

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

fakulta textilní

katedra hydraulických strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Albín Loula

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro g. Křiváková

obor studium přírodě vědních předmětů na středních školách

Protože jste splnil požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol.

Název tématu: Vliv elektrického pole na vlastnosti kapaliny ve vakuu
a její kvantitativní odhad.

Pokyny pro vypracování:

Výzkum vlivu elektrického pole na vlastnosti kapalin pro studium kvantitativní závislosti na povrchové energii, viskozitě, viskozitě kapalin a kvantitativní závislosti na kvantitativní závislosti a 24 hodin po této závislosti. Jako kvantitativní závislosti na povrchové energii kvantitativní.

Na základě výsledků práce kvantitativní vlivu elektrického pole na kvantitativní závislosti kvantitativní.

Autorské právo se řídí směnicemi MŠK pro státní závěrečné zkoušky č. j. 34 727/62 III/2 ze dne 13. července 1962, Věstník MŠK VIII, část 24 ze dne 31. 8. 1962 § 19 autorského zákona č. 115/59 Sb.

VSOŠ SROUŠOVÁ A JETON
Ústřední knihovna
LIBEROV, STUDENTSKÁ 8

V 4/1971

Rozsah grafických laboratorních prací:

Rozsah průvodní zprávy:

Seznam odborné literatury:

1. B. Němec : Podíl elektrochemické koroze na kavitaci destruktivní materiálu,
III. sborník prací VÚST, 1963.
2. Ruzjcov, Balan : Zusammenhang zwischen der Viskosität einer Flüssigkeit u.
der Schallgeschwindigkeit,
Congress on Acoustics, Stuttgart 1959
3. H. Karafold : Sprugut i prožnost židlastej,
Gos. ind. tehn. teor. lit., Moskva 1951

Vedoucí diplomové práce: Doc Ing B. Němec CSc

Konsultanti: Ing Z. Nováček

Datum zahájení diplomové práce:

Datum odevzdání diplomové práce:

L. S.

Doc. Ing. S. Němec CSc
Vedoucí katedry

Simon
Děkan

OBSAH

1. Úvod
2. Z historie výzkumu kavitace
3. Kavitační jev
 - 3.1. Hydrodynamické podmínky vzniku kavitace
 - 3.2. Vlastnosti kapalin ovlivňující vznik kavitace a kavitační rozrušování
 - 3.2.1. Objemová pevnost
 - 3.2.2. Povrchové napětí
 - 3.2.3. Viskozita
 - 3.2.3.1. Základní vlastnosti
 - 3.2.3.2. Dynamická vazkost
 - 3.2.3.3. Kinematická vazkost
4. Kavitační rozrušení materiálu - vývoj názorů
5. Metody zkoušení kavitační odolnosti materiálu
 - 5.1. Laboratorní přístroj
 - 5.1.1. Kavitační trysky a tunely
 - 5.1.2. Rotační nárazový přístroj
 - 5.1.3. Rázový přístroj
 - 5.1.4. Magnetostrikční přístroj
6. Ochrana proti kavitačním účinkům
 - 6.1. Elektrická ochrana
 - 6.2. Úprava kapalin
7. Experimentální část
 - 7.1. Zkoušené vzorky kapaliny a systém značení
 - 7.2. Popis použitého zařízení a postup práce
 - 7.2.1. Příprava a popis vzorků etylenglykolu
 - 7.2.2. Měření viskozity na Englerově viskozimetru
 - 7.2.3. Měření viskozity na Höpplerově viskozimetru
 - 7.2.4. Měření povrchového napětí stalagmometrem
 - 7.2.5. Pozorování změn povrchového napětí při průchodu el. proudu etylenglykolem

8. Hodnocení

8.1. Zhodnocení výsledků a metodik

8.1.1. Měření viskozity na Englerově viskozimetru

8.1.2. Měření viskozity na Höpplerově viskozimetru

8.1.3. Měření povrchového napětí

9. Závěr

1. ÚVOD

Kavitace je známa poměrně dlouhou dobu. Avšak teprve s intenzivním rozvojem různých hydraulických strojů a zařízení vyvstala potřeba důkladného studia kavitačního jevu, jeho příčin i důsledků. Již při pouhém přehlédnutí publikací, týkajících se kavitace, zjistíme, jak mnoho a jak intenzivně se v tomto oboru pracuje. Přestože jsou dosahovány dobré praktické výsledky, nedá se říci, že by výzkum kavitace byl ukončen. Ostatně nelze hovořit ani o jednovázném a potvrzeném názoru na kavitační jev. Tato skutečnost nám napovídá o složitosti kavitačního jevu, který přesahuje hranice jednoho vědního oboru a zasahuje do mnoha odvětví. Pozornost odborníků se soustředila hlavně na výzkumy kavitační odolnosti materiálů, vlastností kapalin, mechanických, elektrochemických a jiných účinků kavitace, vlivu kavitační oblasti na provozní vlastnosti hydraulického stroje nebo zařízení a mnoho dalších problémů, souvisejících až přímo nebo nepřímo s kavitačním jevem. Dynamika kavitačního jevu nás staví před problém validity a reliability měření a tedy i před problém měřících přístrojů a měřicí techniky, neboť charakter tohoto jevu je mikroskopický. To znamená, že probíhá ve velmi krátkých časech a na malých plochách.

Tyto problémy úzce souvisí s metodikou výzkumů a rozvržením výzkumných prací.

Nicméně prudký rozvoj techniky a s ní samozřejmě rozvoj hydraulických strojů a zařízení nutil a nutí vědce a techniky k řešení problémů souvisejících s kavitací. Rovněž důvody jako šetření materiálem, zvýšení trvanlivosti strojních součástí a tím i strojů nutí k intenzivnější výzkumné práci v oboru kavitace.

Účelem této práce je zjistit, zda má elektrické pole vliv na vlastnosti kapalin, které více či méně ovlivňují kavitační jev. Za cíl jsem si nekladal zjištění absolutních hodnot vlivu, ale pouze to, zda a jakým směrem vlivňuje elektrické pole zkoumané vlastnosti kapalin.

2. Z HISTORIE VÝZKUMU KAVITACE

Již Leonard Euler v roce 1754 naznačuje ve své teorii vodních turbin kavitační jev. Upozorňuje na to, že při malém tlaku v dokonale kapalině mohou nastat nesrovnalosti mezi teorií a praxí. Při experimentech byla poprvé zjištěna kavitace v roce 1874 Kundtem a Lehmanem, když vyšetřovali podélné kmitání v kapalině vyvolané zvukovými vlnami. V praxi se poprvé setkáváme s kavitací v roce 1894 a to při zkouškách anglického torpedoborce Daring s lodními šrouby. S rostoucími požadavky na rychlost lodní dopravy rostly i požadavky na rychloběžnost lodního šroubu. To se vyřešilo u torpedoborce Turbinia použitím rychloběžné turbíny místo parního stroje. Výsledky zkoušek neuspokojily, neboť se nedosáhlo ani zdaleka předpokládané rychlosti. U lodních šroubů se objevila kavitace, která byla popsána v roce 1895 S. W. Barnabyem. Podle jeho domněnky byl pokles výkonu způsoben tvořením bublinek, které jsou vyplněny parou. Na podobné těžkosti upozornil i Parsons u torpedoborce Turbinia. Uvedl, že lodní šrouby musely být několikrát vyměněny, protože při vyšších otáčkách nastalo snížení tahu a na šroubu bylo po několikahodinovém provozu zjištěno rozrušení kovu, které mělo houbovitý vzhled.

U vodních turbin se objevila kavitace až v roce 1907. Wagenbach podal zprávu o rozrušení oběžného kola Francisovy turbíny hydroelektrárny v Jaiice v Bosně. Toto kolo bylo zničeno kavitačním účinkem již za několik týdnů provozu. Se zvyšující se rychloběžností vodních turbin se objevovala kavitace častěji. Na souvislost s lodními šrouby poukázal v roce 1919 Thoma. Problémy s kavitací vzrostly ještě po zavedení vrtulových turbin.

Přibližně v této době se začíná intenzivně pracovat na výzkumu kavitace. Výzkum vlastního kavitačního jevu se zaměřil nejprve na teoretické a experimentální zjištění podmínek kavitace. Různí badatelé zjistili, že nutnou podmínkou vzniku kavitace je pokles tlaku proudící kapaliny na hodnotu tlaku nasycené vodní páry při dané teplotě. Později, přibližně v roce 1920,

se výzkumy zaměřily na odolnost materiálů proti kavitační korozi. Vedle toho se výzkumy zabývaly i jevy probíhajícími v kavitaci, t. j. vznikem a zánikem kavitačních dutin. Tyto experimenty si vyžádaly podrobnější informace o fyzikálních vlastnostech kapalin, zejména o jejich tahové pevnosti.

Výzkum kavitace začínal v Evropě, ale dnes se těžiště výzkumů přesunulo do USA a SSSR. Tyto průmyslově vyspělé země mohou zajistit výzkum kavitace, který se stává stále více náročným co do měřících metod i přístrojů a tím také dražším.

3. KAVITAČNÍ JEV

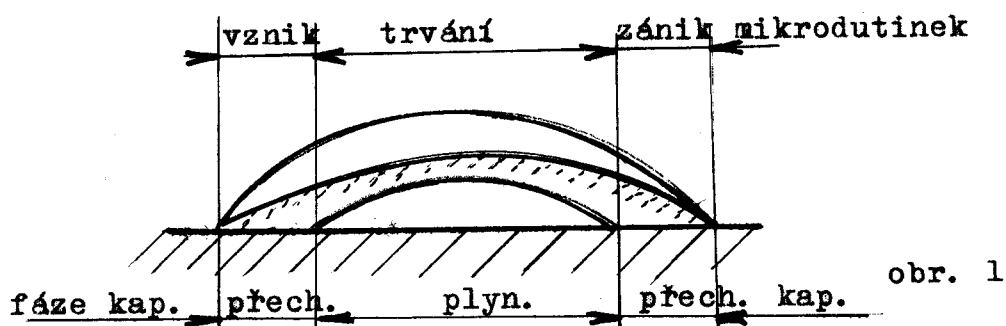
3.1. H y d r o d y n a m i c k é p o d m í n k y v z n i k u k a v i t a c e

Pod pojmem kavitace chápeme utváření a zánik dutin v pohybující se kapalině, které vznikají následkem rozrušení její kompaktnosti. Slovo kavitace vzniklo z latinského "cavitas" - dutina.

Při snížení tlaku v kapalině na kritickou hodnotu, která je řádově blízko tlaku nasycených par při příslušné teplotě, nastane rozrušení jednolitě kapalně fáze a vzniknou dutiny. Tyto dutiny jsou zaplněny parami a plyny uvolněnými z kapaliny. Vznikem páry se absorbuje teplo, které je odebíráno kapalině. Současně je snížení tlaku doprovázeno nejen vznikem par ale i vylučováním vzduchu a jiných plynů obsažených ve vodě. Na velikost tlaku má vliv:

1. Druh a stav kapaliny, tzn. především její teplota
 2. Druh, množství a stav plynů obsažených v kapalině.
- Z toho plyne, že obsah dutin závisí na druhu a stavu kapaliny a na druhu, stavu a množství plynů v ní obsažených. Struktura kavitační dutiny není zpravidla homogenní. Dá se rozdělit na dvě části:

1. na část homogenní, vyplněnou parami kapaliny a plyny z ní vyloučenými a na
2. část přechodnou, která se nachází mezi kapalnou a plynou fází [10] viz obrázek 1.



Objem, který zaujímá kavitační dutina se může pohybovat ve značném rozmezí a sice od kubického milimetru až do několika kubických metrů. [3] Tyto dutiny nebo bubliny jsou unášeny proudem tak dlouho, až se dostanou do místa s vyšším tlakem než je tlak kritický. V tom okamžiku se dutiny začnou zmenšovat až konečně dojde k zániku úplnému. Pro představu o charakteru kavitačního jevu je nutné studovat podmínky vzniku tohoto jevu, t. j. mechanismus utváření, trvání a zániku kavitačních dutin.

Bernoulliho zákon vyjadřuje závislost mezi rychlostí a tlakem při pohybu stacionárního proudu:

$$dh + \frac{dp}{\rho} + \frac{dv^2}{2g} = \text{konst.}$$

Kde dh odpovídá elementární polohové energii, $\frac{dp}{\rho}$ odpovídá tlakové a $\frac{dv^2}{2g}$ kinetické energii a kde

p = hydrostatický tlak

ρ = měrná /specifická/ váha kapaliny

v = rychlost pohybu proudu kapaliny

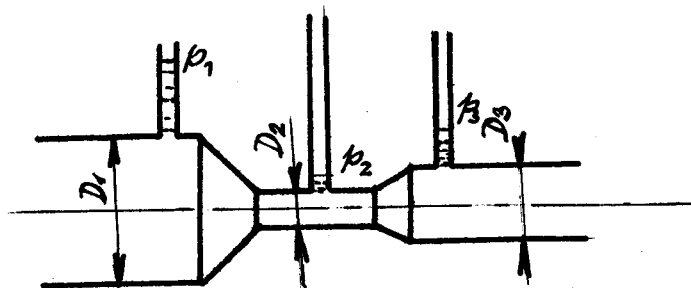
g = gravitační /tíhové/ zrychlení.

Tedy za předpokladu $dh = 0$, nestlačitelnosti a zanedbatelné malé viskozity proudící kapaliny z tohoto vztahu vyplývá,

že součet tlakové a kinetické energie je konstantní. Tuto

závislost mezi tlakem a rychlostí můžeme znázornit následovně

[3] :



obr. 2

Vezmeme trubku, která má proměnlivý průřez, ve které bude proudit kapalina, a která bude mít v různých místech svislé trubice. Podle Bernoulliho zákona bude v nejužším průřezu maximální rychlost a kapalina ve vertikální trubici vystoupí do menší výšky než v ostatních průřezích. Při dostatečně malé ploše minimálního průřezu zjistíme, že kapalina nejen že nevystoupí ve svislé trubici, ale naopak se bude touto trubicí nasávat vzduch zvenčí. Z tohoto lze usuzovat, že v místě dostatečného zúžení průřezu rychlost stoupá, ale tlak klesá na nulovou hodnotu nebo může nabývat až záporných hodnot, tzn. že se v tomto místě bude kapalina podrobovat tahu. Může dojít i k přerušení kompaktnosti proudu a vytvoří se tedy kavitační oblast.

V našem pokusu tedy klesá hydrostatický tlak na hodnotu řádově blízkou tlaku nasycené páry při dané teplotě kapaliny, voda se začala vypařovat a tvořila kavitační dutiny zaplněné těmito parami a plyny, které byly v kapalině obsaženy.

Zkoušky různých autorů za účelem stanovení tlaku a teploty, které vznikají při zániku kavitačních bublin dávají velký rozptyl výsledků. To souvisí s tím, že mnozí autoři ve svých výpočtech nepřihlíží k tlumicímu působení plynů, které jsou vždy v kavitační bublině. Tanto plyn působí vždy při zániku bubliny jako brzda. Z toho vyplývá, že skutečný tlak, který vzniká při srážení bubliny bude menší než tlak vypočtený.

Určitou roli při vzniku kavitace hrají i fyzikální vlastnosti kapaliny. V následující kapitole se budu některými zabývat.

3.2. Vlastnosti kapaliny ovlivňující vznik kavitace a kavitační rozrušování

Rozhodující vliv při kavitačním rozrušování materiálu se přisuzuje hydraulickým úderům, způsobeným zánikem dutiny.

Z toho je zřejmé, že intenzita rozrušení bude určována kapalinou, jejími vlastnostmi. Vlastnosti kapaliny ovlivňují i vznik a zánik kavitačních dutin. Proto bude účelné, podat stručnou charakteristiku jednotlivých vlastností kapaliny vzhledem ke kavitačnímu jevu.

3.2.1. Objemová pevnost

Kapalinu je možno zkoumat jako těleso, které má určitý komplex mechanických vlastností. Je jí proto možné podrobit mechanickému působení, např. tahu [3]. Je známo, že při velkých rychlostech deformace se kapalina chová jako tuhé těleso. Např. při vhodných podmínkách je kapalina schopna se křehce rozrušovat. Při menších rychlostech deformací lze zase pozorovat plastickou deformaci. Náchylnost kapaliny k porušení homogenity je určena objemovou pevností. Objemovou pevností se rozumí tlak, při kterém se poruší celistvost kapaliny. U homogenní kapaliny je způsobena značnými silami mezi molekulárními vrstvami kapaliny. K roztržení těchto vrstev je třeba značných napětí. Objemová pevnost je závislá na druhu kapaliny, na stavu povrchu tělesa hraničících s kapalinou, na teplotě kapaliny a jejích vlastnostech: na povrchovém napětí, vazkosti, stupni nasycenosti plynem a jinými nečistotami.

Největší vliv má stav povrchu tuhého tělesa, který se stýká s kapalinou. Např. u vody při 20°C se objemová pevnost pohybuje v rozmezí od 0,02 do 280 kp/cm² v závislosti na tomto faktoru [3].

Na teplotě kapaliny závisí asi takto: u vody do 5°C prudce roste a pak zvolna klesá [11].

Vazkost má na objemovou pevnost menší vliv, který je vyjádřen empirickým vztahem $\sigma_D = 3,25 + 0,825 \cdot \log \eta$ [11].

Obsah nerozpuštěných plněn a málo smáčlivých tuhých částic značně zmenšují objemovou pevnost tím, že porušují homogenitu molekulárních vrstev. V homogenní kapalině by vůbec nedocházelo ke kavitaci, neboť by kapalina byla schopna přenést tahová napětí, vznikající při podtlaku nižším než

tlak nasycených par.

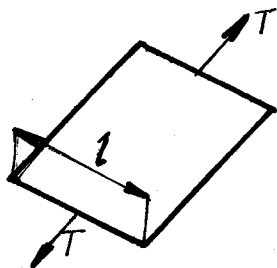
Rozpuštěné plyny mají velmi malý vliv na objemovou pevnost kapaliny a podobně dobře smáčivé tuhé částice. Při dobrém smáčení kapalinou se vyznačují velkým povrchovým napětím, které se podle experimentálních výsledků zhruba rovnají molekulárním silám. [11]

3.2.2. Povrchové napětí

Mezimolekulární síly se v kapalině projevují rovněž tím, že výsledná síla, působící na částici na povrchu kapaliného tělesa, směřuje kolmo k tomuto povrchu dovnitř. Souhrn těchto sil působí na venek tak, jako by kapalinné těleso bylo obloženo pružnou blánou [9]. Napětí této blány zajišťuje souvislost tělesa a s ostatními silami i jeho tvar. Pro technickou praxi nemá význam počítat s tloušťkou povrchové blanky, neboť se udává asi na 10^{-7} cm [1]. Z toho důvodu se zavádí pojem specifického /měrného/ napětí C , které je dáno vztahem

$$C = \frac{dT}{dl}$$

kde T je síla připadající na délku l .



obr. 3

Rozměr tohoto napětí se udává v $[dyn/cm]$ nebo v $[mp/cm]$, což jsou hodnoty téměř stejné neboť jeden dyn = 1,02 mp. / 1 mp [milipond] = 10^{-6} kp/ [1].

Nejvýznamnějším projevem povrchového napětí kapaliny je její vztlínání v trubičkách velmi malého vnitřního průměru, v tzv. kapilárách. Proto se měrné povrchové napětí C nazývá také někdy kapilární konstantou. Další výrazné projevy povrchového napětí jsou např. při odkapávání, rozprašování a pod.

Kapilární konstanta je závislá na teplotě. Např. u vody se mění s teplotou přibližně lineárně, takže při 100°C je $C = 55 \text{ dyn/cm}$ a při 200°C je $C = 25,5 \text{ dyn/cm}$ a poblíž kritického bodu $/374^{\circ}\text{C}/$ se kapilární konstanta rychle blíží k nule [1]. Uvedené hodnoty platí za předpokladu, že povrch kapaliny se stýká se vzduchem. Při jiné kombinaci látek nabývá kapilární konstanta jiných hodnot.

Síly povrchového napětí ovlivňují i průběh kavitační akce. Jejich vliv spočívá v tom, že urychlují zánik kavitační dutiny a tím zvyšují okamžité místní tlakové maximum [9]. V důsledku toho má povrchové napětí značný vliv na intenzitu rozrušení kovu v kavitující kapalině. Zvětšení koeficientu povrchového napětí vede ke zvýšení intenzity rozrušení kovu vlivem kavitace.

3.2.3. Viskozita /vazkost/

3.2.3.1. Základní vlastnosti

Vazkost kapaliny se projevuje předně tím, že kapalina lpí na stěnách kanálu, takže její rychlost roste obecně od nuly směrem dovnitř proudu. Tím vznikají mezi myšlenými sousedními vrstvami proudu čili proudovými vlákny, které se pohybují nestejnými rychlostmi, tečné síly. Zmenšuje se tím vždy hydraulická energie kapaliny. Tento úbytek se projeví buď jako pokles tlaku, nebo jako pokles rychlosti, je však samozřejmo, že se zřetelům na zákon zachování energie se jeho ekvivalent přemění v teplo.

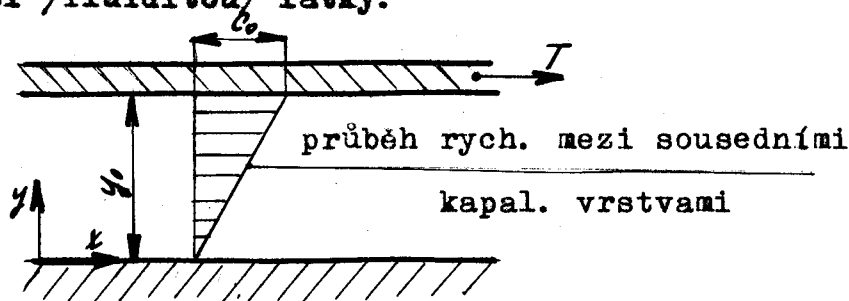
3.2.3.2. Dynamická vazkost

Předpokládáme-li, že kapalina lpí na povrchu obou desek, takže její rychlost je nulová pro $y=0$ a roste úměrně s odlehlostí y až na $c = c_0$ pro $y = y_0$. Napětí τ je podle zkušenosti úměrné rychlosti y , tj.

úměrné rychlostnímu spádu, takže lze psát

$$\tau = \eta \frac{c_0}{y_0} = \frac{T}{F}$$

Součinitele úměrnosti η nazýváme dynamickou neboli absolutní vazkostí tekutiny. Jeho převrácená hodnota $1/\eta$ je někdy zvána tekutostí /fluiditou/ látky.



obr. 4

Rozměr součinitele dynamické viskozity η plyne z rovnice

$$[\eta] = \left[\frac{T \cdot y_0}{F \cdot c_0} \right] = \frac{\text{kp} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}} = \frac{\text{kp} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

Jeho velikost je tedy v technické soustavě jednotek dána silou v kp, působící na plochu 1 m^2 , která se ve vzdálenosti jednoho metru od stojící stěny pohybuje podél ní rychlostí 1 m/s . Fyzikální jednotka dynamické vazkosti η zvaná poise, má rozměr

$$p = \frac{\text{dyn} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}} = \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2}$$

Jednotka stokrát menší se nazývá centpoise: $\text{cP} = 10^{-2} p$.

V soustavě SI je hlavní jednotkou dynamické viskozity $\text{Ns/m}^2 = 10^9 p$.

Dynamická vazkost η , která je pro některé látky udána v tabulkách, prakticky se s tlakem nemění, za to však dosti značně závisí na teplotě: u kapalin s rostoucí teplotou klesá, u plynů, jejichž dynamická vazkost je podstatně menší, naopak s teplotou roste. Toto nestejné chování lze vysvětlit skutečností, že u kapalin se vazba molekul teplem uvolňuje a jejich vzájemné působení zmenšuje, kdežto u plynů s teplotou stoupá hybnost molekul, a tím i intenzita výměny impulsů.

3.2.3.3. Kinematická vazkost

V pohybových rovnicích skutečných tekutin se jako další významná veličina objevuje podíl dynamické vazkosti a měrné hmoty $\rho = \frac{\eta}{\nu}$, který nazýváme kinematickou vazkostí $\nu = \frac{\eta}{\rho}$. V technické soustavě dostaneme pro součinitele kinematické vazkosti čili viskozity

$$\nu = \eta \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{\text{kp} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kp}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

a ve fyzikální soustavě

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} \cdot \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

takže 1 techn. jedn. $\nu = 10^4$ fyz. jedn. Nazveme-li fyzikální jednotku kinematické viskozity stokes /stok S/ a veličinu sto-krát menší centistokes /cS/, pak

$$1 \text{ tech. jedn. } \nu = 10^6 \text{ cS}$$

S rostoucí teplotou klesá kinematická vazkost kapalin poněkud pomaleji než vazkost dynamická, kdežto u plynů naopak roste ν rychleji než η . Kinematická viskozita plynů závisí též značně na tlaku, neboť $\nu = \frac{\eta}{\rho} = \eta \cdot \frac{1}{\rho}$ měrný objem $\frac{1}{\rho}$ se podle stavové rovnice $p \cdot v = R \cdot T$ mění s tlakem nepřímo úměrně.

K měření viskozity se používá různých přístrojů, které se rozdělují podle principu na výtokové, rotační a tělískové.

Poměrná kinetická viskozita se nejčastěji udává v empirických stupních Englera. [1].

Vazkost má vliv na objemovou pevnost /jak již bylo poukázáno v odstavci 3.2.1./ a tím, na kavitační akci.

4. KAVITAČNÍ ROZRUŠENÍ MATERIÁLU - VÝVOJ NÁZORŮ

Fyzikální a chemické vlastnosti kapaliny určují spolu s hydrodynamickými poměry podmínky vzniku kavitace a popřípadě i chemické působení na materiál. Vlastnosti materiálu, jeho složení, struktura a ostatní vlastnosti určují zase odolnost materiálu proti kavitačnímu rozrušení.

Na počátku tohoto století vznikly téměř současně dva názory na způsoby kavitačního rozrušování materiálu. Jedna skupina badatelů tvrdila, že kavitační rozrušování je způsobeno hlavně otěrem /erozí/ povrchu kovu mechanickým účinkem kapaliny, která proudí velkou rychlostí. Druhá skupina vysloviла názor, opírající se hlavně o elektrochemickou korozi. Jedno vysvětlení se opírá hlavně o mechanický účinek a druhé o elektrochemický, případně chemický jev.

Jedním z prvních badatelů, kteří se přiklonili k názoru, že kavitační rozrušování je způsobeno mechanickým účinkem, je Sielberrad [15]. Provedl zkoušky na nárazovém přístroji a kavitační odolnost vyjádřil váhovým úbytkem vzorku. Zkouškami zjistil dobrou odolnost speciální mosazi a kromě toho se ukázalo, že materiály, které jsou chemicky pasivní /zlato, beton, achát aj./ podléhají také kavitačnímu rozrušování. To pak dokazovalo, že hlavním účinkem v kavitačním rozrušování je mechanické působení velkých rázů, které vznikají při zániku kavitačních dutin [11].

Představy korozionistů vyjádřil Raasay [16]. Podle něj se při kavitačním napadení nejdříve rozpouštějí méně odolné krystaly a ostatní zůstávají nenarušeny. Houbovitý vzhled vedl k domněnce, že proces je elektrochemický. Toto potvrzovala i zkušenost, že materiály odolávají kavitaci v mořské vodě 10x méně než ve sladké vodě. Podstatu názorů korozionistů spočívá v tom, že kapalina tvoří elektrolyt a na povrchu kovů se tvoří vrstva kysličníků. Mechanický účinek proudu omezovali jen na odstraňování těchto produktů koroze a na tření mezi proudící kapalinou a povrchem kovu.

Podobně soudili o účinku hydraulických rázů. Větší rychlost kavitační koroze vůči chemické připisovali pohybu kapalin, který odstraňuje ochranné vrstvy kysličníků. Rovněž poznatek, že odolnost nerezavějících ocelí je větší, svěděl k zdůraznění korozivního charakteru kavitačního rozrušování. Tím ovšem nebyl názor jednoznačně potvrzen, neboť zůstala otázka, zda kavitační odolnost nerezavějících slitin je dána chemickou odolností nebo mechanickými vlastnostmi.

Výsledky ukazují, že se prakticky uplatňují oba dva jevy v kavitačním rozrušování a působí společně. Agresivita prostředí kapaliny a tím elektrochemické koroze se projevuje více u materiálů, které jsou méně odolné proti korozi. Různí autoři potvrzují, že kavitační odolnost materiálů není totožná s odolností proti korozi [3]. Zjistili, že např. Al bronz a Mn mosaz mají přibližně stejnou odolnost proti korozi, avšak velmi rozdílnou kavitační odolnost. Wheeler z pozorování vydrolených částic, z jejich deformace a změn usoudil, že větší podíl v kavitačním rozrušování má chemický účinek, který připisuje vysokým teplotám v napadených místech.

U řady jiných autorů je korozi přisuzován druhořadý význam. Je také známo, že kavitační rozrušování je $5\,000 \div 100\,000 \times$ rychlejší než korozivní rozrušování.

Jiná je představa o kavitačním rozrušování jako o únavě velmi malých částic kovu. Výstupky mikroskopických nerovností jsou velmi dynamicky namáhány účinkem hydraulického rázu a únavou materiálu se nakonec vylamují. Tyto vylámané částice zůstávají v kapalině a ovlivňují její fyzikální a chemické vlastnosti. U leštěného povrchu je rozrušení mnohem pomalejší než u povrchu drsného [3] [11].

Na základě elektrochemických jevů se vysvětluje vliv hladkosti povrchu na kavitační odolnost materiálu. Jelikož na drsném povrchu jsou jednotlivé výstupky vystaveny rozdílným mechanickým napadením, dojde k nerovnoměrnému rozložení elektrických potenciálů. Mezi částmi drsného povrchu se pak

vyrovnávají elektrické potenciály a koroze probíhá rychleji. Naproti tomu se na hladkém povrchu vytvoří souvislejší a rovnoměrnější ochranná vrstvička kyslíčků a tato zvýší korozivní odolnost hladkého povrchu [3] [11]. Deformace povrchové vrstvy jsou doprovázeny též jejich ohřevem, což vede k tepelnému namáhání vrstev nastejnou teplotou ve strukturních složkách, mající různou tepelnou vodivost. Teplejší část se stává anodou a chladnější katodou, při čemž v těchto podmínkách, vlivem vznikajícího st. proudu se anoda rozrušuje, zatímco katoda zůstává beze změny [7]. Tento názor na vznik termočlánků se opírá hlavně o ohřev materiálů energií rázů. Není však vyloučeno, že k ohřevu může dojít stykem kavitačních dutin se zbytkem stlačeného a přehřátého plynu.

Kavitační rozrušování probíhá ve dvou fázích. V inkubační době se neprojevuje úbytek materiálu /nebo jen malý/, ale při úplném rozvinutí kavitační akce se materiál vydroluje a úbytek je velký. V inkubační době probíhají různé jevy jako např. změna velikosti krystalů [17], vznik poruch, které jsou spojeny s napětím materiálu [18] a pod.

Z uvedených názorů je patrné, že kavitační rozrušování je složitý jev, který zahrnuje mechanický účinek a elektrochemickou korozi. Dosavadní výsledky ukázaly, že mechanické účinky jsou primární a jsou doprovázeny korozi.

Podíl obou rozrušení se může změnit v širokém rozmezí /Doc. Němeček např. uvádí, že mechanické účinky se podílí 60 % a chemická koroze 40 % z celkového rozrušení. [11] ./ a je závislý na kavitační a chemické odolnosti materiálu, agresivitě kapaliny a intenzitě kavitačního účinku. Podle dosavadních výsledků je možné si učinit představu o průběhu kavitačního rozrušování: Účinkem rázů, které vznikají při zániku kavitačních dutin na povrchu kovu, vznikají deformace, materiál se zpevňuje, při čemž dochází k posuvům skupin materiálu. V materiálu vznikají trhliny, což má za následek při dalších rázech koncentraci napětí a vy-

drolování materiálu. Kavitovaný povrch nabývá houbovitého vzhledu. Nerovný povrch zesiluje účinky rázu při zániku kavitačních dutin.

5. METODY ZKOUŠENÍ KAVITAČNÍ ODOLNOSTI MATERIÁLU

Kavitační rozrušování je možno sledovat v přirozených podmínkách^(nebo) na speciálních laboratorních přístrojích.

Při zkouškách v přírodních podmínkách jsou prováděny zkoušky buď přímo na vodních trubicích, kde oběžné kolo je vyrobeno s lopatkami, z nichž každá je z jiného materiálu, nebo se zkoušky provádějí na modelech ve zkušebních stanicích, jako např. u fy Escher - Wyss [5].

Konečně se také mohou do oblasti kavitačního působení připevňovat vzorky.

Tyto zkoušky jsou však příliš dlouhé, hospodářsky nákladné a mimo to nedávají možnost plynulého studování postupu kavitačního rozrušování. Proto byly hledány laboratorní metody, které by umožnily vyvolat mnohem intenzivnější kavitaci, aby se doba zkoušky zkrátila.

Pro tyto laboratorní zkoušky se rozšířily tři základní způsoby:

- a/ rozrušení materiálu mnohonásobnými údery o paprsek vody
- b/ vytvoření kavitační oblasti v dýze
- c/ " " " vibrací.

5.1. Laboratorní přístroje

V této kapitole se omezím pouze na stručný popis základních typů kavitačních přístrojů s uvedením literatury, ve které jsou tyto přístroje podrobněji popsány a vyobrazeny.

5.1.1. Kavitační trysky a tunely [3][5][10][11]

Prvním zkušebním zařízením byla kavitační tryska. Při průtoku nejužším místem kavitační trysky dosáhla kapaliny takové rychlosti, že její tlak klesl na tlak nasycených vodních par a vznikla kavitace. Na konci kavitační oblasti kde se projevují účinky kavitace na materiál, se připevňují vzorky z různých materiálů na nichž se projevuje kavitační

rozrušení. Tyto přístroje slouží i ke studování vlastního kavitačního jevu.

5.1.2. Rotační nárazový přístroj [11] [3] [5] [10]

Vzorky zkoumaného materiálu se pohybují na obvodě rotujícího kotouče a narážejí na vodní paprsek. Mechanický účinek kavitace na materiál je nahrazen rázem zkoušeného vzorku na vodní paprsek. Trysky, z nichž vytéká kapalina, jsou umístěny na rovinu kotouče. Různými obvodovými rychlostmi a různě velkým ϕ kapalinového paprsku se dá řídit intenzita kavitační akce. Záleží rovněž na ploše vzorku, který vchází ve styk s paprskem kapaliny.

Tento přístroj znamená podstatné snížení výkonu zkušebního zařízení proti tryskám, přičemž kavitační zkoušky probíhají rovněž rychleji.

5.1.3. Rázový přístroj

Tímto přístrojem se vyvolávají v kapalině rázové vlny. Účinek kapaliny na vzorek je vyvolán tlakovými vlnami, které se šíří od pístu, na který buší pneumatické kladivo. Kuželový tvar prostoru, který je zaplněn vodou, zvyšuje rázový účinek kapaliny na vzorek, na němž se vyvolává kavitační rozrušení. Do prostoru se přivádí tlaková voda o přetlaku $/5$ až $3/10^5$ N/m². Energie rázu se pohybuje v rozmezí 1 až 2 kpa.

5.1.4. Magnetostrikční přístroj

V roce 1932 upozornil Gaines na možnost použití magnetostrikčního přístroje.

Přístroj je založen na magnetostriko. Je to změna lineárních rozměrů feromagnetických materiálů a jejich slitin ve střídavém magnetickém poli. Mezi materiály mající vysoké magnetostrikční hodnoty patří např. nikl a některé jeho slitiny, jako např. permalloy, které obsahují 78,5% Ni.

Umístíme-li niklovanou trubku do cívky, kterou prochází proud, pak vlivem magnetického pole, které vzniklo v soustavě, změní se rozměr magnetostrikčního materiálu.

Připustíme-li magnetizační cívku střídavý proud, bude se magnetické pole měnit synchronně kmitočtem napájecího zdroje.

V těchto podmínkách bude magnetostrikční člen měnit periodicky své rozměry, tzn., že se bude střídavě prodlužovat a smršťovat. Při shodě frekvencí zdroje proudu a měniče se amplituda kmitání značně zvětšuje. Za dobu jedné půlperiody proudu, napájecího cívku, se vykoná celý cyklus kmitu, což vede ke zdvojení frekvence kmitání magnetostrikční tyče vzhledem ke kmitočtu napájecího proudu. K zabránění zdvojení amplitudy a pro zvětšení intenzity vyřazování se ke střídavému magnetickému poli přidává stejnosměrné pole, tzv. předmagnetizace.

Střídavé magnetické pole se vytváří vysokofrekvenčním proudem z oscilátoru. Pro dosažení maximálního kmitání je zapotřebí, aby oscilační kruh byl naladěn na frekvenci vlastních kmitů niklované trubky. Frekvence kmitů bývá v rozmezí 6,5 až 25 Hz. Vlastní kmity niklové trubky jsou dány vztahem $f = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, kde l je délka trubky, E = modul pružnosti niklu a ρ = měrná hmotnost niklu. Tyč musí být chlazená, aby nenastalo její ohřátí na teplotu 360°C, což je Curieho bod, při kterém magnetostrikční účinek u niklu mizí [11].

Tyč z niklu je uprostřed uchycena a na jejích koncích je upevněn vzorek materiálu, který kmitá s trubkami. Jestliže se vzorek ponoří do kapaliny, vytváří se pod ním kavitace, neboť kapalina nedovede sledovat v důsledku setrvačnosti velmi rychlý pohyb vzorku, takže dochází k jeho odtržení od kapaliny a k jejímu odpařování. Při zvýšení tlaku kavitační dutiny zanikají a dochází k rázovým účinkům na materiál.

Před účinkem ultrazvukového záření je nutno chránit pracovní prostředí absorbujiícího personálu izolací přístroje ve skřínce nebo kabině. Horní přípustná mez zvukové hladiny je 70 dB při 1 000 Hz nebo 65 dB při 8 000 Hz.

6. OCHRANA PROTI KAVITAČNÍM ÚČINKŮM

Kavitace je doprovázena charakteristickým hlukem, vibracemi, obláčky větších či menších rozměrů v kapalině, změnou účinnosti a poškozeným povrchem namočených stěn. Proto je nutná ochrana proti kavitaci. Radikálním řešením proti kavitaci je např. účerpadel zmenšení ssací výšky, vložení podávacího čerpadla do ssací dráhy nebo překonstruování oběžného kola. Jiným řešením je např. vaška vhodnějšího materiálu na součástky napadené kavitací. Následkům kavitace se dá ale čelit též zmírněním kavitačních účinků např. elektrickou ochranou povrchu vystaveného kavitaci nebo úpravou kavitačních vlastností kapaliny.

6.1. E_l_e_k_t_r_i_c_k_á_ _o_c_h_r_a_n_a

Elektrická ochrana je založena na poznatku, že při kavitačním rozrušení byly zjištěny elektrické proudy jako součást elektrochemické koroze. Účinek elektrické ochrany na úbytek kavitačního vzorku na magnetostrikčním přístroji je patrný z obr. 5 na str. 100. Kompenzace elektrického proudu vzorkem a pomocnou elektrodou snižší kavitační úbytek /b/. Protiproudem se dosáhlo dalšího snížení úbytku /c/, což se může vysvětlit nerovnoměrným rozložením proudu po ploše vzorku a elektrického odporu vody, na který má vliv kavitační mrak. Průběh křivek úbytku ukazuje, že elektrická ochrana prodlužuje inkubační dobu [19]. Jakmile se ale kavitační rozrušení vyvine, je ochrana neúčinná. Převládá pak mechanický účinek, charakteristický takřka rovnoměrným úbytkem materiálu.

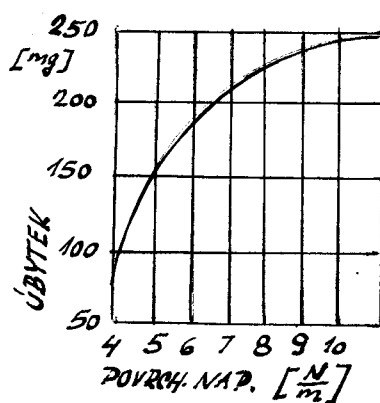
Tyto zkoušky se prováděly i v praxi.

6.2. Ú_p_r_a_v_a_ _k_a_p_a_l_i_n_y

Jak již bylo řečeno, chová se kapalina při velkých deformačních rychlostech jako tuhé těleso. Mechanické roztržení kapaliny závisí na napětí, při kterém se poruší spojitost kapaliny.

Kavitací se tato spojitost kapaliny narušuje, proto vznik kavitace je určen pevností kapaliny. Pevnost kapaliny pak závisí na několika činitelích: na teplotě, povrchovém napětí, obsahu plynů a pod.

Na vznik kavitačních bublin má tedy vliv povrchové napětí. Čím nižší je povrchové napětí, tím je zapotřebí méně energie při vzniku kavitačních bublin. To má vliv i na kavitační rozrušení materiálu [11]



obr. 6

Snížením povrchového napětí kapaliny lze zmenšit kavitační napadení. Povrchové napětí se dá v širokém rozmezí měnit přidáním velmi malého množství povrchově aktivních látek, tzv. inhibitorů. To má význam pro uzavřené hydraulické okruhy.

7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V úvodu bylo řečeno, že účelem této práce je zjistit vliv elektrického pole na některé fyzikální vlastnosti kapaliny, a to na viskozitu, viskozitní index a povrchové napětí. Při tom ovšem mi nejde o zjištění absolutních hodnot, ale pouze o to, zda má vůbec elektrické pole nějaký vliv a jakým způsobem tyto vlastnosti ovlivňuje. Zkoumanou kapalinou byl etylenglykol, který má chemický vzorec $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, molekulovou váhu 62,07, bod tání -15°C , bod varu $197,4^\circ\text{C}$, hustotu při 0°C $\rho = 1,1155$. Je to bezbarvá, sirupovitá kapalina, sladké chuti. Je mísitelný s vodou a alkoholem [20]. Etylenglykol byl zvolen z toho důvodu, že veškeré kavitační zkoušky na Katedře hydraulických strojů VŠST v Liberci se v současné době provádějí v této kapalině.

Podobné zkoušky, ale s některými oleji byly již dříve na této katedře prováděny. Bylo to na podnět průmyslové potřeby, kdy docházelo k žernání olejů, vystavených v hydraulických obvodech dlouhodobě opakovaným náhlým změnám tlaku. Z tehdejších výsledků vyplynulo, že kavitační akce

1/ zvyšuje vazkost oleje a

2/ " strmost viskozitní křivky [9].

V literatuře [21] je však citovaný opačný případ, což bylo vysvětleno nestejným použitým olejem a nestejnou dobou kavitace a její intenzitou.

Pokud se týká povrchového napětí bylo zjištěno, že krátkodobé namáhání oleje kavitací je prakticky bez vlivu na tuto vlastnost. Naopak dlouhodobé použití oleje v hydraulickém okruhu zvyšuje povrchové napětí a to pravděpodobně vlivem změn ve struktuře uhlovodíků obsažených v oleji.

7.1. Zkoušené vzorky kapaliny a systém značení

Zkoušenou kapalinou byl etylenglykol, který byl popsán v předešlém odstavci.

Pro měření povrchového napětí byly zvoleny tři vzorky a sice:

1/ čistý nepoužitý etylenglykol

2/ čerstvě kavitovaný "

3/ dříve " " tzn., že etylenglykol použitý ke kavitování byl po změření ponechán 24 hodin v klidu ve skleněné kyvetě a pak bylo opět změřeno povrchové napětí.

Na těchto vzorcích bylo měřeno povrchové napětí jednak bez působení elektrického pole na kapalinu a jednak za současného působení elektrického pole na etylenglykol. Elektrické pole, způsobené stejnosměrným proudem mělo napětí $U = 50 \text{ V}$, nebo $U = 100 \text{ V}$.

Systém značení těchto vzorků je následující:

Č.vzorku	etylenglykol	dobu měření po kavitaci	el. pole
I	čistý, nepoužitý	0	0
I' ₅₀	" "	0	$U = 50 \text{ V}$
I' ₁₀₀	" "	0	$U = 100 \text{ V}$
II	kavitovaný	ihned	0
II' ₅₀	"	"	$U = 50 \text{ V}$
II' ₁₀₀	"	"	$U = 100 \text{ V}$
III	"	24 hodin	0
III' ₅₀	"	"	$U = 50 \text{ V}$
III' ₁₀₀	"	"	$U = 100 \text{ V}$

Pro měření viskozity byl zvolen jiný systém, neboť toto měření bylo prováděno dvěma způsoby na dvou různých viskozimetrech a s jinými vzorky. Na Englerově viskozimetru byla měřena viskozita etylenglykolu, na který bezprostředně nepůsobilo elektrické pole, ale kapalina byla vystavena elektrickému poli těsně před měřením, a nebo při kavitování byly zvoleny různé podmínky. Jednou byl etylenglykol podroben kavitování bez elektrické ochrany /i přetížení/ a podruhé bylo při kavitování použito katodické ochrany. Na Höpplerově viskozimetru byly měřeny vzorky etylenglykolu, který byl při vlastním měření podrobován působení elektrického pole.

Pro měření na Englerově viskozimetru byl pro značení vzorků zvolen tento způsob:

č. vzorku	popis
I	etylenglykol čistý nepoužitý
I'	" , ale před měřením byl 20 min. vystaven působení elektrického pole o napětí U 50V
II	čerstvě kavitovaný, tzn. že měření bylo provádě- no ihned po kavitaci, při které nebylo použito elektrické ochrany
II'	měřeno ihned po kavitaci, při které bylo použi- to katodické ochrany, tzn. že působilo elektric- ké pole o napětí U 50V
III	vzorek měřen 24 hod. po kavitaci, při které nebyla použita elektrická ochrana
III'	měřeno 24 hod. po kavitaci, při které byla použita katodická ochrana, tzn. elektrické pole o napětí U 50V

Pro měření na Höpplerově viskozimetru, kde byl měřen bezprostřední vliv elektrického pole na viskozitu, byly vza-
ty vzorky s tímto značením:

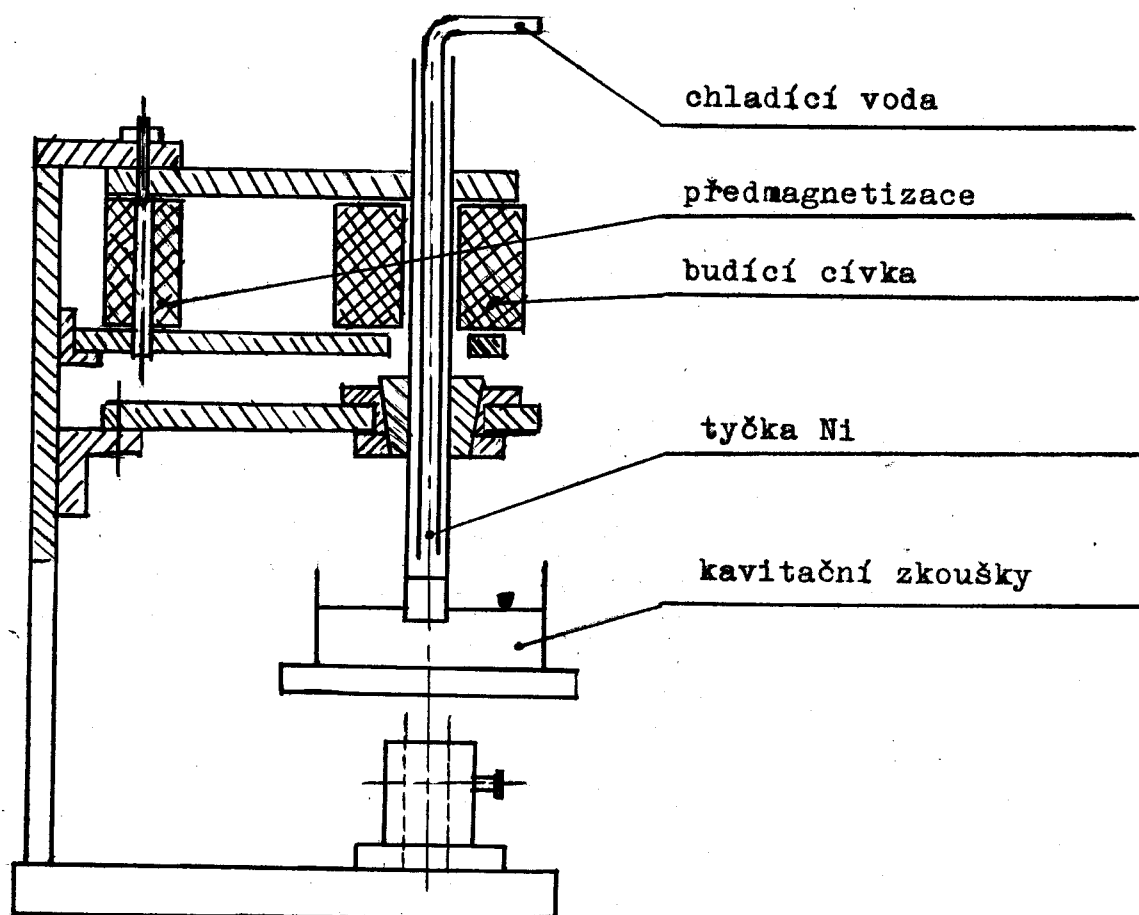
Označení vzorku	Podmínky při kavitaci				Doba měření po kavitaci	el. pole při měř.
A a	mekavitován				0	ne
A b	"				0	ano
B1a	A	20	U	0	ihned	ne
B1b	A	20	U	0	"	ano
B2a	A	20	U	+50	"	ne
B2b	A	20	U	+50	"	ano
B3a	A	20	U	-50	"	ne
B3b	A	20	U	-50	"	ano
B4a	A	10	U	0	"	ne
B4b	A	10	U	0	"	ano
B5a	A	10	U	+50	"	ne
B5b	A	10	U	+50	"	ano
B6a	A	10	U	-50	"	ne
B6b	A	10	U	-50	"	ano
C1a	A	20	U	0	24 hod.	ne
C1b	A	20	U	0	"	ano
C2a	A	20	U	+50	"	ne
C2b	A	20	U	+50	"	ano
C3a	A	20	U	-50	"	ne
C3b	A	20	U	-50	"	ano
C4a	A	10	U	0	"	ne
C4b	A	10	U	0	"	ano
C5a	A	10	U	+50	"	ne
C5b	A	10	U	+50	"	ano
C6a	A	10	U	-50	"	ne
C6b	A	10	U	-50	"	ano

7.2. P o p i s p o u ž i t é h o z a ř í z e n í a p o s t u p p r á c e

Dle dříve uvedených hledisek byl sledován vliv elektrického pole na viskozitu a průběh viskozních křivek v závislosti na teplotě a na povrchové napětí a to vzhledem ke kavitační akci.

7.2.1. Příprava a popis vzorků etylenglykolu

Z předešlé kapitoly /7.1./ je patrné, že^y etylenglykolu byla vyvolána kavitace. Kavítování se provádělo na magnetostrikčním přístroji, jehož princip byl popsán na str. 19 v odstavci 5.1.4. Schema tohoto přístroje je na obrázku 7.



Kmitačem je zde trubka z čistého niklu, která má tyto rozměry:

vnější průměr D 20 mm

vnitřní průměr d 17 mm

délku l 300 mm

Dole je uzavřena zašroubovanou zátkou. Trubka je magneticky buzena na svou rezonanční frekvenci rovnou 8000 Hz, a amplituda, měřená na aktivním spodním konci, je 0,05 mm. Spodní část zátky je asi 1 mm ponořena do zkoušené kapaliny. Při její magnetostrikčním kmitavém pohybu dochází na spodní ploše zátky k tiskovým pulzacím, které mají za následek vznik kavitační oblasti s maximem uprostřed vibrující plochy. Příkon zařízení je 230 W a příkon vlastního kmitače je asi 70 W 5 .

Za provozu přístroje vzniká značná intenzita zvuku vysokého kmitočtu /přes 100 dB/, a proto je přístroj umístěn v dřevěné skřínce a s ní v kabině, čímž je zvuková hladina snížena na přípustnou hodnotu /asi 65 dB/.

Etylenglykol byl podrobován kavitaci o různé intenzitě. V podstatě byly sledovány 4 hodnoty amplitudy /zaznamenány na elektrickém amplitudoměru/ a sice: A 20 15 10 5. Při každé hodnotě z těchto amplitud byl dále sledován vliv elektrické ochrany /katodické ochrany nebo anodické přetížení/. Proto byly zvoleny podmínky:

1. bez elektrické ochrany
2. anodové přetížení / U -50V/
3. katodické ochrany / U +50V/

Kavitační obláček, který se objevil pod vzorkem byl fotografován přístrojem "Exakta - Varex" /viz obrázek 8 - 19/. Fotografie kavitačního přístroje s příslušenstvím je na obr. 32 a 33. Pro nedostatek času bylo upuštěno od měření viskozity vzorků kavitovaných při amplitudě A 15 a A 5 .

7.2.2. Měření viskozity na Englerově viskozimetru

Schema Englerova viskozimetru je na obr. 20, frontální pohled je na obr. 21.

Popis přístroje: Englerův viskozimetr se skládá z válcové plechové nádoby 2, do níž je vsazena nádoba menších rozměrů, jejíž vnitřní prostor je chromovaný nebo z nerezavějící oceli a jejíž dno je mírně skloněno ke středu, kde je kuželový výtokový otvor. Uvnitř této nádoby jsou po obvodu tři hroty 3, určující výšku plnění. Nádoba 1 je uzavřena výkem 4, v jehož středu je otvor pro uzavírací tyč 7 a na obvodu otvor pro teploměr 6. Vnější nádoba, kterou je možno elektricky vytápět, je opatřena míchadlem 8, teploměrem 5 a vypustním kohoutem, je připevněna ke stojanu a s ním k podstavci 9. K přístroji patří odměrná banka 10 o obsahu 200 cm³.

Princip metody je založen na měření výtokové rychlosti 200 cm³ kapaliny při dané teplotě v porovnání s výtokovou rychlostí téhož množství destilované vody při 20 °C.

Před vlastními měřeními musíme zjistit tzv. vodní hodnotu viskozimetru. To provedeme tak, že do vyčištěné vnitřní nádoby nalejeme asi 240 cm³ destilované vody. Do vnější nádoby napustíme obyčejnou vodovodní vodu a vytemperujeme ji na 20 °C a s ní i obsah vnitřní nádoby. Pak vypustíme tolik vody z malé nádoby, až se bude hladina dotýkat hrotů, což odpovídá 200 cm³. Hladinu necháme ustálit a posléze změříme dobu výtoku vody. Toto měření opakujeme tak dlouho, až se třikrát po sobě naměří hodnoty, které se od sebe neliší o více než 0,5 sec. a přitom celkový čas výtoku se pohybuje v rozmezí 50 - 52 sec.

Po důkladném vyčištění měříme podobným způsobem, za jaký čas vyteče 200 cm³ zkoušená kapalina při dané teplotě.

Viskozita ve °E je potom daná poměrem výtokového času měřené kapaliny k průtočnému času stejného objemu destilované vody o teplotě 20 °C.

Na našem viskozimetru byla stanovena vodní hodnota z těchto časů: 51,0 ; 51,2 ; 51,5 a z toho aritmetický průměr je 51,2 sek, což je jeho vodní hodnota.

7.2.3. Měření viskozity na Höpplerově viskozimetru

Höpplerův viskozimetr patří svým principem měření mezi tělískové viskozimetry a považuje se za jeden z nej-
přesnějších. Celkový pohled na Höpplerův viskozimetr je na obr. 22 a 29 na str. a schema je na obr. 23.

Hlavní částí tohoto přístroje je skleněná válcová přesně kalibrovaná trubice 2, která je skloněna pod úhlem 10° ke kolmici a je naplněna měřenou kapalinou. Trubice je obklopena vodní lázní, která se udržuje na potřebné teplotě buď vlastním vytápěním pomocí topného tělíska 6, a nebo cirkuluje v uzavřeném okruhu ultratermostat - Höpplerův viskozimetr, za pomoci trubice 7. Teplota lázně je měřena teploměrem 5. Celý přístroj je otočně přichycen na stojan 8, který je stavitelný pomocí šroubů.

Z důvodu, aby bylo možno měřit na tomto přístroji viskozitu za současného působení el. pole, byla provedena úprava uzávěru. Do trubice 2 bylo nutno zavést elektrody tak, aby přes kovové součásti nenastal zkrat. Proto bylo víčko 3 zhotoveno dle obr. 24 ze silonu. V jeho středu byl vyvrtán otvor, kterým procházela elektroda 4 /viz též na obr. 25/ z duralu, zakončená závitem M 5. Pomocí podložky a matice byl přichycen přívodní drát elektrického proudu. Celkový pohled je na obr. 30.

Poněvadž na jedné straně přístroje byla trubice 2 umístěna níže, bylo proto z důvodu těsnění, nutné zhotovit ještě ze silonu pomocné víčko dle obr. 26.

Při úplném zaplnění trubice 2 měřenou kapalinou, což bylo dosaženo tím, že se nalil etylenglykol až po okraj trubice a posléze zašroubování víčka, se plný objem trubice uzavřel a přebytečná kapalina byla před dotažením vytlačena a odešla nečistotami v závitech, bylo dosaženo nepřerušného toku elektrického proudu.

Princip měření je jednoduchý a spočívá v tom, že se měří doba, za kterou projde padající kulička 1 svým spodním okrajem ryskami, které jsou od sebe vzdáleny 100 mm. Z tohoto času výpočteme hodnotu dynamické viskozity dle vztahu

kde je dynamická viskozita v poisech
T - čas, za který projde kulička dráhu mezi ryskami v sek.
Sk - specifická váha kuličky v g/cm^3
Sf - " " kapaliny při dané teplotě měření v g/cm^3 .
K - kuličková konstanta

7.2.4. Měření povrchové napětí stalagmometrem

Stalagmometr /obr. 27/ je v podstatě pipeta s měrnou nádobkou uprostřed. Měřicí rysky jsou nad i pod nádobkou. Její výtoková část je kapilární a je zakončena rozšířeným vodorovným zabroušením, kolným k ose výtoku.

Měření touto kapkovou metodou spočívá v tom, že měříme dobu, za kterou odkape objem kapaliny daný objemem mezi měřicími ryskami.

7.2.5. Pozorování změn povrchového napětí při průchodu elektrického proudu stylenglykolem

Jelikož měření povrchového napětí stalagmometrem nelze provádět za souč. působení elektrického pole, bylo proto sestaveno následující zařízení jehož schema je na obr. 28 a 31. Do malé kyvety 1 byly vloženy 2 elektrody 2 přesně proti sobě. Doprostřed byly postaveny 2 planparalelní sklička 3, mezi nimiž byly vloženy úzké plíšky z niklu, z důvodu dodržení vzdálenosti skláček, která byla zvolena 0,1 mm. Po zafixování všech součástí v této poloze bylo na dno kyvety nalito do výšky asi 1,5 cm dentacrylu 4 .

Po zatvředení dentacrylu byla kyveta až po okraj zaplněna etylenglykolem / přibližně 30 cm^3 /. Etylenglykol vystoupil mezi planparalelními sklíčky do určité výšky a pak následovalo pozorování nivelačním dalekohledem 5 /viz obr. 61 a 62 ze vzdálenosti asi 6 metrů/, zda a jak se bude měnit výška hladiny vlivem procházejícího el. proudu. Hladina mezi skly byla pozorována při zapnutí elektrického proudu a po průchodu po dobu 30 minut při napětí U 50 V, nebo U 100 V.

8. HODNOCENÍ

8.1. Zhodnocení výsledků a metodik

8.1.1. Měření viskozity na Englerově viskozimetru

Výsledky tohoto měření jsou zaznamenány v tabulce 1 na diagramu na obr. 34 a 35.

V diagramu na svislé ose je nanesena viskozita ve $^{\circ}\text{E}$ /obr. 33/ nebo v cSt /obr. 34/ a na ^{vedlejší} svislé ose jsou v obou případech teploty ve $^{\circ}\text{C}$.

Měření bylo prováděno při teplotách 20°C , 35°C a při 50°C . Bylo dosti zdlouhavé, neboť udržování teploty na žádané hodnotě bylo obtížné a kolísalo v rozmezí $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ kolem každé hodnoty. Další, ale ne již tak velkou obtíží, bylo to, že u našeho viskozimetru nebyla normalisovaná odměrná banka, ale běžná odměrka, v níž nebylo snadné dodržet podmínku, aby kapalina při výtoku se nezpěnila, a tím také byla zhoršena přesnost odečítání. Z výsledků je patrné, že vzorek I. má při teplotě přibližně 43°C nejnižší viskozitu. Při vyšší teplotě má zlepšenou tekutost vzorek III a posléze vzorky III a I. Z toho bylo možno usuzovat na to, že elektrické pole zlepšuje tekutost etylenglykolu až při vyšší teplotě, pokud ovšem byl vzorek kavitován s elektrickou ochranou, zatímco vzorek III, kavitovaný bez elektrické ochrany, zlepšuje svou tekutost již při teplotách nižších. Jasně se však zdá být, že elektrické pole, ať působí samostatně, nebo společně s kavitovanou akcí, vždy při nižších teplotách zhoršuje tekutost. Nevýhodou tohoto způsobu měření je, že nelze s jistotou prohlásit některý z těchto vlivů za dominantní, neboť působily společně a nebylo možné je tímto způsobem měření oddělit.

Vliv doby, která uplynula od kavitování se zdá být

asi tento: u vzorku III byla viskozita při nižších teplotách vyšší než u vzorku II. U vzorku III je viskozita za všech teplot nižší než u vzorku II, což, což je dle očekávání, neboť se pravděpodobně etylen glykol snaží získat své původní vlastnosti.

Na tomto přístroji nebylo možno měřit viskozitu za současného působení elektrického pole, neboť by při průchodu elektrického proudu docházelo k narušení vnitřích stěn přístroje elektrochemickými vlivy.

8.1.2. Měření na Höpplerově viskozimetru

Höpplerův viskozimet byl zapůjčen z chemických laboratorí n.p. Textilana v Liberci.

Výsledky těchto měření jsou zaznamenány v tabulce 2 a na obrázku 35 až 38. Na obr. 35 až 46 jsou na svislých osách vyneseny hodnoty viskozity ve $^{\circ}\text{E}$, přičemž na obr. 35 - 40 jde o hodnoty, získané při teplotě 20°C a na obr. 41 - 46 jde o hodnoty při teplotě 50°C . Na obr. 47 - 52 jsou na svislé osy vyneseny hodnoty E , což je rozdíl $E_{20} - E_{50} = \Delta E$, kde E_{20} je viskozita při 20°C /ve $^{\circ}\text{E}$ / E_{50} je viskozita ve stupních E měřená při teplotě 50°C .

Na všech diagramech jsou vzorky s indexem a /tj. bez současného působení elektrického pole/ provedeny plnou čarou a vzorky s indexem b provedeny čerchovaně.

Na obr. 35 jsou vzorky Aa, Ab, Bla, Blb, Cla a Clb měřeny při 20°C . Z průběhu je zřejmé, že kavitace zvýšila viskozitu etylen glykolu, ale po 24 hodinách byla viskozita ještě menší než vzorku Aa. Čára a má na všech dalších diagramech, tj. na obr. 35-40 podobný charakter. Jedinou výjimku tvoří vzorky B3a a C3a. Zde totiž nebyla dodržena doba měření. Měření bylo provedeno asi 3-4 hodiny po kavitaci, místo ihned po ní. Stalo se to tím, že vzorky B1, B2, B3 byly kavitovány posobě /po 20 min./ a měření viskozity bylo možno provádět až po této práci. Tím bylo způsobeno toto zpoždění.

O průběhu čar označených a na obr. 35 - 40, je tedy možno říci toto: V kapalině působí velmi vysoké tlaky a teploty spolu s dalšími účinky kavitace. Do kapaliny přechází malé částice kovu ze vzorku. Tyto částice mohou zvýšit vnitřní tření kapaliny, jejích proudových vrstev. Musí tu však působit ještě něco, co způsobuje, že s časem se viskozita opět dostává na svou původní hodnotu nebo hodnotu ještě nižší. Snad by to mohlo být rozbitím nebo narušením molekul, nebo i určité změny v atomech.

Na obr. 47 - 52 jsou vidět průběhy η u zkoušených vzorků. Je z nich vidět, s výjimkou vzorku B3a, že opět kavitací se zvyšuje tento rozdíl, avšak po 24 hodinách kapalina nabývala přibližně původních hodnot. Vliv elektrického pole zase u všech vzorků snižuje hodnoty η oproti čistému etylenglykolu podrobenému elektrickému poli.

V těchto měřeních však byly zase určité nepřesnosti, které nám mohou tyto výsledky zkreslovat. Je to udržování teploty na potřebné teplotě. Toto bylo u Höpplerova viskozimetru způsobeno tím, že jsem neměl k dispozici ultratermostat, ale ohřev byl prováděn vlastní topným tělískem, které je umístěno svisle. Teplá lázeň stoupala k hořejší části přístroje, čímž byl způsoben nepravidelný ohřev. Druhá nepřesnost by mohla být v tom, že nebyl sledován směr průchodu proudu tzn., že nemohu zaručit zda elektrický proud procházel ve směru pádu kuličky, či proti němu.

Na obr. 53 - 58 je vidět strmost viskozních křivek. Jelikož byla u všech těchto vzorků měřena viskozita při dvou teplotách, nejsou na těchto obrázcích křivky skutečného průběhu viskozity s teplotou.

8.1.3. Měření povrchového napětí

Toto bylo prováděno na stalagmometru a sice bez vlivu elektrického pole. Byl sledován čas, za který vykape stanovený objem. Tento čas považujeme za měřítko povrchového napětí. Výsledky jsou v následující tabulce:

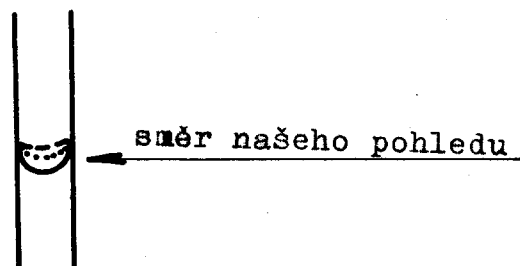
č. vzorku	t /min/
I	13'13,6''
II	11'05,5''
III	11'14,9''

Jelikož však toto měření nebylo považováno za důležité, nebyla mu věnována dostatečná péče tzn., že nebyla sledována přesně teplota kapaliny ani tlak, při kterém měření probíhalo, tedy byly opominuty faktory, které nejvíce ovlivňují povrchové napětí. Proto nelze z tohoto měření činit závěry.

U vzorků označených čárkou //, nelze hovořit o měření, ale pouze o pozorování. Byla totiž pozorována hladina mezi dvěma planparalelními sklíčky, které byly od sebe vzdáleny tak, aby mezi nimi došlo k vzlínání. Očekávalo se, že kapalina, při zavedení elektrického proudu do ní, se pohne, vystoupí výše nebo klesne. Výsledky jsou následující:

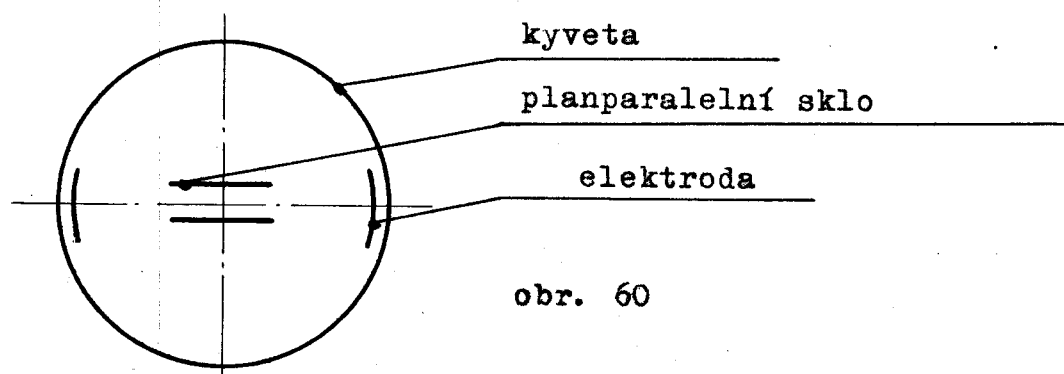
I'50	žádná změna
II'50	" "
III'50	" "
I'100	" "
II'100	" "
III'100	" "

Výsledky tedy nepotvrdily hypotézu, že elektrické pole ovlivňuje povrchové napětí. Zůstává však otázka, zda zvolená metoda byla správná. Hladina kapaliny byla pozorována ze předu, a nikoliv z boku. Tzn., že není jisté, jestli se měnil tvar povrchu hladiny /viz obr. 59/.



obr. 59

Dále je možné, že výsledky by byly jiné v případě, že by elektrody byly pootočený o 90° , podle obr. 60.



Stejných výsledků bylo dosaženo při kontrolním pozorování s vodou.

9. ZÁVĚR

Závěrem lze říci, že tato práce, jejíž cíl byl naznačen v úvodu, nevyřešila stanovenou problematiku, ale pokusil jsem se, alespoň z části, přispět k řešení některých problémů. Domnívám se, že po důkladném zhodnocení by bylo možno přijmout, nebo zavrhnout některé metody, použité v této práci, což samo o sobě už znamená určitý, i když malý, přínos.

V této práci jsem neprováděl měření vlivu elektrického pole na kavitační luminiscenci, neboť toto měření fotografickou cestou, nedává možnost dobrých výsledků a kromě toho k tomuto měření nebylo k dispozici ani potřebné zařízení.

LITERATURA

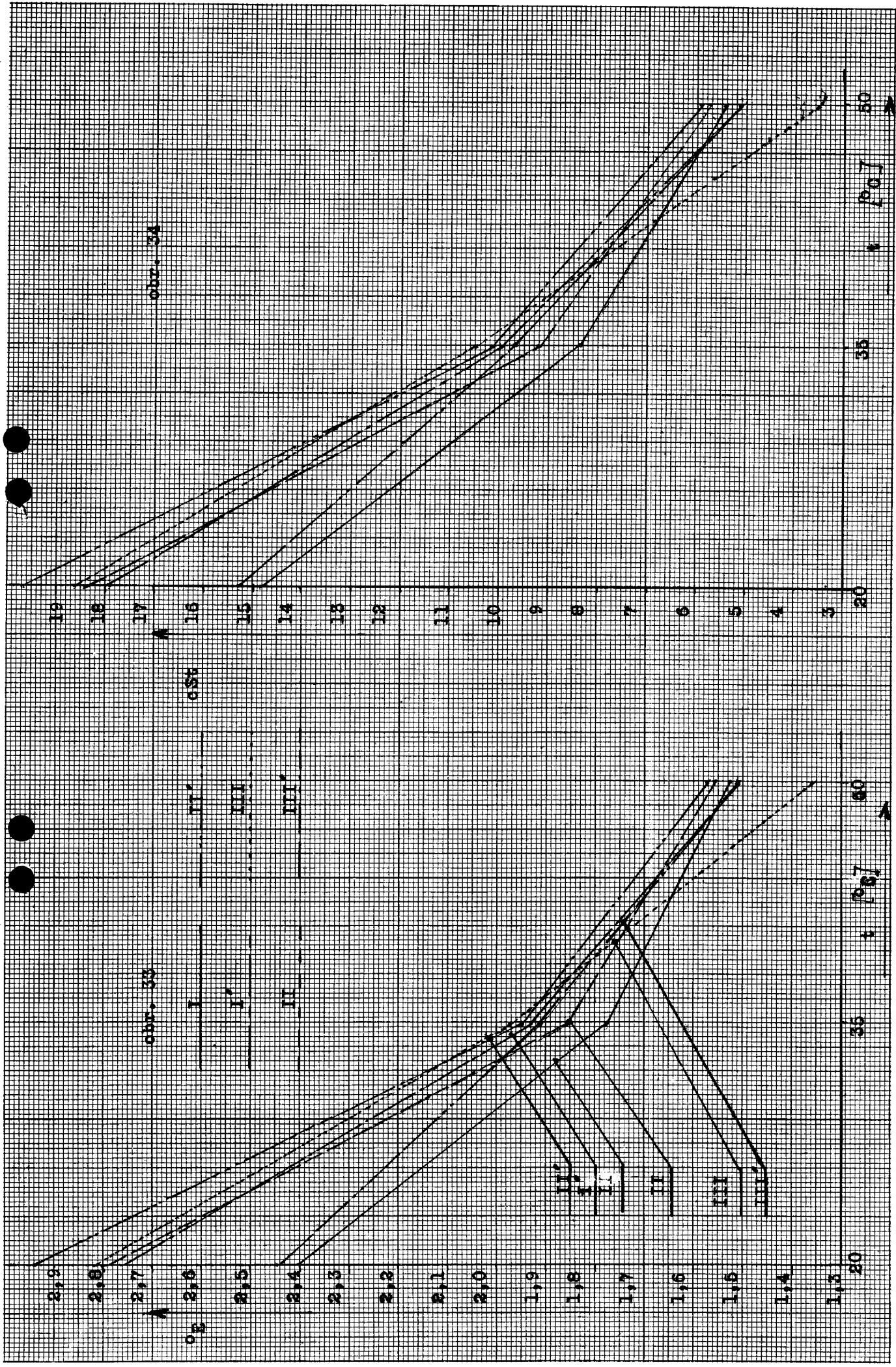
- 1 Maštovský, O.: Hydromechanika. SNTL/SVTL, Praha, 1964.
2. vyd.
- 2 Krouza, V.: Čerpadla odstředivá a jím příbuzná. NČSAV, Praha, 1956. 1. vyd.
- 3 Bogačev - Mine: Kavitační roztřívání železouhličkových slitin. Odd. TMI, n.p. Sigma Lutín, 1965.
- 4 Fetter, F.: Obecná elektrotechnika pro stroj. ing. SNTL/SVTL, Praha, 1967.
- 5 Koutný, A.: Výzkum odolnosti mat. proti kavitaci. Diplom. práce DP - ST 131/63. Liberec, VŠST, 1963.
- 6 Němeček, S.: Určování kov. odolnosti materiálu. I. díl. Disertační práce.
- 7 " : Rol elektrochemické koroze v kavitacionní erozi. Elektronická obrábění materiálů 1967, č.2, str. 13 - 24.
- 8 " : Vodní stroje lopatkové. Učební text VŠST, SNTL, P., 1959.
- 9 " : Vliv kavitace na vlastnosti vybraných olejů. Výzkumná zpráva pro n.p. ČKD Blansko a n.p. Autobrady Jablonec n. H. / 1968.
- 10 " : K otázce mechaniky kavitace. I. sborník prací VŠS v Liberci. SNTL, P., 1959.
- 11 Noskovič : Kavitační. Academia, P., 1969.
- 12 Holub, L.: Výzkum vlivu kavitace na elektrickou vodivost kapalin. Diplom. práce. VŠST Liberec, 1966.
- 13 Vysloužil, Z.: Meranie ve strojárstve. SNTL, Bratislava, 1962.

- 14 Teyssler - Kotyška: Technický slovník naučný.
Ilustrovaná encyklopedie věd tech.
Díl XIV. Borský a Šulc, P., 1938
- 15 Sielberrad, D.: Engineering, č. 28, 1912.
- 16 Ramsay, W.: " , č. 24, 1912.
- 17 Nowotny, H.: Werkstoffzerstörung durch Kavitation.
VDI - Verlag, Berlin, 1942.
- 18 Glikman, L.A.: Korroziionns - mehaničeskaja pročnost
metallov. mašgiz, Moskva 1955, str.
94 - 171.
- 19 Leith, W.C. + Thompson, A.L.: Some Corrosion Effects
in Accelerated Cavitation Damage. TASME,
ser. D, r. 82, 1960, č. 4, str. 795 - 807.
- 20 Technický naučný slovník. SNTL, P., 1964.
- 21 Archangelskij, Segějeva: The role of Ultrasonic Cavita-
tion in Reducing the Viscosity of
Hydraulic Liquids. Soviet Physics -
Acoustics, 10, 1, 86 - 87, July - Sept.
1964.

Č. vz.		t °C					
		20			50		
		/sek/	cSt	°E	/sek/	cSt	°E
A	a	180,9	16,61	2,50	62,3	5,89	1,47
	b	196,0	18,01	2,65	64,53	6,09	1,49
B ₁	a	196,2	18,05	2,66	74,1	7,00	1,56
	b	180,1	16,56	2,495	66,7	6,30	1,504
B ₂	a	192,5	17,69	2,62	69,5	6,56	1,526
	b	188,5	17,33	2,58	70,3	6,63	1,53
B ₃	a	175,4	16,15	2,45	69,9	6,60	1,529
	b	174,4	16,06	2,44	73,5	6,94	1,557
B ₄	a	193,6	17,79	2,63	62,0	5,84	1,467
	b	188,8	17,36	2,58	64,4	6,07	1,485
B ₅	a	204,5	18,79	2,74	64,6	6,10	1,489
	b	196,4	18,06	2,66	65,6	6,18	1,494
B ₆	a	195,3	17,96	2,65	60,7	5,72	1,457
	b	189,6	17,43	2,59	64,1	6,05	1,484
C ₁	a	177,0	16,26	2,46	58,1	5,48	1,44
	b	173,0	15,90	2,42	60,0	5,66	1,45
C ₂	a	175,2	16,11	2,445	58,7	5,53	1,44
	b	172,6	15,96	2,43	59,3	5,61	1,448
C ₃	a	174,9	16,16	2,45	54,9	5,19	1,415
	b	166,7	15,33	2,36	56,7	5,35	1,428
C ₄	a	179,4	16,51	2,49	60,2	5,68	1,455
	b	174,0	15,99	2,43	63,0	5,94	1,475
C ₅	a	190,9	17,52	2,60	53,9	5,09	1,407
	b	182,9	16,79	2,52	55,6	5,24	1,420
C ₆	a	178,8	16,42	2,48	58,4	5,51	1,44
	b	176,3	16,23	2,46	60,4	5,70	1,456

Č. vz.		/sek/	°E	E stř	Č. vz.		/sek/	°E	E stř
A	a	117,7	1,03	1,985	C ₁	a	118,9	1,02	1,95
	b	131,47	1,16	2,07		b	113,0	0,97	1,935
B ₁	a	122,1	1,10	2,11	C ₂	a	116,5	1,005	1,9425
	b	113,4	0,992	1,999		b	113,3	0,982	1,939
B ₂	a	123,0	1,094	2,073	C ₃	a	120,0	1,035	1,9325
	b	118,2	1,05	2,055		b	110,0	0,932	1,894
B ₃	a	105,5	0,921	1,989	C ₄	a	119,2	1,035	1,9725
	b	100,9	0,883	1,998		b	111,0	0,955	1,9525
B ₄	a	131,6	1,163	2,048	C ₅	a	137,0	1,193	2,003
	b	124,4	1,095	2,0325		b	127,3	1,100	1,970
B ₅	a	204,5	18,79	2,74	C ₆	a	120,4	1,040	1,96
	b	130,8	1,166	2,077		b	115,9	1,004	1,958
B ₆	a	134,6	1,193	2,0535					
	b	125,5	1,106	2,037					

t °C	I	I'	$\frac{^{\circ}\text{E}}{\text{cSt}}/$ II	II'	III	III'
20	2,3 /14,8/	2,64 /17,9/	2,71 /18,5/	2,84 /19,7/	2,72 /18,58/	2,35 /15,25/
35	1,68 /8,29/	1,825 /9,88/	1,755 /9,1/	1,84 /10,04/	1,87 /10,37/	1,81 /9,61/
50	1,43 /5,375/	1,41 /5,125/	1,455 /5,69/	1,47 /5,875/	1,26 /3,46/	1,41 /5,125/



2.5
2.6
2.7
2.8
A
obs.

31

obs. 35

32

2.5
2.6
2.7
2.8
A
obs.

33

obs. 36

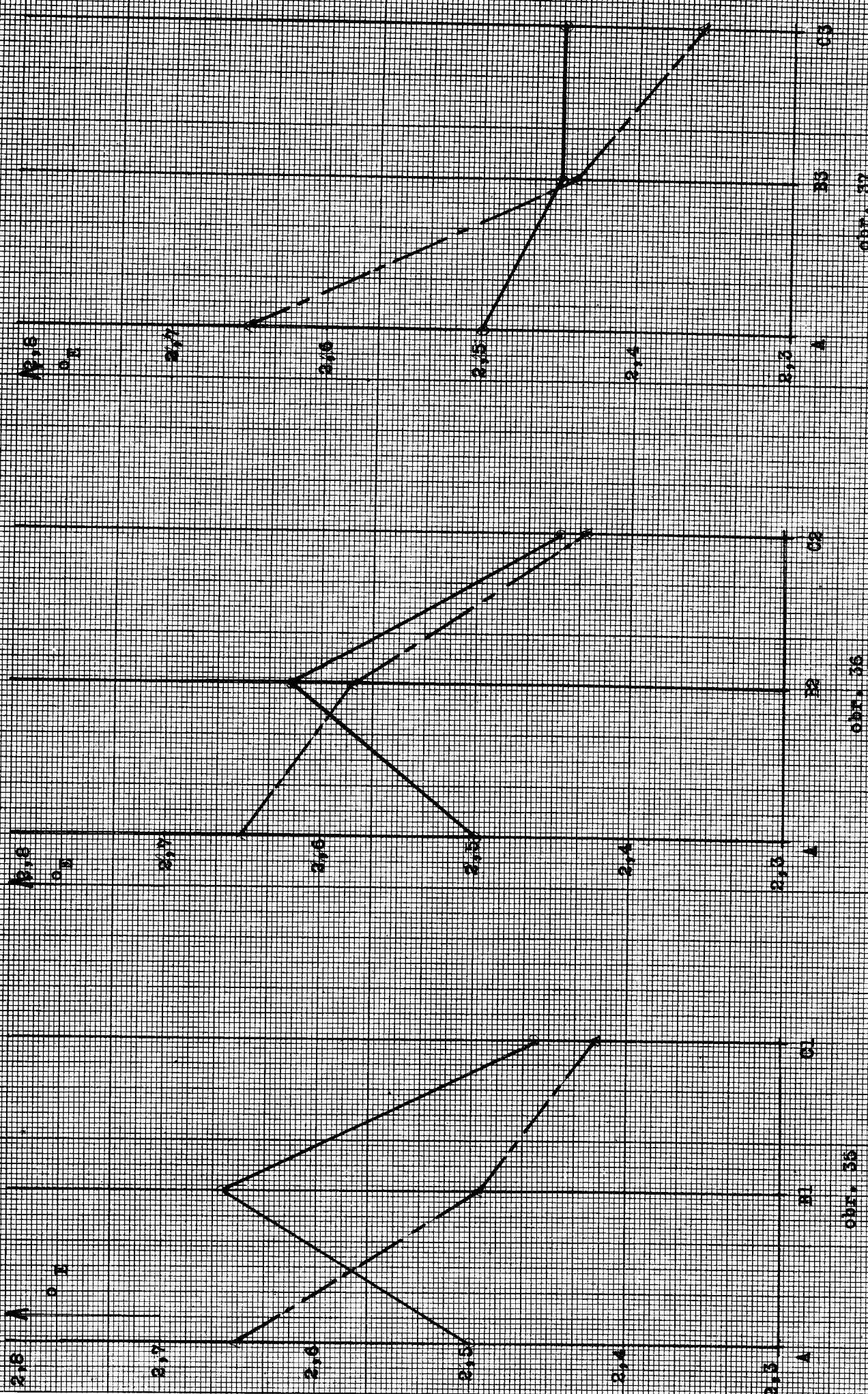
34

2.5
2.6
2.7
2.8
A
obs.

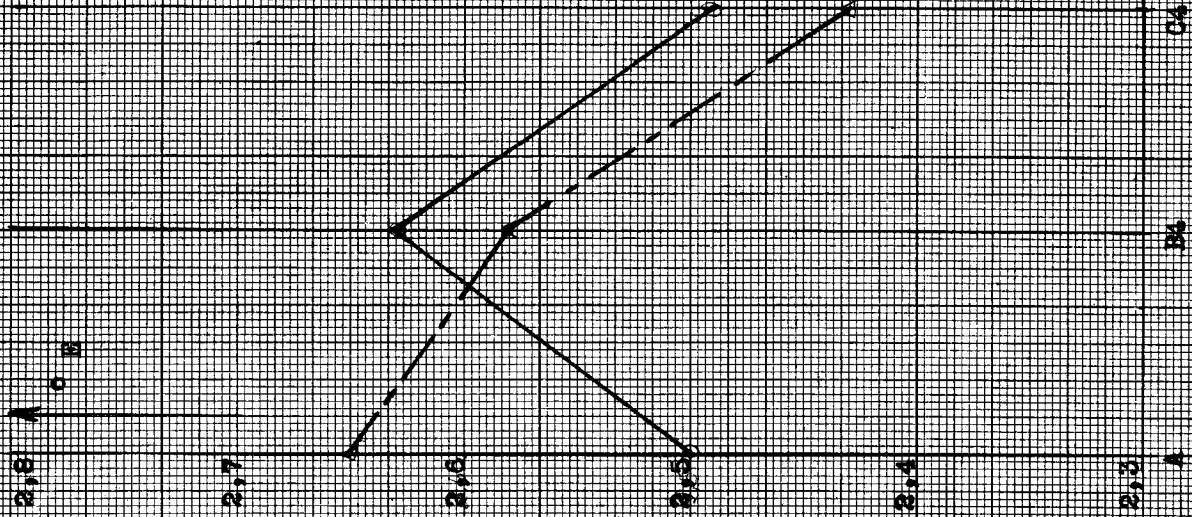
35

obs. 37

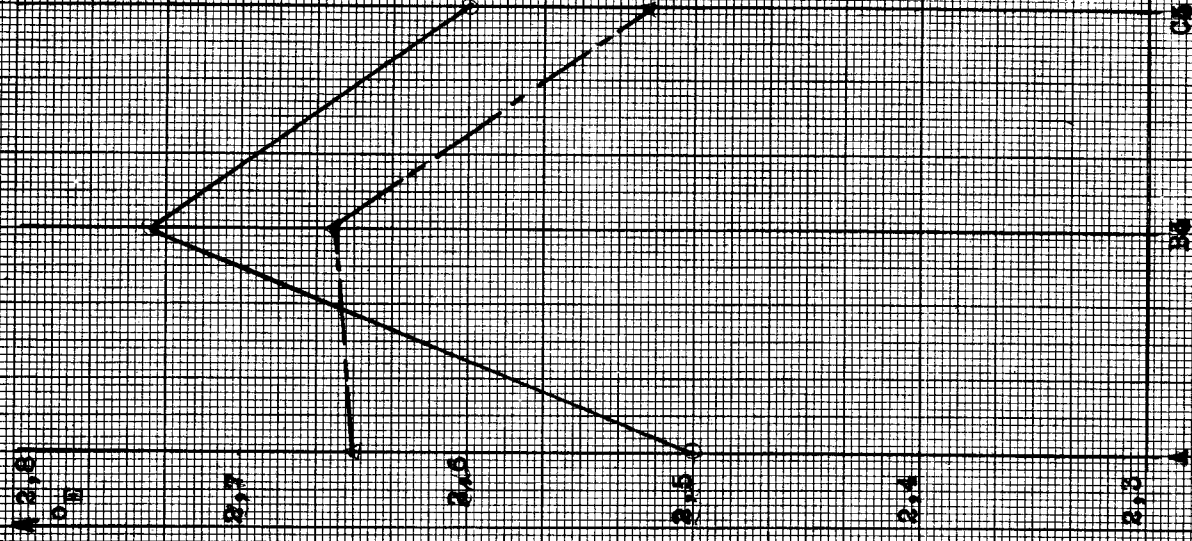
36



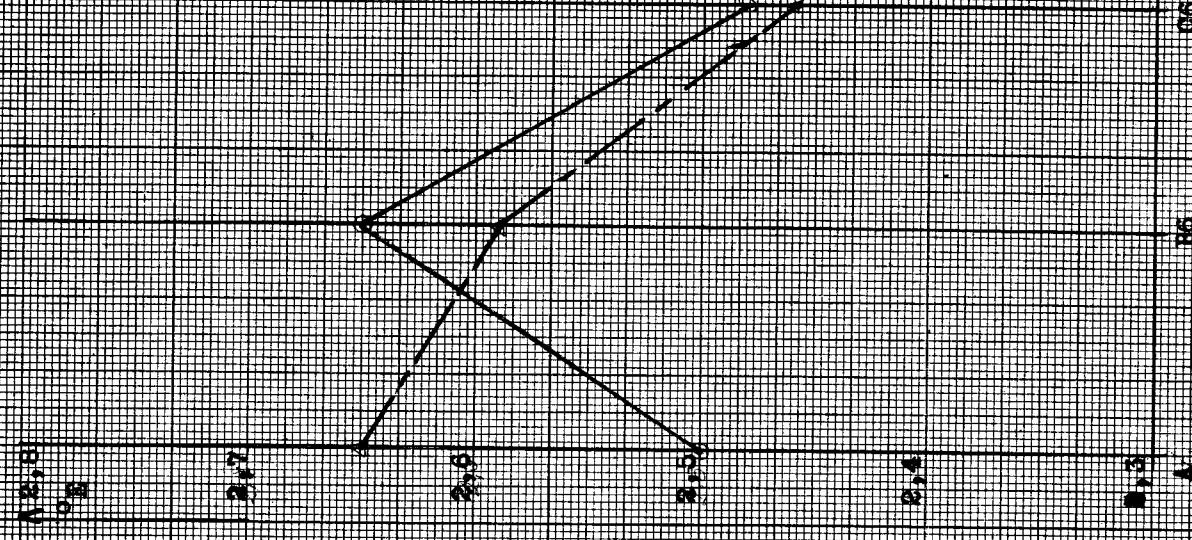
2.8
2.7
2.6
2.5
2.4
2.3
A

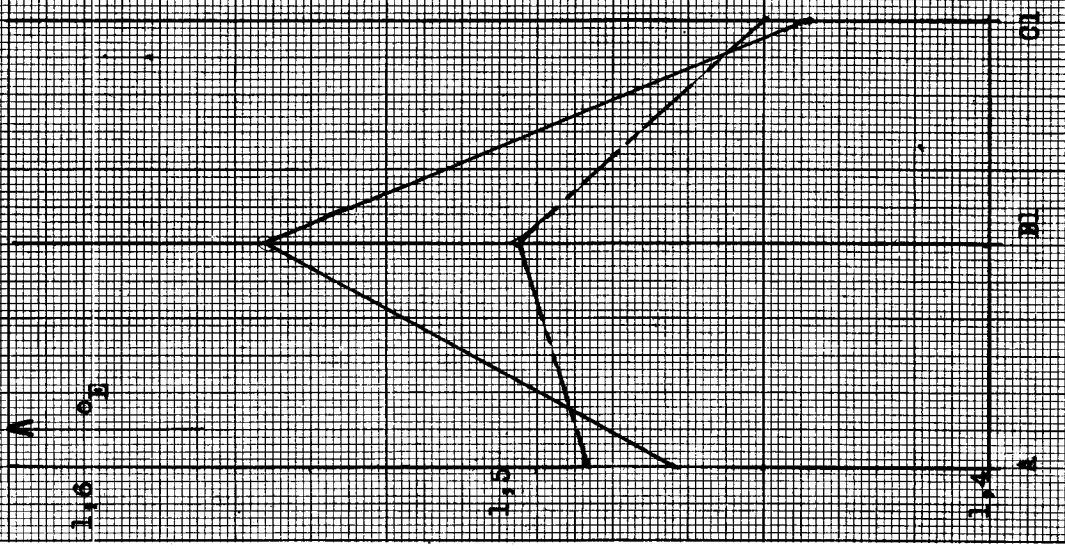
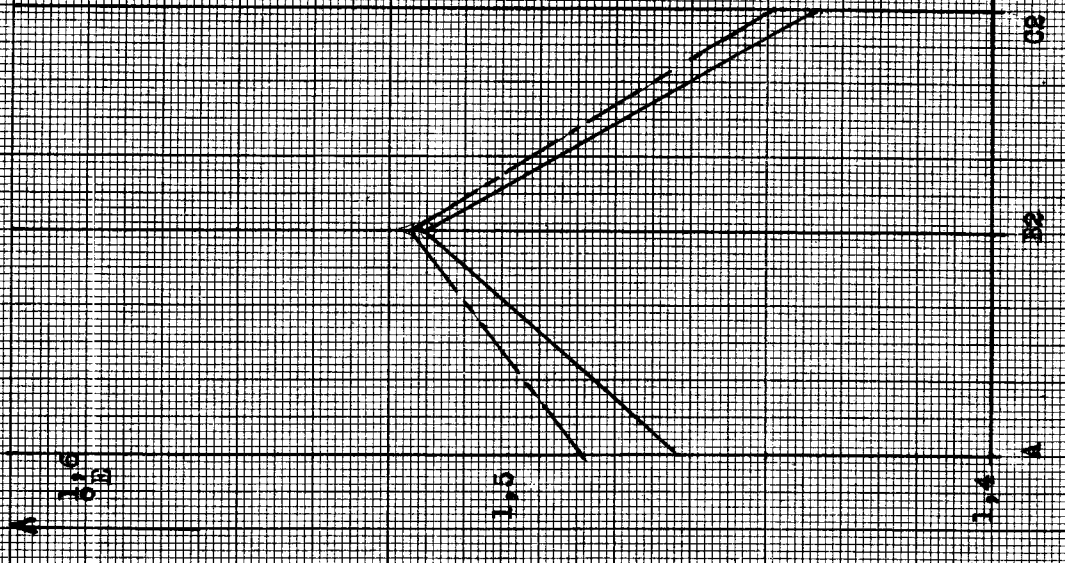
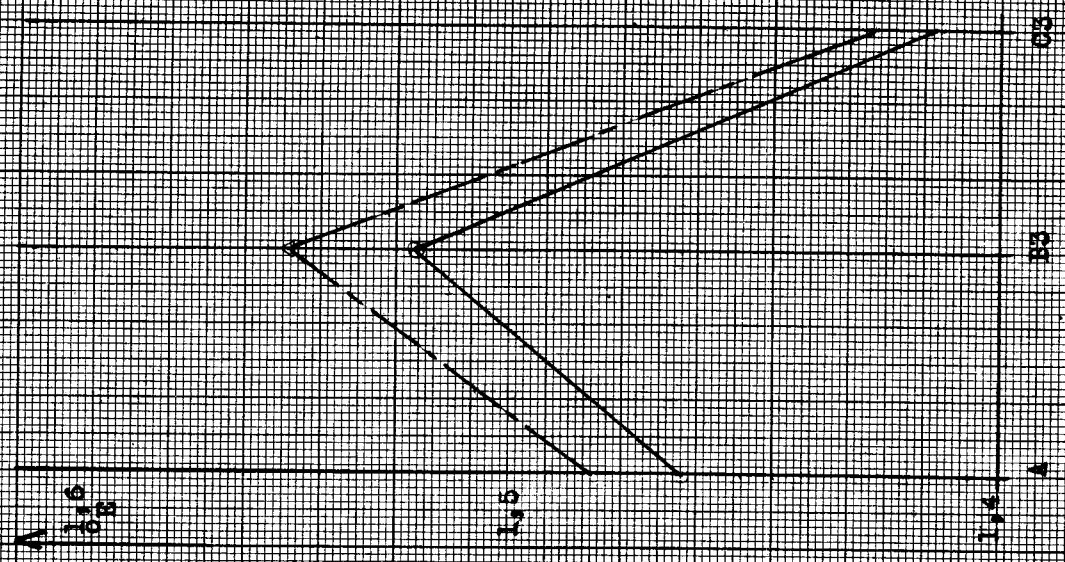


2.8
2.7
2.6
2.5
2.4
2.3
A



2.8
2.7
2.6
2.5
2.4
2.3
A





A
B

1.5
1.4

1.4
A

86

86

obr. 46

A
B

1.5
1.4

1.4
A

86

86

obr. 45

A
B

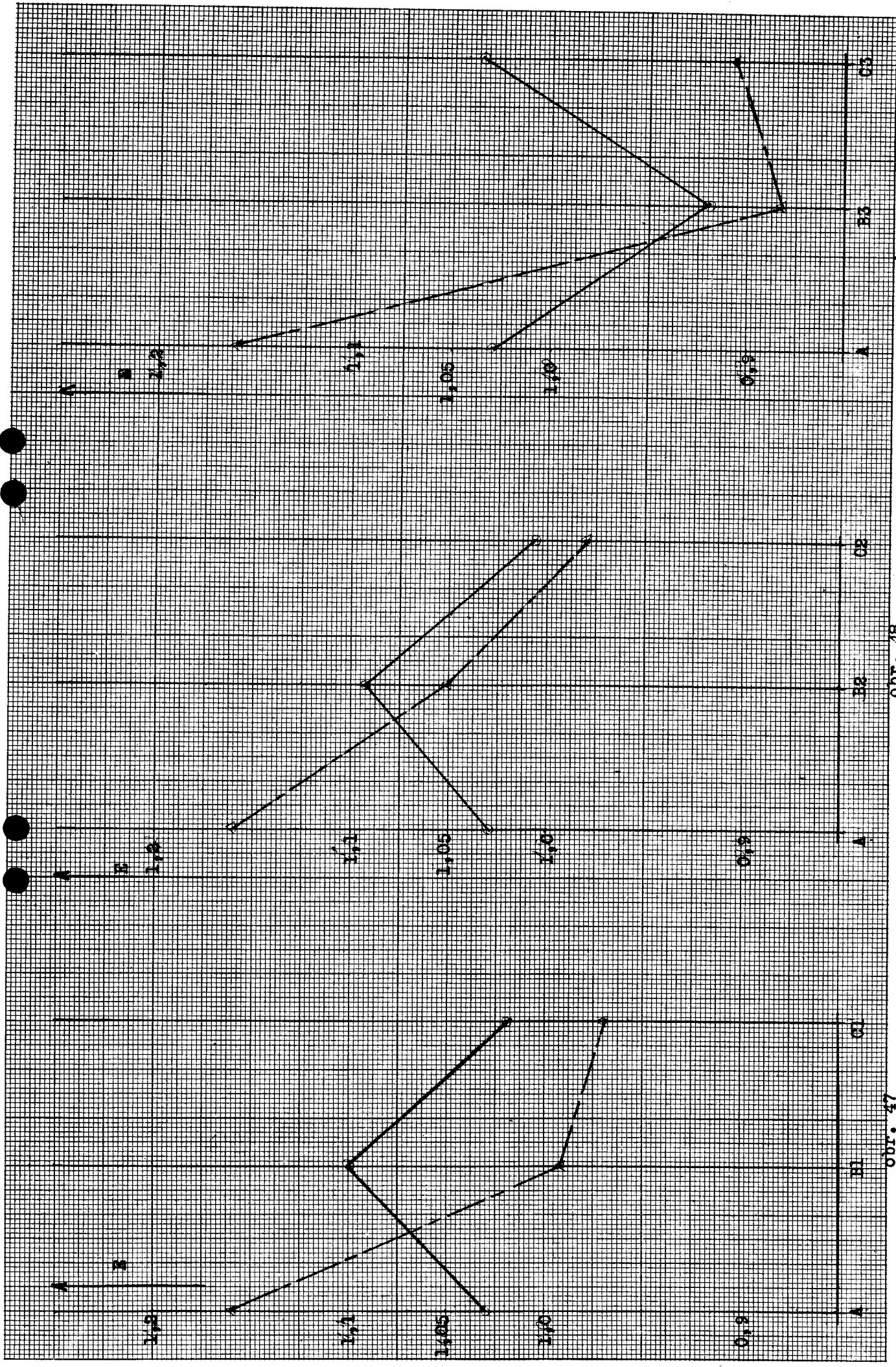
1.5
1.4

1.4
A

84

84

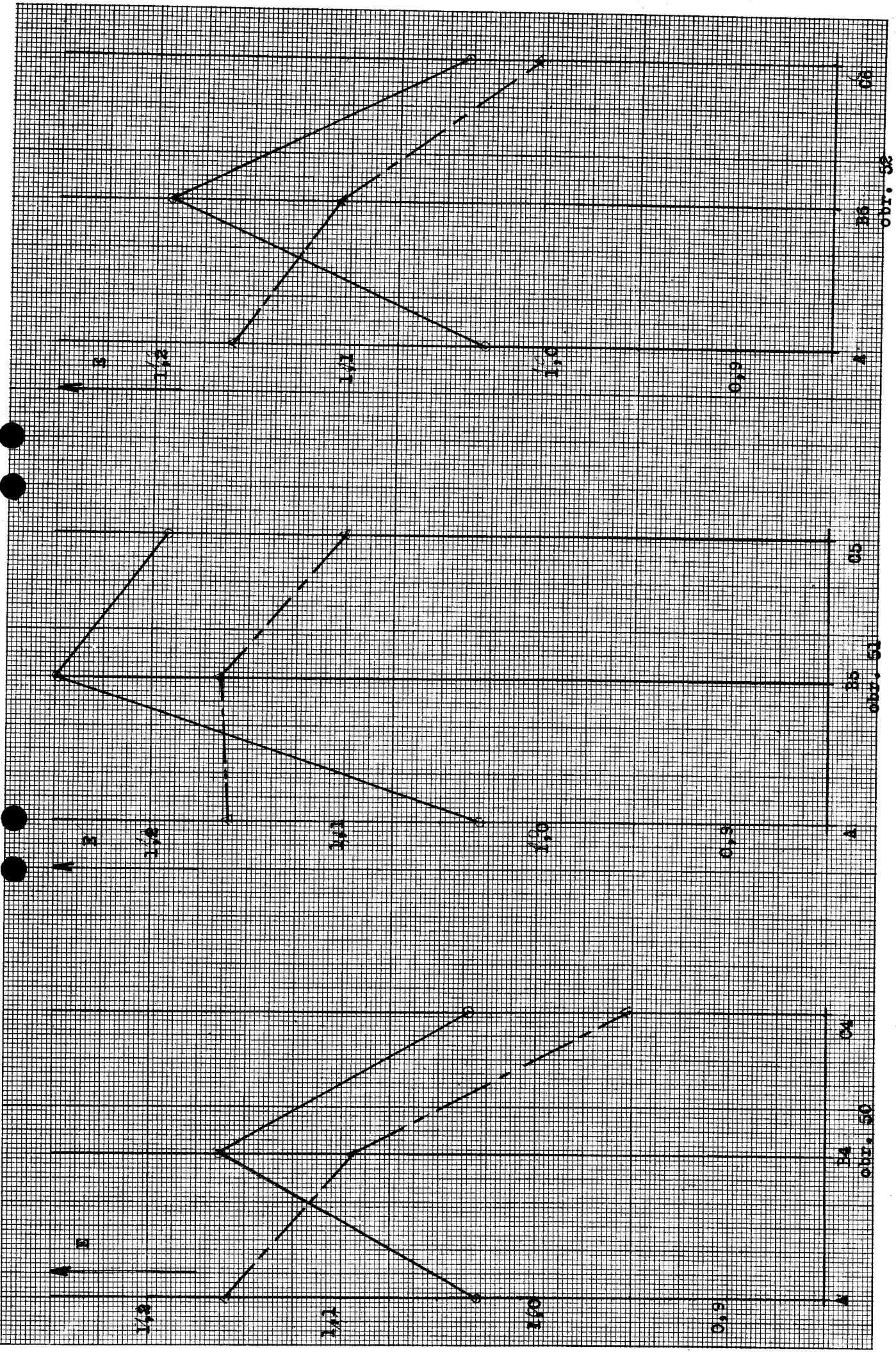
obr. 44

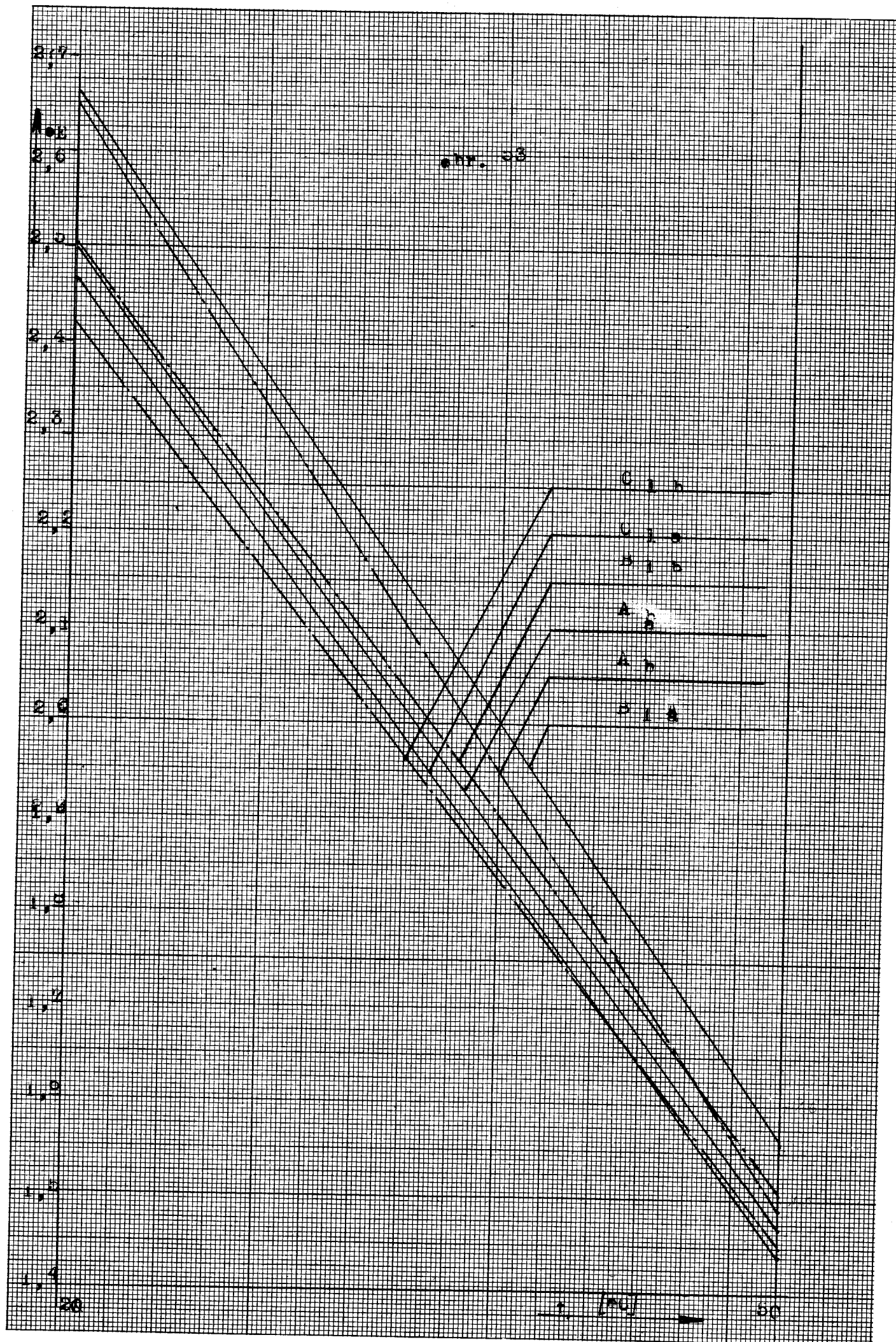


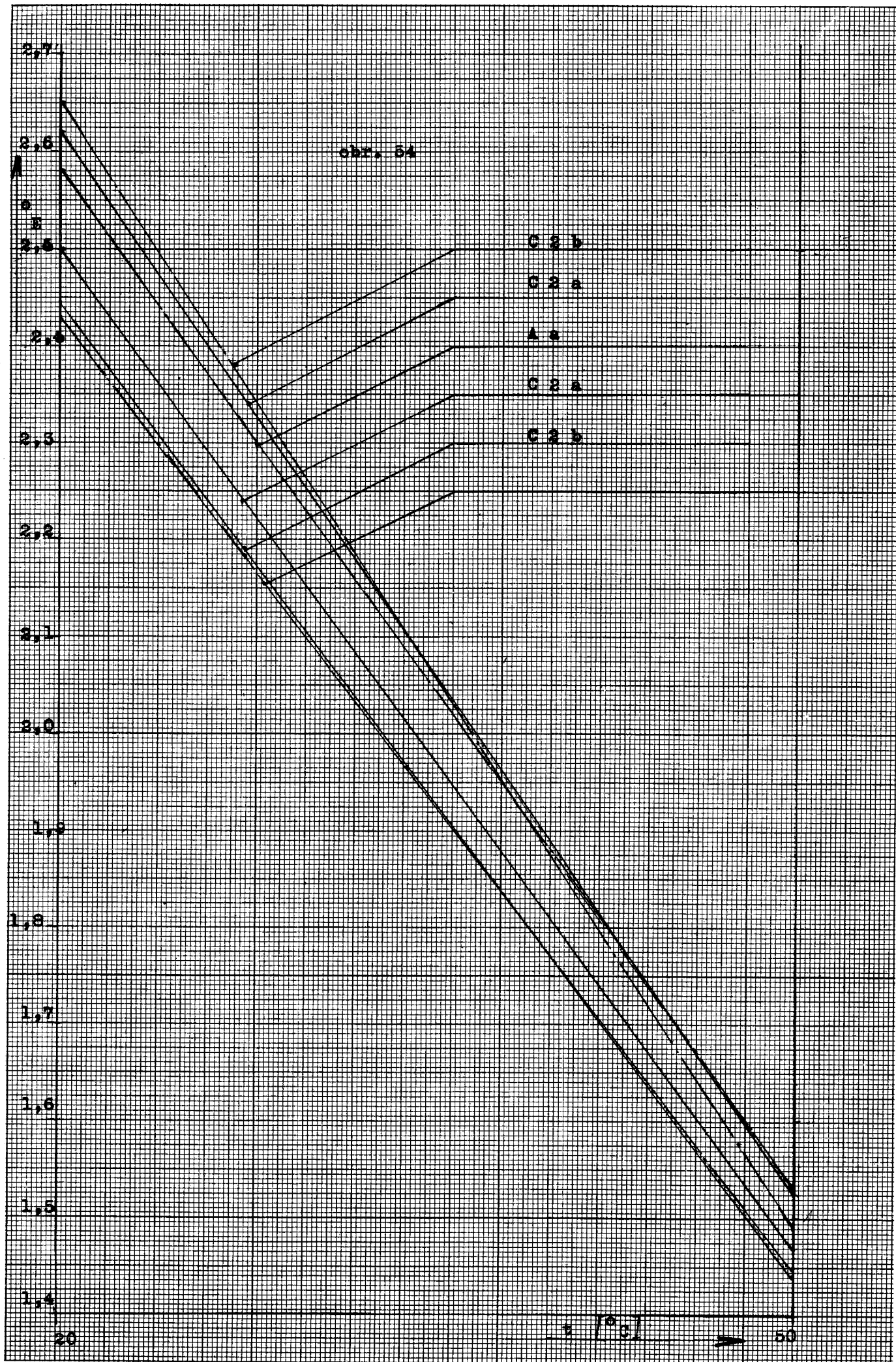
Obr. 49

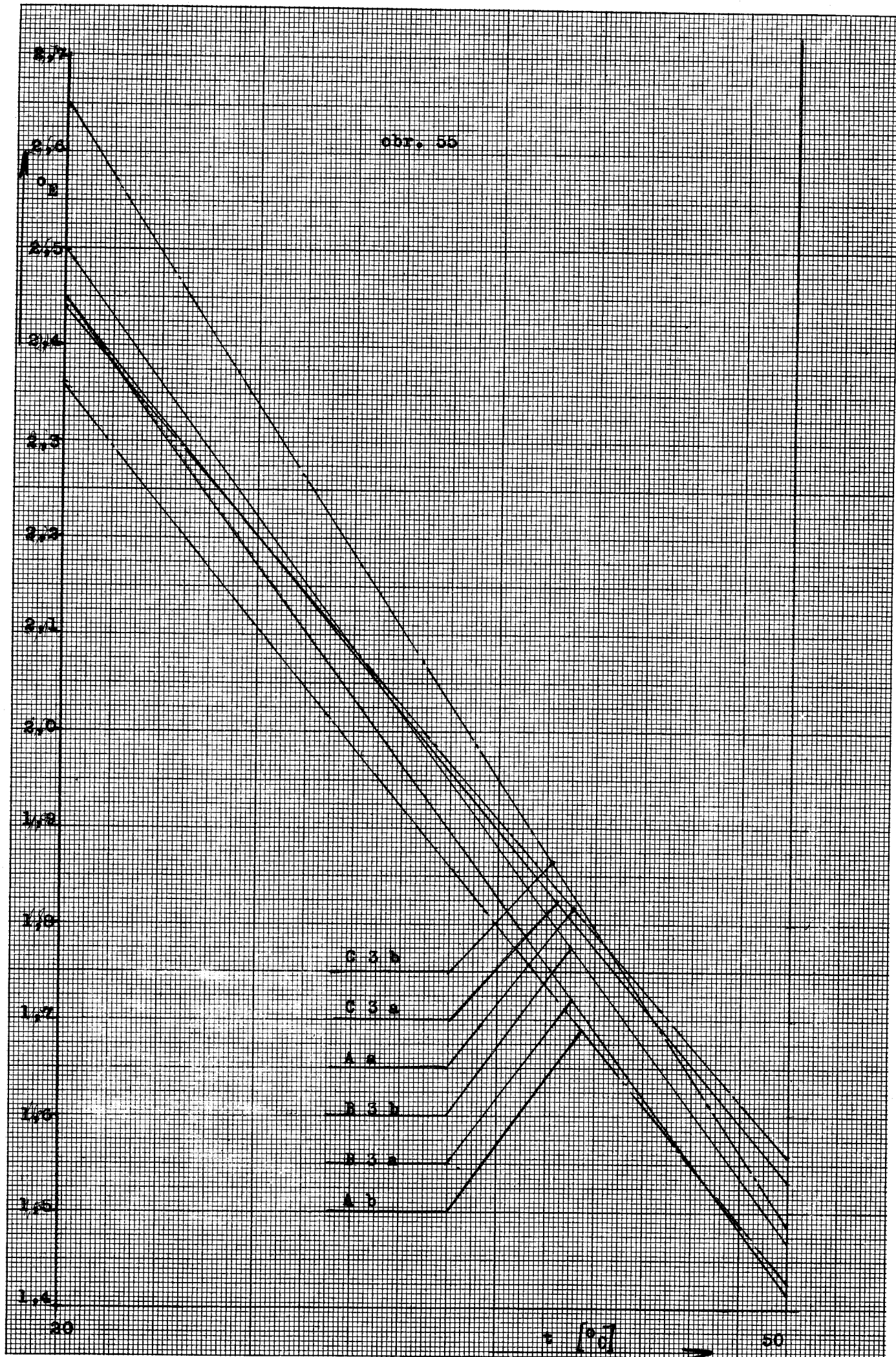
Obr. 48

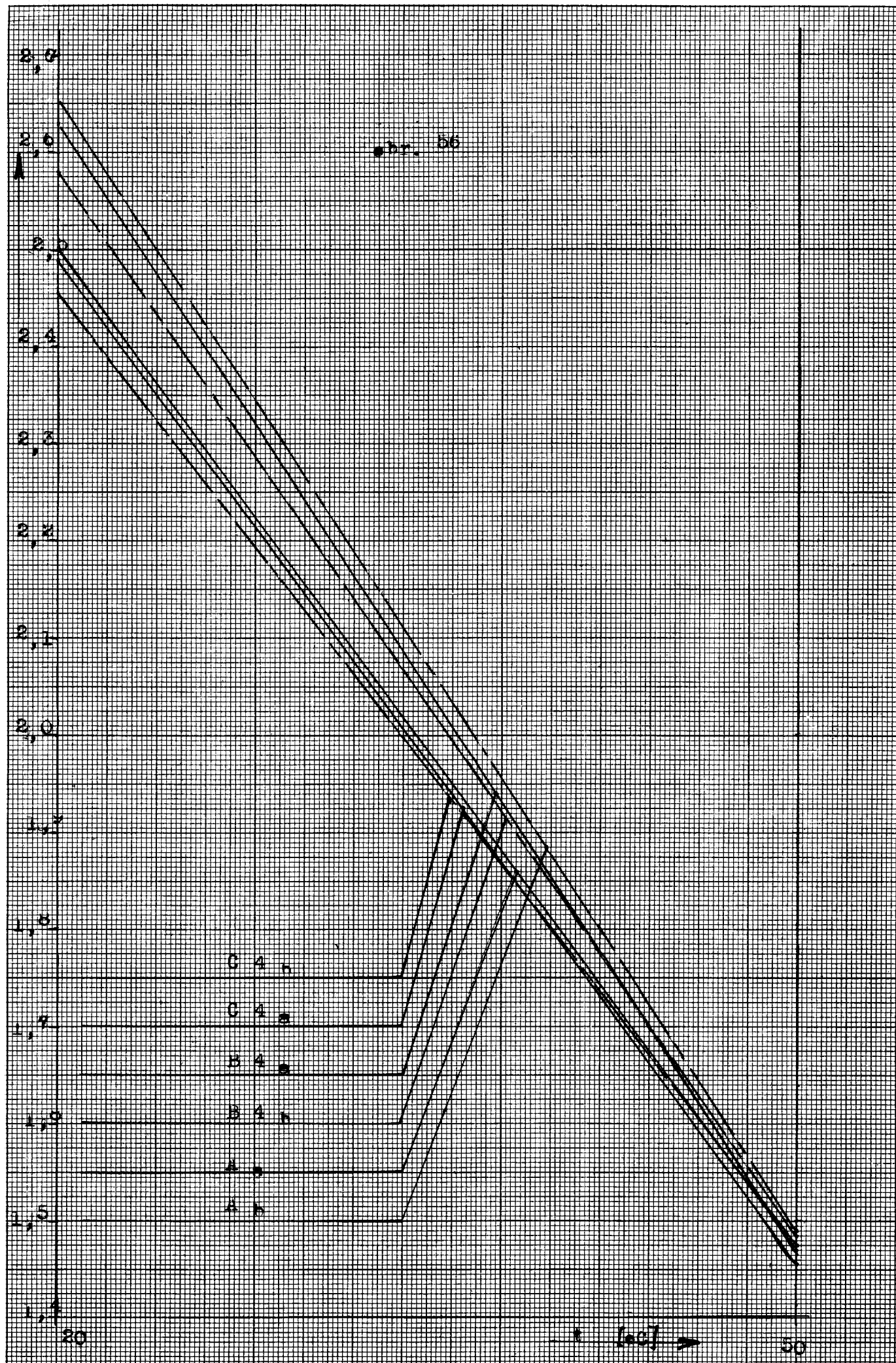
Obr. 47

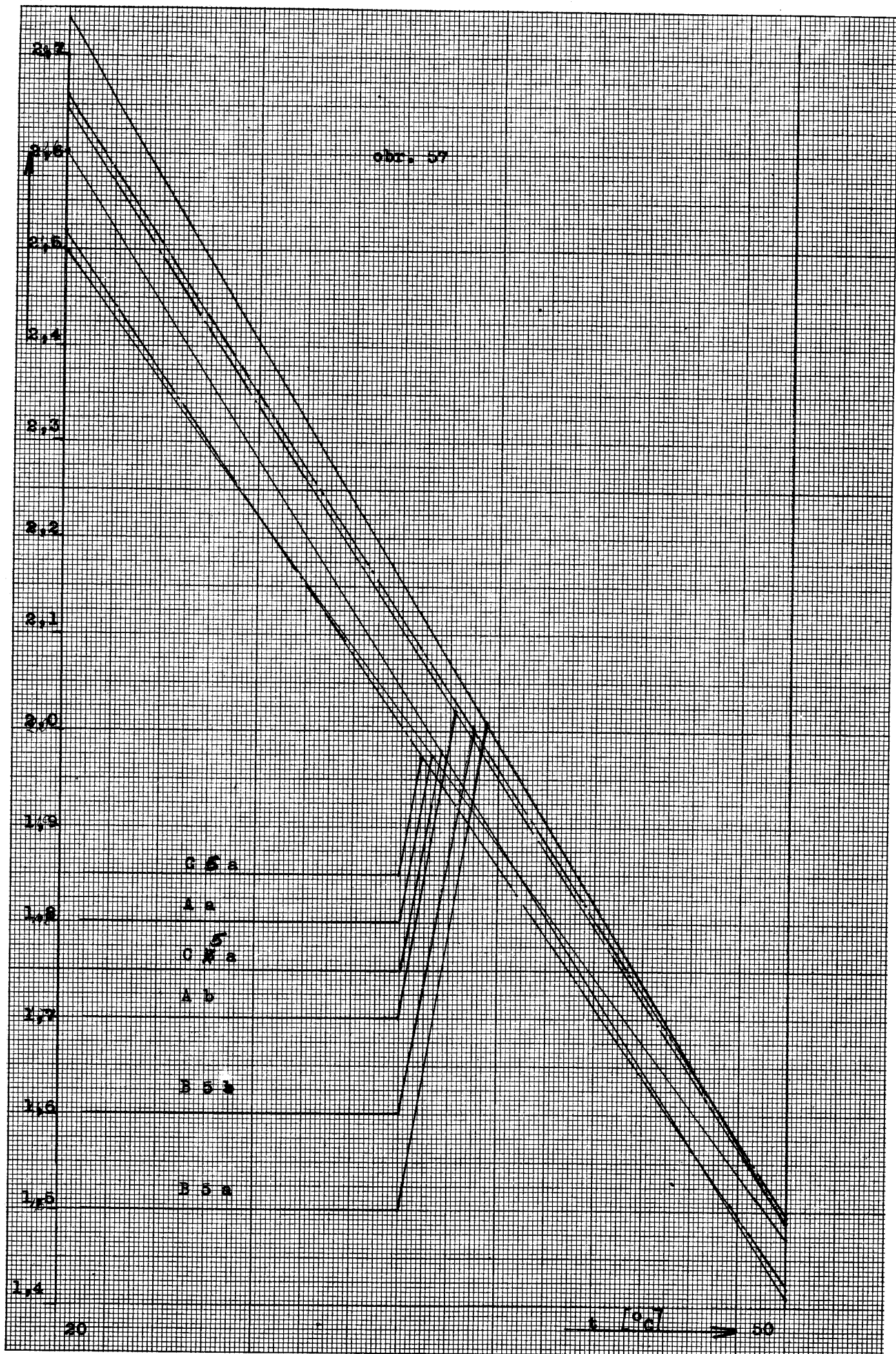




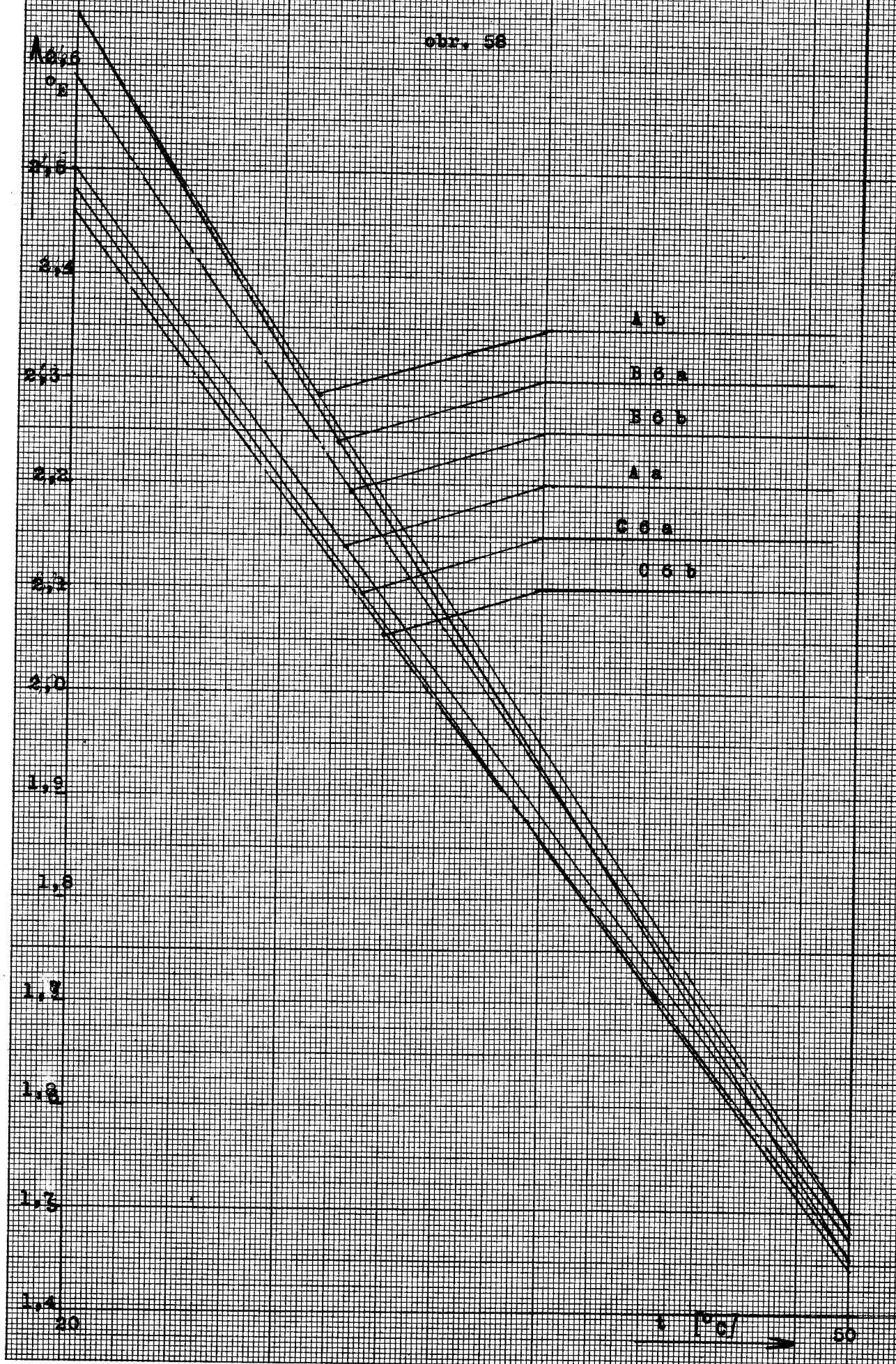


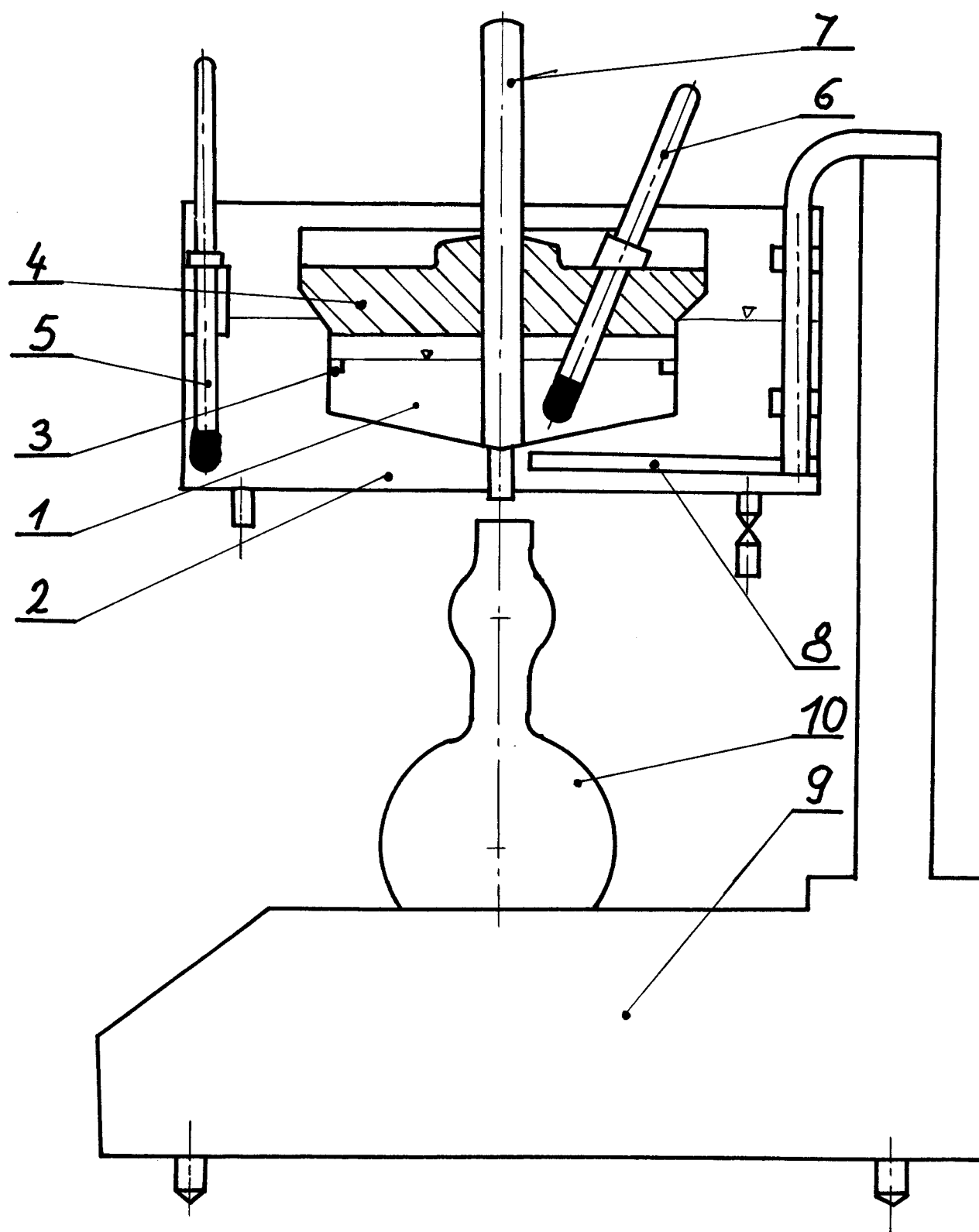




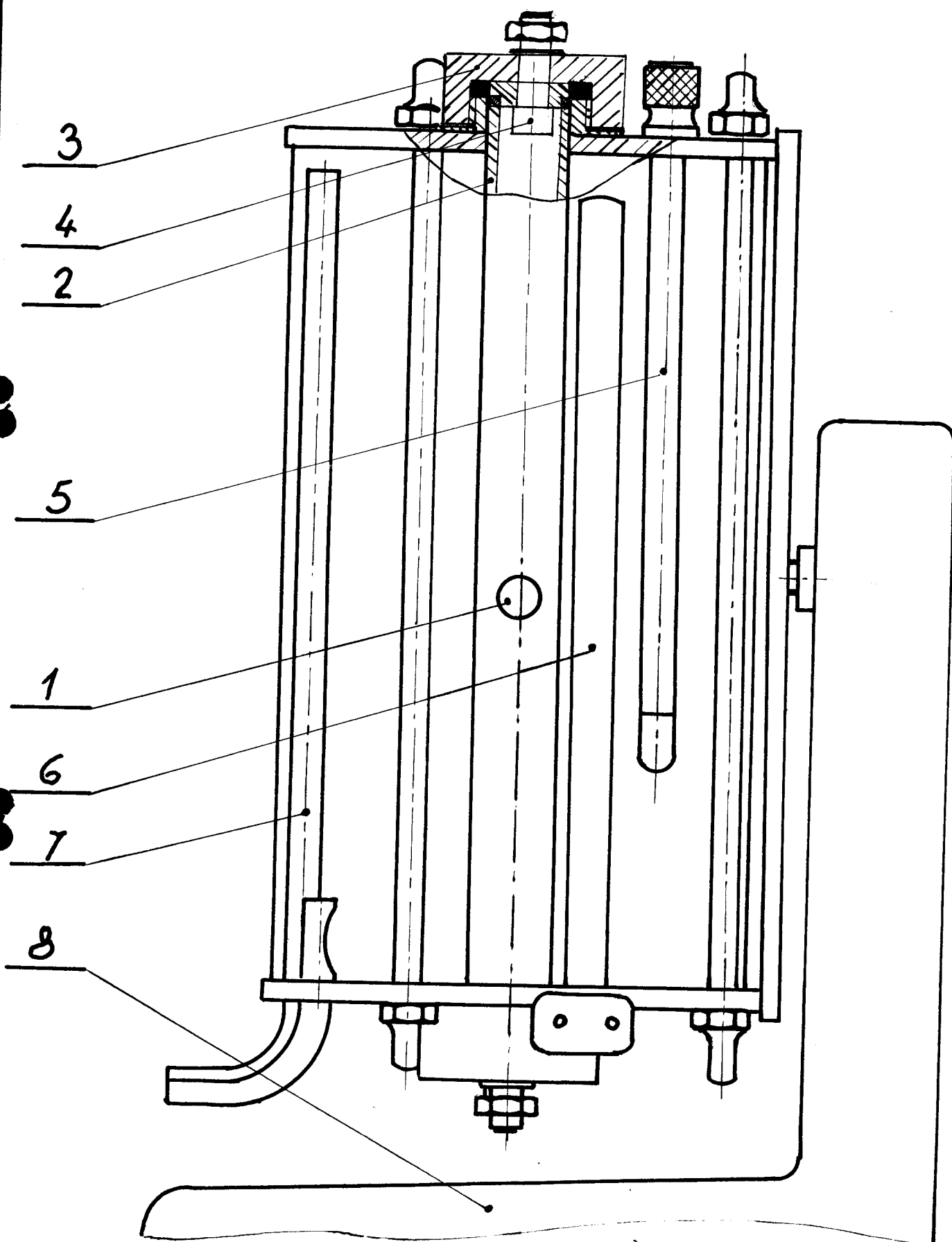


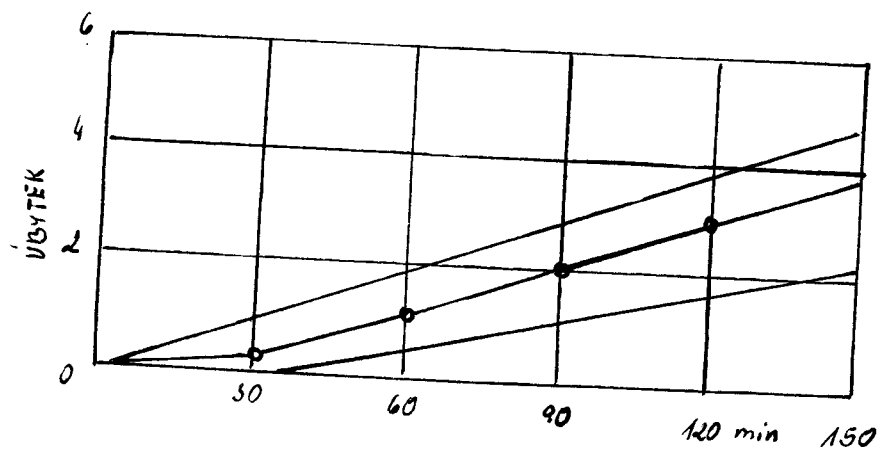
obr. 58



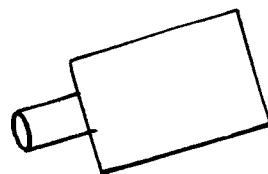
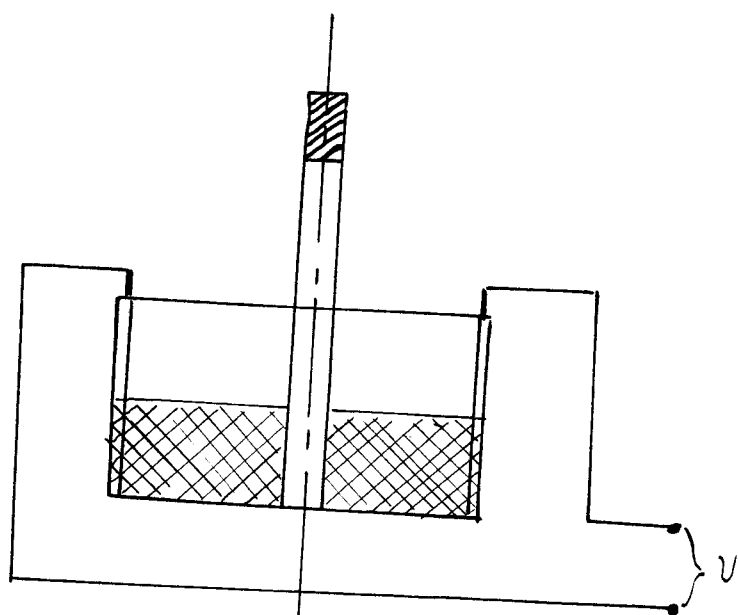


obr. 20

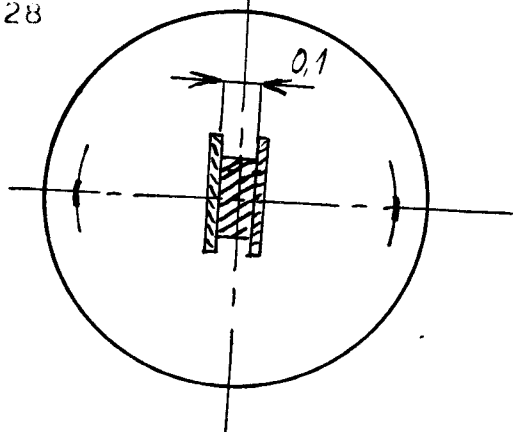


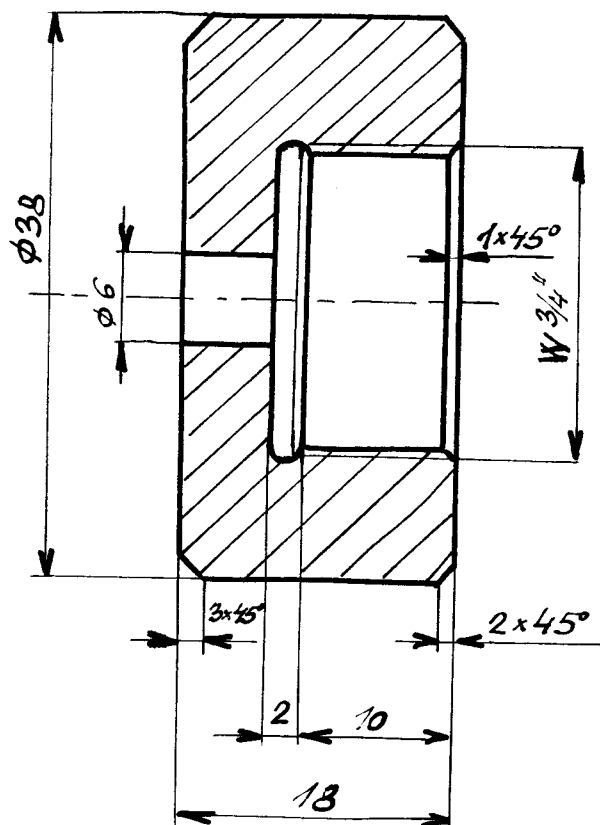


obr. 5

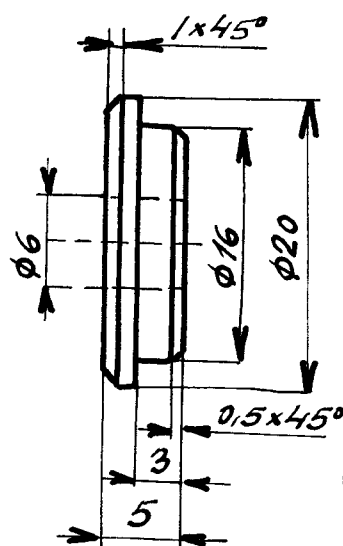


obr. 28

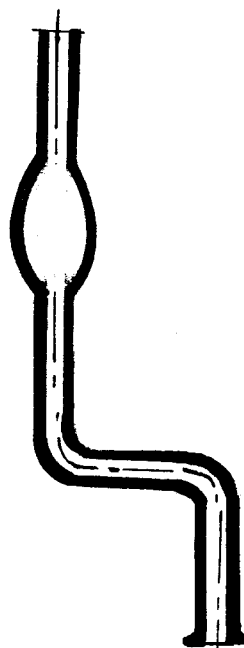




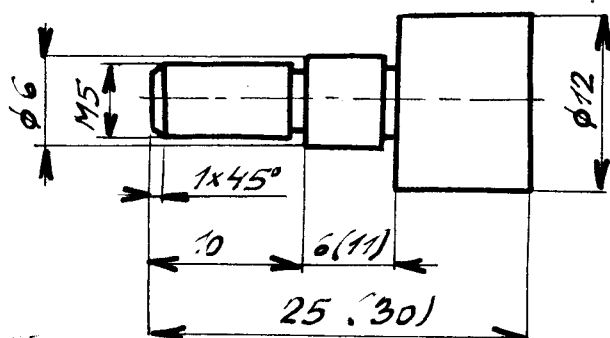
obr. 24



obr. 26



obr. 27



obr. 25