



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**DIAGRAM *i*-*s* VLHKÉHO VZDUCHU A PLYNNÝCH PALIV
DO TLAKU 5 MPa A TEPLoty 1600 °C**

Václav Konečný¹

*K termodynamickému výpočtu kompresoru na stlačení vzduchu, plynové turbíny na zemní plyn ale i ventilátoru nebo ejektoru je užitečný nebo až nepostradatelný *i-s* diagram vzduchu a spalín. Navrhuje se konstrukce *i-s* diagramu spalín plyných paliv, která zahrnuje interval součinitele přebytku vzduchu od jedné do nekonečna nebo jinak stechiometrické spaliny až vzduch. Platnost *i-s* diagramu se omezuje tlakem 5 MPa, aby bylo možné stanovit měrnou entalpii jen v závislosti na teplotě, a nejvyšší teplotou 1600 °C, aby nebylo nutné brát v úvahu disociaci CO₂ a H₂O.*

Klíčová slova: diagram *i-s*, spaliny, vlhký vzduch, plynová turbína, kompresor, ventilátor, ejektor, paroplynové zařízení.

1. Úvod.

V oboru parních turbín je běžným pracovním nástrojem pro termodynamický i proudový návrh průtočné části diagram *i-s* vodní páry. V tomto případě se využívá oblasti přehřáté páry a mokré páry do vlhkosti zhruba 15 %. Název "diagram *i-s*" je poplatný technické historii, protože v současné době je zpracován do podoby rovnic. Účast českých vědeckých pracovníků je v těchto souvislostech velmi významná ve světovém měřítku. Vývoji *i-s* diagramu vody a vodní páry se věnuje velká soustavná pozornost.

U plynové turbíny je pracovní látkou v kompresoru vlhký vzduch, ve spalovací komoře a v turbíně spaliny. Spaliny z výfuku plynové turbíny jsou dále v parním generátoru, jestliže je za ní umístěn v paroplynovém zařízení. U vzduchem chlazené turbíny jsou spaliny za spalovací komorou ředěny tímto chladicím vzduchem, takže přísněji vzato dochází navíc k neustálé změně chemického složení pracovní látky. To je rozdíl od stálého chemického složení vody u parní turbíny, ovšem tam jsou zase komplikace s mokrou párou. Pro spaliny není dosud běžně k dispozici jejich *i-s* diagram, proto byl pro potřebu katedry energetických strojů a zařízení strojní fakulty Západočeské univerzity v Plzni vypracován jako pomůcka pro výuku. Několikaletá praxe však ukazuje, že zpracovaná forma *i-s* diagramu může být užitečná na mnoha jiných pracovištích. Rozlišovací schopnost *i-s* diagramu je natolik vysoká, že je v něm možné dobře znázornit průběh tlakových ztrát při proudění vzduchu a spalín v potrubí nebo s jeho pomocí vyhodnotit nejrůznější aerodynamická měření. Z toho důvodu není využití navrženého tvaru *i-s* diagramu vlhkého vzduchu a spalín zdaleka omezeno jen na kompresory a turbíny, kde se jedná obvykle o

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

značné rozdíly měrných entalpií i měrných entropií mezi vyšetřovanými termodynamickými stavy pracovní látky.

S použitím několika pomocných podprogramů, které je nutno k matematické formě i - s diagramu vypracovat, se pohodlně znázorní základní termodynamické změny: škrcení, izoentropická změna, izobarická změna a další. Kombinací těchto základních změn se určí kompresní nebo expanzní čára, navíc s místními chemickými složeními pracovní látky během jejích termodynamických změn.

Diagram i - s může mít různé tvary a základním tvarem je nazváno vyjádření pomocí čtyř součinitelů a_0, \dots, a_3 pro měrnou entalpii

$$i = a_0 t + a_1 t^2 + a_2 t^3 + a_3 t^4 \quad (1)$$

a pro měrnou entropii

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

kde $T = t + T_0$, r je měrná plynová konstanta, p_0 je základní tlak. Jsou voleny hodnoty $T_0 = 273,15 \text{ K}$, $p_0 = 2000000 \text{ Pa}$. Součinitele a_0, \dots, a_3 jsou konstanty ve zvoleném teplotním rozsahu a součinitele b_0, \dots, b_3 se určí pomocí a_0, \dots, a_3 . U základního tvaru i - s diagramu je teplotní interval 0°C až 1600°C rozdělen po 800°C na dva. Důvod je v přesnosti. Je navržena také další varianta s pěti součiniteli pro celý rozsah do 1600°C a v něm jsou potom a_0, \dots, a_4 konstantami.

Hlavním důvodem pro vypracování i - s diagramu (1), (2) je známá skutečnost, že výpočet měrné entalpie a dalších veličin pomocí izoentropického exponentu je spojen s nejistotami. U reálných plynů se také snadno zjistí, že při výpočtu izoentropických stavů pracovní látky dostáváme tři číselně různé hodnoty izoentropických exponentů podle toho, zda se počítá se vztahem $p-v$, $v-T$ nebo $T-p$. K odvození rovnic (1), (2) jsou použity tabelované hodnoty středních měrných tepelných kapacit plynů při stálém tlaku v práci Ražnjeviče [1]. Ty zřejmě nezahrnují vliv disociace, proto je platnost i - s diagramu omezena teplotou asi 1600°C . Z důvodu obsahu značného množství vodní páry ve spalinách zemního plynu se počítá s dalším omezením do tlaku asi 5 MPa . Omezení teplotou a tlakem nebrání popisu změn termodynamických stavů pracovní látky ani v těch nejmodernějších stacionárních plynových turbínách. Teploty plynu v nich nepřesahují 1500°C a tlak vzduchu za kompresorem 3 MPa je spíše výjimkou.

2. Konstrukce i - s diagramu.

Rovnice (1) vychází ze vztahu $i = c_{pm} t$, kde c_{pm} je střední měrná tepelná kapacita plynu při stálém tlaku a rovnice (2) je odvozena pomocí první věty termodynamiky. Úvodním krokem je stanovení náhrad c_{pm} plyných složek, které se vyskytují ve spalinách: CO_2 , H_2O , N_2 , Ar , suchého vzduchu. Když se počítá přímo s vlhkým vzduchem, jde o směs suchého vzduchu a vodní páry při definované relativní vlhkosti, teplotě a barometrickém tlaku. V rovnici (1) pro měrnou entalpii je pro c_{pm} použit vztah

$$c_{pm} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad (3)$$

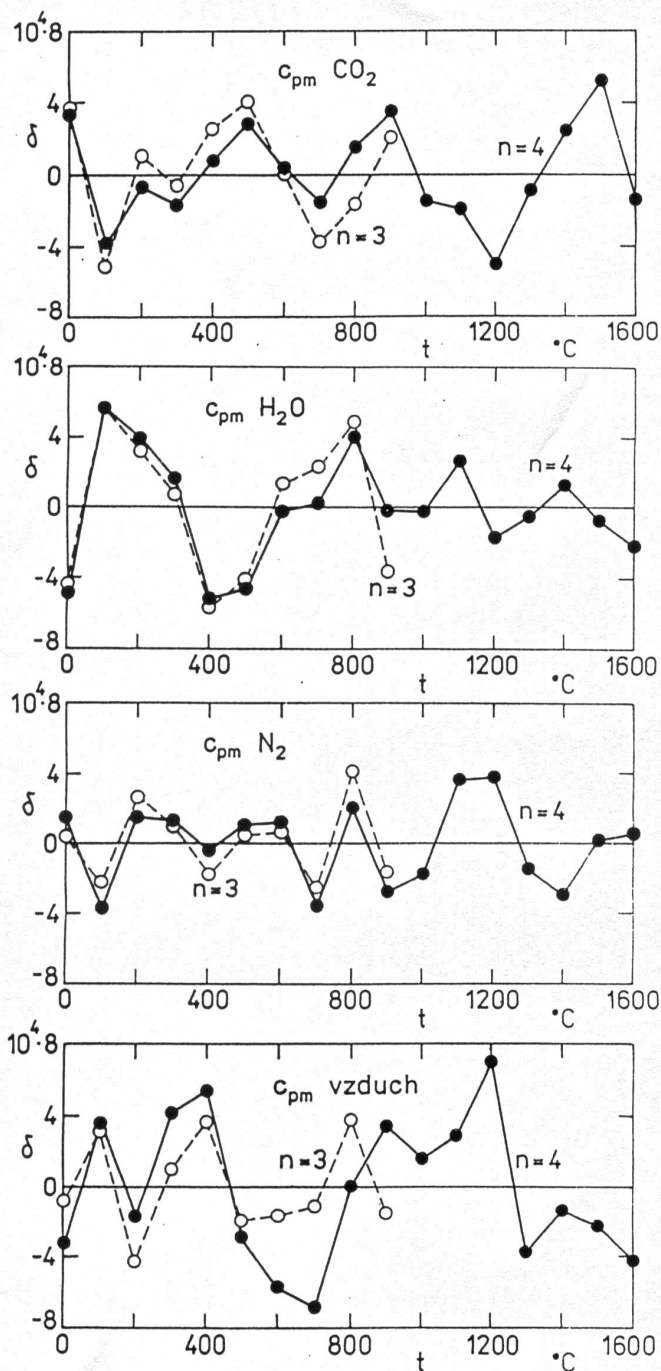
v němž jsou podle [1] určeny součinitele a_0, \dots, a_3 . Pro součinitele b_j v rovnici (2) k výpočtu měrné entropie se odvodí rovnice

$$\begin{aligned} b_0 &= a_0 - 2a_1 T_0 + 3a_2 T_0^2 - 4a_3 T_0^3, & b_1 &= 2a_1 - 6a_2 T_0 + 12a_3 T_0^2, \\ b_2 &= (3a_2 - 12a_3 T_0) / 2, & b_3 &= 4a_3 / 3. \end{aligned} \quad (4)$$

U spalín jsou součinitele a_0, \dots, a_3 vyjádřeny pomocí hmotnostních koncentrací w_i plyných složek CO_2 , H_2O , N_2 , Ar a suchého vzduchu. Pro $i = 0, 1, 2, 3$ platí

$$a_i^{SP} = w_{\text{CO}_2} a_i^{\text{CO}_2} + w_{\text{H}_2\text{O}} a_i^{\text{H}_2\text{O}} + w_{\text{N}_2} a_i^{\text{N}_2} + w_{\text{Ar}} a_i^{\text{Ar}} + w_{\text{SV}} a_i^{\text{SV}} \quad (5)$$

a z rovnic (4) se pomocí a_i^{SP} určí součinitele b_j^{SP} . Přesnost polynomicke náhrady c_{pm} rovnicí (3) je zřejmá z obr. 1, v němž je $\delta = (c_{pm} - c_{pm}^R) / c_{pm}^R$ a c_{pm}^R je hodnota uvedená Ražnjevičem v [1].



Obr. 1

Odchytky polynomicke náhrady c_{pm} od c_{pm}^R podle Ražnjeviče z [1] pro CO_2 , H_2O , N_2 a suchý vzduch. Hodnoty pro Ar v [1] uvedeny nejsou. Podle [5] do 800°C je voleno $c_{pm}^{\text{Ar}} = 0,521$ a mezi 800 a 1600°C je $c_{pm}^{\text{Ar}} = 0,520$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Polynomicke náhrada třetího a čtvrtého stupně je vyznačena $n = 3$, $n = 4$.

3. Příklad užití základního tvaru i - s diagramu suchého vzduchu pro ventilátory.

Příklad je volen pro ventilátor proto, že v tomto oboru se s i - s diagramem pravděpodobně vůbec nepočítá. Ve ventilátorech jsou relativně malé změny tlaků a teplot a běžně uváděné i - s diagramy jsou pro použití ve výpočtech ventilátorů příliš hrubé. Pro teplotní rozsah 0 až 500°C jsou podle [1] kapesním kalkulátorem HP 38G vypočítány hodnoty součinitelů a_0, \dots, a_3 pro c_{pm} suchého vzduchu (SV):

$$c_{pm}^{SV} = a_0^{SV} + a_1^{SV}t + a_2^{SV}t^2 + a_3^{SV}t^3, \quad \text{měrná entalpie } i_{SV} = c_{pm}^{SV}t,$$

$$a_0^{SV} = 1,00387301587, \quad a_1^{SV} = 1,10846560846e-5,$$

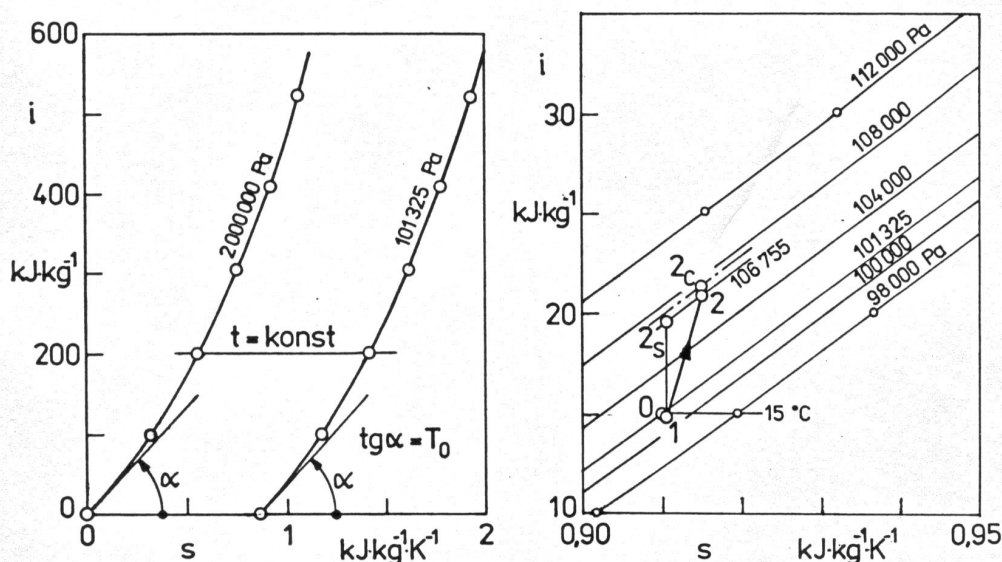
$$a_2^{SV} = 1,50396825397e-7, \quad a_3^{SV} = -6,48148148155e-11$$

a odpovídající hodnoty součinitelů b_j pro výpočet měrné entropie jsou

$$b_0^{SV} = 1,03676490273, \quad b_1^{SV} = -2,82346762474e-4,$$

$$b_2^{SV} = 3,31820238096e-7, \quad b_3^{SV} = -8,64197530875e-11.$$

Rozměry součinitelů a_i, b_j nejsou uvedeny, odpovídají definičním rovnicím.



Obr. 2 Diagram i - s suchého vzduchu s podrobnější oblastí pro stlačení vzduchu v stupni ventilátoru. $T_0 = 273,15 \text{ K}$.

V levé části obr. 2 je vyznačeno, že měrná entropie s je nulová při teplotě $t = 0^\circ \text{C}$ a tlaku $p_0 = 2000000 \text{ Pa}$. V pravé části je zobrazena komprese okolního vzduchu s teplotou 15°C a tlakem 101325 Pa . Přírůst celkového tlaku je 6000 Pa . V sání 1 se volí rychlost proudění vzduchu $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ve výfuku 2 se počítá s rychlostí $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro posouzení schopnosti způsobu výpočtu znázornit i nevelké rozdíly mezi stavy vzduchu ve ventilátoru jsou uvedeny následující údaje:

$$i_0 = 15,0610936 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, \quad s_0 = 0,9097646 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \quad p_1 = 100835,659243 \text{ Pa},$$

$$i_1 = 14,8610936 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, \quad s_1 = 0,9104598 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \quad t_1 = 14,8008568 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$i_{2c} = 21,3624589 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, \quad s_{2c} = 0,9148859 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \quad t_{2c} = 21,2736146 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$i_2 = 20,9124589 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, \quad t_2 = 20,8256472 \text{ }^\circ\text{C}, \quad p_2 = 106754,569818 \text{ Pa},$$

$$i_{2c} - i_1 = 6,5 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, \quad t_{2c} - t_1 \approx 6,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Jiný možný tvar i -s diagramu vlhkého vzduchu a spalin.

Z vyjádření střední měrné tepelné kapacity plynu při stálém tlaku pomocí polynomu čtvrtého stupně s pěti součiniteli a_i

$$c_{pm} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4, \quad i = c_{pm} \cdot t$$

vyplývají vztahy pro součinitele b_j k výpočtu měrné entropie

$$\begin{aligned} b_0 &= a_0 - 2a_1 T_0 + 3a_2 T_0^2 - 4a_3 T_0^3 + 5a_4 T_0^4, & b_1 &= 2a_1 - 6a_2 T_0 + 12a_3 T_0^2 - 20a_4 T_0^3, \\ b_2 &= (3a_2 - 12a_3 T_0 + 30a_4 T_0^2) / 2, & b_3 &= (4a_3 - 20a_4 T_0) / 3, \\ b_4 &= 5a_4 / 4. \end{aligned}$$

Diagram i -s založený na těchto vztazích je možné s vyhovující přesností použít v celém teplotním intervalu 0 až 1600°C s konstantními součiniteli a_i , b_j , jak je znázorněno na obr. 1 čarami pro $n = 4$.

5. Závěr.

Pro vlhký vzduch a spaliny plyných paliv je vypracován diagram i -s a na něj vázané obslužné podprogramy pro výpočet hmotnostních koncentrací složek stechiometrických spalin a podprogramy pro stanovení termodynamických stavů plynu.

Užití i -s diagramu je ověřeno na příkladech výpočtů chlazené plynové turbíny na zemní plyn, ventilátoru a ejektoru. Velká rozlišovací schopnost navržené formy i -s diagramu byla zjištěna ve znázornění tlakových ztrát v potrubních prvcích protékaných vzduchem a rovněž jim odpovídajících velmi malých změn teplot, měrné entalpie a měrné entropie vzduchu. Při výpočtu a znázornění změn termodynamických stavů plynu se berou v úvahu místní změny chemického složení plyné směsi, například ve spalinách při jejich průtoku v plynové turbíně..

Literatura

- [1] Ražnjevič K. Tepelné tabulky a diagramy. Nakladatelství ALFA Bratislava, 1969.
- [2] Jůza J. An Equation of State for Water and Steam. Rozpravy Československé akademie věd, 76, č. 1, 1966.
- [3] Bečvář J., Liška A. Diagram vzduchu i -s, t -s. Praha, SNTL, 1964.
- [4] Mareš R., Kokeisl M., Kocourek K. Tabulky termofyzikálních vlastností vody a vodní páry. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta strojní, 1994.
- [5] Vargaftik N.B. Spravočnik po teplofizičeskim svojstvam gazov i židkosteij. Izdatelstvo NAUKA, Moskva 1972.
- [6] Konečný V. Termodynamické vlastnosti molekulárního dusíku. Jaderná energie, sv. 5, čís. 10, 1959.
- [7] Konečný V. Izoentropické exponenty reálného plynu. Strojírnoství 38, 1986, čís. 2.