

## PRESSURE DROP IN FLOW SYSTEMS OF STEAM BOILERS

F. Jirouš\*

**Summary:** *The paper deals with the influence of steam boilers flow systems design on flow distribution in branched systems. They are differential equations of flow in U and Z flow systems derived and solved. The computation formulas for speed and pressure drop in systems are given.*

### 1.Úvod

Tak, jak ubývá zásob fosilních paliv, sílí snaha, využít zbývající jejich zásoby co nejefektivněji. V oblasti energetického strojírenství vznikají proto projekty, které se zabývají zvyšováním účinnosti přeměny chemické energie paliv v energii elektrickou. Jednou z cest k úspoře paliv je snižování vlastní spotřeby energetických zařízení. U parních kotlů je možno snížit vlastní spotřebu napájecího čerpadla snížením tlakových ztrát trubkových systémů, ze kterých tlakový systém kotle sestává.

Trubkovým systémem se zde rozumí systém složený podle obr. 1 z rozdělovací komory, trubkového registru nebo svazku a ze sběrné komory. V některých případech má systém komoru jen jednu, nebo místo trubek jsou výtokové dýzy zabudované do rozdělovací komory. V komorách se předpokládá axiální proudění. Uspořádání proudění v trubkovém systému je uvažováno typu U nebo typu Z, uspořádání komor horizontální.

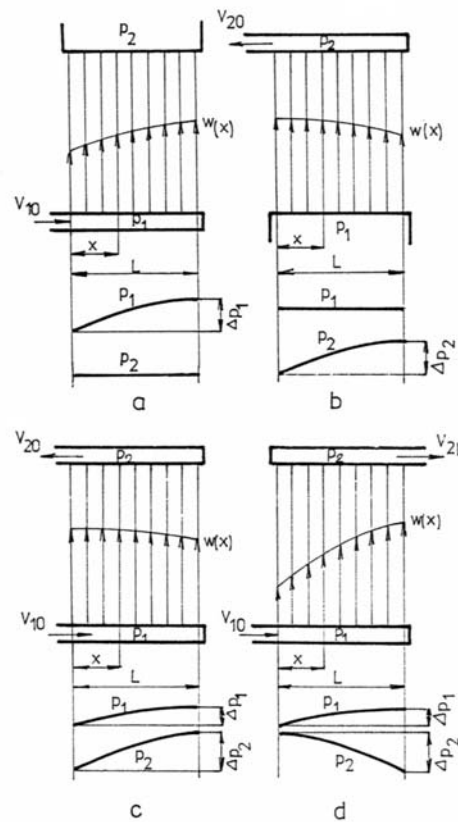
U parních kotlů tyto systémy představují ohříváky vody, přehříváky a přihříváky páry. Protože se jedná o systémy otápěné, požaduje se, aby průtok media trubkovým svazkem byl rovnoměrný, nebo přizpůsoben rozdělení tepelného příkonu. Matematický model názorně ukazuje, že o rovnoměrnosti rozdělení media do trubek rozhoduje především typ zvoleného uspořádání proudění a volba vnitřních průměrů komor.

Důsledkem nevhodně navrženého systému je nerovnoměrné proudění v trubkovém svazku nebo dokonce nejednoznačné proudění. Rozdělovací komora může mít ejekční účinek a přisávat medium z části sběrné komory, takže v některých trubkách dochází k obrácenému proudění, v některých trubkách medium neproudí a tak dochází k lokálnímu přehřátí trubek a k jejich praskání. Návrh trubkového systému proto silně ovlivňuje spolehlivost provozu parního kotle, jak bylo řečeno na loňské konferenci INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002, Jirouš (2002).

Podle názvu příspěvku, je nyní úkolem stanovit průběh tlaku v komorách a v trubkovém svazku pro trubkové systémy s uspořádáním proudění typu U a Z. K tomu je třeba sestavit a řešit diferenciální rovnice proudění v trubkových systémech.

---

\* 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: [jirous@fsid.cvut.cz](mailto:jirous@fsid.cvut.cz)



**Obr. 1** Uspořádání trubkových systémů

- a – s rozdělovací komorou      b – se sběrnou komorou  
c – typu U                              d – typu Z

## 2. Odvození diferenciální rovnice proudění v trubkovém systému typu U

Diferenciální rovnice proudění v trubkovém systému typu U byla uvedena na konferenci INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002, Jirouš (2002). Protože úkolem příspěvku je určení tlakových spádů, je třeba se vrátit k odvození diferenciální rovnice, tak jak obdobně je pro turbulizátor spalínového tahu parního kotle ( Jirouš 2001) uvedeno ve sborníku TU Žilina, Jirouš (2002).

S označením 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 vztaženým na vstupní rychlost proudění do trubek  $\xi_1$  a výstupní rychlost z trubek  $\xi_2$  jsou definovány parametry rozdělovací komory

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

a sběrné komory

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

Pro proudění v rozdělovací komoře lze psát Bernoulliho rovnici

$$\frac{dp_1}{\rho_1} + V_1 dV_1 + gdh_1 + gdh_{z1} = 0. \quad (3)$$

Zde je činěn předpoklad, že elementární ztrátová energie je úměrná elementární kinetické energii a protože  $dV_1 < 0$

$$gdh_{z1} = -C_1 V_1 dV_1, \quad (4)$$

takže s označením součinitele tlakového spádu v rozdělovací komoře

$$E = 1 - C_1 \quad (5)$$

z rov. (3) dostáváme

$$\frac{dp_1}{dx} = -E \rho_1 V_1 \frac{dV_1}{dx}. \quad (6)$$

Podobně z Bernoulliho rovnice psané pro proudění ve sběrné komoře, když se v otápených trubkách změnila hustota media

$$\frac{dp_2}{\rho_2} + V_2 dV_2 + gdh_2 + gdh_{z2} = 0 \quad (7)$$

opět s předpokladem, že

$$gdh_{z2} = C_2 V_2 dV_2 \quad (8)$$

a s označením součinitele tlakového spádu ve sběrné komoře

$$A = 1 + C_2 \quad (9)$$

z rov. (7) plyne

$$\frac{dp_2}{dx} = -A \rho_2 V_2 \frac{dV_2}{dx} \quad (10)$$

Pro horizontální komory jsou členy v rov. (3) a (7)  $gdh_1 = gdh_2 = 0$ .

Platnost vztahů (6) a (10) se zakládá na znalosti součinitelů tlakového spádu v rozdělovací komoře E a sběrné komoře A. Kikinis (1964) dospěl na základě experimentů k závěru, že tyto součinitelů jsou konstantní, nezávislé na rychlosti, tlaku, podélné rozteči trubek u komor a vzdálenosti od vstupu do komory. Hodnoty se pohybovaly v mezích  $E = 0,6-0,7$  a  $A = 2,0-2,2$ . Urban (1968) dospěl k hodnotám  $E = 0,79-0,96$  a  $A = 1,8-2,1$  V sovětské normativní metodě (1978) jsou doporučeny hodnoty  $E = 0,82$  a  $A = 2,5$ .

Rozdíl tlaku na trubce v místě x se součinitelem tlakových ztrát  $\xi_1$  vztaženým na vstupní rychlost do trubky  $w_1$  lze vyjádřit

$$p_1 - p_2 = \xi_1 \frac{\rho_1}{2} w_1^2 + H \rho g. \quad (11)$$

Po diferenciaci je

$$\frac{dp_1}{dx} - \frac{dp_2}{dx} = \xi_1 \rho_1 w_1 \frac{dw_1}{dx} \quad (12)$$

protože druhý člen na pravé straně rov. (11) je konstantní. Vzhledem ke vztahům (6) a (10) z rov. (12) plyne

$$A\rho_2V_2 \frac{dV_2}{dx} - E\rho_1V_1 \frac{dV_1}{dx} - \xi_1\rho_1w_1 \frac{dw_1}{dx} = 0. \quad (13)$$

Nyní je třeba rychlost proudění ve sběrné komoře  $V_2$  a na vstupu do trubky  $w_1$  vyjádřit jako funkce rychlosti proudění v rozdělovací komoře  $V_1$ . Před tím lze udělat předpoklad, že průtočný průřez trubek  $S_{t1}$  je možno nahradit spárou po délce komory  $L$  o šířce  $b$

$$b = \frac{S_{t1}}{L} \quad (14)$$

Z rovnice kontinuity elementu rozdělovací komory o průtočném průřezu  $S_1$  potom plyne

$$w_1 = -\frac{S_1}{S_{t1}}L \frac{dV_1}{dx} \quad (15)$$

a

$$dw_1 = -\frac{S_1}{S_{t1}}L \frac{d^2V_1}{dx^2} \quad (16)$$

Z rovnice kontinuity celého systému v místě  $x$  s rychlostí proudění na vstupu do rozdělovací komory  $V_{10}$  a s průtočným průřezem sběrné komory  $S_2$  je

$$V_2 = \frac{S_1}{S_2} \frac{\rho_1}{\rho_2} V_1 \quad (17)$$

Je možno odvodit, že součinitel tlakových ztrát  $\xi_2$  vztažený na výstupní rychlost z trubky  $w_2$  lze psát

$$\xi_2 = \xi_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (18)$$

Rov. (13) tak přejde ve tvar

$$\frac{dV_1}{dx} \left[ -L^2 \frac{d^2V_1}{dx^2} + V_1 (\delta_2^2 - \delta_1^2) \right] = 0. \quad (19)$$

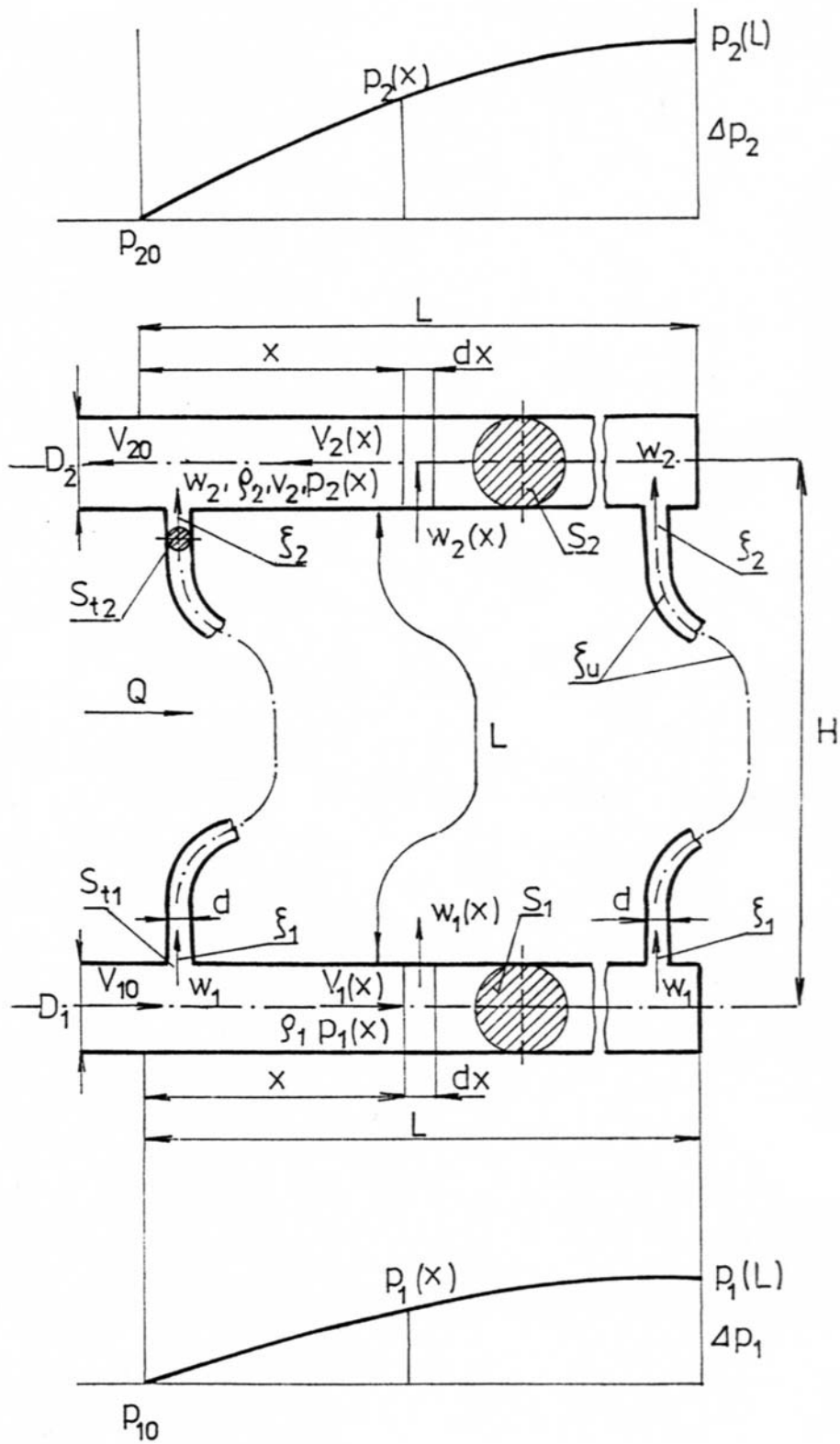
K rovnici přistupují okrajové podmínky pro

$$\begin{aligned} x = 0 & \quad V_1 = V_{10}, \\ x = L & \quad V_1 = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Protože v rov. (19) je  $\frac{dV_1}{dx}$  nenulové, musí být

$$L^2 \frac{d^2V_1}{dx^2} - (\delta_2^2 - \delta_1^2) V_1 = 0 \quad (21)$$

Integrací rov. (6) je možno určit průběh tlaku v rozdělovací komoře



**Obr. 2** Trubkový systém typu U

$$p_1 - p_{10} = E \frac{\rho_1}{2} V_{10}^2 \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_{10}} \right)^2 \right] \quad (22)$$

a podle obr. 2 pro  $x = L$

$$\Delta p_1 = E \frac{\rho_1}{2} V_{10}^2 \quad (23)$$

Podobně po integraci rov. (10) je

$$p_2 - p_{20} = A \frac{\rho_2}{2} V_{20}^2 \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_{20}} \right)^2 \right] \quad (24)$$

a pro  $x = L$

$$\Delta p_2 = A \frac{\rho_2}{2} V_{20}^2 \quad (25)$$

Řešení rov. (21) dává:

$$A. \quad \delta_1 > \delta_2, \quad \delta_A^2 = \delta_1^2 - \delta_2^2$$

pro rychlost proudění v rozdělovací komoře

$$\frac{V_1}{V_{10}} = \frac{\sin \delta_A \left( 1 - \frac{x}{L} \right)}{\sin \delta_A} \quad (26)$$

a pro rychlost proudění na vstupu do trubkového svazku

$$\frac{w_1}{w_{1S}} = \delta_A \frac{\cos \delta_A \left( 1 - \frac{x}{L} \right)}{\sin \delta_A} \quad (27)$$

$$B. \quad \delta_1 = \delta_2 = \delta_B$$

Uvedená rovnost je podmínkou rovnoměrného proudění v trubkovém svazku. Řešením rov. (21) je

$$\frac{V_1}{V_{10}} = 1 - \frac{x}{L} \quad (28)$$

a

$$w_1 = w_{1S} = \text{konst.} \quad (29)$$

$$C. \quad \delta_1 < \delta_2, \quad \delta_C^2 = \delta_2^2 - \delta_1^2$$

$$\frac{V_1}{V_{10}} = \frac{\text{sh} \delta_C \left( 1 - \frac{x}{L} \right)}{\text{sh} \delta_C} \quad (30)$$

$$\frac{w_1}{w_{1S}} = \delta_C \frac{\text{ch} \delta_C \left( 1 - \frac{x}{L} \right)}{\text{sh} \delta_C} \quad (31)$$

když střední rychlost proudění na vstupu do trubkového svazku je

$$w_{1S} = V_{10} \frac{S_1}{S_{t1}} \quad (32)$$

S hodnotami rychlostí podle vztahů (26), (28) a (30) je již možno určit ze vztahu (22) průběh tlaku v rozdělovací komoře a s přihlédnutím ke vztahu (17) z rov. (24) průběh tlaku ve sběrné komoře. S hodnotami rychlostí podle vztahů (27), (29) a (31) z rov. (11) rozdíl tlaku na trubkovém svazku a pro  $x = 0$  rozdíl tlaku mezi vstupem a výstupem trubkového systému.

### 3. Průběhy tlaku v trubkovém systému s uspořádáním proudění typu Z

Obdobným postupem, jako u trubkového systému s prouděním typu U, je možno odvodit diferenciální rovnici proudění v trubkovém systému typu Z obr. 3 ( Jirouš 1972)

$$L^2 \frac{d^2 V_1}{dx^2} + (\delta_1^2 - \delta_2^2) V_1 = -\delta_2^2 V_{10} \quad (33)$$

Řešení rov.(31) dává

$$A. \delta_1 > \delta_2, \quad \delta_A^2 = \delta_1^2 - \delta_2^2$$

pro rychlost proudění v rozdělovací komoře

$$\frac{V_1}{V_{10}} = \frac{\delta_1^2 \sin \delta_A \left(1 - \frac{x}{L}\right) + \delta_2^2 \left(\sin \delta_A \frac{x}{L} - \sin \delta_A\right)}{\delta_A^2 \sin \delta_A} \quad (34)$$

a pro rychlost proudění na vstupu do trubkového svazku

$$\frac{w_1}{w_{1S}} = \frac{\delta_1^2 \cos \delta_A \left(1 - \frac{x}{L}\right) - \delta_2^2 \cos \delta_A \frac{x}{L}}{\delta_A \sin \delta_A} \quad (35)$$

$$B. \delta_1 = \delta_2 = \delta_B$$

Řešení rov.(31) se zjednoduší na tvar

$$\frac{V_1}{V_{10}} = 1 + \left(\frac{\delta_B^2}{2} - 1\right) \frac{x}{L} - \frac{\delta_B^2 x^2}{2L^2} \quad (36)$$

a

$$\frac{w_1}{w_{1S}} = 1 + \frac{\delta_B^2}{2} \left(2 \frac{x}{L} - 1\right) \quad (37)$$

$$C. \delta_1 < \delta_2, \quad \delta_C^2 = \delta_2^2 - \delta_1^2$$

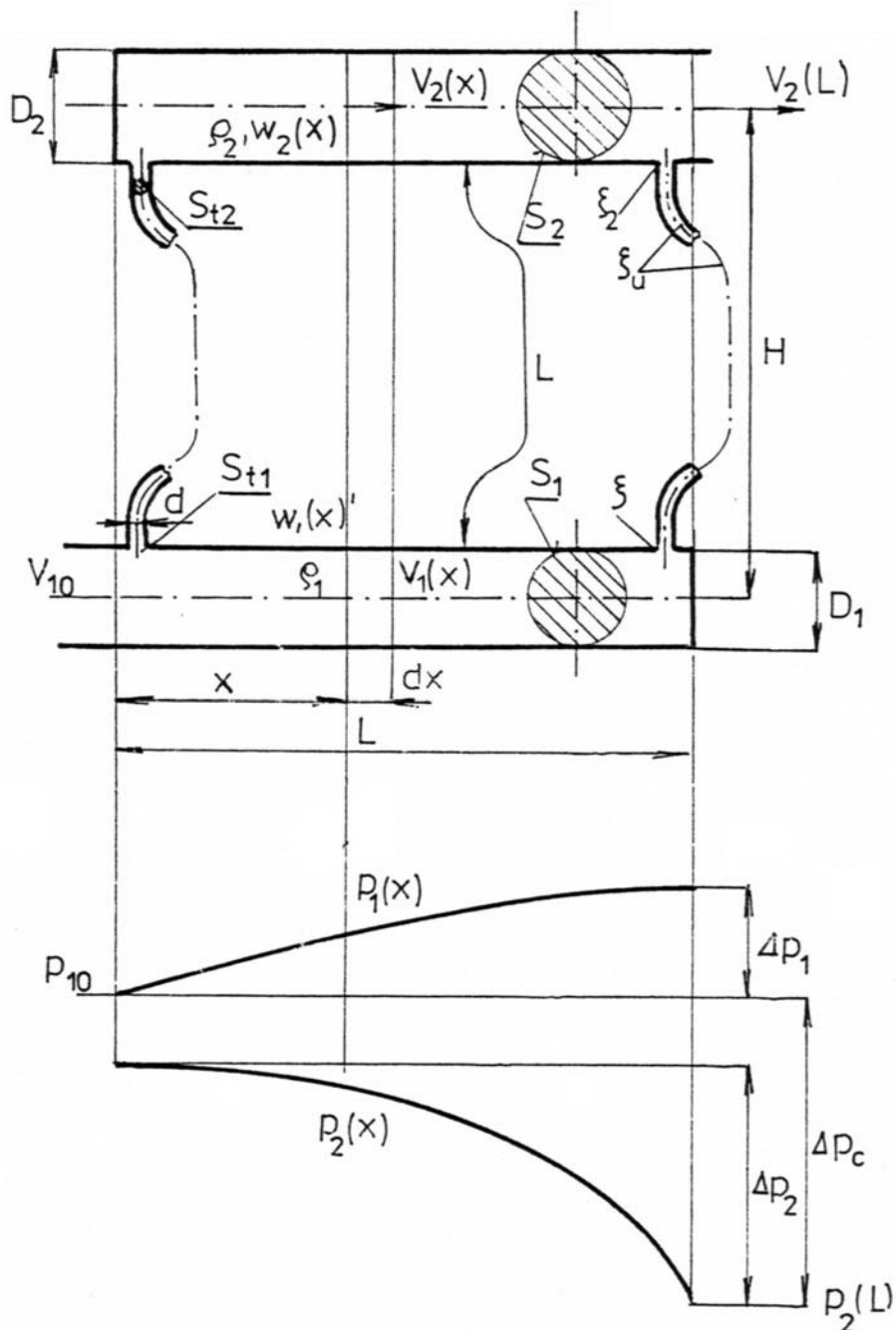
$$\frac{V_1}{V_{10}} = - \frac{\delta_1^2 sh \delta_C \left(1 - \frac{x}{L}\right) + \delta_2^2 \left(sh \delta_C \frac{x}{L} - sh \delta_C\right)}{\delta_C^2 sh \delta_C} \quad (38)$$

$$\frac{w_1}{w_{1S}} = \frac{\delta_2^2 ch \delta_C \frac{x}{L} - \delta_1^2 ch \delta_C \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\delta_C sh \delta_C} \quad (39)$$

Z rovnice kontinuity celého trubkového systému v místě  $x$  je

$$V_2 = \frac{S_1 \rho_1}{S_2 \rho_2} (V_{10} - V_1) \quad (40)$$

integrací rov. (10)



Obr. 3 Trubkový systém typu Z

$$p_{20} - p_2 = A \frac{\rho_2}{2} V_2^2 \quad (41)$$



a pro  $x = L$

$$\Delta p_2 = A \frac{\rho_2}{2} V_{2L}^2 \quad (42)$$

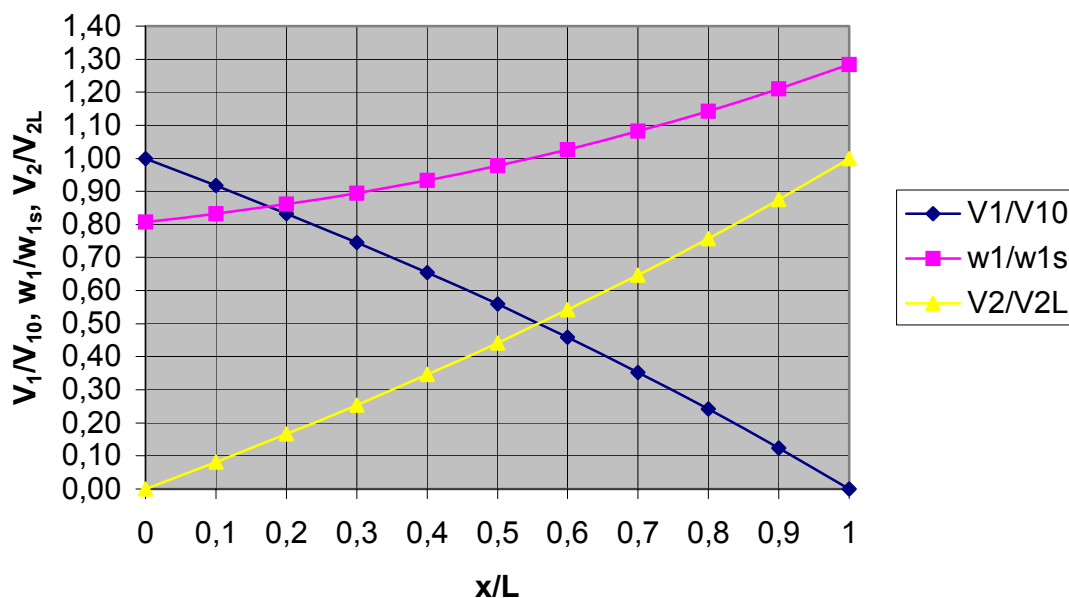
S hodnotami rychlostí podle vztahů (34), (36) a (38) je možno určit ze vztahu (22) průběh tlaku v rozdělovací komoře. a s přihlédnutím ke vztahu (40) z rov. (40) průběh tlaku ve sběrné komoře, s hodnotami rychlosti proudění podle vztahů (35), (37) a (39) z rov. (11) rozdíl tlaku na trubkovém svazku. Rozdíl tlaku mezi vstupem a výstupem trubkového systému nyní podle obr.3 a vztahů (11) a (23) je

$$p_{10} - p_{2L} = p_1(L) - p_2(L) - \Delta p_1 \quad (43)$$

#### 4.Příklad

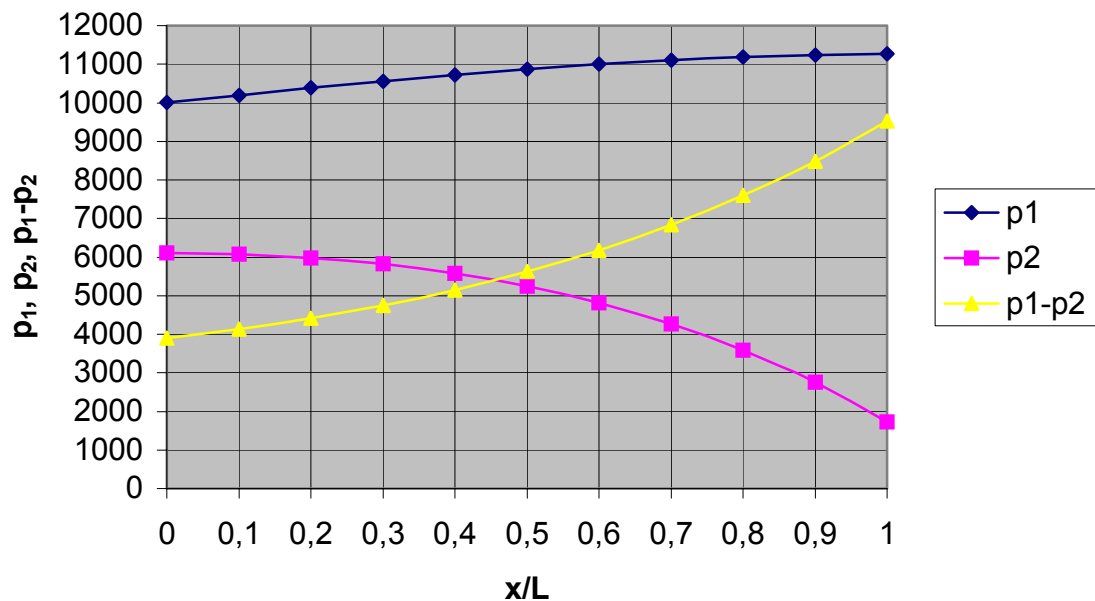
Přihřívák páry s uspořádáním proudění typu Z má horizontální komory o vnitřním průměru 460 mm, tj. jejich průřez  $S_1 = S_2 = 0,6648m^2$ , průtočný průřez trubek svazku je konstantní  $S_{t1} = 1m^2$ , měrná hmotnost páry v rozdělovací komoře  $\rho_1 = 9,0253kg.m^{-3}$ , ve sběrné komoře  $\rho_2 = 7,8370kg.m^{-3}$  a střední měrná hmotnost páry v trubkovém svazku  $\rho = 8,3893kg.m^{-3}$ . Rozdíl geodetických výšek komor  $H = 2.5m$ . Součinitel tlakových ztrát trubek vztažený na vstupní rychlost do trubek je konstantní  $\xi_1 = 7,1$ . Součinitele tlakového spádu v komorách jsou voleny  $A = 2,1$  a  $E = 0,7$ . Rychlost páry na vstupu do rozdělovací komory  $V_{10} = 20m.s^{-1}$ . Podle rov. (1)  $\delta_1 = 0,4723$  a podle vztahu (2) s přihlédnutím k rov. (18)  $\delta_2 = 0,8779$ . Jedná se o řešení rov. (33) typu C, proto  $\delta_C^2 = 0,5476$  a  $\delta_C = 0,74$ . Průběh rychlostí je na obr.4 a průběh tlaků na obr.5.

Průběh rychlostí



Obr. 4

### Průběh tlaků



Obr. 5

#### 4. Závěr

Z příkladu je vidět, jak průběh rychlosti proudění v trubkách závisí na rozdělení tlaku v trubkovém systému. Rozdíl tlaku v komorách cca 5,5 kPa způsobí celkovou nerovnoměrnost rychlosti v trubkách téměř 50%. Je třeba proto věnovat návrhu trubkového systému náležitou pozornost.

#### 5. Poděkování

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

#### 6. Literatura

CKTI, VTI (1973): *NORMATIVNYJ METOD GIDRAVLÍČESKOVO RASČETA PAROVYCH KOTLOV*, Tom 1, Leningrad.

Jirouš, F. (2001): Užité vzor „Spalinový tah“, č. zápisu 11548 ze dne 25.9.2001.

Jirouš, F. (2002) Rovnice proudění v trubkových systémech parních kotlů. *SBORNÍK A CD ROM INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002*, AVČR, Svratka 2002, ISBN 80-214-2109-6.

Jirouš, F. (2002) Proudění v turbulizátoru spalinového tahu parního kotle. *SBORNÍK APLIKÁCIA EXPERIMENTÁLNÝCH A NUMERICKÝCH METÓD V MECHANIKE TEKUTÍN*. TU Žilina, Oravský Biely Potok, Slovensko, str.30-35. ISBN 80-7100-955-5.

Jirouš, F.(1972): Trubkové systémy s uspořádáním proudění typu Z. *STROJÍRENSTVÍ* 22, č. 5. str. 279-283.

Kikinis, A. (1964) : Durchflussverteilung in Rohrregistern. *Mitt. VGB*, H.91, str.257-259.

Urban, B.(1968): Tlakové a proudové poměry v komorách přehříváku páry s osovým přívodem a odvodem. *STROJÍRENSTVÍ* 18, č.9, str. 656-662.