

Stanovení součinitele odporu a relativní ekvivalentní délky armaturního prvku

Úvod:

Potrubí na dopravu tekutin (kapalin, plynů) jsou vybavena armaturními prvky, kterými se regulují průtoky (ventily, šoupata), mění směry toku (kolena, ohyby, odbočky), zabezpečuje se nerušená doprava (sací koše, zpětné klapky) apod.

Armaturní prvky kladou odpor proudění tekutin a zvyšují energetické nároky na jejich dopravu závisle na součiniteli odporu armaturního prvku a čtverci rychlosti proudění tekutiny. Proto se s nimi musí počítat při výpočtech dopravních tras.

Úkol:

1) Stanovit závislost a) ztrátové výšky h_{ztr} , b) ztrátového součinitele ζ a c) relativní ekvivalentní délky potrubí l_e / d armaturního prvku při hodnotě součinitele tření v potrubí $\lambda = 0,03$ na rychlosti proudění vody potrubím v a na Reynoldsově čísle Re formou tabulky a grafů (charakteristik armaturních prvků) v souřadných systémech $h_{ztr} - v$, $\zeta - v$, $l_e / d - v$, $h_{ztr} - Re$, $\zeta - Re$ a $l_e / d - Re$.

2) Porovnat stanovené hodnoty s hodnotami uváděnými v literatuře.

Teoretický úvod:

a) Ztrátovou výšku h_{ztr} a b) ztrátový součinitel armaturního prvku vypočteme z rovnic:

$$h_{ztr} = \zeta \frac{v^2}{2g} = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (R-1)$$

a

$$\zeta = \frac{2 \Delta p}{\rho_v v^2} \quad (R-2)$$

Protože tlakový odpor Δp armaturního prvku nezměříme přímo, vypočítáme jej z tlakové diference Δp hydrostatických tlaků způsobené rozdílem výšek Δh manometrické kapaliny o hustotě ρ_m a vody o hustotě ρ_v :

$$\Delta p = \Delta h (\rho_m - \rho_v) g \quad (R-3)$$

Také rychlost proudění vody v potrubím o průměru d nezměříme. Musíme ji vypočítat z průtoku \dot{V} změřeného rotametrem podle rovnice

$$v = \frac{4\dot{V}}{\pi d^2} \quad (R-4)$$

nebo pro průtoky menší než 1 000 l/hod z výšky hladiny h_d v danáidě pro výtoku dýzu o průměru 10 mm s hodnotou výtakového součinitele $\zeta = 0,814$:

$$v_d = 0,814 \sqrt{2g h_d} \quad (R-5)$$

Po dosazení z rov.(R-3) a (R-4) do rov.(R-2) a úpravě dostaneme pro ztrátový součinitel

$$\zeta = \frac{\pi^2 (\rho_m - \rho_v) d^4 g}{8 \rho_v} \cdot \frac{\Delta h}{\dot{V}^2} \quad (\text{R-6})$$

Pro naše potrubí o průměru $d = 38,1$ mm, manometrickou kapalinu chloroform ($\rho_m = 1488$ kg m⁻³ při teplotě 20 °C) dostaneme po dosazení do předchozí rovnice

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{(1488 - 998) \text{ kg m}^{-3}}{998 \text{ kg m}^{-3}} \cdot (38,1 \cdot 10^{-3} \text{ m})^4 \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2} \cdot \frac{\Delta h}{\dot{V}^2} = \\ &= 1,252 \cdot 10^{-5} \text{ m}^5 \text{ s}^{-2} \cdot \frac{\Delta h}{\dot{V}^2} \end{aligned} \quad (\text{R-7})$$

Při měření průtoků danaidou při otevřené výtokové dýze o průměru $d_d = 10$ mm s hodnotou výtokového součinitele $\zeta = 0,814$ dosazujeme za \dot{V} buď z rov. (R-5):

$$\dot{V} = \frac{\pi d_d^2}{4} v_d = \frac{\pi (0,01)^2 \text{ m}^2}{4} \cdot 0,814 \sqrt{2gh_d} = 2,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{2,5} \text{ s}^{-1} \cdot h^{0,5} \quad (\text{R-8})$$

a pak pro $(\rho_m - \rho_v) / \rho_v = 0,491$ je

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{\pi^2 (\rho_m - \rho_v) d^4 g \Delta h}{8 \rho_v \dot{V}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 0,491 \cdot 2,107 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2} \cdot \Delta h}{8 (2,832 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{2,5} \text{ s}^{-1} \cdot h_d^{0,5})^2} = \\ &= 156,1 \frac{\Delta h}{h_d} \end{aligned} \quad (\text{R-9})$$

nebo z rovnice regrese kalibračního grafu pro výtokovou dýzu danaidy o průměru 10 mm:

$$\dot{V} = (295,75 \text{ m}^{-0,5} h_d^{0,5} - 8,82) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (\text{R-10})$$

ze které dosadíme za \dot{V} opět do rov. (R-6):

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{\pi^2 (\rho_m - \rho_v) d^4 g}{8 \rho_v} \cdot \frac{\Delta h}{\left[(295,75 \text{ m}^{0,5} h_d^{0,5} - 8,82) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \right]^2} = \\ &= 5,942 \cdot 10^{-8} \text{ m}^5 \text{ s}^{-2} \cdot \frac{\Delta h}{(295,75 \text{ m}^{0,5} h_d^{0,5} - 8,82)^2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^6 \text{ s}^{-2}} \end{aligned} \quad (\text{R-11})$$

c) Ekvivalentní délku potrubí l_e / d pro hodnotu součinitele třením v potrubí $\lambda = 0,03$ vypočteme z rovnice

$$\frac{l_e}{d} = \frac{\zeta}{\lambda} = \frac{2 \Delta p}{\lambda v^2} = \frac{\pi^2 d^4 \Delta p}{8 \lambda \dot{V}^2} \quad (\text{R-12})$$

Nezávisle proměnné veličiny v a Re vypočteme při měření průtoků rotametrem dosazením do rov. (R-4):

$$v = \frac{4\dot{V}}{\pi d^2} = \frac{4}{\pi \cdot (0,0381 \text{ m})^2} \cdot \dot{V} = 8,77 \cdot 10^2 \text{ m}^{-2} \cdot \dot{V} \quad (\text{R-13})$$

a dosazením do rovnice

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{d v \rho}{\eta} = \frac{4 \dot{V} \rho}{\eta \pi d} = \frac{4 \cdot 998 \text{ kg m}^{-3}}{1,00 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \cdot \pi \cdot 0,0381 \text{ m}} \cdot \dot{V} = \\ &= 3,335 \cdot 10^7 \text{ m}^{-3} \text{ s} \cdot \dot{V} \end{aligned} \quad (\text{R-14})$$

Použijeme-li pro měření průtoků danaidu vypočítáme rychlost proudění v z rovnice kontinuity

$$v S = v_d S_d = v \pi d^2 / 4 = v_d \pi d_d^2 / 4$$

ve které jsou veličiny bez indexu vztaženy k potrubí, veličiny s indexem d k danaidě. Pro rychlost proudění v vody potrubím pak platí

$$v = v_d \left(\frac{d_d}{d} \right)^2$$

Při otevřené výtokové dýze o průměru $d_d = 10 \text{ mm}$ a průměrné hodnotě výtokového součinitele $0,814$ po dosazení do předchozí rovnice platí

$$v = 0,814 \sqrt{2g} \cdot \left(\frac{10 \text{ mm}}{38,1 \text{ mm}} \right)^2 \cdot \sqrt{h_d} = 0,2484 \text{ m}^{0,5} \text{ s}^{-1} \cdot \sqrt{h_d} \quad (\text{R-15})$$

Zbývá ještě zodpovědět otázku, zda rozdílná výška tlakových odběrů neovlivní výsledky výpočtů ztrátových výšek, součinitelů odporu a ekvivalentních délek potrubí. Otázku zodpovíme schématem, podle kterého platí:

$$p_1 = p_2 + \Delta p + (h_2 - h_1) \rho_v g$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 - (h_2 - h_1) \rho_v g$$

a dále pro rovnost tlaků v pravém

a levém rameni U - manometru

ve vztážené rovině vyznačené

silnou přerušovanou čarou

$$p_1 + (h_1 + h_p) \rho_v g =$$

$$= p_2 + (h_2 - h_l) \rho_v g + (h_l + h_p) \rho_m g$$

$$p_1 - p_2 = (h_2 - h_l) \rho_v g +$$

$$+ (h_l + h_p) \rho_m g - (h_l + h_p) \rho_v g$$

a po dosazení za $p_1 - p_2$ do

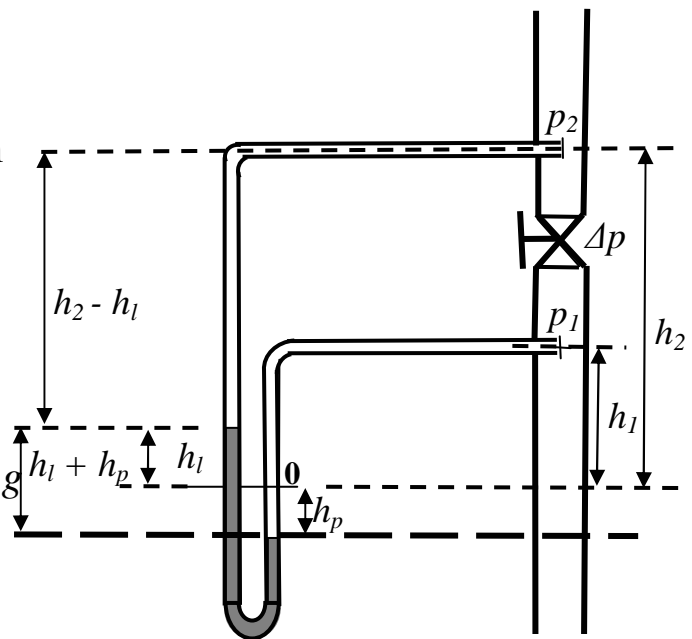
předchozí rovnice

$$\Delta p = (h_2 - h_l - h_1 - h_p - h_2 + h_1) \rho_v g$$

$$+ (h_l + h_p) \rho_m g$$

a úpravě

$$\Delta p = (h_l + h_p) (\rho_m - \rho_v) g$$



Z poslední rovnice je zřejmé, že tlakový odpor armaturního prvku nezávisí na rozdílné výšce tlakových odběrů, protože měřicí systém zaplněný vodou vytváří spojitou nádobu.

Sestava aparatury:

Hodnoty veličin h_d , Δh a \dot{V} potřebné pro výpočet ztrátové výšky, součinitele odporu a ekvivalentních délek armaturních prvků měříme na hydrodynamickém okruhu podle uvedeného schématu

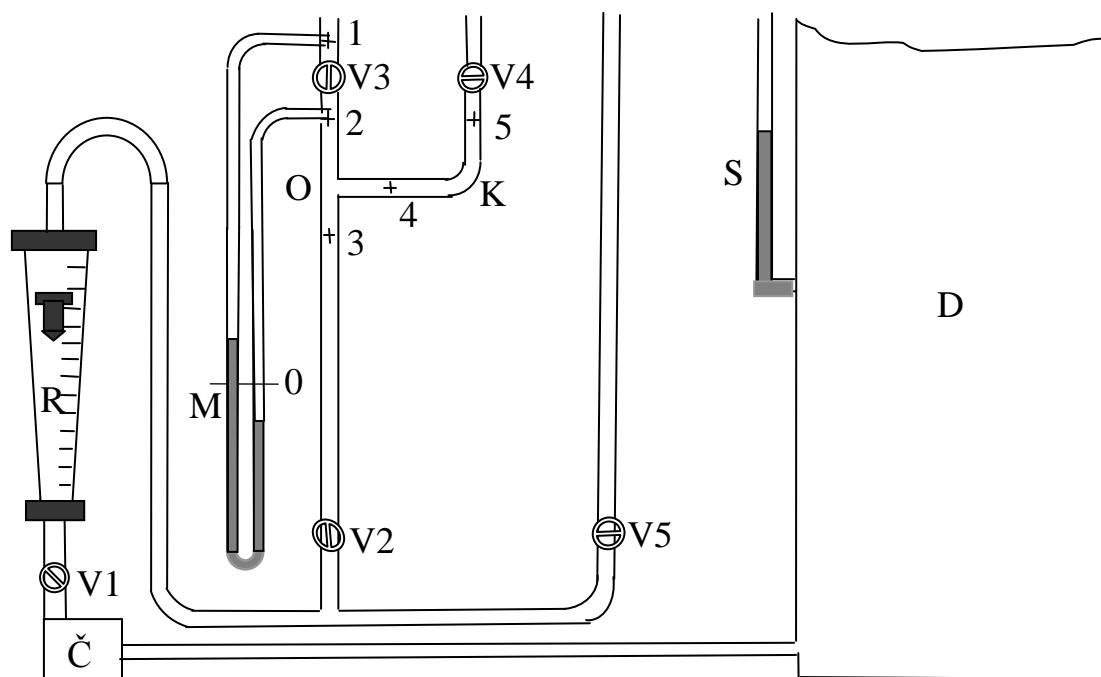


Schéma okruhu pro měření charakteristik armaturních prvků

R - rotametr, Č - čerpadlo, V1 až V5 - ventily, 1 až 5 - kohouty tlakových odběrů, M - U-manometr, O - odbočka, K - koleno 90°, D – danaida, S - stavoznak

Postup při měření:

a) na všech armaturních prvcích:

- a) Změříme nebo vypočteme podle údaje na ventilu průměr potrubí d .
- b) Stanovíme hustotu manometrické kapaliny ρ_m měřením výšek hladin vody a manometrické kapaliny přímo v U-trubici manometru. Hustotu vody a její dynamickou viskozitu najdeme v tabulkách podle její teploty.
- c) Pro měření průtoků do 1 000 l/hod ponecháme na danaidě otevřenou jen výtokovou dýzu o průměru 10, ostatní uzavřeme.

b) na ventilu:

- 1) Zazátkujeme levé rameno U-manometru a pravé doplníme po okraj vodou ze stříčky.
- 2) Otáčením růžic ventilů proti směru otáčení hodinových ručiček otevřeme úplně ventily V2 a V3 a otáčením růžic ventilů V4 a V5 po směru otáčení hodinových ručiček je úplně uzavřeme, takže voda bude protékat pouze větví s měřeným ventilem.
- 3) Zkontrolujeme uzavření všech kohoutů tlakových odběrů 1 až 5 a hlavního ventilu V1, kterým se reguluje průtok vody měřicími okruhy (otáčením jeho růžice po směru otáčení hodinových ručiček na doraz).
- 4) Nasadíme hadice na kohouty tlakových odběrů 1 a 2.
- 5) Uvedeme do chodu čerpadlo a mírným otevřením ventilu V1 zaplníme měřicí okruh vodou při průtoku menším než 1 000 l/hod až začne vytékat dýzou

danaidy. Při velkých průtocích nastává riziko vytlačení manometrické kapaliny z manometru!!!.

6) Zvedneme hadici nasazenou na kohout 2 tak, aby byla po celé délce výše než kohout 2 a kohout 2 mírně pootevřeme až začne otevřeným koncem hadice vytékat do podstavené nádoby voda. Tím je hadice odvzdušněna.

7) Odvzdušněnou hadici zaškrtneme přehnutím přes ukazováček a rychle ji nasadíme na vodou naplněné pravé rameno U-manometru se stupnicí pod nulou (do hadice nesmí vniknout vzduch). Pak kohout 2 uzavřeme.

8) Stejně odvzdušníme hadici nasazenou na kohout 2 a její volný konec nasadíme na vodou naplněné levé rameno U- manometru se stupnicí nad nulou. Je-li třeba, přivážeme hadice k potrubí, aby nepřekážely při měření.

9) Plně otevřeme kohouty 1 a 2, úplně zavřeme ventil V1 a zkontrolujeme polohu hladin manometrické kapaliny v ramenech U-manometru. Neleželi-li ve vodorovné rovině, musíme odvzdušnění opakovat. Odvzdušnění ještě zkontrolujeme třikrát opakovaným pozvolným otevřením ventilu V1 na průtok asi 3 000 l/hod a jeho rychlým uzavřením. V trubici manometru se nesmí objevit bublina a hladiny manometrické kapaliny se musí po uzavření ventilu V1 ustálit ve vodorovné rovině.

10) Mírným otevřením ventilu V1 nastavíme průtok vody měřicím okruhem tak, aby hladina vody ve vodoznaku danaidy se ustálila na výšce kolem 10 cm. Ustálení hladiny je časově velmi náročné vzhledem k velké kapacitě nádrže danaidy. Stabilitu hladiny je třeba kontrolovat v 30 s intervalech třikrát po sobě. Nemění-li se výška hladiny ve stavoznaku, je průtok měřicím okruhem shodný s průtokem vody dýzou danaidy a můžeme jej použít k výpočtům. Jinak nejsou vypočtené hodnoty správné a projeví se ve výsledcích měření. Po ustálení hladiny v danaidě odečteme výšku hladiny vody v danaidě h_d a polohy hladin h_l v levém a h_p v pravém rameni U- manometru a zapíšeme je do tabulky změřených veličin.

11) Postupně zvyšujeme průtoky pootevřením ventilu V1 tak, aby se hladiny vody v danaidě ustálily na výškách kolem 15, 20, 30, 35 a 40 cm, zapisujeme hodnoty výšek na stavoznaku danaidy a odečtené hodnoty na U-manometru.

12) Po ukončení měření podle bodu 11) otevřeme na danaidě ještě dýzu o průměru 20 mm a začneme měřit průtoky na rotametu měřicího okruhu počínaje průtokem 1 000 l/hod. Průtoky zvyšujeme po 500 l/hod až do 3 000 l/hod a současně s jejich hodnotami zapisujeme hodnoty odečítané na U- manometru. Měření skončíme při průtoku 3 000 l/hod. Při vyšších průtocích hrozí vytlačení manometrické kapaliny do měřicího okruhu a znemožnění dalších měření !!!

13) Po ukončení měření vypneme čerpadlo, zavřeme kohouty 1 a 2 tlakových odběrů a sejmemo hadice z ramen U-manometru a kohoutů tlakových odběrů.

c) na koleně 90°

Při měření postupujeme podobně jako při měření na ventilu. Plně otevřeme ventily V2 a V4, uzavřeme ventily V3 a V5 a hadice navlečené na kohouty 4 a 5 připojíme na příslušná ramena U-manometru tak, aby hladiny rozhraní manometrické kapaliny a vody přiléhala ke stupnicím. Měření můžeme ukončit

při průtoku 5 500 l/hod bez rizika přetlačení manometrické kapaliny do měřicího okruhu.

d) na odbočce, kterou protéká voda přímo (úhel 180°)

Při měření jsou otevřeny ventily V2 a V3, zavřeny V4 a V5. U-manometr je vhodně připojen hadicemi na kohouty tlakových odběrů 2 a 3. Vzhledem k malým tlakovým diferencím můžeme zvyšovat průtoky až do 5 500 l/hod.

e) na pravoúhlé odbočce (úhel 90°)

Při měření jsou otevřeny ventily V2 a V4, zavřeny V3 a V5. U-manometr připojíme vhodně hadicemi na kohouty tlakových odběrů 3 a 4. Průtoky můžeme zvyšovat až do hodnot 5 500 l/hod.

Pokud jsme v časové tísní, vypustíme měření při průtocích menších než 1000 l hod⁻¹ danaidou (časově náročná nastavování výšek hladin).

Vyhodnocení výsledků měření:

Výsledky měření jsou tabulky naměřených a vypočtených hodnot a grafy závislostí uvedených v odst. **Úkol**. Tabulky s oddělenými naměřenými a vypočtenými hodnotami a z nich vyplývající grafy zpracujeme výhodně v programu Excel se sloupci naměřených hodnot

- h_d / m výšek hladin ve stavoznaku danaidy pro průtoky pod 1 000 l/hod,
- \dot{V} / m³ hod⁻¹ průtoků vody nad 1 000 l/hod změřených rotametrem,
- h_l / m výška hladiny manometrické kapaliny v levém rameni U-manometru,
- h_p / m výška hladiny manometrické kapaliny v pravém rameni U-manometru,

a vypočtených hodnot podle rovnic uvedených v odst. **Teoretický úvod**

- Δh / m rozdílů výšek hladin manometrické kapaliny v U-manometru,
- $\dot{V} / 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ průtoků vody nad 1 000 l/hod změřených rotametrem
- $v / \text{ m s}^{-1}$ rychlostí proudění vody v potrubí,
- $v^2 / \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ rozhodneme-li se pro ověření lineární závislosti $h_{ztr} = k v^2$,
- $h_{ztr} / \text{ m}$ ztrátových výšek,
- $\zeta / 1$ součinitelů odporu,
- $(l_e / d) / 1$ ekvivalentních délek potrubí pro hodnotu součinitele tření $\lambda = 0,03$.

Tabulka charakteristiky armaturního prvku pro vodu o teplotě t °C, manometrickou kapalinu o hustotě $\rho_m = \dots$ a průměr potrubí 38,1 mm

č. m.	$\frac{h_d}{m}$	$\frac{\dot{V}}{\text{m}^3 \text{ hod}^{-1}}$	$\frac{h_l}{m}$	$\frac{h_p}{m}$	$\frac{\dot{V}}{10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}}$	$\frac{\Delta h}{m}$	$\frac{v}{\text{ m s}^{-1}}$	$\frac{\text{Re}}{10^3}$	$\frac{\zeta}{1}$	$\frac{l_e / d}{1}$

Diskuse výsledků:

V tomto odstavci zhodnotíme výsledky měření s hodnotami uváděnými v tabulkách odborné literatury, uvedeme názory na správnost a přesnost měření, problémy a závady, které se vyskytly během měření a jiné okolnosti, které ovlivnily průběh měření a jeho výsledky.

Příloha:

Grafy závislostí uvedené v odst. *Úkol*.

Kontrolní otázky:

1) Vysvětlete význam hodnot součinitelů odporu armaturních prvků a ekvivalentních délek potrubí pro hydrodynamické výpočty.

2) Jak vypočtete ztrátovou výšku a tlakovou ztrátu armaturního prvku? Napište příslušné rovnice.

3) Jak vypočtete tlakovou ztrátu armaturního prvku zabudovaného na a) kapalinovém, b) plynovém potrubí z rozdílu výšek hladin manometrické kapaliny v U-manometru?

4) Vypočtete velikost tlakové difference, která se projevila na U-manometru plněném chloroformem a zaplněném nad hladinou chloroformu vodou, rozdílem výšek hladin chloroformu 300 mm při teplotě 20 °C. Hustota chloroformu je $1,488 \text{ g cm}^{-3}$, vody $0,998 \text{ g cm}^{-3}$. ($\Delta p = 1,44 \text{ kPa}$)

5) Nakreslete schéma měření tlakové ztráty na armaturním prvku, vyznačte v něm potřebné veličiny a dokažte, že hodnota tlakové ztráty nezávisí na rozdílu výšek tlakových odběrů.

6) Jak vypočtete rychlost proudění vody potrubím a) z průtoku změřeného rotametrem, b) z výšky hladina vody v danaidě, průměru výtokového odporu a výtokového součinitele?

7) Jak vypočtete hodnotu Reynoldsova čísla z průtoku kapaliny potrubím? Jak zjistíte hodnoty dalších veličin potřebných pro její výpočet?

8) Odvoďte rovnici pro výpočet ekvivalentní délky potrubí ze zjištěné tlakové difference a změřeného průtoku.

9) Odvoďte výraz pro výpočet hustoty manometrické kapaliny z výšek odečtených na U-manometru naplněného manometrickou kapalinou a vodou. Nakreslete schéma měření.

10) Jak velkou chybu způsobí při měření U-manometrem vzduchová bublina délky 1 cm v nedokonale odvzdušněné hadici neúplně zaplněné vodou a) ve vodorovné, b) ve svislé poloze? (ve vodorovné 0, ve svislé 98 Pa)