



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

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

**ROVNICE PROUDĚNÍ V TRUBKOVÝCH SYSTÉMECH
PARNÍCH KOTLŮ**

F. Jirouš *

Summary: It is shown that only a system with counter-current in- and outflow (U-type flow) can lead to an even distribution in branched systems. Calculations prove that even then the irregularity of flow distribution can exceed the admissible limits. It can be reduced by optimization of the feeder and header diameters.

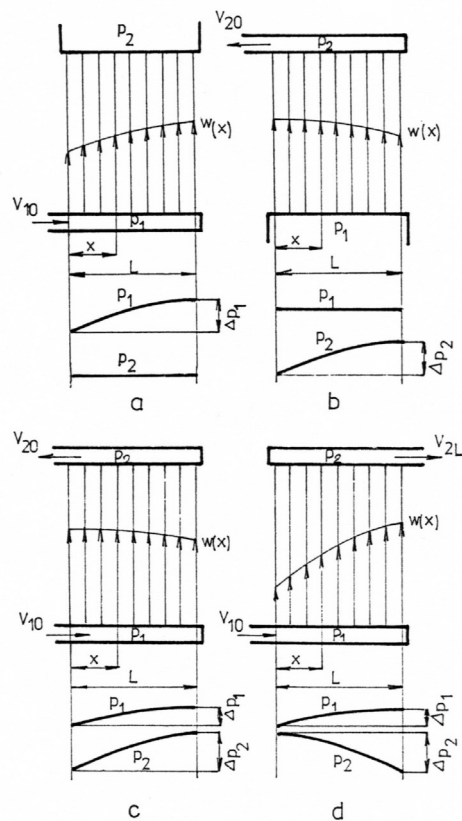
Klíčová slova: trubkový systém, rozdělovací komora, trubkový registr, trubkový svazek, sběrná komora, rychlost proudění, uspořádání proudění, typ U, typ Z, typ H, matematický model, diferenciální rovnice, řešení.

1. Úvod

Matematické modelování proudění v trubkových systémech představuje kvalitativní změnu při navrhování parních kotlů. Trubkovým systémem se zde rozumí systém složený 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 může být typu U nebo typu Z. Uspořádání komor může být horizontální nebo vertikální.

S trubkovými systémy je možno se setkat v chemickém a potravinářském průmyslu a především v energetice u parních kotlů, u parogenerátorů jaderných elektráren, kondenzátorů páry, u otopných systémů, u chladících věží a jinde. 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.

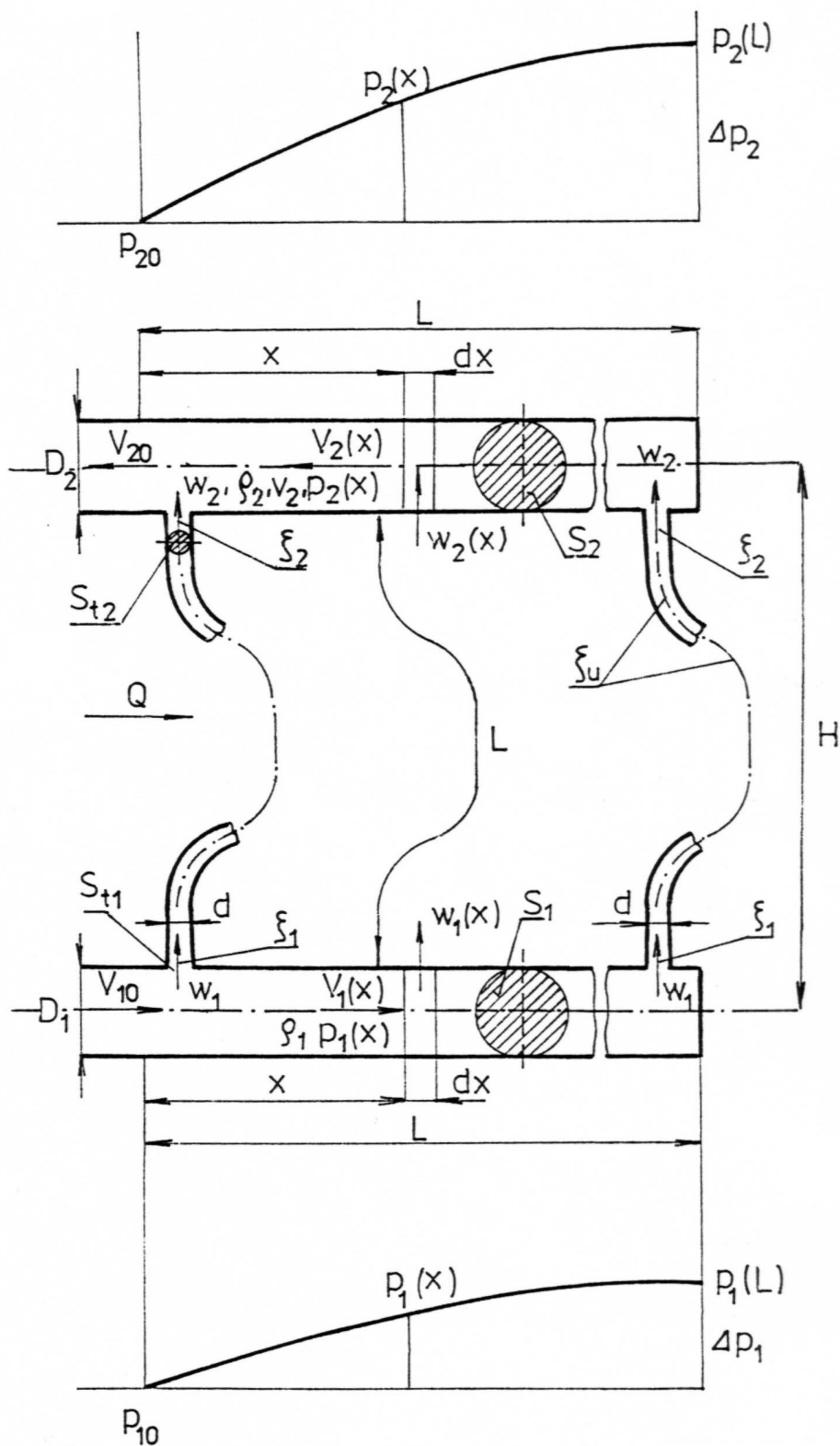
* Prof. Ing. František Jirouš, DrSc., ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a energetiky, odbor tepelných a jaderných energetických zařízení; Technická 4, 166 07 Praha 6; tel.: 00420.2.24352524, fax: 00420.2.24353705; E-Mail: jirous@fsid.cvut.cz



Obr. 1 Uspořádání trubkových systémů
 a – s rozdělovací komorou b – se sběrnou komorou
 c – typu U d – typu Z

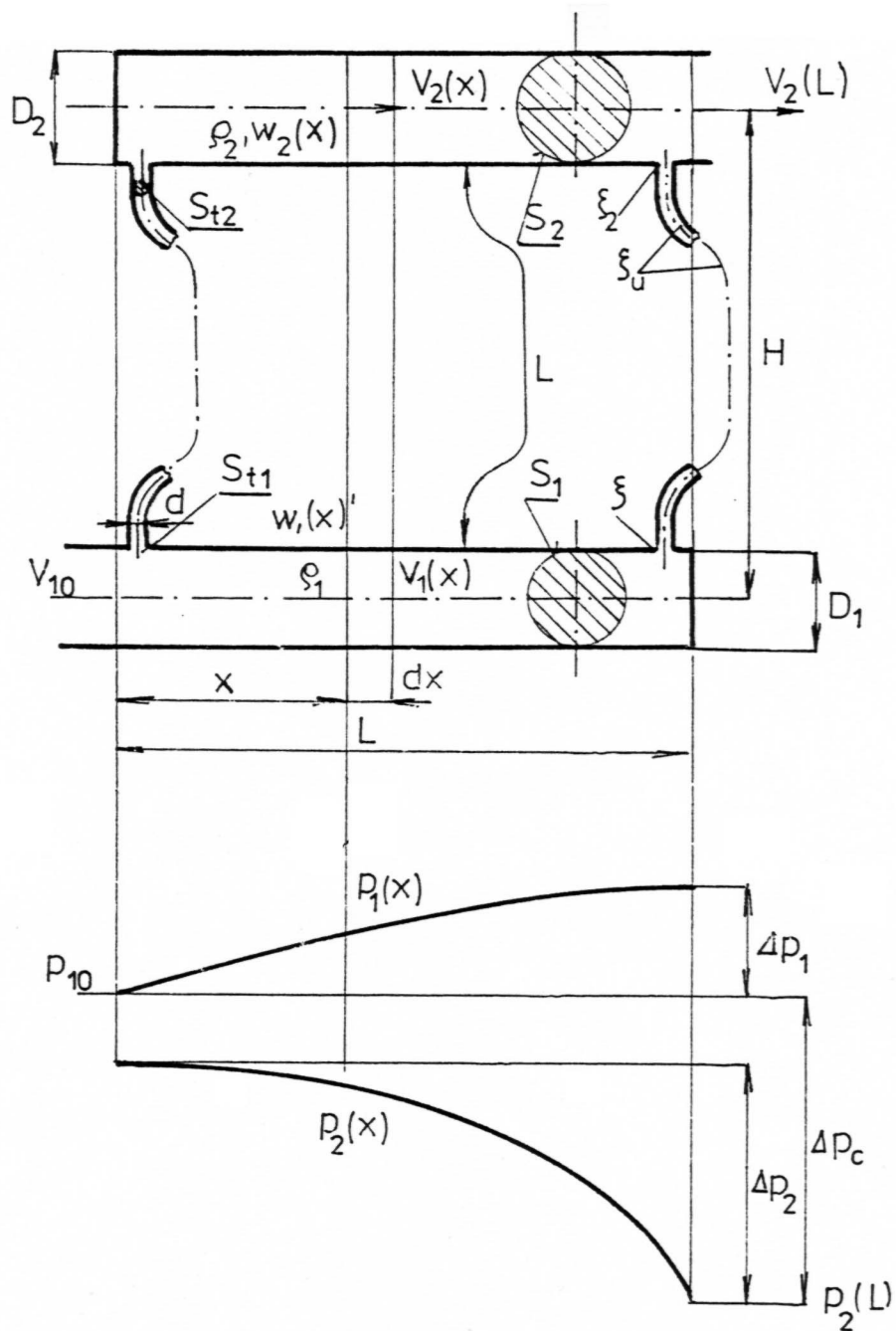
Optimalizací geometrie trubkových systémů se musí zabývat každá kotlářská firma. Na optimální rozměry používaných systémů měla patent firma Babcock & Wilcox [1], rovnoměrností rozdělení průtoku se zabývala firma Sulzer [2], firma L.&C. Steinmüller GmbH [3], výzkumné ústavy v bývalém Sovětském svazu [4], TOKYO UNIVERSITY OF MERCANTILE MARINE [5], u nás bývalá IBS-VÚEZ [6,7]. Souproudé a protiproudé uspořádání výměníku je zohledněno v [8]. Odvození rovnic systémů, řešení rovnic, podmínky rovnoměrnosti a jednoznačnosti proudění při uspořádání proudění typu U, Z a H je možno nalézt v pracích ČVUT [9,10,11,12,13]. Ve všech případech se jednalo o horizontální uspořádání komor. Přibližné řešení rovnice proudění v systému s vertikálním uspořádáním komor bylo hledáno v [14].

Zdálo by se, že problematika proudění v trubkových systémech parních kotlů byla zcela zvládnuta. Objevil se však rovinný trubkový systém, turbulizátor, složený z rozdělovací komory, trubkového registru a ze sběrné komory s uspořádáním proudění typu Z [15], umístěný ve spalínovém tahu, či v ohništi parního kotle tak, že jak v komorách tak v trubkách je proudění vzestupné. Byla sestavena diferenciální rovnice proudění nelineární, nehomogenní, druhého řádu, která nemá analytické řešení. I když rovnice byla numericky řešena, zbývá nalézt podmínky jednoznačnosti a rovnoměrnosti proudění. Určení těchto podmínek, experiment, případně matematická simulace proudění a vizualizace v tomto systému by mohla být zajímavým zadáním pro doktorskou práci. V dalším jsou uvedeny rovnice proudění v trubkových systémech.



Obr. 2 Trubkový systém typu U

2. Trubkové systémy s uspořádáním proudění typu U a Z



Obr. 3 Trubkový systém typu Z

Diferenciální rovnice proudění v trubkovém systému jsou sestaveny na základě pohybových rovnic v rozdělovací komoře a ve sběrné komoře, rovnice kontinuity v rozdělovací komoře a celého systému v místě x , za předpokladu, že průtočný průřez trubkového registru, či svazku lze nahradit spárou po délce komor L a zahrnutím tlakové ztráty v komorách do součinitelů tlakového spádu A – ve sběrné komoře a E – v rozdělovací komoře. Hodnoty součinitelů tlakového spádu byly určeny experimentálně [2,4,6,9].

Trubkové systémy s uspořádáním proudění typu U a Z s horizontálním uspořádáním komor jsou na obr.1.

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 tlakových ztrát v trubkách vztaženým na vstupní rychlost proudění do trubek ξ_1 a 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

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

Pro trubkový systém typu U podle obr. 2 byla sestavena diferenciální rovnice

$$L^2 \frac{d^2 V_1}{dx^2} - (\delta_2^2 - \delta_1^2) V_1 = 0 \quad (3)$$

Pro trubkový systém typu Z podle obr. 3 byla sestavena diferenciální rovnice

$$L^2 \frac{d^2 V_1}{dx^2} - (\delta_2^2 - \delta_1^2) V_1 = -\delta_2^2 V_{10} \quad (4)$$

K oběma rovnicím (3) a (4) přísluší okrajové podmínky

$$\begin{aligned} V_1(x) &= V_{10} & \text{pro } x = 0 & \text{ a} \\ V_1(x) &= 0 & \text{pro } x = L. \end{aligned} \quad (5)$$

Analytické řešení v závislosti na hodnotách parametrů komor je uvedeno v [9, 10].

Rychlost proudění na vstupu do trubek z rovnice kontinuity elementu rozdělovací komory je

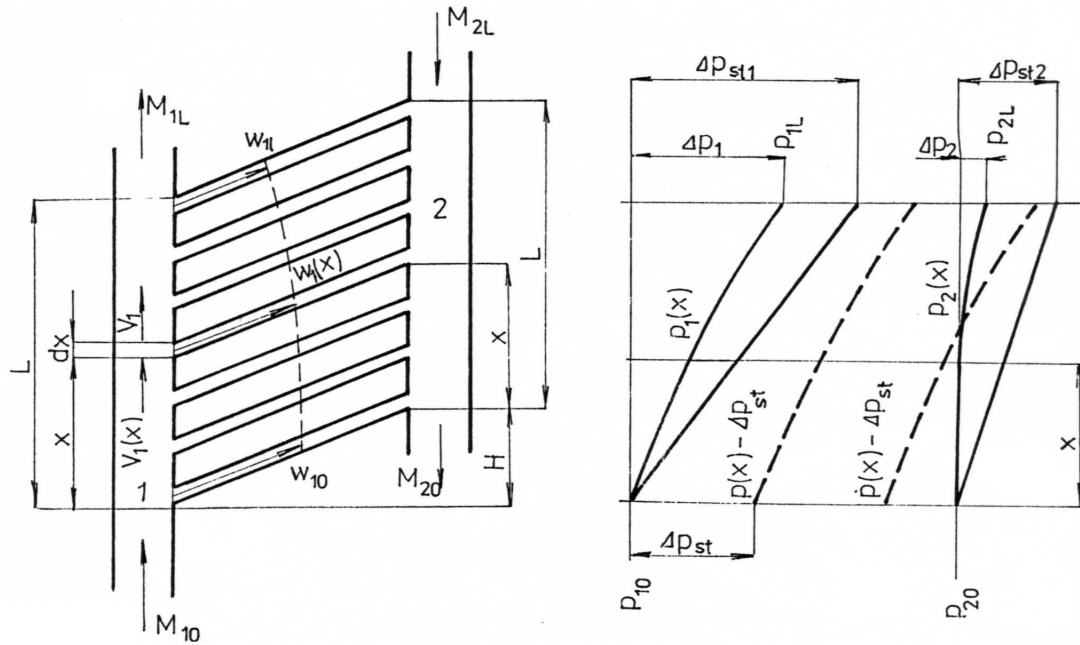
$$w_1 = -L \frac{S_1}{S_{t1}} \frac{dV_1}{dx} \quad (6)$$

Z podmínky, že v rov. (3) je $\delta_1 = \delta_2$ lze nalézt takové průměry komor, s kterými je $w_1 = \text{konst.}$ Rovnoměrné rozdělení rychlosti do trubek lze realizovat pouze u systému s prouděním typu U.

3. Trubkové systémy s vertikálním uspořádáním komor

U spalinových kotlů používala ČKD DUKLA Praha výparník s vertikálně uspořádanými komorami, s prouděním typu Z podle obr. 4. Pro systém byla sestavena nelineární nehomogenní diferenciální rovnice druhého řádu

$$\frac{dV_1}{dx} \left[-L^2 \frac{d^2 V_1}{dx^2} + V_1 (\delta_2^2 - \delta_1^2) - \delta_2^2 V_{10} \right] = \left(\frac{S_t}{S_1} \right)^2 \frac{g}{\xi_1} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \quad (7)$$



Obr. 4 Trubkový systém s vertikálním uspořádáním komor

K rovnici přistupují okrajové podmínky pro

$$\begin{aligned} x = 0 & \quad V_1 = V_{10} , \\ x = L & \quad V_1 = 0 . \end{aligned} \quad (8)$$

V [14] bylo nalezeno analytické řešení, ale za zjednodušujících předpokladů. Bez zjednodušujících předpokladů lze rov. (7) řešit pouze numericky.

4. Turbulizátor spalinového tahu

Turbulizátor spalinového tahu je tvořen rovinným trubkovým systémem složeným podle schématu na obr. 5 z rozdělovací komory AB, paralelně připojených trubek o délce $AC = BD$ a ze sběrné komory CD. Trubkový systém má uspořádání proudění typu Z. Vstup media je v bodě A rozdělovací komory a výstup v bodě D sběrné komory. Ve spalinovém tahu je turbulizátor umístěn tak, že jak v komorách, tak v trubkách je vzestupné proudění. Trubky a komory jsou podle obr. 5 rovnoběžné se stěnami spalinového tahu. Turbulizátory v konvekčních tazích mohou tvořit teplosměnné plochy, v ohništi mají sloužit k lepšímu promíchání spalin se spalovacím vzduchem a tak přispět k lepšímu vyhoření oxidu uhelnatého [15].

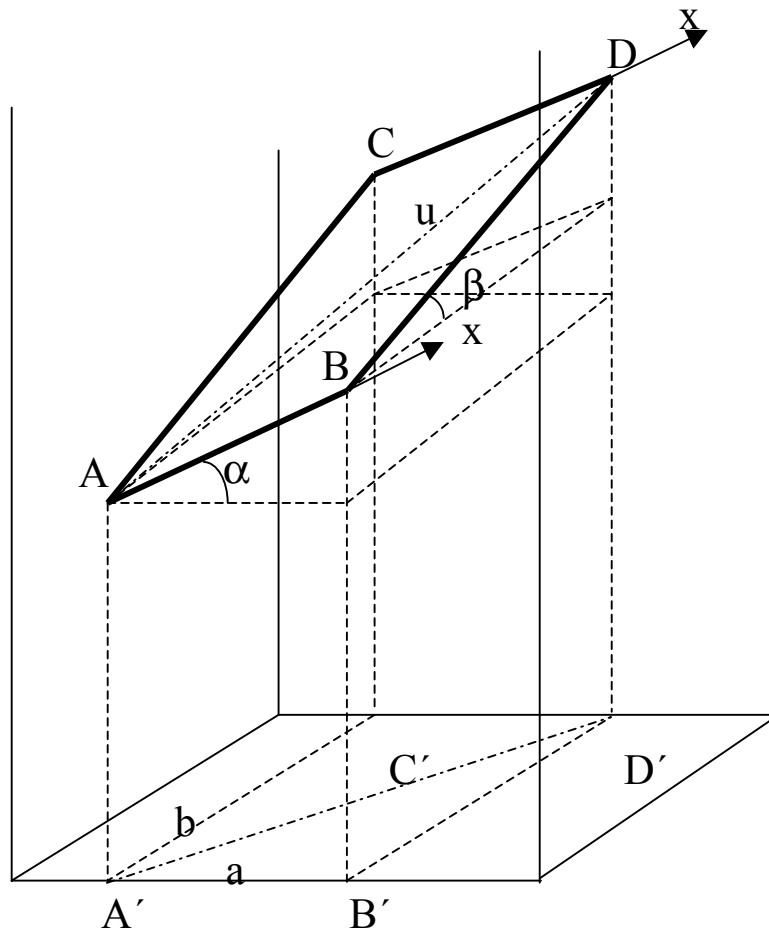
Pro systém byla sestavena diferenciální rovnice

$$\frac{dV_1}{dx} \left[-L^2 \frac{d^2V_1}{dx^2} + V_1(\delta_2^2 - \delta_1^2) - \delta_2^2 V_{10} \right] = \left(\frac{S_t}{S_1} \right)^2 \frac{g}{\xi_1} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \sin \alpha . \quad (9)$$

K rovnici přistupují okrajové podmínky pro

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

Je vidět, že pro $\sin \alpha = 1$ přechází rov. (9) v rov. (7). Rovnici (9) lze řešit pouze numericky.



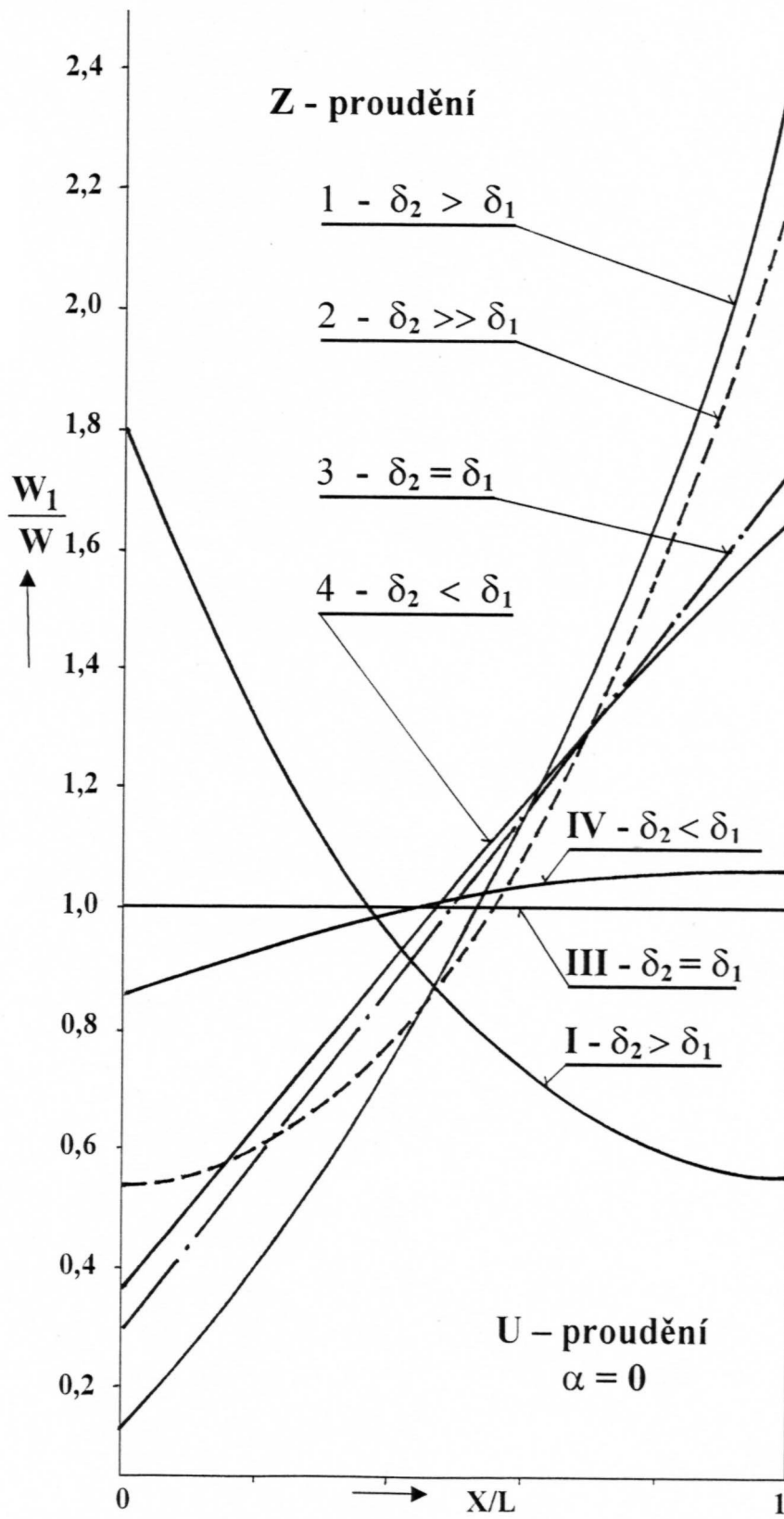
Obr. 5 Uspořádání turbulizátoru v ohništi

Další možností při řešení turbulizátoru je použití uspořádání proudění v systému typu U. V tomto případě však úhel α musí být roven nule, aby v žádné komoře nenastalo proudění sestupné. Diferenciální rov. (9) se zjednoduší na rov. (3).

Příklad

Je dán trubkový systém podle obr. 5, umístěný v ohništi parního kotle s půdorysem $a = 2\text{m}$ a $b = 6\text{m}$. Úhly $\alpha = \beta = 30^\circ$. Délka komor $AB = 2,31\text{m}$ a délka trubek $AC = 6,98\text{m}$. Délka úhlopříčky je $7,83\text{m}$. Trubky mají vnitřní průměr $d = 0,052\text{m}$, jejich počet $n = 22$.

Hmotnostní průtok systémem $M = 40 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Průběh poměrné rychlosti proudění na vstupu do trubek z rozdělovací komory pro čtyři případy systému s uspořádáním



Obr. 6 Průběh rychlosti proudění na vstupu do trubek

proudění typu Z a tři případy systému s uspořádáním proudění typu U jsou na obr. 6. Střední rychlost v trubkách je $w = 0,923 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1. Komory mají vnitřní průměr $D_1 = D_2 = 0,135 \text{ m}$. $\delta_1 = 1,221$ a $\delta_2 = 2,094$. Je tedy $\delta_2 > \delta_1$.
2. Rozdíl parametrů komor v rov. (25) je zvětšen změnou průměru rozdělovací komory, nyní $D_1 = 0,191 \text{ m}$, takže $\delta_1 = 0,6101$.
3. Rozdíl parametrů komor v rov. (25) je nulový, tj. $\delta_1 = \delta_2 = 1,221$.
4. Průměr rozdělovací komory $D_1 = 0,135 \text{ m}$ a průměr sběrné komory je $D_2 = 0,191 \text{ m}$, $\delta_1 = 1,221$ a $\delta_2 = 1,046$. Je tedy $\delta_1 > \delta_2$.

Pro charakter křivek rychlosti proudění platí, že pro $\delta_2 > \delta_1$ jsou křivky konvexní, pro $\delta_2 = \delta_1$ je průběh téměř přímkový nebo přímkový a pro $\delta_1 > \delta_2$ jsou křivky konkávní.

5. Závěr

Jak byl nalezen průběh rychlosti proudění na vstupu do trubek bylo by možno nalézt průběh rychlosti proudění a průběh tlaku v celém trubkovém systému. Po stručném úvodu do problematiky proudění v trubkových systémech parních kotlů lze dodat, že zbývá nalézt podmínky jednoznačného proudění u systémů s vertikálním uspořádáním komor, kdy je třeba sestavené diferenciální rovnice řešit numericky. Jak bylo řečeno již v úvodu, byla by to zajímavá úloha pro doktorskou disertaci.

Literatura

- [1] Rohrsystem für Wärmetauscher, insbesondere für Dampferzeuger. Patentschrift Nr. 853293 Deutsche Babcock & Wilcox Dampfkessel-Werke A.G.
- [2] Kikinis, A.: Durchflussverteilung in Rohrregistern. Mitt. VGB, 1964, H.91, str.257-263.
- [3] Jirouš, F.: Untersuchung über die Durchflussverteilung von Rohrregistern mit axial an- und abgeströmten Verteilern und Sammlern. Mitt. VGB 50, 1970, H. 4, str. 315-320.
- [4] CKTI, VTI: Normativnyj metod gidravličeskovo rasčeta parovyh kotlov, Tom 1, Leningrad, 1973.
- [5] Kubo, T., Hori, K., Sugawara, T., Konno, K.: On Flow Distributions in Header Systems. Bulletin of the M.E.S.J., Vol. 9, No.1, March 1981, str.15-34.
- [6] Urban, B.: Proudění páry v přehříváku parního kotle. Strojírenství 14, 1964, č. 6.
- [7] Urban, B.: Tlakové a proudové poměry v komorách přehříváku páry s osovým přívodem a odvodem. Strojírenství 18, 1968, č.9.
- [8] Hellwig, U.: Gleichmäßige Verteilung strömender Flüssigkeiten auf parallel geschaltete, beheizte Rohre. BWK 40, 1988, Nr. 7/8, str. 277-282.
- [9] Jirouš, F.: Trubkové systémy s uspořádáním proudění typu Z. Strojírenství 22, 1972, č. 5. str. 279-283.
- [10] Jirouš, F.: Durchflussverteilung und die Ungleichförmigkeit der Temperatur in Rohrsystemen. VGB KRAFTWERKSTECHNIK 53, 1973, H. 1, str. 40-44.

- [11] Jirouš, F.: Podmínky rovnoměrnosti a jednoznačnosti proudění v trubkových systémech. ACTA POLYTECHNIKA - Práce ČVUT v Praze, II, 1975, vědecká konference, str. 43- 52.
- [12] Jirouš, F.: Proudění v trubkových systémech s radiálním vstupem media do rozdělovací komory nebo radiálním výstupem ze sběrné komory. Strojírnoství 29, 1979, č. 5. str. 270-274.
- [13] Jirouš, F.: Durchflussverteilung und die Ungleichförmigkeit der Temperatur in Rohrsystemen mit H-Strömung. Energietechnik 22, 1972, H. 8, str. 348-352.
- [14] Jirouš, F.: Proudění v trubkových systémech s vertikálním uspořádáním komor. Strojírnoství 28, 1978, č. 12, str. 713-718.
- [15] Jirouš, F.: Užitečný vzor „ Spalinový tah“, č. zápisu 11548 ze dne 25.9.2001.