PŘÍLOHA 862: Dynamika tekutin, Proudění plynů a par tryskami, Výpočet polohy rázové vlny v trysce

Tento případ je zobrazen na OBRÁZEK 105 (s. 12)*, který ukazuje ideální průběh expanze s rázovou vlnou v trysce, jedná o případ, kdy je protitlak p_{ec}. To znamená, že před rázovou vlnou probíhá nadzvuková expanze a za rázovou vlnou probíhá podzvuková komprese. Odhad místa vzniku rázové vlny může tedy probíhat, tak, že spočítáme stavové veličiny plynu v trysce mezi hrdlem a ústím (pro vybraná místa) při expanzi při návrhovém stavu. Tyto stavy označíme 1x, protože se bude jednat o stavy před rázovou vlnou. V druhém kroku pomocí Rankine-Hugoniotových rovnic (viz článek Machovo číslo a jevy při proudění vysokými rychlostmi) vypočítáme stavy za případnou vlnou, kdyby vznikla ve vyšetřovaném místě. Tyto stavy označíme indexem 2x.*

$$M_2^2=\frac{\frac{\kappa-1}{2}M_1^2+1}{\kappa\cdot M_1^2-\frac{\kappa-1}{2}};\quad \frac{T_2}{T_1}=\frac{1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^2}{1+\frac{\kappa-1}{2}M_2^2};\ \frac{p_2}{p_1}=\frac{M_1}{M_2}\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}.$$

P862/1: Zadaný parametr úlohy je:

Δp
0,55

[MPa]

Další známé parametry získané při řešení ÚLOHY 104 (s. 10), respektive ÚLOHY 102 (s. 6) jsou uvedeny v textu.

P862/2: Tlak p_{1x} může být v trysce v rozmezí od kritického tlaku až pro tlak za tryskou při návrhovém stavu p_{en}. Kritická tlak zjistíme z kritického tlakového poměru ε^*_s a z celkového tlaku p_{is} – oba parametry jsou uvedeny v ÚLOZE 102 (s. 6). Dále lze spočítat tlakový poměr ε_{sx} a odtud pomocí ROVNICE 101 (s. 4) i rychlosti V_{1x}, přičemž parametry pracovního plynu lze odečíst z ÚLOHY 102 (s. 6).

Dále lze vypočítat měrný objem v_{1x} podle rovnice izoentropy v P102/6:

$$p_{is}\cdot v_{is}^{\kappa}=p_{1x}\cdot v_{1x}^{\kappa}.$$

Teplotu t_{1x} lze vypočítat z tlaku p_{1x} a měrného objemu v_{1x} pomocí stavové rovnice ideálního plynu (P102/6):

$$p_{1x}\cdot v_{1x}=r\cdot T_{1x}.$$

Rychlost zvuku a_{1x} lze vypočítat podle rovnice (P104/3):

$$a_{1x}=\sqrt{\kappa\cdot r\cdot T_{1x}}.$$

Aktuální průtočný průřez A_x lze stanovit z rovnice kontinuity (ROVNICE 334, s. 4.). Z průtočného průřezu A_x lze dopočítat i

souřadnici x podle ROVNIC 703 (s. 10) a parametrů trysky v ÚLOZE 104 (s. 10), přičemž lze vycházet z toho, že tryska je kruhového průřezu a jednotlivé poloměry lze stanovit z rovnice pro plochu kruhu:

$$r_{1x}=\sqrt{\frac{A_{1x}}{\pi}}.$$

Parametry trysky z ÚLOHY 104 (s. 10):

p_{is}	T_{is}	v_{is}	p_{en}	$\dot{m}$	ε^*_s	r	κ	t
1,1848	654,09	158,44	0,25	2,8086	0,5283	287	1,4	0,0727
α	r_t							
10	2,1883							

p [MPa]; T [K]; v [dm^3·kg^{-1}]; m [kg·s^{-1}]; ε [1]; r [J·kg^{-1}·K^{-1}]; κ [1]; t, r_t [cm]; α [°]

	1	2	3	4	5	6	7	8
p_{1x}	625,95	550	500	450	400	350	300	250
ε_{s1x}	0,5283	0,4642	0,4220	0,3798	0,3376	0,2954	0,2532	0,2110
V_{1x}	467,97	508,66	535,80	563,51	592,04	621,76	653,11	686,73
v_{1x}	249,92	274,11	293,42	316,36	344,13	378,56	422,63	481,41
t_{1x}	271,93	252,15	238,04	222,88	206,47	188,51	168,62	146,20
a_{1x}	467,99	459,42	453,21	446,44	438,99	430,69	421,31	410,48
M_{1x}	1,0000	1,1072	1,1822	1,2622	1,3487	1,4436	1,5502	1,6730
A_{1x}	14,999	15,135	15,381	15,768	16,325	17,100	18,175	19,689
r_{1x}	2,1850	2,1949	2,2127	2,2403	2,2796	2,3331	2,4052	2,5034
x	0,0000	0,1489	0,3516	0,6677	1,1162	1,7279	2,5527	3,6751

p [kPa]; ε [1]; V, a [m·s^{-1}]; v [dm^3·kg^{-1}]; t [°C]; M [1]; A [cm^2]; r, x [cm]

P862/3: Nyní máme potřebné parametry na vstupu do rázové vlny, kdyby vznikla na souřadnici x. Na výstupu z takové vlny musí být parametry určené Rankine-Hugoniotovými rovnicemi v P862/1:

	1	2	3	4	5	6	7	8
M_{2x}	1,0000	0,9062	0,8534	0,8059	0,7624	0,7220	0,6840	0,6477
t_{2x}	271,92	288,66	297,77	305,75	312,83	319,18	324,97	330,31
p_{2x}	625,91	694,91	731,99	761,44	782,14	792,65	791,06	774,67
v_{2x}	249,93	232,03	223,85	218,2	215,02	214,47	217	223,57
V_{2x}	468	430,57	408,75	388,66	369,92	352,24	335,34	318,92

M [1]; t [°C]; p [kPa]; v [dm^3·kg^{-1}]; V [m·s^{-1}]

P862/4: Nyní lze vypočítat parametry izoentropické komprese pro případy 1 až 8, která by měla následovat od rázové vlny k ústí trysky. Z dostupných údajů a nového protitlaku p_e lze dopočítat jaký by musel být výstupní průřez trysky A_{eR}, aby bylo proudění v rovnováze. Případ, kde bude A_{eR} nejblíž skutečnému průřezu trysky A_e bude i nejblíže skutečnosti viz dále.

Přičemž skutečný průřez trysky z ÚLOHY 104 (s. 10) je:

A_e
19,689

[cm²]

Déle vypočítáme nový protitlak p_e ze zadané změny tlaku Δp a měrný objem v_{eR} z rovnice izoentropy:

$$p_{2x} \cdot v_{2x}^{\kappa} = p_e \cdot v_{eR}^{\kappa}.$$

Dále lze stanovit rychlost V_{eR} z ROVNICE 101 (s. 4) a následně z ROVNICE 334 (s. 4) i průtočný průřez A_{eR}:

	1	2	3	4	5	6	7	8
p_e	800,00							
v_{eR}	209,75	209,83	210,08	210,63	211,58	213,06	215,26	218,49
ε_R	1,28	1,15	1,09	1,05	1,02	1,01	1,01	1,03
V_{eR}	373,48	372,89	370,94	366,78	359,48	347,76	329,53	300,86
A_{eR}	15,77	15,8	15,91	16,13	16,53	17,21	18,35	20,4

p [kPa]; v [$dm^3 \cdot kg^{-1}$]; ε [1]; V [$m \cdot s^{-1}$]; A [cm^2]

P862/5: Z poslední tabulky je zřejmé, že rázová vlna vznikne někde v místě trysky s označením 7 a 8, tj. na úseku mezi 2,5527 až 3,6751 cm. Přesnější polohu lze získat rozdělením úseku 7-8 na více částí.