

D132-01079

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

Üldfüüsika kateeder

KÕRGVAAKUMSÜSTEEMI KONSTRUEERIMINE JA EHTAMINE

GAASLAHENDUSE UURIMISEKS

Diplomitöö

Töö teostaja: H. Reedla, füüsika
pedagoogilise osa-
konna V k. üli-
õpilane

Töö juhendaja: M. L a a n,
üldfüüsika kateedri
aspirant

Tartu 1973

SISUKORD

SISSEJUHATUS	3
I. TEOREETILINE OSA	5
§ 1. Vaakumi põhivõrrand	5
§ 2. Piirvaakumi arvutamine	6
§ 3. Rõhu mõõtmine	7
§ 4. Lõksud	9
§ 5. Iseseisva gaaslahenduse tekkimine	9
II. EKSPERIMENTAALNE OSA	13
1. Eksperimendi seade	13
a) Vaakumsüsteem	13
b) Gaaslahendustoru ja elektriseadmed...	19
c) Materjalid	22
2. Mõõtmismetoodika ja -tulemused	23
III. OHUTUSTEHNIKA	28
KOKKUVÕTE	29
RESÜMEE (vene keeles)	30
RESÜMEE (saksa keeles)	31
KIRJANDUSE LOETELU	32

SISSEJUHATUS

Tänapäeva füüsika üheks haruks on gaasis toimuvate ionsatsioonprotsesside uurimine, mille tulemusi rakendatakse tehnikas huumlahenduslampidest laseriteni. Loodusnähtuste eksperimentaalsel uurimisel püütakse alati objekt teha võimalikult lihtsaks. Gaaslahenduse puhul on kõige lihtsamaks objektiks spektraalselt puhas gaas, sest juba väikesed liisandgaasi kogused võivad tugevasti mõjutada lahenduse tekkimist ja kulgu. Tööruumalas tuleb tekitada enne puhta gaasiga täitmist kõrgvaakum.

Käesoleva töö eesmärgiks oli konstrueerida ja ehitada kõrgvaakumsüsteem mitmesuguste gaaslahendusalauste tööde jaoks. Lisaks sellele uuriti ühe konkreetse lahendustoru kasutamise võimalust vastava praktikumitöö ülesseadmiseks Paschen'i seaduse uurimiseks argoonis. Edaspidi täidetakse toru argooniga ning joodetakse lahti. Vaakumsüsteemi võib seejärel kasutada teiste tööde teostamiseks.

Töö teoreetilises osas antakse ülevaade vaakumsüsteemi ehitamise ja konstrueerimise põhimõtetest ning vaakumi mõõtmise viisidest. Sellele lisaks vaadeldakse lühidalt iseseisva gaaslahenduse tekkimise tingimusi (põhjalikumalt on vastavaid küsimusi käsitletud kirjanduses [1], mille jätkuks käesolev töö on).

Eksperimentaalses osas tuuakse ära eksperimendiseadme kirjeldus ning mõõtmistulemused. Eraldi paragrahvina käsitletakse ohutustehnikat.

I. TEOREETILINE OSA

§ 1. Vaakumi põhivõrrand

Vaatleme pumbast ja tööruumalast koosnevat vaakumsüsteemi. Pumba töötamise ajal väheneb rõhk süsteemis pidevalt. Seejuures rõhk pumba sisendis p_2 on väiksem kui rõhk p_1 tööruumala väljundis. Seega tekib rõhkude vahe $p_1 - p_2$.

Gaasivoog Q' määratakse i -ndas ristlõikes oleva rõhu p_i ja lõiget ajaühikus läbiva gaasi ruumala S_i korrutisena.

$$Q' = p_i S_i = \text{const.} \quad (1)$$

Gaasivoog Q' ja rõhkude vahe $p_1 - p_2$ suhet nimetatakse toru läbilaskvuseks U .

$$U = \frac{Q'}{p_1 - p_2} \quad (2)$$

Rakendame suvalist ristlõiget läbivate gaasivoogude võrdse seadust (1) pumba sisendis ning tööruumala väljundis.

$$Q' = S_p p_2 = S_o p_1 = U(p_1 - p_2). \quad (3)$$

kus S_o - nn. efektiivne pumpamiskiirus (erineb pumba pumpamiskiirusest).

Siit saab tuletada vaakumi põhivõrrandi [2, lk. 319-320].

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{U} \quad (4)$$

Valemi (4) analüüsimisel näeme, et $U \gg S_p$ korral sõltub efektiivne pumpamiskiirus ainult pumba pumpamiskiirusest. Kui $U \ll S_p$, siis sõltub S_0 põhiliselt toru läbilaskvusest, s.t. väikese läbilaskvusega torude korral pole tarvidust suure pumpamiskiirusega pumba järele.

§ 2. Piirvaakumi arvutamine

Pumpamise ajal toimub vaakumsüsteemis pidev gaaside sisesevool ja degaseerumine, mida iseloomustame gaasivooga Q'_Σ . Piirrõhu p_0 määrab järgmine võrdus:

$$p_0 = \frac{Q'_\Sigma}{S_0} \quad (5)$$

kus S_0 - efektiivne pumpamiskiirus.

$$Q'_\Sigma = Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 \quad (6)$$

Q'_1 - vaakumis töödeldavast kehast eralduv gaasivoog,

Q'_2 - vaakumsüsteemi seintelt eralduv gaasivoog,

Q'_3 - lekist tingitud gaasivoog.

Toatemperatuuril toimub gaaside eraldumine seintelt võrdlemisi aeglaselt. Põhiliselt eralduvad füüsikalise adsorbeerunud gaasid. Temperatuuri tõustes kasvab gaaside eraldumine kiiresti, saavutab maksimumi, väheneb ja hakkab uuesti kasvama.

Esimene maksimum on paljude materjalide jaoks 450-500°C. Eralduvad füüsikaliseelt adsorbeerunud gaasid. See gaaside kogus on suhteliselt väike: üks või paar gaasi monokohti.

Edasisel kuumutamisel hakkab gaas tungima süsteemi läbi materjali ning algab gaaside eraldumine materjalide sisemusest.

§ 3. Rõhu mõõtmine

Atmosfäärirõhust madalamate rõhkude mõõtmiseks kasutata-
vaid riistu nimetatakse vaakummeetriteks. Enamikel juhtudel
saab hinnata ainult kaudsete ilmingute järgi (näit. gaasi
soojusjuhtivuse rõhust sõltuvuse järgi). Enamkasutatavad on
termopaar- ja elektron-ionisatsioonvaakummeetrid.

Vaatleme nüüd lähemalt termopaar-vaakummeetrit.

Molekulaarse voolamise režiimi korral on soojusjuhtivus
gaasis sõltuvuses molekulide kontsentratsioonist, s.o. rõhust.
Klaas- või metallkolvis on kütteniit, mille keskkohaga on
ühendatud termopaar. Kütteniiti läbib konstantne vool (klaas-
kestaga lampide puhul tuleb see määrata kaliibrimisel, metall-
kestaga lampidel on see märgitud lambi kestale).

Mõõtes ära termopaari emj., leitakse kaliibrimisgraafi-
kult gaasi rõhk.

Elektron-ionisatsioonlamp on kolme elektroodiga süsteem,
mis koosneb kollektorist, anoodvõrest ja katoodist. Konstant-
se küttevooluga köetavast katoodist emiteeruvad elektronid
liiguvad positiivselt pingestatud anoodvõre suunas. Osa
elektrone läbib võre ning jõuab võre ja kollektori vahelisse

ruumi. Kollektori negatiivne pinge tõrjub elektronid tagasi anoodile. Nii võnguvad elektronid anoodvõre ümber keskmiselt 6 korda, ioniseerides põrkumisel gaasi molekule. Tekkinud positiivsed ioonid moodustavadioonvoolu J_i , mille jaoks kehtib järgmine seos:

$$J_i = \Delta J_e \rho, \quad (7)$$

kus Δ - tundlikkus,
 J_e - elektronvool,
 ρ - rõhk.

Kuna $J_e = \text{const}$, siis

$$J_i = K \rho. \quad (8)$$

K - lambi konstant ($\frac{\text{A}}{\text{mm Hg}}$).

Teoreetiline analüüs ja katsed on näidanud, et ionisatsiooni tõenäosus kasvab koos elektronide arvuga molekulis [3, lk. 315]. Seepärast antakse lambi karakteristikutes suhe $\frac{K}{K_0}$, kus K on tundlikkus antud gaasi suhtes, K_0 - tundlikkus kuiva õhu suhtes.

Kuna ionisatsioonmanomeetri tundlikkus on proportsionaalne elektronide arvuga mõõdetava gaasi voo auru molekulides, siis mõjutavad difusioonpumbast migreeruvad õliaurud suurel määral rõhu mõõtmist. Eksperimentaalselt on kindlaks tehtud, et õliaurude esinemise korral on tegelik rõhk umbes üks suurusjärk madalam mõõdetavast rõhust, kui manomeeter on kaalibritud puhta õhu või lämmastiku järgi [4, lk. 106-109]. Tööolukorras on gaasi tegeliku koosseisu manomeetris väga

raske määrata, sest paljud komponendid lagunevad. Seepärast kaliibrimisel arvestatakse juba õliaurude olemasolu süsteemis.

§ 4. Lõksud

Lõkse kasutatakse rõhu alandamiseks ja õliaurude migratsiooni takistamiseks. Üldised nõuded:

1. Lõksu võime takistada aurude läbiminekut peab olema maksimaalne. Selleks tuleb kindlustada vähemalt üks õliauru molekuli pörge lõksu seintega. Selle tagamiseks peab lõks olema optiliselt läbipaistmatu ja kaugus üksikute elementide vahel väiksem molekulide keskmisest vabateepikkusest.

2. Lõks peab võimalikult vähe piirama pumpamiskiirust. Õige lõksu konstruktsiooni korral ei vähene pumpamiskiirus rohkem kui 40 - 50%.

Vedela lämmastikuga jahutatavad pinnad suurendavad märgatavalt veeaurude pumpamiskiirust. Näiteks veeauru tasakaaluline rõhk vedela lämmastiku temperatuuril (-196°C) on 10^{-24} mmHg. Selline külmutatud pind ei tohi sattuda kokkupuutesse atmosfääriga, kuna ta jäätuks väga kiiresti õhus leiduva veeauru tõttu.

§ 5. Iseseisva gaaslahenduse tekkimine

Elektrivoolu tekkimiseks gaasis on vaja laengukandjaid. Üheks võimaluseks laengukandjate saamisel on katoodist elektronide väljalöömine (näiteks valguskvandi toimel). Liikudes

anoodile pörkub elektron gaasi molekulidega ning ioniseerib neist osa (leiab aset tõukeionisatsioon). Tekkinud positiivsed ioonid liiguvad katoodile. Pörkudes katoodiga lööbioon sellest teatud tõenäosusega välja uue elektroni (sellist protsessi nimetatakse sekundaaremissiooniks).

Anoodvoolu iseloomustab järgmine valem:

$$I_{ea} = I_{ek} \frac{e^{\alpha d}}{1 - g(e^{\alpha d} - 1)}, \quad (9)$$

kus I_{ea} - anoodvool,

I_{ek} - katoodist väljalöödud elektronide (välja arvatud sekundaarelektronide) poolt tekitatud vool,

α - ionisatsioonaktide arv ühikulisel löigul (Townsendi esimene koefitsient),

g - väljendab sekundaarelektronvoolu ja ioonvoolu suhet,

d - elektrodidevaheline kaugus.

Valemi tuletus leidub kirjanduses [5, lk. 281-285].

Oletame, et korrutis $g(e^{\alpha d} - 1)$ on ühest väiksem suurus. Siis $1 - g(e^{\alpha d} - 1) < 1$. Voolu I_{ek} vähenemisel väheneb ka I_{ea} . Kui $I_{ek} = 0$, siis $I_{ea} = 0$, s.t. välise mõjustuse lakkamisel lahendus katkeb. See on mitteiseseseisev lahendus.

Olgu $I_{ek} = \text{const}$. Suurendame elektronide ionisatsiooni võimet. Sel juhul anoodvool I_{ea} suureneb valemi (9) lugejas oleva suuruse $e^{\alpha d}$ suurenemise ja nimetaja $1 - g(e^{\alpha d} - 1)$ vähenemise arvel. Füüsikaliselt vastab sellele elektronlavii-
nide intensiivvuse kasv.

Lõpuks saabub olukord, kus

$$g(e^{\alpha d} - 1) = 1. \quad (10)$$

$e^{\alpha d} - 1$ väljendab katoodist väljalöödud elektroni poolt tekitatud ionide arvu. Korrutis $g(e^{\alpha d} - 1)$ annab ionide laviini poolt katoodist väljalöödud elektronide arvu. Seega põhjustab iga katoodist väljalöödud elektron ionide laviini, mis katoodile jõudes lööb välja vähemalt ühe elektroni. Sel- line lahendus ei katke enam välise mõjustuse puudumisel (la- hendus on muutunud iseseisvaks). g on seda suurem, mida suurem on ionide energia, s.t. mida tugevam on elektriväli ning väiksem gaasi rõhk. Seega

$$g = \psi\left(\frac{E}{p_0}\right). \quad (11)$$

Asendades valemisse (10) valemi (11) ja α avaldise, saame

$$\psi\left(\frac{U_e}{p_0 d}\right) \left[e^{p_0 d f\left(\frac{U_e}{p_0 d}\right)} - 1 \right] = 1, \quad (12)$$

kus U_e - läbilöögi pinge.

Valemile (12) on iseloomulik, et rõhk p_0 ja d esinevad ainult korrutisena. Kuna $\alpha = p_0 f\left(\frac{E}{p_0}\right)$ omab teatud rõhu korral maksimumi, siis peab esinema teatud optimaalne $p_0 d$ väärtus, mille korral U_e on minimaalne.

Sellist sõltuvust uuris enne Townsendi teooria loomist eksperimentaalselt Paschen. Seepärast nimetatakse U_e sõltuvust korrutisest $p_0 d$ väljendavaid graafikuid Paschen'i

kõverateks.

Analüüsime lähemalt Paschen'i kõvera käiku. Olgu $d =$
 $= \text{const}$, vähendame rõhku p . Ionisatsioonikoefitsient

1) suureneb, kuna kasvab ionisatsiooni tõenäosus elektro-
ni ja neutraalse molekuli põrkel;

2) väheneb ühikulisel teepikkusel toimuvate põrgete arvu
vähennemise tõttu.

Tähistame läbilöögipinget miinimumile U_{em} vastava rõhu
 p_m -ga. Rõhu $p > p_m$ korral on ülekaalus esimene faktor,
 $p < p_m$ puhul teine.

Olgu $p = \text{const}$, vähendame kaugust d . Ionisatsiooni-
koefitsient α

1) suureneb väljatugevuse E kasvamise tõttu,

2) väheneb sekundaaremissiooniga katoodist eralduvate
elektronide arv laviini intensiivsuse vähenemise tagajärjel.

Tähistame U_{em} -le vastava kauguse d_m -ga. $d > d_m$ kor-
ral on ülekaalus esimene protsess; $d < d_m$ korral teine.

II. EKSPERIMENTAALNE OSA

1. Eksperimendi seade

a) V a a k u m s ü s t e e m

Lähtudes olemasolevatest pumpadest ja materjalidest projekteeritakse joonisel 1 oleval skeemil ning fotol 1 kujutatud vaakumsüsteem.

Eelvaakumi saamiseks kasutatakse rotatsioonpumpa BH-461M, mille pumpamiskiirus on $0,8 \frac{\text{l}}{\text{s}}$ ning piirvaakum $2 \cdot 10^{-2}$ mmHg.

Kõrgvaakumi tekitamiseks kasutatakse õlijoa difusioonpumpa H-1C-5, mis on varustatud õliaurude peegeldajaga. Pumba

karakteristikud:

pumpamiskiirus	50 liitrit/s
piirrõhk	$2 \cdot 10^{-6}$ mmHg
töödiapasoon	$2 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-2}$ mmHg
töövedeliku (BM-1) kogus	- 100 cm ³
suurim lubatav rõhk väljundis	- 0,3 mmHg
minimaalne eelvaakumpumba tootlikkus	- $0,2 \frac{\text{l}}{\text{s}}$

Piirrõhk on mõõdetud pumba flantsil, kasutades kummitihendit.

Hindame järgnevalt efektiivset pumpamiskiirust S_0 difusioonpumba väljundis. Pumpasid ühendava klaastoru ja vaakumvooliku diameeter on 1,5 cm ning efektiivne pikkus 180 cm. Efektiivsuse pikkuse arvutamisel kasutatakse järgmist valemit:

$$l_{\text{ef}} = l_{\text{geom}} + 1,33 dn$$

kus l_{ef} - efektiivne pikkus,
 l_{geom} - geomeetriline pikkus,
 d - diameeter,
 n - toru painutuste arv.

Gaasi voolamise režiimi leidmiseks arvutatakse korrutis $d\bar{p}$, kus \bar{p} on keskmine rõhk. $d\bar{p} = 7,5 \cdot 10^{-2}$ mmHg.cm. Kirjanduses antud kriteeriumi põhjal voolab gaas molekulaarviskoosses režiimis [2, lk. 317]. Toru läbilaskvuse U

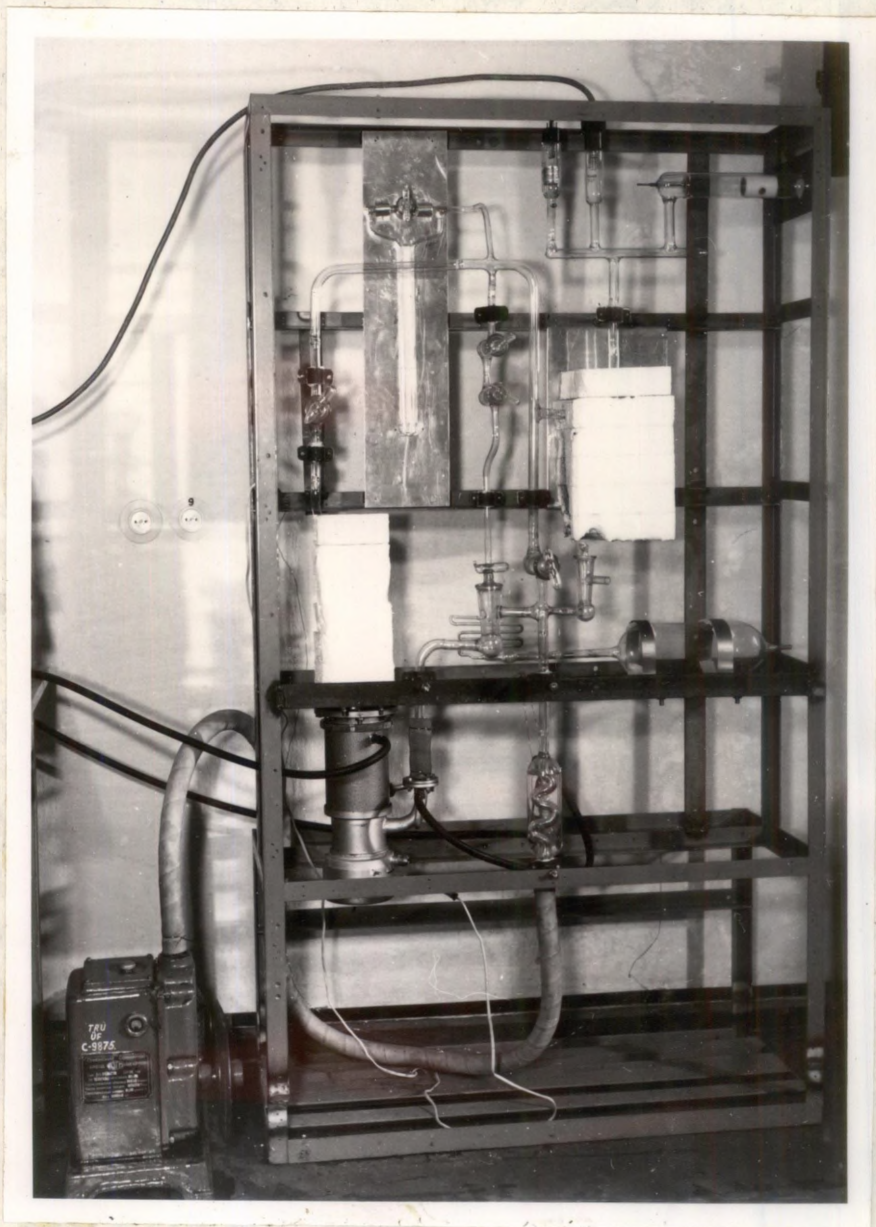
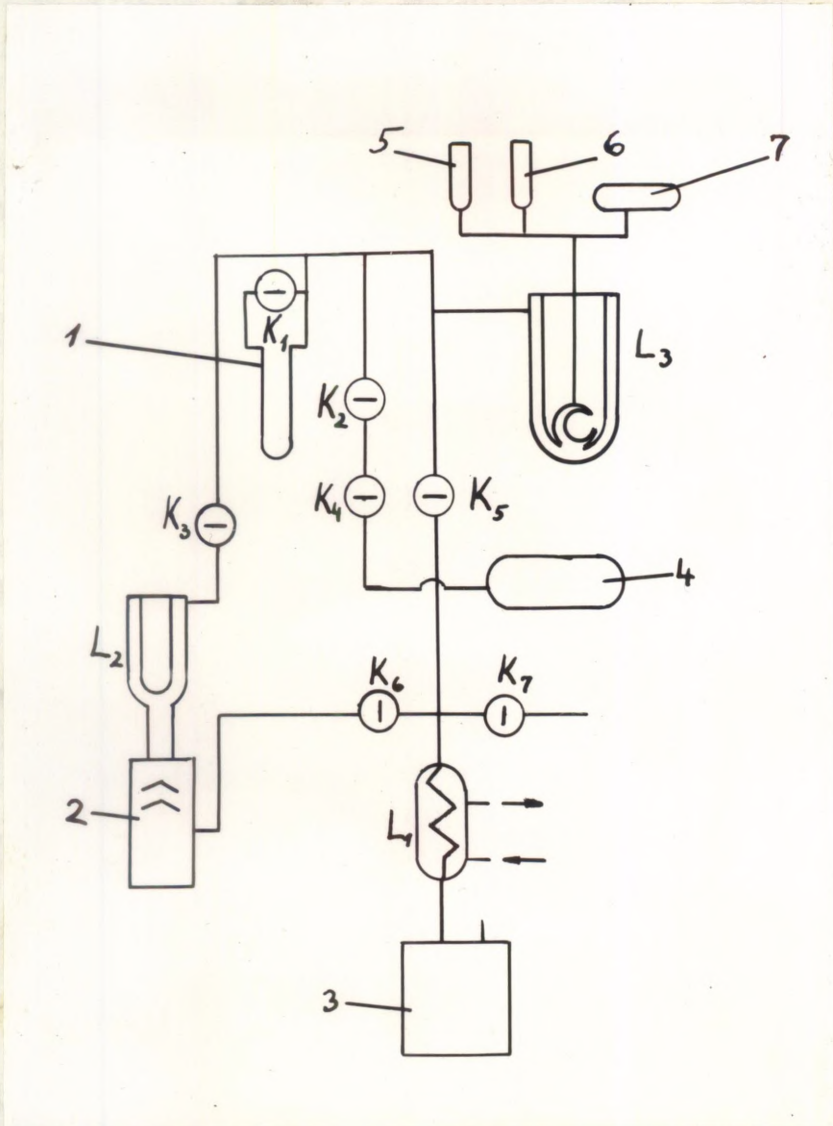


Foto 1. Katseseadme ülevaade.



Joonis 1. Vaakumsüsteemi skeem

$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7$ - kraanid; L_1 - vesilõks; L_2, L_3 - lämmastiklõksud; 1 - U-manomeeter; 2 - difusioonpump; 3 - rotatsioonpump; 4 - argooniballoon; 5 - lamp M-2; 6 - lamp T-2; 7 - gaaslahendustoru.

Koolide järjestus kesamise hinde järgi
1960.a.



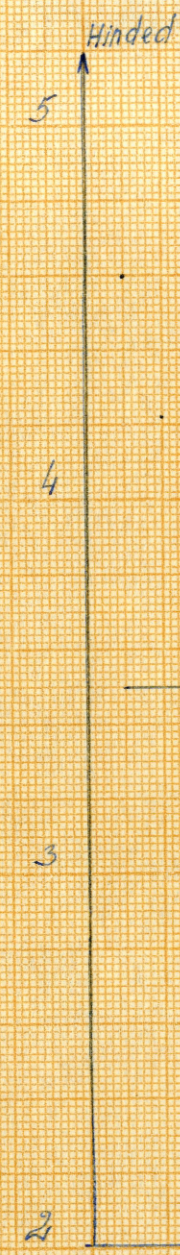
hinde järgi

Kaugõppu KK
Tall XX
Oletovere PT
Narva III
Naiskav
Kiviõppu TN
Räpvere I
Tõhvi I
Tall IX
Nigand I
Lihula
Tall I TN
Kunda
Vigandi III
Tall III
Nalga I
Tall VIII
Tõsta Ch. T
Põlva
Tall XVII
Lohila
Kuumaa UKT
Tõsta El. me. T
Tall I TN
Kiviõp. TN
Kivilas
Vastseliina
Ravvere TN
Loksa
Põlva
Tall 24
Elva TN
Tall. Kõrge. T
Antsla
Jõue. Mani
Lõvi
Mustla
Tall II TN
Tõlva II TN
Mustvee I
Võru KTT
Altnu
Pärnu II
Tall II TN
Tall 20
Tapa I
Tõsta I TN
Pärnu TN
Tall med. Ke
Põlva maa
Tall Ch. T
Õie. Põlva me. T
Tõsta Med. Ke
Nigandi TN
Tall LOMo. Ke
Tall XI
Tall 18
Vand. Võidu UKT

Tall I TN
Kiviõli TN
Keilas
Vastseliina
Rannu TN
Loksa
Põhja
Tall 3.4
Elva TN
Tall. Kõrge T
Antsla
Jämsä parr
Lüri
Mustla
Tall II TN
Tõrva II TN
Mustvee I
Võru KTT
Ahtme
Pärnu II
Tall IV TN
Tall Lo
Tapa I
Tõrva I TN
Pärnu TN
Tall med. K
Põltsamaa
Tall El T
Õie Põhmad
Tõrva Med K
Kigandi TN
Tall LOMõkk
Tall XI
Tall 18
Vana-Võidu LK
Warsta
Tall IV
Räina LT
Ravira PT
T. Lemiste MT
Täru PT
Rannu Ad K.
Jõhvi I
Jäneda PT
Tall 8 TN
Saku PT
Põide TN
Nõmme PT

Koolid

Koolide järjestus kinnise kinde järgi
1959. a.



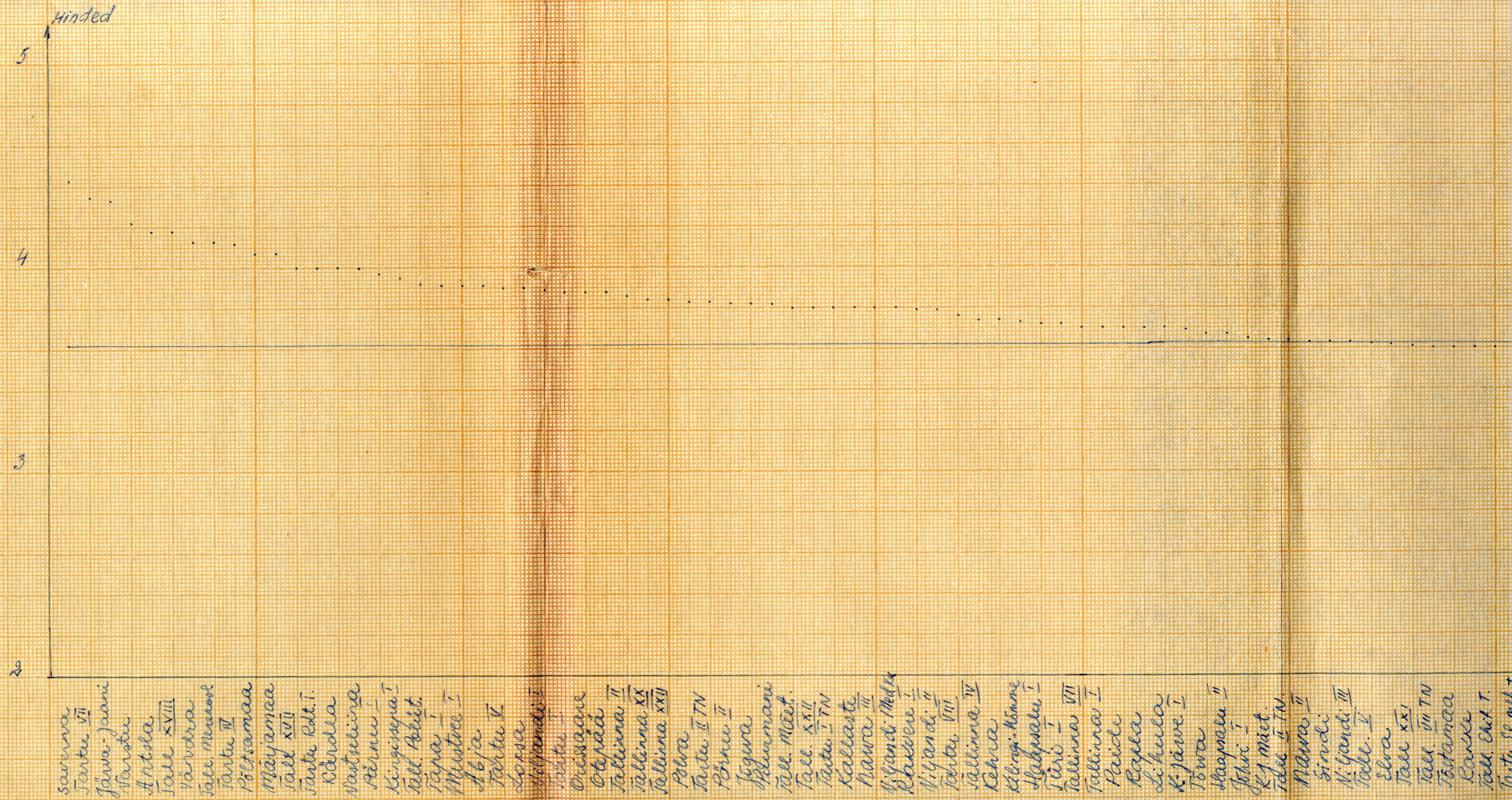
- suure-jaani
- Türi I
- Antsla
- Kil.-Kõnnu
- Tartu I
- Tallinna I
- Tall. Mäet.
- Vigandi II
- Välk-Maaja
- Tallinna IX
- Rapla
- Maasalu I
- Vändra
- Orissaare
- Otepää
- Läpinä
- Mäyamaa
- Püüri-Jaagpi
- Nõu II
- Pärnu I
- Tallinna III
- Tallinna XX
- Tallinna IV
- Tallinna VI
- Kärdele
- Kingimäe I
- Kõha-järv I
- Tallinna II
- Kehra
- Tallinna 17
- Tallinna 21
- Tallinna 19
- Tartu IV
- Ahja
- Põlva
- Tartu 6
- Kaare Ped. kool
- Paide
- Tartu I
- Tallinna 22
- Tartu Elit. T.
- Migandi III
- Tallinna 23
- Jõhvi TN
- Tartu 8
- Tallinna IV
- Jõhvi
- Tallinna 33
- Tilimetsa MT
- Tallinna PT
- Tallinna konna. T
- Oudvere PT
- Tallinna 32
- Ahja
- Tallinna 16
- Migandi TN
- Rõuge I
- Nõo
- Tõrva
- Põlva
- Räpina AT
- Nõue I
- Kangõpe Kx
- Tallinna VI TN
- Väimela 2T
- Tartu El. m.d. T.
- Järvea PT
- Tartu I
- Tartu IV
- Maarja I

Koolide järjestus keemiste kände järgi
1959. a.

Tartu 10
Aha
Pärnu
Tartu 6
Kõrre Ad. kool
Paide
Tartu I
Tallinna 22
Tartu Chit. I
Nigandi III
Tallinna 23
Tõre TN
Tartu 8
Tallinna IV
Tõura
Tallinna 33
Tilimetsa MT
Tallinna PT
Tallinna koolm. I
Olustvere PT
Tallinna 32
Aha
Tallinna 16
Nigandi TN
Rõõveri I
Nõo
Tõura
Põra
Rõpina AT
Nõue I
Kangipõu K
Tallinna VII TN
Kõmela 2T
Tartu El. mek. T.
Järeda PT
Tartu II
Tartu IV
Maarja I
Põhja II
dihula
Tapa I
Tall I TN
Artla PT
Tall 3 kool ke.
Tall Ad. ke.
Eura
Narva II
K. Jäve mäet.
Nigandi I
Tall. V TN
Põltsamaa
Kihant. T.
Tartu 5 TN
Ahtme
Tall. XI
Tall. XVII
Tall. El. T.
Nõue KTT
Tartu Rlt T.
Tall. II TN
Tartu Mad. K.
Tall. LOM 5. K.
Nõmme PT
Tartu II TN
Saare PT
Kumna 4KT
Malga TN
Eura TN
Tõre PT

Koolid

Koolide järjestus keskmise hinde järgi
1961. a.



Tartu Er. mek. +
Nõue I
Tartu lin. I.
Järwakandi
Tall. Aegst. I
Kunda
Räpinas
Tartu III
Tartu II
Tall. IX
Tall. XXX
Keila
Pärnu IV
Puhja
K-J I TN
Püca
Kingishepa TN
Tall. X
Tall. XXXII
Tall. I TN
Pärnu Jaaguja
Narva TN
Tall. Kõnnuaste
Suure-Jaani
Pärnu III
Tall. L4
Maardu
Tall. VI
Ahtme
Lein
Kiviõli TN
Tall. IV TN
Nõu KTT
Tall. V TN
Tall. XVI.
Kaugõpe. KK.
Tall. Kaland. I
Tall. I TN
Saku PT
Tartu med KK
Nõo
Tall. VII TN
Ravvere II
Näike-Maaja
Tall. XI
Tall. XIX
Miyandi TN
Tall. Mod KK
Nõu-Jaaguja
Tall. L5
Tüvi PT
Alatsiivi
Nõmme PT
Olvaste PT
Valga I
Tall. XXXIII
Tall. Kaland. I.
Pärnu TN
Kivili I#
Antkla PT
Jõreda PT
Kuemaa LKT
Vilnela. IT
Räpina AT
Jõmpa TN
Tall. III TN
Kana-Võid LKT
Tapa TN
Tall. X TN
Kuemaa MT
Märka
Tall. XIII TN
Tiimetsa MT
Valga TN

Koolid