



A PROCEDURE FOR FLOW CROSS-SECTIONS CALCULATION IN EJECTOR AND ITS PIPE SYSTEM

Václav Konečný

***Summary:** Lack of appropriate procedure for ejector design has initiated an interest to develop it. A system of basic and auxiliary equations have been used in example calculations. A new model of specific enthalpy-entropy diagram, both for air and combustion products, has also been developed. Using the procedure results of calculations can serve as a mean for control software preparation to ensure operational characteristics.*

1. ÚVOD

Ejektor pro dopravu plynů je proudový kompresor a mimo obor kondenzačních parních turbín se používá spíše v rozsahu tlaků z pracovní oblasti ventilátorů. Ejektor má podstatně nižší účinnost než ventilátor. Použití ejektoru musí být proto zdůvodněno. Hlavním zdůvodněním bývá vysoká teplota dopravovaného plynu. Uvedeme některé příklady:

- U průmyslového kotle se zkoušel vliv zpětného zavedení části spalin před přehřívákem páry do spalovacího prostoru k podpoře směšování hořlavých plynů a vzduchu. Střední teplota spalin byla 800 °C .
- Odsávání spalin z kremační pece bylo nutno v projektu podpořit tak, aby spaliny zaručeně proudily do komína a neobtěžovaly v nejbližším okolí. Nejvyšší teplota spalin za pecí byla 500 °C . Ochlazení spalin ve výměníku, a tím možnému použití ventilátoru, bránilo chování v daných souvislostech.
- Při povrchové úpravě předmětů v zinkovací peci vznikají plynné produkty, které je nutno s jistotou odsávat. Teplota odsávaných plynů je asi 600 °C .

Teplota plynů dopravovaných ventilátorem bývá omezena 400 °C nebo 350 °C [2] . Dodavatelé zařízení v uvedených třech příkladech se proto zajímali o ejektor. V prvním příkladu byl ejektor jediným prostředkem. V dalších dvou byl jistícím prostředkem při dopravě plynů, protože výfuk z ejektoru směřoval do komína.

V rozvahách o použití ejektoru nebo ventilátoru vycházel ejektor příznivěji zřejmě proto, že není nutné chladit ložiska, ejektor žádná nemá, a že při vysokých teplotách plynu žádná součást ejektoru nerotuje. To je dáno principem funkce ejektoru. K přenosu hybnosti od hnacího plynu k dopravovanému stačí kus potrubí. Jak již bylo řečeno, něco taková jednoduchost stojí. Je to

¹ Doc.Ing.Václav Konečný, CSc., Jabloňová 31, 106 00 Praha 10, Czech Republic.

nízká účinnost ejektoru, nebo obráceně jeho vyšší spotřeba energie než u ventilátoru. Toto srovnání však vyžaduje doplnění. Technicky je jistě zvládnutelné vyrobit speciální chlazený ventilátor z austenitických materiálů. Zvláště v kusové výrobě by však byl takový ventilátor drahý a to, co by se ušetřilo na provozních nákladech by bylo do značné míry sníženo pořizovacími náklady. Představíme-li si ještě, že v uvedeném druhém a třetím příkladu použití ejektoru se jedná o přerušovaný provoz pecí, mohou být i vyšší provozní náklady zařízení s ejektorem v porovnání s drahým ventilátorem přijatelné.

Po tomto rozkladu z pohledu nižší hospodárnosti ejektoru vzhledem k ventilátoru se vyskytne i jiná otázka. Proč se zde vlastně pojednává o návrhové metodě ejektoru, když je známo, že ejektor je velice jednoduchý proudový přístroj a pro výpočet přenosu hybnosti v něm je v technickém pojetí známa úplně jednoduchá rovnice. Odpověď může být alespoň ze dvou zdrojů. Prvním je styk se zájemci o konstrukci ejektoru. Ti by si mohli projekt a konstrukci udělat sami bez placení navenek, ovšem za předpokladu, že by byl k dispozici přístupný způsob výpočtu. Přesto, že i v české technické literatuře byly podklady [1], ani kolem roku 1995 zřejmě nebyly takové, aby je technici mohli použít. Druhým zdrojem jsou vlastní zkušenosti, spíše obtíže, autora. I když asi měl bližší vztah k tomuto druhu proudových výpočtů, taky nebyl schopen rychle a bez nejistot zareagovat na požadavky zákazníků, protože dostupná metodika v ucelené formě nebyla.

Předkládá se proto postup výpočtu ejektoru s podzvukovým prouděním plynů, který je založen na řešení přímé úlohy, jak se v aerodynamice říká. Znamená to, že se zvolí rozměry příslušných částí ejektoru a jiné parametry a hledá se odezva u nějakého vhodného kritéria. Když odezva nevyhovuje, například vycházejí velké tlakové ztráty, změní se vstupní údaje pro výpočet a v tom smyslu i vlastnosti projektu. Dialogovým, iteračním postupem se dojde k přijatelnému cíli, kterým jsou rozměry konstrukčních částí ejektoru: především průměr a délka směšovací komory ejektoru a potrubí.

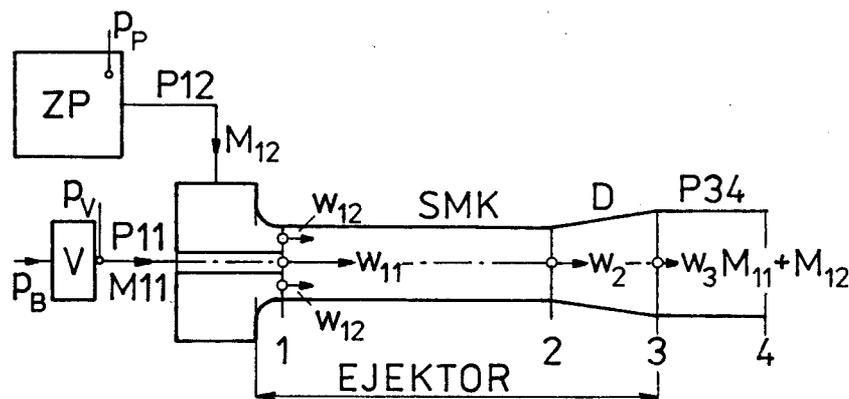
Výpočtový postup ejektoru má tu vlastnost, že na začátku je značný počet neznámých. Okolnosti jsou složitější i v termodynamice úlohy, jestliže se snažíme pracovat s reálnými plyny. S nadsázkou by se dalo říci, že máme něco počítat a kromě množství dopravovaných spalin či škodlivin a barometrických podmínek nevíme dostatečně přesně nic. Řešení tohoto stavu je v navrhovaném postupu voleno iteračními výpočty v takovém pořadí a počtu, jak se v toku výpočtu objeví neznámá nebo nedostatečně definovaná veličina. Zřejmě tato metodická komplikace způsobila, že výpočtová metoda ejektoru nebyla zpracována v ucelené formě. Byla zdůrazňována především směšovací komora ejektoru jako místo předávání hybnosti od hnacího plynu dopravovanému. Směšovací komora je srdcem ejektoru, je však nutné věnovat pozornost celé soustavě, kterou ejektor ovlivňuje. Dokud není propočítána celá taková soustava, nemůže být dobře navržen ani ejektor.

V další části je postup výpočtu ejektoru spojen s i - s diagramem vzduchu a spalin plyných paliv. Při řešení konkrétní úlohy by bylo vhodné znát chemické složení dopravovaného plynu. Většinou tomu tak není. Vypomáháme si přiblížením, že dopravovaný plyn má vlastnosti spalin známého plyného paliva, jako je zemní plyn, nebo mu jednoduše přiřadíme vlastnosti vzduchu. Tento druhý způsob je použit dále při výpočtu příkladu.

Ve výpočtu ejektoru se musí šetřit, obrazně řečeno, s každým pascalem. Proto je brán v úvahu i vliv změny geodetické výšky. Ukázalo se, že přínos je spíše v úplnější metodice než ve významu pro konstrukci ejektoru. V diagramu i - s se s vlivem změněné výšky zachází podobně jako s měrnou kinetickou energií pro stanovení celkových stavů plynu.

2. ROVNICE PRO ŘEŠENÍ SOUSTAVY S EJEKTOREM

Základní uspořádání zařízení pro dopravu horkých plynů ejektorem je na obr. 2.1. Ze zdroje horkého plynu ZP se plyn nasává do směšovací komory ejektoru SMK rychlostí w_{12} ve vstupní rovině 1. Zde se horkému plynu začíná předávat hybnost od hnacího plynu



Obr. 2.1 Schéma zařízení pro dopravu plynu ejektorem.

vstupujícího do SMK rychlostí w_{11} . Směšovací komora končí v rovině 2 a promísené plyny s předpokládanou skončenou výměnou hybnosti a s vyrovnaným rychlostním profilem vstupují do difuzoru D a dále procházejí potrubím P34 třeba do komína.

Uvnitř zdroje ZP je tlak horkého plynu p_P , za ventilátorem V je tlak hnacího plynu p_V . Vychází se z názoru, že tlak p_{12} na vstupu do SMK je dán tlakovou ztrátou mezi ZP a vstupem 12 v rovině 1 pro předepsaný tok M_{12} horkého plynu. Potom je celkový tlak

$$p_{12}^C = p_P - \Delta p_Z^{12}, \quad p_P = p_P^C. \quad (2.1)$$

V rovině 1 se volí rovnosti měrných tlaků $p_1 = p_{11} = p_{12}$. Je-li hnacím plynem vzduch, je ve ventilátoru V stlačen z barometrického tlaku p_B v jeho okolí na takový tlak p_V , aby po tlakové ztrátě v potrubí P11 měl na vstupu 11 do směšovací komory ještě potřebnou rychlost w_{11} . Míra potřeby je dána tím, že spojený tok plynů $M_{11} + M_{12}$ musí protéci směšovací komorou, difuzorem D a potrubím P34 v navržených průtočných průřezích a délkách a překonat při tom tlakové ztráty. Matematický model pro aerodynamický a termodynamický výpočet takové soustavy tvoří následující základní rovnice.

Tlaková ztráta v rovnici (2.1) se vyjádří vztahem

$$\Delta p_Z^{12} = \zeta_{12} \cdot \frac{1}{2} \rho_{12} w_{12}^2 = \zeta_{12} \cdot \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_{12}} \left(\frac{M_{12}}{S_{12}} \right)^2. \quad (2.2)$$

Při volené rychlosti proudění w_{11} a daném toku M_{12} hnacího plynu a při rovnosti $S_1 = S_{11} + S_{12} = S_2$ se statický tlak směsi v rovině 2 za SMK vypočítá z rovnice

$$p_2 = p_1 + [M_{11}(w_{11} - w_2) - M_{12}(w_2 - w_{12})] \cdot \frac{1}{S_2} - \Delta p_Z^{SMK}, \quad (2.3)$$

v němž je p_1 statický tlak v rovině 1 a $\Delta p_Z^{SMK} = \zeta_{SMK} \cdot \frac{1}{2} \rho_2 w_2^2$ je tlaková ztráta ve směšovací komoře.

Tlak p_3 za difuzorem D se určí pomocí rovnice zachování celkové měrné entalpie

$$i_3 = i_2 + \frac{w_2^2 - w_3^2}{2} \quad (2.4)$$

po zahrnutí ztrát v difuzoru přes ztrátový součinitel nebo izoentropickou účinnost.

Tlaková ztráta v potrubí P34 se vyjádří vztahem

$$\Delta p_Z^{34} = \zeta_{34} \cdot \frac{1}{2} \rho_3 w_3^2 \quad (2.5)$$

Celkový tlak p_{2C} musí být tak velký, aby byl po ztrátách tlakem p_{4C} zajištěn výtok plynu řezem 4 do okolí. Této podmínky lze využít pro řízení výpočtu prostřednictvím volené rychlosti proudění hnacího vzduchu w_{11} při stálém toku horkého plynu M_{12} .

Na rovnicích je možné poukázat na počáteční neznalost potřebných veličin. V rovnicích (2.2) není známa hustota ani rychlost proudění a ani ztrátový součinitel. V rovnici (2.3) se v daném výpočtovém způsobu volí rychlost w_{11} , plošný obsah S_2 a známý je jen tok M_{12} . V rovnicích (2.4), (2.5) se předem nezná žádná veličina. Proto se v navrhované metodice, při snaze o přesnost, používají v hojně míře přípravné iterační kroky.

3. UŽITÍ i - s DIAGRAMU VZDUCHU A SPALIN

Z rovnice (2.4) je zřejmá potřeba znát měrnou entalpii plynu a protože musí být výpočet veden se ztrátami, je třeba znát i měrnou entropii plynu. S výjimkou SMK se používá jednotného postupu: tlaková ztráta představuje rozdíl celkových tlaků při stálé celkové měrné entalpii a pomocí tohoto rozdílu se určí měrná entropie a statický tlak na konci vyšetřovaného úseku. Používá se při tom rovnice pro měrnou entalpii

$$i = c_{pm} t, \quad c_{pm} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad t \text{ ve } ^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

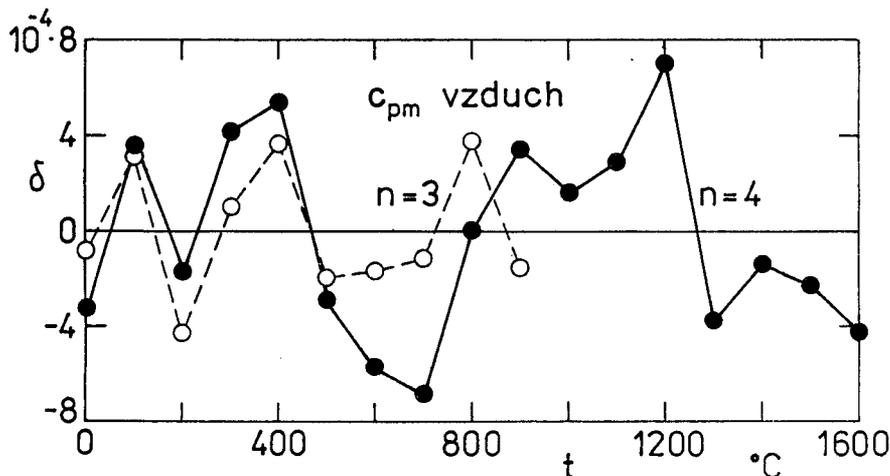
a pro měrnou entropii

$$s = b_0 \ln \frac{T}{T_0} + b_1 (T - T_0) + b_2 (T^2 - T_0^2) + b_3 (T^3 - T_0^3) - r \ln \frac{p}{p_0} \quad (3.2)$$

Součinitele b_j se vyjadřují pomocí součinitelů a_i , $T_0 = 273,15 \text{ K}$, $p_0 = 2 \text{ MPa}$ je volený vztažný tlak, r je měrná plynová konstanta, $T = t + T_0$ je absolutní teplota.

Dále v příkladu se počítá s hodnotami a_i pro vzduch stanovenými podle údajů Ražnjeviče [3]. Přesnost náhrady tabelovaných hodnot c_{pm} vzduchu v [3] pomocí vztahu v (3.1) je možné posoudit prostřednictvím relativní odchylky $\delta c_{pm} = (c_{pm} - c_{pmR}) / c_{pmR}$ v obr. 3.1 mezi teplotami 0 - 900 °C pro polynom třetího stupně s $n = 3$ a mezi teplotami 0 - 1600 °C

pro polynom s $n = 4$. Označení c_{pmR} se vztahuje k hodnotám c_{pm} tabelovaným v [3]. Relativní odchylka náhrady c_{pm} v rovnici (3.1) s $n = 3$ je menší než $5 \cdot 10^{-4}$.



Obr. 3.1 Relativní odchylka náhrady c_{pm} vzduchu z [3] polynomem $n = 3$ a $n = 4$.

4. PŘÍKLAD VÝPOČTU EJEKTORU

Počítá se soustava s ejektorem podle obr. 4.1. Je zahrnut i vliv rozdílných geodetických výšek částí zařízení. Předpokládá se, že horký plyn v toku M_{12} má vlastnosti vzduchu. To

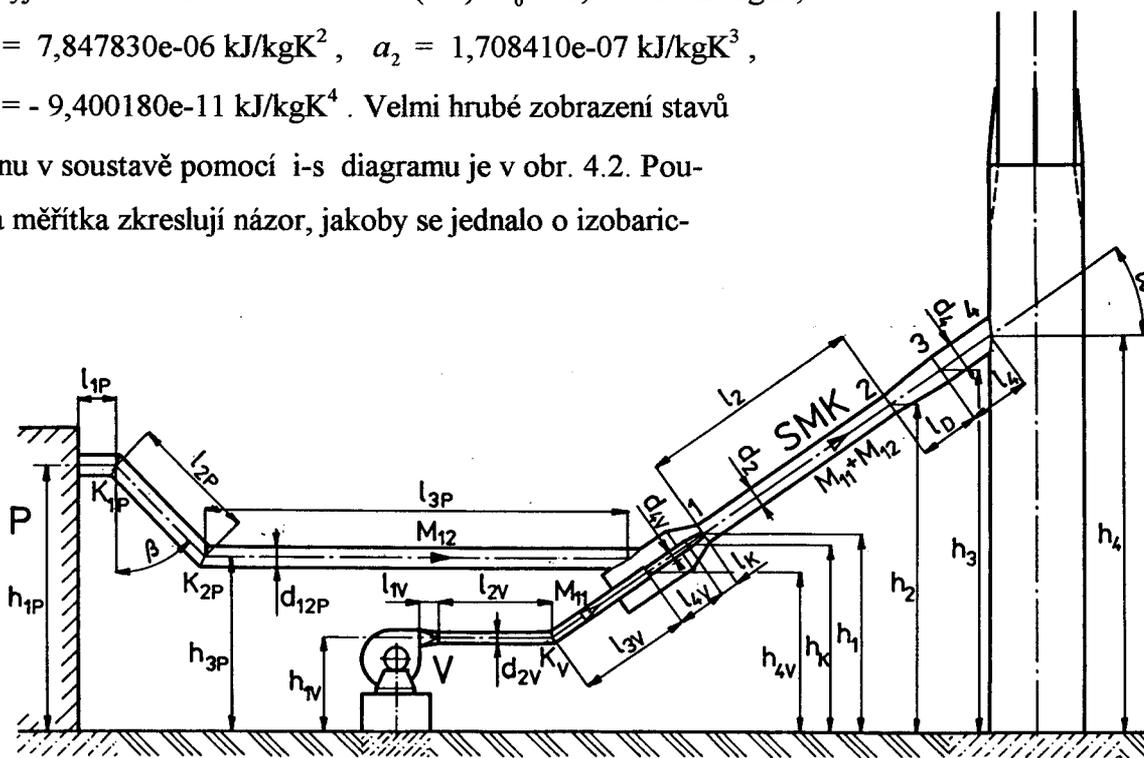
se vyjádří hodnotami součinitelů v (3.1) $a_0 = 1,003914 \text{ kJ/kgK}$,

$a_1 = 7,847830e-06 \text{ kJ/kgK}^2$, $a_2 = 1,708410e-07 \text{ kJ/kgK}^3$,

$a_3 = -9,400180e-11 \text{ kJ/kgK}^4$. Velmi hrubé zobrazení stavů

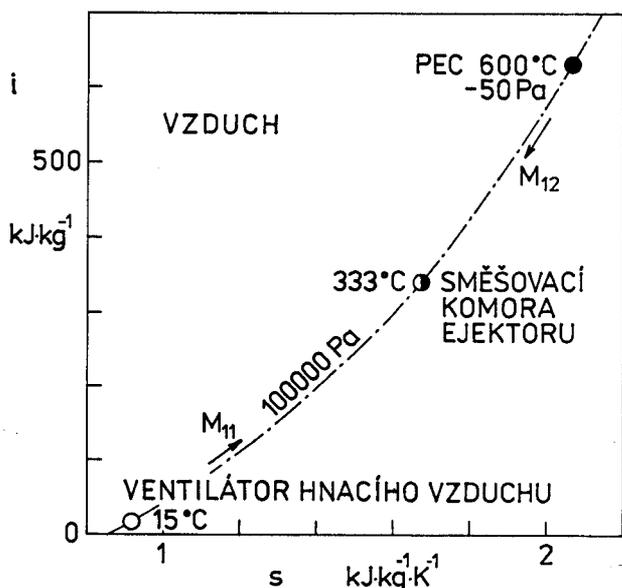
plynu v soustavě pomocí i - s diagramu je v obr. 4.2. Pou-

žitá měřítka zkreslují názor, jakoby se jednalo o izobaric-



Obr. 4.1 Schéma počítaného zařízení s ejektorem. P pec, V ventilátor hnacího vzduchu, SMK směšovací komora ejektoru ; výfuk do komína.

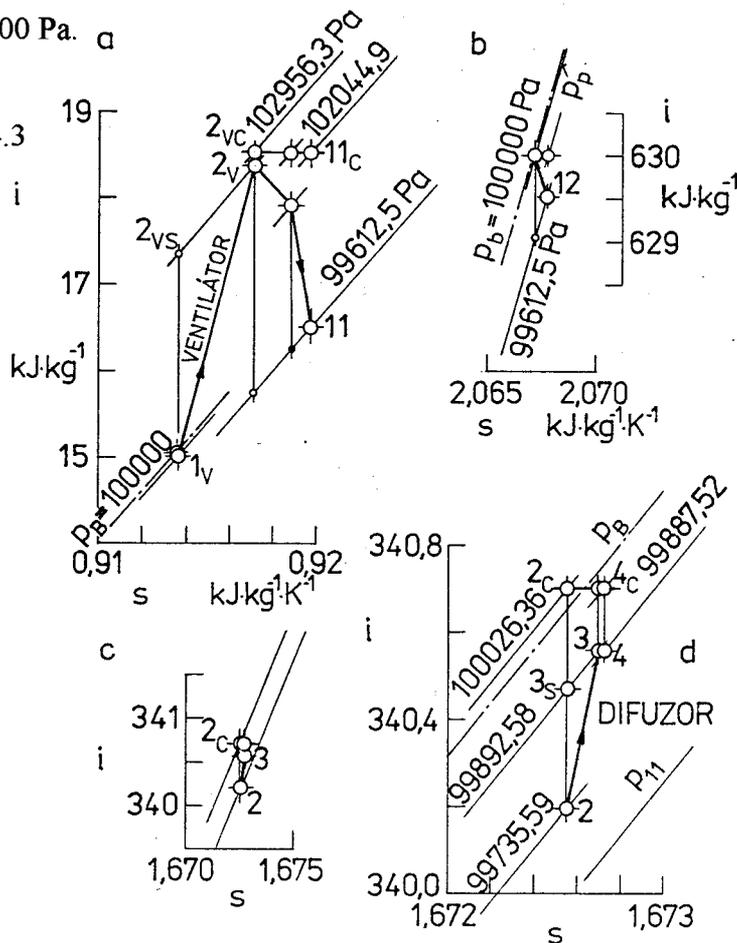
ký děj při barometrickém tlaku $p_b = p_B = 100000 \text{ Pa}$. Z pece P s podtlakem 50 Pa vzhledem k barometrickému tlaku se do SMK nasává plyn s teplotou $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Ventilátorem V se do SMK žene hnací vzduch s teplotou $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Po smísení ve SMK má plyn teplotu vyšší než $300 \text{ }^\circ\text{C}$ a je obtěžujícím exhalátem. Podrobněji jsou změny stavu plynů znázorněny pomocí obr. 4.3. Jeho část *a* odpovídá traktu hnacího vzduchu se stlačením ve ventilátoru s tlakovými ztrátami v potrubí a expanzí na vstupu do SMK. Část *b* odpovídá traktu dopravovaného horkého plynu s expanzí na vstupu do SMK. V části *c* je znázorněno stlačení ply-



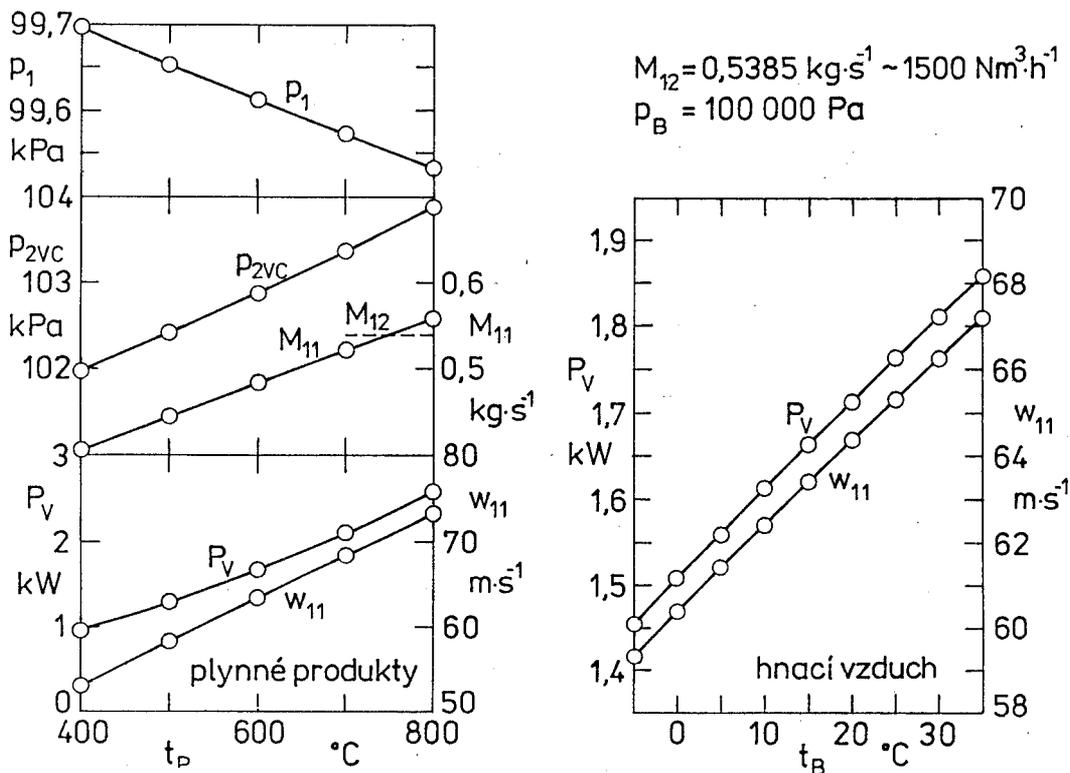
Obr. 4.2 Diagram *i-s* vzduchu v soustavě s ejektorem, barometrický tlak 100000 Pa .

nu v difuzoru. Části *a, b, c* v obr. 4.3 jsou kresleny ve stejném měřítku. Podrobněji je stlačení v difuzoru zobrazeno v části *d*. Za difuzorem následuje úsek krátkého potrubí P34 s malou tlakovou ztrátou a tedy malým přírůstem měrné entropie. Celkový tlak p_{2c} je vypočítán mírně vyšší než barometrický tlak. Statický tlak p_4 je nižší než barometrický proto, že potrubí P34 podle obr. 4.1 ústí do komína. V dolní části je vidět přírůst statického tlaku plynu ve SMK z p_{11} na p_2 . Další vypočítané údaje jsou předloženy v

rem V se do SMK žene hnací vzduch s teplotou $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Po smísení ve SMK má plyn teplotu vyšší než $300 \text{ }^\circ\text{C}$ a je obtěžujícím exhalátem. Podrobněji jsou změny stavu plynů znázorněny pomocí obr. 4.3. Jeho část *a* odpovídá traktu hnacího vzduchu se stlačením ve ventilátoru s tlakovými ztrátami v potrubí a expanzí na vstupu do SMK. Část *b* odpovídá traktu dopravovaného horkého plynu s expanzí na vstupu do SMK. V části *c* je znázorněno stlačení ply-



Obr. 4.3 Znázornění stavu plynu v *i-s* diagramu.



Obr. 4.4 Závislost příkonu ventilátoru a jiných veličin na teplotě horkých plynů a vzduchu.

5. ZÁVĚR

Je vypracována metoda výpočtu ejektoru pro dopravu horkých plynů vznikajících v různých technologických procesech s použitím ventilátoru jako zdroje hnacího vzduchu.

Metoda využívá dostupných údajů o velikosti ztrátových součinitelů k výpočtu tlakových ztrát a nově zkonstruovaného i - s diagramu vzduchu nebo plyných produktů, zvláště spalin plyných paliv.

Z výpočtového postupu vyplývá zaměření experimentů nebo způsob měření a řízení.

6. PODĚKOVÁNÍ

Předložené téma souvisí s dřívější pracovní náplní autora ve Státním výzkumném ústavu pro stavbu strojů v Praze-Běchovicích do roku 1998 a se současnou externí spoluprací s katedrou energetických strojů a zařízení strojní fakulty Západočeské univerzity v Plzni od roku 1993. Obě organizace podpořily vývoj a realizace.

LITERATURA

- [1] Hibš M.: Proudové přístroje, Praha, SNTL, 1981
- [2] Technické podklady firmy RaVent, s.r.o., Sažinova 360, 399 01 Milevsko
- [3] Ražnjevič K.: Tepelné tabulky a diagramy, Bratislava, ALFA, 1969
- [4] Ražnjevič K.: Termodynamické tabulky, Bratislava, ALFA, 1984