

OPTIMALIZATION OF STEAM BOILER PIPE SYSTEM

F. Jirouš*

Summary: *The paper deals with the influence of steam boilers flow systems design on flow distribution in branched systems.*

Key words: steam boilers, flow distribution, flow systems, design, optimisation

1. Úvod

U parních kotlů trubkovými systémy jsou výparníky, ohříváky vody, přehříváky a přihříváky páry. Protože se jedná o systémy otápěné, požaduje se, aby průtok média trubkovým svazkem byl rovnoměrný, nebo přizpůsoben rozdělení tepelného příkonu. Návrh trubkového systému proto silně ovlivňuje spolehlivost provozu parního kotle. Matematický model názorně ukazuje, že o rovnoměrnosti rozdělení média do trubek rozhoduje především typ zvoleného uspořádání proudění a volba vnitřních průměrů komor. Předkládaný příspěvek navazuje na příspěvky na konferencích INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002, Jirouš (2002), INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2003, Jirouš (2003) a je rozšířením příspěvku v Acta Mechanica Slovaca, Jirouš (2003). Zabývá se přizpůsobením proudění tepelnému příkonu u trubkových systémů s uspořádáním proudění typu U a typu Z, které se vyskytují nejčastěji.

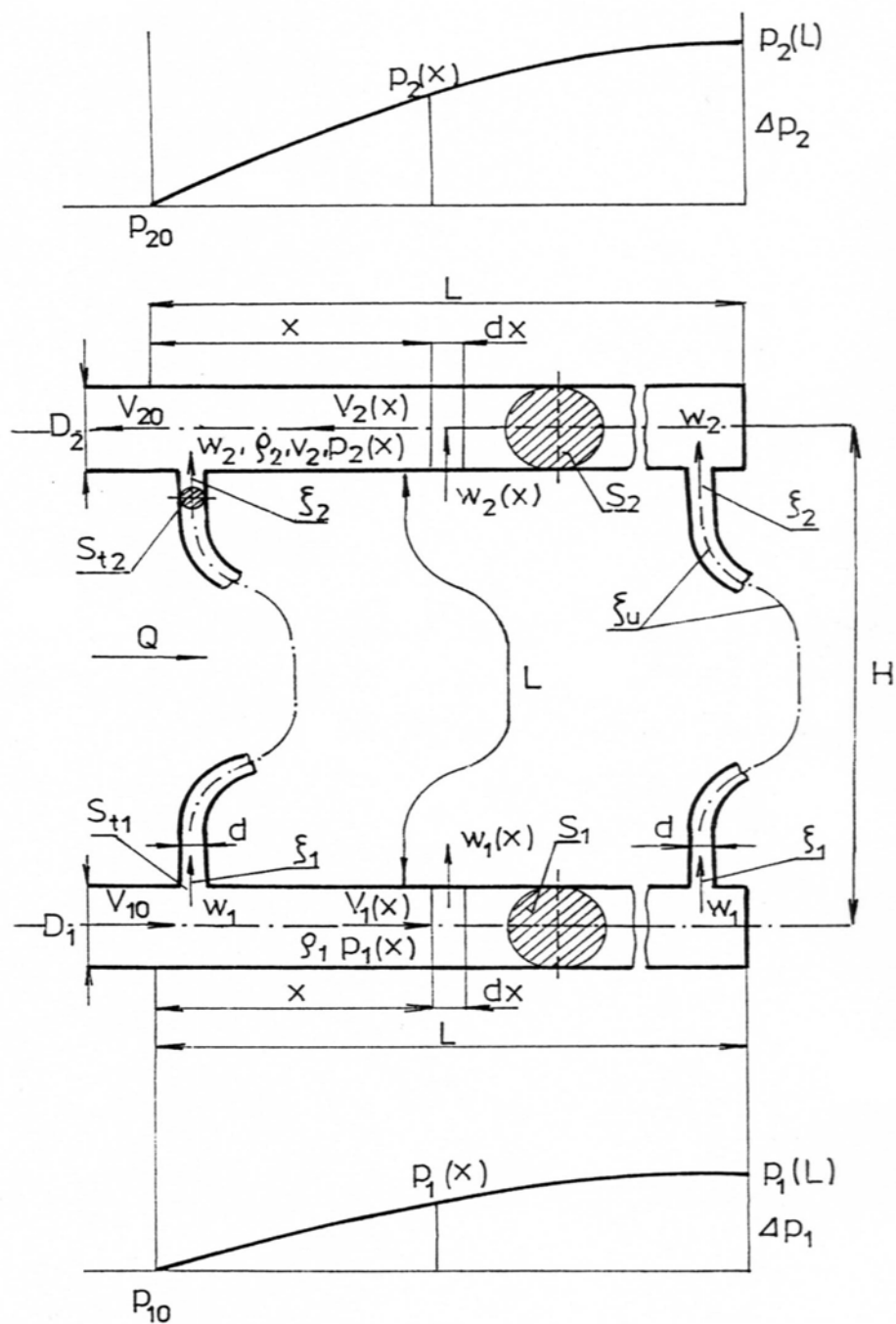
S označením podle obr. 1 průtočného průřezu rozdělovací komory S_1 , průřezu trubek u rozdělovací komory S_{t1} , průtočného průřezu sběrné komory S_2 a průřezu trubek vcházejících do sběrné komory S_{t2} , se součinitelem tlakového spádu v rozdělovací komoře E a ve sběrné komoře A, se součinitelem tlakových ztrát v trubkách vztaheným na vstupní rychlost proudění do trubek ξ_1 a na výstupní rychlost z trubek ξ_2 jsou definovány parametry rozdělovací komory

$$\delta_1 = \frac{S_{t1}}{S_1} \sqrt{\frac{E}{\xi_1}} \quad (1)$$

a sběrné komory

$$\delta_2 = \frac{S_{t2}}{S_2} \sqrt{\frac{A}{\xi_2}} \quad (2)$$

* Prof. Ing. František Jirouš, DrSc., ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a energetiky, odbor tepelných a jaderných energetických zařízení; Technická 4, 166 07 Praha 6; tel.: 00420.224352524, fax: 00420.224353705; E-Mail: Frantisek.Jirous@fs.cvut.cz



Obr. 1 Trubkový systém typu U

Při kontrole návrhu průtočných systémů se posuzují kriteria:

- jednoznačnost proudění,
- rovnoměrnost nebo přizpůsobení rozdělení proudění danému průběhu tepelného příkonu,
- dovolená hydraulická nerovnoměrnost,
- tlakový rozdíl na trubkovém systému.

Pro tlakový rozdíl v rozdělovací komoře systému proudění typu U lze odvodit

$$\Delta p_1 = E \frac{\rho_1}{2} V_{10}^2 \quad (3)$$

a ve sběrné komoře

$$\Delta p_2 = A \frac{\rho_2}{2} V_{20}^2 \quad (4)$$

Pro tlakový rozdíl ve sběrné komoře systému typu Z plyne

$$\Delta p_2 = A \frac{\rho_2}{2} V_{2L}^2 \quad (5)$$

Střední tlakový rozdíl na trubkách je dán vztahem

$$\Delta p_s = \xi_1 \frac{\rho_1}{2} w_{1s}^2 + (-)\Delta p_{st} \quad (6)$$

když tlakový rozdíl na trubkách způsobený rozdílem geodetických výšek

$$\Delta p_{st} = 2Hg \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (7)$$

S využitím vztahů pro rozdíly tlaku lze parametry komor také vyjádřit:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\Delta p_1}{\Delta p_s - (+)\Delta p_{st}}} \quad (8)$$

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{\Delta p_2}{\Delta p_s - (+)\Delta p_{st}}} \quad (9)$$

Znaménko plus ve vztahu (6) a minus ve vztazích (8) a (9) platí pro vzestupné proudění, znaménko minus ve vztahu (6) a plus ve vztazích (8) a (9) pro sestupné proudění v trubkách. Podmínky pro typ řešení diferenciálních rovnic v trubkových systémech typu U a Z vzhledem ke vztahům (1) a (2) zní

$$A. \quad \delta_1 > \delta_2, \quad \Delta p_1 > \Delta p_2, \quad \frac{S_2}{S_1} > k \quad (10)$$

$$B. \quad \delta_1 = \delta_2, \quad \Delta p_1 = \Delta p_2, \quad \frac{S_2}{S_1} = k \quad (11)$$

$$C. \quad \delta_1 < \delta_2, \quad \Delta p_2 > \Delta p_1, \quad \frac{S_2}{S_1} < k \quad (12)$$

když

$$k = \sqrt{\frac{A \rho_1}{E \rho_2}} \quad (13)$$

Charakter rychlosti proudění v trubkách v závislosti na podmínkách (10) až (12) je na obr. 2 a obr. 3. Pro podmínku (10) mají křivky rychlosti proudění charakter konkávní, pro podmínku (11) přímkový a pro podmínku (13) konvexní.

2. Proudění v trubkovém systému typu U

Vlastnosti navrhovaného systému lze posoudit simulací na matematickém modelu. Za tím účelem jsou proto ještě jednou uvedena potřebná řešení již dříve odvozených diferenciálních rovnic proudění. Rychlost proudění na vstupu do trubek pro jednotlivé podmínky řešení je

$$A. \quad \frac{w_1}{w_{1S}} = \delta_A \frac{\cos \delta_A \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\sin \delta_A} \quad (14)$$

$$B. \quad w_1 = w_{1S} = konst. \quad (15)$$

$$C. \quad \frac{w_1}{w_{1S}} = \delta_C \frac{ch \delta_C \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{sh \delta_C} \quad (16)$$

když střední rychlost proudění na vstupu do trubkového svazku s hmotnostním průtokem m je

$$w_{1S} = \frac{m}{S_{t1} \rho_1} \quad (17)$$

3. Proudění v trubkovém systému typu Z

Použité označení je stejné, jako u systému typu U. Řešením diferenciální rovnice pro systém proudění typu Z je rychlost proudění na vstupu do trubkového svazku:

$$A. \quad \frac{w_1}{w_{1S}} = \frac{\delta_1^2 \cos \delta_A \left(1 - \frac{x}{L}\right) - \delta_2^2 \cos \delta_A \frac{x}{L}}{\delta_A \sin \delta_A} \quad (18)$$

$$B. \quad \frac{w_1}{w_{1S}} = 1 + \frac{\delta_B^2}{2} \left(2 \frac{x}{L} - 1\right) \quad (19)$$

$$C. \quad \frac{w_I}{w_{IS}} = \frac{\delta_2^2 ch \delta_C \frac{x}{L} - \delta_I^2 ch \delta_C \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\delta_C sh \delta_C} \quad (20)$$

4. Jednoznačnost proudění

Podmínky jednoznačného proudění vyplývají z požadavku, aby rychlosti proudění v trubkách podle vztahů (14), (16), (18), (19) a (20) byly větší než nula. Protože u otápěných systémů parních kotlů nelze v trubkách nulové rychlosti připustit, platí podmínka, že v místě systému s nejmenší rychlosti proudění v trubkách musí být

$$w_1 \rho_1 \geq (w_1 \rho_1)_{\min} \quad (21)$$

Místa s minimální rychlostí proudění pro systémy typu U a Z a pro podmínky A, B a C jsou ukázány na ob. 2 a obr. 3.

5. Rovnoměrnost proudění

Proudění v trubkovém svazku bude rovnoměrné, když bude splněna podmínka shodnosti parametrů komor podle rov. (1) a (2). Je zřejmé, že rovnoměrné proudění v trubkovém svazku lze docílit jen u trubkového systému typu U, v případě B. Průřezy komor musí splňovat podmínku

$$\frac{S_2}{S_1} = \sqrt{\frac{A \rho_1}{E \rho_2}} \quad (22)$$

6. Přizpůsobení proudění tepelnému příkonu

U parních kotlů jsou teplosměnnými plochami přehříváky a přehříváky páry, které mají s ohledem na zvolený materiál omezenou maximální teplotu media na výstupu z trubkového svazku. Je proto lokální nerovnoměrnost teploty media na výstupu z trubek dána. Je dáno i rozdělení tepelného příkonu do trubkového svazku. O nerovnoměrnosti teploty rozhoduje proto proudění v jednotlivých trubkách. Lokální nerovnoměrnost teploty na výstupu z trubek se střední teplotou t_{2s} je vyjádřena

$$\psi(x) = \frac{t_2(x) - t_{2s}}{t_{2s}} \quad (23)$$

nebo s použitím entalpií

$$\psi(x) = \frac{i_2(x) - i_{2s}}{i_{2s}} \quad (24)$$

Zde proměnná x značí opět souřadnici místa v rozdělovací komoře o délce L .

S příkonem tepla Q a hmotnostním průtokem m je střední hodnota entalpie

$$i_{2s} = i_1 + \frac{Q}{m} \quad (25)$$

když i_1 značí entalpii media na vstupu do trubek.

Střední hustota tepelného toku vztažená na jednotku délky s příkonem tepla Q je

$$q_s = \frac{Q}{L} \quad (26)$$

a lokální nerovnoměrnost hustoty tepelného toku

$$\mu(x) = \frac{q(x) - q_s}{q_s} \quad (27)$$

Lokální nerovnoměrnost proudění je definována podobně

$$\varphi(x) = \frac{w_1(x) - w_{1s}}{w_{1s}} \quad (28)$$

Z energetické bilance elementu trubkového systému, když

$$\frac{dS_{t1}}{S_{t1}} = \frac{dx}{L} \quad (29)$$

vyplývá entalpie na výstupu z trubek

$$i_2(x) = i_1 + \frac{Q}{m} \frac{w_s}{w_1(x)} \frac{q(x)}{q_s} \quad (30)$$

Z tohoto vztahu je hned vidět, že pokud

$$\frac{w_1(x)}{w_{1s}} = \frac{q_1(x)}{q_s} \quad (31)$$

tj. proudění v trubkách bude přizpůsobeno hustotě tepelného toku, bude entalpie na výstupu z trubek konstantní.

Dosazením vztahu (30) do vztahu (24) je lokální nerovnoměrnost teploty media na výstupu z trubek

$$\psi(x) = \frac{i_{2s} - i_1}{i_{2s}} \frac{\mu(x) - \varphi(x)}{1 + \varphi(x)} \quad (32)$$

Lokální nerovnoměrnost teploty media na výstupu z trubek bude maximální v místě $x = 0$ nebo $x = L$, kde je maximální poměr

$$\pi = \frac{\mu(x) - \varphi(x)}{1 + \varphi(x)} \quad (33)$$

Dovolená lokální hydraulická nerovnoměrnost již vyplývá z požadované lokální teplotní nerovnoměrnosti a dané lokální nerovnoměrnosti hustoty tepelného toku ze vztahu (32)

$$\varphi(x) = \frac{\frac{i_{2s} - i_1}{i_{2s}} \mu(x) - \psi(x)}{\psi(x) + \frac{i_{2s} - i_1}{i_{2s}}} \quad (34)$$

Ke splnění podmínky (31) je nutno znát před hledáním geometrie trubkového systému průběh hustoty tepelného toku, který lze aproximovat funkcí v závislosti na charakteru křivek pro jednotlivé podmínky řešení.

S označením

$$\sigma = k \frac{S_1}{S_2} \quad (35)$$

též platí

$$\delta_2 = \sigma \delta_1 \quad (36)$$

$$\text{A:} \quad \delta_A = \delta_1 \sqrt{1 - \sigma^2} \quad (37)$$

$$\text{B:} \quad \delta_B = \delta_1 \quad (38)$$

$$\text{C:} \quad \delta_C = \delta_1 \sqrt{\sigma^2 - 1} \quad (39)$$

U trubkových systémů typu U jsou aproximační funkce hustoty tepelného toku

$$\text{A:} \quad \frac{q(x)}{q_s} = a \frac{\cos a \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\sin a} \quad (40)$$

a z porovnání se vztahem (14) je

$$a = \delta_1 \sqrt{1 - \sigma^2} \quad (41)$$

$$\text{B:} \quad \frac{q(x)}{q_s} = 1 \quad (42)$$

$$\text{C:} \quad \frac{q(x)}{q_s} = a \frac{\cosh a \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\sinh a} \quad (43)$$

a z porovnání se vztahem (16) je

$$a = \delta_1 \sqrt{\sigma^2 - 1} \quad (44)$$

Pro systém Z a podmínky

$$\text{A:} \quad \frac{q(x)}{q_s} = \frac{a \cos b \left(1 - \frac{x}{L}\right) - c \cos b \frac{x}{L}}{b \sin b} \quad (45)$$

kde

$$b = \sqrt{a - c} \quad (46)$$

a z porovnání se vztahem (18) je

$$a = \delta_1^2 \quad (47)$$

$$b = \delta_1 \sqrt{1 - \sigma^2} \quad (48)$$

$$c = \sigma^2 \delta_1^2 \quad (49)$$

$$\text{B:} \quad \frac{q(x)}{q_s} = a + b \frac{x}{L} \quad (50)$$

a z porovnání se vztahem (19) je

$$a = 1 - \frac{\delta_1^2}{2} \quad (51)$$

$$b = \delta_1^2 \quad (52)$$

$$C. \quad \frac{q(x)}{q_s} = \frac{achb\left(1 - \frac{x}{L}\right) - cchb\frac{x}{L}}{bshb} \quad (53)$$

kde

$$b = \sqrt{a - c} \quad (54)$$

a z porovnání se vztahem (20) je

$$a = -\delta_1^2 \quad (54)$$

$$b = \delta_1 \sqrt{\sigma^2 - 1} \quad (55)$$

$$c = -\delta_1^2 \sigma^2 \quad (56)$$

7. Závěr

Příspěvek se zabýval jednou optimalizační úlohou při návrhu trubkového systému parních kotlů, tj. návrh systému přizpůsobit hustotě tepelného toku. Postup při řešení této optimalizační úlohy je následující:

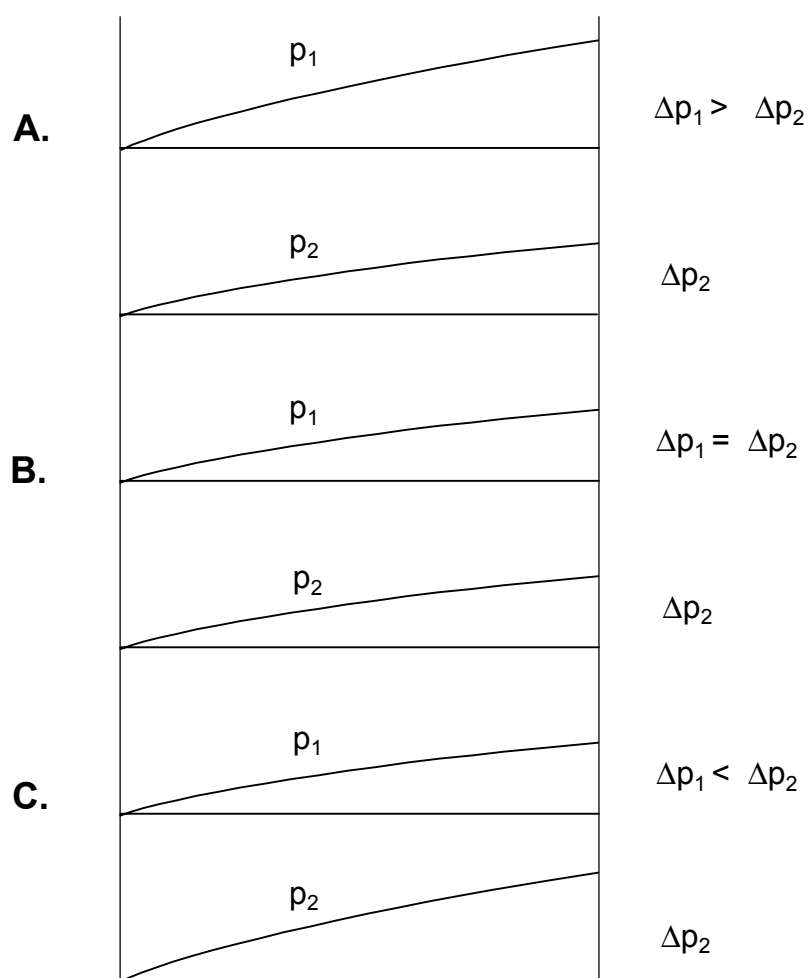
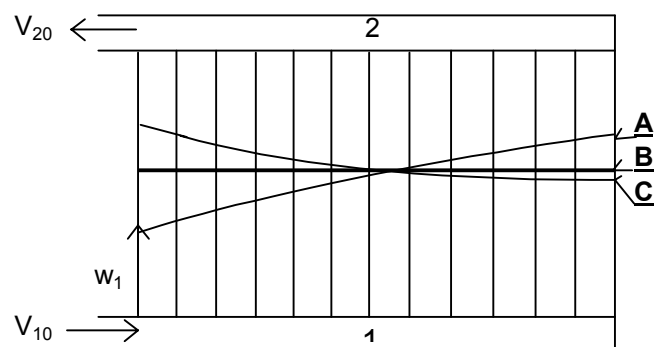
1. Analytické vyjádření hustoty tepelného toku jako funkce $\frac{q(x)}{q_s}$.
2. Podle průběhu funkce hustoty tepelného toku vyplýne volba typu trubkového systému a z charakteru křivek podle obr. 2 a obr.3 rychlost proudění na vstupu do trubek podle řešení A, B nebo C.
3. Nalezení parametrů komor, které odpovídají koeficientům aproximačních vztahů pro hustotu tepelného toku a tedy takový návrh geometrie trubkového systému, který nejlépe splní podmínku (31).

Poděkování

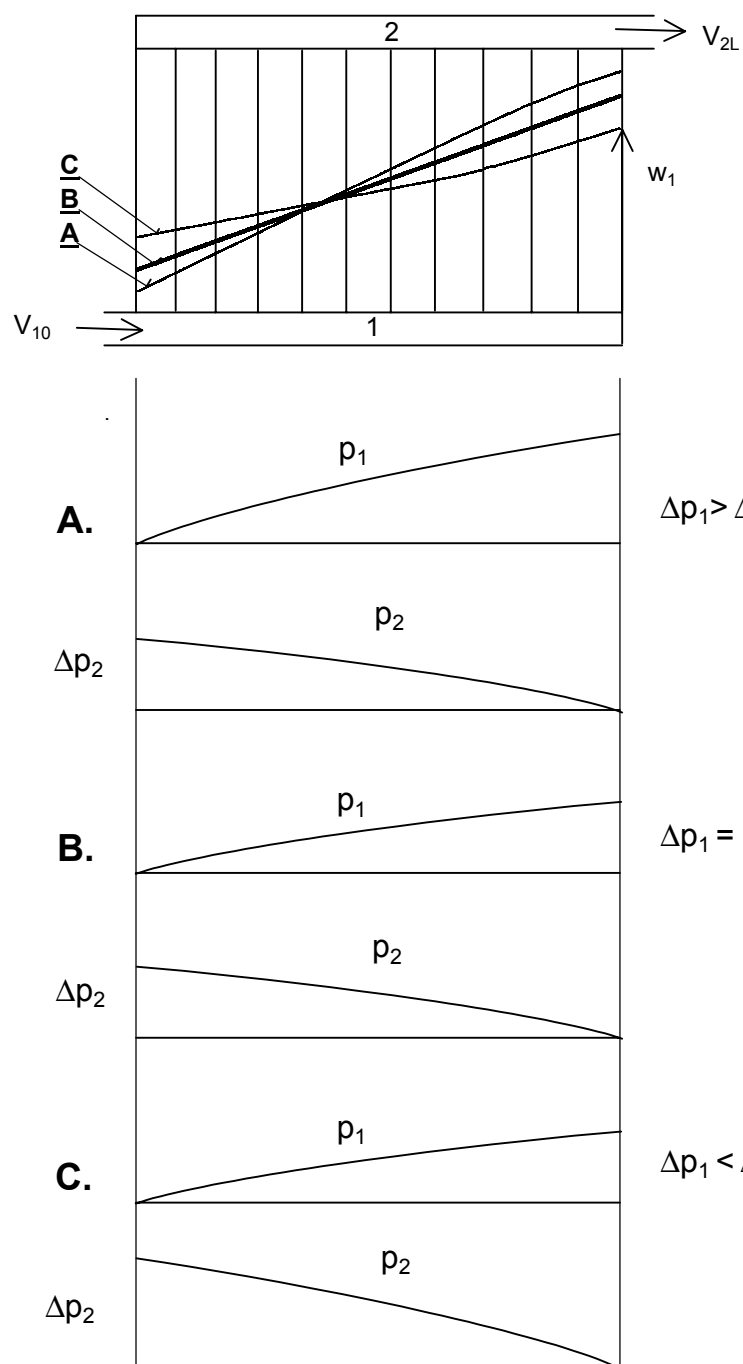
Tato práce vznikla díky výzkumnému záměru CEZ: J04/98: 212200009

8. Literatura

- Jirouš, F. (2002) Rovnice proudění v trubkových systémech parních kotlů. *Sborník a CD ROM, Inženýrská mechanika 2002, AVČR, Svratka 13.-16.5.2002*, ISBN 80-214-2109-6.
- Jirouš, F. (2003) Pressure drop in flow systems of steam boilers. *Sborník a CD ROM Inženýrská mechanika 2003, AVČR, Svratka 12.-15.5.2003*, ISBN 80-86246-18-3
- Jirouš, F. (2003) Optimalizace trubkových systémů parních kotlů. *ACTA MECHANICA SLOVACA, Košice, ročník 7, 2003, č. 3 str. 67 – 76. Sborník 5. mezinárodní konference Racionálna výroba, prenos a spotreba energie, Herlany 22. –25.9.2003. ISSN 1335-2393.*



Obr. 2 Charakter proudění v trubkách systému U



Obr. 3 Charakter proudění v trubkách systému Z