

# MĚŘENÍ VÝTOKOVÉHO KOEFICIENTU OTVORŮ S NEPRAVIDELNÝMI OKRAJI

Ondřej Novák<sup>a</sup>, Ilona Pasková<sup>b</sup>, Václav Koza<sup>a</sup>

<sup>a</sup>VŠCHT Praha, Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší, [ondrej.novak@vscht.cz](mailto:ondrej.novak@vscht.cz)  
<sup>b</sup>RWE GasNet

*Průtok plynu otvorem je složitý děj, který je zkoumán již dlouhou dobu. Dosavadní matematická a semi-empirická řešení úspěšně modelují průtok plynu kruhovými otvory pro ustálený tok. V případě neustáleného toku plynu otvorem jsou výsledky stávajících řešení pouze částečně úspěšné, protože výtok plynu je ovlivněn mnoha faktory, mezi které patří geometrické vlastnosti otvoru, kvalita hran otvoru, tloušťka clonového kotouče, režim proudění a termodynamické a chemické vlastnosti plynu. Vzhledem k obtížné parametrizovatelnosti problému je experimentální vyhodnocování výtokového koeficientu stále důležitou oblastí výzkumu. Při porušení plynových potrubí zásahem třetích stran dochází k vytvoření otvorů specifických tvarů s rozřepenými hranami otvoru. Tato práce se zabývá měřením výtokového koeficientu otvorů s výklopem části materiálu nad vlastní otvor a otvorů s rozřepenými hranami při neustáleném výtoku plynu.*

*Klíčová slova: výtokový koeficient, neustálený výtok plynu, výtok plynu z nádoby*

Došlo 24. 7. 2013, přijato 13. 9. 2013

## 1. Úvod

Výtok plynu je složitý proces, který je ovlivněn širokou škálou faktorů. I pro poměrně jednoduchý případ ustáleného proudění plynu otvorem se matematická a semiempirická řešení zaměřují jen na oblast dobře definovaných tenkostěnných clon [1-3].

Výtok stlačeného plynu otvorem je ovlivněn chemickým složením vytékajícího plynu a jeho tlakem a teplotou před otvorem, režimem výtoku a vlastnostmi výtokového otvoru. Děj dále ovlivňují vlastnosti nádoby, ze které plyn vytéká, a vlastnosti okolního prostředí, do kterého plyn vytéká. Vzhledem k složitému systému podmínek, které výtok ovlivňují, je pro technickou praxi třeba jednoduše charakterizovat vztah mezi teoretickým výtokem ideálního plynu ideálním otvorem a reálným výtokem reálného plynu reálným otvorem. Výtokový koeficient otvoru je pak považován za parametr, který ve výpočtech ovlivňuje velikost plochy otvoru [4].

V průběhu výtoku se mění termodynamické vlastnosti plynu v nádobě a je tedy třeba přihlížet nejen k okamžitým hodnotám termodynamických veličin, ale i k jejich historii [5]. Teplota plynu v nádobě v průběhu reálného výtoku nemůže poklesnout pod teplotu při adiabatickém výtoku. Zároveň dochází k ovlivnění teploty plynu přestupem ze stěny nádoby a případně prostupem tepla z okolí přes stěnu nádoby. Přestup tepla ze stěn je při déletrvajících výtociích plynu hlavním faktorem, který ovlivňuje teplotu plynu v nádobě během výtoku [6].

Hlavním mechanismem sdílení tepla je v tomto případě proudění. Vzhledem k prudkému poklesu teploty plynu při výtoku dochází k neustálenému přestupu tepla mezi plynem a stěnou nádoby. Pokud je nádoba dostatečně velká, aby se neprojevovalo proudění způsobené výtokem plynu uvnitř nádoby, mělo by u plynu docházet k volnému proudění v důsledku teplotních gradientů v nádobě. Podle publikovaných výsledků je ale

přestup tepla vyšší, než by odpovídalo volnému proudění [7-9].

Dalším faktorem, který ovlivňuje výtok plynu otvorem a tedy i hodnoty výtokového koeficientu, jsou tvary otvorů a ostrost jejich hran [10-12].

Průběhy výtokových koeficientů pro kruhové, čtvercové, trojúhelníkové a štěrbinové otvory při výtoku methanu z nádoby jsou publikovány v [13]. Tento článek je zaměřen na měření výtokového koeficientu otvorů různých tvarů s nepravidelnými otřepy na hranách a pro clony s výklopem části materiálu nad otvor clony, které lze najít například při narušení plynovodů zásahem třetích stran, na rozšířeném souboru clon. Dále je diskutován vliv polohy otřepů vzhledem ke směru proudění plynu na hodnoty výtokového koeficientu v kritickém a podkritickém režimu.

## 2. Experimentální část

### 2.1. Teoretický popis systému

Tlaková nádoba o objemu  $V$  [m<sup>3</sup>] je naplněna plynem, který má molární hmotnost  $M$  [kg.mol<sup>-1</sup>] a izoentropický koeficient (Poissonova konstanta, poměr měrných tepelných kapacit)  $\kappa$  [-]. Absolutní tlak plynu v nádobě je  $P$  [Pa] a jeho absolutní teplota je  $T$  [K]. Plyn v okolí nádoby je vzduch s absolutní teplotou  $T_{atm}$  absolutním tlakem  $P_{atm}$ .

Kritický tlakový 2poměr  $\beta$  [-] je definován

$$\beta = \frac{P_{atm}}{P_{krit}} = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \quad (1)$$

kde  $\kappa$  je izoentropický koeficient a  $P_{krit}$  [Pa] je kritický tlak. Při dosažení kritického tlaku proudí vytékající plyn rychlostí zvuku a s dalším zvyšováním tlaku  $P$  se rychlost plynu nemění.

K nádobě je připojena armatura, ke které je upevněna clona s plochou otvoru  $S$  [m<sup>2</sup>]. Teoretická hodnota hmotnostního toku plynu proudícího tímto otvorem je

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m} \quad (2)$$

kde  $m$  [kg] je hmotnost plynu,  $t$  [s] je čas,  $\dot{m}$  [kg s<sup>-1</sup>] je hmotnostní tok a  $G_{teor}$  [kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>] je teoretická hustota hmotnostního toku.

V průběhu experimentu jsou okolní tlak a teplota považovány za neměnné. Dále je zanedbána tepelná roztažnost materiálu nádoby a objem nádoby je tedy považován též za neměnný. Plyn v nádobě má konstantní složení v průběhu experimentu. Vzhledem k poměrně nízkým tlakům, při kterých byly experimenty prováděny, je zanedbán vliv kompresibility a plyn je považován za ideální.

Teoretická hustota hmotnostního toku pro adiabatický tok je v čase  $t$  [s] pro podkritický tok, kde  $P_{atm}/P > \beta$ , rovna

$$G_{teor}(t) = P_{atm}^{1/\kappa} P(t)^{(\kappa-1)/\kappa} \cdot \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{M}{RT(t)} \left( 1 - \left( \frac{P_{atm}}{P(t)} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)} \quad (3)$$

a pro kritický tok, kde  $P_{atm}/P < \beta$ , je

$$G_{teor}(t) = P(t) \sqrt{\frac{M}{RT(t)} \kappa \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad (4)$$

kde  $R$  [J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] je univerzální plynová konstanta, která je rovna  $R=8.314$  J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> a  $M$  je molární hmotnost [kg mol<sup>-1</sup>].

Hmotnost plynu v nádobě v čase  $t$  lze vyjádřit ze stavové rovnice ideálního plynu:

$$m(t) = \frac{P(t)VM}{RT(t)} \quad (5)$$

Hustotu hmotnostního toku pro každý okamžik  $t$  lze získat numerickou derivací z rovnic 2 a 5, pokud je v každém okamžiku výtoku změřen tlak  $P(t)$  a teplota  $T(t)$  plynu v nádobě:

$$G_{exp}(t) = \frac{\dot{m}}{S} \quad (6)$$

Podíl reálné hustoty hmotnostního toku  $G_{exp}(t)$  a teoretické hustoty hmotnostního toku  $G_{teor}(t)$  je výtokový koeficient

$$\alpha(t) = \frac{G_{exp}(t)}{G_{teor}(t)} \quad (7)$$

Výtokový koeficient zahrnuje vliv nejrůznějších parametrů otvoru na průtok tekutiny daným reálným otvorem oproti teoretickému toku tekutiny ideálním otvorem, který má stejnou plochu.

## 2.2. Testované otvory

Testování bylo provedeno na obdélníkových a trojúhelníkových clonách s výklopem materiálu nad vlastní otvor clony (viz obr. 1) a clonách s různě vychlípenými hranami (viz obr. 2 – 5). Jako referenční byly použity tenkostěnné clony s kruhovými otvory a dále clony se čtvercovými a trojúhelníkovými otvory s podobnými plochami, jako jsou plochy otvorů clon s výklopem nebo vychlípenými hranami.

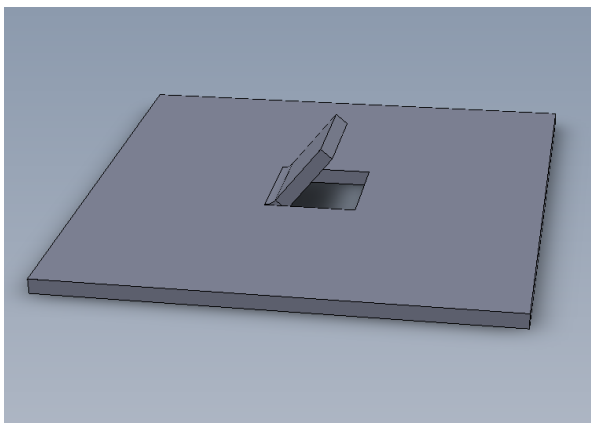
Parametry měřených clon jsou v tabulce 1. Za plochu otvorů clon s výklopem je považována plocha volného otvoru v horní rovině clony v pozici výklopem nahoru. Plocha clon s vychlípenými hranami byla zjištěna optickou cestou na fotografiích metodou počítání obrazových bodů.

Tab. 1 Parametry testovaných clon

Clona	Tvar otvoru	S [mm <sup>2</sup> ]	Úhel výklopu [°]
1.6	kruh	110,47	
1.7	kruh	260,16	
C1.1	čtverec	28,62	
C1.2	obdélník	23,01	33
C1.3	obdélník	24,08	45
C1.4	obdélník	26,75	55
C2.1	čtverec	113,42	
C2.2	obdélník	93,72	33
C2.3	obdélník	84,14	55
C2.4	obdélník	99,05	45
T1.1	trojúhelník	22,45	
T1.2	trojúhelník	11,71	27
T1.3	trojúhelník	19,44	47
T1.4	trojúhelník	17,74	60
T2.1	trojúhelník	99,39	
T2.2	trojúhelník	74,37	27
T2.3	trojúhelník	81,08	47
T2.4	trojúhelník	80,92	60
H8	nepravidelný, oblý	145,40	
H9	kruhový, zubovitý	298,00	
H11	kruhový	223,70	
H13	nepravidelný oblý	157,90	

## 2.3. Experimentální zařízení

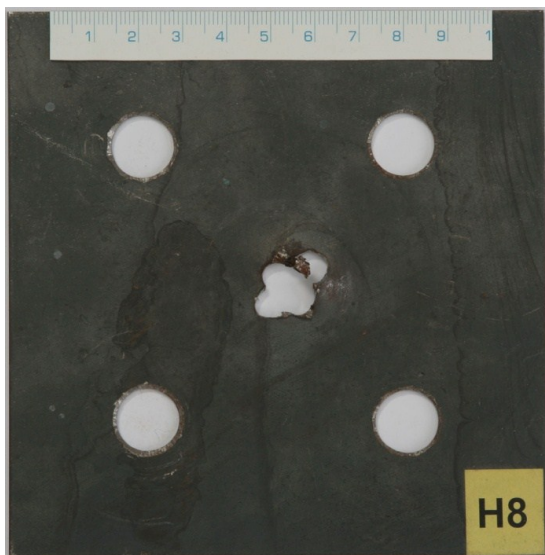
Pro měření výtokových koeficientů clon při neustáleném výtoku plynu bylo postaveno experimentální zařízení, které je složeno z běžně dostupných průmyslových součástí. Základem zařízení je tlaková nádoba Aquamat P (Dukla Trutnov), sada termočlánků a elektronické tlakové čidlo (viz obr. 6).



**Obr. 1** Model clony s výklopem materiálu nad otvor clony



**Obr. 4** Clona H11



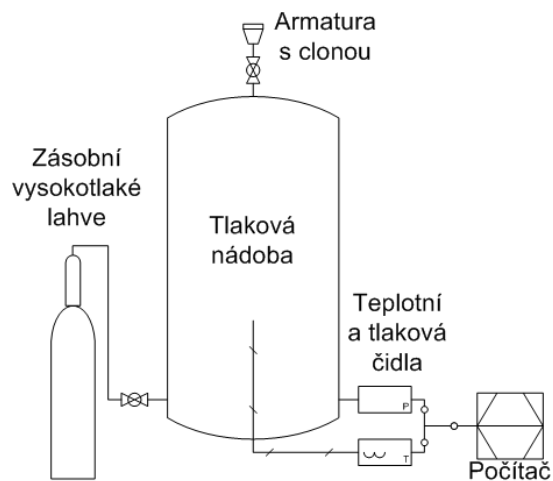
**Obr. 2** Clona H8



**Obr. 5** Clona H13



**Obr. 3** Clona H9



**Obr. 6** Blokové schéma měřícího zařízení

Tlaková nádoba má objem  $0.16 \text{ m}^3$  a umožňuje měření do tlaku 1 MPa. Pro měření teploty uvnitř tlakové nádoby a teploty okolního plynu jsou použity termočlánky s odhaleným svarem typu T, tedy měď – konstantan. Referenčním čidlem teploty je odporový snímač Pt100. Měření tlaku je zajišťováno elektronickým tlakovým čidlem DMP 331, vizuální kontrolu tlaku lze provést pomocí manometru s viditelnou stupnicí.

Experimentální tlaková nádoba je přes redukční ventil plněna ze zásobních vysokotlakých lahví. Tím je zajištěno konstantní složení plynu v průběhu celé sady měření. Signály z čidel tlaku a teploty jsou vzorkovány dvanáctibitovým analogově–číslicovým (A/D) převodníkem a číslicová data jsou uložena do počítače ve formě textových souborů.

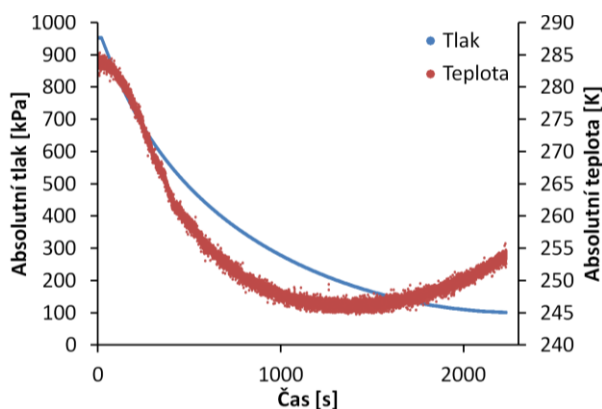
#### 2.4. Průběh měření

Tlaková nádoba měřicího zařízení je naplněna plynem ze zásobní vysokotlaké lahve na přetlak  $0,85 \text{ MPa}$  proti okolnímu tlaku. Při plnění dochází k redukci tlaku, se kterým se pojí prudký pokles teploty plynu v tlakové nádobě měřicího zařízení. Doba vyrovnání teploty v nádobě na teplotu okolí je třicet minut. Poté je upraven tlak v tlakové nádobě na hodnotu v rozmezí  $0,85 - 0,86 \text{ MPa}$ .

V průběhu ustalování podmínek v tlakové nádobě je na výtokovou armaturu připevněna testovaná clona. Je změřen a zaznamenán barometrický tlak. Po ustálení tlaku a teploty v tlakové nádobě měřicího zařízení je spuštěn program pro vzorkování dat. Následně je otevřen vypouštěcí ventil a zahájen vlastní výtok plynu testovanou clonou.

#### 2.5. Zpracování naměřených dat

Výsledkem jednotlivých měření jsou hodnoty tlaku a teploty plynu uvnitř nádoby v průběhu výtoku (viz obr. 7). Zpracování naměřených dat je provedeno dávkově výpočetními skripty v jazyce R [14]. Numericky je odstraněn šum superponovaný na signály hodnot tlaku a teploty.



**Obr. 7** Naměřené hodnoty absolutního tlaku a teploty uvnitř nádoby při výtoku methanu clonou T1.2 v poloze proti proudu

Teplota plynu v nádobě v každém okamžiku výtoku je vypočtena podle modelu publikovaného v [7], který vychází ze zákona zachování energie při izoentropickém výtoku ideálního plynu z nádoby s okrajovými podmínkami vedení tepla na vnější a vnitřní stěně nádoby. Model dobře predikuje střední teplotu plynu v nádobě pro kritický tok, pro podkritický tok jsou predikované hodnoty teploty nižší než hodnoty teploty plynu zjištěné experimentálně.

Z naměřených hodnot tlaku a modelovaných hodnot teploty je pro každý okamžik spočítána teoretická a experimentální hodnota hustoty hmotnostního toku a odpovídající hodnota výtokového koeficientu.

Dále je vyhodnocena průměrná relativní odchylka  $\bar{\varepsilon}$  mezi výtokovými koeficienty jednotlivých otvorů:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - x_i}{x_i} \right)}{n}, \quad (8)$$

kde  $x_i$  je hodnota výtokového koeficientu referenčního otvoru a  $y_i$  je hodnota výtokového koeficientu porovnávaného otvoru v  $i$  – tém měřeném bodě a  $n$  je počet změřených bodů.

Průměrná relativní odchylka je vyhodnocena zvlášť pro kritický a podkritický tok, aby bylo možné porovnat chování výtokového koeficientu v obou režimech výtoku.

### 3. Výsledky a diskuse

Použité termočlánky mají časovou konstantu, která pro měření s krátkou dobou výtoku neumožňuje dostatečně přesné měření teploty plynu uvnitř nádoby. Proto byl na základě modelu publikovaného v [7] vytvořen numerický model průběhu teploty plynu uvnitř nádoby během výtoku. Model zahrnuje přestup tepla volným prouděním z okolního prostředí a přestup tepla turbulentním volným prouděním ze stěn nádoby do plynu uvnitř nádoby.

Clony s výklopem a clony s otřepanými hranami byly testovány v poloze výklopu po směru vytékajícího plynu (označení *po*) a proti směru vytékajícího proudu (označení *proti*). Výsledky v grafech na obrázcích 8 až 13 jsou uspořádány podle tvaru otvorů a podobné velikosti plochy otvorů. Měření byla provedena s methanem. Okolní atmosférický tlak v průběhu měření byl  $98 \text{ kPa}$ . Čerchovaná svislá čára na grafech označuje kritický tlakový poměr  $P_{atm}/P = 0,5429$ .

**Tab. 2** Odchytky výtokových koeficientů otvorů clon, referenční je vždy první clona ze dvojice

Clony	Průměrná rel. odchylka (%)	
	kritický tok	podkritický tok
C1.1 - C1.2 po	-22,94	-12,05
C1.1 - C1.2 proti	-30,55	-25,08
C1.1 - C1.3 po	-14,07	-3,28
C1.1 - C1.3 proti	-24,17	-19,54
C1.1 - C1.4 po	-4,10	-0,13
C1.1 - C1.4 proti	-16,57	-14,28
C2.1 - C2.2 po	-19,06	-7,63
C2.1 - C2.2 proti	-28,26	-19,78
C2.1 - C2.3 po	5,56	10,76
C2.1 - C2.3 proti	-5,03	2,95
C2.1 - C2.4 po	-8,94	-4,4
C2.1 - C2.4 proti	-17,65	-10,53
T1.1 - T1.2 po	-35,26	-23,47
T1.1 - T1.2 proti	-38,97	-29,52
T1.1 - T1.3 po	-38,04	-28,96
T1.1 - T1.3 proti	-43,11	-38,21
T1.1 - T1.4 po	-28,41	-16,75
T1.1 - T1.4 proti	-35,05	-29,76
T2.1 - T2.2 po	-48,38	-34,33
T2.1 - T2.2 proti	-52,47	-39,03
T2.1 - T2.3 po	-29,85	-20,76
T2.1 - T2.3 proti	-35,99	-26,45
T2.1 - T2.4 po	-5,6	1,6
T2.1 - T2.4 proti	-16,14	-7,58
C1.2 po - C1.2 proti	-10,39	-14,83
C1.3 po - C1.3 proti	-12,24	-16,81
C1.4 po - C1.4 proti	-13,43	-14,08
C2.2 po - C2.2 proti	-11,89	-10,69
C2.3 po - C2.3 proti	-10,74	-3,08
C2.4 po - C2.4 proti	-10,85	-5,56
T1.2 po - T1.2 proti	-5,93	-7,9
T1.3 po - T1.3 proti	-8,4	-12,97
T1.4 po - T1.4 proti	-10,34	-15,47
T2.2 po - T2.2 proti	-7,95	-7,28
T2.3 po - T2.3 proti	-9,76	-6,33
T2.4 po - T2.4 proti	-11,2	-5,01
H8 po - H8 proti	-7,06	-11,59
H9 po - H9 proti	0,99	-1,17
H11 po - H11 proti	-4,85	-7,79
H13 po - H13 proti	-4,55	-14,46

Na obrázcích 8 – 13 jsou na levé straně grafů jasně patrné náběhy hodnot výtokového koeficientu, na které charakterizují postupné otevírání vypouštěcího ventilu na počátku výtoku. Tyto náběhové křivky vznikly v důsledku pomalého otevírání ručně ovládaného vypouštěcího ventilu.

Z grafů je patrné, že tvar křivek průběhu výtokového koeficientu clon záleží nejen na tvaru otvoru, ale i na velikosti plochy otvoru. Výklop či ořep hran posouvají křivky průběhu výtokového koeficientu clon na ose  $y$ , na tvar křivek mají ale jen malý vliv.

Clony s výklopem vykazují obecně nižší hodnoty výtokového koeficientu než dvourozměrné clony s podobnou plochou (viz tab. 2). Výjimkou je clona C2.3, která má úhel výklopu  $55^\circ$  a která v poloze výklopu po směru proudu vykazovala vyšší hodnoty výtokového koeficientu než clona C2.1. Clony C2.3 v poloze *proti proudu* a T2.4 v poloze *po proudu* mají v podkritickém režimu toku taktéž vyšší hodnoty výtokového koeficientu než srovnatelné dvourozměrné clony.

Relativní odchylky výtokového koeficientu mezi dvourozměrnými clonami a clonami s výklopem se obecně snižují se vzrůstajícím úhlem výklopu (viz tab. 2). Výjimkou je clona T1.3, která má jak v poloze *po proudu* tak v poloze *proti proudu* nejmenší relativní odchylku výtokového koeficientu z clon skupiny T1.

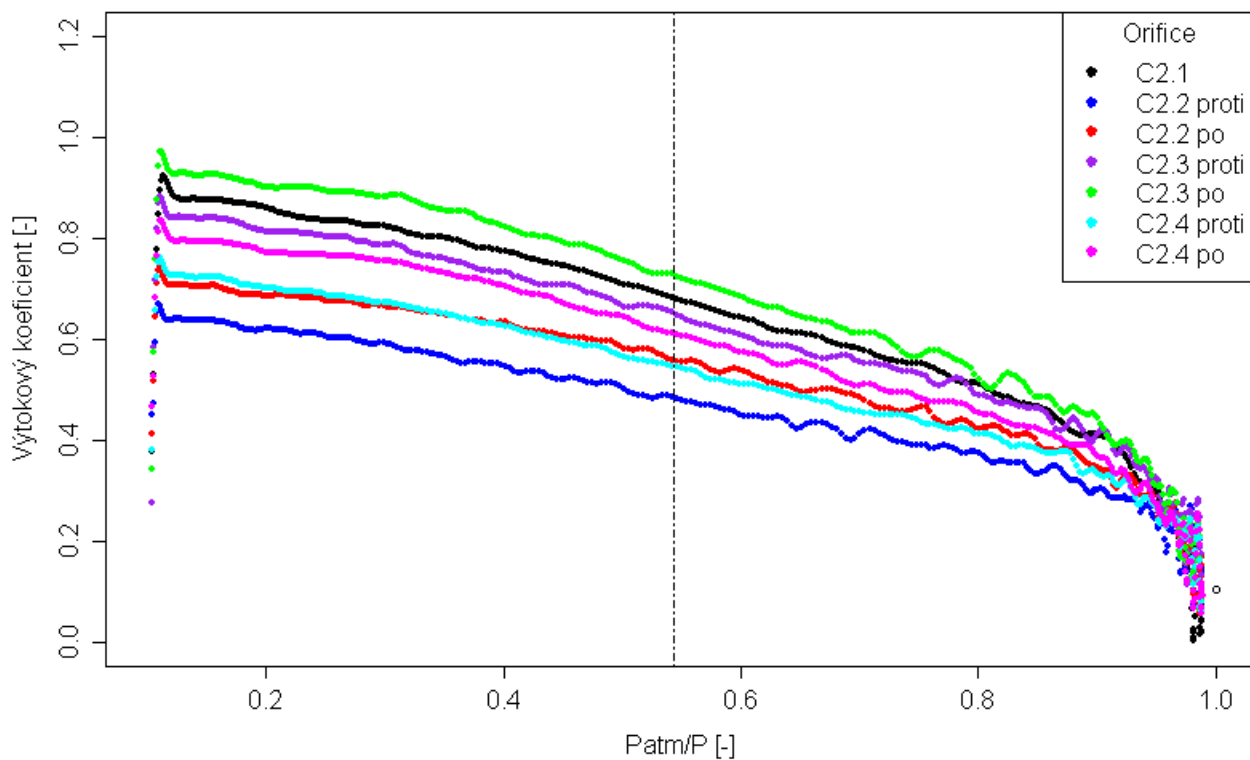
Relativní odchylky výtokového koeficientu mezi clonami s výklopem a dvourozměrnými clonami jsou vyšší v kritickém režimu než v podkritickém režimu. Nejvyšší relativní rozdíly výtokového koeficientu mezi clonami s výklopem a dvourozměrnými clonami vykazují clony s trojúhelníkovým otvorem skupiny T2.

Výtokové koeficienty clon s ořepy na hranách (H8, H9, H11 a H13) jsou výrazně vyšší než u porovnávaných clon s kruhovými otvory (viz obr. 12 a 13). Ve srovnání s clonami s výklopem mají tyto clony v kritickém režimu výtoku nižší relativní odchylky výtokových koeficientů mezi polohami *po proudu* a *proti proudu*. Překvapením jsou nízké hodnoty průměrné relativní odchylky výtokového koeficientu mezi polohami u clony H9 s velmi *otrhanými* hranami otvoru. Naopak největší průměrnou relativní odchylku výtokového koeficientu v kritickém režimu mezi polohami má clona H8, která má pouze jeden výrazný ořep na hraně.

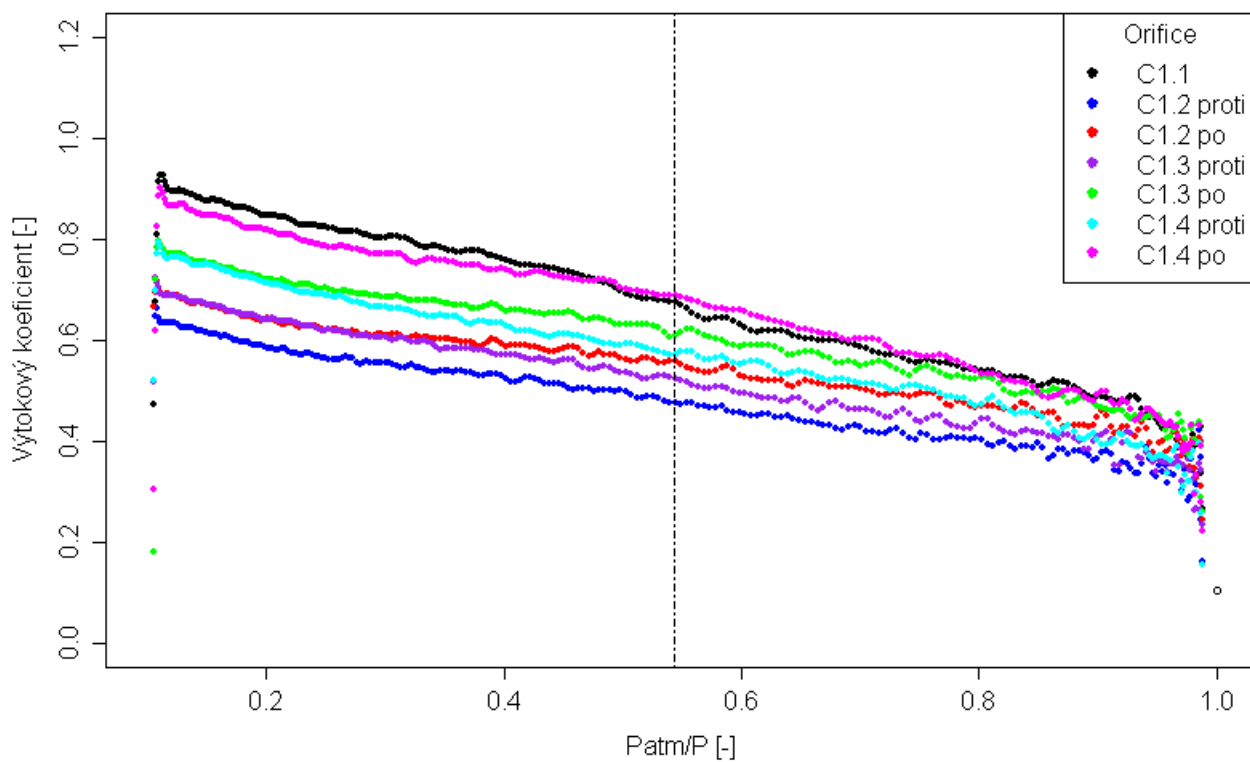
#### 4. Závěr

Článek se zabývá měřením výtokového koeficientu pro otvory s nepravidelnými hranami a ořepem na hranách. Při měření výtokových koeficientů těchto otvorů byl použit methan. Účelem měření bylo lépe prostudovat vliv nepravidelných hran otvorů a vliv ořepů na hranách na výtokový koeficient a tím modelovat případy narušení plynovodů z vnějšku zásahem třetích stran.

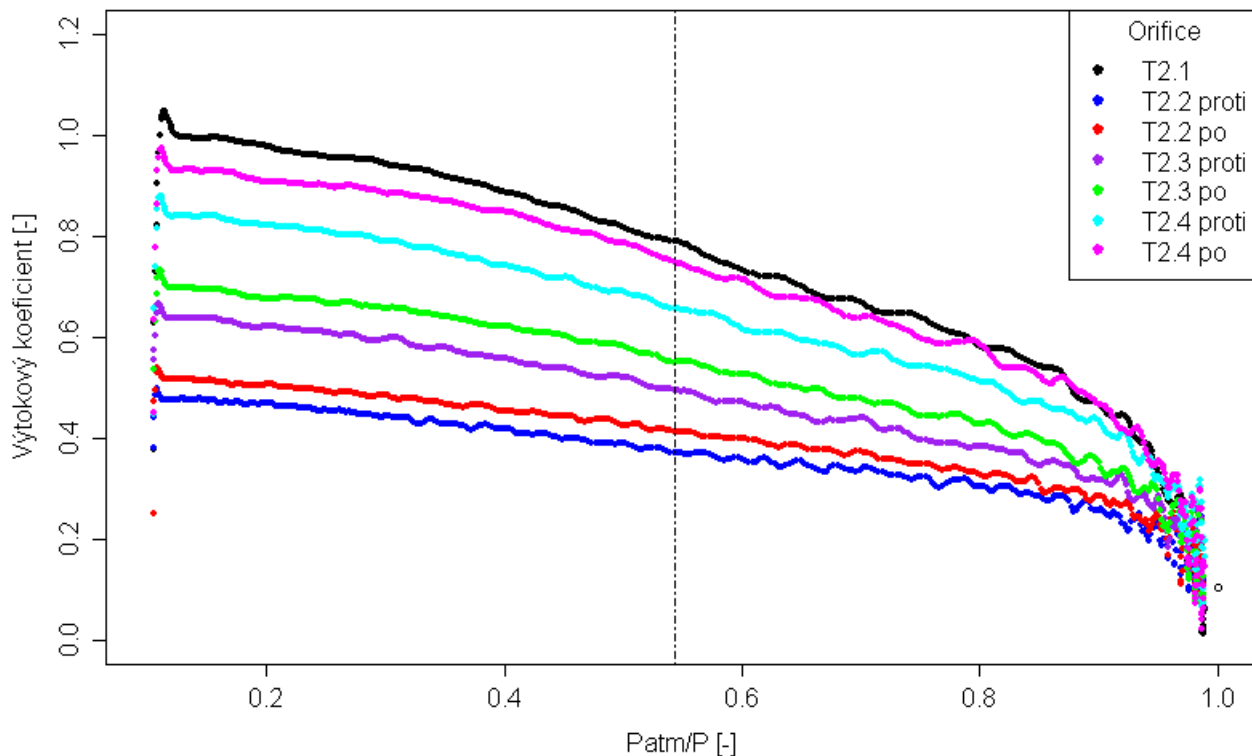
Výsledky prokázaly velký vliv úhlu výklopu materiálu na výtokový koeficient otvoru oproti dvourozměrnému otvoru se srovnatelnou plochou. Hodnoty výtokového koeficientu otvorů s výklopem při měření s výklopem *proti proudu* byly o zhruba deset procent menší než v poloze s výklopem *po proudu*.



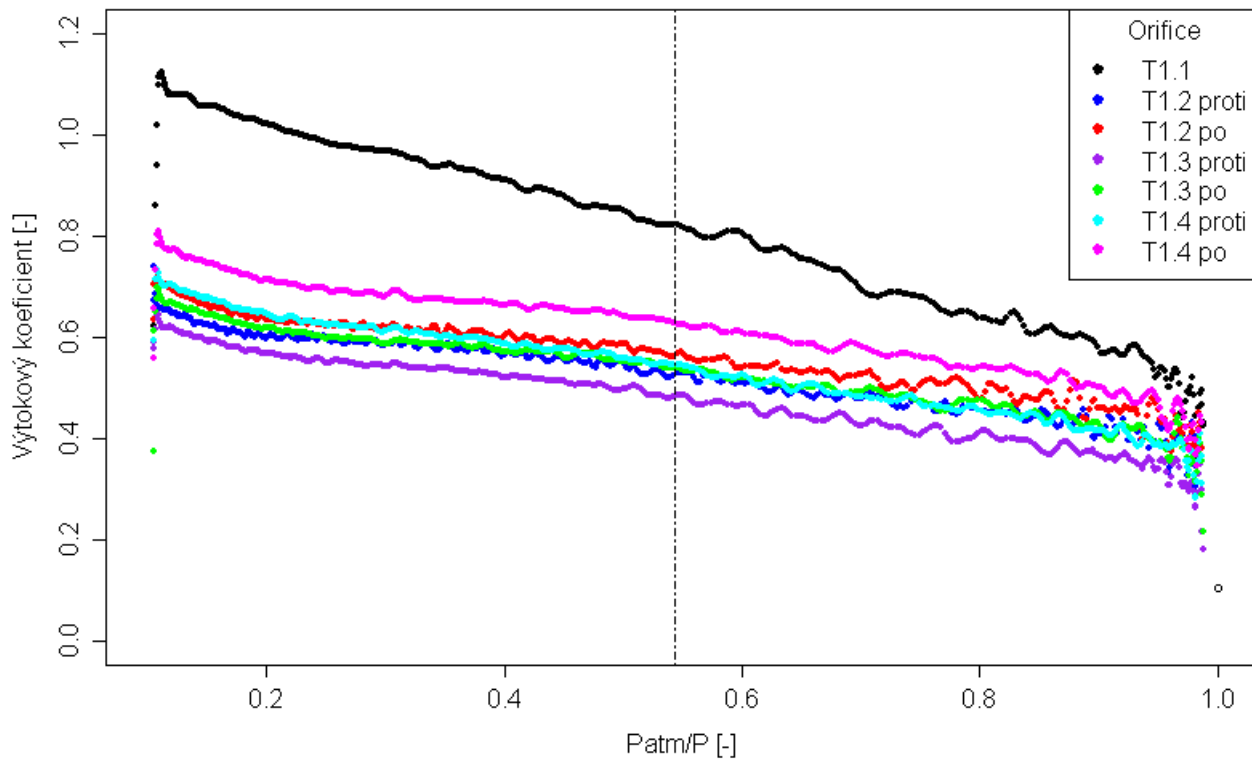
**Obr. 8** Průběh výtokového koeficientu pro clony s čtvercovým a obdélníkovým otvorem a malou plochou otvoru



**Obr. 9** Průběh výtokového koeficientu pro clony s čtvercovým a obdélníkovým otvorem a větší plochou otvoru

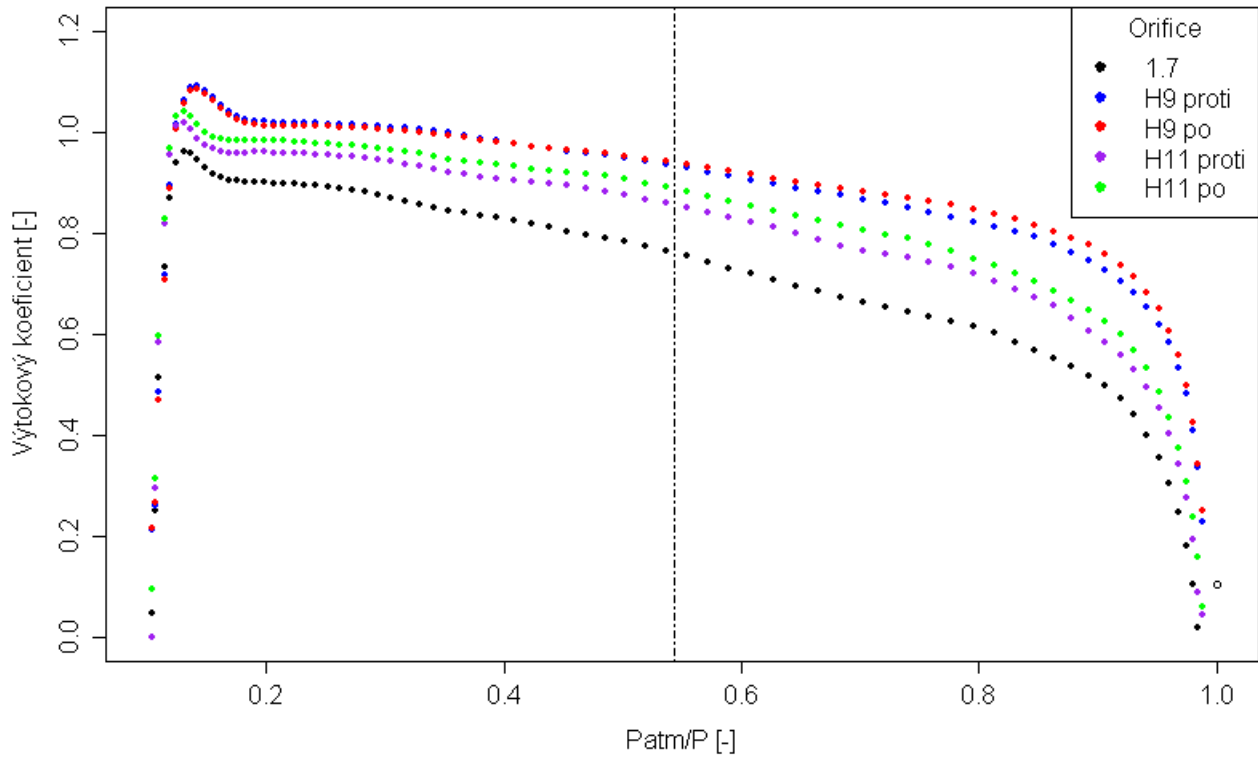


**Obr. 10** Průběh výtokového koeficientu pro clony s trojúhelníkovými otvory a malou plochou otvoru

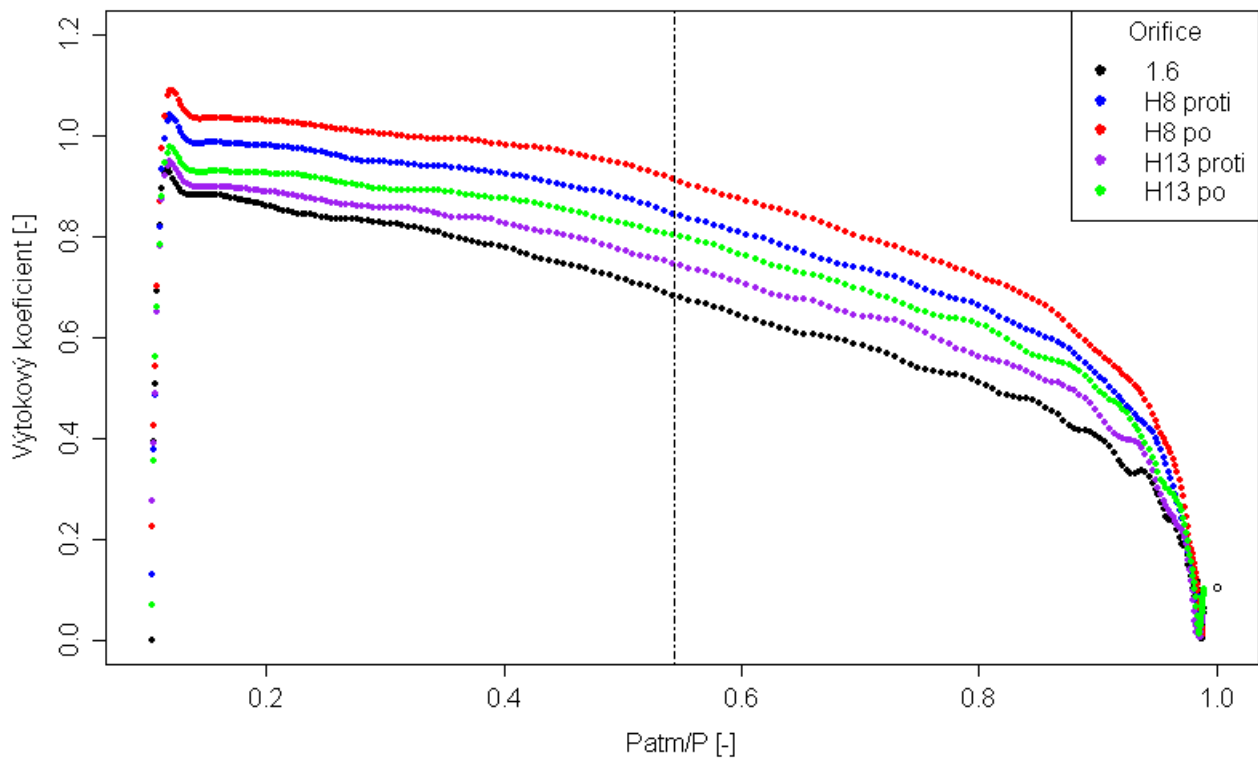


**Obr. 11** Průběh výtokového koeficientu pro clony s trojúhelníkovým otvorem a větší plochou otvoru





**Obr. 12** Průběh výtokového koeficientu pro clony s kruhovým otvorem s rozřepenými hranami a referenční clonu s kruhovým otvorem s ostrou hranou



**Obr. 13** Průběh výtokového koeficientu pro clony s oválným otvorem s rozřepenými hranami a referenční clonu s kruhovým otvorem s ostrou hranou



## Seznam symbolů

$G$	hustota hmotnostního toku	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$
$\dot{m}$	hmotnostní tok	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
$M$	molární hmotnost	$[\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}]$
$P$	absolutní tlak v nádobě	Pa
$P_{atm}$	atmosférický tlak	Pa
$P_{krit}$	kritický tlak	Pa
$R$	univerzální plynová konstanta $R=8,314\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$[\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$S$	plocha	$[\text{m}^2]$
$t$	čas	$[\text{s}]$
$T$	termodynamická teplota	
$V$	objem	
$\alpha$	výtokový koeficient	$[-]$
$\beta$	kritický tlakový poměr	$[-]$
$\kappa$	izoentropický koeficient, Poissonova konstanta	

## Literatura

1. Bragg, S. L. Effect of Compressibility on the Discharge Coefficient of Orifices and Convergent Nozzles. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 1960, 2, 1, s. 35–44.
2. Benson, R. S. – Pool, D. The Compressible Flow Discharge Coefficients for a Two-Dimensional Slit. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1965b, 7, s. 337–353.
3. Deckker, B. E. L. – Chang, Y. F. Paper 7: An Investigation of Steady Compressible Flow through Thick Orifices. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*. 1965, 180, 10, s. 312–323.
4. Lapple, C. E. Isothermal and Adiabatic Flow of Compressible Fluids. *AIChE*. 1943, 39, s. 385–428
5. Chang, Y. F. Transient Effects in the Discharge of Compressed Air from a Cylinder through an Orifice. PhD. Thesis, University of Saskatchewan, 1968
6. Johnston, S. C. A Characterization of Unsteady Gas Discharge from a Vessel, Dissertation, University of California, Davis, 1974
7. Landram, C. S. Heat Transfer during Vessel Discharge: Mean and Fluctuating Gas Temperature. *Journal of Heat Transfer*. 1973, 95, 1, s. 101–106.
8. Haque, A. et al. Rapid depressurization of pressure vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* s. 1990, 3, 1, s. 4 – 7.
9. Xia, J. – Smith, B. – Yadigaroglu, G. A simplified model for depressurization of gas-filled pressure vessels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 1993, 20, 5, s. 653 – 664.
10. Deckker, B. E. L. Compressible Flow through Square Edge Rectangular Orifices. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1978, 192, 1, s. 277–288.

11. Deckker, B. E. L. – Chang, Y. F. Paper 19: Slow Transient Compressible Flow through Orifices. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*. 1967, 182, 8, s. 175–183.
12. Kayser, J. – Shambaugh, R. Discharge coefficients for compressible flow through small-diameter orifices and convergent nozzles. *Chemical Engineering Science*. 1991, 46, 7, s. 1697–1711.
13. Pasková, I – Novák, O. – Koza, V. Measurement of Gas Discharge Coefficient, *Paliva*, 2013, 2, s. 71–78
14. R Development Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2011, 409 p., ISBN 3-900051-07-0.

## Summary

*Ondřej Novák, Ilona Pasková, Václav Koza  
ICT Prague, Department of gas, coke and air protection, RWE GasNet*

**Measuring of a discharge coefficient of orifices with irregular edges**

In this paper we proposed measurements of the discharge coefficient for several types of orifices with irregular shapes of their opening and irregular edges of the opening. In addition we measured special type of orifices that extends measuring of discharge coefficient of the two – dimensional orifices to the measuring of the discharge coefficient of orifices with a three – dimensional lift. They can be found on ruptured pipelines during pipeline accidents caused by puncturing the pipeline from outer side.

We proposed an apparatus, which was built from widely available industrial parts. The apparatus consists of high pressure supply tanks, a working pressure vessel with volume of  $0.16\text{ m}^3$ , several thermocouples, an electronic pressure sensor and a flange for tested orifices. We used a theoretic approach to determine the temperature of the gas inside the vessel during measured discharge process.

Methane was used during our measurements. Results show that the discharge coefficient of a lifted orifice is lower than the discharge coefficient of a two-dimensional orifice with comparable area and shape of opening. The discharge coefficient of the lifted orifice grows with the increasing angle of the lift. The influence of an irregular shape of the opening on the discharge coefficient of the orifice is lower than the influence of a lifted part of the orifice material over its opening area.