

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka řádu práce
fakulta strojní

obor 23-20-8

zaměření:

Stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu

katedra obrábění a montáže

EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠŤOVÁNÍ VLASTNOSTÍ HADICOVÉHO VEDENÍ

Pavel Veselovský

vedoucí práce: Ing. J. Cerha

VŠST katedra obrábění
a montáže

konzultant: Ing. Dao Quang Ngien

VŠST Liberec

Ing. Jiří Burian

VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	68
Počet tabulek	1
Počet obrázků a grafů	28

DT: 531.732

Datum: 31. 5. 1982

Vysoká škola: strojní a textilní
v Liberci

Fakulta: strojní

Katedra: obránění a montáže

Školní rok: 1981/82

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Pavla Veselovského

obor 23-20-8 stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorozních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Experimentální zjišťování vlastností hadicového
vedení

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor vlastností hadic
2. Rozbor možností stávajících metod měření
délekových a objemových změn hadic v závislosti na tlaku
3. Návrh vhodné měřicí metody a formy zpracování výsledků
4. Praktické ověření

Autorské právo se neliší směrnicemi
MŠK pro státní záv. zkoušky č.j. 31
727/62-III/2 ze dne 13. července
1962-Věstník MŠK XVIII, část 24 ze
dne 31. 8. 1962 č. 115/53 Sb.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

V 71 / 82 S

Rozsah grafických prací: 2 výkresy a graf.zpracování výsledků
Rozsah průvodní zprávy: 35 - 40 stran textu
Seznam odborné literatury: Ernest,V,: Experimentální zjišťování objemových
změn hadicového vedení. DP VSST 1981. SF

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Cerha

Konzultant DP: Ing.Dao Quang Ngien - VŠST Liberec
Ing. Jiří Burian - VŠST Liberec

Datum zadání diplomové práce: 15.10.1981 - konečné zadání

Termín odevzdání diplomové práce: 4.6.1982




Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.
Vedoucí katedry


Doc. RNDr. Bohuslav Stráž, CSc.
Děkan

Liberci 15.10. 81
v dne 10

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, dne 31. května 1982

Pavla Veselovský

O B S A H

=====

str.

	Použité symboly	6
1.	Úvod	8
2.	TEORETICKÝ ROZBOR VLASTNOSTÍ HADICOVÉHO VEDENÍ	10
2.1.	Konstrukce hadice	10
2.1.1.	Duše hadice	11
2.1.2.	Tlaková vložka	11
2.1.3.	Obal	12
2.2.	Teoretická část	12
2.2.1.	Sdružený modul pružnosti	14
2.2.2.	Celková hydraulická kapacita systému	17
3.	ROZBOR MOŽNOSTÍ STÁVAJÍCÍCH METOD MĚŘENÍ DÉLKOVÝCH A OBJEMOVÝCH ZMĚN HADIC V ZÁVISLOSTI NA TLAKU	19
3.1.	Zkouška objemové deformace pryžových hadic dle ČSN 635305	19
3.2.	Měření hadic v ZTS n.p. Dubnica nad Váhom	21
3.2.1.	Modul pružnosti pryžové hadice	21
3.2.2.	Obvod pro měření statických parametrů	21
3.2.3.	Výsledky měření	22
3.3.	Zhodnocení metod	23
4.	MĚŘENÍ OBJEMOVÝCH A DÉLKOVÝCH ZMĚN NA KOM VŠST LIBEREC	25
4.1.	Zjišťování objemové změny náhradou závislosti exponenciální závislosti	25
4.1.1.	Princip měření	26
4.1.2.	Zhodnocení měření	28
4.2.	Rozbor chyb metodiky vyšetřování objemových změn hadicového vedení	28

4.3.	Zjišťování objemových změn hadicového vedení souvislým měřením	32
4.3.1.	Princip měření	33
4.4.	Zjišťování deformace hadic proměřením geometrických parametrů	34
4.4.1.	Deformace hadicového vedení	36
4.4.1.1.	Shrnutí a závěr výpočtu	38
4.4.2.	Výpočet objemových změn v závislosti na změně délky a vnějšího průměru hadice	38
4.4.2.1.	Snímání změny vnějšího průměru a délky hadice	39
4.4.2.2.	Výpočet změny geometrického objemu hadice	40
5.	PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ A NÁVRH VHODNÉ MĚŘÍCÍ METODY	42
5.1.	Zjišťování objemových změn přímým měřením	42
5.1.1.	Měření hadice a kapalina	44
5.1.2.	Vlastní měření	45
5.2.	Zjišťování objemových změn proměřením geometrických parametrů vedení	54
6.	ZÁVĚR	62
	Použitá literatura	68

POUŽITÉ SYMBOLY

α	- úhel opletu	
α_n	- neutrální úhel opletu	[°]
d	- vnitřní průměr hydraul. vedení (hadice)	[m]
D	- vnější průměr hydraul. vedení (hadice)	[m]
ΔD	- změna vnějšího průměru hadice	[m]
$\bar{D}$	- poměrná změna vnějšího průměru	[1]
β	- úhel mezi směrem vinutí šroubovice a směrem kolmým k ose hadice	[°]
β_k	- izotermický objemový součinitel stlačitelnosti kapaliny	[m ² .N ⁻¹]
c_h	- celková hydraulická kapacita vedení	[m ⁵ .N]
c_k	- hydraulická kapacita kapaliny	[m ⁵ .N]
c_s	- hydraulická kapacita stěny vedení	[m ⁵ .N]
E_T	- modul pružnosti trubky	[MPa]
E	- modul pružnosti materiálu	[MPa]
E_H	- modul pružnosti hadice	[MPa]
E_{HS}	- statický (izotermický) modul pružnosti hadicového vedení	[MPa]
ϵ	- relativní chyba určování poměrné objemové změny hadicového vedení	[1]
ϵ_d	- poměrná deformace průměru	[1]
ϵ_l	- poměrná deformace délky	[1]
K_k	- objemový izotermický modul pružnosti kapaliny	[MPa]
K_s	- sdružený modul pružnosti hydraulického vedení	[MPa]
K_{SH}	- sdružený modul pružnosti hadicového vedení	[MPa]
$\bar{K}_k$	- izotermický objemový modul pružnosti směsi	[MPa]
K_T	- převodní konstanta tlakového snímače	[MPa.mV ⁻¹]
l_0	- původní délka hadice	[m]
Δl	- zkrácení hadice	[m]

$\bar{I}^+$	- poměrné zkrácení hadice	[1]
L	- délka vlákna odpovídající stoupání šroubovice	[m]
Δp	- působící přetlak ve vedení	[MPa]
r	- vnitřní poloměr trubky	[m]
Δr	- změna vnitřního poloměru	[m]
φ_m	- střední kvadratická chyba	[1]
s	- tloušťka stěny hydraulického vedení	[m]
σ_r	- radiální složka napětí	[MPa]
σ_a	- axiální složka napětí	[MPa]
σ_t	- tečná složka napětí	[MPa]
V_0	- vnitřní objem hadice při nulovém přetlaku	[m ³]
V_p	- objem přípojí hadice	[m ³]
ΔV	- celková změna objemu hadice	[m ³]
ΔV_k	- změna objemu kapaliny (stlačení)	[m ³]
ΔV_H	- změna objemu hadice daná deformací stěn hadice	[m ³]
ΔV_T	- změna objemu trubky	[m ³]
ν	- celková poměrná objemová změna hydr. vedení	[1]
ν_H	- poměrná objemová změna způsobená deformací stěn hadice	[1]
ν_k	- poměrná objemová změna kapaliny (stlačení)	[1]

1. Ú V O D

Snaha po automatizaci stávajících a nových technologických pochodů vede ke specifikaci požadavků kladených na mechanismy, které mají ten který pochod řídit. Všimneme-li si současně skladby výrobních strojů vidíme, že mimo mechanismy tuhé a elektrické jsou ve velké míře využívány mechanismy hydraulické a pneumatické. S rozvojem a výrobou nových výrobních systémů jsou také spojeny nové požadavky na hydraulické systémy.

Na rozvoj hydrauliky reagují i směrnice pro hospodářský a sociální rozvoj ČSSR na léta 1981-1985 přednesené na XVI. sjezdu KSČ. Ve statí " Uplatnění vědeckého a technického pokroku v celém národním hospodářství " [1] uvádí v úkolech základního výzkumu orientaci výzkumné a vývojové práce především k řešení úkolů zaměřených na rozvoj hydrauliky ve strojírenských oborech. Ukládají požadavek rozvinout výrobu hydraulických prvků na dvojnásobek současného stavu. Přitom je nutné zvýšit jejich technickou úroveň a životnost.

Jednou z hlavních částí hydraulického zařízení je vedení. Vedení v hydraulických mechanismech umožňuje přenos tlakové energie od zdroje ke spotřebiči. Nejčastěji je vedení tvořeno ocelovými bezešvými trubkami a pryžovými hadicemi. Pro pohyblivé přístroje a tam, kde by přístroj vyžadoval složité prostorové ohyby vedení, se používá hadic. Hadicové vedení je navíc snadno montovatelné a demontovatelné, má dobrou možnost skladování, manipulace vzhledem ke své ohebnosti, je korozi vzdorné a nepřenáší zvuk.

Hlavním požadavkem, kladeným na vedení obecně, je těsnost. Jakákoliv ztráta množství kapaliny má za následek ztrátu výkonu. V hadicovém vedení je to navíc určitá poddajnost, t.j. ha-

dice jsou schopny akumulovat část přenášené energie. Tato vlastnost se ale může stát výhodnou, v případě, že bychom požadovali od vedení tlumení tlakových rázů.

Jednou z důležitých vlastností hadicového vedení je objemová změna vedení při práci s tlakovou kapalinou. Z celkové energie, kterou má hadicové vedení přenést, se část energie spotřebovává na překonání odporu proti deformaci, a to jak odporu vedení, tak odporu přepravované látky. Část energie se tedy akumuluje ve formě deformační energie, v kapalině a vedení. Tato vlastnost se nazývá celková hydraulická kapacita hadicového vedení. Je definována jako poměrná změna objemu zaplněného kapalinou se změnou působícího tlaku, při deformaci vedení i kapaliny.

Při návrhu hydraulických systémů je tedy zapotřebí znát vlastnosti hydraulického vedení a zahrnout je do výpočtu. Na KGM VŠBT bylo vypracováno několik metod měření délkových a objemových změn hadicového vedení v závislosti na tlaku. Cílem této diplomové práce je provést rozbor stávajících metod měření, navrhnout vhodnou metodu a tuto metodu prakticky ověřit.

V této diplomové práci jsem se omezil na zjišťování objemových změn hadicového vedení při statickém tlakovém zatížení.

2. T E O R E T I C K Ý R O Z B O R V L A S T N O S T Í H A D I C O V Ě H O V E D E N Í =====

Hadicové vedení, které je jedním ze základních prvků hydraulických obvodů, se používá u částí tvořících relativní pohyb nebo složité tvary. Je to ohebná trubka, která musí během provozu přenášet energii a materiál, musí odolávat těmto přenášeným látkám a současně prostředí, ve kterém je umístěna.

Oproti trubce má tyto výhody:

- ohebnost
- absorbuje vibrace
- dopravuje korozivní materiály
- tlumí zvuk
- snadno se skladuje
- umožňuje snadnější montáž a demontáž

Pro volbu hadic je důležité znát některé provozní vlastnosti: pracovní tlak, způsob namáhání (statické, dynamické), rozsah pracovních teplot, prostředí, ve kterém bude hadice pracovat, dále dopravovanou látku, potřebnou délku hadice atd.

2.1. K o n s t r u k c e h a d i c e =====

Konstrukce hadice [5] musí splňovat především tři základní požadavky. Hadice musí přepravovat materiál tak, aby nebyl při dopravě znečištěn nebo poškozen stykem s hadicí. Dále musí mít hadice určitou pevnost proti tlaku dopravovaného média a musí odolávat poškození vnějšími silami nebo vlivem okolního prostředí. Proto se hadice skládá minimálně ze tří vrstev: z vnitřní pryžové vrstvy zvané duše, z výstužné silové kostry z textilního nebo kovového materiálu a z vnější pryžové vrstvy zvané obal.

2. 1. 1. D u š e h a d i c e

Duše tvoří vnitřní vrstvu hadice, která musí být odolná vůči přepravované látce, přenáší tlak této látky na tlakovou vložku, chrání tlakovou vložku před chemickým působením látky a zaručuje nepropustnost hadice. Volba materiálu duše je závislá na použití hadice. Duše hadice se vyrábí z různých druhů kaučuku a v poslední době se ve světě rozšiřují hadice, jejichž duše je tvořena z plastických hmot, především z PVC.

2. 1. 2. T l a k o v á v l o ž k a

Tlaková vložka tvoří pevnostní část hadice odolnou tlakovým silám. Druh a způsob uložení vložky udává typ hadice.

Z hlediska tlakových sil lze hadice rozdělit na podtlakové a tlakové, tyto pak dále na vysokotlaké a nízkotlaké. Podle použitého materiálu se tlakové vložky dělí na:

- a) hadice přízové - tlaková vložka je tvořena textilním materiálem. Přírodní materiály jsou na ústupu (bavlna, len). Nejrozšířenějším textilním materiálem je viskozová příze. b) hadice drátové - tlaková vložka je tvořena z drátu. Používá se vysokepevnostní drát o ϕ (0,25 - 0,56) mm. Pro dosažení dobré soudržnosti se používá drát v pomosazeném stavu. Důležité je dosažení dobré soudržnosti tlakové vložky s ostatními vrstvami hadice. Toho se dosahuje použitím cementu, impregnované příze nebo použitím adhézních směsí.

Podle způsobu uložení tlakové vložky se hadice dělí na hadice oplétané, hadice ovinované, hadice zavalované a případně na hadice speciální.

Změna úhlu mezi pravotočivou a levotočivou spirálou

v opletu nebo ovinu způsobí u hadice to, že hadice při působení tlaku mění svůj objem (mění se délka a průměr hadice). Na většinu hadic je kladen požadavek na minimální změny objemu. Úhel mezi osou hadice a pramenem příze se nazývá úhel opletu nebo úhel ovinu α . Úhel α , při kterém nedochází k žádné změně délky a průměru, se nazývá neutrální nebo úhel rovnováhy α_n a činí $54^\circ 44' 08''$. Tato hodnota se dá odvodit z podmínky rovnováhy sil v hadici nebo z podmínky, že objem hadice je při tomto úhlu maximální [2]. Je-li úhel α menší než α_n , pak při působení vnitřního přetlaku se bude délka zkracovat a průměr se bude zvětšovat. Je-li úhel α větší než α_n bude tomu naopak.

2. 1. 3. O b a l

Obal, nebo-li vnější vrstva, ochrání tlakovou vložku před mechanickým poškozením a chemickými účinky prostředí. Musí být proto odolný vůči prostředí, ve kterém má být hadice použita. Vnější vzhled obalu musí být v souladu s normou ČSN 635305 bez trhlin, natržení, pórovitosti, bublin a přiložených částí. Nejčastější materiál obalu je pryž. V poslední době se také používají plastické hmoty.

2. 2. T e o r e t i c k á č á s t

Z celkové energie, kterou má hadicové vedení přenést, se část energie akumuluje ve formě deformační energie v kapalině a ve vedení samotném. Každý prvek hydraulického mechanismu je schopen pojmout určité množství kapaliny, které je závislé na velikosti činného prostoru prvku a dále potom

na stlačitelnosti kapaliny a tuhosti stěn, které prostor uzavírají.

Při působení vnitřního přetlaku, který se přenáší na stěny hadicového vedení pomocí dopravované látky, dochází k deformaci vedení a vzhledem k poddajnosti (dále uvažujeme jen kapalinu) dochází k deformaci této látky.

Pro celkovou deformaci můžeme psát

$$\frac{\Delta V}{V_0} = [\beta_k \cdot \Delta p + f(M, p)] , \quad (2.1)$$

kde ΔV - celková změna objemu hadice
 V_0 - objem uzavřený stěnami hadice při $\Delta p = 0$
 Δp - vnitřní přetlak
 β_k - izotermický objemový součinitel stlačitelnosti kapaliny
 $f(M, p)$ - fce vyjadřující vliv materiálových, geometrických parametrů stěny hadice, uzavírající objem V_0 , na působícím tlaku

Vztah (2.1) je možno dále rozepsat: pro $\beta_k = \frac{1}{K_k}$

$$\Delta V = V_0 \left[\frac{\Delta p}{K_k} + f(M, p) \right] , \quad (2.2)$$

kde K_k - izotermický objemový modul pružnosti kapaliny

Ze vztahů (2.1) a (2.2) vyplývá, že změna objemu je dána součtem změny objemu vlivem stlačitelnosti kapaliny a změny objemu způsobené deformací stěny vedení hadice. Můžeme tedy napsat

$$\Delta V = \Delta V_k + \Delta V_n = V_0 \cdot \frac{1}{K_k} \cdot \Delta p + V_0 \cdot f(M, p) , \quad (2.3)$$

kde ΔV_k - deformace objemu kapaliny
 ΔV_n - deformace stěny hadice

K_k - izotermický modul pružnosti kapaliny, který lze odvodit použitím linearizované stavové rovnice kapaliny ([2])

$$K_k = \left(\frac{V \cdot \Delta p}{\Delta V} \right)_T$$

Vztah platí pro určitou konstantní teplotu.

2. 2. 1. S d r u ž e n ý m o d u l p r u ž n o s t i

Objemový modul pružnosti ve většině výpočtů představuje sdruženou hodnotu, zahrnující stlačitelnost pracovní látky i objemovou deformaci pracovního prostoru. Vyjdeme-li z toho, že celková změna objemu hadice ΔV při působícím přetlaku Δp je dána součtem deformací kapaliny (stlačením) ΔV_k a hadice samotné (roztahením) ΔV_H .

$$\Delta V = \Delta V_k + \Delta V_H = \frac{V_0}{K_s} \cdot \Delta p \quad (2.4)$$

kde K_s - sdružený modul pružnosti

Z rovnice (2.4) můžeme psát

$$K_s = \frac{V_0 \cdot \Delta p}{\Delta V_k + \Delta V_H} \quad (2.5)$$

V_0 - původní geometrický objem hadice při $\Delta p = 0$

Δp - působící přetlak

ΔV_k - stlačení kapaliny

ΔV_H - deformace hadice

a pro ΔV_k můžeme psát ze vztahu (2.3)

$$\Delta V_k = \frac{V_0}{K_k} \cdot \Delta p$$

Uvažujeme hladkou tenkostěnnou trubku, dostatečně dlouhou a předpokládáme, že pro vstupní tlak p_1 a výstupní tlak p_2 platí $p_1 - p_2 \neq 0$. Bude-li trubka dokonale tuhá, bude se na objemové změně podílet pouze kapalina svou stlačitelností

a můžeme tedy psát

$$\Delta V_k = \frac{V_0}{K_k} \cdot (p_1 - p_2) = \frac{V_0}{K_k} \cdot \Delta p \quad (2.6)$$

Jestliže uvažujeme pouze trubku, pak platí

$$\Delta V_T = \frac{V_0}{E_T} \cdot \Delta p \quad (2.7)$$

kde ΔV_T - deformace trubky

E_T - modul pružnosti trubky

Z teorie tlustostěnných nádob [4] lze pro modul pružnosti trubky odvodit vztah

$$E_T = \frac{E \cdot s}{d} \quad (2.8)$$

s - tloušťka stěny trubky

d - vnitřní průměr trubky

E - modul pružnosti pro ocel

Po dosazení vztahu (2.8) do (2.7) dostaneme

$$\Delta V_T = V_0 \cdot \frac{d \cdot \Delta p}{E \cdot s} \quad (2.9)$$

$$\text{Jestliže } \Delta V = \Delta V_k + \Delta V_T \quad (2.10)$$

pak dosazením vztahů (2.9) a (2.6) do (2.10) dostaneme

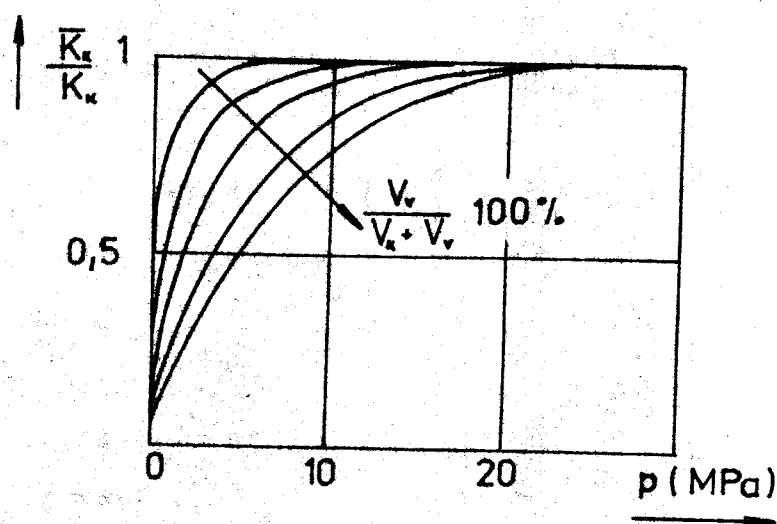
$$\Delta V = V_0 \cdot \left[\frac{1}{K_k} + \frac{d}{E \cdot s} \right] \cdot \Delta p \quad (2.11)$$

Dosazením vztahů pro trubku (2.9) a kapalinu (2.6) do (2.5) dostaneme vztah pro sdružený modul pružnosti K_s , který však platí pro ocelovou trubku.

$$K_s = \frac{K_k \cdot E}{E + K_k \frac{d}{s}} \quad (2.12)$$

Tento vztah však platí pouze v mezích Hookeova zákona. Modul pružnosti pro ocel lze snadno nalézt v tabulkách a modul pružnosti kapaliny můžeme zjistit měřením, které je poněkud obtížné. Modul pružnosti kapaliny závisí na druhu použité kapaliny, na velikosti tlaku, na teplotě, při které dochází k deformaci kapaliny a také na obsahu vzduchových bublinek. Je to jednak vzduch rozpuštěný v kapalině, který nemá na modul pružnosti kapaliny vliv a jednak vzduch ve formě vzduchových bublinek, který modul pružnosti kapaliny výrazně snižuje, zvláště při nižších tlacích. Tento vzduch není možné z kapaliny odstranit. V nejlepším případě obsahuje kapalina (3-5) % vzduchu rozptýleného ve formě bublinek.

Velikost tohoto vlivu je znázorněna na obr. 2.1, kde $\bar{K}_k$ je objemový modul pružnosti směsi a V_v je objem vzduchu rozptýlený ve formě bublinek v kapalině o objemu V_k .



Obr. 2.1.

V praxi se pro měření modulu pružnosti kapaliny používají piezometry.

Přýžové hadice svou konstrukcí ani materiálem nespĺňují požadavek homogenity ani izotropnosti jako základní podmínky platnosti Hookeova zákona, proto u nich nelze vztahu (2.12).†

Jestliže zavedeme deformaci hadice ΔV_H jako

$$\Delta V_H = \frac{V_0}{E_H} \cdot \Delta p \quad (2.13)$$

kde E_H - modul pružnosti hadice
pak dosazením (2.13) do (2.5) dostaneme

$$K_{SH} = \frac{K_K \cdot E_H}{K_K + E_H} \quad (2.14)$$

K_{SH} - sdružený modul pružnosti hadicového vedení

V tomto vzorci se již nevyskytují rozměry hadice jako tomu bylo v případě ocelové trubky. Sdružený modul pružnosti hadice K_{SH} je funkční závislostí modulu pružnosti kapaliny K_K a modulu pružnosti hadice E_H . Obě veličiny vykazují dále funkční závislosti na teplotě T , tlaku p . Modul pružnosti kapaliny dále závisí na obsahu nerozpuštěného vzduchu v kapalině a na druhu kapaliny. Modul pružnosti hadice závisí na materiálu a hlavně na konstrukci hadice.

$$K_K = K_K(T, p, \text{obs. vzduchu, druhu kap.})$$

$$E_H = E_H(T, p, \text{mat. a konstr.})$$

můžeme tedy psát

$$\Delta V = V_0 \cdot \left(\frac{1}{K_K} + \frac{1}{E_H} \right) \cdot \Delta p \quad (2.15)$$

2. 2. 2. Celková hydraulická kapacita systému

Celkovou hydraulickou kapacitu systému můžeme vyjádřit ze vzorce (2.15), jestliže tento podělíme změnou tlaku Δp .

$$C_h = C_k + C_s = \frac{V_0}{K_k} + \frac{V_0}{E_s} \quad (2.16)$$

kde C_h - celková hydraulická kapacita systému

C_k - hydraulická kapacita kapaliny

C_s - hydraulická kapacita stěn vedení

Tento vztah je však platný pouze pro ocelovou trubku.

Obecně můžeme napsat

$$C_h = V_0 \cdot \left(\frac{1}{K_k} + q(M) \right) \quad (2.17)$$

$q(M)$ - fee vyjadřující vliv materiálových, geometrických a konstrukčních parametrů stěny hadice, uzavírající objem V_0 .

3. ROZBOR MOŽNOSTÍ STÁVAJÍCÍCH METOD MĚŘENÍ DÉLKOVÝCH A OB- JEMOVÝCH ZMĚN HADIC V ZÁ- VISLOSTI NA TLAKU

Nutno konstatovat, že dosud nebyla stanovena žádná experimentální ani výpočtová metoda pro určování objemových změn hadicového vedení při působícím statickém resp. dynamickém přetlaku, která by byla závazná pro ověřování vlastností hadicového vedení. Stávající metody jsou totiž velmi pracné nebo nedávají hodnoty odpovídající experimentálnímu měření, které vykazuje určitý rozptyl hodnot. Praktické i teoretické prověrky hydraulických okruhů vedly výrobce hadic k zavedení zkušebních metod zatěžováním hadic tlakovými předem definovanými rázy, které mají vliv zejména na jejich poruchovost.

Z těchto metod bych chtěl ukázat na měření objemových změn hadic dle ČSN 635305 a na metodu navrženou v ZTS, n.p. Dubnica nad Váhom.

3. 1. Z k o u š k a o b j e m o v é d e f o r m a c e p r y ž o v ý c h h a d i c d l e Č S N 635305

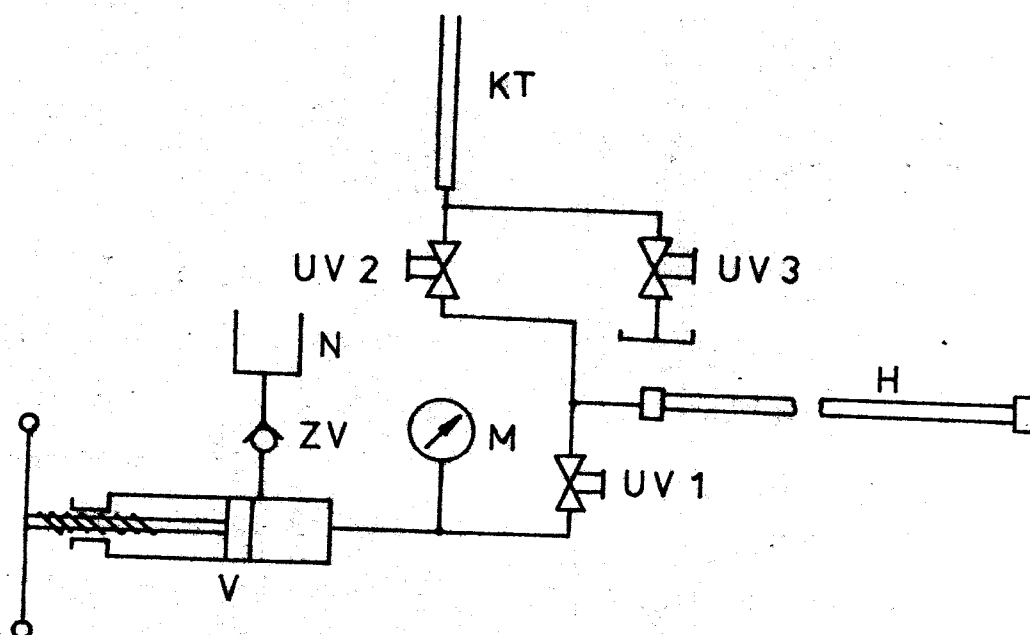
ČSN 635305 zahrnuje tuto zkoušku jako jednu z řady zkoušek pro ověření vlastností hadic. Svým charakterem jde spíše o zkoušku informativní, ověřující správnou konstrukci a neporušenost [3].

Zkouší se na zvláštním přístroji, jehož schéma je uvedeno na obr. 3.1. Před započítím měření se hladina kapaliny v kalibrované trubičce KT ustaví na nulovou polohu. Zkoušená

hadice H je ve vodorovné poloze jedním koncem upnutá do přístroje a druhý konec je uzavřen zátkou. Zatlačováním pístu do válce V přístroje se snadno vyvine ve zkoušené hadici přetlak, při kterém se měří deformace. Po dosažení tohoto přetlaku se uzavře přívod kapaliny do hadice uzavíracím ventilem UV 1 a otevře přívod do kalibrované trubičky KT ventilem UV 2. Tím dojde ke změně hladiny v trubičce. Odečtením dílků na stupnici trubičky se zjistí objemová deformace σ_1 . Naměřená hodnota σ_1 se sníží o korekci přístroje a , zjištěnou pro příslušný přetlak. Skutečná objemová deformace se pak vypočte dle vzorce :

$$\sigma = \frac{(\sigma_1 - a) \cdot 100}{l} \quad [\text{cm}^3]$$

- kde
- σ - objemová deformace zkoušené hadice
 - σ_1 - naměřená objemová deformace, t.j. údaj na trubičce
 - a - hodnota odečtená z korekční křivky
 - l - délka hadice v mm



Obr. 3.1.

3. 2. M ě ř e n í h a d i c v Z Ě S n . p . D u b n i o a n a d V á h o m

Naměřené a vypočtené hodnoty v ZĚS n.p. byly získány v podobě objemového modulu pružnosti [3] .

3. 2. 1. M o d u l p r u ž n o s t i p r y ž o v é h a d i c e

Při měření byla předpokládána kapalina bez obsahu plynu, vyloučeného ve formě bublinek. Výpočet byl prováděn užitím sečného izotermického modulu pružnosti kapaliny, označeného jako střední modul definovaný vztahem

$$K_s = \Delta p \cdot \frac{V_0}{\Delta V} \quad (3.1)$$

Vyjdeme z celkové objemové deformace (2.4), kde musíme uvažovat stlačitelnost kapaliny i v přípojkách hadice .

$$\Delta V_k = \frac{V_0 + V_p}{K_s} \cdot \Delta p \quad (3.2)$$

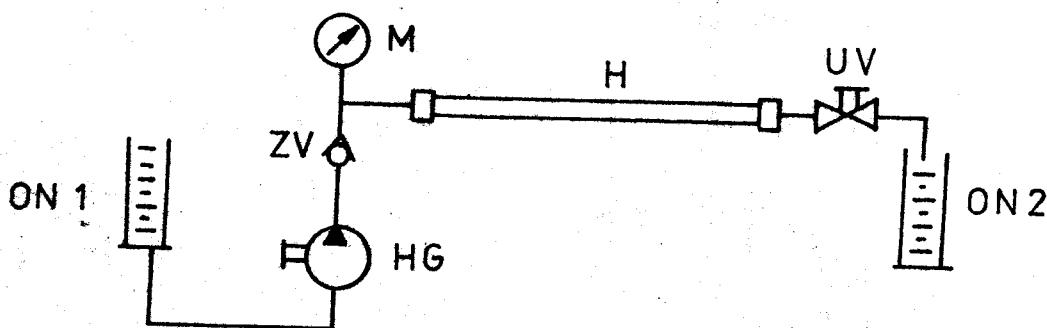
Deformaci hadice vyjádříme vztahem (2.13). Vztah pro statický (izotermický) modul pružnosti pryžové hadice E_{ns} odvodíme dosazením (2.13) a (3.2) do (2.4).

$$E_{ns} = \frac{V_0 \cdot \Delta p}{\Delta V - \frac{\Delta p}{K_s} (V_0 + V_p)} \quad (3.3)$$

3. 2. 2. O b v o d p r o m ě ř e n í s t a t i c - k ý c h p a r a m e t r ů

Pro měření statického modulu pružnosti byl sestaven experimentální obvod znázorněný na obr. 3.2. Obvod se sestává z hydrogenerátoru HG s nepatrným průtokem (řádově $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) a s téměř nulovými objemovými ztrátami, jedno-
směrného ventilu ZV, uváděného jako absolutně těsný, od-

měrných válců na straně sání (ON 1) a na straně výtoku hadice (ON 2), uzavíracího ventilu UV a kontrolního manometru M. Po odvědušnění obvodu byl zjišťován přírůstek objemu ΔV při zvoleném tlakovém spádu p buď jako úbytek kapaliny v nádobě ON 1 nebo přírůstek objemu v nádobě ON 2 po otevření uzavíracího ventilu UV.

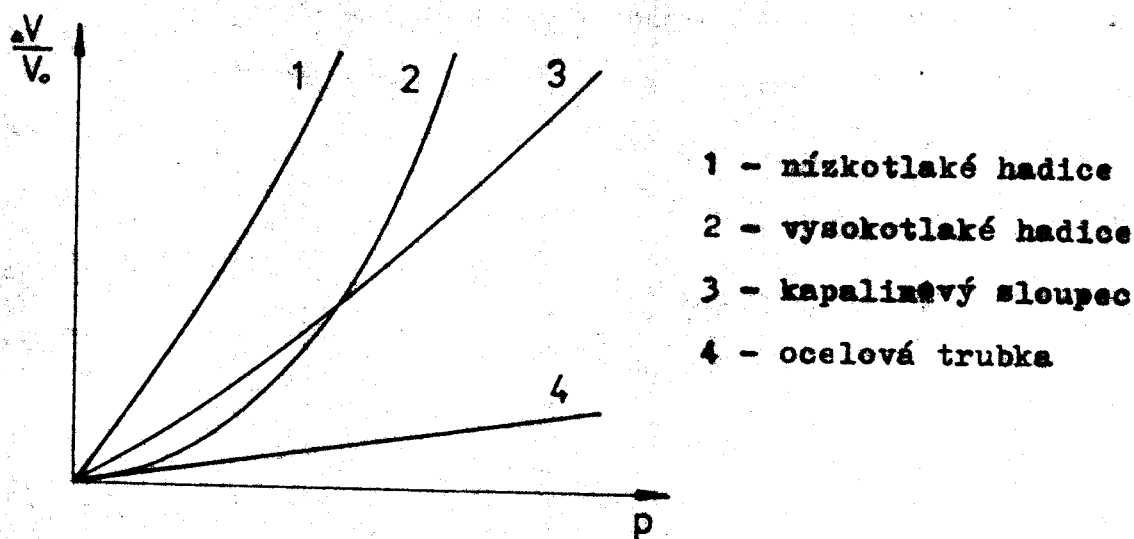


Obr. 3.2.

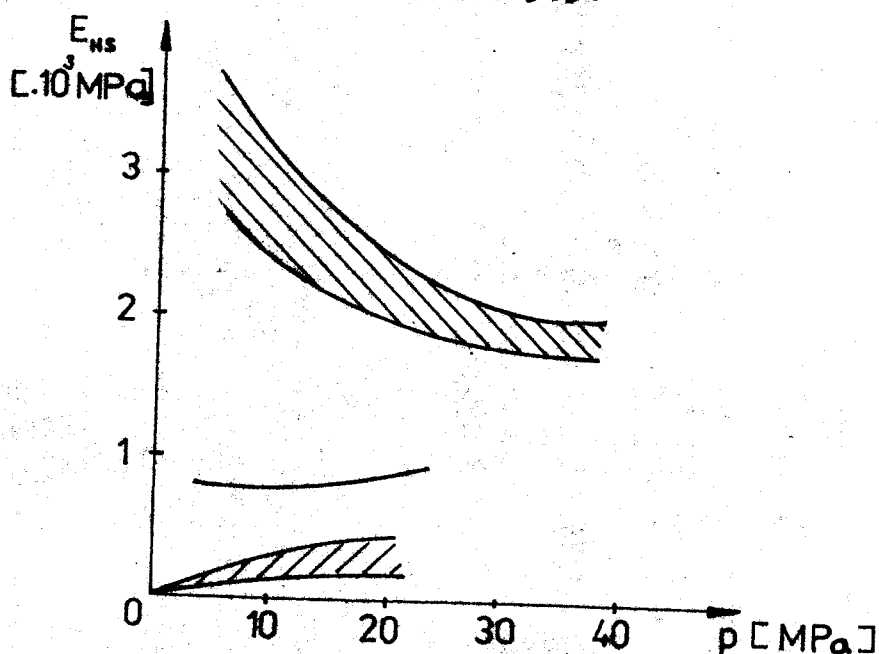
3. 2. 3. V ý s l e d k y m ě ř e n í

Statická měření objemového modulu pružnosti hadic zahrnovala široký program podle světlosti, délek, typu hadice, tvaru vedení, pro sériové a paralelní zapojení dvou hadic. Jednotlivá měření vykazovala značný rozptyl, zejména podle typů a světlosti hadic. Výsledky byly zpracovány do plošných grafů, vymezujících oblasti dané závislosti, do kterých patřilo min. 90% naměřených hodnot. Takto byly proměřeny vysokotlaké hadice typu BRT Hiflex, středotlaké Optimit a nízkotlaké Technometra, Motex.

U výsledků jsou uvedeny grafy závislosti poměrné objemové deformace $\frac{\Delta V}{V_0}$ na tlaku. v obr. 3.3. a průběh závislosti modulu pružnosti na tlaku u jednotlivých typů hadic na obr. 3.4.



Obr. 3.3.



Obr. 3.4.

3. 3. Z h o d n o c e n í m e t o d

Metoda měření objemových deformací dle ČSN 635305 je, jak již bylo řečeno, spíše metodou informativní, zjišťující bezvadnost a neporušenost hadice. Zjištěná deformace, zmenšená o hodnotu korekce přístroje, je zde stažena na jednotku délky hadice. Norma již dále neuvádí směrodatné či kontrolní

hodnoty deformací hadic.

Praktické využití předpokládá vynesení naměřených hodnot do grafů, či tabulek, aby bylo možno získat představu o chování hadic při působícím přetlaku. Jedině tak lze využít hodnot při návrhu hydraulických systémů z hlediska vlivu hadic na jejich chování a hospodárnost.

Hodnoty vyplývající z měření ZŤS n.p. nám již dávají představu o chování různých typů hadic. Teoretický postup je obdobný jako užívá KOM VŠST v Liberci. Jde v podstatě o měření celkové objemové změny vedení, dané stlačitelností a deformací stěn hadice. Ačkoliv je teoretický přístup shodný s přístupem KOM VŠST, výsledné charakteristiky však udávají poněkud odlišný průběh deformací. Chyba tohoto měření je pravděpodobně v tom, že přírůstek objemu ΔV byl zjišťován při tlakovém spádu p jako úbytek kapaliny v odměrné nádobě, která byla umístěna před hydrogenerátorem. Z toho vyplývá, že při měření byla zanedbána hydraulická kapacita hydrogenerátoru, což má vliv na výslednou charakteristiku

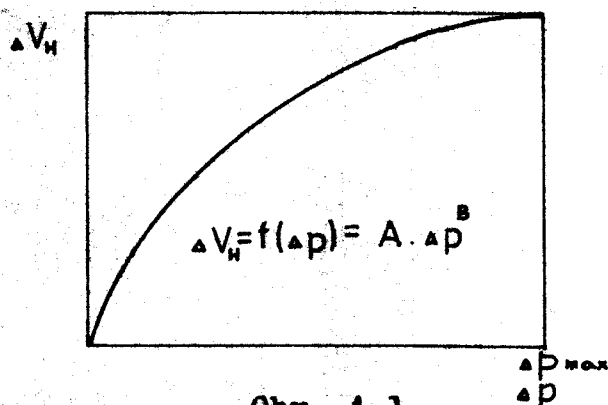
$$\frac{\Delta V}{V_0} \text{ na } p.$$

4. MĚŘENÍ OBJEMOVÝCH A DÉLKOVÝCH ZMĚN NA KON VŠST LIBEREC

4.1. Zjišťování objemové změny náhradou závislosti exponenciální závislosti

Měřením konečných objemových změn systému vedení a hydraulické kapaliny při působení vnitřního tlaku získáme závislost $\Delta V = f(\Delta p)$, kde $\Delta V = \Delta V_k + \Delta V_H$. Od naměřené závislosti $\Delta V = f(\Delta p)$ odečteme závislost $\Delta V_k = f(\Delta p)$, a tím dostaneme hledanou závislost $\Delta V_H = f(\Delta p)$; [6].

Takto získanou závislost lze v určitém intervalu nahradit exponenciální závislostí obr. 4.1.



Obr. 4.1.

Potom můžeme psát

(4.1)

kde A, B jsou regresivní koeficienty. Platí tedy:

$$\log \Delta V_H = \log A + B \cdot \log \Delta p$$

a nebo

$$\ln \Delta V_H = \ln A + B \cdot \ln \Delta p$$

Máme-li N bodů křivky $\Delta V = f(\Delta p)$, pak můžeme psát podle metody nejmenších čtverců pro a, A, B

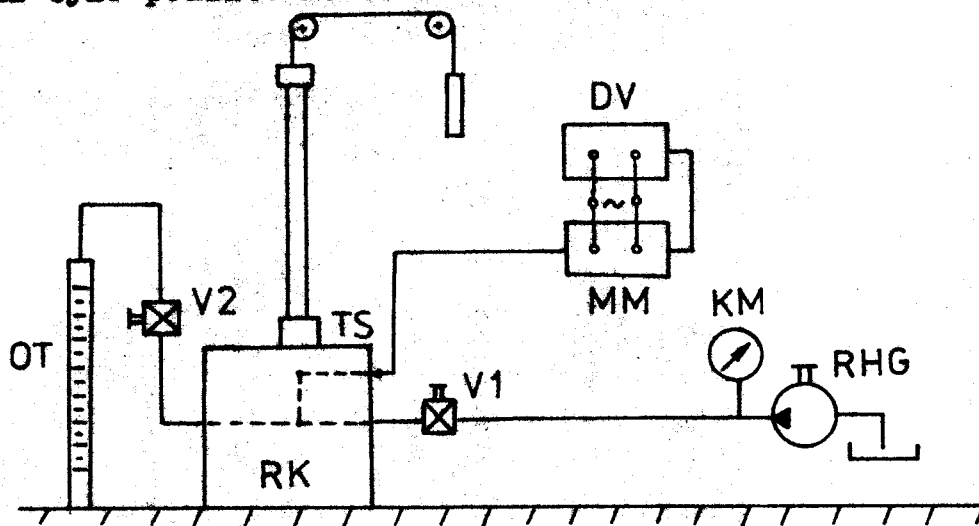
$$B = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \cdot \psi_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \psi_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \right)^2} \quad (4.2)$$

$$\alpha = \psi - B \cdot p \quad (4.3)$$

$$A = 10^a \quad (4.4)$$

4.1.1. Princip měření

Princip měření spočívá v měření konečných objemových směn vedení a kapaliny se změnou působícího tlaku. K měření bylo použito zařízení z obr. 4.2.



Obr. 4.2.

Pracovní obvod obr. 4.2. se skládal z rozváděcí kostky RK, odměrné trubice OT, ventilů V_1 , V_2 , ručního hydrogenerátoru RHG, kontrolního manometru KM, a vedení. K tomu přísluší zařízení sloužící k napínání hadice, které se skládá ze stojanu, dvou kladek, napínacího závaží s lankem a koncovky k přichycení hadice. Jako čtecí zařízení zde bylo použito digitálního voltmetru DV.

Při vlastním měření bylo postupováno následovně. Nejprve se naplnila rozváděcí kostka hydraulickou kapalinou tak, aby nikde nedošlo k uzavření určitého objemu vzduchu. Všechny ventily byly otevřeny. Po naplnění rozváděcí kostky se uzavřel ventil V_2 , potom byla přichycena koncovka hadice na rozváděcí kostku a ručním hydrogenerátorem byl pomalu naplněn objem hadice. Po zaplnění celého objemu hadice byla přišroubována druhá koncovka hadice ke šroubu napínacího lanka. Ručním hydrogenerátorem byl zvyšován tlak. Hadice se natlačovala na určitý přetlak a zavřel se ventil V_1 . Potom byl postupně otevírán ventil V_2 a odpouštěno do odměrné trubice určité množství kapaliny odpovídající přetlaku v hadici. Měříme tedy množství kapaliny V_1 vyteklé do odměrné trubice při přetlaku Δp . Tlak v hadici byl snímán tenzometrickým snímačem a přes měřicí můstek byla jeho hodnota udávána digitálním voltmetrem. Naměřené hodnoty Δp a V_1 jsou odečítány ve voltech a milimetrech stupnice odměrné trubice. Proto bylo nutné pro zpracování výsledků oceňovat tenzometrický snímač a odměrnou trubicí.

Vlastním měřením bylo tedy stanoveno ΔV a Δp . Ze vztahu (2.3) pak můžeme napsat

$$\Delta V_M = \Delta V - \Delta V_K$$

Hodnotu ΔV jsme stanovili měřením a hodnotu ΔV_K lze vypočítat ze vztahu (2.6)

$$\Delta V_K = \frac{V_0}{K_K} \cdot \Delta p$$

K tomu, abychom mohli ΔV_K vypočítat, je však nutno znát objemový modul pružnosti kapaliny K_K . Zjišťování této hodnoty je však velmi náročné, protože každá hydraulická

kapalina obsahuje určité množství nerozpuštěného vzduchu, což podstatně stěžuje měření K_K . Blíže je o tom pojednáno v kapitole 2.2.1. Zjišťování objemového modulu pružnosti kapaliny je hlavním nedostatkem této metody.

Vzhledem k většímu množství hodnot byly hodnoty zpracovány na počítači. Byly vypočítány i hodnoty středních kvadratických chyb, pro které můžeme psát

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta V_i - A \cdot \Delta p^3)^2}{N}} \quad (4.5)$$

Při výpočtu se chyba pohybovala v rozmezí (2-3) %. Pro jednotlivé typy hadic pak byly stanoveny vztahy

$$\Delta V_H = A \cdot \Delta p^3$$

4. 1. 2. Z h o d n o c e n í m ě ř e n í

Z výsledků vidíme, že chyba při náhradě závislosti $\Delta V_H = A \cdot \Delta p^3$ závislostí $\Delta V_H = f(\Delta p)$ je poměrně malá. Proto můžeme v určitém intervalu počítat ΔV_H podle této exponenciální závislosti.

Při měření změn objemu při vyšších tlacích již nebylo odečítání Δp a ΔV tak přesné jako při tlacích nižších. Bylo to způsobeno poklesem tlaku vzhledem k netěsnostem obvodu.

4. 2. R e z b o r c h y b m e t o d i k y v y - š e t ř e v á n í o b j e m o v ý c h z m ě n h a d i c o v é h o v e d e n í

Hadicevé vedení prokazuje nelineární závislost objemových změn, způsobených deformací stěny hadice na pů-

působícím vnitřním tlaku. Nelze tedy pro určení objemových změn hadicového vedení užít vztahy obdobné vztahu pro vedení tvořené ocelovou tenkostěnnou trubkou. Pro hadicové vedení lze pro poměrnou objemovou změnu psát:

$$\nu = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta P}{K_K} + \nu_H(P) \quad (4.6)$$

kde $\nu_H(P)$ je poměrná objemová změna způsobena pouze deformací stěn hadice a ΔP je působící vnitřní přetlak.

Poměrná objemová změna stěn hadice bude kromě působícího vnitřního přetlaku záviset rovněž na daných materiálových parametrech hadice. Praktické metody vycházejí z měření absolutní objemové změny vedení ΔV , která je dána součtem absolutních objemových změn kapaliny ΔV_K a stěn hadice ΔV_H

$$\Delta V = \Delta V_K + \Delta V_H \quad (4.7)$$

Po vydělení rovnice geometrickým objemem vedení při atm. tlaku (V_0) lze psát pro poměrné objemové změny

$$\nu = \nu_K + \nu_H \quad (4.8)$$

Poměrnou objemovou změnu stěn hadice lze určit odečtením poměrné objemové změny kapaliny ν_K od celkové poměrné objemové změny vedení ν .

Víme, že objemová změna kapaliny závisí kromě působícího tlaku p a modulu pružnosti K_K na skutečném t.j. okamžitém objemu kapaliny. Takže ve vztahu (4.7) bude pro ΔV_K platit

$$\Delta V_K = (V_0 + \Delta V_H) \cdot \frac{\Delta P}{K_K} \quad (4.9)$$

Dosažením tohoto vztahu do (4.7) dostaneme

$$\Delta V = V_0 \frac{\Delta P}{K_k} + \Delta V_H \left(\frac{\Delta P}{K_k} + 1 \right) \quad (4.10)$$

pro poměrnou objemovou změnu

$$\nu = \frac{V}{V_0} = \frac{\Delta P}{K_k} + \left(1 + \frac{\Delta P}{K_k} \right) \quad (4.11)$$

Odkud poměrná objemová změna stěn hadice

$$\nu_H = \frac{\nu - \frac{\Delta P}{K_k}}{1 + \frac{\Delta P}{K_k}} \quad (4.12)$$

Z odměřené celkové objemové změny vypočteme tedy poměrnou objemovou změnu stěn hadice podle (4.12) nejpřesněji.

Vzniká tedy problém, jaké chyby se dopustíme při používání metodách, kdy poměrná objemová změna kapaliny byla určována z geometrického objemu vedení při atm. tlaku, oproti přesnému určení ν_H podle vztahu (4.12).

Pro stlačitelnost kapaliny platí zde:

$$\Delta V_k = V_0 \cdot \frac{\Delta P}{K_k} \quad (4.13)$$

pro poměrnou objemovou změnu kapaliny

$$\nu_k = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta P}{K_k} \quad (4.14)$$

Poměrná objemová změna stěn hadice pak dosazením do (4.8) bude

$$\nu_H = \nu - \frac{\Delta P}{K_k} \quad (4.15)$$

Relativní chyba této metody užitím vztahů (4.12) a (4.15) bude

$$\epsilon = \frac{\nu_H - \nu_H}{\nu_H} = \frac{\Delta P}{K_k} \quad (4.16)$$

V našem případě, kdy rozsah tlaků je $p \in \langle 0, 16 \rangle$ MPa a modul pružnosti kapaliny lze vzít $K_k = 1,66 \cdot 10^3$ MPa, bude relativní chyba metody ${}^1\varepsilon$ řádově pod 10^{-2} , t.j. nepřekročí 1 %.

Zkusme dále zanedbat stlačitelnost kapaliny zcela. Naměřenou objemovou změnu vedení přisoudíme tedy deformaci stěn hadice.

$$\Delta V = {}^2V_H \quad (4.17)$$

pro objemovou změnu hadice zde platí

$${}^2V_H = V \quad (4.18)$$

Vypočteme relativní chybu této velmi zjednodušené metody užitím vztahů (4.18) a (4.12)

$${}^2\varepsilon = \frac{{}^2V_H - V}{V} = \frac{\Delta p}{K_k} \cdot \frac{v + 1}{v - \frac{\Delta p}{K_k}} \quad (4.19)$$

Víme, že poměr $\frac{\Delta p}{K_k} = {}^1\varepsilon$, pak

$${}^2\varepsilon = {}^1\varepsilon \cdot \frac{v + 1}{v - \frac{\Delta p}{K_k}} \quad (4.20)$$

Vyjádříme relativní chybu ${}^2\varepsilon$ jako A - násobek relativní chyby ${}^1\varepsilon = \frac{\Delta p}{K_k}$.

$${}^2\varepsilon = \frac{\Delta p}{K_k} \cdot \frac{v + 1}{v - \frac{\Delta p}{K_k}} = \frac{\Delta p}{K_k} \cdot A \quad (4.21)$$

Musí zde platit rovnost

$$A = \frac{v + 1}{v - \frac{\Delta p}{K_k}} \quad (4.22)$$

Ze vztahu (4.22) vypočteme celkovou poměrnou objemovou změnu

$$(4.23)$$

Poměr $\frac{\Delta P}{K_K} = 10^{-2} = 1 \%$, jak bylo uvedeno dříve (platí pro $p = 16 \text{ MPa}$). Konstanta A nám tedy dle (4.22) přímo udává relativní chybu v %. Celkové poměrné objemové změny vedení odpovídající různým chybám, daným konstantou A , jsou vypočteny v tab. 4.1.

$A = \varepsilon^2 (\%)$	1	2	4	8	10	6	15	20
$\nu (1)$	∞	1,02	0,37	0,154	0,122	0,212	0,082	0,663

tab. 4.1.

Z tabulkových hodnot vyplývá, že u hadic s přízovým opletem, kde celková poměrná objemová změna ν dosahuje asi 15 %, by poměrná chyba této metody neměla překročit 10 %. U hadic s ocelovým opletem však dochází k menším deformacím a stlačitelnost kapaliny u nich lze zanedbat na úkor větší nepřesnosti metody měření.

Kontrolováním hodnot ε^2 užitím naměřených hodnot deformací hadic s přízovým opletem docházelo k tomu, že při určování poměrné objemové deformace stěn hadice jako odměřené celkové poměrné objemové změny se dopustíme max. relativní chyby pod 10 % [6] .

4. 3. Z j i š ť o v á n í o b j e m o v ý c h z m ě n h a d i c o v é h o v e d e n í s o u v i s l ý m m ě ř e n í m

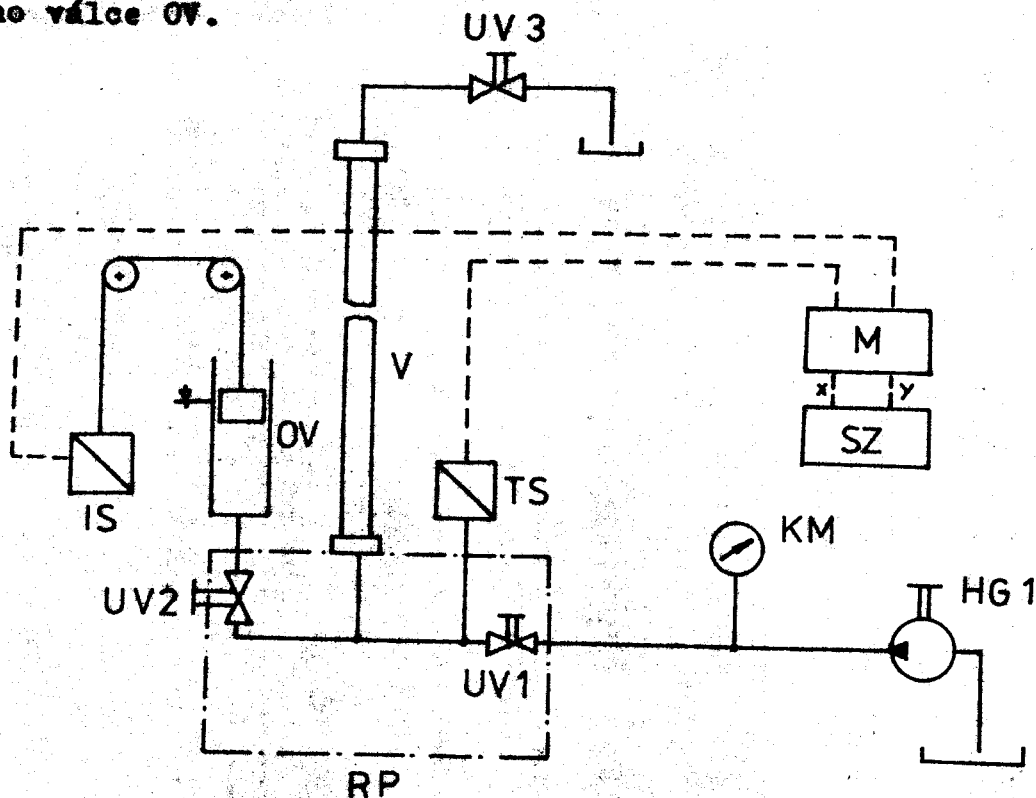
Uvedené metody stanovovaly deformaci hadice z výšky kapalinového sloupce v odměrné trubici. Takovéto stanovení dávalo příznivé výsledky, ale bylo nutno jak odměřit velké množství hodnot, tak i zpracovat naměřené hodnoty na počítači k určení regresní křivky, což je poněkud náročné na

čas.

Zjišťování deformací hadice souvislým měřením může sloužit pro rychlou informaci o chování hadice při různém tlakovém zatížení eo do změny objemu. Nutno však podotknout, že tato metoda nám umožňuje zjišťovat objemové změny pouze při snižování tlaku z již natlakované hadice.

4. 3. 1. P r i n c i p m ě ř e n í

Oproti uvedené metodě [3] je objemová deformace u této metody snímána ve formě změny hladiny v odměrném válci při měření. Výšku hladiny sleduje plovák spřažený přes převod s kladičkami s indukčním snímačem polohy. Schéma měřicího zařízení je uvedeno na obr. 4.3. Skládá se z rozváděcího přípravku RP obsahujícího uzavírací ventily UV 1 pro plnění a UV 2 pro odpoaštění kapaliny z měřeného vedení do odměr - ného válce OV.



Obr. 4.3.

Na rozváděcí přípravek je připojen pro snímání úrovně tlaku tenzometrický tlakový snímač TS (TT 60) spojený dále s můstkem M (UM 131) a napojený na souřadnici x u souřadnicového zapisovače SZ (ENDIM 2200/I). Vedení ve svislé poloze je odvzdušňováno před měřením ventilem UV 3. Plnění obvodu zajišťuje ruční hydrogenerátor HG 1 s kontrolním manometrem nebo hydrogenerátor HG 2 s elektromotorem (pro měření při vyšší teplotě). Snímání výšky hladiny v odměrném válci OV je zajištěno propojením plováku s jádrem indukčního snímače IS (IWT 302) přes kladičky uložené ve stojanu na hrotech. Indukční snímač je spojený přes můstek M na souřadnici Y zapisovače SZ.

Navržené zařízení umožňuje zjišťování deformace vedení při kontrolní teplotě. Teplotu možno snímat pomocí dotykového teploměru, přiloženého na stěnu hadice. Přesnějších výsledků měření při různých teplotách bychom dosáhli otočením hadice do vodorovné polohy a pak ponořením hadice do ohřívací lázně. Nevýhodou tohoto měření je však to, že nebylo možno zkontrolovat chování hadice při různém přetlaku po uplynutí určitého časového intervalu, který by umožnil relaxaci hadice.

4. 4. Z j i š ť o v á n í d e f o r m a c e h a d i c e p r o m ě ř e n í m g e o m e t r i c k ý c h p a r a m e t r ů

Budeme-li uvažovat bezešvou ocelovou tenkostěnnou trubku dostatečně dlouhou, dojdeme k závěru, že se zde projevují pouze dvě složky napětí. Nastává zde dvonásobná napjatost [4]. V trubce tak vzniká axiální napjetí σ_a a napjetí tečné σ_t .

Pro σ_a a σ_t platí

$$\sigma_a = \frac{p \cdot r}{2 \cdot s} \quad (4.25) \quad \sigma_t = \frac{p \cdot r}{s} \quad (4.24)$$

kde p - tlak v trubce
 r - vnitřní poloměr trubky
 s - tloušťka stěny

pro deformaci v tečném směru ε_t platí:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu \sigma_a) \quad (4.26)$$

μ - poissonova konstanta (pro ocel = 0,3)

pro ε_t dále můžeme napsat

$$\varepsilon_t = \frac{2\pi(r+\Delta r) - 2\pi \cdot r}{2\pi \cdot r} = \frac{\Delta r}{r} \quad (4.27)$$

Δr - změna vnitřního průměru

odtud pak pro Δr platí:

$$\Delta r = r \cdot \varepsilon_t \quad (4.28)$$

U tenkostěnné ocelové trubky uvažujeme, že se vnitřní průměr mění stejně jako průměr vnější při působení tlaku p .

Jak jsem již v kapitole 2.2.1. uvedl, můžeme pro trubku psát

$$\Delta V = V_0 \cdot \left(\frac{1}{\frac{E \cdot s}{d}} + \frac{1}{K_k} \right) \cdot \Delta p$$

Jestliže tedy známe rozměry trubky, modul pružnosti kapaliny K_k , modul pružnosti pro ocel E a Δp , pak můžeme vypočítat změnu objemu ΔV . Tento vztah je však platný pouze v mezích Hookeova zákona. Možnost výpočtu pro objemové změny u ocelové trubky vedle k odvození závislosti změny objemu ha-

dice, dané deformací stěny hadice, na materiálových a rozměrových parametrech.

4. 4. 1. D e f o r m a c e h a d i c o v é h o v e - d e n í

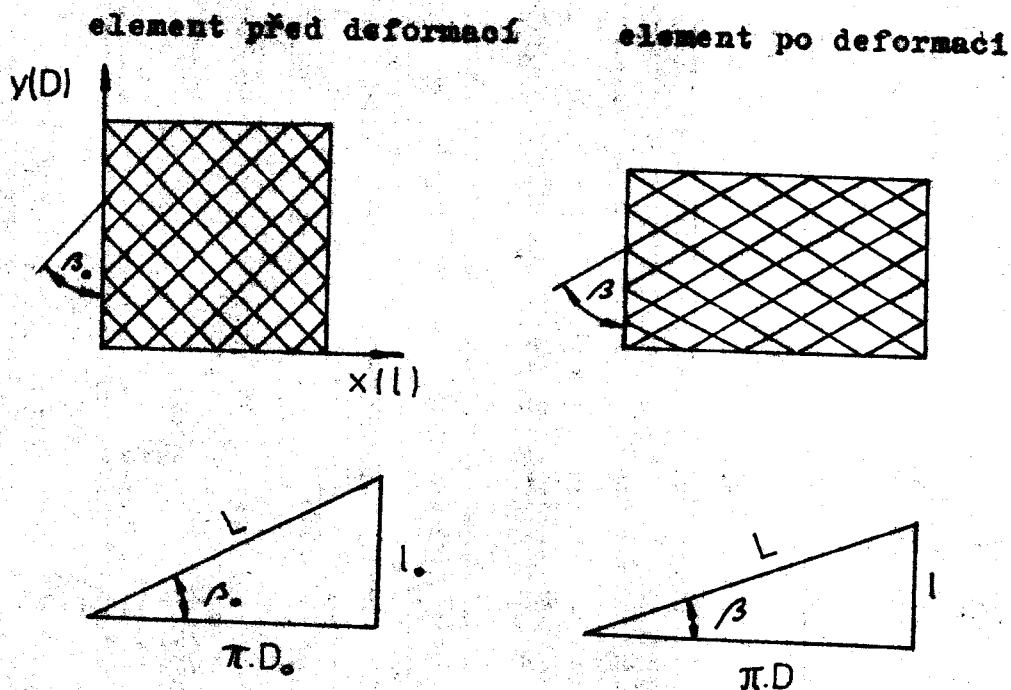
Pro deformaci stěny hadice o počáteční délce l_0 odpovídající stoupání šroubovice navinutého vlákna na počátečním průměru D_0 , platí

$$V = V_0 + \Delta V_s = \frac{\pi}{4} \cdot (D_0 + \Delta D)^2 \cdot (l_0 + \Delta l) \quad (4.29)$$

při zanedbání veličin druhého a vyššího řádu můžeme psát

$$\Delta V_s = V_0 \cdot \left(2 \cdot \frac{\Delta D}{D_0} + \frac{\Delta l}{l_0} \right) \quad (4.30)$$

Nyní odvodíme závislost změny délky a změny průměru na změně α / β , kde β je úhel mezi spirálou příze či drátu a směrem kolmým k ose hadice.



Obr. 4. 4.

Z obr. 4.4. vyplývá

$$\varepsilon_o = \frac{D - D_o}{D_o} = \frac{\cos \beta - \cos \beta_o}{\cos \beta_o} \quad (4.31)$$

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_o}{l_o} = \frac{\sin \beta - \sin \beta_o}{\sin \beta_o} \quad (4.32)$$

kde L - délka vlákna odpovídající stoupání šroubovice

dosadíme-li (4.31) a (4.32) do (4.30) dostaneme

$$\Delta V_s = V_o \left(2 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \beta_o} - \frac{\sin \beta}{\cos \beta_o} - 3 \right) \quad (4.33)$$

Dále byla odvozena [2] závislost změny úhlu β na působícím tlaku kde

$$\beta = \beta (L, h, n, d, t, G_p, p)$$

kde L - délka vlákna odpovídající stoupání šroubovice

h - celková tloušťka pryžokordové stěny

n - počet vrstev kordových vložek

d - průměr nitě (drátu)

t - rozteč nití

G_p - modul pružnosti pryže

p - vnitřní přetlak

Závislost $\beta = f(p)$ byla odvozena z podmínky minima celkové energie systému. Z výpočtu je zřejmé, že změna objemu způsobena deformací stěny hadice je vedle působícího tlaku závislá též na materiálových a konstrukčních parametrech hadice

potom můžeme psát

$$\Delta V_s = \Delta V_s (\beta_s, L, h, n, d, t, G_p, \Delta p) \quad (4.34)$$

Výpočet ΔV_s byl shrnut do programu.

4. 4. 1. 1. S h r n u t í a z á v ě r v ý p o č t u

Uvedený teoretický výpočet vychází z určitých předpokladů, které však jsou splněny pouze do určité míry. Především je to předpoklad rovinné napjatosti. Napjatost můžeme považovat za rovinnou jen v těch případech, kdy tloušťka stěny hadice h je značně menší než průměr hadice D . . V těch případech, kdy $h \rightarrow \frac{D}{2}$ vzniká hadicí radiální složka napětí, kterou již nelze zanedbat a rovněž obvodové napětí není možno považovat za konstantní po celé tloušťce stěny.

Dalším předpokladem je to, že se stěna hadice skládá z pryžokordových kosočtverečných elementů a že celková deformace probíhá deformací těchto elementů.

Velkým nedostatkem této metody je nutná znalost parametrů hadice uvedených v (4.34). Tyto parametry výrobce neudává a lze je zjistit jen velmi obtížně.

4. 4. 2. V ý p o č e t o b j e m o v ý c h z m ě n v z á v í s l o s t i n a z m ě n ě d ě l k y a v n ě j š í h o p r ů m ě - r u h a d i c e

Budeme-li uvažovat hadici jako tenkostěnnou, můžeme říct, že se bude vnitřní průměr měnit stejně jako průměr vnější. Tento předpoklad lze vyslovit na základě toho, že

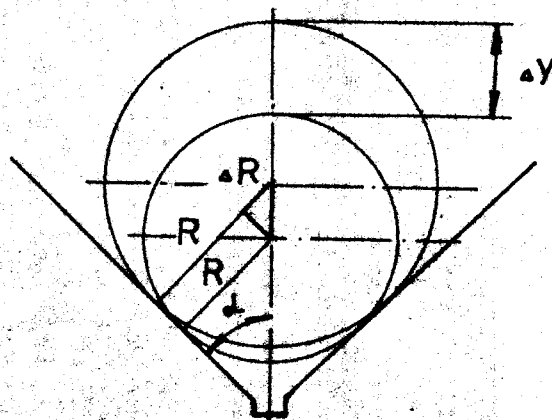
hlavní tlakové napětí přenáší tlaková vložka, kterou vzhledem^k její tloušťce můžeme uvažovat jako tenkostěnnou. Z toho lze předpokládat, že se obal i duše budou měnit stejně. To vedlo k metodě zjišťování objemových změn proměřením geometrických parametrů hadice.

Změny vnějšího průměru a délky hadice naměřené při statickém zatížení hadice vnitřním přetlakem byly použity pro výpočet změny objemu hadice, resp. pro výpočet poměrné změny objemu.

4. 4. 2. 1. S n í m á n í z m ě n y v n ě j š í h o p r ů m ě r u a d ě l k y h a d i c e

Změna vnějšího průměru byla snímána [3] pomocí indukčního snímače polohy IWT (RPT Dresden) s talířovým detektem (IS 2) , Z uspořádání držáku snímače vyplývá, že je nutno měřenou výchylku y přepočíst na změnu průměru D .

Přepočet výchylky y na změnu vnějšího průměru hadice D provedeme dle obr. 4.5.



Obr. 4.5.

Změna měřena snímačem y je dána změnou poloměru R a posunutím středu kružnice y .

$$\Delta y = \Delta R + y \quad (4.35)$$

Posunutí středu kružnice y lze psát z obr. 4.5.

$$y = \Delta R \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \quad (4.36)$$

Po dosazení (4.36) do (4.35) dostaneme

$$\Delta y = \Delta R \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha} \right) \quad (4.37)$$

Odkud lze vyjádřit změnu poloměru, resp. průměru hadice

$$\Delta D = 2 \cdot \Delta R = 2 \cdot \frac{\Delta y}{1 + \frac{1}{\sin \alpha}} \quad (4.38)$$

Pro úhel $\alpha = 45^\circ$ je $\sin \alpha = \frac{\sqrt{2}}{2}$, pak změna průměru

$$\Delta D = 0,828\,427 \cdot \Delta y \quad (4.39)$$

Změna délky hadice byla snímána indukčním snímačem polohy (IS 1) INT 302 (RFT Dresden). Celkové uspořádání je patrné z obr. 4.6. Jednotlivé úrovně přetlaku byly dosahovány nastavením tlakového ventilu VT, při nízkých úrovních přetlaku v kombinaci se škrtícím ventilem VS. Záznam hodnot ΔD a Δl byl proveden na oscilografu 8LS-1 (RFT Dresden), který byl použit z měření dynamických vlastností hadice. Hadice byla při měření pložena ve vedení, které zaručovalo její přímost.

4. 4. 2. 2. V ý p o č e t z m ě n y g e o m e t r i c - k é h o o b j e m u h a d i c e

Původní objem hadice V , daný její geometrií, t.j. vnějším průměrem D a délkou l včetně koncovek, se při změně průměru ΔD a zkrácení hadice Δl vlivem vnitřního přetlaku p zvětší o hodnotu ΔV .

$$[V + \Delta V]_p = \left[\frac{\pi}{4} (D + \Delta D)^2 (1 - \Delta l) \right]_p \quad (4.40)$$

Po roznásobení a vytknutí hodnoty $\frac{\pi}{4} D^2 l = V$ dostaneme

$$[V + \Delta V]_p = \left\{ \frac{\pi}{4} D^2 l \left[1 + 2 \left(\frac{\Delta D}{D} \right) + \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^2 - \left(\frac{\Delta l}{l} \right) - 2 \left(\frac{\Delta D}{D} \right) \left(\frac{\Delta l}{l} \right) - \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^2 \left(\frac{\Delta l}{l} \right) \right] \right\}_p \quad (4.41)$$

Označme

$$\left(\frac{\Delta D}{D} \right)_p = \bar{D} \quad - \text{poměrná změna vnějšího průměru daná přetlakem } \Delta p \quad (4.42)$$

$$\left(\frac{\Delta l}{l} \right)_p = \bar{l} \quad - \text{poměrná změna délky daná přetlakem } \Delta p \quad (4.43)$$

Po dosazení (4.42) a (4.43) do (4.41) dostaneme vztah pro změnu objemu ΔV

$$[\Delta V]_p = \left\{ \frac{\pi}{4} D^2 l [2\bar{D} + \bar{D}^2 - \bar{l} - 2\bar{D}\bar{l} - \bar{D}\bar{l}^2] \right\}_p \quad (4.44)$$

Odkud pro změnu objemu poměrnou platí

$$(\nu)_p = \frac{[\Delta V]_p}{V} [\bar{D} (2 + \bar{D}) - \bar{l} (1 + \bar{D})^2]_p \quad (4.45)$$

Při zanedbání malých veličin druhého řádu a označení veličin, které jsou funkcemi přetlaku jako možno vztah (4.45) upravit do konečného tvaru

$$\nu(p) = 2 \bar{D}(p) - \bar{l}(p) \quad (4.46)$$

Základním předpokladem této metody je uvažování tlakové vložky jako tenkostěnné, t.j. zanedbáváme radiální napětí σ_r . Tento předpoklad však není zřejmě správný, což vyplývá z konstrukce hadice (podrobněji viz kap. 2.1.). Jestliže tedy budeme uvažovat hadici jako tlustostěnnou, pak změna vnitřního průměru bude větší než změna vnějšího průměru [4].

5. PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ A NÁVRH VHODNÉ MĚŘICÍ METODY

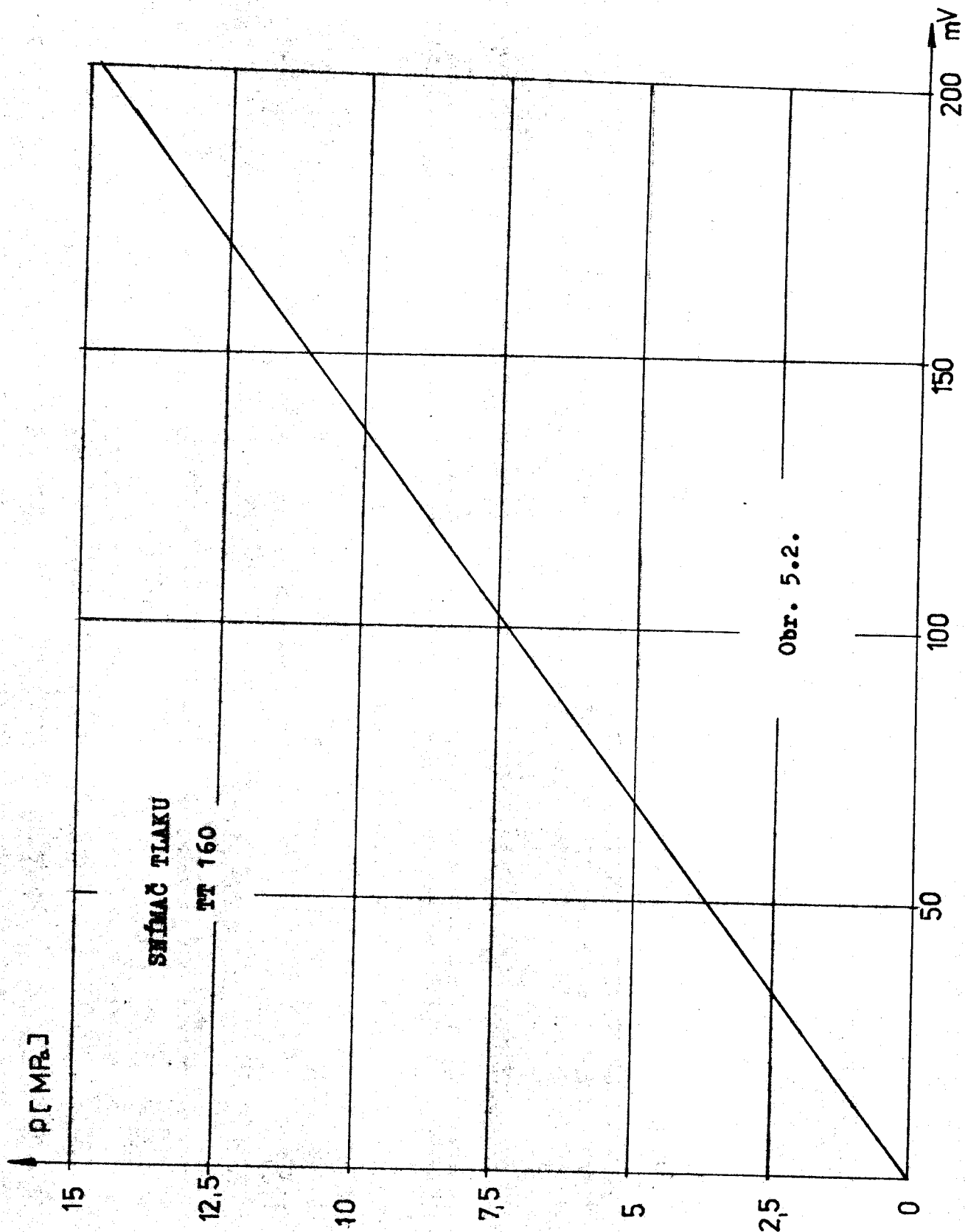
K praktickému ověření byly vybrány dvě základní metody zjišťování objemových změn hadicového vedení. Byla to metoda přímého měření objemových změn a metoda zjišťování objemových změn proměřením geometrických parametrů hadice.

5.1. Zjišťování objemových změn přímým měřením

Princip měření je podrobně uveden v kapitole 4.1.1. V našem případě byly objemové změny natlakované hadice odečítány na milimetrovém měřítku, které bylo umístěno na skleněné kapiláře. Tato kapilára byla umístěna na rozváděcí kostce. Uspořádání měřicího zařízení je vyfotografováno na obr. 5.1.

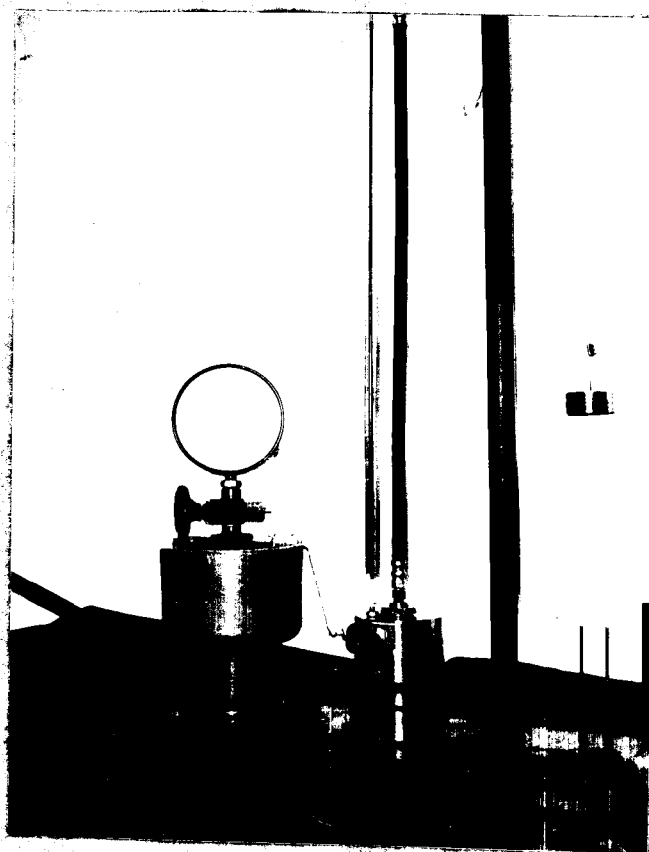
Pro snímání úrovně přetlaku v měřené hadici, resp. i trubce, byl připojen tříkanálový tenzometrický můstek UM 131 (Dresden). Úroveň přetlaku v hadici byla odečítána v mV. Použitý rozsah na můstku byl 4V a na stupnici 200 mV. Při cejchování byl tlakový snímač připojen na přesnou laboratorní pumpu závažnou ZT 300 (Mikrotechna Modřany). Ze zjištěných hodnot při cejchování byla pomocí metody nejmenších čtverců sestavena cejchovní křivka grafu 5.2. a byl vypočítán převod mezi odečítanou hodnotou ve voltech a tlakem

$$K_T = 75,56 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \cdot \text{V}^{-1}$$



Převodní konstanta pro sklěněnou kapiláru činí

$$K_v = 0,0136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$$



Obr. 5.1.

5. 1. 1. M ě ř e n á h a d i c e a k a p a l i n a

Při měření jsme použili středotlakou pryžovou hadici s vnitřním opletem z drátěného pletiva a s lisovanými koncovkami

hadice - 272 362 3 1021 10 FHT 028 406

Jmenovitá světlost $J_s = 10 \text{ mm}$, délka hadice $l = 1000 \text{ mm}$.

Hydraulická kapalina.

K měření byla použita hydraulická kapalina OT T 3 C.

Jde o minerální olej, jehož modul pružnosti $K_k = 1,66 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ [3].

5. 1. 2. V l a s t n í m ě ř e n í

Abychom mohli potvrdit možnost provedení této metody, byly změřeny tři ocelové trubky o různých jmenovitých světlostech (Js 6, Js 8, Js 10) a stejné délce $l = 1000 \text{ mm}$. Naměřené hodnoty pak byly srovnány výpočtem a stanovena % chyba. Naměřené závislosti ΔV na Δp byly vyneseny pro jednotlivé trubky do grafů, viz obr. 5.3., 5.4., 5.5. Jak je z obrázků patrné, závislosti u jednotlivých ocelových trubek jsou lineární. Víme, že lze hodnotu deformace ocelové trubky matematicky vyčíslit z již uvedeného vztahu:

$$\Delta V = \Delta V_k + \Delta V_r = V_0 \cdot \left(\frac{1}{K_k} + \frac{d}{E \cdot s} \right) \cdot \Delta p$$

Při známých parametrech $K_k = 1,66 \cdot 10^3 \text{ MPa}$, $d = 10 \text{ mm}$, $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, $s = 1 \text{ mm}$, lze spočítat deformaci trubky o délce $l = 1000 \text{ mm}$, např. při přetlaku 10 MPa .

a) trubka Js = 6 mm

$$\Delta V_k = \frac{V_0}{K_k} \cdot \Delta p = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot K_k} \cdot l \cdot \Delta p = 170,3 \text{ mm}^3$$

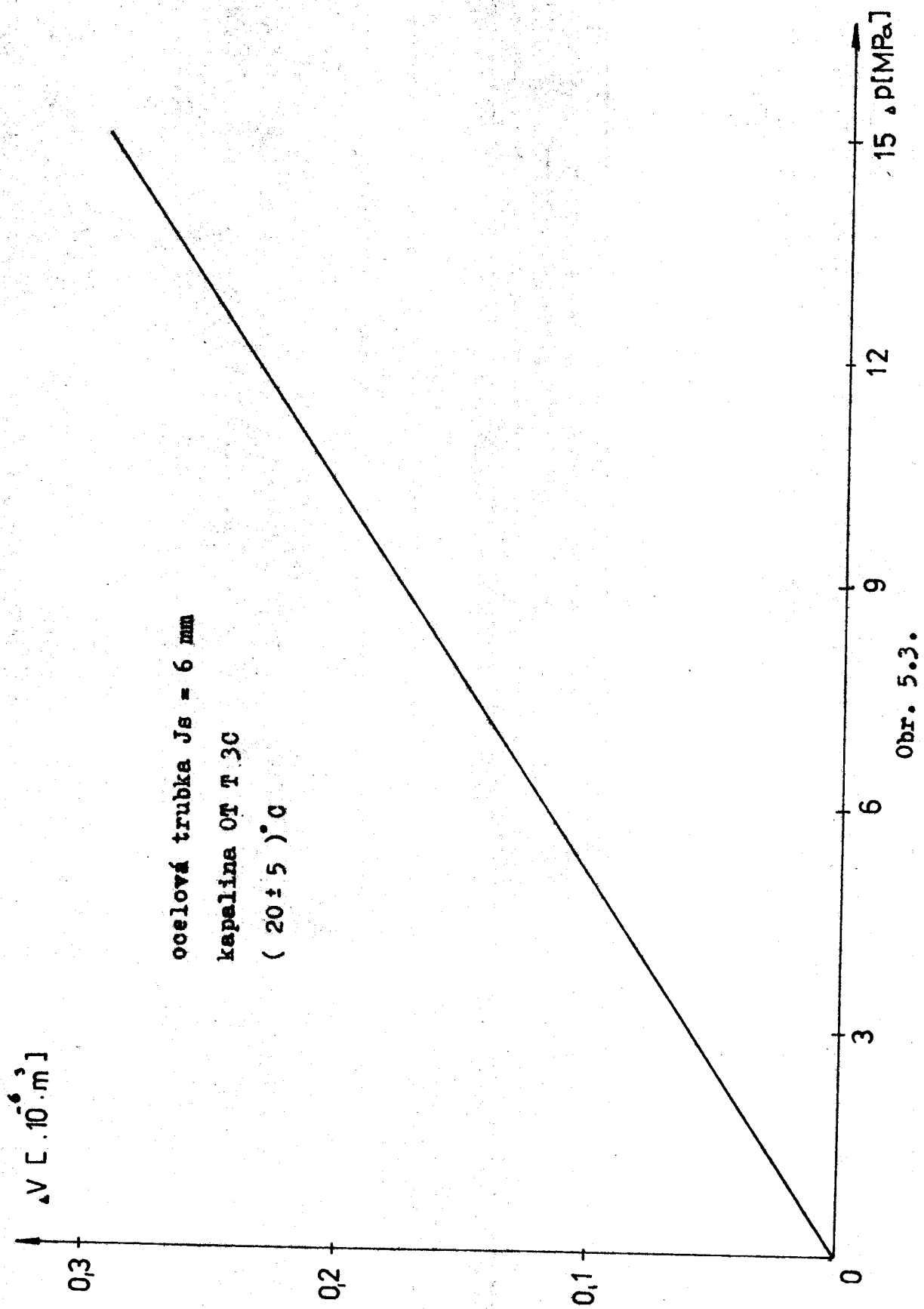
$$\Delta V_r = V_0 \cdot \frac{d}{E \cdot s} \cdot \Delta p = 8,1 \text{ mm}^3$$

$$\Delta V = \Delta V_k + \Delta V_r = 178,4 \text{ mm}^3$$

v grafickém záznamu činí hodnota

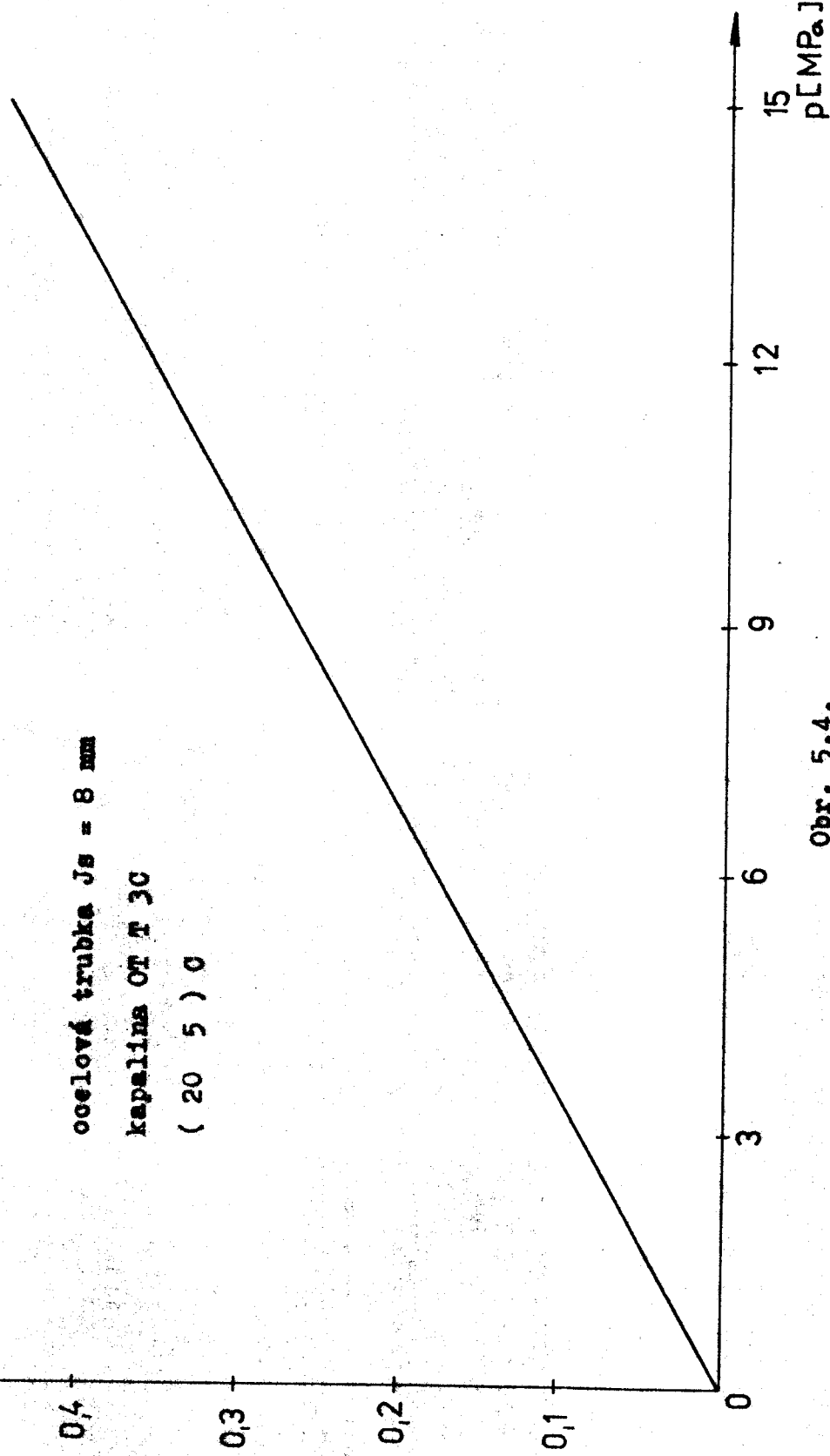
$$\Delta V = 194,6 \text{ mm}^3$$

z čeho vyplývá chyba $\epsilon_a = 8,3 \%$



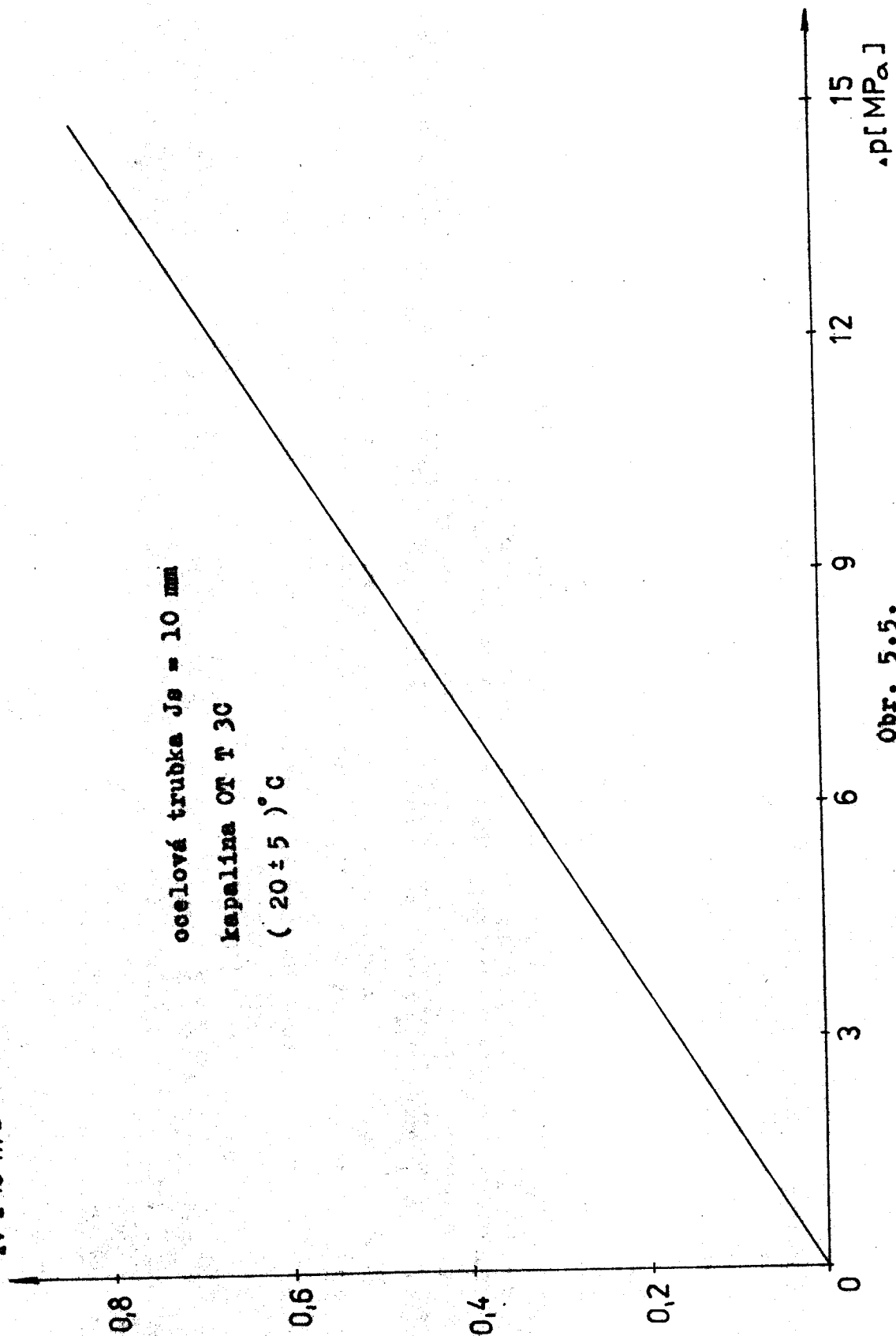
$\Delta V [10^{-6} m^3]$

ocelová trubka $J_s = 8 \text{ mm}$
kapalina OT T 3C
(20 5) 0



Obr. 5.4.

$\Delta V [10^{-6} \text{ m}^3]$



ocelová trubka Js = 10 mm

kapalina OT T 30

(20 ± 5) °C

Obz. 5.5.

b) trubka Js = 8 mm

$$\Delta V_k = 302,8 \text{ mm}^3$$

$$\Delta V_r = 19,2 \text{ mm}^3$$

$$\Delta V = 322 \text{ mm}^3$$

$$\text{z grafu } \Delta V = 297,9 \text{ mm}^3$$

$$\varepsilon_s = 8,5 \%$$

c) trubka Js = 10 mm

$$\Delta V_k = 473,13 \text{ mm}^3$$

$$\Delta V_r = 37,4 \text{ mm}^3$$

$$\Delta V = 510,53 \text{ mm}^3$$

$$\text{z grafu } \Delta V = 553 \text{ mm}^3$$

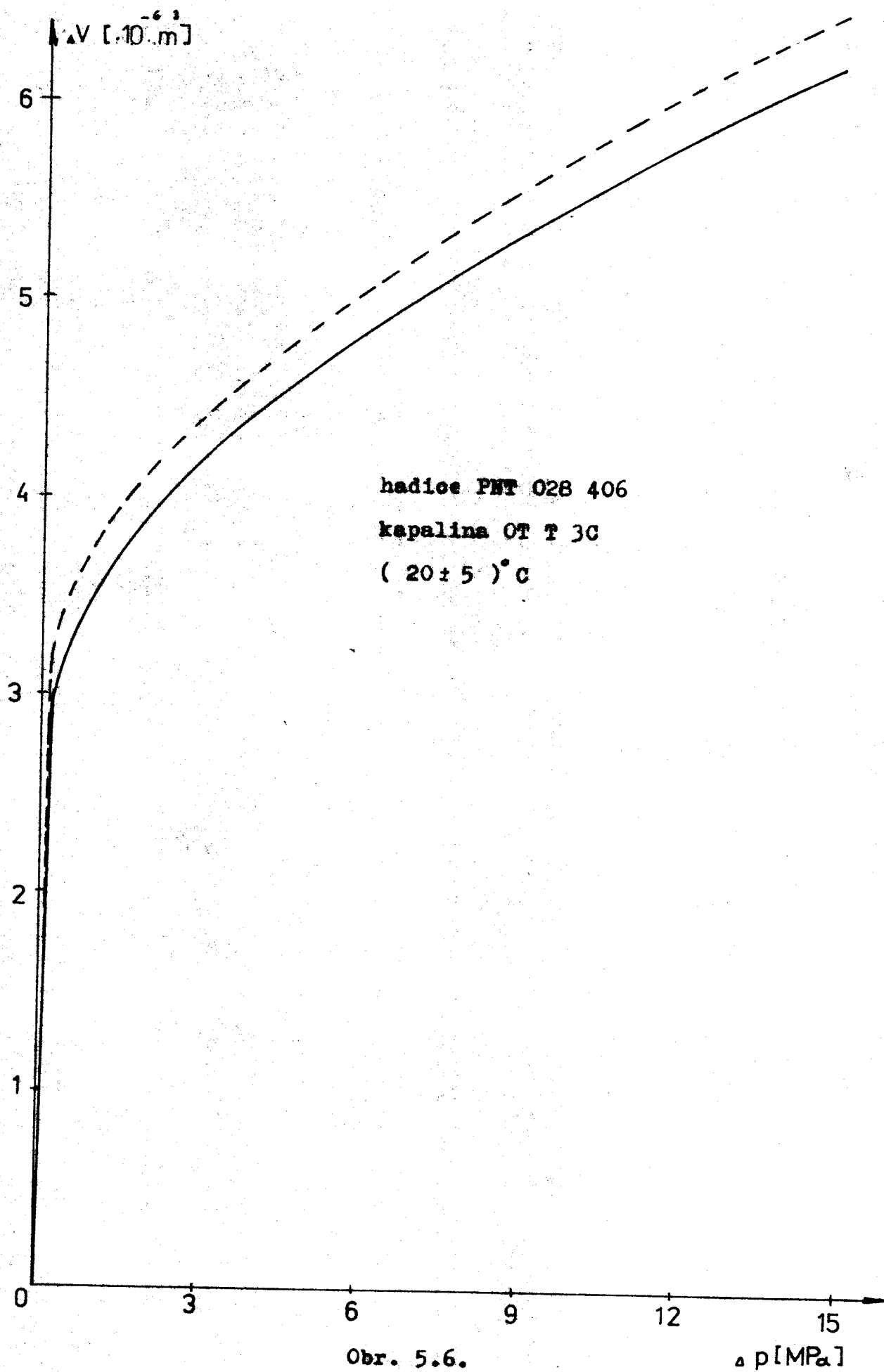
$$\varepsilon_s = 7,7 \%$$

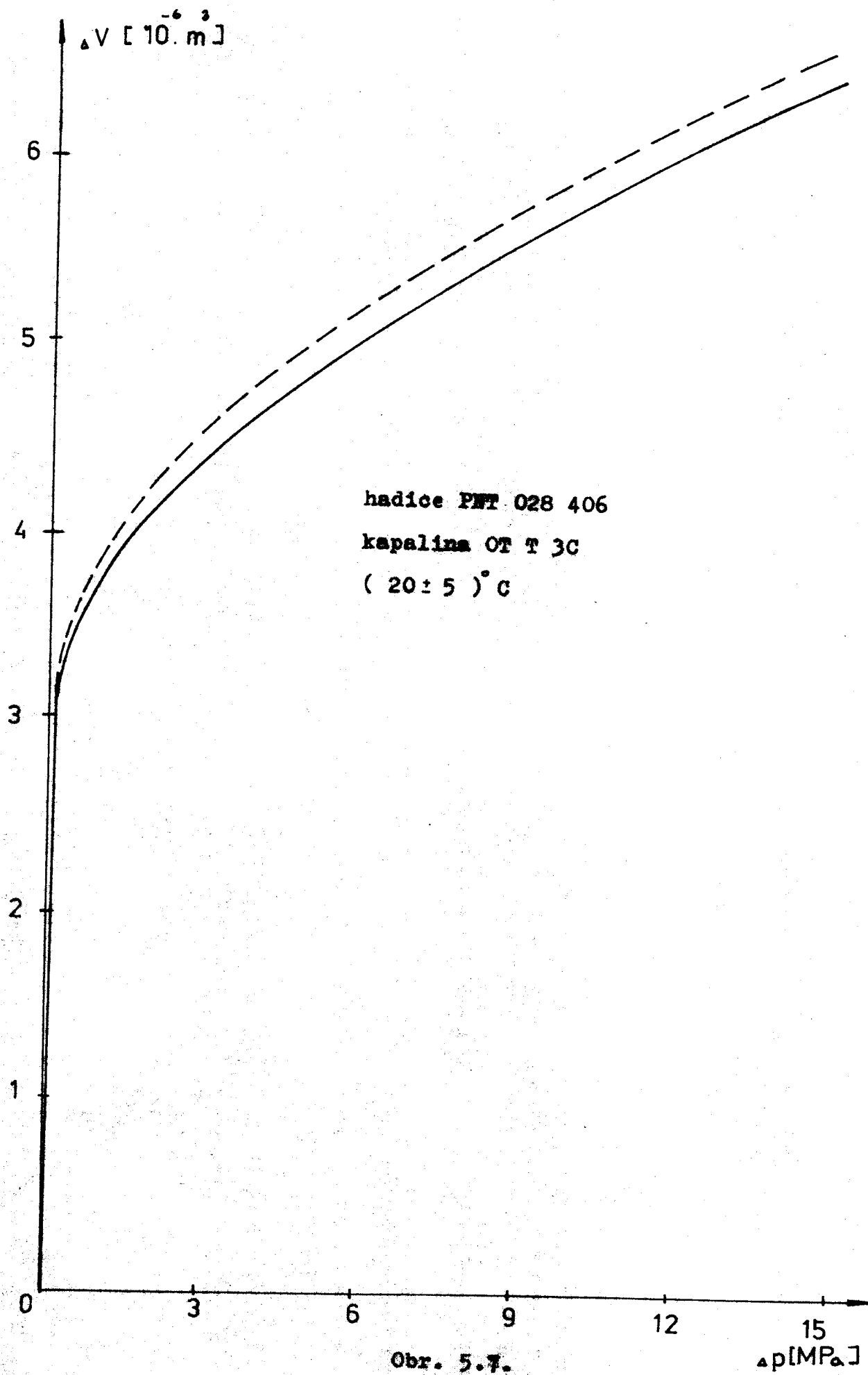
Vidíme, že grafický záznam je dostatečně přesný. Navíc lze průběh deformace ocelové trubky považovat za průběh stlačení kapaliny. Deformace trubky totiž činí okolo 7 % celkové deformace. Vynesením této závislosti do grafů hadic si lze vytvořit představu o ovlivnění závislosti deformace hadice při zanedbání stlačitelnosti v ní uzavřeného objemu kapaliny.

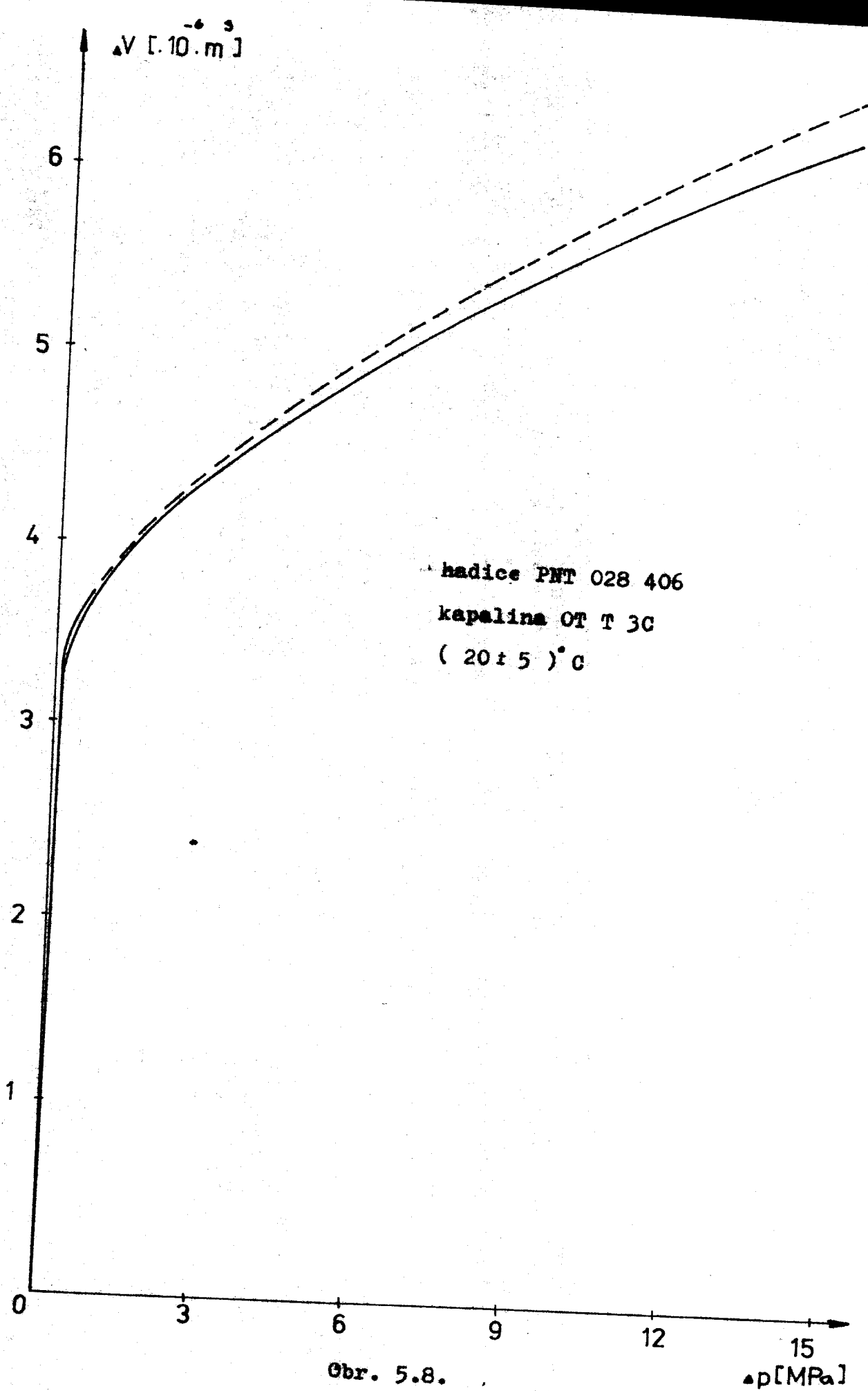
Z uvedených výsledků tedy vyplývá možnost měření objemových změn na námi sestaveném zařízení.

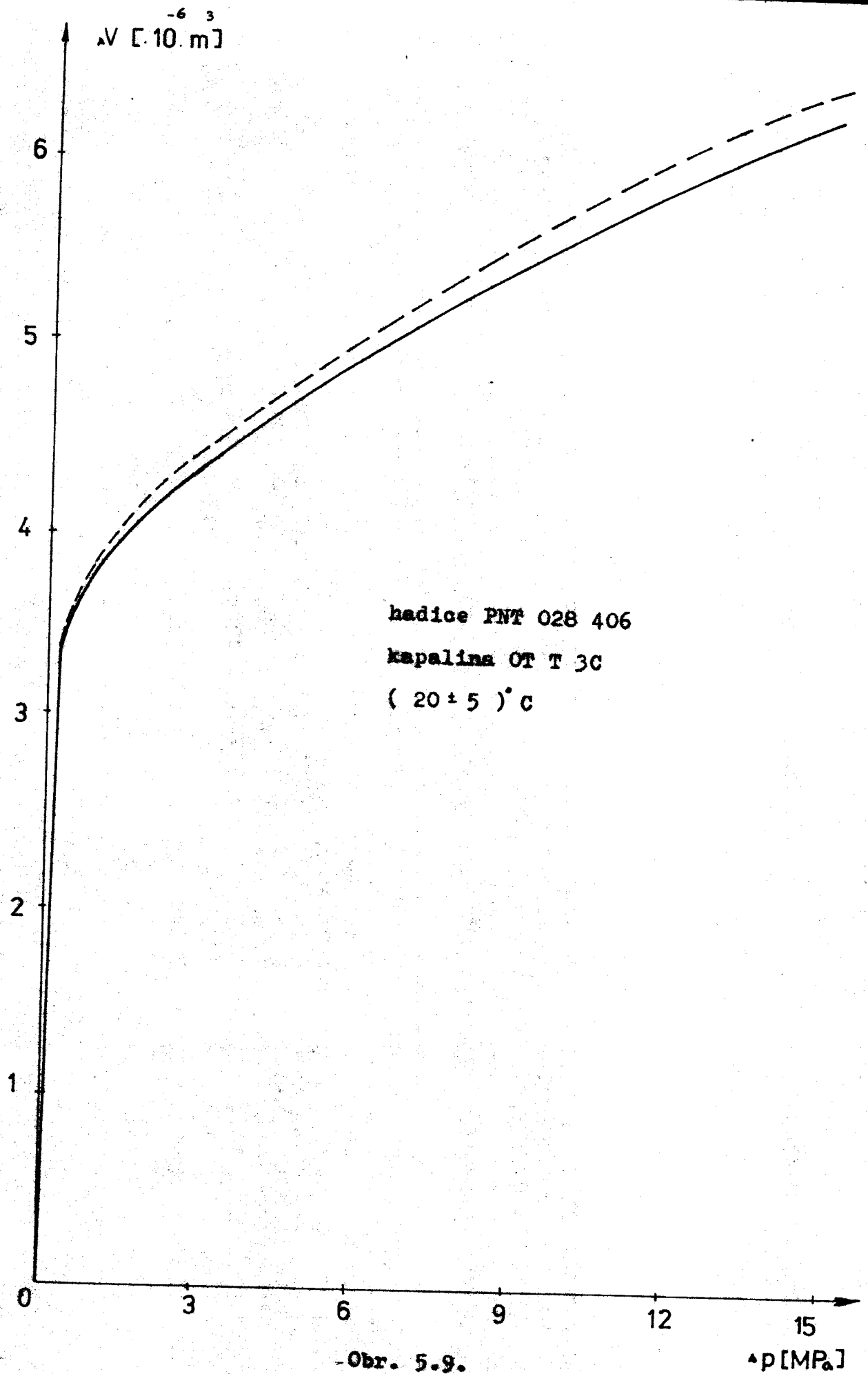
Při měření hadice byly ponechány jak mezi jednotlivými dílčími měřeními, tak i mezi jednotlivými měřeními různé časové intervaly.

- 1) Jednotlivá měření byla prováděna rychle za sebou a v závěru se nenechala hadice relaxovat - obr. 5.6.
- 2) Měření obdobné jako u 1) , ale mezi skončeným měřením a opětným natlakováním hadice byl ponechán časový interval ≈ 15 min. - graf 5.7.
- 3) Mezi jednotlivými dílčími měřeními byl ponechán interval ≈ 3 min., po skončení měření byla hadice ihned natlakována a měření se opakovalo - obr. 5.8.









- Obr. 5.9.

3) Mezi jednotlivými dílčími měřeními byl ponechán časový interval ≈ 3 min., mezi skončeným měřením a opětným natlakováním byl ponechán interval ≈ 15 min. - obr.5.9. Každé měření bylo prováděno 3x. Celkové časy měření jsou uvedeny v grafech.

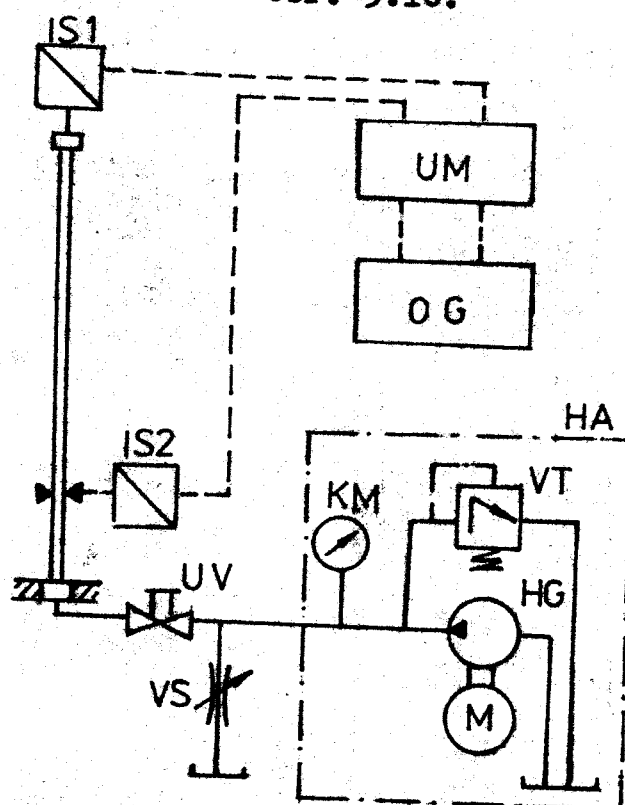
5. 2. Z j i š ť o v á n í o b j e m o v ý c h z m ě n p r o m ě ř e n í g e o m e t r i c k ý c h p a r a m e t r ů v e d e n í

Podrobný popis měření je uveden v kap. 4.4. Ke snímání vnějšího průměru jsme použili indukčního snímače polohy IWT 102 (RFT Dresden) s talířovým dotekem. Změna vnějšího průměru stejně jako úrovně přetlaků byla odečítána v mV na tříkanálovém tenzometrickém můstku UM 131 (Dresden). Ke snímání přetlaku byl použit tenzometrický tlakový snímač TT 160. Tento snímač bylo nutné ocejchovat. Změna délky měřené hadice byla snímána posuvným měřítkem. Měřená hadice byla uložena ve vedení, které zaručovalo její přímost. Celkové uspořádání bylo vyfotografováno v obr. 5.10. Při měření byla použita stejná hadice i kapalina jako v předchozím měření.

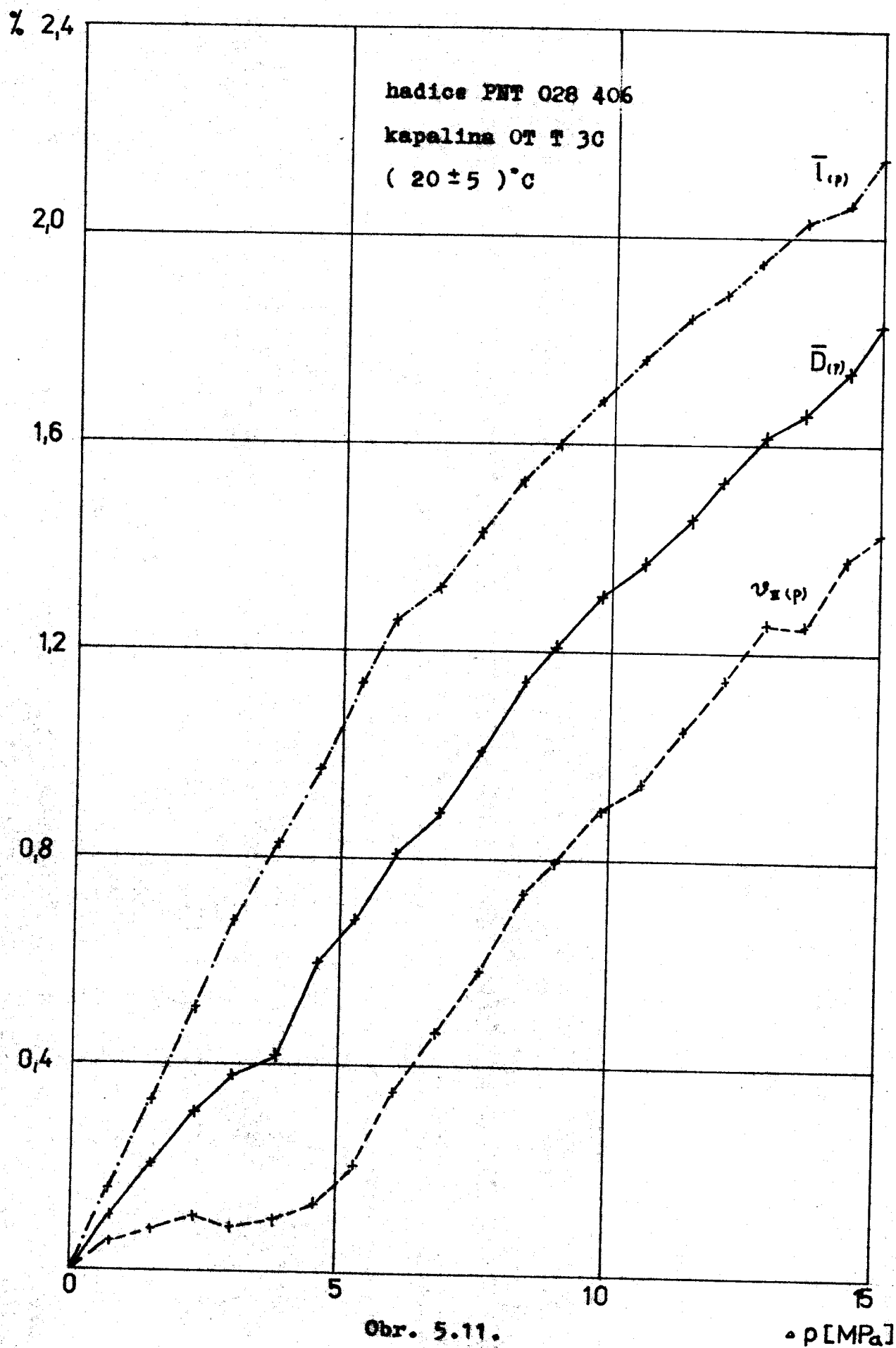
Měření bylo prováděno dvěma způsoby. Změny délky a vnějšího průměru byly snímány jak při zvyšování úrovně přetlaku (obr. 5.11., 5.12., 5.13.), tak při snižování úrovně přetlaku (obr. 5.14, 5.15.). Do grafů jsou vyneseny poměrné hodnoty objemu v_x , délky l a průměru $\bar{D}$.

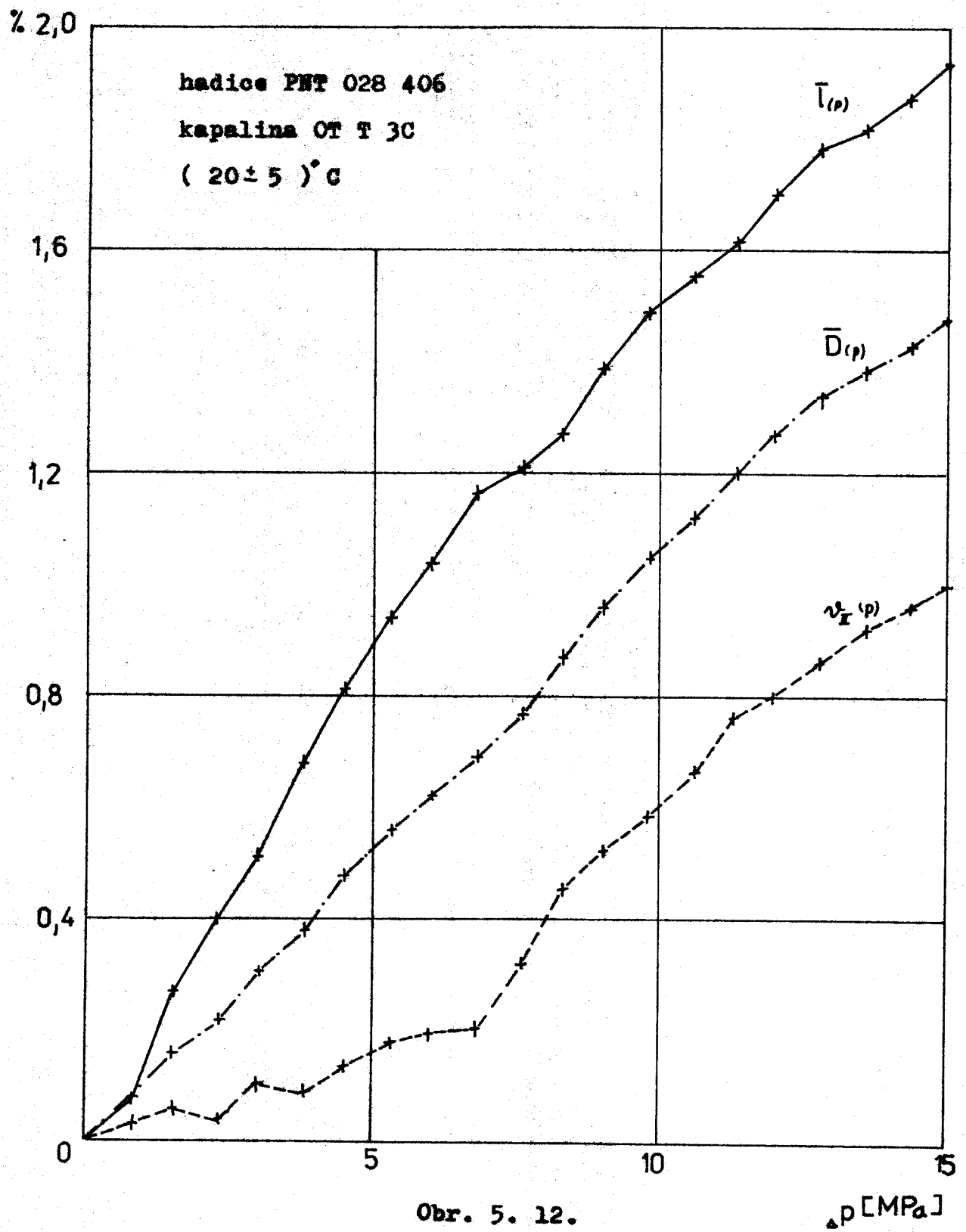


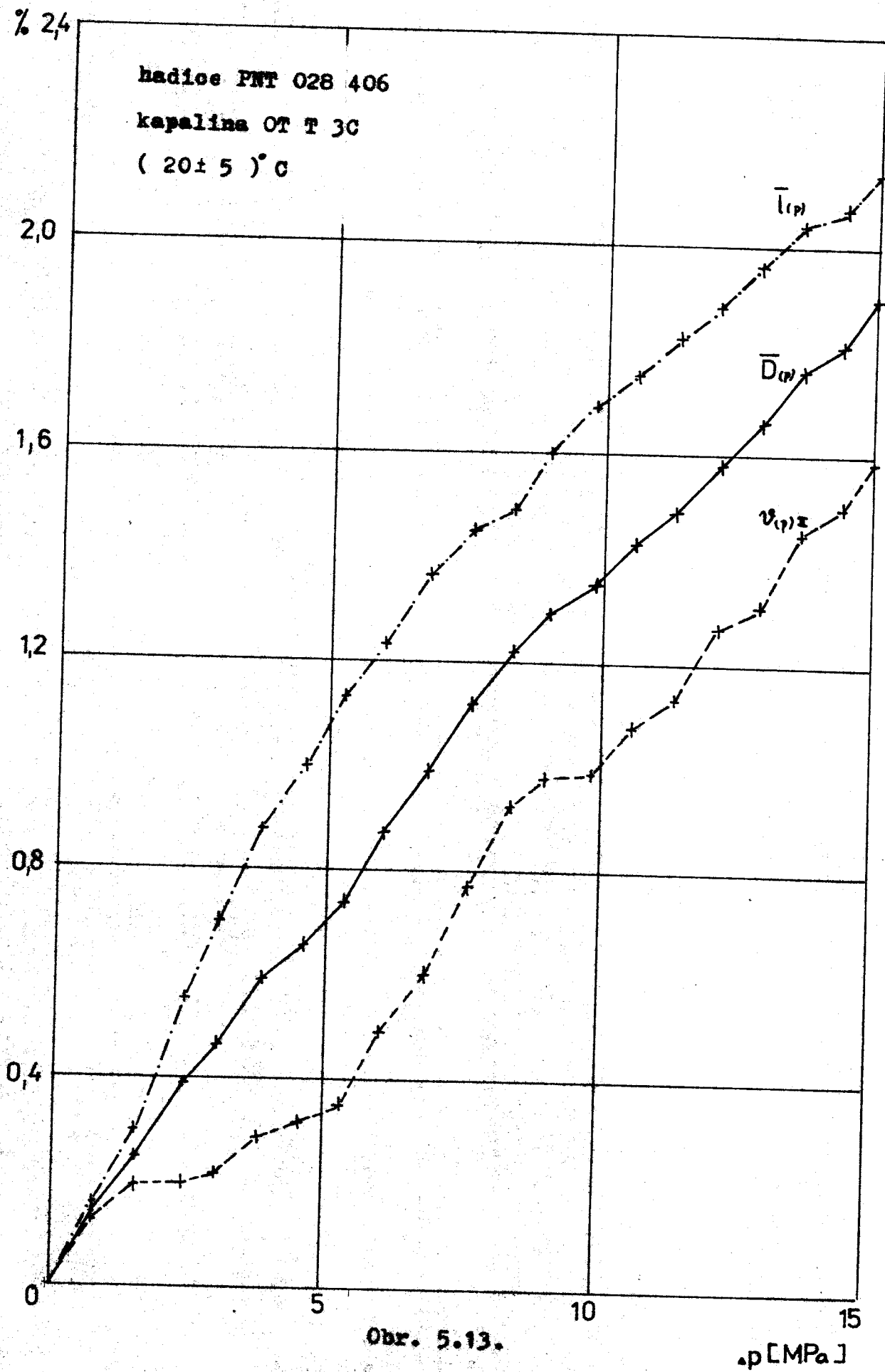
Obr. 5.10.



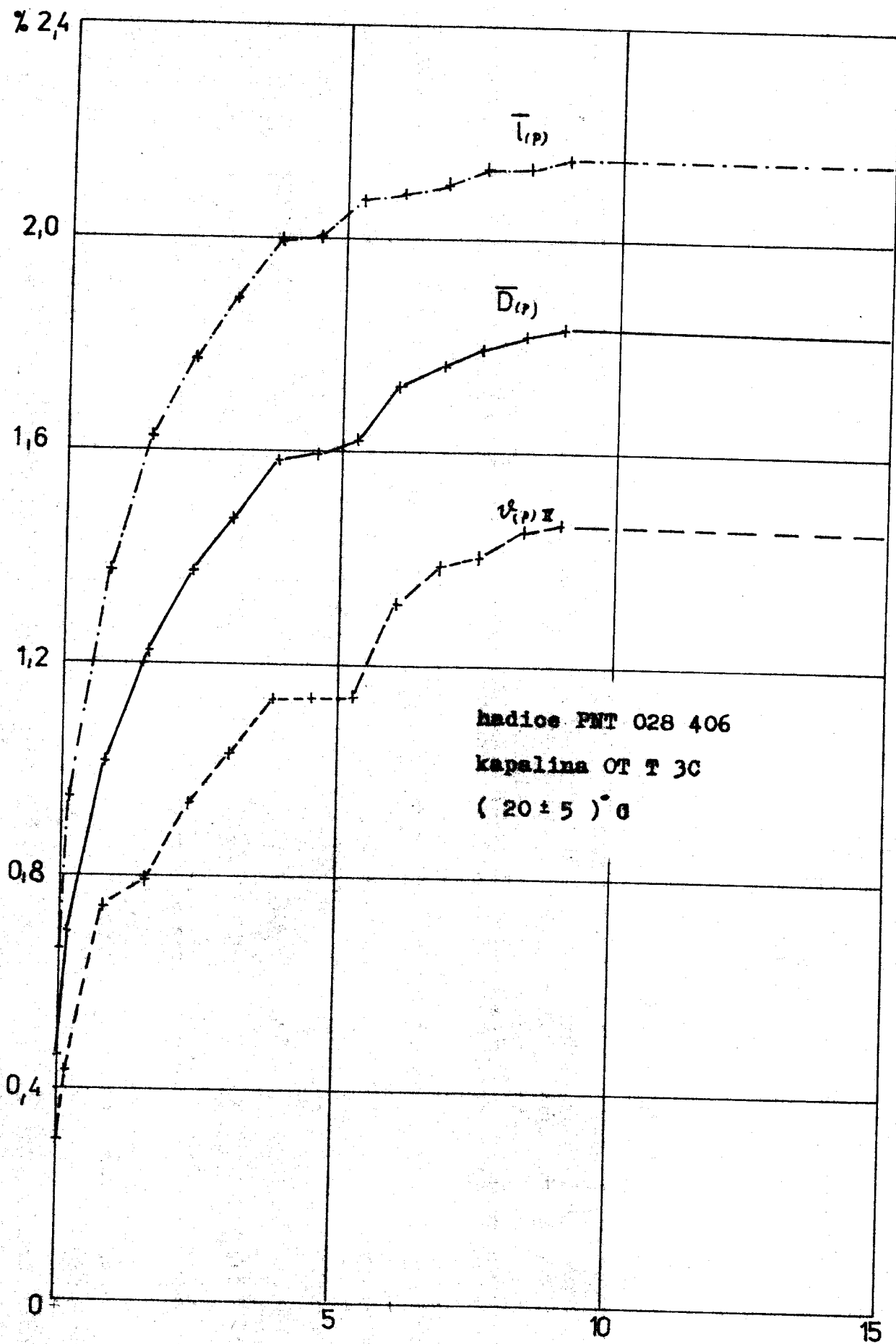
Obr. 4. 6.





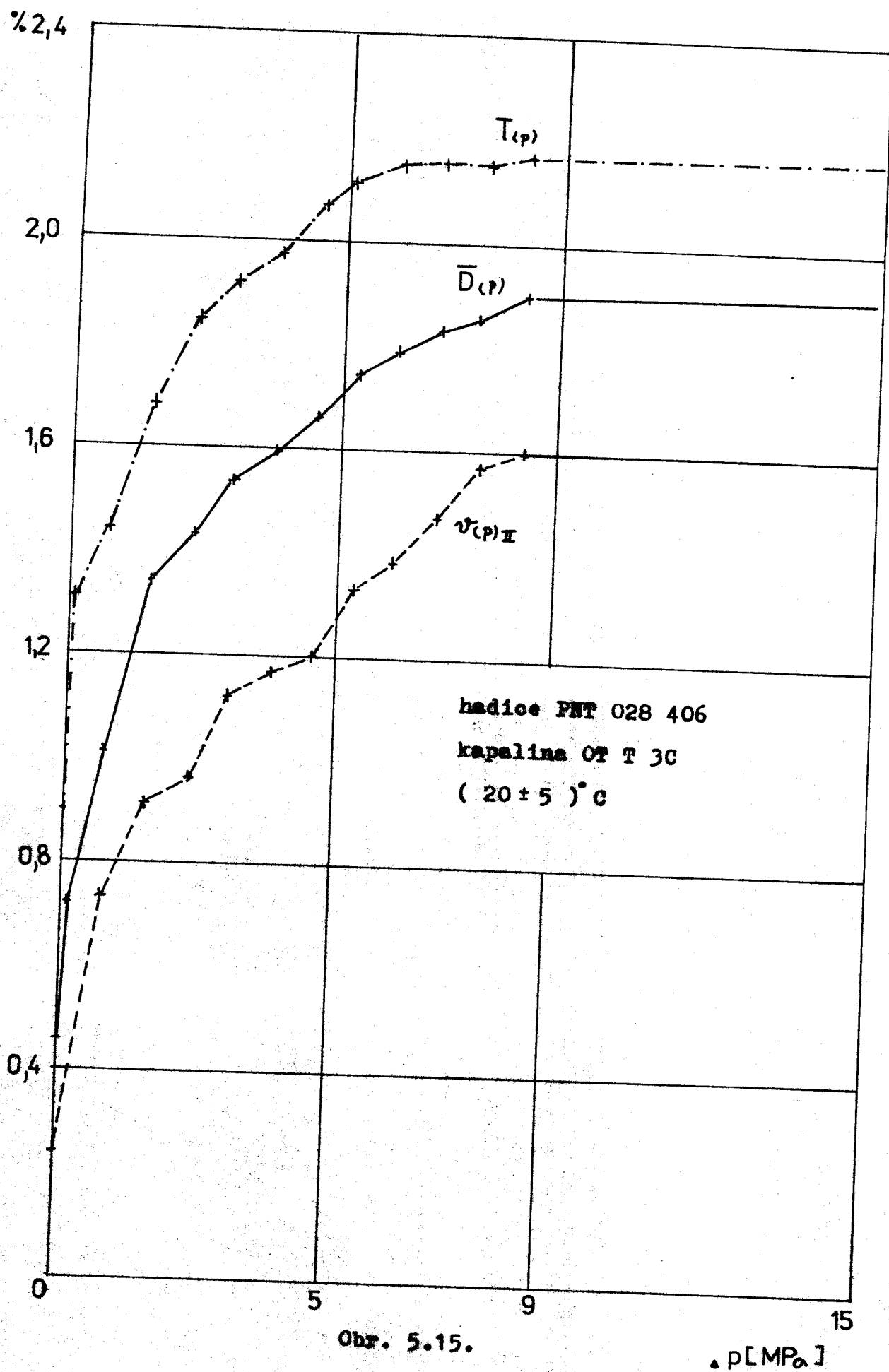


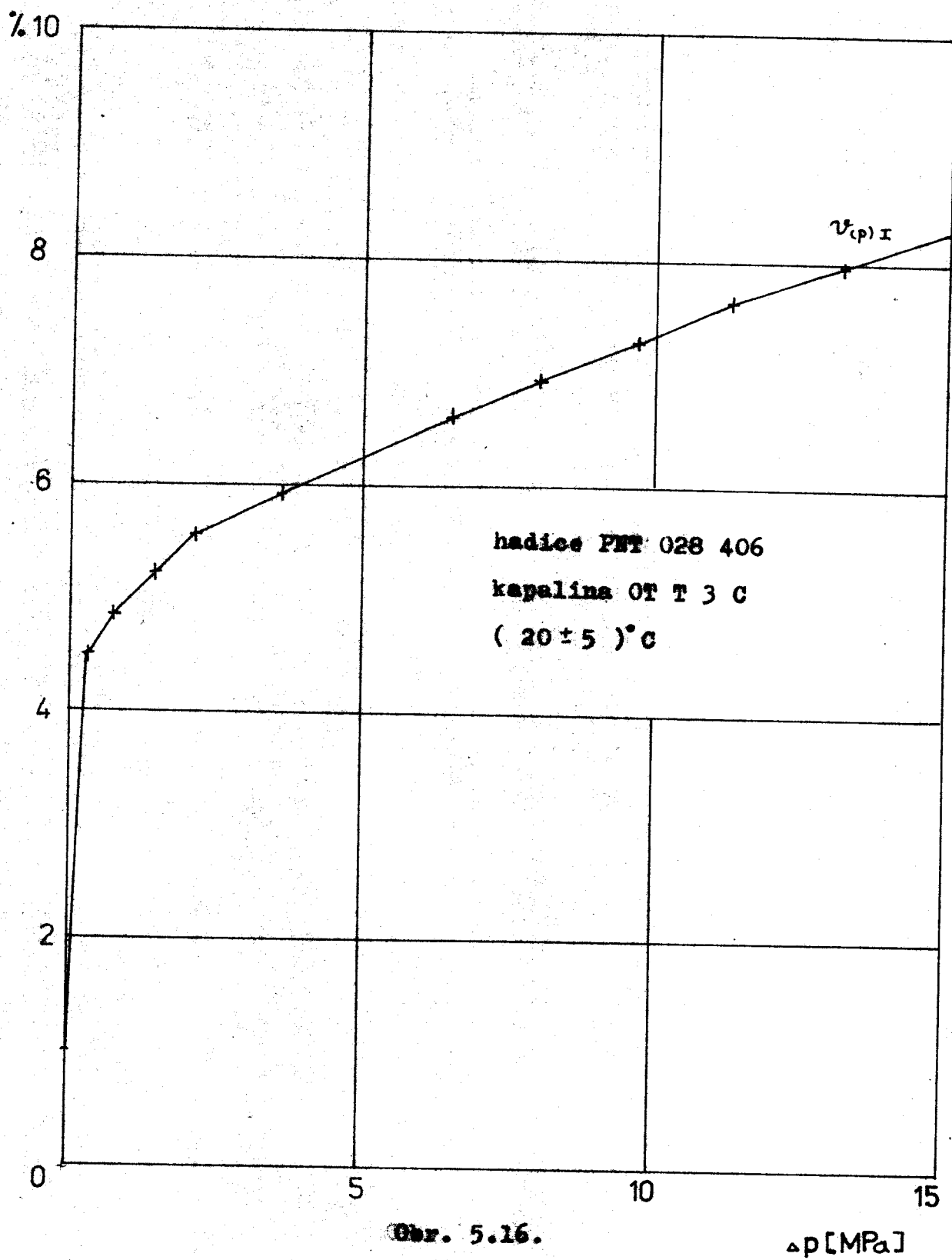
Obz. 5.13.



Obr. 5.14.

Δp [MPa]





obr. 5.16.

6. Z Á V Ě R

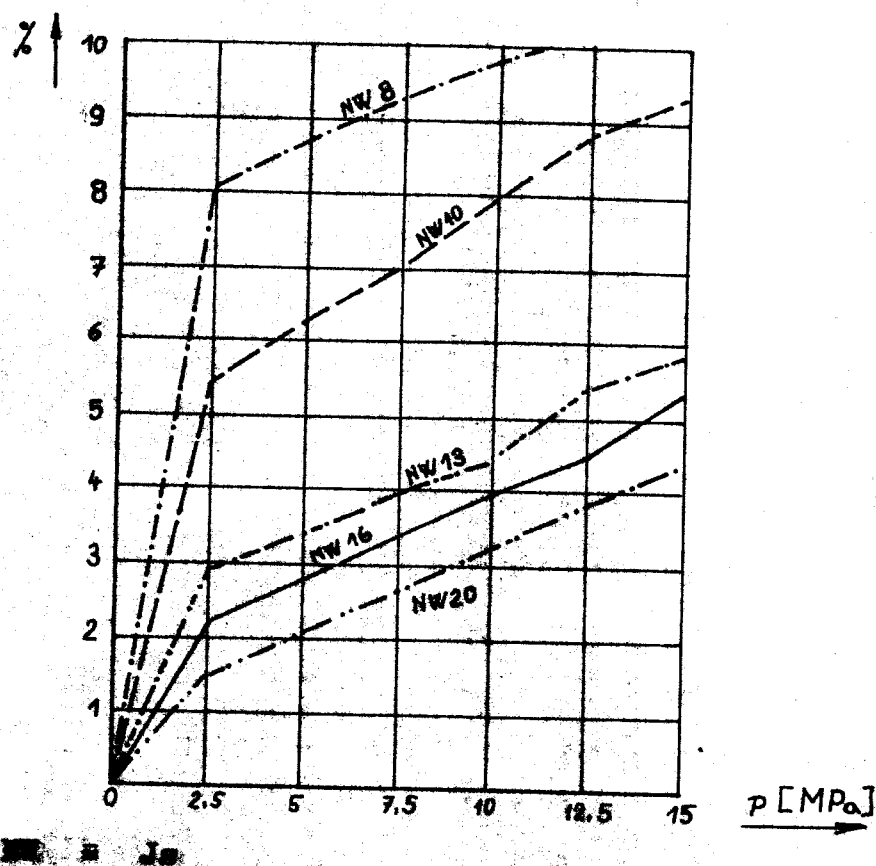
Všimneme-li si výsledků metody přímého měření objemových změn - dále metody I, vidíme, že průběhy změny ΔV v závislosti na Δp jsou u všech měření téměř naprosto stejné. Můžeme tedy říct, že časový interval mezi jednotlivými dílčími měřeními nemá na tvar výsledné charakteristiky podstatný význam. Tato metoda ^{je} poměrně rychlá, ale její nevýhodou je nutná znalost vlastností použité kapaliny. Tvar křivky je zvláště při nižších tlacích ovlivněn nerozpuštěným vzduchem, který se v kapalině projevuje ve formě vzduchových bublinek. Tato metoda také neumožňuje měření objemových změn při stoupajícím přetlaku v měřené hadici.

Po zhodnocení výsledků metody, která využívá proměření geometrických parametrů hadice ke zjišťování objemových změn - dále metoda II, vidíme, že průběhy závislostí při stoupajícím přetlaku a klesajícím přetlaku se od sebe výrazně liší. Jestliže porovnáme tvar průběhu V_1 z obr. 5.16. s tvarem průběhu V_2 u metody II při klesání přetlaku v měřené hadici, je patrné, že tvary závislostí jsou podobné.

U metody II se při snižování přetlaku v hadici začínal měnit vnější průměr a délka hadice až při hodnotě tlaku okolo 9 MPa. V oblasti vyšších tlaků se chovala hadice jako velmi tuhá. To je možno vysvětlit dlouhodobou deformací materiálů jednotlivých vrstev hadice. Ten se po stlačení chová jako kompaktní. Určitý vliv na chování hadice může mít též stárání hadice, protože materiál po určité době ztrácí svou původní pružnost. Průběhy jak u metody I, tak u metody II, při snižování přetlaku nám tedy nedávají přehled o chování jednotlivých částí hadice.

Porovnáme-li průběhy poměrných objemových změn metody I a poměrné objemové změny metody II (obr. 5.16) co do ve-

likosti, vidíme, že $\nu_{max, I}$ u metody I se pohybuje v rozmezí (8 - 9) %, kdežto u metody II se $\nu_{max, II}$ pohybuje okolo 2,2 %. To lze vysvětlit tím, že u metody II jsme uvažovali změnu vnitřního průměru stejnou jako změnu průměru vnějšího. Tento předpoklad byl vysloven na základě uvažování tlakové vložky jako tenkostěnné. To však nelze, protože vezmeme-li v úvahu stavbu hadice, je nutno ji uvažovat jako tlustostěnnou. Jak již bylo řečeno a jak vyplývá z teorie pružnosti a pevnosti, u tlustostěnných nádob se mění vnitřní průměr o hodnotu větší než průměr vnější. Jestliže porovnáme průběh závislosti poměrné objemové změny u metody I s katalogem firmy Aeroquip, viz obr. 6.1., pro stejný typ hadice, je patrné, že naměřené hodnoty se co do velikosti pohybují ve stejných mezích.



Obr. 6.1.

Budeme-li uvažovat poměrnou objemovou změnu v_z u metody I co do velikosti jako správně naměřenou hodnotu a víme-li, že u metody II dokážeme přesně změřit změnu délky hadice při tlakovém zatížení, můžeme ze vzorce (4.46) psát:

$$\Delta D_v = \frac{\bar{I} + v_z}{2} \cdot D \quad (6.1.)$$

a odtud potom lze porovnáním vypočteného a změřeného vnějšího průměru zjistit změnu vnitřního průměru.

Byl provedenkušební výpočet pro různé velikosti vnitřního tlaku v měřené hadici.

a) $p = 6 \text{ MPa}$

$$\Delta D_v = \frac{\bar{I} + v_z}{2} \cdot D = \frac{0,0123 + 0,065}{2} \cdot 20 = 0,773 \text{ mm}$$

$$\Delta D_o = \bar{D} \cdot D = 0,0087 \cdot 20 = 0,174 \text{ mm}$$

$$x = \frac{\Delta D_v}{\Delta D_o} = 4,4$$

kde

ΔD_v - změna vnějšího průměru pro v_z

ΔD_o - změna vnějšího průměru naměřená při met. II

$\bar{I}$ - poměrná změna délky

$\bar{D}$ - poměrná změna průměru

x - hodnota udávající, kolikrát více se změní vnitřní průměr d než vnější D

Výpočet byl proveden pro různé úrovně tlaku.

$p = 2 \text{ MPa}$	$\Delta D_v = 0,595 \text{ mm}$	$\Delta D_o = 0,0929 \text{ mm}$	$x = 9,3$
$p = 9 \text{ MPa}$	$\Delta D_v = 0,89 \text{ mm}$	$\Delta D_o = 0,26 \text{ mm}$	$x = 3,1$

$p = 12 \text{ MPa}$	$\Delta D_v = 0,962 \text{ mm}$	$\Delta D_o = 0,312 \text{ mm}$	$x = 3,1$
$p = 15 \text{ MPa}$	$\Delta D_v = 1,04 \text{ mm}$	$\Delta D_o = 0,38 \text{ mm}$	$x = 2,7$

Z uvedených výsledků je zřejmé, že se při nižších tlacích mění vnitřní průměr daleko více než při tlacích vyšších, kdy se vedení stává již poměrně tuhé.

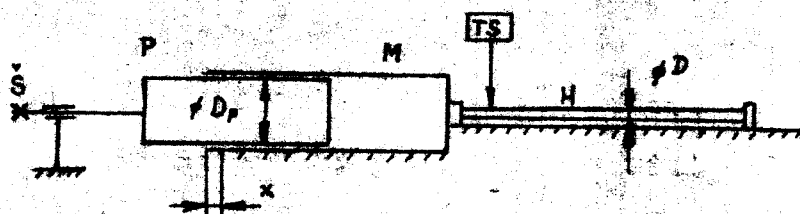
Nevýhodou této metody je to, že nám nedává přehled o chování jednotlivých částí hadice.

Při zvyšování přetlaku v hadici a přitom odečítání geometrických parametrů, nám získané závislosti dávají již možnost usoudit na chování se hadice. Jak je z grafů patrné, nejprve se deformuje duše, která dosedá na drátový opleť. Tato deformace je největší a probíhá do tlaků asi okolo 5 MPa. Potom, kdy již dosedla duše na drátový opleť, který přenáší téměř všechno tlakové zatížení, není deformace vnitřního průměru tak výrazná a průběh v_r je téměř lineární. Některé výkyvy v lineárním průběhu mohou nastat vlivem nehomogenosti materiálů. Při porovnání grafických výsledků metody II vidíme, že průběh v_r při snižování přetlaku v hadici je jiný než průběh v_r při zvyšování přetlaku. Projevuje se zde určitá hystereze, která je dána hysterezí materiálu hadice.

Z měření a provedených úvah vyplývá, že pro další měření bude výhodné dále pokračovat v metodě zjišťování objemových změn proměřením geometrických parametrů hadice. Tato metoda je velmi výhodná, protože zde není nutná znalost vlastností používané kapaliny. Výsledky nejsou tedy ovlivňovány nerozpuštěným vzduchem v kapalině, jako tomu bylo u metody přímého měření objemových změn. Pro další měření by bylo dobré použít tuto metodu při zvyšování přetlaku v hadici. Tento způsob nám totiž dává přehled o chování hadice, což je

velmi výhodné. Nedostatkem metody je neznalost již zmíněné relace mezi změnou vnějšího a vnitřního průměru. Tento nedostatek je nutno vyřešit.

Pro zjištění této závislosti byl navržen obvod, zobrazený na obr. 6.2.



Obr. 6.2.

Lapovaný píst P o známém průměru D_p je zatlačován pomocí šroubu do motoru M, pomocí čehož se v měřené hadici vytvoří přetlak, který je snímán tlakovým snímačem TS. Známeli tedy hodnotu posunutí pístu x a průměr D , můžeme vypočítat ΔV . Změnu délky hadice dokážeme změřit přesně. Při znalosti ΔV a D můžeme spočítat vnitřní průměr hadice a změněním vnějšího průměru pak usoudit na relaci mezi nimi. U tohoto obvodu bude nutné vyřešit ztráty objemu kapaliny, vzniklé netěsností mezi pístem a motorem. Vzhledem k tomu, že píst je lapován, budou tyto ztráty nepatrné. Tato metoda nám dává možnost proměřit hadice jak při stoupajícím, tak i při klesajícím přetlaku.

Jednou z možností zjištění změny vnitřního průměru hadice by bylo simulování přetlaku v hadici pomocí kalibrovaných trnů. Po zasunutí trnu do hadice, která by byla bez koncovek, by nebylo obtížné změřit jak vnitřní průměr, tak i vnějš-

Ší průměr a stanovit závislost mezi nimi.

Závěrem děkují všem vedoucím ústavů
a. ing. J. Čechovi a všem pracovníkům a. ing. J. Čech
duang Nglisnawati za trvalý zájem a podporu v průběhu.

P O U Ž I T Á L I T E R A T U R A

- [1] Hlavní směry hospodářského a sociálního rozvoje
ČSSR na léta 1981 - 1985. Příloha Rudého práva.
- [2] PAVLÍČEK Z.: Teoreticko-experimentální vyšetření
kapacitních vlastností hadicového vedení (Diplo-
mová práce). Liberec 1980 VŠST. Fakulta strojní.
- [3] ERNEST V.: Experimentální zjišťování objemových
změn hadicového vedení (Diplomová práce). Liberec
1981 VŠST. Fakulta strojní.
- [4] STRÍŽ B.: Pružnost a pevnost I. díl, první vydá-
ní, VŠST Liberec 1980.
- [5] Dny nové techniky o výrobě a použití hadic (Sber-
ník přednášek). Dům techniky ČSVTS Pardubice 1978.
- [6] DAO QUANG NGIEM: Základní vlastnosti vedení užité-
ho v hydraulických mechanismech. Liberec 1981, VŠST
fakulta strojní.
- [7] CERHA J.: Experimentální zařízení pro zjišťování
kapacitních vlastností vedení hydraulických mecha-
nismů. Sborník prací VŠST Liberec 1979.
- [8] Katalog firmy AERQUIP.

Závěrem děkuji svému vedoucímu diplomové práce
s. ing. J. Cechovi a svému konzultantovi s. ing. Dao
quang Nghiemuvi za trvalý zájem a podporu v mé práci.