SCIENTIFIC PAPERS
OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE
Series B
The Jan Perner Transport Faculty
1 (1995)

# VLIV OBSAHU PLYNU V KAPALINĚ NA JEJÍ STLAČITELNOST

Josef KOREIS

Katedra dopravní mechaniky a provozní spolehlivosti

## Úvod

Kapalina může obsahovat plyny ve dvou formách. Buď ve formě atomární - plyn je v kapalině rozpuštěn, nebo ve formě molekulární, kdy plyn není v kapalině rozpuštěn a má snahu tvořit zhluky.

Obsah plynu rozpuštěného v kapalině je limitován vlastnostmi plynu a vlastnostmi kapaliny. Maximální hodnota poměru objemu rozpuštěného plynu k objemu kapaliny je konstanta nezávislá na tlaku. Pokud je obsah rozpuštěných plynů malý (do 2%), nemá podstatný vliv na vlastnosti kapaliny.

Obsah nerozpuštěných plynů v kapalině takovým zpúsobem limitován není. Snad jen tím, že když bude plynu víc než kapaliny,bude se již jednat o kapalinu rozptýlenou v plynu (mlha). Předmětem zájmu bude kapalina obsahující malé množství nerozpuštěného plynu.

Kapalina obsahující nerozpuštěné plyny se popisuje jako směs, ve které si každá složka zachovává svoje vlastnosti. Vlastnosti směsi jsou potom dány parciálním součtem vlastností obou složek a popisují se stejným způsobem jako vlastnosti převažující složky. Objem nerozpuštěného plynu v kapalině je silně závislý na tlaku a i nepatrný obsah nerozpuštěných plynů v kapalině ovlivňuje radikálně zejména objemový modul pružnosti směsi, a tím i všechny parametry hydraulického mechanismu, závislé na stlačitelnosti kapaliny.

Každá kapalina za normálních barometrických podmínek obsahuje určitý minimální objem nerozpuštěných plynů. Voda musí být provzdušněna, aby v ní mohl existovat organický život. Organismy žijící ve vodě potom produkují např. $CO_2$ a hnilobné procesy produkují uhlovodíky (Bahenní plyn). Na volnou hladinu (nejen vody) působí barometrický tlak ($p_o$ = 0,1 MPa), který spolu s povrchovým napětím brání totálnímu samovolnému odplynění kapaliny. V hydraulickém oleji se nachází za normálních barometrických podmínek rovněž určité minimální procento vzduchu a také nerozpuštěné lehké uhlovodíky, které však při vyšších tlacích zkapalňují. Hydraulické mechanismy pracují v širokém rozsahu tlaků. V ssacím traktu samonasávacího hydrogenerátoru je tlak nižší než barometrický, a ve vysokotlaké větvi se dnes pracuje s tlaky do 70 MPa.

Kapalina obsahující i nepatrný objem nerozpuštěných plynů je snadno stlačitelná zejména při nízkých tlacích blízko barometricrického tlaku, a téměř nestlačitelná při velmi vysokých tlacích. V populární literatuře se to často popisuje opačně. Kapalina se při nízkých tlacích považuje za nestlačitelnou.

Pro analytický popis vlastností směsi kapaliny a plynu, nechť platí následující zjednodušující předpoklady.

*Předpoklad P1:*

- Zidealizovaná kapalná složka směsi si zachovává vlastnosti kapaliny i při velmi nízkých tlacích, až do absolutního vakua. (Nezplyňuje).

*Předpoklad P2:*

- Zidealizovaná plynná složka směsi si zachovává vlastnosti ideálního plynu i při velmi vysokých tlacích, řádově do 100 MPa. (Nezkapalňuje).

*Předpoklad P3:*

- Rychlosti změn objemu, tlaku, a měrné hmotnosti jsou malé a změny probíhají při konstantní teplotě.

Pro rozlišení stejnojmenných veličin budou použity indexy:

*k* - kapalná složka
*p* - plynná složka
*s* - směs
*o* - hodnota při norm. barometrických podmínkách

## 1. Stlačitelnost kapalné složky

Má-li čistá kapalina (bez nerozpoštěných plynů) při tlaku p objem $V_k$, potom při zmenšení tohoto objemu o hodnotu $dV_k$ (jeho stlačením působením vnějších sil) se tlak v kapalině zvýší o přírůstek dp podle definičního vztahu:

$$dp = -\frac{E_k}{V_k}\, dV_k \ , \qquad (1)$$

kde $E_k$ je objemový modul pružnosti kapaliny při tlaku $p$. Specielně při normálním barometrickém tlaku $p_o$ a normální teplotě $T = 20^oC$ je

$$E_{ok} = -V_{ok} \frac{dp}{dV_k} , \tag{2}$$

kde $V_{ok}$ je objem kapaliny při tlaku $p_o = 0{,}1$ MPa. Podle definičního vztahu (2) je hodnota $E_{ok}$ přímoúměrná počátečnímu objemu $V_{ok}$. Má-li být objemový modul pružnosti použit jako porovnávací kriterium pro stlačitelnost dvou rúzných kapalin, potom je mutné porovnávat nejen při stejných počátečních podmínkách, ale i při stejných počátečních objemech obou porovnávaných kapalin. V daném případě je tato podmínka porovnatelnosti splněna, když bude $V_{ok} = V_{os}$.

Obecně je hodnota $E_k$ závislá na tlaku, v nejjednodušším případě lineárně podle vztahu

$$E_k = E_{ok} + K_E \left(p - p_0\right) . \tag{3}$$

Uvedený zjednodušující předpoklad P1 hovoří pouze o tom, že rovnice (3) platí i pro absolutní tlak $p = 0$ a zidealizovaná kapalina má nenulový objemový modul pružnosti i při absolutním vákuu.

U hydraulických olejů se počítá s hodnatou $E_{ok} = 1400$ MPa. Protože směrnice lineárního růstu $K_E = 4$ až 6 je v provnání s hodnotou $E_{ok}$ velmi malá, považuje se často modul objemové pružnost olejů za konstantu $E_k = konst.$, která v obvyklém rozsahu pracovních tlaků představuje střední hodnotu z výrazu (3). Rozsáhlá měření stlačitelnosti hydraulických olejů prováděli autoři prací [1] a [4]. Pro nejčastěji používaný ČS hydraulický olej OT-H3, PND 23-107-71 při teplotě $50^\circ$ C, je v práci [1] uvedena hodnota izotermického (statického) modulu pružnosti $E_{kS} = 1460$ MPa.

Při rychlostech deformace, srovnatelných s rychlostí šíření zvuku v kapalině, se počítá s tzv. adiabatickým (dynamickým) modulem pružnosti, který je vetší v poměru měrných tepelných kapacit oleje. ($E_{kD} / E_{kS} = c_p / c_v = 1{,}125$ až $1{,}168$). V lit. [1] je pro olej OT-H3 uvedena hodnota $E_{kD} = 1710$ MPa.

Při technických výpočtech se rovněž často definiční rovnice (2) linearizuje do tvaru:

$$E_k = E_{ok} = -V_{ok} \frac{\Delta p}{\Delta V_k} = -V_{ok} \frac{p - p_o}{V_k - V_{ok}} , \tag{4}$$

kde $p$ a $V_k$ jsou proměnné veličiny, $p_o$ a $V_{ok}$ jsou konstanty určující libovolný počáteční stav.

Rovnice (4) je nezávislá na volbě počátečních podmínek a lze z ní určit přírůstky

$$\Delta p = -\frac{E_k}{V_{ok}} \Delta V_k , \tag{5}$$

$$\Delta V_k = -\frac{V_{ok}}{E_k}\Delta p, \tag{6}$$

a také tlak

$$p = p_o + \frac{E_k}{V_{ok}}\left|\Delta V_k\right|, \tag{7}$$

a proměnný objem

$$V_k = V_{ok}\left(1 - \frac{\Delta p}{E_k}\right). \tag{8}$$

Je třeba zdůraznit, že uvedené linearizované vztahy lze použít pouze pro malé odchyky od rovnovážného počátečního stavu, daného konstatními hodnotami $p_o$ a $V_{ok}$. Při velkých odchylkách vznikají nepřípustně velké chyby. Např. při $\Delta p = E_k$ je podle (8) kapalina stlačena až na nulový objem $V_k = 0$, což není reálně možné.

Nelineární závislosti se získají integrací definičního vztahu (1).

$$\int_{p_o}^{p} dp = -E_k \int_{V_{ok}}^{V_k} \frac{1}{V_k}\, dV_k \,; \tag{9}$$

odkud je

$$p = p_o - E_k.\ln\frac{V_k}{V_{ok}}, \tag{10}$$

$$V_k = V_{ok}.\exp\left(\frac{-\Delta p}{E_k}\right). \tag{11}$$

Je zřejmé, že změny objemu vyvolají změny měrné hmotnosti. Ze zákona zachování hmoty plyne:

$$m = V_{ok}\,\rho_o = V_k\,\rho = konst. \tag{12}$$

$$\frac{d}{dt}\left(V_k\rho\right) = V_k\frac{d\rho}{dt} + \rho\frac{dV_k}{dt} = 0\,. \tag{13}$$

Z poslední rovnosti plyne:

$$\frac{dv_k}{V_k} = -\frac{d\rho}{\rho}\,. \tag{14}$$

Definiční vztah (1) potom lze přepsat do tvaru:

$$dp = E_k\frac{d\rho}{\rho}\,. \tag{15}$$

ze kterého lze $E_k$ vyjádřit vztahem:

$$E_k = \rho \frac{dp}{d\rho} = \rho a^2 \ , \tag{16}$$

kde $a = \sqrt{(dp/d\rho)}$ je rychlost zvuku v kapalině.

## 2. Stlačitelnost plynné složky

Při izotermické změně platí: $T = konst.$

$$p_o V_{op} = p_1 V_{1p} = p V_p = RT = konst. \tag{17}$$

V definiční rovnici (17) lze $p_o$ a $V_{op}$ považovat za konstanty určující počáteční rovnovážný stav při normálních atmosferických podmínkách ($p_o$ = 0,1 MPa, $T$ = 20$^0$ C), a $p$, $V_p$ za proměnné parametry, ($R$ je plynová konstanta). Při daných počátečních podmínkách je:

$$p = p_o \frac{V_{op}}{V_p}, \qquad V_p = V_{op} \frac{p_o}{p} \ . \tag{18}$$

Přímou derivací zlomků v rovnicích (18) se získají vztahy:

$$\frac{dp}{dV_p} = p_o V_{op} \frac{d}{dV_p}\left(\frac{1}{V_p}\right) = -p_o \frac{V_{op}}{V_p^2} \tag{19}$$

$$\frac{dV_p}{dp} = p_o V_{op} \frac{d}{dp}\left(\frac{1}{p}\right) = -V_{op} \frac{p_o}{p^2} \ . \tag{20}$$

V literatuře (např. [2]) se často základní definiční vztah (17) derivuje jako součin:

$$\frac{d}{dt}(pV_p) = p\frac{dV_p}{dt} + V_p \frac{dp}{dt} = 0 \ . \tag{22}$$

Z rovnice (22) vyplývá:

$$p\, dV_p = -V_p\, dp \tag{23}$$

$$\frac{dV_p}{dp} = -\frac{V_p}{p} \ . \tag{24}$$

V rovnici (24) je $V_p$ proměnný objem závislý na tlaku podle vztahu (18), který je nutno do (24) dosadit. Tím se získá jednoznačná závislost $dV_p / dp$ na tlaku $p$, totožná se vtahem (20).

## 3. Stlačitelnost směsi kapaliny a plynu

*Předpoklad P4:* Objem plynu $V_p$ v objemu plynu kapaliny $V_k$ je tak malý, že směs objemu $V_s = V_k + V_p$ lze popisovat vztahy platnými pro kapalinu. To znamená, že pro objemový modul pružnosti směsi bude platit definiční vztah (1) ve tvaru:

$$E_s = -V_s \frac{dp}{dV_s} = -\frac{V_s}{\dfrac{dV_s}{dp}} . \tag{25}$$

Existují v podstatě dva přístupy k odvození vztahu pro $E_S$.

- buď se sečítají objemy $V_s = V_k + V_p$,
- nebo jejich diferenciály $dV_s = dV_k + dV_p$.

### 3.1. Objemový modul pružnosti směsi podle Prokofjeva

Prokofjev uskutečnil rozsáhlá měření objemového modulu pružnosti kapalin a směsí různých hydraulických olejů s malým obsahem plynu. Získané výsledky měření dobře odpovídají vypočítaným teoretickým průběhům [4]. Postup odvození $E_s$ podle Prokofjeva:

Sečítají se celkové objemy. (Podmínka porovnatelnosti se nerspektuje).

$$V_s = V_p + V_k = V_{op} \frac{p_o}{p} + V_{ok} \exp\left(-\frac{p}{E_k}\right) . \tag{26}$$

Vztah (26) se derivuje podle $p$ a tím se určí:

$$\frac{dV_s}{dp} = -V_{op} \frac{p_o}{p^2} - \frac{V_{ok}}{E_k} \exp\left(-\frac{p}{E_k}\right) . \tag{27}$$

Vztahy (26) a (27) se dosadí do definičního vztahu (25) a výsledek se upraví do tvaru, ve kterém se proměnný tlak $p$ nevyskytuje ve jmenovateli zlomku, aby počítač neprotestoval, že dostal příkaz dělit nulou.

Po dosazení a úpravě bude:

$$E_{s1} = E_k \frac{p^2 \exp\left(-\dfrac{p}{E_k}\right) + \dfrac{V_{op}}{V_{ok}} p_o p}{p^2 \exp\left(-\dfrac{p}{E_k}\right) + \dfrac{V_{op}}{V_{ok}} p_o E_k} . \tag{28}$$

Ve vztahu (28) musí být p absolutní tlak. Potom má $E_s$ nulovou hodnotu při absolutním vakuu. Kdyby se do vztahu (28) dosadil za veličinu p přetlak $p = p - p_o$, byla by hodnota $E_s$ nulová už při barometrickém tlaku $p_o$ = 0,1MPa, což není možné.

Při $p = E_k$ dává vztah (28) výsledek $E_{s1} = E_k$. Při $p > E_k$ je podle (28) $E_{s1} > E_k$ a čistá kapalina bez plynu je více stlačitelná jako směs kapaliny a plynu, což je důsledek nerespektování podmínky porovnatelnosti. To však platí pouze tehdy, když je hodnota $E_k$ konstantní, nebo když je ve vztahu (3) směrnice růstu $K_E < 1$. U převážné většiny hydraulických kapalin na bázi minerálních olejů tomu tak není. Hodnota $E_k - p$ je vždy kladná, a hodnota $E_k / p$ je vždy větší jako jedna. Kromě toho jsou pracovní tlaky zatím nejméně o řád nižší jako $E_k$ takže tento ryze matematický nedostatek vztahu (28) je zcela nepodstatný.

### 3.2. Druhý způsob určení $E_S$ (ČS)

Celkový objem směsi $V_s$ je algebraickým součtem objemu kapaliny $V_k$ a objemu plynu $V_p$, přičemž všechny tyto tři objemy jsou funkcemi tlaku $p$. Objem směsi je potom složenou funkcí

$$V_s = f\left[V_k(p), V_p(p)\right].$$

Podle předpokladu formulovaném v úvodu je působení tlaku na jednotlivé složky směsi parciální, což lze vyjádřit vztahem:

$$\frac{\delta V_s(p)}{\delta p} dp = \frac{\delta V_k(p)}{\delta p} dp + \frac{\delta V_p(p)}{\delta p} dp , \qquad (29)$$

kde je:

$$\frac{\delta V_s(p)}{\delta p} = -\frac{V_{os}}{E_s} \qquad (30)$$

$$\frac{\delta V_k(p)}{\delta p} = -\frac{V_{ok}}{E_k} \qquad (31)$$

$$\frac{\delta V_p(p)}{\delta p} = -\frac{V_p}{p} = -V_{op} \frac{p_o}{p^2} . \qquad (32)$$

Po dosazení a úravě bude:

$$\frac{V_{os}}{E_s} = \frac{V_{ok}}{E_k}\left(1 + \frac{V_p E_k}{V_{ok} p}\right) = \frac{V_{ok}}{E_k}\left(1 + \frac{V_{op} p_o E_k}{V_{ok} p^2}\right) . \qquad (33)$$

Ve smyslu v úvodě formulované podmínky porovnatelnosti modulů stlačitelnosti dvou různých kapalin je třeba položit počáteční objem kapaliny $V_{ok}$ stejně velký, jako je počáteční objem směsi $V_{ok} = V_{os} = V$.

Potom bude podle [2]:

$$E_{s2} = E_k \frac{p}{p + \frac{V_p}{V} E_k} \qquad (34)$$

a nebo

$$E_{s2} = E_k \frac{p^2}{p^2 + \frac{V_{op}}{V_{ok}} p_o E_k} . \tag{35}$$

Vztah (34), (uvedený v [2]), je sice bezchybný, ale při výpočtu funkční závislosti $E_s = f(p)$ se do něj musí za $V_p$ dosazovat podle (18). Ve vztahu (35) už je tato závislost dosazena a poměr $V_{op} / V_{ok}$ je konstanta nezávislá na tlaku $p$. Podle (34) je $E_s$ funkcí dvou proměnných veličin: tlaku $p$ a poměru $V_p / V$. V technické praxi je u složitých funkcí několika proměnných zvykem měřit a vyhodnocovat parciální statické charakteristiky, které jsou závislostí na jedné zvolené proměnné, při konstantních hodnotách ostatních proměnných. Často ani jiná metodika měření není účelná. Při měření parciálních charakteristik je však nutné udržovat neměřené veličiny na zvolených konstantních hodnotách. Konkrétně u $E_s$ lze měřit a vyhodnocovat parciální statickou charakteristiku $E_s = f(V_p/V)$ při několika zvolených konstantních hodnotách tlaku $p$, neboť při měření není problém udržovat konstantni tlak. Nelze však měřit parciální charakteristiku závislosti $E_s = f(p)$ při několika konstantních hodnotách poměru $V_p / V$, protože tento poměr nelze při měření udržovat na konstantní hodnotě. Proto ani nemá praktický význam takové parciální charaktaristiky uvádět. Podle (35) je $E_s$ funkcí pouze jedné proměnné $p$, neboť $V_{op} / V_{ok}$ je konstanta určená jednou pro vždy při zvolených počátečních podmínkách a závislost $E_s = f(p)$ při různých konstantách $V_{op} / V_{ok}$ má praktický význam a lze ji ověřit experimentálním měřením.

Pokud se nerespektuje podnínka porovnatelnosti, je možné dosadit do vztahu (33) $V_{ok} = V_{os} - V_{op}$. Potom shodně s [1] bude:

$$E_{s3} = E_k \frac{p}{p + \frac{V_p}{V_{ok}} (E_k - p)} . \tag{36}$$

Po dozazení za $V_p$ podle (18) bude

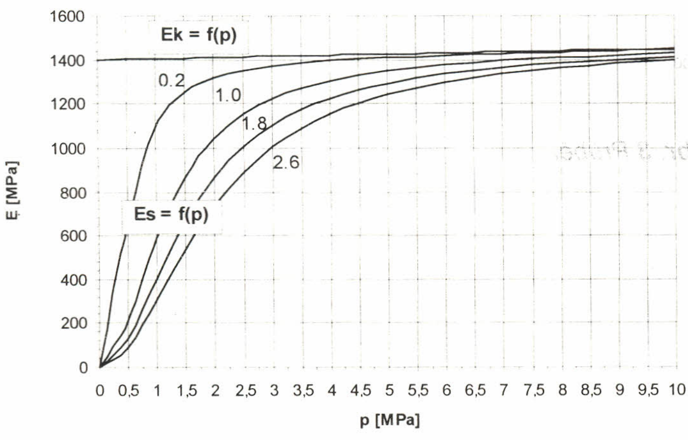
$$E_{s3} = E_k \frac{p^2}{p^2 + \frac{V_{op}}{V_{ok}} p_o (E_k - p)} . \tag{37}$$

Na obr. 1 je průběh $E_s = f(p)$ při několika konstantních hodnotách $V_{op} / V_{ok}$ pro rozah tlaku $p \in \langle 0, 10 \rangle$ Mpa. Na obr. 2 je rozsah tlaku zvýšen na $p \in \langle 0. 40 \rangle$ MPa. Na obr. 3 je graf $E_s / E_k = f(p)$ s logaritmickou stupnicí na vodorovné ose, což zvýrazňuje nelinearitu průběhu.

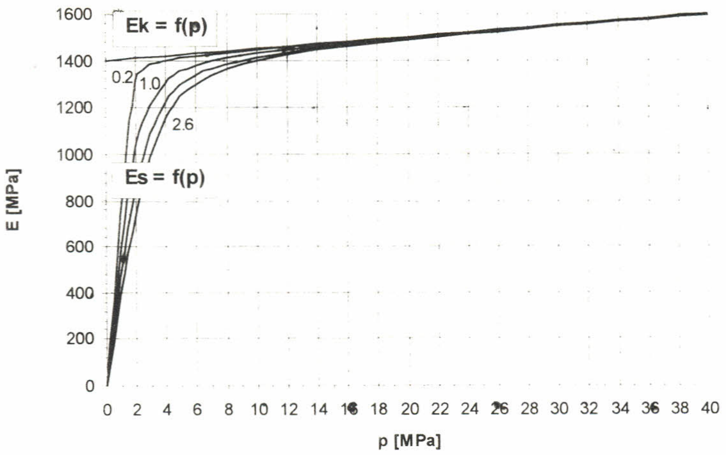
V tabulce I. jsou vyčísleny vybrané hodnoty proměnného tlaku $p$ a jim odpovídající hodnoty $E_k = E_{ok} + 5p$, $E_{s1}$ podle Prokofjevova vztahu (28), $E_{s2}$ podle vztahu (35) a $E_{s3}$ podle vztahu (37).

Je vidět, že přítomnost nerozpoštěných plynů v uvedených koncetracích výrazně snižuje hodnotu objemového modulu pružnosti zejména při velmi nízkých tlacích a má zanedbatelný vliv při tlacích nad 10 MPa. Při obvyklé koncentraci nerozpuštěných plynů v hydraulickém oleji do 0,5 %, nevznikají problémy v důsleku snížení hodnoty $E_k$, když nikde v hydraulickém obvodu tlak nepoklesne pod 1,6 MPa. V tom smyslu jsou ve výhodě uzavřené hydraulické obvody, s přeplňovanou nízkotlakou větví. Protože řídící prvky jsou často napájeny z plnícího obodu, je z hlediska spolehlivosti řízení výhodné, aby plnící tlak byl co nejvýšší, i za cenu zhoršení účinnosti systému přenosu výkonu. Fy Sauer používá plnící tlaky od 1,6 do 2 MPa na hranici spolehlivosti při zavzdušnění, fy Rexroth používá plnící tlaky běžně do 3 MPa, při náročném řízení do 4 MPa. V uzavřených, přeplňovaných obvodech se nevyskytují problémy s kavitací, které jsou běžné v otevřených obvodech se samonasávacími hydrogenerátory. Řídící clonka umístěná na svodu řídícího prvku způsobuje pěnění oleje, když při velkém tlakovém spadu je za clonkou téměř barometrický tlak a dostatečně velký expanzní prostor. Při expanzi za těchto podmínek dochází za clonkou k uvolňování plynné fáze.

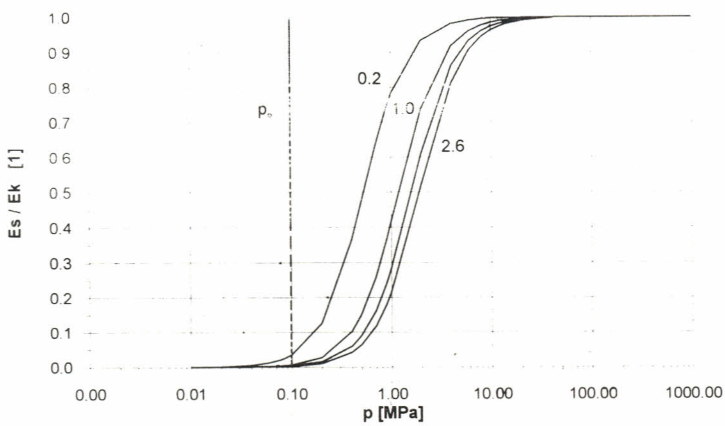
Jestliže je v uzavřeném pracovním hydraulickém obvodu vysoký tlak např. 40 MPa, a řídící systém je napájen nízkým tlaken do 1,6 MPa, potom malé zvýšení koncentrace plynů v kapalině způsobí radikální pokles tuhosti (a vlastní frekvence) řídícího systému, bez znatelné změny tuhosti řízeného pracovního obvodu, což může být příčinou vzniku nestability procesu řízení.




***Obr. 1** Průběh $E_k = f(p)$ a $E_S = f(p)$ pro $V_{op}/V_{ok} = 0.2$, 1.0, 1.8 a 2.6, pro tlak p do 10 MPa.*




***Obr. 2*** *Průběh $E_k$ a $E_S$ z Obr. 1 pro tlak p do 40 MPa.*




***Obr. 3*** *Průběh $E_k$/ $E_S$ s logaritmickou stupnicí tlaku.*

***TABULKA I.*** Modul pružnosti kapaliny $E_k$, a směsi $E_s$.
$V_{ok} = 100$, $V_{op} = 0,5$, $E_{ko} = 1400$, $p_{max} = 500$

| P | $E_k$ | $E_{s1}$ | $E_{s2}$ | $E_{s3}$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.0100 | 1400.0500 | 0.2100 | 0.2000 | 0.2000 |
| 0.0100 | 1400.0500 | 0.2104 | 0.2004 | 0.2004 |
| 0.0200 | 1400.1000 | 0.8203 | 0.8003 | 0.8004 |
| 0.0300 | 1400.1500 | 1.8288 | 1.7989 | 1.7989 |
| 0.0400 | 1400.2000 | 3.2341 | 3.1943 | 3.1944 |
| 0.0500 | 1400.2500 | 5.0338 | 4.9842 | 4.9844 |
| 0.0600 | 1400.3000 | 7.2249 | 7.1655 | 7.1658 |
| 0.0700 | 1400.3500 | 9.8037 | 9.7347 | 9.7351 |
| 0.0800 | 1400.4000 | 12.7658 | 12.6872 | 12.6879 |
| 0.0900 | 1400.4500 | 16.1062 | 16.0183 | 16.0193 |
| 0.1000 | 1400.5000 | 19.8195 | 19.7223 | 19.7237 |
| 0.2000 | 1401.0000 | 75.8647 | 75.6857 | 75.6960 |
| 0.3000 | 1401.5000 | 159.7581 | 159.5225 | 159.5528 |
| 0.4000 | 1402.0000 | 260.8100 | 260.5448 | 260.6054 |
| 0.5000 | 1402.5000 | 368.8766 | 368.6048 | 368.7017 |
| 0.6000 | 1403.0000 | 476.0898 | 475.8278 | 475.9623 |
| 0.7000 | 1403.5000 | 577.3158 | 577.0729 | 577.2424 |
| 0.8000 | 1404.0000 | 669.7956 | 669.5766 | 669.7763 |
| 0.9000 | 1404.5000 | 752.4885 | 752.2942 | 752.5181 |
| 1.0000 | 1405.0000 | 825.4343 | 825.2638 | 825.5063 |
| 2.0000 | 1410.0000 | 1198.7720 | 1198.7270 | 1198.9820 |
| 3.0000 | 1415.0000 | 1311.8890 | 1311.8730 | 1312.0760 |
| 4.0000 | 1420.0000 | 1359.6730 | 1359.6650 | 1359.8280 |
| 5.0000 | 1425.0000 | 1385.5170 | 1385.5130 | 1385.6480 |
| 6.0000 | 1430.0000 | 1402.1540 | 1402.1520 | 1402.2660 |
| 7.0000 | 1435.0000 | 1414.2930 | 1414.2910 | 1414.3900 |
| 8.0000 | 1440.0000 | 1423.9820 | 1423.9800 | 1423.0680 |
| 9.0000 | 1445.0000 | 1432.2260 | 1432.2250 | 1432.3040 |
| 10.0000 | 1450.0000 | 1439.5640 | 1439.5630 | 1439.6350 |
| 20.0000 | 1500.0000 | 1497.1930 | 1497.1930 | 1497.2300 |
| 30.0000 | 1550.0000 | 1548.6670 | 1548.6660 | 1548.6920 |
| 40.0000 | 1600.0000 | 1599.2010 | 1599.2000 | 1599.2200 |
| 50.0000 | 1650.0000 | 1649.4560 | 1649.4560 | 1649.4720 |
| 60.0000 | 1700.0000 | 1699.5990 | 1699.5990 | 1699.6130 |
| 70.0000 | 1750.0000 | 1749.6880 | 1749.6880 | 1749.7000 |
| 80.0000 | 1800.0000 | 1799.7470 | 1799.7470 | 1799.7580 |
| 90.0000 | 1850.0000 | 1849.7890 | 1849.7890 | 1849.7990 |
| 100.0000 | 1900.0000 | 1899.8200 | 1899.8200 | 1899.8290 |
| 200.0000 | 2400.0000 | 2399.9290 | 2399.9280 | 2399.9340 |
| 300.0000 | 2900.0000 | 2899.9530 | 2899.9530 | 2899.9580 |
| 400.0000 | 3400.0000 | 3399.9640 | 3399.9640 | 3399.9680 |
| 500.0000 | 3900.0000 | 3899.9700 | 3899.9700 | 3899.9740 |

*Lektoroval: Prof. Ing. Jaroslav Kopáček, CSc.*

Předloženo v únoru 1995.

## Literatura


[1] Kopáček, J.: Obsah vzduchu v minerálním oleji a jeho měření. Zborník 10-té konference o tekutinových mechanismech. DT ČSVTS Ostrava, 1982.

[2] Paciga, A. - Ivantyšyn, J.: Tekutinové mechanismy. SNTL Praha, 1985.

[3] Turza, J.: Vliv tlouštky stěny trubky na objemový modul pružnosti hydraulického vedení. HYDRAULIKA 54 - VUHYM Dubnica, 1990.

[4] Prokofjev, V. N.: Experimentalnyje issledovania uprugich svojstv dvuchfazovych rabočich židkostěj. Izv. VUZ Mašinostrojenije, 1968 č.2.

[5] Kopáček, J., Šubert, J.: Objemový modul pružnosti pryžových hadic. Strojírenská výroba 28, 1980, č.20


## Resumé

### VLIV OBSAHU PLYNU V KAPALINĚ NA JEJÍ STLAČITELNOST

Josef KOREIS


Článek pojednává o stlačitelnosti kapaliny, která obsahuje malý objemový díl plynů. Jsou ukázány vztahy pro výpočet koeficientu kompesibility kapaliny s objemovým podílem plynu v závislosti na tlaku.


## Summary

### INFLUENCE OF GAS CONTENTS IN LIQUID TO ITS COMPRESSIBILITY

Josef KOREIS


The article discuss a compressibility of liquid, which contains a small volume share of gases. There are pointed relations for calculation of compressibility coefitient for liquids with gas volume share dependent on a pressure in the article.


## Zusammenfassung

### EINFLUSS DES GASGEHALTS IN DER FLÜSSIGKEIT AUF IHRE ZUSAMMENDRÜCKBARKEIT

Josef KOREIS


Der Artikel behandelt die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeit, die enthaltet klein Volumenanteil der Gase. Im Artikel sind engefürt die Beziehungen für die Berechnung des Koeffizienten der Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeit mit einem Gasvolumenanteil in der Abhängigkeit von dem Druck.