
	0,712	0,401	3,12	0,204	8,83
malm	0,126	0,724	5,40	0,555	10,50
	0,252	0,528	5,75	0,360	10,17
orgaa- niline klaas	0,141	0,790	3,50	0,535	10,00
	0,282	0,665	3,10	0,417	7,46

### 3.6.3. Puistematerjali hüdraulilise voolamise diferentsiaalvõrrand

Punktis 3.6.1. kirjeldatud puistematerjalide normaalse voolamise protsessi kulgu võime kujutleda ka järgmiselt (joon. 11):

1) punkri keskosas tekib materjali liikumise sammasjas voog, mis haarab mingi koonuse  $ABCD$  ja mida seetõttu võib nimetada väljavoolukoonuseks;

2) osa materjali, mis on surutud vastu punkri seina (materjal alades  $ACE$  ja  $BDF$ ) jääb liikumatuks;

3) väljavoolukoonuse ülemise põhja  $AB$  allapoole nihkumisel hakkavad osakesed aladest  $ACE$  ja  $BDF$  alla libisema loomuliku varisemisena ja satuvad väljavoolamisalasse  $ABCD$ .

Et kirjeldatud protsessi kulgemisel jääb lõik  $AB$  teoreetiliselt horisontaalseks, siis põhimõtteliselt erineb normaalne voolamine vähe hüdraulilisest - erinevus seisneb vaid selles, et normaalne voolamine toimub mahus, mis on piiratud punkri seintega, hüdrauliline voolamine antud juhul aga koonuse  $ABCD$  mahus. Seega moodustab hüdrauliline voolamine normaalse voolamise peamise osa, haarates liikumise kõige aktiivsema ala. Järelikult võime küsimuse lihtsustamise eesmärgil normaalset voolamist mõnevõrra idealiseerida ning vaadelda seda hüdraulilisena.

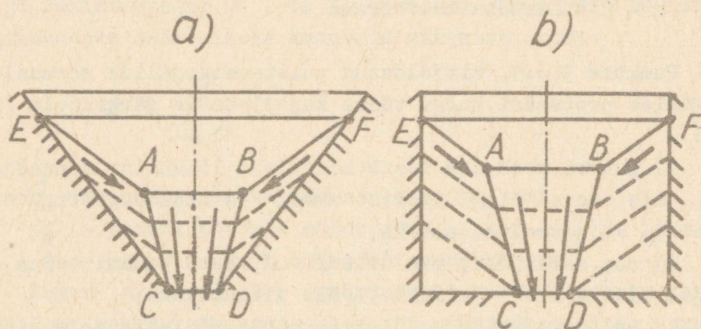
Teatavasti on hüdrauliline (vedelike) voolamine kirjeldatav seosega

$$Q = Fv,$$

s. t. vooluhulk  $Q$  võrdub ristlõikepinna  $F$  ja voolu kiiruse  $v$  korrutisega. Seetõttu võime voolu kiirenduse  $a$  avaldada järgmiselt:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{Q}{F} \right). \quad (84)$$

Arvestades, et üldjuhul on nii  $Q$  kui ka  $F$  ajas muutuvad suurused, saame



Joon. 11. Hüdrauliline voolamine normaalse voolamisprotsessi peamise osana puistematerjali väljavoolamisel kaldsete (a) ja vertikaalsete (b) seintega punkrist.

$$a = \frac{F \frac{dQ}{dt} - Q \frac{dF}{dt}}{F^2},$$

millest

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{Q}{F} \frac{dF}{dt} = aF. \quad (85)$$

Kasutades joonisel 10 toodud koordinaadistikku, võime kirjutada, et

$$a = \frac{d^2z}{dt^2} = \ddot{z}$$

ja

$$\frac{dF}{dt} = \frac{dz}{dt} \cdot \frac{dF}{dy} \cdot \frac{dy}{dz} = \frac{Q}{F} \frac{dF}{dy} \operatorname{tg} \alpha,$$

mistõttu võrrand (85) avaldub:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{Q^2}{F^2} \frac{dF}{dy} \operatorname{tg} \alpha = F \frac{d^2z}{dt^2}. \quad (86)$$

Kui võrrelda võrrandit (86) normaalse voolamise diferentsiaalvõrrandiga (82), siis näeme, et põhimõtteliselt on need samased, kusjuures kiirendus  $\ddot{z}$  avaldub:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{1}{\rho} \gamma' + \frac{1}{\rho F} \frac{dP_z}{dz} - \frac{kP_z}{\rho F}. \quad (87)$$

Järelikult on materjali liikumise kiirenduse põhjustajaks selle füüsikalise-mehaanikalised omadused, kihile mõjuv koormus ja ristlõike suurus, sest seose (87) põhjal  $\ddot{z} = f(\gamma', \rho, k, P_z, F)$ . Et võrrandis (86) on need parameetrid väljendatud liikumise ühe põhisuuruse - kiirenduse - kaudu, siis on mainitud võrrand voolamise protsessi kõige üldisem avaldis. Selleks on aga hüdrauliline voolamine.

Kui võrrandis (86) asendada tagasi  $\tan \alpha = dy/dz$ , saame:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{Q^2}{F^2} \frac{dF}{dz} = F \frac{d^2z}{dt^2}. \quad (88)$$

Võrrandid (86) ja (88) on võrdväärased ning nagu selgub järgmises punktis, on nad kasutatavad praktilistes arvutustes.

4. PÖLLUTÖÖMASINATE UNIVERSAALSETE SÕLMEDE  
TEORIA JA TEHNOLOOGILINE ARVUTUS

4.1. Vertikaalsete punkrite tehnoloogiline arvutus  
tingimusel  $dQ/dz = 0$

Puistmaterjali normaalse voolamise protsess vertikaalsetes punkrites (ja torudes), nagu selgus punktis 3.6.2., on kirjeldatav diferentsiaalvõrrandiga (82). Selle üldlahendi määramine mis tahes parameetri suhtes on küllaltki keeruline ülesanne. Praktiliselt pole selleks aga vajadustki, sest enamasti püstitatakse probleem niiviisi: etteantud tootlikkuse  $Q$  tagamiseks projekteerida punkri seinakuju  $y = f(z)$  (vt. joon. 10) ning määrata väljavooluava pindala  $F_{\text{välj}}$ . Selle ülesande lahendamiseks on küllaldane kasutada hüdraulilise voolamise diferentsiaalvõrrandit (88).

Kui lähtuda nõudest, et ühes ajaühikus punkrist väljavoolava materjali hulk  $Q_{\text{välj}}$  peab jääma konstantseks, siis tähendab see seda, et  $Q_{\text{välj}}$  peab olema sõltumatu punkri täi-teastmest (s. o. materjalisamba kõrgusest punkris). See tingimus on täidetud, kui kehtestada sama nõue mitte ainult väljavooluava, vaid ka mis tahes ristlõike kohta. Nimetatud nõude, mida matemaatiliselt väljendab

$$\left. \begin{aligned} Q_z &= \text{const}, \\ \frac{dQ}{dz} &= 0 \end{aligned} \right\} (89)$$

tagab materjali voolama (liikuma) paneva jõu konstantsus, s. o.  $dm\ddot{z} = \text{const}$ . Et massi element  $dm$  on homogeense materjali puhul konstantne suurus, siis järelikult väljendab liikumapaneva jõu konstantsust kiirenduse  $\ddot{z}$  konstantseks jäämine, s. o.

$$\ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2} = C = \text{const} \quad (90)$$

Et

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{Q}{F} \frac{dQ}{dz} ,$$

siis võrrand (88) on kirjutatav ka järgmiselt:

$$\frac{dQ}{dz} - \frac{Q}{F} \frac{dF}{dz} = \frac{F^2}{Q} \frac{d^2z}{dt^2} . \quad (91)$$

Arvestades tingimusi (89) ja (90), saab võrrand (91) kuju:

$$\frac{dF}{dz} + \frac{C}{Q^2} F^3 = 0 . \quad (92)$$

Eraldades diferentsiaalvõrrandi (92) muutujad

$$\frac{dF}{F^3} = - \frac{C}{Q^2} dz ,$$

saame pärast integreerimist:

$$- \frac{1}{2F^2} = - \frac{C}{Q^2} z + C_1 . \quad (93)$$

Asetades võrrandisse (93) algtingimused  $z = 0$  ja  $F = F_{6x}$ , saame määrata integreerimiskonstandi:  $C_1 = - 1/2F_{6x}^2$ . Nii-  
siis,  $C_1$  avaldise arvestamisel saame seosest (93):

$$F = \frac{Q F_{6x}}{\sqrt{Q^2 + 2C F_{6x}^2 z}} , \quad (94)$$

kus  $F_{6x}$  on punkri sissevooluava ristlõike pindala.

Kui jooksev parameeter  $z$  võrrutada punkri kogukõrguse-  
ga  $H$  (sisenemis- ja väljumisristlõigete vaheline kaugus),  
siis võrrandist (94) saame väljavooluava ristlõike pindala

$F_{6ux}$  :

$$F_{6ux} = \frac{Q F_{6x}}{\sqrt{Q^2 + 2C F_{6x}^2 H}} . \quad (95)$$

Avaldades pindala  $F$  koordinaadi  $y$  (joon. 10) kaudu saame seosest (94) funktsiooni  $y = f(x)$ , mis on punkri seinakuju kontuuri võrrandiks ja määrab selle kuju vertikaaltelge läbival tasapinnal (ringikujulisel ristlõikel  $F = \pi y^2$ , ruudukujulisel  $F = 4y^2$ , ristkülikukujulisel  $F = 4xy$ ).

Enamasti on punkrid vertikaalsed, väljavooluava asub neil punkri põhjas. Sel juhul on väljavooluava ristlõiget läbiva materjali kiirendus võrdne raskuskiirendusega  $g$  (loomulikult juhul, kui tegemist on väljavoolamisega raskusjõu mõjul, s. o. vaba voolamisega). Sel juhul  $C = g$  ja võrrandite (94) ja (95) põhjal saame:

$$F = \frac{Q F_{6x}}{\sqrt{Q^2 + 2g F_{6x}^2 z}} \quad (96)$$

$$F_{6xx} = \frac{Q F_{6x}}{\sqrt{Q^2 + 2g F_{6x}^2 H}} \quad (97)$$

#### 4.2. Šarniirise nelilülismehhanismi analüütiline arvutus

Väga paljudel juhtudel toimub põllutöomasinatel tehnoloogilise protsessi täitmine või selle juhtimine ning reguleerimine mehhanismide abil, mis koosnevad šarniirsete nelilülivate ahelast. Eestkätt võime nimetada haakeadra tõstereguleerimismehhanisme ja traktorile monteeritud hüdraulilist rippmehhanismi. Selleks, et projekteerida niisuguseid mehhanisme ja valida sobivaid kinemaatilisi parameetreid (lülide pikkusi ja omavahelist asetust määravaid nurki), on vaja teada nende vahel kehtivat analüütilist sõltuvust.

Šarniirsete nelilülismehhanismide lülide asetuse järgi võib eristada kolme tüüpvormi:

- 1) ükski vastaslülide paar ei lõiku omavahel lülide ots-punkte tähistavate šarniiride vahelises osas (joon. 12,a);
- 2) omavahel lõikuvad aluslülige ühendatud vastaslülid (joon. 12,b);
- 3) omavahel lõikuvad aluslülid ja selle vastaslülid (joon. 12,c).

Kasutades skeemi joonisel 12,a, määrame lülide pikkuste  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $a$  ja  $d$  ning nurkade  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ja  $\delta$  vahelised analüütilised seosed.

Jagame nelilüliliku diagonaaliga  $BD$  kaheks kolmnurgaks. Mõlema kolmnurga kohta võime koosinusteoreemi põhjal kirjutada:

$$\overline{BD}^2 = r_1^2 + d^2 - 2dr_1 \cos \alpha,$$

$$\overline{BD}^2 = r_2^2 + a^2 - 2ar_2 \cos \gamma.$$

Kui lülid  $AB$  pikkusega  $r_1$  on vedavaks lüliks, siis tema asendi (s. t. nurga  $\alpha$  väärtused) võime lugeda etteantuks. Seega, lahendades ülaltoodud võrrandsüsteemi nurga  $\gamma$  suhtes, saame:

$$\cos \gamma = \frac{(r_2^2 + a^2) - (r_1^2 + d^2) + 2dr_1 \cos \alpha}{2ar_2}$$

ehk

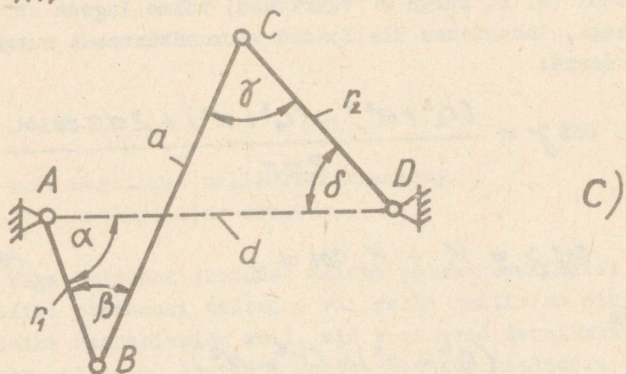
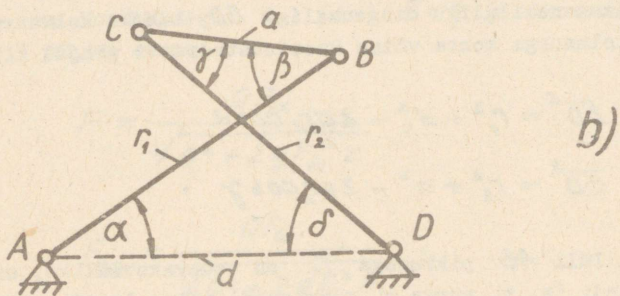
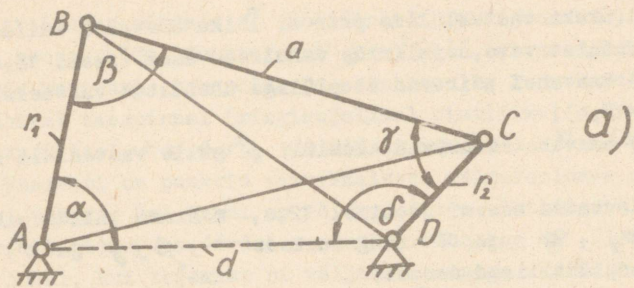
$$\cos \gamma = K_1 + K_2 \cos \alpha, \quad (98)$$

kusjuures

$$K_1 = \frac{(r_2^2 + a^2) - (r_1^2 + d^2)}{2ar_2}, \quad (99)$$

$$K_2 = \frac{dr_1}{ar_2}. \quad (100)$$

Jagades nüüd nelilüliliku diagonaaliga  $AC$  kaheks kolmnurgaks, võime analoogiliselt toimides kirjutada:



Joon. 12. Šarnirsete nelilülükmeħhanismide tüüpvormid.

$$\cos \beta = K_3 + K_4 \cos \delta, \quad (101)$$

kus

$$K_3 = \frac{(r_1^2 + a^2) - (r_2^2 + d^2)}{2ar_1}, \quad (102)$$

$$K_4 = \frac{dr_2}{ar_1}. \quad (103)$$

Kolmandaks seoseks aga on  $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 2\pi$ , millest

$$\delta = 2\pi - (\alpha + \beta + \gamma). \quad (104)$$

Saadud kolm võrrandit (98), (101) ja (104) sisaldavad kõike nelja nurka ja seetõttu on kolm neist neljanda funktsiooniks. Kui etteantud on näiteks nurk  $\alpha$ , siis võrrandist (89) saame määrata nurga  $\gamma = f(\alpha)$ . Nurgad  $\beta$  ja  $\delta$  tuleb leida seoste (101) ja (104) koos lahendamisel:

$$\cos \beta = K_3 + K_4 \cos [2\pi - (\alpha + \beta + \gamma)]$$

ehk

$$\cos \beta = K_3 + K_4 \cos [(\alpha + \gamma) + \beta].$$

Pärast nurkade summa avaldamist ja sarnaste liikmete grupeerimist, võime viimase avaldise kirjutada järgmiselt:

$$\cos \beta + \frac{K_4 \sin(\alpha + \gamma)}{1 - K_4 \cos(\alpha + \gamma)} \sin \beta = \frac{K_3}{1 - K_4 \cos(\alpha + \gamma)}. \quad (105)$$

Võrrandi (105) lahendamiseks nurga  $\beta$  suhtes on sobiv tähistada

$$\frac{K_4 \sin(\alpha + \gamma)}{1 - K_4 \cos(\alpha + \gamma)} = \frac{\sin \lambda}{\cos \lambda} = \operatorname{tg} \lambda. \quad (106)$$

Sel juhul saab seos (105) kuju:

$$\cos \beta \cos \lambda + \sin \beta \sin \lambda = \frac{K_3}{1 - K_4 \cos(\alpha + \gamma)}$$

ehk

$$\cos(\beta - \lambda) = \frac{K_3}{1 - K_4 \cos(\alpha + \gamma)} \quad (107)$$

Võrrandist (107) saame võrrandi (106) kaasabil määrata nurga  $\beta = f(\alpha, \gamma)$  ja seejärel seosest (104) nurga  $\delta$  väärtused.

Toimides analoogiliselt eeltooduga ka nelilülilikmehhanismide tüüpidega, mis on kujutatud joonisel 12, b, c, näeme, et võrrandid (98)... (107) jäävad kehtima.

#### 4.3. Traktori rippseadme tehnoloogiline arvutus

##### 4.3.1. Hüdrauliline rippüsteem, selle osad ja nende tüübid

Rippmasinate ühendamiseks traktoriga varustatakse viimased rippseadmega, mis on hüdraulilise rippüsteemi mehhaaniliseks osaks. Hüdraulilise rippüsteemi teiseks põhiosaks on hüdroüsteem, millesse kuuluvad järgmised sõlmed: õlipaak, õlipump, jaoti (koos siibrite ja nende juhtimishoobadega), ühendustorustik ja hüdrocilindrid. Hüdroüsteemi peahüdrocilinder on sõlmeks, mis ühendab hüdroüsteemi rippseadmega. Seega moodustavad hüdroüsteem ja rippseade kokku ühise süsteemi - hüdraulilise rippüsteemi.

Kuni 1958. a. toodeti Nõukogude Liidus traktoreid, mis olid varustatud monoblokk- ehk agregaatse hüdroüsteemiga. Sellel süsteemil olid kõik põhisõlmed monteeritud traktori tahaossa kinnitatud ühisesse korpusesse (blokki), moodustades niiviisi tervikliku agregaadi. Alates 1958. a. aga varustatakse kõik traktorid nn. lahusagregaatse hüdroüsteemiga, mida iseloomustab:

- 1) hüdroüsteemi põhisõlmede (paak, pump, jaoti, hüdrocilinder) lahuspaigutus,
- 2) varustatus kahepoolse töötamisega peahüdrocilindriga,
- 3) võimalus kasutada teisaldatavaid hüdrocilindreid,

4) varustatus jaotusseadme siibri täiendava - nn. "ujuva" asendiga, mis sisuliselt tähendab seda, et hüdrocilindri pooled on teineteisega ühendatud jaoti kaudu.

Hüdroüsteemi pumba poolt jaoti ja torustiku kaudu hüdrocilindrisse suunatav õli paneb cilindris liikuma kolvi, mis omakorda kannab liikumise üle kogu rippüsteemi mehhaanilisele osale - rippseadmele. Seega võime hüdroüsteemi vaadelda lihtsa hüdroootorina, mille veetav lüli - kolb - on rippseadme vedavaks lüliks. Seega on vaadeldav hüdroüsteem esimene traktoritel ja põllutöomasinatel kasutatud lihtne hüdroajam, mille sünniajaks on käesoleva sajandi kahekümnendad aastad. Selle massiline levik aga algas pärast G. Fergusoni (USA) poolt leiutatud kolmepunktilise rippseadme (ülevaate rippseadmetest anname allpool) kasutuselevõtmist, mis tänu oma universealsusele muutus mobiilse põllutöomasina ja traktori vahelise seose peamiseks skeemiks, eriti Teise maailmasõja järgsetel aastatel.

Et hüdraulilise rippüsteemi hüdroüsteem kujutab endast jõuseadet, siis on see traktori kui jõumasina orgaaniliseks osaks. Vastavalt sellele vaatlеме edaspidi vaid hüdraulilise rippüsteemi nn. tööseadet - rippseadet, pidades samal ajal silmas selle kuuluvust lahusagregaatse hüdroüsteemi juurde.

Traktori rippseade koosneb järgmistest nelilülilikmehhanismidest (joon. 13, a ja 14, a):

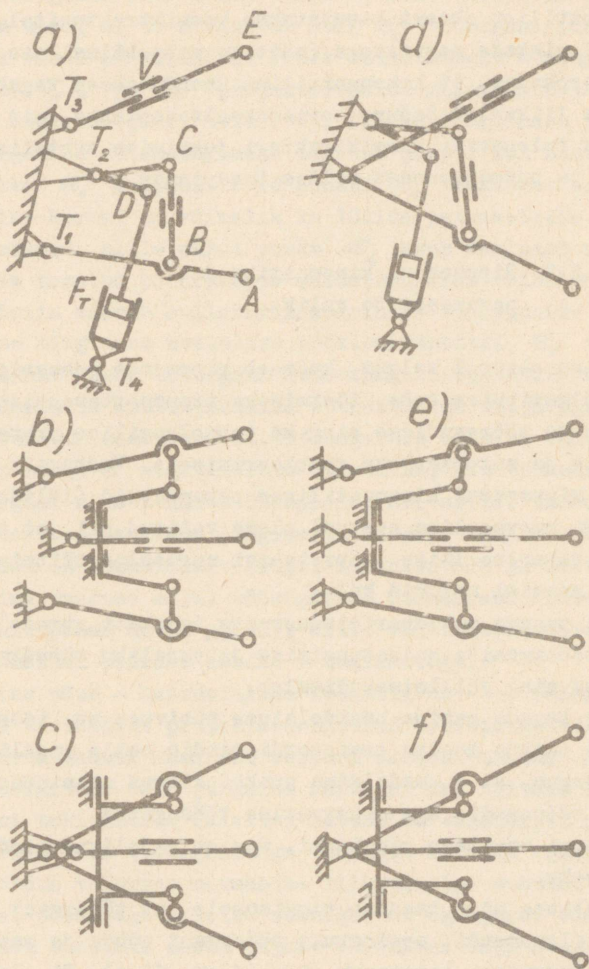
- 1) hüdro mehhanism  $T_4 F_7 D T_2$ ,
- 2) tõstemehhanism  $T_1 B C T_2$ ,
- 3) riputusmehhanism  $T_1 A E T_3$ .

Seejuures on vedavaks mehhanismiks hüdro mehhanism, veetavaks aga riputusmehhanism koos rippmasinaga. Hüdro mehhanismi vedavaks lüliks on cilindris liikuv kolb  $F_7 D$ , veetavaks aga tõstehoovastik  $D T_2 C$ , mis on tõstemehhanismi vedavaks lüliks. Selle liikumine antakse vertikaalsete tõmmitsate  $BC$  kaudu alumistele veolattidele  $T_1 B A$ . Niisiis on veolattid omakorda riputusmehhanismi vedavaks lülideks, kusjuures veolatte ja ülemist tõmmitsat  $T_3 E$  ühendav lüli  $AE$  on rippmasina raami osaks - veetavaks lüliks.

Rippseadmeid võib klassifitseerida mitmesuguste tunnuste järgi järgmiselt:

- 1) asetuse järgi traktori suhtes:
  - a) tagumine,
  - b) eesmine,
  - c) külgmine,
  - d) telgedevaheline (šassiitraktoritel);
- 2) kinnituspunktide arvu järgi traktoril (joon. 13):
  - a) kolmepunktiline,
  - b) kahepunktiline (alumised veolatid on traktori šassii-  
ga ühendatud ühes punktis),
  - c) ühepunktiline (alumised veolatid ja ülemine tõmmits  
on ühendatud ühes punktis traktoril), mille üheks alaliigiks  
on üheteljeline kinnitus (mõlemad veolatid ja ülemine tõmmits  
on kinnitatud ühisele teljele);
- 3) rippmehhanismi struktuuri järgi:
  - a) radiaalsed, kuhu kuuluvad kõik ühepunktilised ja ühe-  
teljelised skeemid,
  - b) nelilülilised (kõik kahe- ja kolmepunktilised skee-  
mid),
- 4) ülemise tõmmitsa koormatavuse järgi:
  - a) suletud (kui masina tööasendis on ülemine tõmmits  
koormatud, s. t. kui selles mõjub jõud),
  - b) avatud (kui tõmmits on tööasendis koormamata, s. t.  
selles ei esine jõudu).
- 5) hüdroüsteemi koormatavuse järgi:
  - a) koormamata (masina töötamisel ei esine üleliigset rõh-  
ku hüdrotsilindris; siia kuuluvad hüdroüsteemi jaotussilibri  
"ujuvas" asendis töötavad skeemid),
  - b) mittepidevalt koormatud (siia kuuluvad mitmesugused  
poolautomaatselt või automaatselt juhitud tehnoloogilist  
tööprotsessi reguleerivad skeemid, näiteks traktori veoratas-  
te koormuse hüdrauliline suurendi),
  - c) pidevalt koormatud (automaatselt juhitud tehnoloog-  
ilist protsessi reguleerivad skeemid, näiteks reguleerimine  
masina takistusjõu või töösügavuse järgi).

Praktiliselt on kõige laialdasemat kasutamist leidnud traktori taha kinnitatavad kolmepunktilised (s. o. nelilülilised) koormamata hüdroüsteemiga suletud rippseadmed. Avatud skeemi kohaselt töötavad *НКС* tüüpi adrad (vt. käesole-



Joon. 13. Traktori rippseadme tüübid. *ab* - kolmepunktiline; *ac* - kahepunktiline; *de* - üheteljeline; *df* - ühepunktiline.

va sarja II osa "Mullaharimismasinad", p. 1.6.1., joon. 32). Kahepunktulist skeemi kasutatakse roomiktraktoritel, eriti töötamisel pikkade masinatega (näiteks mitmehõlmaliste atradega). Seda seepärast, et kahepunktiline ühendusskeem tagab masinale suurema liikumisvabaduse horisontaaltasapinnas, mis on eriti vajalik tulenevalt roomiktraktori juhtimise suhtelisest järskusest ja hüppelisusest selles tasapinnas.

#### 4.3.2. Rippseadme kinemaatika ja parameetrite valik

Nagu eespool selgus, koosneb rippseade mehhanismidest masina külgeriputamiseks, tõstmiseks transportasendisse ja allalaskmiseks tööasendisse ning ka tehnoloogilise protsessi juhtimiseks ja automaatseks reguleerimiseks. Vastavalt sellele peavad rippseadme kinemaatilised parameetrid (lülide pikkused ja nende omavaheline asetus) olema valitud nii, et tagataks masina tehnoloogilise tööprotsessi normaalne täitmine. Seejuures on peamisi nõudeid kolm:

1) tagada mullaharimismasinate (eeskätt atrade) korral nende tööorganite muldatungimise ja vajaliku töösügavuse saavutamise ning säilimise võimalus,

2) tagada masina haardelaiuse püsivuse nn. isesäilivus,

3) tagada masina transpordiasendis selle vajalik transpordikõrgus, s. t. madalaima punkti kõrgus maapinnast (kliirens), tööasendis aga maksimaalne töösügavus.

Edasi vaatleme tingimusi, mis on vajalikud nende nõute täitmiseks.

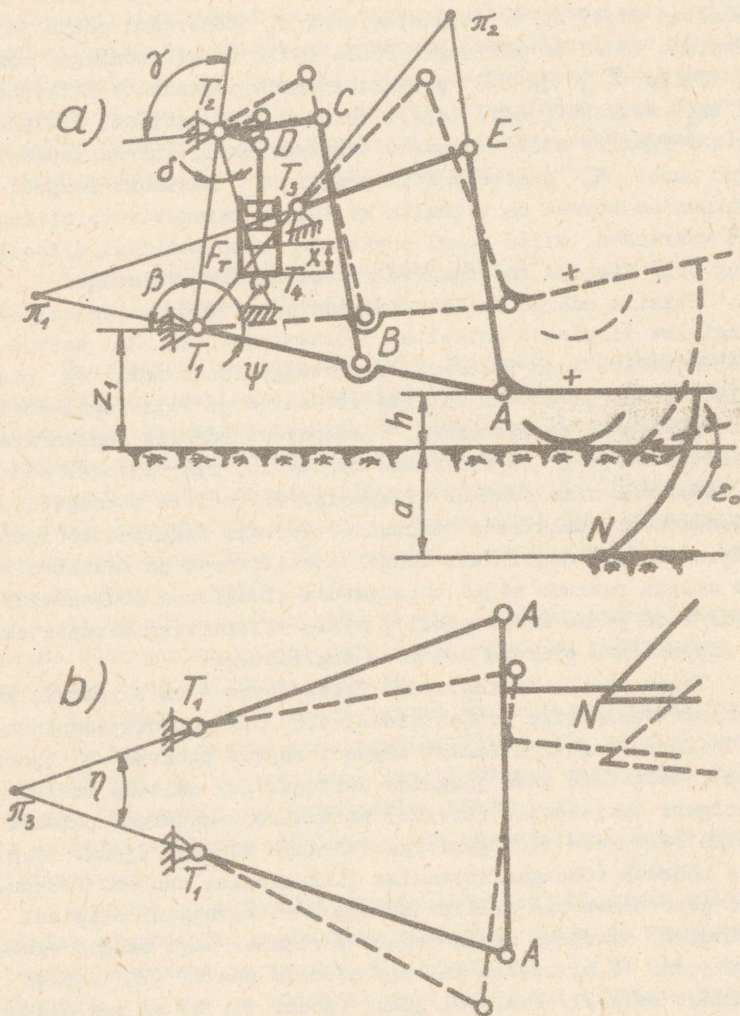
Esimene nõue taandub tingimusele, et tööorgani muldatungimise algmomendil moodustuks tööorgani põhja ja maapinna vahel teatud suurusega teravnurk  $\epsilon_0$  (joon. 14,a). Ei ole raske veenduda, et see on võimalik vaid siis, kui alumiste veolattide  $AT_1$  ja ülemise tõmmitsa  $ET_2$  projektsioonjoonte (pikiverтикаalsel tasapinnal) pikenduste lõikepunkt  $\pi_1$  (hetkelise pöörlemise tšenter) asub rippmasinast eespool. Vastasel juhul (joon. 15,a) on võimalik küll töötamine etteantud töösügavusel, kuid pärast masina transpordiasendisse tõstmist ei saa

selle tööorganid enam mulda tungida, sest tööorgani nina on suunatud üles, s. t. moodustuv nurk  $\epsilon_0'$  tööorgani põhja ja maapinna vahel on nürinurk. Peale selle mängib mõningat osa ka lülide  $T_1 T_3$  ja  $AE$  projektsioonide pikenduste lõikepunkti  $\pi_2$  asukoht (joon. 14, a). Kui see asub masinast ülalpool, on tööorganite muldatungimine tagatud juhul, kui samaaegselt asub punkt  $\pi_1$  eespool. Kuid punkti  $\pi_1$  masinast eespool paiknemise korral on võimalik ka lülide parameetrite niisugused väärtused, mille puhul punkt  $\pi_2$  asub masinast allpool ning pole tagatud tööorganite muldatungimise võimalus.

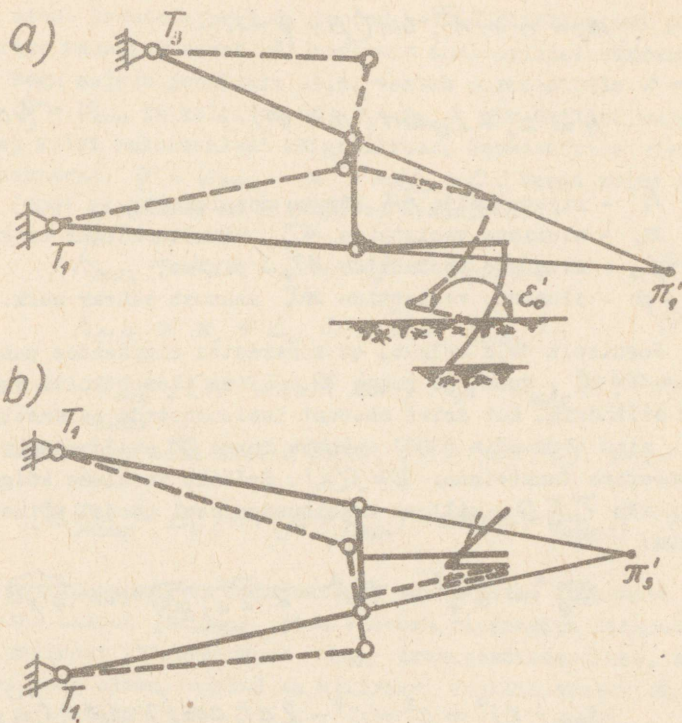
Niisiis määrab mullaharimismasinate tööorganite muldatungimise tingimuse hetkelise pöörlemistsentri  $\pi_1$  asetus eespool masinat. Koos tööorgani muldatungimisega nurk  $\epsilon_0$  pidevalt väheneb ja muutub nulliks etteantud ja väljareguleeritud töösügavuse  $a$  saavutamisel. Töösügavuse edasist suurenemist takistab nurga  $\epsilon$  negatiivseks muutumine, mis tähendab seda, et tööorgani nina suundub ülespoole. Nii säilib töösügavus automaatselt ideaalsete tingimuste korral. Reaalsed töötamistingimused on loomulikult kaugel ideaalsetest ja seetõttu toimub masina raskuse mõjul töösügavuse ülemäärane suurenemine (seda vaid pehme mulla puhul), mille vältimiseks varustatakse rippmasinad piirava seadme - tugirattaga.

Teine nõue - haardelaiuse isesäilivus - on täidetud, kui alumiste veolattide projektsioonjooned horisontaaltasapinnale lõikuvad samuti masinast eespool asuvas punktis  $\pi_3$  (joon. 14, b). Selgitame seda järgmise näitega. Kui näiteks masina tööorgani takistusele (kivile) sattumise tagajärjel paiskub masina raam koos tööorganitega vasakule kõrvale (joon. 14, b), siis pöörduv tööorgan normaalse liikumissihhi suhtes. Pöördumine peab olema aga sellise suunaga, et agregaadid edasistel liikumisel suunduks masin tagasi paremale. Nagu selgub skeemilt joon. 14, b, vastab sellele nõudele punkti  $\pi_3$  asetus masinast eespool. Vastasel juhul (joon. 15, b) on aga olukord vastupidine: tööorgan tungib üha enam vasakule. Süsteem on seda tundlikum, mida suurem on nurk  $\eta$  (joon. 14, b). Järelikult on rippseadme kahepunktiline skeem (joon. 13, c) sellest seisukohast eelistatum, võrreldes kolmepunktilisega.

Kolmanda nõude - vajaliku transpordikõrguse - määramiseks



Joon. 14. Traktori rippseadme kinemaatiline skeem ja sellele esitatavad nõuded.



Joon. 15. Riputusmehhanismi lülide ebaõige asetus.

kasutame skeemi joonisel 14, a.

Vajaliku transpordikõrguse ja võimaluse töötada maksimaalsel töösügavusel tagamine taandub tingimusele, et ripustusteljel  $AA$  peab olema kindel vertikaalse liikumise ulatus  $\Delta h$ , s. t.

$$(\Delta h)_{max} = h_{max} - h_{min} . \quad (108)$$

Skeemilt nähtub, et üldjuhul võime kirjutada

$$z_1 = h + \overline{AT}_1 \sin(\beta + \psi - \pi)$$

ehk

$$h = z_1 + L_H \sin(\beta + \psi), \quad (109)$$

kus  $h$  - riputustelje  $AA$  kõrgus maapinnast;

$z_1$  - alumiste veolattide  $AT_1$  kinnituskõrgus traktoril;

$L_H$  - alumiste veolattide  $AT_1$  pikkus;

$\beta + \psi$  - alumiste veolattide  $AT_1$  asetust määrav nurk.

Jooniselt 14, a selgub, et konkreetse rippseadme puhul on  $\beta = \text{const}$ , kuna aga nurga  $\psi$  väärtus oleneb kolvi asendist silindris. Kui kolvi asetust iseloomustada parameetriga  $X$ , siis võrrandis (109) esineva nurga  $\psi$  avaldamiseks peame koostama funktsiooni  $\psi = f(X)$ . Selleks vaatleme kõigepealt kolmnurka  $T_4 T_2 D$ , millest koosinusteoreemi põhjal võime kirjutada:

$$\overline{DT}_4^2 = \overline{T_2 T_4}^2 + \overline{T_2 D}^2 - 2 \cdot \overline{T_2 T_4} \cdot \overline{T_2 D} \cdot \cos \widehat{T_4 T_2 D}$$

ehk

$$(S_{\min} + X)^2 = c^2 + r_1^2 - 2cr_1 \cos[\gamma - (\alpha + \delta)], \quad (110)$$

kus  $S_{\min} = (\overline{DT}_4)_{\min}$  - lüli  $DT_4$  minimaalne pikkus;

$X$  - koordinaat, mis määrab kolvi asendi silindris;

$c = \overline{T_2 T_4} = \text{const}$  - kinnituspunktide  $T_2$  ja  $T_4$  vaheline kaugus;

$r_1$  - hoova  $DT_2$  pikkus;

$\alpha$  - hoobade  $T_2 C$  ja  $T_2 D$  vaheline jäik nurk;

$\delta = \text{const}$  - rippseadme konstruktiivne nurk;

$\gamma$  - lüli  $T_2 C$  asendit määrav nurk.

Võrrand (110) võimaldab määrata nurga  $\gamma$  väärtused vastavalt kolvi asendile  $X$  (muidugi eeldusel, et parameetrid  $S_{\min}$ ,  $c$ ,  $r_1$ ,  $\alpha$  ja  $\delta$  on teada).

Vaadeldes edasi nelilülilikut  $T_1 T_2 C B$ , võime juba määratud  $\gamma = f(X)$  kaudu leida ka seose  $\psi = f(\gamma) = f_1(X)$ . Sel-

leks saame kasutada p. 4.2. toodud nelilülilmehhanismi parameetrite vahelist seost väljendavaid analoogilisi võrrandeid.

Nagu selgub jooniselt 14, a, vastab parameetrile  $h = h_{max}$  nurk  $\psi = \psi_{min}$  ja kolvi asend  $x = x_{max}$ , mis ühtlasi kujutab endast kolvi maksimaalset käigupikkust. Parameetrile  $h = h_{min}$  aga vastavad  $\psi = \psi_{max}$  ja  $x = x_{min} = 0$ . Seega võime seosest (109) kirjutada ka niisugused avaldised:

$$h_{max} = z_1 + L_H \sin(\beta + \psi_{min}), \quad (111)$$

$$h_{min} = z_1 + L_H \sin(\beta + \psi_{max}), \quad (112)$$

kusjuures  $\psi_{min} = f(x)$  kohal  $x = 0$  ja  $\psi_{max} = f(x)$  kohal  $x = x_{max}$ .

Lahendades koos seosed (108), (111) ja (112), saame

$$(\Delta h)_{max} = L_H [\sin(\beta + \psi_{min}) - \sin(\beta + \psi_{max})]. \quad (113)$$

On arusaadav, et riputustelje vertikaalse liikumise maksimaalne ulatus  $(\Delta h)_{max}$  peab vastama rippmasina liikumisele maksimaalsest töösügavusest  $a_{max}$  transpordiasendisse, kusjuures peab olema tagatud ka kliirensi vajalik suurus  $h_k$ . Võime kirjutada:

$$(\Delta h)_{max} = a_{max} + h_k + h_n, \quad (114)$$

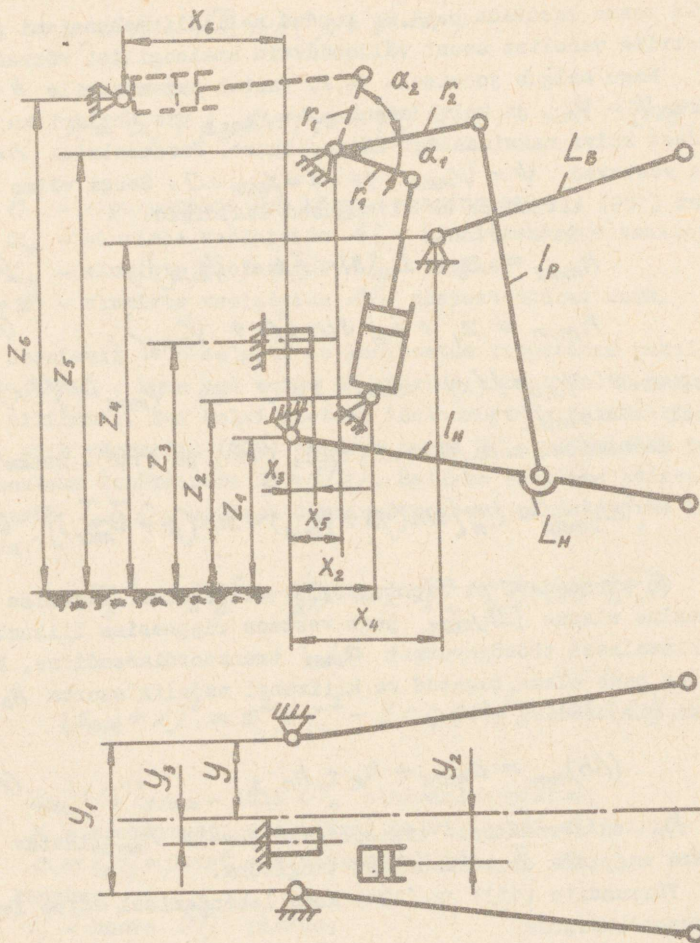
kus  $h_n$  on normaalsele transpordikõrgusele  $h_k$  lisatav tagavara maapinna ebatasasustest tingituna.

Võrrandite (113) ja (114) koos lahendamisel võime leida transpordikõrguse

$$h_k = L_H [\sin(\beta + \psi_{min}) - \sin(\beta + \psi_{max})] - (a_{max} - h_n). \quad (115)$$

Et parameeter  $\psi$  sõltub rippseadme parameetritest, siis järelikult oleneb ka transpordikõrgus  $h_k$  samadest suurusdest. Praktiliselt  $h_k = 0,25 \dots 0,35$  m,  $h_n = 0,15 \dots 0,20$  m.

Mõningate Nõukogude Liidus toodetavate traktorite rippseadme kinemaatilised parameetrid on esitatud tabelites 8 ja 9, kusjuures neis esinevad tähised vastavad joonisel 16 näidatuile.



Joon. 16. Traktori rippseadme kinemaatilised parameetrid.

Mõningate ratastraktorite hüdraulilise rippseadme parameetrid (mm)

1	Tähtis joon. 16	AT-20				T-28	T-40	T-40A	MT3-5AC	MT3-50M	MT3-60/52	T-50B	T-54B	T-54C	T-58M
		sia- modi- fikati- sioon	juur- vilja modi- fikati- sioon	3	4										
Alumised veolatid	$L_N$ $L_N$ $Z_1$ $Y_1$	810 310 425 494	810 340 495 494	810 340 495 494	800 370 705 490	1180 550 475 440	800 400 517...530 490	800 363 351 490	885 410 472...485 477	800 800 205 741	915 410 426 285	915 410 429 285	915 410 429 285	950 310 451 490	
Ülemine tõmmits	$L_{min}$ $L_{max}$ $X_4$ $Z_4$	420 740 130 705	420 740 350 817	420 740 350 817	520 800 200 1087	660 990 371 831	520 800 208 907...920	520 800 205 741	520 800 187 807...820	520 800 205 741	762 1027 116 792	762 1027 116 792	762 1027 116 792	590 900 290 846	
Vertikaalsed tõmmitsad	$L_{pmin}$ $L_{pmax}$	405 475	462 532	462 532	410 560	490 590	430 515	465 515	430 515	465 515	330 415	375 480	375 480	470 525	

Tabell 8 järg

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tõste- hoovastik	$r_1$	105	105	140	165	140	140	140	140	140	160
	$r_2$	220	220	260	300	260	260	260	300	300	200
	$\alpha_1^0$	49	8	7,5	105	0	-	0	-	-	127,5
	$\alpha_2^0$	-	-	-	-	-	-	57,5	75	75	90
	$x_5$	80	300	91	271	113	113	131	110	-19	-5
	$z_5$	825	1032	1287	989	1057...1070	987...1000	987...1000	891	832	997
Hüdroliin- der	$x_2$	25	245	60	-	153	-	153	-	-	-
	$x_6$	-	-	-	350	-	472	-	642	628	426
	$z_2$	373	530	679	-	453...466	-	286	-	-	-
	$z_6$	-	-	-	884	-	1034...1047	-	888	1054	1173
	$y_2$	125	125	-154	340	-156	60	153	0	0	0
Jõuvõtu- võll	$x_3$	168	388	77	150	155	190	169	471	69	154
	$z_3$	447	654	830	667	655...668	636...649	607	564	129	550
	$y_3$	21	21	0	40	0	0	47	40	0	0

Mõningate roomiktraktorite hüdraullilise rippseadme parameetrid (mm)

1	Tähis joon. 16	AT-54A		T-74		AT-75, 6-75 AT-90, K-75		T-4		T-100 T-130	
		kahe- punktiline	kolme- punktiline	kahe- punktiline	kolme- punktiline	kahe- punktiline	kolme- punktiline	kahe- punktiline	kolme- punktiline	kahe- punktiline	kolme- punktiline
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Alumised veolatid	L <sub>H</sub>	973	1000	1000	1000	970	1005	973	1003	1105	1105
	L <sub>H</sub>	706	804	643	758	643	772	706	804	760	800
	Z <sub>1</sub>	409	409	415	415	413	413	419	419	600	600
	Y <sub>1</sub>	0	700	0	649	0	500	0	700	210	570
	Y	0;144	379	0;150	324	0;102	250	0;144	379	105	285
Ülemine tõmmits	L <sub>3min</sub>	760	760	710	710	760	760	760	760	1020	1020
	L <sub>3max</sub>	923	923	970	070	932	932	923	923	1380	1380
	X <sub>4</sub>	70	70	70	70	48	48	90	90	150	150
	Z <sub>4</sub>	1059	1059	1065	1065	1071	1071	1069	1069	1270	1270
Vertikaalsed tõmmitsad	L <sub>pmin</sub>	712	712	580	580	691	691	712	712	675	675
	L <sub>pmax</sub>	798	798	800	800	812	812	798	798	780	780

Tabel 9 järg

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Tõstehoovastik	$r_1$	190	190	190	190	190	190	190	190	420	420	
	$r_2$	600	600	600	600	600	600	600	600	820	820	
	$\alpha_1^0$	35	35	35	35	35	35	35	35	6	6	
	$\alpha_2^0$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	$\lambda_5$	70	70	70	70	70	48	48	90	90	150	
	$z_6$	1059	1059	1065	1065	1065	1071	1071	1069	1069	1270	1270
Hüdrocilinder	$\lambda_2$	0	0	0	0	-180	-180	0	0	0	0	
	$\lambda_6$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	$z_2$	409	409	415	415	464	464	419	419	815	815	
	$z_6$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	$y_2$	190	190	190	190	190	200	200	190	190	±452	±452
Jõuvõtuvõlli	$\lambda_3$	-65	-65	102	102	-104	-104	-33	-33	-530	-530	
	$z_3$	693	693	907	907	595	595	699	699	966	966	
	$y_3$	-65	-65	-74	-74	-30	-30	0	0	0	0	

#### 4.4. Rataste teooria ja tehnoloogiline arvutus

##### 4.4.1. Ratta veeremise protsess

Ratta loomine oli inimkonna suurimaks leiutiseks. Selle eelkäijaks oli rullik (ümar puupakk), mis tunduvalt kergendas suurte raskuste ümberasetamist. Ratastele toetuvad veokid ilmusid juba neljandal aastatuhandel e. m. a. Edasi hakati rattaid kasutama mitte ainult raskuste nihutamiseks, vaid ka liikumise ülekandjatena.

Põllutöömasinatel kasutati ratast esimesena vanimal põllutööriistal - adral. Selle võtsid kasutusele kreeklased, kusjuures ratas täitis hobuadral maapinda kopeeriva seadme ülesannet.

Ratta suurt tähtsust masinate käiguosana kinnitab fakt, et libisliikumisega võrreldes vähendab ratas liikumistakistust kuni 100 korda. See on seletatav järgnevaaga.

Mööda mingit pinda veerevat ratast võib kujutleda pidevalt muutuva hoovana (kangina). Tõmbejõud  $P$  (joon. 17, a) nihutab rattale toetuvat koormust  $G$  kui õla  $OA$  otsale rakendatud jõud. Hoob (õlg)  $OA$  pöörduv toetuspunkti  $A$  ümber mingi nurga võrra ja edasi saab toetuspunktiks  $B$ , õlaks aga  $OB$ , ja nii jätkub ratta veeremise ja õla muutumise protsess. Selleks, et veeremine toimuks tõugeteta, ühendatakse õlgade  $OA, OB, \dots$  välispunktid ringjoonekujulise põiaga, saadeski niiviisi ratta, mille kodarad kujutavadki endast eespool nimetatud õlgu. Ratta veerema panemiseks kulutatav jõud  $P$  aga, nagu selgub skeemilt, avaldub tasakaaluvõrrandist  $P_r = G a :$

$$P = G \frac{a}{r} = G \tan \alpha . \quad (116)$$

Ratta veeremisel sooritab selle põia iga punkt  $K$  (joon. 17, b) liitliikumise: kaasamineku liikumiskiirusega  $v_M$ , mis on ka ratta tsentri liikumiskiiruseks, ja pöörleva liikumise kiirusega  $v$ , mis kujutab endast pöörlemise joonkiirust. Kui veeremine toimub tasasel pinnal ja ilma libisemiseta, siis on toetuspunkti  $\pi$  kiirus võrdne nulliga, sest  $v_M = -v$ . See-

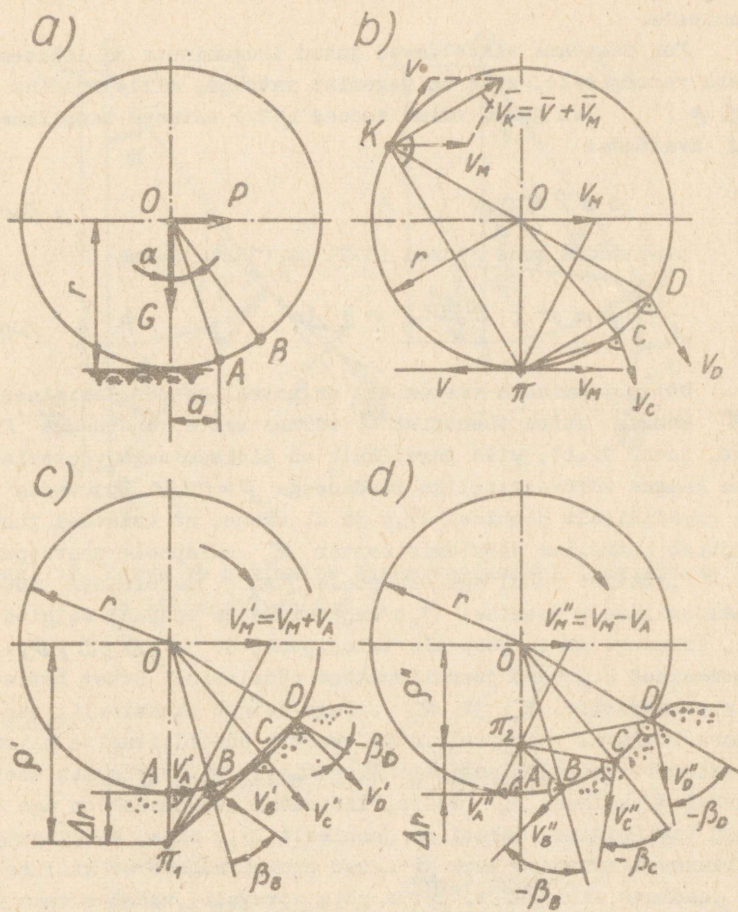
tõttu võib punkti  $\pi$  nimetada pöörlemise hetkeliseks tsentriks. Järelikult võib pöia iga punkti summaarset kiirust vaadelda joonkiirusena pöörlemisel hetkelise tsentri  $\pi$  ümber. Näiteks on punkti  $K$  summaarne kiirus  $\vec{v}_K = \vec{v}_M + \vec{v}$  risti pöörlemise hetkelise raadiusega  $\pi K$ . See kehtib pöia mis tahes punkti kohta.

Reaalse masina ratta veeremisel reaalses tingimustes on aga alati tegemist ratta libisemisega toetuspinna suhtes. Seejuures võib libisemine olla ratta edasiliikumise kiirust suurendav või vähendav. Kiiruse suurenemine esineb enamasti veetavate rataste puhul, sest nende ülesandeks on vaid toetada masinat selle liikumisel ning paljudel juhtudel tagada ka liikumise sihi muutmise võimalust. Veetavad rattad liiguvad edasi mingi tõmbejõu (või ka tõukejõu) mõjul, mis tekitab vedavatel ratastel mõjuva liikumapaneva pöördemomendi poolt. Vedavale rattale rakendatud pöördemoment muutub masina edasiliikumiseks vajalikuks liikumapanevaks jõuks tänu ratta pöia ja toetuspinna vahel mõjuvale hõõrdumisele. Kui hõõrdumistingimused pole küllaldased masina edasitõukamiseks, siis ratas hakkab toetuspinna suhtes libisema. Seega on ainult vedavate rataste puhul tegemist edasiliikumise kiirust vähendava libisemisega. Tihti kasutatakse nimetatud kahesuguse jõuga libisemise eristamiseks erinevaid termineid - edasiliikumise kiirust suurendavat libisemist nimetatakse liugumiseks, kiirust vähendavat aga libisemiseks. Olgu märgitud, et ka vedavad rattad võivad liuguda näiteks kaldpinda mööda alla liikumisel (mäest alla), veetavatel ratastel aga esineb ainult liugumine.

Vaatleme nüüd lähemalt rataste liugumise ja libisemisega veeremise protsessi.

Kui libisemine toob kaasa edasiliikumise kiiruse suurenemise (liugumine), siis tähendab see seda, et ühe täispöörde jooksul liigub ratas edasi teepikkuse, mis on suurem selle ümbermõõdust. Kui aga libisemisega kaasneb edasiliikumise kiiruse vähenemine, siis on ühe täispöörde jooksul läbitud teepikkus väiksem ratta ümbermõõdust. Seega võime kirjutada:

$$s = 2\pi r \pm \Delta s, \quad (117)$$



Joon. 17. Rattale mõjuvad aktiivjõud (a), ratta veeremine libisemise ja liugumiseta (b), liugumisega (c) ning libisemisega (d)

kus ülemine märk (+) vastab liugumisele, alumine (-) aga libisemisele.

Kui taandame vaadeldavad juhud liugumiseta ja libisemiseta veeremisele, siis on tegemist rattaga, mille raadius on  $\rho \geq r$ . Sel juhul võime seoses (117) esineva teepikkuse  $s$  avaldada:

$$s = 2\pi\rho. \quad (118)$$

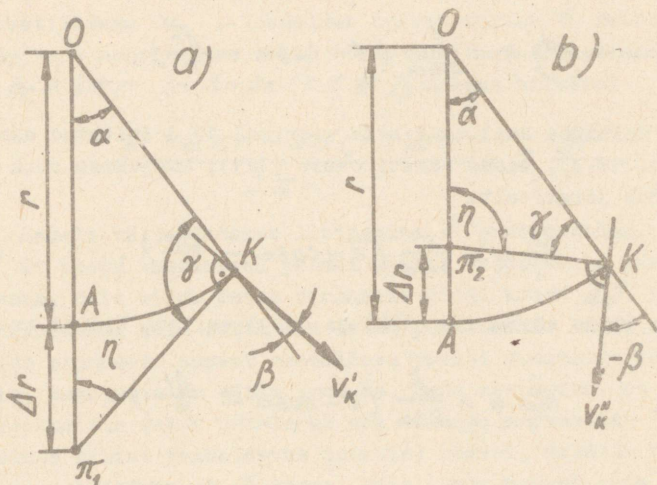
Lahendades koos seosed (117) ja (118), saame

$$\rho = r \pm \frac{\Delta s}{2\pi} = r \pm \Delta r. \quad (119)$$

Et libisemiseta veeremisel on hetkelise pöörlemistsentri  $\pi$  kaugus ratta tsentrist  $O$  võrdne ratta raadiusega  $r$  (vt. joon. 17,b), siis järelikult on libisemisega veeremisel see kaugus võrdne tingliku raadiusega  $\rho = r \pm \Delta r$ . Kujutades seda graafiliselt joonisel 17,c ja d, näeme, et esimesel juhul kujuneb hetkeline pöörlemistsenter  $\pi_1$  allapoole toetuspunkti  $A$ ; teisel juhul aga ülespoole ( $\pi_2$ ). Toimides nüüd analoogiliselt joonisel 17,b kujutatule ja eespool selgitatu-  
le, võime kujutada pöia mis tahes punktide  $A, B, C, D, \dots$  summaarsed kiirused joonkiirustena pöörlemisel ümber hetkeliste tsentrite  $\pi_1$  ja  $\pi_2$ . Nagu selgub skeemidelt, suureneb liuguval veermisel ratta tsentri edasilikumise kiirus teoreetilisega (libisemiseta liikumisel)  $v_H$  võrreldes toetuspunkti  $A$  kiiruse  $v_A$  võrra, libiseval liikumisel on aga olukord vastupidine. Samuti on joonisel 17,c näha, et liuguval liikumisel suureneb nurk  $\beta$  antud punkti summaarse kiiruse ja raadiuse sihi (s. t. ratta pöia normaali) vahel suunas  $D \rightarrow A$ , saavutades kõige madalamas punktis  $A$  väärtuse  $90^\circ$ . Libiseval liikumisel suureneb sama nurk negatiivses suunas.

Vaadeldes eraldi veereva ratta pöia mingit punkti  $K$ , võime joonise 17,b põhjal välja joonestada skeemi, mis on kujutatud joonisel 18,a. Tähistades sellel nurgad  $\widehat{OK} = \alpha$ ,  $\widehat{OK} = \gamma$ , näeme, et

$$\begin{aligned} \beta &= \gamma - \frac{\pi}{2}, \\ \gamma &= \pi - (\alpha + \eta), \end{aligned} \quad (120)$$



Joon. 18. Nurga  $\beta$  määramise skeem veeremisel liugumisega (a) ja libisemisega (b).

mistõttu

$$\beta = \pi - (\alpha + \eta) - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \eta)$$

ehk

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{ctg} (\alpha + \eta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \eta - 1}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \eta}. \quad (121)$$

Seoses (121) esineva suuruse  $\operatorname{ctg} \eta$  määramiseks kasutame kolmnurga  $\pi_2 OK$  kohta siinusteoreemi

$$\frac{\sin \eta}{r} = \frac{\sin \gamma}{r + \Delta r},$$

millest, arvestades seost (120), saame

$$\operatorname{ctg} \eta = \frac{1}{\sin \alpha} \left( 1 - \cos \alpha + \frac{\Delta r}{r} \right). \quad (122)$$

Toimides analoogiliselt joonisel 17, d esitatud skeemiga (joon. 18, b), saame samuti seose (121), kusjuures nurk  $\eta$  avaldub järgmiselt:

$$\operatorname{ctg} \eta = \frac{1}{\sin \alpha} \left( 1 - \cos \alpha - \frac{\Delta r}{r} \right). \quad (123)$$

Seega võime võrrandid (122) ja (123) esitada üldise avaldise-  
ga

$$\operatorname{ctg} \eta = \frac{1}{\sin \alpha} \left( 1 - \cos \alpha \pm \frac{\Delta r}{r} \right). \quad (124)$$

Asetades  $\operatorname{ctg} \eta$  avaldise (124) seosesse (121), saame

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\frac{\operatorname{ctg} \alpha}{\sin \alpha} \left( 1 - \cos \alpha \pm \frac{\Delta r}{r} \right) - 1}{\operatorname{ctg} \alpha + \frac{1}{\sin \alpha} \left( 1 - \cos \alpha \pm \frac{\Delta r}{r} \right)},$$

ehk pärast mõningaid teisendusi

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{ctg} \alpha - \frac{1}{\left( 1 \pm \frac{\Delta r}{r} \right) \sin \alpha}, \quad (125)$$

kus ülemine märk (+) vastab ratta veeremisele liugumisega, alumine (-) aga veeremisele libisemisega.

Võrrand (125) näitab, et ratta põia mis tahes punkti kiiruse kaldenurk  $\beta$  raadiuse suhtes (s. t. põia normaali suhtes) sõltub vaadeldava punkti asukohast ( $\alpha$ ), ratta raadiusest  $r$  ja libisemise liigist ning suurusest  $\pm \Delta r/r$ . Et suhe  $\Delta r/r$  tõesti on libisemist iseloomustavaks parameetriks, selgub kohe. Nimelt määratakse autode ja traktorite rataste libisemine suhtega

$$\delta = \frac{v_T - v}{v_T} = \frac{s_T/t - s/t}{s_T/t} = \frac{s_T - s}{s_T},$$

kus  $v_f - v$  on libisemise tõttu kaotatud kiirus võrreldes teoreetiliselega  $v_f$ . Vaadeldes ajavahemikuna  $t$  ratta ühe täispöörde sooritamise aega, võime ülaltoodud seosesse asendada  $s_f = 2\pi r$  ja  $s = 2\pi(r \pm \Delta r)$ , saades niiviisi

$$\delta = \frac{2\pi r - 2\pi(r \pm \Delta r)}{2\pi r} = \pm \frac{\Delta r}{r}. \quad (126)$$

Sageli väljendatakse libisemine  $\delta$  protsentides.

Et ratta veeremisel pehmel pinnal vajub selle pöid pinnasesse, siis mõjub ratas pinnasele mingi kaare  $AD$  (joon. 17) ulatuses. Kuid ratta mis tahes punkt selle kaare osas ei avalda pinnasele survet vaadeldava punkti summaarse kiiruse sihis, nagu esialgu võiks tunduda. Seda seepärast, et pinnase reaktsioon ratta pöiale ei saa viimase normaalist (s. t. raadiuse sihist vaadeldavas punktis) kõrvale kalduda rohkem, kui veerehõordenurga  $\varphi$  võrra. Järelikult langeb pöia poolt pinnasele avaldatava surve siht kokku sama punkti kiiruse sihiga ainult sel momendil, kui nurk  $\beta$  saab võrdseks hõordenurgaga  $\varphi$ .

Eeltoodu kehtib eeskätt metallist pöia ja rehviga rataste, aga samuti rullide kohta. Õhukummidega rataste veeremisprotsessil on aga mõningaid iseärasusi. Peamiselt seisneb see selles, et sel juhul on tegemist kahepoolse deformatsiooniga - deformeerub mitte ainult toetuspind (veeremispind), vaid ka ratas (kumm). Selle tagajärjel suureneb kontaktpind, mistõttu väheneb erisurve pinnale. Kuid kummi deformeerimiseks kuuluv jõud moodustab osa ratta veeremisel tekkivast takistusjõust. Teine osa sellest jõust moodustab jõud veeremispinna deformeerimiseks. Seega on veeremistakistus sõltuv ka õhurõhust kummis: mida kõvem on liikumispind, seda suurem peab olema rõhk kummis, ja vastupidi. Seetõttu kasutatakse põllutöomasinatel ja traktoritel madalsurvekumme (rõhk kummis  $p = 80 \dots 250 \text{ kN/m}^2$ , s. o.  $0,8 \dots 2,5 \text{ kG/cm}^2$ ), autodel aga kõrgsurvekumme (sõiduautodel  $p = 150 \dots 250 \text{ kN/m}^2$ , s. o.  $1,5 \dots 2,5 \text{ kG/cm}^2$ , veoautodel aga  $p = 300 \dots 700 \text{ kN/m}^2$ , s. o.  $3 \dots 7 \text{ kG/cm}^2$ ).

4.4.2. Põhiseos ratta konstruktiivsete parameetrite määramiseks

On ju igäiks tähele pannud, et ratta poolt toetuspinnas- se (näiteks mullasse) jäetud jälje sügavus oleneb rattale lan- gevast koormusest, ratta läbimõõdust ja põia laiusest, aga samuti ka toetuspinna materjali omadustest (näiteks pehme või kõva muld). Püüame leida nimetatud tegurite vahelise teoreet- tilise sõltuvuse.

Oletame, et ratas koormusega  $G$  on vajunud toetuspinnas- se, jättes jälje sügavusega  $h_0$  (joon. 19,a), kusjuures rat- ta raadius on  $r$  ja põia laius  $b$ . Seejuures on ratas toe- tuspinna kokku surunud mahus  $V$ , mille suurus on kindlasti sõltuv koormusest  $G$ . Selle sõltuvuse võime avaldada võrde- teguri (proportsionaalsuse teguri)  $q$  kaudu:

$$G = qV. \quad (128)$$

Et võrdeteguri  $q$  mõõtühikuks kujuneb jõuühikut mahuühi- ku kohta, siis selle füüsikaliseks sisuks on vaadeldava pin- na materjali füüsikalise-mehhaanikalisi omadusi kajastav vastu- panu muljumisele ehk nn. ruummuljumispinge.

Maht  $V$ , nagu selgub jooniselt 19,a, avaldub segmendi  $ABC$  pindala ja põia laiuse  $b$  korrutisena:

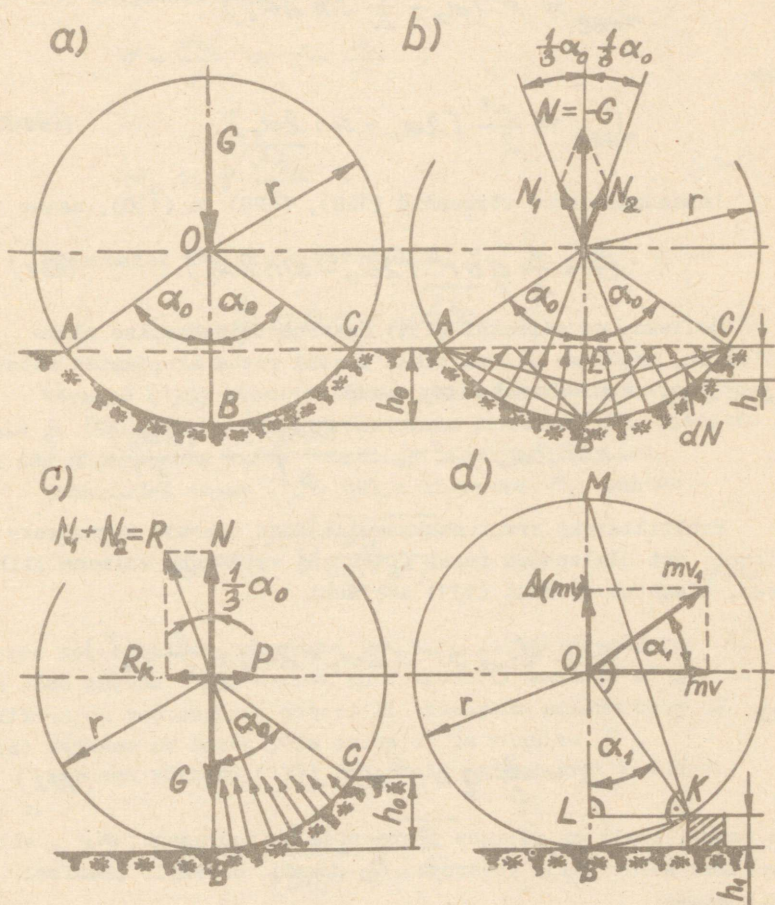
$$V = S_{ABC} b. \quad (129)$$

Segmendi  $ABC$  pindala omakorda võrdub sektori  $OABC$  ja kolm- nurga  $ACO$  pindalade vahena, s. o.

$$S_{ABC} = \frac{\pi r^2 \cdot 2\alpha_0}{2\pi} - \frac{2r(r-h_0)\sin\alpha_0}{2}.$$

Et jälje sügavus  $h_0 = f(\alpha_0)$ , siis on otstarbekohane see elimineerida. Seega asendades viimasesse seosesse  $r-h_0 = r\cos\alpha_0$ , saame

$$S_{ABC} = r^2\alpha_0 - r^2\sin\alpha_0\cos\alpha_0$$



Joon. 19. Ratta arvutusskeem (a), paigalseisvale (b) ja veerevale (c) rattale mõjuvad jõud ning takistusega kohtuva ratta liikumishulga muutumise skeem (d).

ehk

$$S_{ABC} = r^2 \left( \alpha_0 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_0 \right)$$

ehk

$$S_{ABC} = \frac{r^2}{2} (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0). \quad (130)$$

Lahendades koos võrrandid (128), (129) ja (130), saame

$$G = \frac{1}{2} q b r^2 (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0). \quad (131)$$

Selleks, et võrrandi (131) edasine teisendamine oleks võimalik, kasutame matemaatikas tuntud ritta arendamise võtet  $\sin 2\alpha_0$  avaldamiseks  $\alpha_0$  kaudu:

$$\sin 2\alpha_0 = 2\alpha_0 - \frac{(2\alpha_0)^3}{3!} + \frac{(2\alpha_0)^5}{5!} - \dots$$

Praktilisteks arvutusteks küllaldase täpsuse tagamiseks piisab, kui ülaltoodud reast arvestada vaid kahe esimese liikmega, mistõttu võrrand (131) avaldub:

$$G = \frac{1}{2} q b r^2 (2\alpha_0 - 2\alpha_0 + \frac{8}{6} \alpha_0^3)$$

ehk

$$G = \frac{2}{3} q b r^2 \alpha_0^3. \quad (132)$$

Et praktiliselt on tülikas opereerida abisuurusega  $\alpha_0$ , siis avaldame selle jälje sügavuse  $h_0$  kaudu. Skeemilt joonisel 19,a saame

$$\cos \alpha_0 = \frac{r - h_0}{r} = 1 - \frac{h_0}{r}. \quad (133)$$

Kui kasutada ka  $\cos \alpha_0$  puhul ritta arendamist, s. o.

$$\cos \alpha_0 = 1 - \frac{\alpha_0^2}{2!} + \frac{\alpha_0^4}{4!} + \dots$$

ning arvestades sellest kahe esimese liikmega, siis võime seose (133) kirjutada kujul

$$1 - \frac{\alpha_0^2}{2} \approx 1 - \frac{h_0}{r},$$

millest

$$\alpha_0 \approx \sqrt{\frac{2h_0}{r}}. \quad (134)$$

Lahendades nüüd koos võrrandid (132) ja (134), saame

$$G \approx \frac{4}{3} q b h_0 r \sqrt{\frac{2h_0}{r}}. \quad (135)$$

Võrrand (135) sisaldab ratta kõiki peamisi konstruktiivseid ja töötamistingimusi kajastavaid parameetreid. Seetõttu on see põhiseoseks ratta tehnoloogilisel arvutamisel.

Lahendades seose (135) jälje sügavuse  $h_0$  suhtes -

$$h_0 \approx \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{9G^2}{4q^2 b^2 r}} \quad (136)$$

saame teoreetilise tõestuse sellele, et jälje sügavus  $h_0$  on seda suurem, mida suurem on koormus  $G$  rattale ning mida väiksem on toetuspinna materjali vastupanu muljumisele  $q$ , mida väiksem on ratta põia laius  $b$  ja raadius  $r$ .

Kui aga võrrand (135) lahendada parameetri  $q$  suhtes, s. o.

$$q \approx \frac{3G}{4b h_0 r} \sqrt{\frac{r}{2h_0}}, \quad (137)$$

siis näeme, et saadud seos (137) on kasutatav toetuspinna materjali omaduse - vastupanu muljumisele  $q$  - katselisel määramisel. M. V. Sablikovi järgi on  $q$  keskmised väärtused järgmised: kütud põllul - 1000...2000 kN/m<sup>3</sup> (0,1...0,2 kG/cm<sup>3</sup>), söödil - 5000...11000 kN/m<sup>3</sup> (0,5...1,1 kG/cm<sup>3</sup>), muldteel - 45000...90000 kN/m<sup>3</sup> (4,5...9,0 kG/cm<sup>3</sup>).

Olgu lõpuks märgitud, et eeltoodu kehtib metallist põia ja rehvida rataste ning rullide kohta. Õhukummidega rataste

arvutamisel soovitatakse kasutada järgmist empiirilist seost:

$$G = 0,233 Ak p^{0,585} b^{1,39} (d+b), \quad (138)$$

kus  $G$  - koormus rattale (kG);  
 $p$  - õhurõhk kummis (kG/cm<sup>2</sup>);  
 $b$  - kummi profiili laius (cm);  
 $d$  - velje läbimõõt, mõõdetuna kummi toetusäärikult (cm);

$A, k$  - tegurid, mis arvestavad kummi konstruktsiooni ja kasutusala. Orienteerival arvutusel võib kasutada järgmisi väärtusi:

transportveokid	-	$A = 1$ ;	$k = 1$ ;
autod	-	$A = 1,3 \dots 1,5$ ;	$k = 0,4 \dots 0,5$ ;
põllutöomasinad			
ja traktorid	-	$A = 1,0 \dots 1,3$ ;	$k = 0,3 \dots 0,4$ .

#### 4.4.3. Ratta veerehõõrdetegur ja veeretakistus

Paigalseisva ratta puhul jaguneb sellele mõjuv koormus  $G$  ebaühtlaselt toetuspinnaga kontaktis olevale põia osale, s. o. kaarele  $ABC$  (joon. 19,b), kutsudes sellel esile ka ebaühtlaselt jaotunud normaalreaktsiooni (s. o. ratta raadiusse sibilise reaktsiooni). Mis tahes kohal mõjuv normaalreaktsioon  $dN$  on sõltuv jälje sügavusest  $h$  sellel kohal. Funktsiooni  $dN = f(h)$  kuju sõltub paljudest teguritest, eeskätt aga toetuspinna materjali füüsikalise-mehaanikalistest omadustest, mille arvestamine praktilistes arvutustes osutub väga keeruliseks ülesandeks. Seetõttu oletatakse, et on tegemist ideaalse olukorraga, ja normaalreaktsiooni  $dN$  muutumine sõltuvalt jälje sügavusest  $h$  allub kolmnurkade seaduspärasusele. See tähendab, et jõud  $dN$  paiknevad kolmnurkades  $CBF$  ja  $ABE$  (joon. 19,b), kusjuures nende summa  $N_1$  ja  $N_2$  läbib kolmnurga raskuskeset, mis teatavasti asub mediaanide (külpoolitajate) lõikepunktis. Et viimane asub kolmnurga alusest ühe kolmandiku kõrgusel, siis järelikult moodustavad jõud

$N_1$  ja  $N_2$  vertikaaliga nurga  $\sim \frac{1}{3}\alpha_0$ . Lisame selgituseks, et niisugusel juhul  $N_1 = N_2$ , mis vastab olukorrale, kus läik  $AC$  on horisontaalne. Jõudude  $N_1$  ja  $N_2$  geomeetriline summa kujutab endast rattale mõjuvat summaarset normaalreaktsiooni  $N$ , mis on võrdne ja vastupidine koormusele  $G$ .

Kui aga ratta tsentrile rakendada horisontaalne tõmbejõud  $P$  (joon. 19,c), siis hakkab ratas veerema. Selle tagajärjel põia osa  $AB$  (joon. 19,b) kaotab kontakti toetuspinna ja reaktsioon  $N_2$  muutub nulliks. Surve  $N_1$  põia osal  $BC$  aga kahekordistub, saades võrdseks  $R = N_1 + N_2 = 2N_1$ . Järelikult, vaadeldes veerevat ratas staatilise mudelina (s. t. selle tasakaalu ühel ajamomendil), tekib tõmbejõuga  $P$  võrdne ja vastupidine takistusjõud  $R_k$ , mis avaldub seosega (arvestamata hõõrdumisega ratta laagris)

$$R_k = N \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{3}. \quad (139)$$

Analoogiliselt avaldub ka tõmbejõud

$$P = G \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{3}. \quad (140)$$

Teatavasti määratakse ratta veeremistakistus seosest

$$R_k = Nf = N \operatorname{tg} \varphi, \quad (141)$$

kus  $f$  - veerehõõrdetegur;  
 $\varphi$  - veerehõõrdenurk.

Kõrvutades seosed (139), (140) ja (141) võime kirjutada:

$$f = \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{3} = \frac{R_k}{N} = \frac{P}{G}. \quad (142)$$

Avaldades  $\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{3}$  reana

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{3} = \frac{\alpha_0}{3} + \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha_0}{3}\right)^3 + \frac{2}{15} \left(\frac{\alpha_0}{3}\right)^5 + \dots \quad (143)$$

ning võttes sellest arvesse kaks esimest liiget, võime võrrandi (142) esitada ka kujul:

$$f = \operatorname{tg} \varphi = \frac{P}{G} = \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{3} \approx \frac{\alpha_0}{3} + \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha_0}{3}\right)^3. \quad (144)$$

Asetades siia  $\alpha_0$  avaldise vastavalt seostele (132) ja (134) saame kaks samaväärset võrrandit:

$$f = \frac{P}{G} \approx \frac{G}{54 q b r^2} + \frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{3G}{2q b r^2}} \quad (145)$$

ja

$$f \approx \frac{r + 2h_0}{3r} \sqrt{\frac{2h_0}{r}}. \quad (146)$$

Võrrandid (145) ja (146) näitavad, et veerehõõrdeteguri  $f$  väärtus sõltub mitte ainult kontaktpindade omadustest, nagu see on saanud tavaks praktiliste arvutuste korral (vt. tabel 10), vaid ka ratta konstruktiivsetest parameetritest ja rattale langevast koormusest. Hõõrdeteguri  $f$  katseliseks määramiseks sobib rohkem seos (146), sest jälje sügavus  $h_0$  ja ratta raadius  $r$  on lihtsalt mõõdetavad.

Juhime tähelepanu asjaolule, et kõik eeltoodu kehtib ka mullaharimisel kasutatavate rullide kohta.

Ei saa märkimata jätta ka seda, et eespool vaatlesime ratta veeremist ühel ajahetkel, s. t. staatilise mudelina, arvestamata veeremise kiirust. On ilmne, et kiiruse suurenemisel suureneb ka veeretakistus ja järelikult ka veerehõõrdetegur. Peale selle, veeretakistus sõltub ka veeremispinna ebatasasusest. Nimelt ratta veeremisel ebatasasel takistustega (kivid, mullapangad jms.) pinnal tekivad löögid ja tõukeid, mistõttu suureneb ka üldine veeretakistus. Selle küsimuse selgitamiseks kasutame skeemi joonisel 19,d.

Nagu selgus punktis 4.4.1., võib veereva ratta toetuspunkti  $B$  (joon. 19,d) vaadelda hetkelise pöörlemistsentrina. Kui ratas kohtub takistusega, siis sel momendil saab hetkeliseks pöörlemistsentriks ratta ja takistuse kokkupuutepunkt  $K$ . Järelikult muutub ka ratta tsentri  $O$  kiiruse siht ning suurus, mistõttu muutub ka ratta liikumishulk. Liikumishulga muutumine aga, nagu teame, võrdub löögijõu impulsiga:

$$R_{yy} \Delta t = \Delta(mv). \quad (147)$$

Et antud juhul muutub ka ratta tsentri kiiruse siht, siis liikumishulga juurdekasv  $\Delta(mv)$  pn suunatud vertikaalselt üles, kusjuures (joon. 19,d)

$$\Delta(mv) = mv \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (148)$$

kus  $mv$  on ratta liikumishulk enne takistusega kohtumist. Skeemilt saame, et

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\overline{KL}}{\overline{OL}} \quad (149)$$

ning

$$\overline{OL} = r - h_1, \quad (150)$$

kus  $r$  - ratta raadius;  
 $h_1$  - takistuse kõrgus.

Lõigu  $KL$  pikkuse saame avaldada sarnastest kolmnurkadest  $KLM$  ja  $KLB$  :

$$\frac{\overline{ML}}{\overline{KL}} = \frac{\overline{KL}}{\overline{BL}},$$

millest

$$\overline{KL} = \sqrt{\overline{ML} \cdot \overline{BL}} = \sqrt{(2r - h_1)h_1}. \quad (151)$$

Lahendades nüüd koos (147), (148), (149), (150) ja (151), saame:

$$R_{yg} \Delta t = \frac{\sqrt{h_1(2r - h_1)}}{r - h_1} mv,$$

millest

$$R_{yg} = \frac{m \sqrt{h_1(2r - h_1)}}{r - h_1} \cdot \frac{v}{\Delta t}. \quad (152)$$

Võrrand (152) näitab, et löögitakistuse  $R_{yg}$  suurus ole-  
 neb ratta ja sellele langeva koormuse massist  $m$ , ratta raa-

diusest  $r$ , takistuse kõrgusest  $h_1$ , ratta takistusele veeremise kiirusest  $V$  ning löögijõu mõjumise ajast  $\Delta t$ . Viimane aga sõltub omakorda ratta põia ja takistuse füüsikalistest omadustest (elastsus, plastilisus), mida suurem on pöörkuvate kehade elastsus, seda väiksem on aeg  $\Delta t$  ja seda suurem on järelikult tekkiv löök ehk tõuge  $R_{yg}$ . Nii on näiteks muld keerulise füüsikalise olemusega keha (materjal), olles nii elastne kui ka plastiline. Niisuguste kehade (materjalide) puhul võib löögi tagajärjel tekkinud deformatsiooni  $X$  võtta võrdeliseks kiiruse ja löögiajaga, s. t.

$$X \approx v \Delta t, \quad (153)$$

kus  $X$  on deformatsioon. Sel juhul võrrand (152) saab kuju

$$R_{yg} \approx \frac{m \sqrt{h_1 (2r - h_1)}}{r - h_1} \cdot \frac{v^2}{X}. \quad (154)$$

Võrrand (154) on teoreetiliseks tõestuseks õhukummidega varustatud rataste kasutamise eelistest. Nimelt näitab see, et löögijõud  $R_{yg}$  on seda väiksem, mida suurem on löögi mõjul tekkinud deformatsioon  $X$ . Ja edasi, mida väiksem on takistuse ületamisel tekkinud löögijõud, seda väiksem on ka ratta summaarne veeremistakistus.

Ja lõpuks, vedavate rataste puhul on olulise tähtsusega veel haardumine veeremispinnaga, mis sõltub pinna füüsikalismehhaanikalistest omadustest ja ratta põia veeremispinna konstruksioonist. Kui haardumistingimused on halvad, hakkab ratta libisema. Vedava ratta pöördemomendist tulenevat maksimaalset puutejõudu ratta põia pinnal, mille puhul tekib ratta libisemine, nimetatakse maksimaalseks haardumis- ehk sidetusjõuks  $T_{cs \max}$ . Selle jõu suhet koormusesse  $G$  rattal nimetatakse haardumis- (sidetus-) teguriks

$$f_{cs} = \frac{T_{cs \max}}{G}, \quad (155)$$

mille väärtused on esitatud tabelis 10. Seosest (155) järeldub, et ratas veereb ilma libisemiseta, kui on täidetud tingimus

$$T_{cs} \leq f G. \quad (156)$$

Rataste veerehõrde teguri  $f$  ja haardumisteguri  $f_{\text{ch}}$  praktiliselt kasutatavaid väärtusi

Veeremispinna liik	Veerehõrde- tegur $f$		Haardumistegur $f_{\text{ch}}$	
	metall- rattad	õhukum- midega rattad	metall- rattad	õhukumide- ga rattad
Asfalt	0,015	0,02	0,7	0,7
Kuiv muldtee	0,05	0,03	0,8	0,8
Niitmata aas	0,14	0,08	0,8	0,5
Tüüstik	0,15	0,10	0,7	0,6
Vajunud künd	0,16	0,12	0,4	0,5
Värske künd	0,22	0,16	0,3	0,4
Kuiv liiv	0,30	0,20	0,2	0,3
Turvasmuld	0,40	0,25	0,2	0,1
Lumetee	0,05	0,03	0,4	0,3

## 5. TEATMEMATERJALE

Tabel 11

### 5.1. Mahu- ja erikaalud

		Niiskus	Mahukaal	Erikaal	1000 tera
		%	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kaal N
1	2		3	4	5
<b>MULD</b>					
Liiv- ja saviliiv	abso-		8,0...15,0	25,0...28,0	-
Liivsavi	luut-		8,0...15,0	24,0...26,0	-
Raske liivsavi	selt		8,0...21,0	22,0...26,0	-
Savi- ja mustmuld	kuiv				
Turvasmuld				12,0...25,0	-
<b><u>TERA- JA KAUNVILJADE SEEMNED</u></b>					
Rukis *			6,6...7,9	12,0...15,0	0,18...0,27
Nisu			6,5...8,3	12,0...15,0	0,26...0,42
Oder			4,3...7,5	13,0...14,0	0,31...0,51
Kaer			3,9...5,5	10,0...14,0	0,23...0,40
Mais			6,0...8,2	13,0...14,0	2,86
Hernes			7,0...8,5	11,5...14,5	1,0...1,7
Vikk			7,6...11,5	12,0...14,0	0,23...0,57
Uba			5,9...8,0		4,0...8,0
<b><u>HEINTAIMEDE SEEMNED</u></b>					
Ristik			8,2...8,4	9,0...15,0	0,02
Timut			5,7	8,0...11,0	0,0005... 0,006
Kerahein			6,5	9,5	0,008... 0,017

Tabeli 11 järg

1	2	3	4	5
Lutsern	8,1...8,3	8,0...14,0		0,015...0,020
Valge mesikas		8,4	11,3	0,017...0,022
Härilik aruhein				0,015...0,020
Aasnurmikas		3,3	10,0	0,002...0,004
Aas-rebase-saba			10,5	0,010...0,015
Kõrge raihein		7,2	10,5	0,020...0,030
Karjamaa-raihein		7,2	12,0	0,020...0,030
Ohtetu luste		4,0	8,0...12,0	0,030...0,040
Punane aruhein				

UMBROHTUDE SEEMNED

Põldohakas		5,4	9,2	0,012...0,020
Põld-piimachakas	2,0	2,0	7,4	0,003...0,006
Rukkiluste			3,0...4,0	0,05...0,11
Nisulill		6,9...7,9	12,0...13,0	0,07...0,10
Rukkilill				
Rukki-katsehein		2,2	16,3	0,002...0,003
Valge karikakar		4,4	17,1	0,007...0,012
Ristikuvõrm		6,7	11,0...14,0	0,003...0,004
Orahein			8,0...11,0	0,03...0,04
Hirehernes		8,0	11,0	0,09...0,10
Kassitapp		7,4	12,1	0,05...0,10
Kassitatar		8,8	8,0...12,0	0,03...0,04
Linnutatar		5,6	9,7	0,01...0,02
Hobumadar		6,0	6,4	0,003...0,005
Vesihein		6,2	14,0	0,002...0,005
Süstlehine tee-leht		7,5	9,0...14,0	0,003...0,010
Lääv-teeleht		7,5	11,0...13,0	0,001...0,003
Oblikas		6,0...6,6	9,0...14,0	0,025...0,030
Valge hanemalts		7,1...7,2	8,0...12,0	0,009...0,012
Lõikhein				0,003...0,004
Angervaks				0,017...0,020

Tabeli 11 järg

	1	2	3	4	5
Põldsinep					0,005...0,006
Põldrõigas					0,040...0,080

ÕLIKULTUURIDE SEEMNED

Päevalill		2,6...4,4	7,3...9,4		0,53...0,69
Lina		5,8...7,3			0,038...0,048

MUGUL- JA JUURVILJADE JUURIKAD JA PEALSED

Kartulimugulad		6,2...7,7	10,7...11,5		-
Kartulipealsed	toored				-
Peedipealsed	toored	3,0...3,6			-
Suhkrupeedi-juurikad	-	5,8...10,2	10,3...11,0		-
Söödaporgand	-	5,6...7,0	10,1...10,8		-
Söödanaeris	-	5,8...6,4			-
Söödapeet	-	6,2...6,3			-
Kaalikas	-	4,5...6,5			-

KORE- JA JÕUSÖÖDAD NING SAAGI TÖÖTLEMISE JÄÄTMED

Kõrrelised					
heintaimed	20	0,48...0,67	-		-
Liblikõielised	20	0,68...0,88	-		-
Heintaimed	12...60	0,80...1,00	-		-
Pressitud					
segahein	11...30	2,03...5,63	-		-
Segahein					
kuhjas		0,55...1,20	-		-
Lutsernihein	22...50	0,17...0,89	-		-
Põldhein	toores	3,4...3,6	-		-
Looduslik					
hein		0,38...0,71	-		-
Teraviljajahu		2,9...6,6	-		-
Kliid	14...30	1,8...4,4	-		-
Kombikorm	8...60	4,25...10,0	-		-

Tabell 11 järg

1	2	3	4	5
Heinajahu		1,5...1,8	-	-
Teraviljapõhk	10...65	0,30...1,25	-	-
Aganad		0,80...1,40	-	-
Linakuprad		1,30...1,35	-	-
Linavarred		0,60...0,75	-	-

SILU (HOIDIA TÄITMISEL /3 NÄDALA MÕÖDUDES)

Maisist	-	$\frac{45...52}{6,0...7,0}$	-	-
Päevalillest	-	$\frac{4,75...5,50}{6,25...7,25}$	-	-
Juurviljapealsetest	-	$\frac{5,0...6,0}{6,75...7,75}$	-	-
Loodusliku heina segust	-	$\frac{3,50...4,25}{5,0...6,0}$	-	-
Ristiku-lutserni-segust	-	$\frac{4,25...5,00}{5,75...6,75}$	-	-
Viki-haljasrukki segust	-	$\frac{4,00...4,75}{5,5...6,5}$	-	-

VÄETISED

Laudasõnnik	65...85	4,0...10,0	-	-
Turvas	40...86	2,7...10,2	-	-
Lubiväetis	...20	7,0...17,0	-	-
Granuleeritud superfosfaat	4...6	11,4...13,0	-	-
Pulbriline superfosfaat	12	9,0...11,9	-	-
Kaaliumkloriid	2,4	7,25...11,25	-	-

Tabeli 11 järg

	1	2	3	4	5
Ammoonium- salpeeter		1,4	8,0...8,9		-

EHITUS- JA KÜTTEMATERJALID

Liiv	-		13,7...20,5		-
Savi	-		15,0...19,0		-
Lubi	-		5,0...9,3		-
Tsement	-		14,0		-
Kruus	-		17,0		-
Paekivi	-		24,0...28,0		-
Telliskivi	-		14,0...18,0		-
Marmor	-		25,0...28,0		-
Betoon		18,0...22,0			-
Kips			18,1		-
Saepuru	-		1,1...2,0		-
Kasepuit	õhukuiv		7,5		-
Kuusepuit	"		6,0		-
Männipuit	"		7,0		-
Tammepuit	"		8,0		-
Kivisüsi	-		8,5		-
Põlevkivi	-		1,8		-
Puusüsi	-		1,8		-

5.2. Dinaamilised hõõrdetegurid  
(M ä r k u s: staatiline hõõrdetegur on dinaamilisest ca 1,5...1,7 korda suurem.)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
M u l d	Niiskuskus %	Töötlemata teras	Töödeldud teras	Puit, vineer	Tehniline kummi	Tekstiil-lõuend	Muld	Sisehõõrdetegur
Liiiv ja saviliiv	11...55	0,40...0,50	0,37...0,42					0,30...0,80
Liiivsavi	11...77	0,40...0,80	0,38...0,47					0,30...0,78
Raske liivsavi	25	0,50...0,80	0,47...0,52					0,80...0,97
Savi- ja mustmuld	25	0,30...1,10	0,30...0,58					1,06...1,60
Mullapangad	-	0,31...0,43			0,38...0,62			
<u>TERA- JA KAUNVIILJADE SEEMNED</u>								
Rukis	0,36...	0,36...0,58	0,32...0,58	0,37...0,38	0,45			0,47...1,07
Nisu		0,36...0,65		0,30...0,37	0,38...0,49			0,47...0,73
Oder		0,34...0,50	0,38...0,58	0,32...0,38	0,52			0,47...1,00
Kaer		0,20...0,44	0,40...0,58	0,33...0,73	0,47...0,49	0,36...1,43		0,51...0,70
Mais		0,37...0,42	0,29...0,49	0,24...0,34	0,53...0,61			0,53
Hernes		0,03...0,34	0,26...0,32	0,03...0,31	0,26...0,36	0,05...0,48		0,44...0,57
Vikk		0,07...0,25				0,14...0,36		
Uba			0,38...0,47					0,47

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<u>HELVETAIMEDE SEEMNED</u>									
Ristik		0, 14...0,49	0, 14...0,49		0, 14...0,44	0,53	0,21...0,57		0,45...0,49
Timut			0, 17...0,47		0, 18...0,43	0,51	0,36...1,19		0,49
Intseern		0, 14...0,40	0, 14...0,40		0,21...0,44		0,25...0,90		0,45...0,48
Valge mesikas			0,49...0,53		0, 18...0,40	0,53	0,19...0,49		0,47
Harilik aruhein			0,55		0,40...0,55	0,60	0,58...1,68		0,68
Kerabein			0,58		0,34...0,56	0,70	0,45...1,28		0,75
Aasnurmikas					0,40...0,70		0,70...2,15		
Kõrge raihein					0,25...0,47		0,49...0,97		
Karjamaa-raihein					0,36...0,51		0,42...0,90		
Ontetu luste					0,49...1,33		0,73...2,15		
<u>UMBROHTUDE SEEMNED</u>									
Põldobakas					0,30...0,49		0,36...0,84		
Põld-pilm-obakas					0,53...0,93		0,70...2,15		
Rukkiluste					0,16...0,35		0,20...0,38		
Nisulill									
Rukkilill									
Rukki-kastehein					0,49...2,15		0,84...2,15		
Valge karikakar					0,34...0,55		0,40...1,00		
Ristikuvõrm					0,18...0,31		0,34...0,81		
Hairehernes					0,32...0,58		0,47...0,75		

Tabell 12 järg

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kassitapp					0,16...0,43		0,21...0,45		
Kassitatar					0,21...0,38		0,25...0,43		
Idnutatar					0,30...0,49		0,34...0,84		
Hobumadar					0,16...0,40		0,27...0,78		
Vesiheln					0,14...0,31		0,33...0,81		
Lõikeheln					0,58...0,84				
Süstlehine					0,29...0,53		0,30...0,78		
teeleht					0,33...0,51		0,45...1,20		
Idiv-teeleht					0,21...0,51		0,38...1,24		
Oblikas									
Valge hane- malts					0,14...0,18		0,30...0,68		
<u>ÕLIKULATVURIDE SEEMNED</u>									
Päevalill		8...34	0,36...0,39	0,34...0,40		0,60...0,70			0,60...1,00
Lin			0,21...0,40		0,38...0,40		0,42...1,03		0,44...0,57
<u>JUUR- JA KÖÖGIVILJADE SEEMNED</u>									
Kapsas					0,21				
Sibul					0,84				
Porgand					0,63				
Kurk					0,65				
Redis					0,43				
Salat					0,58				
Spinat					0,47				
Uba					0,37				
Kaalikas					0,21				
Peet					0,58				

Tabell 12 järg

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<u>MUGUL- JA SÖÖDAJUURVILJADE JUURIKAD JA PEALISED</u>								
Kartulimugulad (liige)	-	0,45...0,59	0,45...0,59	0,50...0,66	0,66...0,71		0,43...0,91	0,57...0,90
Kartulimugulad (veere)	-	0,21...0,35			0,25...0,43			0,57...0,90
Kartulipealsed toored			0,47...0,74		0,42...0,55		0,60...0,90	
Suhkru- ja söödapeedi juurikad	-	0,37...0,63	0,31...0,60	0,55...0,68	0,59...0,81			0,62...1,00
Suhkru- ja söödapeedipealsed toored		0,49...0,51	0,53...0,55		0,58...0,59			
Kaalikajuurikad	-	0,27...0,61		0,53...0,85	0,75...1,30			0,58...0,84
Kaalikapealsed toored		0,60		0,80				
<u>KORE- JA JÕUSÖÖDAD NING JÄÄGI TÖÖTLEMISE JÄÄTMED</u>								
Kõrrelised heintaimed	55...63	0,53...0,73	0,56...0,65	0,26...0,38				
Idelikõielised heintaimed	65...72	0,87...0,94	0,83...1,29	0,48...0,62				1,10...1,43
Segahain	39...70	0,31...0,65	0,45...0,86	0,42...0,81				0,78...0,90
Teraviljajahu	14...50	0,65...1,13	0,65	0,49...0,65	0,50...87			0,58...0,78
Kliid	8...6	0,42	0,31...0,69	0,30...0,39	0,50			
Kombikorm	7...50	0,29...0,41	0,66...0,71	0,25...0,39				
Viljakõrred	8...13	0,25...0,60	0,24...0,89	0,26...0,40				
Viljapead			0,37...0,39					

Tabell 12 järg

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Teraviljapõhk	8...13	0,30...0,42	0,37...0,39					
Aganad	8...13		0,38...0,40					
Maisivarred	10...60		0,31...0,43	0,25...0,29	0,80...1,04			
Päevalillevarred	14...70	0,62...0,80	0,60...0,75	0,45...0,46	0,70...1,01	0,65...0,68		
Linavarred	10...63	0,31...0,63	0,45...0,85	0,47...0,64	0,46...0,95	0,44...0,60		
Linakuprad	25...39	0,34...0,53		0,38...0,60	0,73...0,86	0,70...1,10		
<u>VÄETISED</u>								
Turvas		0,50...0,75		0,25...0,80				
Lubiväetised		0,42...0,48		0,49...0,63	0,56...0,62			
Tuhk		0,70...0,84						
Sõnnik	75...78	0,62...0,97						
Superfosfaat (granuleeritud)	5	0,47...0,65		0,54...0,56	0,57...0,58			0,65
Superfosfaat	12	0,51...0,71		0,68	0,53			0,97
Kaaliumkloriid		0,47...0,87		0,47	0,64			0,57...0,84
Ammooniumsalpeeter	2	0,39...0,66		0,73	0,69			0,65...1,00

5.3. Põllumajanduslike materjalide osakeste  
geomeetrilised mõõtmised ja hõljumiskiirused

	Pikkus mm	Laius mm	Paksus mm	Hõljumis- kiirus m/s
1	2	3	4	5
<u>TERA- JA KAUNVILJAJADE SEEMNED</u>				
Rukis	5,0...9,8	1,4...3,4	1,0...3,4	8,3...10,0
Nisu	4,8...8,0	1,8...4,0	1,6...3,6	9,9...11,0
Oder	7,0...14,6	2,0...5,0	1,4...4,5	8,4...11,0
Kaer	8,0...18,6	1,4...4,0	1,0...4,0	8,0...9,1
Mais	5,5...13,5	5,0...11,5	2,5...8,0	9,6...17,0
Hernes	4,0...9,5	4,0...9,5	3,0...9,0	15,5...17,5
Vikk	3,5...6,5	2,5...6,0	2,0...5,0	4,0...16,0
Uba	7,2...18,5	4,7...11,0	2,7...10,0	6,0...16,5
<u>HEINTAIMEDE SEEMNED</u>				
Ristik	1,4...2,3	1,0...1,7	0,6...1,3	2,0...8,0
Timut	1,0...2,4	0,6...1,2	0,4...1,1	1,8...6,0
Kerahein	2,5...3,3	0,8...1,9	0,4...0,9	0,8...6,0
Lutsern	1,2...3,0	0,8...2,0	0,5...1,3	2,5...8,0
Valge mesikas	1,7...2,3	1,1...1,7	0,6...1,2	
Harilik aruhein	2,7...5,0	1,2...2,5	0,5...1,5	0,5...3,7
Aasnurmikas	2,5...3,2	0,6...1,0	0,4...0,8	0,2...4,5
Aas-rebasesaba	3,2...6,5	1,4...2,8	0,4...1,2	5,0...6,0
Kõrge raihein	3,1...3,6	1,0...1,5	0,8...1,3	4,0...5,0
Karjamaa-raihein	2,4...4,0	0,8...1,6	0,4...0,9	4,0...6,0
Ohtetu luste	8,0...10,0	20,0...2,7	0,7...1,2	1,8...5,2
<u>ÕLIKULTUURIDE SEEMNED</u>				
Päevalill	3,5...4,2	4,8...6,0	1,7...2,8	4,0...14,0
Lina	3,4...5,0	1,6...3,7	0,5...1,3	3,2...8,5
<u>UMBROHTUDE SEEMNED</u>				
Põldohakas	2,6...3,2	0,8...1,4	0,6...0,9	3,7...7,0
Põld-piimohakas	2,5...3,5	0,8...0,15	0,4...0,9	
Rukkiluste	6,0...8,4	1,4...2,4	1,2...2,0	
Nisulill	2,6...4,8	1,2...3,5	0,8...3,0	6,9...9,8

Tabeli 13 järg

1	2	3	4	5
Rukkilill	2,8...4,8	1,2...2,2	0,8...1,6	
Rüki-kastehein	2,1...2,9	0,5...1,0	0,3...0,5	
Valge karikakar	1,6...1,9	0,7...1,4	0,5...1,1	
Ristikuvõrm	0,7...1,0	0,6...0,9	0,4...0,8	2,0...6,5
Orahein	8,0...10,0	1,2...1,7	0,6...1,6	2,0...6,0
Hirehernes	2,0...3,0	2,0...3,0	1,2...1,5	
Kassitapp	2,9...4,5	1,6...2,5	1,3...3,0	5,9...8,0
Kassitatar	2,2...2,8	1,6...2,0	1,2...2,0	2,0...6,5
Linnutatar	2,5...3,1	1,1...1,7	0,6...1,3	
Hobumadar	1,3...1,5	0,8...1,3	0,6...1,1	4,0...6,0
Vesihein	0,9...1,3	0,7...1,1	0,4...0,9	2,0...6,0
Lõikehein	1,5...1,7	1,0...1,2	1,0...1,2	2,0...5,5
Angervaks	7,0...7,5	2,7...3,0	0,5...0,7	
Süstlehine tee- leht	2,3...2,9	0,8...1,5	0,4...1,1	3,6...8,0
Ldiv-teeleht	1,1...1,7	0,6...0,9	0,3...0,6	
Oblikas	1,4...3,0	0,8...1,3	0,6...1,0	2,0...6,0
Valge hanemalts	1,2...1,5	0,9...1,4	0,5...0,9	1,8...7,0
Põldsinep	1,2...2,8	1,0...2,6	0,7...2,2	1,0...8,0
Põldrõigas	4,7...6,5	3,0...5,9	3,1...4,2	2,8...10,0

JUUR- JA KÖÖGIVILJADE SEEMNED

Kapsas	1,7...2,7	1,2...2,5	12...2,5	2,0...7,0
Sibul	2,0...3,7	1,4...3,2	1,0...2,5	2,0...5,0
Porgand	1,7...4,5	0,7...2,5	0,4...2,0	1,0...4,0
Kurk	6,7...12,5	3,0...4,5	0,8...2,2	3,0...5,0
Redis	2,0...4,0	1,1...3,0	1,1...3,0	4,0...8,0
Salat	3,2...4,0	1,0...2,2	0,4...1,0	2,0...4,0
Spinat	2,5...5,0	2,0...4,2	1,5...3,0	
Uba	7,0...14,0	4,0...9,0	3,0...7,0	
Kaalikas	1,7...2,5	1,5...2,2	1,5...2,2	
Peet	2,5...6,5	1,5...5,5	1,5...5,5	20...6,0

MUGUL- JA SÖÖDAJUURVILJADE JUURIKAD

Söödapheet	40...290	30...160	30...160	-
Kaalikas	70...29	83...250	83...250	-
Turnips	80...420	36...220	36...220	-
Kartul	40...120	35...84	25...71	-
Söödaporgand	40...300	15...60	15...60	-

5.4. Põllumajanduslike kultuuride keskmised  
külvisenormid (külviväärtusega 100%)

Kultuur	Külvisenorm kN/ha
Rukis	1,80...2,20
Nisu	1,80...2,70
Oder	2,30...3,00
Kaer	2,00...2,30
Mais	0,70...0,90
Hernes	2,00...3,00
Haljassegatis (vikk + hernes + kaer)	2,40...3,00 (1,2...1,4 + 0,4... 0,6 + 0,8...1,0)
Uba	2,00...2,90
Päevalill	0,25...0,35
Lina	1,20...1,40
Hiline punane ristik	0,09...0,15
Roosa ristik	0,07...0,10
Valge ristik	0,07...0,12
Lutsern	0,12...0,17
Kerahein	0,13...0,20
Harilik aruhein	0,17...0,33
Punane aruhein	0,16...0,22
Aas-rebasesaba	0,13...0,20
Aasnurmikas	0,12...0,15
Kõrge raihein	0,20...0,40
Karjamaa-raihein	0,15...0,30
Kasteheinad	0,09...0,12
Ohtetu luste	0,20...0,38
Kartul	32,00...38,00
Suhkrupeet	0,16...0,20
Söödapeet	0,14...0,16
Söödakaalikas	0,03...0,04
Hübriidkaalikas	0,015...0,020
Söödanaeris	0,02...0,03
Söödaporgand	0,03...0,05

## 5.5. Põhi- ja kõrvalsaakide kaaluline suhe

Teraviljad	Terad/põhk	Juurviljad	Juurikad/pealsed
Talirukis	1 : 2,4	Suhkrupeet	1 : 0,8...1,0
Talinisu	1 : 2,0	Söödapeet	1 : 0,3...1,0
Suvinisu	1 : 1,5...2,0	Söödakaalikas	1 : 0,2...0,3
Oder	1 : 1,3	Hübridkaalikas	1 : 0,4...0,5
Kaer	1 : 3,0	Söödaporgand	1 : 0,4
Kaunvili	1 : 3,0	Maapirn	1 : 3...5
		Söödanaeris	1 : 0,2

K i r j a n d u s

- I. Горячкин В. П. Собрание сочинений. Том первый, второй и третий. Изд. "Колос". Москва, 1965.
2. Рейнер М. Реология (перевод с немецкого). Москва, 1965.
3. Рейнер М. Деформация и течение (перевод с английского). Москва, 1963.
4. Северс Э. Т. Реология полимеров (перевод с английского). Москва, 1966.
5. Новое в земледелии в странах Запада и СССР. Обзор литературы. Выпуск 5 (103). Министерство сельского хозяйства СССР и Всесоюзный институт научно-технической информации по сельскому хозяйству. Москва, 1967.
6. Гячев Л. В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах. Изд. "Машиностроение". Москва, 1968.
7. Сабликов М. В. Сельскохозяйственные машины. Часть вторая. Основы теории и технологического расчета. Изд. "Колос". Москва, 1968.
8. Байнер Р., Кепнер Р., Барджер Е. Основы сельскохозяйственной техники (перевод с английского). Сельхозгиз. Москва, 1959.
9. Хемминг Р. В. Численные методы (перевод с английского). Изд. "Наука". Москва, 1968.
10. Сапожников Н. А. Биологические основы обработки подзолистых почв. Сельхозиздат. Москва-Ленинград, 1963.
11. Левин Ф. И. Роль механической обработки в улучшении свойств дерново-подзолистых почв. Изд. Московского университета. Москва, 1965.
12. Дубровский А., В. П. Горячкин и его влияние на развитие сельскохозяйственной техники. Журнал "Техника в сельском хозяйстве", 1968, № I.

13. Желиговский В.А., Василий Прохорович Горячкин. Журнал "Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства", 1968, № I.
14. Кирюхин А. М. Основоположник науки о сельскохозяйственных машинах. Журнал "Тракторы и сельхозмашины", 1968, № I.
15. Лучинский Н. Д. Памяти учителя. Журнал "Тракторы и сельхозмашины", 1968, № I.
16. Бахтин П. У. Динамика физико-механических свойств почв в связи с вопросами их обработки. "Труды Почвенного института им. В. В. Докучаева", т. 45, 1954.

Эстонская сельскохозяйственная академия  
Кафедра сельскохозяйственных машин  
г. Тарту, ул. Рийа, 12  
А. Рейнтам

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

I

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
На эстонском языке

Vastutav toimetaja: M. Kiisler  
Korrektor: J. Hendrikson  
Kunstnik: A. Jaal

---

Faljundamiseks antud 4. XI 1970. Paber 60x84/16 cm.  
Trükipoognaid 9,75. Tingtrükipoognaid 9,1. Arvestus-  
poognaid 9. Tiraaз 800. MB 09545. Tell. nr. 222  
EPA rotaprint, Tartu, Riia 12

Hind 25 kop.



Hind. 25 kop.