National Conference with International Participation
ENGINEERING MECHANICS 2003
Svratka, Czech Republic, May 12 – 15, 2003

paper no.
267

LEAKAGE OF WATER FROM LINEPIPE AS THE WAY FOR DETERMINATION OF THE SIZE OF A THROUGH CRACK IN THE WALL

Ľ. Gajdoš*

Summary: *The paper deals with derivation of relations between the half-length of a longitudinal through crack in a pressure linepipe and outflow parameters of water as followed from reparation overloading of linepipes by internal pressure of water. The results are demonstrated on a specific pipeline section 1680 m long, made from steel pipes of 530 mm in outside diameter and 6 mm in wall thickness.*

1. Úvod

Pro bezporuchový spolehlivý provoz vysokotlakých potrubí, např. plynovodů, je potřebná znalost jejich technického stavu a s tím související znalost geometrických imperfekcí a defektů ve stěně. Např. vysokotlaká plynovodní potrubí jsou z výroby, montáže a provozu zatížena konečným počtem defektů. Jedná se o plošnou nebo důlkovou korozi, kořenové a povrchové vady svarů eventuálně o studené spoje, zdvojeniny stěny trubky (laminace), ostré vruby a nezřídka i o trhliny, které jsou svými účinky nejnebezpečnějším typem defektů. K jejich identifikaci a lokalizaci lze použít vnitřní inspekci potrubí pomocí nákladního inspekčního zařízení (inteligentního ježka), které k detekci využívá různých mechanických, magnetických a ultrazvukových metod (viz Gajdoš, 2000). Naprostá většina vysokotlakých plynovodních rozvodů však není technicky ani dispozičně uzpůsobena vnitřní inspekci. U těchto plynovodů je proto velmi obtížné určit velikost defektů, zejména průchozích trhlin, které mohou vést během provozu k havárii plynovodu. Kromě toho je inspekce a hodnocení lokálního poškození potrubí ekonomicky velmi náročné.

Za účelem zvýšení provozní bezpečnosti starších plynovodních potrubí byl vypracován postup, spočívající v přerozdělení napětí ve stěně potrubí přetížením vnitřním tlakem vody. Postup lze realizovat v celé délce potrubí, aniž by bylo nezbytné mít přesné informace o poloze samotných defektních míst (viz Gajdoš, 2000). Největší efekt přetížení je u defektů, které vedou k největším hodnotám koncentrace napětí, tedy u velmi ostrých vrubů nebo u trhlin. Vzhledem k úrovni přetížení mají uvedené defekty buď podkritickou nebo kritickou velikost. V prvním případě dojde přetížením k přerozdělení napětí a k vytvoření podmínek pro další namáhání stěny v pružné oblasti, ve druhém případě dojde k bezpečnému rozvinutí defektu, který lze opravit a tlakovací režim pak zopakovat.

* Ing. Ľubomír Gajdoš, CSc.: Ústav teoretické a aplikované mechaniky, Akademie věd České republiky; Prosecká 76/809; 190 00 Praha 9; tel.: +420.286882121, fax: +420.286884634; e-mail: gajdos@itam.cas.cz

Vyskytuje-li se ve stěně potrubí průchozí trhlina určité délky, pak při tlakové reparaci dochází k úniku vody, a to tím více, čím je trhlina delší a čím je tlak vyšší. Této skutečnosti lze využít pro přibližné určení velikosti průchozí trhliny, jak je pojednáno v práci Gajdoše (1998). Je-li navíc známa kritická délka trhliny pro požadovaný přetlak, lze tuto délku trhliny spojit s časovým množstvím unikající vody a bezpečný provoz tlakového potrubního systému pak kontrolovat na základě požadavku, aby zjištěný časový únik vody pro daný tlak nepřesáhl jistou hodnotu, odpovídající kritické délce průchozí trhliny.

Pro určení závislosti mezi délkou průchozí trhliny v potrubí a výtokovými parametry vody budeme postupovat tak, že nejdříve určíme tlakovou závislost objemu přičerpávané vody do potrubí a pak budeme uvažovat výskyt podélné průchozí trhliny ve stěně potrubí natlakovaného na požadovanou hodnotu přetlaku vody a následný výtok vody touto trhlinou.

2. Tlaková závislost objemu přičerpávané vody

2.1 Příspěvek k objemu přičerpané vody od deformace pláště

Uvažujme velmi tenkostěnné potrubí o vnějším průměru D, tloušťce stěny t a délce L. Objem vody v potrubí s nulovým vnitřním přetlakem je

$$V = \frac{\pi (D - 2t)^2 L}{4} \tag{1}$$

Jakékoliv další dodané množství vody znamená zvýšení vnitřního přetlaku vody a tomu odpovídající zvětšení průměru potrubí. (Pokud se bude jednat o krátké potrubí s možností podélných deformací, bude se zvětšovat i jeho délka). Uvažujeme, že převážná část potrubí se nachází ve stavu mezi krajními deformačními podmínkami, danými vztahy:

a) poměrná podélná deformace $\varepsilon_x = 0$ a tomu odpovídající osové napětí $\sigma_x = \nu.\sigma_\varphi$
   (uprostřed souvislého přímého úseku)
b) podélné napětí $\sigma_x = \sigma_\varphi/2$
   (v místě uzavření potrubí tlakovým dnem nebo v místě oblouku potrubí)

Dále předpokládejme, že σ_x leží mezi těmito dvěma krajními hodnotami, tedy

$$\sigma_x = 0{,}4\ \sigma_\varphi \tag{2}$$

Pak lze vyjádřit změnu objemu pláště potrubí vztahem:

$$(\Delta V)_1 = \frac{0{,}2325.\pi.(D-2t)^2.L.D.p}{E.t} \tag{3}$$

a při zanedbání 2t vůči D:

$$(\Delta V)_1 = \frac{0{,}2325.\pi.D^3.L.p}{E.t} \tag{4}$$

2.2 Příspěvek k objemu přičerpané vody v důsledku stlačení vody

Z definice součinitele stlačitelnosti vody A vyplývá, že změna objemu $(\Delta V)_2$ je dána vztahem:

$$(\Delta V)_2 = \int_0^p V(p).A(p).dp \tag{5}$$

kde V(p) je objem vody v potrubí při přetlaku p a A(p) je součinitel stlačitelnosti vody jako funkce přetlaku p.

Zřejmě je

$$V(p) = V_0 + \Delta V_1 = \frac{\pi D^2}{4} L + \frac{0{,}2325\,\pi D^3 L}{E\,t}\,p \tag{6}$$

Objemy rehabilitovaných plynovodních úseků se v závislosti na průměru potrubí pohybují zhruba od 60 m^3 (~ DN200) do 600 m^3 (~ DN700) při typické délce úseku L ~ 1,5 km. Úroveň rehabilitačního přetlaku nepřesahuje zpravidla hodnotu 8 MPa. Pro tuto úroveň přetlaku se hodnota druhého členu v rov. (6) pohybuje mezi 0,06% celkového objemu (~ DN200) a 0,2% celkového objemu (~ DN700). Lze proto druhý člen v rov. (6) zanedbat a v rov. (5) uvažovat, že V(p) ~ $V_0 = \frac{\pi D^2}{4} L$.

Funkci A(p) lze popsat klesající lineární závislostí :

$$A(p) = A_0(T) - h.p \tag{7}$$

Teplotní závislost základní hodnoty součinitele stlačitelnosti vody A_0, odpovídající nulovému přetlaku, lze aproximovat vztahem (viz např. VdTÜV-Merkblatt, 1980):

$$A_0 = 50{,}2183 - 0{,}3813.T + 0{,}011.T^2 - 0{,}0002.T^3 \tag{8}$$

Gradient poklesu součinitele stlačitelnosti vody h s rostoucím přetlakem p je velmi málo závislý na teplotě a v teplotním rozpětí 2 - 20^0 C jej lze považovat za konstantní o velikosti h = $1{,}02.10^{-6}$ MPa^{-2}. Pokud nepřekročí rehabilitační přetlak hodnotu p = 8 MPa, je záporný příspěvek zvýšeného přetlaku k celkové hodnotě součinitele stlačitelnosti menší než 1,8% a lze jej proto zanedbat. Pak lze uvažovat, že A = $A_0(T)$, a rov. (5) získá tvar:

$$(\Delta V)_2 = \frac{\pi.D^2.L.p.A_0(T)}{4} \tag{9}$$

2.3 Příspěvek k objemu přičerpané vody daný stlačením vzduchu

Obsahuje-li potrubní úsek, který se má rehabilitovat přetížením, jisté množství vzduchu, k dosažení určitého tlaku v potrubí bude nutné dodat větší množství vody, než v případě zcela odvzdušněného potrubí. Zvýšený objem přičerpané vody je dán změnou objemu vzduchu (zmenšením) a jeho rozpouštěním ve vodě při nulovém a uvažovaném přetlaku.

Je-li počáteční objem vzduchu při normálních fyzikálních podmínkách V_{vz} (= x .V), platí rovnice

$$a\, V_{vz} = H \tag{10}$$

kde $a = 1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa je fyzikální atmosféra (= 760 torr). H je veličina daná součinem $m\, r\, T$, kde m je hmotnost vzduchu, $r = 287{,}04$ J/(kg.K) je měrná plynová konstanta suchého vzduchu a T = 273,15 K je absolutní teplota. Poměrný obsah vzduchu při fyzikálně normálních podmínkách je $x = V_{vz} / V$, kde $V = \pi D^2/4 \cdot L$. Hmotnost plynu je tudíž $m = x\, V\, \gamma_{vz}$, kde $\gamma_{vz} = 1{,}293$ kg/m^3 je měrná hmotnost suchého vzduchu při fyzikálně normálních podmínkách.

Dosáhne-li se v potrubí přetlak p, pak v jeho důsledku se objem vzduchu zmenší o ΔV a objem vody se o tuto hodnotu zvětší. Bude tedy platit:

$$(p + a) \cdot (V_{vz} - \Delta V) = H \tag{11}$$

Z obou rovnic plyne:

$$\Delta V = H\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{p+a}\right) \tag{12}$$

Po dosazení součinu $a.V.x$ za H do předchozí rovnice dostaneme:

$$\Delta V_3 = \frac{\pi D^2}{4} L\, x \frac{p}{p+a} \tag{13}$$

2.4 Příspěvek k objemu přičerpané vody daný rozpouštěním vzduchu ve vodě

Další příspěvek k objemu přičerpané vody je dán rozpouštěním vzduchu ve vodě. Hmotnost rozpuštěného vzduchu ve vodě M_{rvz} je úměrná hmotnosti vody M_{vo} a působícímu absolutnímu tlaku (p+a) dle vztahu:

$$M_{rvz} = q_{(T)} \cdot M_{vo} \cdot (p+a) \tag{14}$$

kde součinitel rozpustnosti vzduchu ve vodě $q_{(T)}$ je závislý na teplotě T. Průběh této závislosti při tlaku p = 760 torr je uveden na obr.1. Rozpuštěnému množství vzduchu M_{rvz} odpovídá při tlaku (p+a) objem V_{rvz} daný stavovou rovnicí plynu:

$$(p+a).V_{rvz} = M_{rvz}.r.T \tag{15}$$

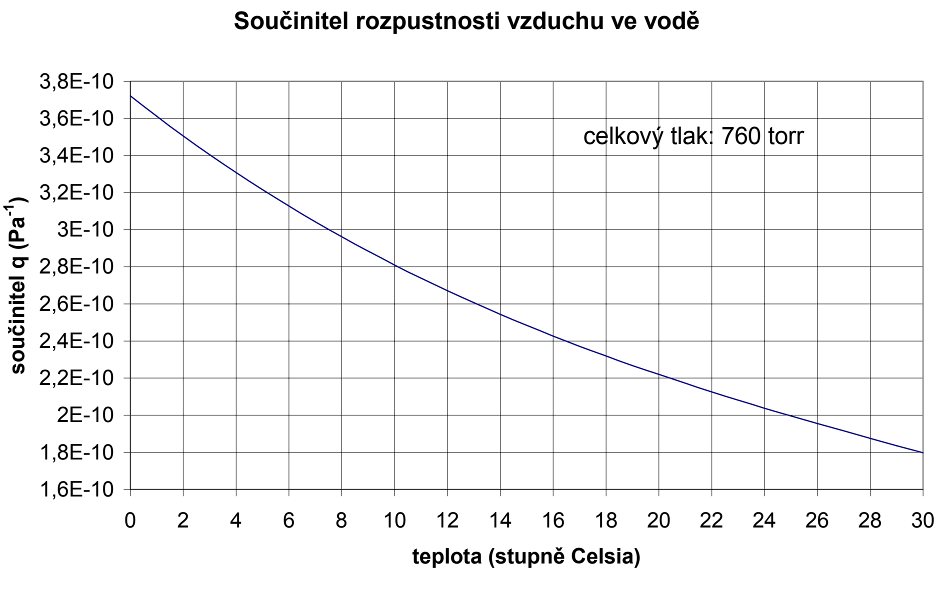
V rov.(15) je V_{rvz} hledaný objem rozpuštěného vzduchu, r je měrná plynová konstanta vzduchu (r = 287,04 J/kg/K) a T je absolutní teplota. Po dosazení za M_{rvz} z rov.(14) do rov.(15) dostaneme:

$$V_{rvz} = q_{(T)}.M_{vo}.r.T \tag{16}$$

To znamená, že objem rozpuštěného vzduchu ve vodě při dané teplotě je úměrný hmotnosti vody M_{vo}. Protože $M_{vo} = V_{vo}.\gamma_{vo}$, můžeme rov.(16) psát ve tvaru:

$$V_{rvz} = q_{(T)}.V_{vo}.\gamma_{vo}.r.T \tag{17}$$

Objem rozpuštěného vzduchu ve vodě při konstantní teplotě se tedy zvyšuje s růstem celkového objemu vody. Je-li původní objem vody v potrubí při nulovém přetlaku (p = 0) $V_{vo,0}$ (= $x.V$), pak při zvýšení přetlaku z nulové hodnoty na hodnotu p se zvýší objem přičerpané vody o hodnotu odpovídající a) deformaci pláště, b) stlačitelnosti vody a c) stlačení zbytkového vzduchu, a objem přičerpané vody v důsledku rozpuštění vzduchu ve vodě bude dán vztahem:



Obr. 1 Teplotní závislost součinitele rozpustnosti vzduchu ve vodě

$$\Delta V_4 = \chi(T) \cdot \left[k_1 p + H \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{p+a} \right) \right] \tag{18}$$

kde $\chi(T) = q(T) \cdot \gamma_{vo} . r . T$ a

$$k_1 = \pi . D^2 . L . \left(\frac{0{,}2325 . D}{E . t} + \frac{A_0}{4} \right) \tag{19}$$

Celkové množství přičerpané vody je pak:

$$\Delta V = [1 + \chi(T)] . \left[k_1 . p + H . \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{p+a} \right) \right] \tag{20}$$

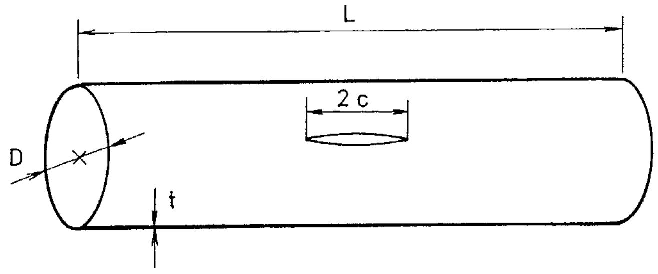
Je tedy zřejmé, že příspěvek k objemu přičerpané vody v důsledku rozpuštění vzduchu ve vodě je $\chi(T)$- násobkem součtu příspěvků od deformace pláště potrubí, stlačitelnosti vody a stlačení zbytkového vzduchu. To znamená, že je tím větší, čím je uvedený součtový příspěvek větší. Při jinak stejných podmínkách je příspěvek od rozpuštění vzduchu ve vodě tím větší, čím je teplota nižší. Budeme-li uvažovat, že v reálných podmínkách rehabilitace plynovodu nemůže teplota vody klesnout pod 0^0C, určíme maximální poměrnou hodnotu tohoto příspěvku. K tomu stačí vyjádřit číselně hodnotu bezrozměrného parametru $\chi(T)$ pro teplotu 0^0C, tj. pro T = 273,15 K.

$$\chi(0^0 C) = q(0^0 C) \cdot \gamma_{vo} . r . 273{,}15 = 3{,}722 . 10^{-10} . 1000 . 287{,}04 . 273{,}15 = 0{,}02918$$

Výsledek ukazuje, že příspěvek k objemu přičerpané vody daný rozpuštěním vzduchu ve vodě je vždy menší než 3% objemu přičerpané vody v důsledku deformace pláště potrubí, stlačitelnosti vody a stlačení zbytkového vzduchu v potrubí. I když se objem přičerpané vody s obsahem vzduchu v potrubí zvětšuje, podíl objemu přičerpané vody připadající na rozpouštění vzduchu ve vodě zůstává stále menší než 3% celkového objemu přičerpané vody. Lze proto tento podíl zanedbat a uvažovat pouze příspěvky od deformace pláště potrubí, od stlačení vody a od stlačení vzduchu.

3. Výtok vody z potrubí průchozí trhlinou

Na obr.2 je schematicky znázorněna trubka s podélnou průchozí trhlinou, namáhaná vnitřním přetlakem vody. Vnější průměr trubky je D, tloušťka stěny t, délka podélné průchozí trhliny je 2c, a vnitřní přetlak vody je p. V důsledku obvodového napětí σ se trhlina otevře a vzniklým kanálkem, omezeným lícemi trhliny, začne docházet k výtoku vody.



Obr. 2 Přímé potrubí s podélnou průchozí trhlinou

Je-li dodávka vody do potrubí schopná krýt její únik kanálkem otevřené trhliny a udržovat tlak na konstantní úrovni p, z Bernoulliho zákona plyne:

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \tag{21}$$

kde v je rychlost vytékající vody
ρ je hustota vody
p je tlak vody

Takto určená rychlost je rychlostí teoretickou. Skutečná výtoková rychlost, ovlivněná zúžením (kontrakcí) průřezu a třením vody o povrch lící trhliny, je nižší a je respektována tzv. výtokovým součinitelem μ:

$$v_{sk} = \mu\sqrt{\frac{2p}{\rho}} \tag{22}$$

Při průtoku kapaliny úzkou rovnou štěrbinou se počítá s výtokovým součinitelem $\mu \cong 0{,}5$ až 0,6. Je-li však štěrbina lomená, je $\mu \cong 0{,}3$ (viz např. Kolář, 1983). V případě trhliny, jejíž líce nejsou rovné a hladké, uvažujeme výtokový součinitel na úrovni $\mu \cong 0{,}1$ (Gajdoš, 1998). Množství vytékající vody za jednotku času Q závisí na rychlosti výtoku v_{sk} a na průřezu proudu F vztahem

$$Q = F.v_{sk}$$

V případě trhliny se jedná o velmi protáhlý eliptický průřez s menší poloosou a závislou na působícím obvodovém napětí σ (a tedy na přetlaku vody p) a na polodélce trhliny c vztahem

$$a = \frac{2\sigma c}{E}$$

Průřez proudu vytékající vody je tedy:

$$F = \pi.a.c = \frac{2.\pi\sigma\, c^2.}{E} = \frac{\pi.D.c^2\, p}{E.t}$$

a množství vytékající vody za jednotku času:

$$Q = k_2\, p^{3/2} \tag{23}$$

kde

$$k_2 = \frac{\pi.D.c^2.\mu}{E.t}.\sqrt{\frac{2}{\rho}} \tag{24}$$

Protože $Q = -\frac{d}{d\tau}\left(\Delta V\right)$, bude

$$-\frac{d}{d\tau}\left(\Delta V\right) = k_2\, p^{3/2} \tag{25}$$

Uvážením, že $d\tau = \frac{\partial\tau}{\partial p}dp$ a po derivaci rov. (23) a výrazu v hranaté závorce rov. (18) – součet objemových příspěvků ΔV_1, ΔV_2 a ΔV_3 - dostaneme:

$$-\frac{k_1 + \dfrac{H}{(p+a)^2}}{k_2\, p^{3/2}}dp = d\tau \tag{26}$$

Integrací levé strany této rovnice od hodnoty $p = p_1$ do hodnoty $p = p$ a pravé strany rovnice od hodnoty $\tau = 0$ do hodnoty $\tau = \tau$ získáme následující vztah:

$$\begin{aligned} \tau = {} & \frac{2k_1}{k_2}\left(\frac{1}{\sqrt{p}} - \frac{1}{\sqrt{p_1}}\right) + \frac{H}{k_2}\left\{\frac{2}{a}\left[\frac{1}{\sqrt{p}(p+a)} - \frac{1}{\sqrt{p_1}(p_1+a)}\right] + \right. \\ & \left. + \frac{3}{a^2}\left[\frac{\sqrt{p}}{p+a} - \frac{\sqrt{p_1}}{p_1+a}\right] + \frac{3}{a^2\sqrt{a}}\left[arctg\sqrt{\frac{p}{a}} - arctg\sqrt{\frac{p_1}{a}}\right]\right\} \end{aligned} \tag{27}$$

Tato rovnice uvádí vztah mezi dobou výtoku vody trhlinou τ a přetlakem vody v potrubním úseku p po přerušení dodávky vody na úrovni přetlaku p_1, přičemž obsah vzduchu v potrubním úseku je charakterizován hodnotou H. Lze ukázat, že množství vody, které vyteče za čas τ daný rovnicí (27), tedy od okamžiku, kdy přestaneme udržovat tlak na hodnotě p_1, do okamžiku, kdy vnitřní přetlak vody klesne na hodnotu p, je dáno jednoduchým vztahem:

$$V_f = k_1(p_1 - p) + H\left(\frac{1}{p+a} - \frac{1}{p_1+a}\right) \tag{28}$$

První člen na pravé straně této rovnice odpovídá příspěvku k objemu vyteklé vody od deformace pláště potrubí a stlačitelnosti vody, zatímco druhý člen odpovídá příspěvku od stlačeného vzduchu.

4. Určení obsahu vzduchu v potrubí

Objem vzduchu v tlakovaném potrubí, resp. konstantu H, která jej charakterizuje, lze určit na základě experimentálně zjištěných hodnot poměru $\frac{\Delta(\Delta V)}{\Delta p}$ při tlakování potrubí na rehabilitační přetlak. Při zanedbání rozpouštění vzduchu ve vodě je závislost objemu přičerpané vody na vnitřním přetlaku p daná vztahem (20) s nulovou hodnotou funkce $\chi_{(T)}$. Derivací tohoto vztahu podle tlaku p zjistíme, že změna objemu přičerpané vody s elementárním nárůstem tlaku je

$$\frac{dV}{dp} = k_1 + \frac{H}{(p+a)^2} \tag{29}$$

Bereme-li přibližně, že $\frac{dV}{dp} \approx \frac{\Delta(\Delta V)}{\Delta p}$, můžeme pro určitou hodnotu tlaku p určit konstantu H:

$$H = (p+a)^2 \left[\frac{\Delta(\Delta V)}{\Delta p} - k_1 \right] \tag{30}$$

a odsud lze také určit poměrný objem vzduchu z celkového objemu potrubního úseku při fyzikálně normálních podmínkách:

$$x = \frac{H}{V \gamma_{vz} r T} \tag{31}$$

5. Určení velikosti trhliny pro zjištěný únik vody

Předpokládáme-li z hlediska pevnostní spolehlivosti potrubí nejhorší případ úniku vody při prodlevě na určité počáteční úrovni tlaku, a to, že voda uniká z potrubí pouze jednou průchozí trhlinou orientovanou v podélném směru, můžeme její rozměr (polodélku c) určit z experimentálně zjištěného časového poklesu tlaku od začátku prodlevy $\frac{\Delta p}{\Delta \tau}$. Vyjdeme při tom z rov. (26), kterou přepíšeme na tvar:

$$k_2 = -\frac{k_1 + \frac{H}{(p+a)^2}}{p^{3/2}} \frac{\Delta p}{\Delta \tau} \tag{32}$$

kde poměr $\frac{\Delta p}{\Delta \tau}$ určíme experimentálně pro malou změnu tlaku Δp na úrovni p. Z vypočtené hodnoty k_2 určíme polodélku trhliny c ze vztahu (24).

Postup ilustrujeme na konkrétním příkladě tlakové reparace potrubního úseku o délce L = 1680 m s potrubím o průměru D = 530 mm a tloušťce stěny t = 6 mm. Při tlakování tohoto potrubního úseku byla zjištěna závislost poměru $\Delta V/\Delta p$ na tlaku p podle tab.1 a závislost poklesu tlaku na čase podle tab.2 po přerušení dodávky vody do potrubí na tlakové úrovni p = 3,807 MPa.

Tab.1 Naměřené dvojice p – ΔV/Δp

p (MPa)	ΔV/Δp (litr/MPa)
4,0	920
4,2	855
4,4	815
5,2	740

Tab.2 Časový pokles tlaku vody

p (MPa)	τ (min)
3,807	0
3,757	15
3,709	30
3,662	45
3,616	60
3,572	75
3,529	90

Nejdříve určíme obsah vzduchu v potrubním úseku. Ze vztahu (30), v němž za H dosadíme výraz $x.V.\gamma_{vz}.r.T$, vyplyne:

$$x.V.\gamma_{vz}.r.T = (p+a)^2.\left[\frac{\Delta(\Delta V)}{\Delta p} - \pi\, D^2 L\left(\frac{0{,}2325D}{Et} + \frac{A_0}{4}\right)\right] \tag{33}$$

Řešením této rovnice pro hodnoty p = p_1 = 4,0 MPa a $\frac{\Delta(\Delta V)}{\Delta p}$ = 920 l/MPa (= 9,2 . 10^{-7} m^3/Pa) dostaneme: x = 0,2705. To znamená, že obsah vzduchu v potrubí při přetlaku p = 0 je 27,05%. K určení polodélky trhliny c potřebujeme nyní stanovit hodnotu k_2 podle rov.(32). K tomu určíme hodnotu konstanty k_1 podle vztahu (19) a hodnotu H dle vztahu $H = x.V.\gamma_{vz}.r.T$:

$$k_1 = 3{,}16076.10^{-7}\ \mathrm{m^3/Pa}$$
$$H = 1{,}01639.10^{7}\ \mathrm{J}$$

Dále potřebujeme určit poměr $\frac{\Delta p}{\Delta \tau}$, nebo $\frac{dp}{d\tau}$ pro určitý tlak p. Je výhodné provést derivaci inverzní funkce, tedy $\frac{d\tau}{dp}$, a tuto uvažovat ve jmenovateli pravé strany rov.(32), protože v tomto případě je možné přímo určit hodnotu $\frac{d\tau}{dp}$ pro konkrétní úroveň přetlaku p. Z hodnot v tab.2 plyne, že závislost $\frac{d\tau}{dp}$ na tlaku p je možné popsat funkcí

$$\frac{d\tau}{dp} \approx 1{,}2273.10^{-8}.p - 6{,}44284.10^{-2}$$

kde τ je v [s] a p v [Pa]. Pak pro tlak p = p_1 = 4,0 MPa máme: $\left.\frac{d\tau}{dp}\right|_{p=p_1} = -1{,}53364.10^{-2}$ [s/Pa]

Z rov.(32) pak dostáváme: $k_2 = 7{,}501.10^{-15} \frac{m^5}{N}\sqrt{\frac{m}{kg}}$

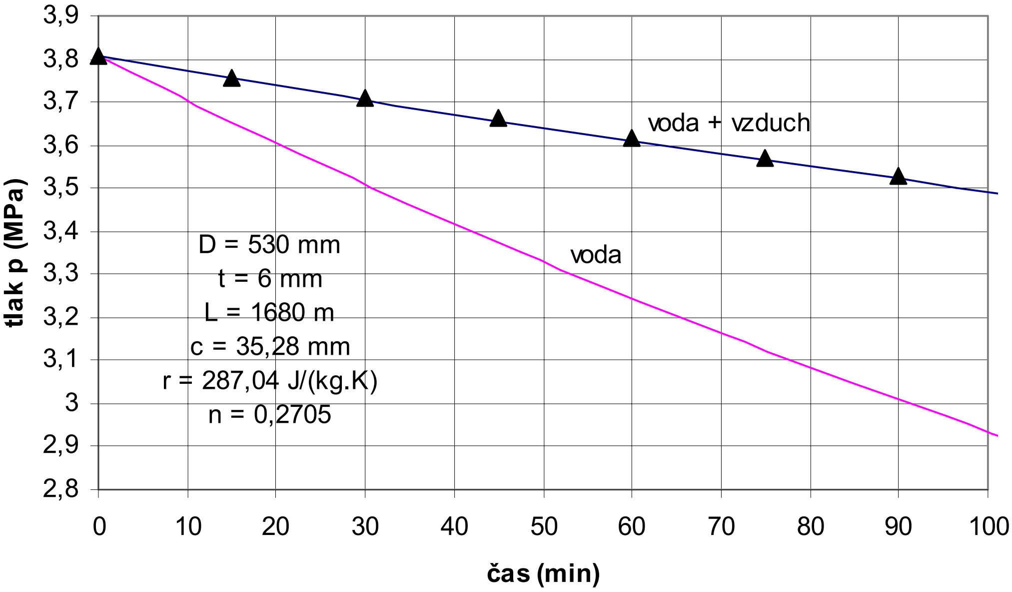
Z rov.(24) pak plyne:

<u>c = 35,3 mm</u>

Abychom mohli získaný výsledek porovnat s experimentálně zjištěnými hodnotami p_i, τ_i z tab.2, zkonstruujeme grafický průběh časové závislosti poklesu tlaku p z hodnoty p = p_1 = 3,807 MPa. K tomu použijeme vztah (27), který nám umožňuje získat dvojice hodnot τ_i , p_i (< p_1). Uvažujeme zde následující hodnoty konstant:

k_1= 3,1608.10^{-7} m^3/Pa; p_1 = 3,807.10^6 Pa; H = 1,01639.10^7 J; k_2 = 7,501.10^{-15} m^5/N.√(m/kg)

Výsledek je zobrazen na obr.3, kde je uvedena i závislost p - τ pro případ dokonale odvzdušněného potrubí (voda) a jsou zde dále vyznačeny i experimentální body z údajů v tab.2.



Obr.3 Časový pokles tlaku vody při úniku trhlinou

Jak z tohoto obrázku vyplývá, je souhlas predikované závislosti poklesu tlaku vody na čase s experimentálně zjištěnými hodnotami výborný. Z toho vyplývá, že vypočtená velikost průchozí trhliny odpovídá zjištěným podmínkám výtoku vody z natlakovaného potrubí. Obrázek dále dokumentuje rychlejší pokles tlaku vody v důsledku jejího úniku trhlinou, pokud potrubí neobsahuje žádný vzduch.

6. Závěr

Výsledky práce umožnily vypracovat konzervativní teoreticko-experimentální metodu určení rozměru ostrého průchozího defektu typu trhliny ve stěně plynovodního potrubí při jeho rehabilitaci přetížením vnitřním tlakem vody.

Základem metody jsou v práci odvozené vztahy mezi velikostí podélné průchozí trhliny a výtokovými podmínkami vody trhlinou. Jedná se o konzervativní metodu, neboť se zde apriorně předpokládá, že netěsností, kterou dochází k úniku vody z potrubí, je trhlina, a dále, že veškerý únik vody je způsoben pouze jednou trhlinou a nikoliv dvěma či více trhlinami.

V budoucnosti bude nutné ověřit odvozené závislosti na řadě dalších trhlin s různými délkami a podle získaných výsledků zpřesnit také hodnotu výtokového součinitele μ. Budoucí praktické zkušenosti s touto ekonomicky a technicky nenáročnou metodou ukáží její uplatnění a eventuální korekce.

7. Poděkování

Tato práce byla podporována grantem MPO č. FA-E 3/009.

8. Literatura

Gajdoš, Ľ. (1998) Rozbor podmínek úniku vody trhlinou v plášti trubky. *Výzk. zpráva ÚTAM AVČR.*

Gajdoš, Ľ. a kol. (2000) *Spolehlivost plynovodních potrubí*. Vydavatelství ČVUT, Praha

Kolář,V., Patočka, C. & Bém, J. (1983) *Hydraulika*. SNTL/ALFA, Praha.

VdTÜV-Merkblatt (1980) *Wasserdruckprüfung von erdverlegten Rohrleitungen nach dem Druck-Temperatur-Meßverfahren*.