

DETERMINATION OF THE SMALL HEAT EXCHANGERS LEAK

V. Horák^{*}, D. Rozehnal^{**}

Summary: *The paper presents thermodynamic processes analysis connected with the identification and quantification of the air leak discharge from small heat exchangers – coolers, condensers, evaporators. Outlined theoretical solution was verified by the experiment. Time pressure drop during air leak discharge was measured for various heat exchangers volume and leakage size.*

1. Východiska, cíle a prostředky řešení problému

Potřeba podrobnějšího popisu jevů a procesů spojených s výtokem plynu z nádoby malým otvorem vyvstala ve spojitosti s požadavkem identifikovat a kvantifikovat netěsnost malých výměníků tepla – chladičů, kondenzátorů, výparníků.

Případná netěsnost se v technologickém procesu určuje na základě úniku stlačeného vzduchu z výměníku tepla netěsností. Tento výtok se běžně určuje prostřednictvím měřeného poklesu tlaku vzduchu v závislosti na čase, tj. jeho časovou derivací.

Cílem příspěvku je provést teoretický rozbor jevů a procesů spojených s popsáním způsobem určování netěsností malých výměníků tepla. Na základě tohoto rozboru posoudit možnosti zjišťování netěsnosti únikem vzduchu při snížených tlacích. Realizaci experimentu ověřit správnost teoretického řešení problému a identifikovat případné vedlejší jevy a vlivy.

Teoretický rozbor úlohy představuje:

- rozbor fyzikální podstaty problému a formulaci rovnic pro teoretické řešení;
- matematickou simulaci úniku netěsností výparníku jako výtok vzduchu malým otvorem při nadkritickém i podkritickém tlakovém spádu;
- řešení závislosti tlaku a teploty vzduchu na čase při úniku netěsností v rozsahu tlaků (míněno přetlaků) od 2 MPa až nulový přetlak;
- varianty výpočtu pro různé velikosti netěsnosti a rozměry výměníků tepla.

Experimentální ověření teoretického řešení měřením zahrnuje:

- sestavení měřicího řetězce a realizaci experimentu;
- měření časového průběhu tlaku a teploty při několika velikostech netěsností a pro několik velikostí výměníků tepla.

^{*} Doc. Ing. Vladimír Horák, CSc.: Katedra strojírenství, Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně, Kounicova 65, 612 00 Brno; tel.: +420.973.442749; E-Mail: vladimir.horak@unob.cz

^{**} Ing. Dalibor Rozehnal, PhD.: Katedra letecké a raketové techniky, Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně, Kounicova 65, 612 00 Brno; tel.: +420.973.445161; E-Mail: dalibor.rozehnal@unob.cz

2. Základní principy a formulace rovnic pro teoretické řešení úlohy

Při teoretickém řešení úlohy se vychází z obecně platných termodynamických zákonitostí. Energetickou bilanci při vyprazdňování výměníku obecně popisuje rovnice prvního zákona termodynamiky. Pro časově neustálený děj v otevřené termodynamické soustavě má diferenciální tvar [1]

$$\frac{dQ}{d\tau} + h \frac{dm}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} + p \frac{dV}{d\tau}, \quad (1)$$

kde tepelný tok a výtok entalpie látky kontrolní plochou způsobuje časovou změnu vnitřní energie uvnitř soustavy a vykonání objemové práce.

Tepelný tok přiváděný do soustavy je dán přestupem tepla mezi stěnou chladiče o teplotě T_s mající teplosměnnou plochu A a stlačeným plynem v nádobě o teplotě T prostřednictvím Newtonovy rovnice

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha A (T_s - T), \quad (2)$$

kde α je součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí uvnitř chladiče. Vzhledem k poměru tepelných kapacit chladiče a stlačeného plynu uvnitř, lze změnu teploty stěny v průběhu děje zanedbat.

Součinitel přestupu tepla α se určuje na základě podobnosti platné pro přirozenou konvekci v omezené uzavřené mezeře. Kriteriaální rovnice pro takové sdílení tepla má tvar [3]

$$Nu = 0,4 (Gr Pr)^{0.2} \quad (3)$$

s platností v rozsahu $10^6 < (Gr Pr) < 10^{10}$.

Pro ideální plyn a konstantní objem soustavy možné rovnici (1) prvního zákona termodynamiky zjednodušit na tvar

$$\alpha A (T_s - T) + r T \frac{dm}{d\tau} = m c_v \frac{dT}{d\tau}, \quad (4)$$

odkud lze – pro potřebu numerického integrace kvazistacionárního řešení [4] – vyjádřit časovou změnu teploty plynu uvnitř soustavy ve tvaru

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{T}{m} \left[(\kappa - 1) \frac{dm}{d\tau} + \frac{\alpha A (T_s - T)}{c_v T} \right], \quad (5)$$

Časová změna měrného objemu v plynu v soustavě o objemu $V = konst.$ – jako vyjádření zákona zachování hmotnosti – je

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{V}{m} \right) = - \frac{V}{m^2} \frac{dm}{d\tau} = - \frac{v}{m} \frac{dm}{d\tau} \quad (6)$$

Časová změna hmotnosti plynu je dána rychlostí vyprazdňování výměníku, tj. okamžitým hmotnostním výtokem plynu

$$\frac{dm}{d\tau} = Q_m, \quad (7)$$

kde hmotnostní tok je podle znaménkové konvence u vytékající tekutiny záporný.

Hmotnostní výtok je determinován okamžitým stavem plynu ve výměníku tepla a velikostí netěsnosti. Je předpokládán výtok ideálního plynu kruhovým otvorem do okolního prostředí, tj. volné atmosféry.

Při větších tlakových rozdílech, kdy pro tlak p_{otv} ve výstupním průřezu otvoru je plněna okrajová tlaková podmínka $p_{kr} \leq p_{otv} \leq p_b$, nastává kritický stav proudění, pro který platí [2]

$$\frac{p_{kr}}{p} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \quad (8)$$

kde p je tlak plynu v nádobě a p_b tlak barometrický. Při výtoku plynu je pak tlak ve výstupním průřezu otvoru roven tlaku kritickému $p_{otv} = p_{kr}$.

Při poklesu tlaku v nádobě a po dosažení tlaku ve výstupním průřezu otvoru rovnému tlaku barometrickému zůstává tento tlak ve výstupním průřezu zachován, tj. $p_{otv} = p_b$.

Hmotnostní průtok ideálního plynu výstupním průřezem otvoru o ploše A_{otv} je z rovnice spojitosti ve tvaru

$$Q_m = \mu_{otv} \frac{c_{otv} A_{otv}}{v_{otv}}, \quad (9)$$

kde μ_{otv} je průtokový součinitel, jehož hodnota je pro vzduchu [2] v intervalu 0,85 až 0,65 podle okamžitého poměru tlaků p_{otv}/p , který je v rozsahu 0,05 až 1.

Pro výpočet rychlosti plynu byla použita rovnice Saint-Venant a Wantzelova [2]

$$c_{otv} = \sqrt{\frac{2 \kappa}{\kappa - 1} p v \left[1 - \left(\frac{p_{otv}}{p} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} \quad (10)$$

a měrný objem se určí z izoentropické expanze vztahem

$$v_{otv} = v \left(\frac{p}{p_{otv}} \right)^{\frac{1}{\kappa}}. \quad (11)$$

Prostřednictvím stavové rovnice ideálního plynu a časové změny měrného objemu (6) lze z časové změny teploty (5) vyjádřit analogickou časovou změnu tlaku uvnitř soustavy ve tvaru

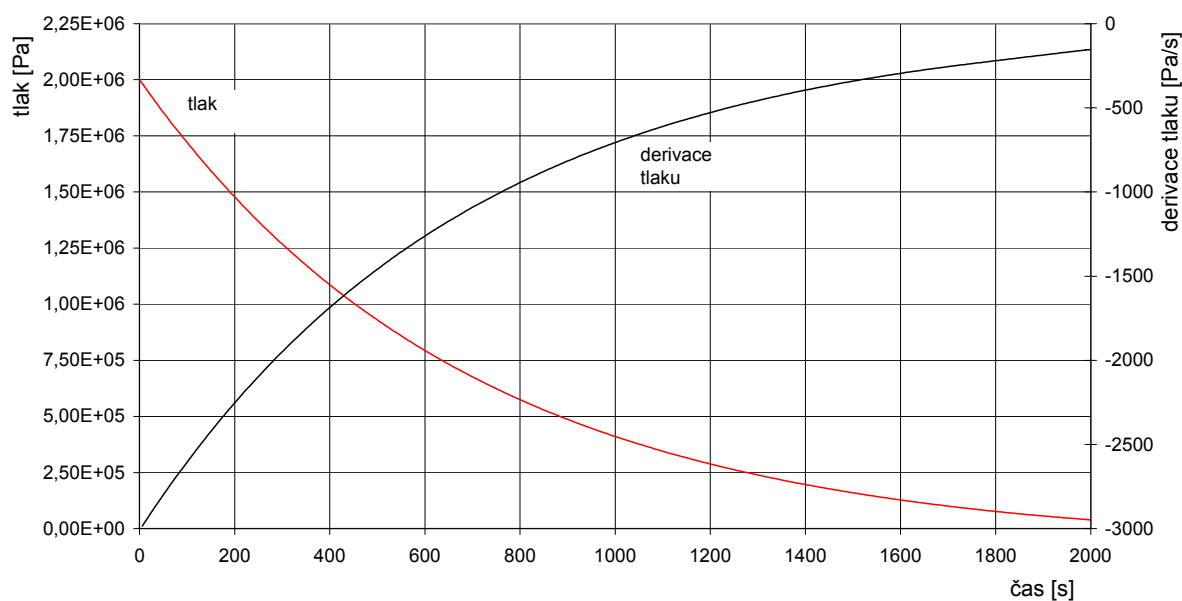
$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{p}{m} \left[\kappa \frac{dm}{d\tau} + \frac{\alpha A (T_s - T)}{c_v T} \right]. \quad (12)$$

Výše uvedené rovnice časových změn teploty (5), měrného objemu (6), hmotnosti uvnitř soustavy (7) a tlaku (12) představují soustavu čtyř obyčejných diferenciálních rovnic prvního řádu. Jejich řešení se provádí standardní numerickou metodou pro řešení úloh s počátečními podmínkami Runge-Kutta 4. řádu.

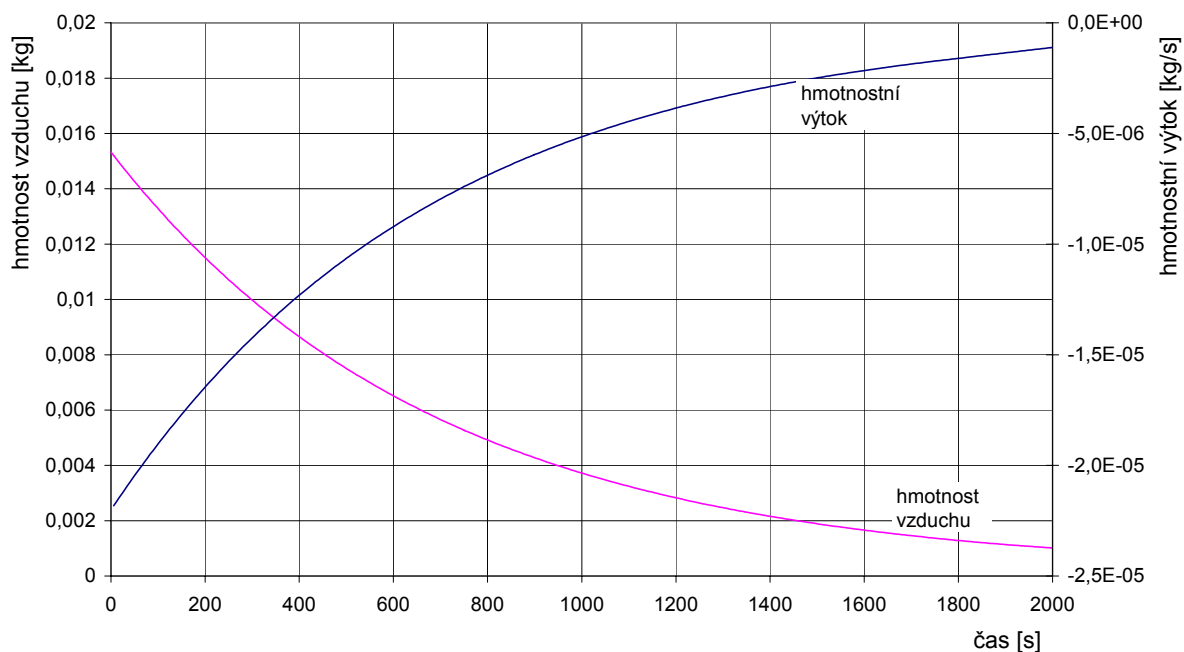
Výpočet umožňuje řešit časové průběhy tlaku, teploty a hmotnosti stlačeného vzduchu uvnitř výměníku tepla v průběhu výtoku netěsností. Dále je možné vypočítat příslušné velikosti náhradních kruhových otvorů netěsnosti odpovídajících zvolené hodnotě poklesu tlaku pro různé velikosti testovaných chladičů. Odpovídající průměry jsou vyjádřené v matematickém řešení prostřednictvím průtočné plochy otvoru A_{otv} .

Příklad výsledků výpočtu časového průběhu tlaku a jeho derivace je uveden na *obr. 1* pro vyprazdňování chladiče o objemu $0,61 \text{ dm}^3$. Počáteční hodnota derivace tlaku je -3 kPa/s při přetlaku 2 MPa . Tato derivace odpovídá výtoku vzduchu otvorem o průměru $0,0814 \text{ mm}$.

Průběhy okamžité hmotnosti a hmotnostního výtoku vzduchu jsou za těchto podmínek uvedeny na *obr. 2*.



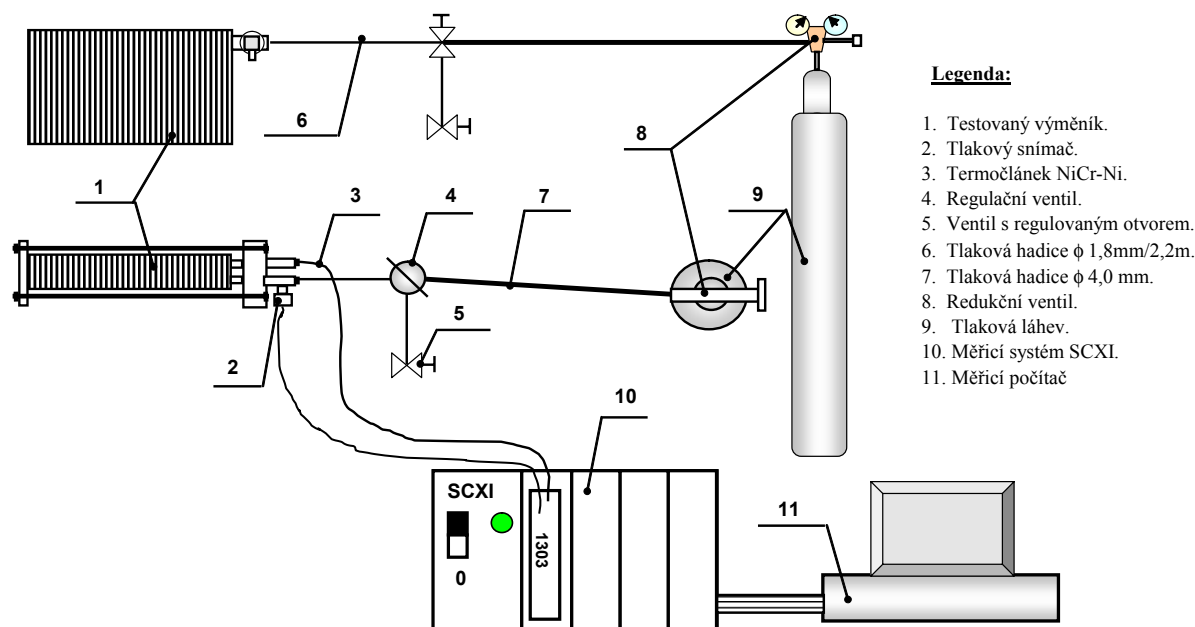
Obr. 1 Závislosti tlaku a jeho derivace na čase pro chladič o objemu $0,61 \text{ dm}^3$



Obr. 2 Časový průběh hmotnosti a hmotnostního toku pro chladič o objemu $0,61 \text{ dm}^3$

3. Měření průběhu stavových veličin v chladiči

Zařízení pro měření závislosti tlaku a teploty vzduchu v chladiči na čase bylo sestaveno dle schématu uvedeného na *obr. 3*. Měření bylo realizováno v laboratoři aerodynamiky katedry letecké a raketové techniky Univerzity obrany v Brně.



Obr. 3 Schéma měřicího zařízení

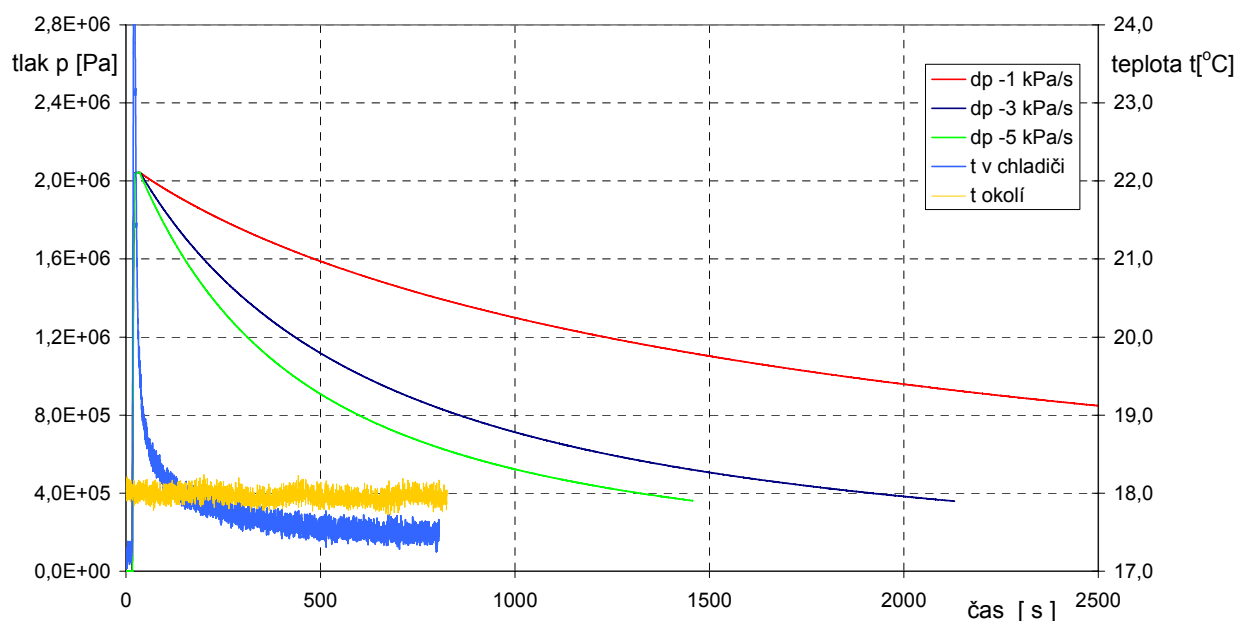
Jako zásobník stlačeného vzduchu byla použita tlaková láhev s redukčním ventilem a spojovacími prvky od firmy LEGRIS.

Tlak byl měřený snímačem DMP 331 s analogovým elektrickým výstupem. Pro zvýšení přesnosti měřených hodnot byly monitorované parametry odečítány frekvencí 5000 vzorků za sekundu s hloubkou záznamu 600 hodnot na kanál. Časová prodleva mezi odběry a zpracováním těchto bloků dat byla stanovena na 0,2 s. Měřicí řetězec byl sestavený z komponentů firmy National Instrument USA.

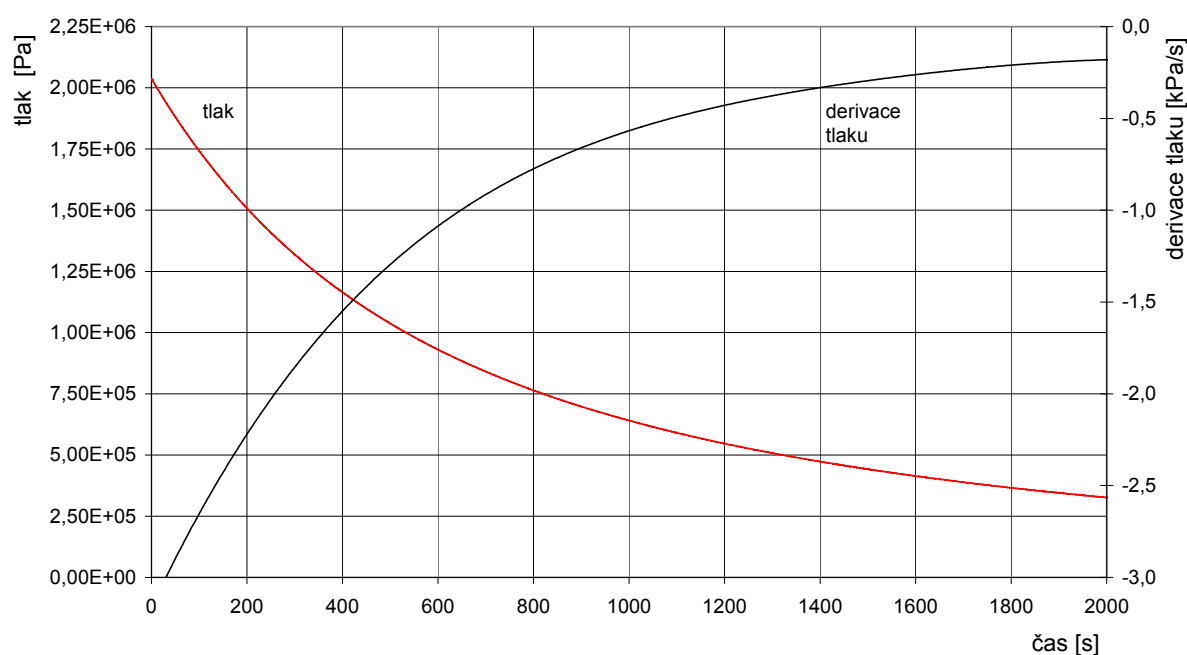
Pro měření teplot byly zvoleny termočlánky NiCr-Ni s krátkou časovou konstantou. Teplotní čidlo bylo instalováno uprostřed válcové komory chladiče ve vzdálenosti 73 mm od čela plnicího otvoru.

Ke změně teploty vzduchu v chladiči dochází v důsledku komprese při plnění stlačeným vzduchem, respektive v průběhu expanze při vyprazdňování. Vzhledem k velké teplosměnné ploše chladiče dochází k intenzivnímu sdílení tepla.

Zařízení umožňuje nastavit různé velikosti netěsností, kterým odpovídající počáteční derivace tlaku. Příklad výsledků měření závislosti tlaku a teploty vzduchu v chladiči na čase výtokem z přetlaku 2 MPa při třech velikostech netěsnosti (dané hodnotami počátečních derivací $dp/d\tau$: -1, -3 a -5 kPa/s) je uveden na *obr. 4* pro chladič o objemu 0,46 dm³.



Obr. 4 Průběh tlaků a teplot pro tři hodnoty počátečních derivací, chladič o objemu $0,46 \text{ dm}^3$



Obr. 5 Časový průběh tlaku a jeho derivace pro chladič o objemu $0,61 \text{ dm}^3$

Na *obr. 5* jsou uvedeny měřené časové průběhy tlaku a jeho derivace odpovídající počáteční derivaci asi -3 kPa/s při počátečním tlaku 2 MPa . Při porovnávání uvedeného průběhu měřené závislosti okamžitého tlaku a jeho derivace na *obr. 5* a vypočítané závislosti těchto veličin na *obr. 1* – oboje pro mezní počáteční derivaci, 3 kPa/s při tlaku 2 MPa – musíme kromě drobných odchylek při nastavení počátečních derivací tlaku konstatovat významné odchylování navzájem si odpovídajících veličin při nižších tlacích.

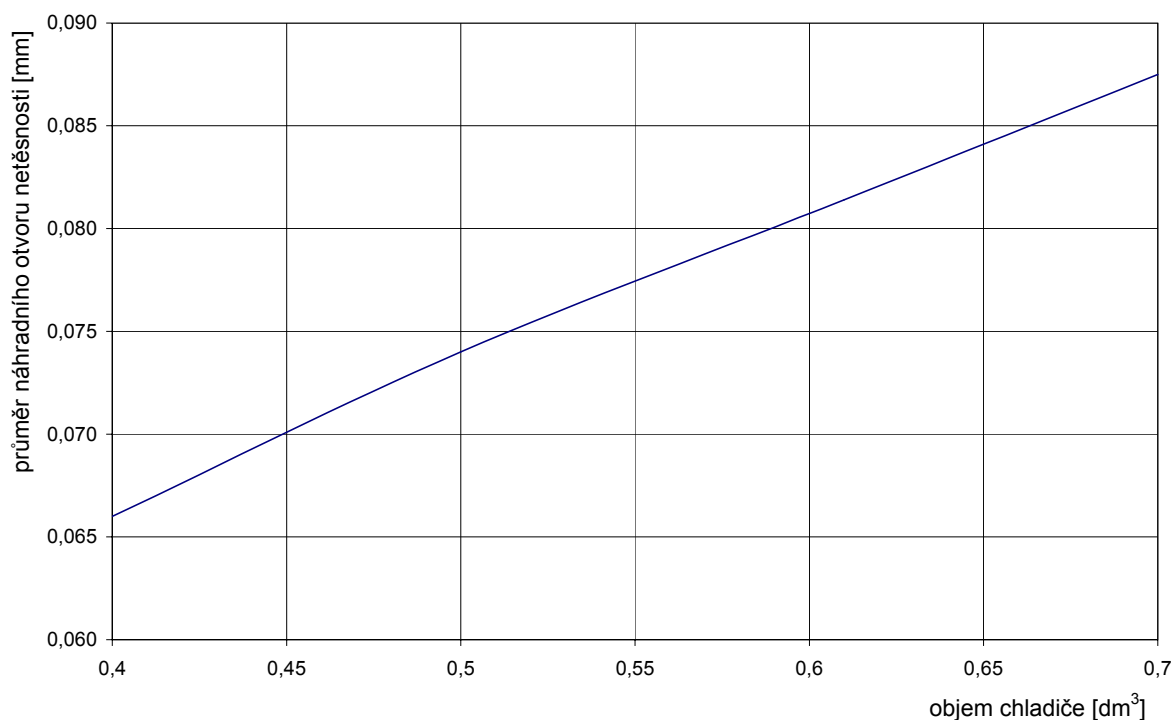
Na základě zkušeností z průběhu prováděných měření lze usuzovat, že je tato odchylka způsobena změnou geometrie výtokového otvoru v důsledku změny zatížení tlakem. Vlivem poklesu tlaku v chladiči a tím i silového zatížení a zmenšování následných deformací zařízení *dochází při nižších tlacích ke zmenšování otvoru netěsnosti.*

4. Závěry

Velikost úniku stlačeného vzduchu netěsností je určována měřeným poklesem tlaku – časovou derivací. Velikost této derivace je přímo svázána:

- s velikostí otvoru netěsnosti, která determinuje změnu hmotnosti v soustavě vlivem úniku vzduchu;
- s okamžitou hmotností vzduchu v soustavě danou jeho objemem, tlakem a teplotou.

Z výše uvedeného matematického popisu úlohy lze např. určit závislost velikost náhradního kruhového otvoru netěsnosti na velikosti chladiče. Na *obr. 6* je tato závislost vynesena pro tlaku pro zadaný pokles (derivaci) tlaku -3 kPa/s při tlaku 2 MPa.



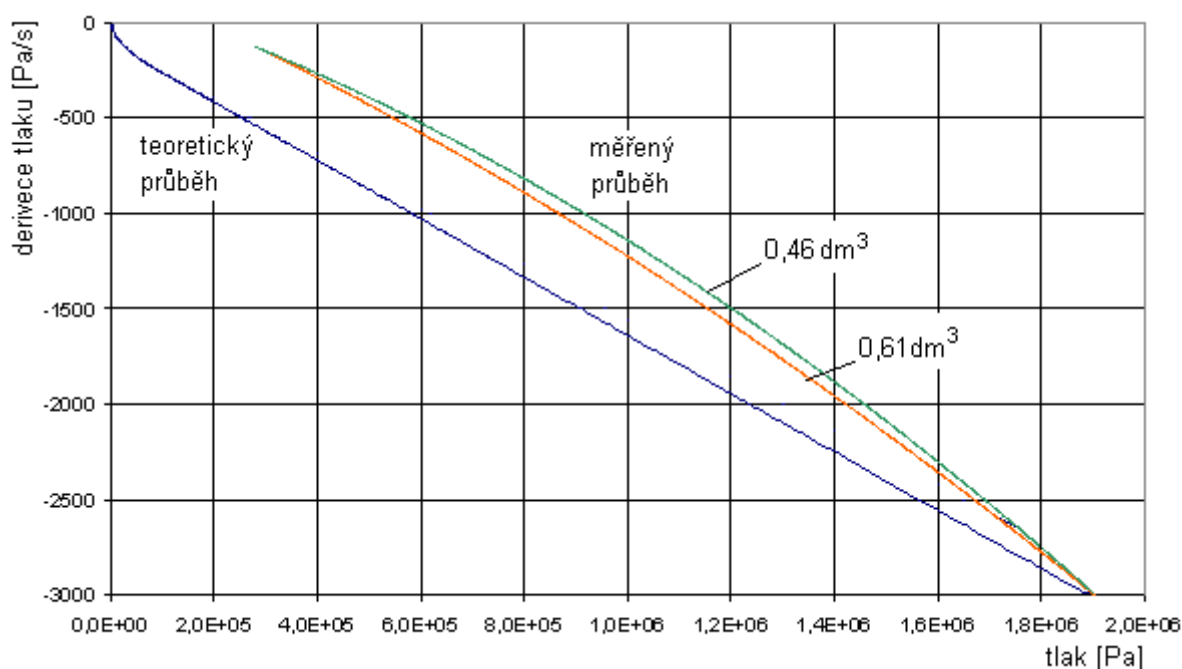
Obr. 6 Závislost průměru otvoru netěsnosti na objemu chladiče pro derivaci tlaku 3 kPa/s při tlaku 2 MPa

Jelikož je uvedený postup stanovení úniku netěsností aplikován na různé typy výměníků tepla je potřeba vhodně charakterizovat jejich velikost. Vzhledem k podstatě jevu je touto *reprezentativní veličinou objem výparníku.*

Z teoretického popisu problému dále ale vyplývá, že průběh derivace tlaku (12) je vzhledem k okamžitému tlaku prakticky lineární (*obr. 7*) a *není závislý na objemu soustavy.* Pro stejnou počáteční hodnotu derivace tlaku jsou tedy průběhy derivací tlaků v závislosti na okamžitém tlaku *shodné pro všechny velikosti chladičů.*

Tuto skutečnost potvrzuje i měřený průběh derivací z experimentu. Na obr. 7 jsou vyneseny také průběhy derivací tlaku v závislosti na okamžitém tlaku pro dvě velikosti chladičů – červená křivka pro objem $0,61 \text{ dm}^3$ a zelená křivka pro objem $0,46 \text{ dm}^3$. Blízkost průběhu obou křivek tedy podporuje předchozí závěr.

Na druhou stranu podstatná odchylka průběhu měřených hodnot derivací tlaku od teoretického výpočtu názorně demonstruje vliv změny geometrie otvoru netěsnosti při změně okamžitého tlaku v chladiči.



Obr. 7 Teoretická a měřená závislost derivace tlaku na okamžitém tlaku v chladiči

Vzhledem k nákladům na budování tlakových rozvodů je opodstatněná úvaha o možnostech testování netěsností při nižších tlacích. Při rozhodování o velikosti tlaku vzduchu při testu a rozsahu poklesu tlaku bude potřeba především uvážit experimentem potvrzený jev změny velikosti otvoru netěsnosti při snížených tlacích. Tento vliv se bude pravděpodobně měnit s geometrií a umístěním otvoru netěsnosti na objektu.

Dále zmenšení derivace tlaku při nižších tlacích bude – vzhledem k zachování rozlišovací schopnosti – mít negativní vliv na dobu testovacího měření vzhledem k možnostem a parametrům měřicího zařízení. Co se týče doby stabilizace před testem, která má vyrovnat teplotní poměry v soustavě po naplnění stlačeným vzduchem, lze předpokládat možnost jejího částečného zkrácení při určování netěsnosti chladičů za nižších tlaků.

5. Literatura

- [1] KRÍŽ, R.-VÁVRA, P.a kol. *Strojírenská příručka*. Sv. 4, odd. L. Praha: SCIENTIA, 1994.
- [2] DEJČ, M. E. *Technická dynamika plynů*. Praha: SNTL, 1967.
- [3] KALČÍK, J.-SÝKORA, K. *Technická termodynamika*. Praha: Academia, 1973.
- [4] MAXA, J.-HORÁK, V.-ROZEHNAL, D. Stavová změna plynu při vyprazdňování tlakové nádoby. In *Inženýrská mechanika 2002*. Svratka: May 13-16 2002.