

THERMAL CYCLE WITH EXTRACTION OF STEAM FOR PREDRYING OF FUEL

F. Jirouš*

Summary: *The paper deals with Rankine-Clausius cycle with bled steam from turbine for predrying of fuel. In spite of the efficiency of Rankine –Clausius cycle and the fuel flow to steam boiler being lower, the utilisation of fuel increases.*

1. Úvod

Při spalování tuhých paliv velmi závisí doba hoření, spalné teplo a výhřevnost na obsahu vody v palivu [1]. Vysušené palivo má výhodnější vlastnosti pro dopravu do hořáků, má vyšší výhřevnost, takže stoupne teplota nechlazeného plamene v ohništi. Tuhá paliva s vyšším obsahem vody se proto před spalováním suší. Jednou možností spalování předsušeného paliva odběrovou párou z turbíny energetického bloku se zabývá předložený příspěvek. Předřazená suška parnímu kotli v tomto případě ovlivní celý tepelný oběh. Rankinův- Clausiův cyklus byl dostatečně popsán v [2]. Porovnání Rankinova-Clausiova cyklu bez odběru páry a s odběrem páry na předsušení paliva s příkladem je provedeno v [3].

U elektrárenských uhelných bloků se palivo před vstupem do mlýna suší teplem spalin odebíraných z horní části ohniště parního kotle. Sušení uhlí v elektrárnách byla věnována pozornost již v roce 1958 [4]. V Německu je průměrný obsah vody v hnědém uhlí 55% [5]. V Německu probíhá proto od devadesátých let i v současnosti intenzivní výzkum technologie sušení hnědého uhlí. Jednou z metod je sušení paliva v atmosferické fluidní vrstvě teplem recirkulovaných brýd a s využitím kondenzačního tepla odpařené páry z paliva na principu tepelného čerpadla (WTA-Wirbelschicht-Trocknung-Abwärmenutzung), která se jeví hospodárnější, než sušení paliva spalinami [5], [6]. Výsledkem optimalizace této technologie je systém BoA-Plus Technik (Braunkohlekraftwerke mit optimierter Anlagetechnik plus vorgeschalteter Braunkohletrocknung) [7]. První elektrárna s touto technologií v Niederaußem má vykazovat čistou účinnost 43,2% a budoucí zařízení mají zvýšit čistou účinnost bloku o 5% , snížit spotřebu paliva o 10% a tím i snížit ekologickou zátěž.

Paralelně s technologií WTA probíhá výzkum sušení paliva před jeho spalováním metodou MTE (MTE-Mechanisch-Thermische Entwässerung) [7,8]. Palivo se suší při teplotě 180 °C a tlaku 4-6 MPa. Výsledkem je vysušené palivo o teplotě 100 °C. Tento proces má být ještě jednodušší než technologie WTA.

* 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

Na technické universitě v Cottbusu probíhá výzkum technologie sušení paliva v přetlakové fluidní vrstvě [9].

Na ČVUT v Praze, Fakultě strojní, jsou dělány studie sušení biomasy odběrovou párou z turbíny energetického bloku [10]. Rešerše metod sušení paliva před jeho spalováním byla uvedena v [11] a [12]. O výrobě elektřiny na bázi spalování vlhké biomasy je pojednáno v [13].

2. Složení hořlaviny, složení paliva, spalné teplo, výhřevnost a redukováná výhřevnost

Ke sledování vlivu obsahu vody v palivu na spalné teplo a výhřevnost je třeba uvést základní vztahy pro přepočet složení hořlaviny na spalovaný stav paliva, který závisí na obsahu vody a popela.

Pro určení složení paliva je většinou zadáno složení hořlaviny

$$C^{daf} + H^{daf} + S^{daf} + O^{daf} + N^{daf} = 1 \text{ [kg.kg}^{-1}\text{]} \quad (1)$$

obsah popela v bezvodém vzorku A^d , obsah vody v původním vzorku W^r a spalné teplo hořlaviny Q_s^{daf} [kJ.kg⁻¹].

Složení paliva přiváděného do sušky uvádí složení původního vzorku

$$C^r + H^r + S^r + O^r + N^r + A^r + W^r = 1 \text{ [kg.kg}^{-1}\text{]} \quad (2)$$

Přepočet složení prvků hořlaviny na složení původního paliva je následující

$$X^r = X^{daf} (1 - A^r - W^r) \quad (3)$$

když obsah popela je

$$A^r = A^d (1 - W^r) \quad (4)$$

Člen v závorkách $1 - A - W$ představuje obsah hořlaviny v palivu a je možno jej vyjádřit jako funkci obsahu vody

$$1 - A - W = (1 - A^d)(1 - W) \quad (5)$$

Spalné teplo paliva se určuje ze vztahu

$$Q_s^r = Q_s^{daf} (1 - A^r - W^r) \quad (6)$$

S vyjádřením spalného tepla bezvodého vzorku

$$Q_s^d = Q_s^{daf} (1 - A^d) \quad (7)$$

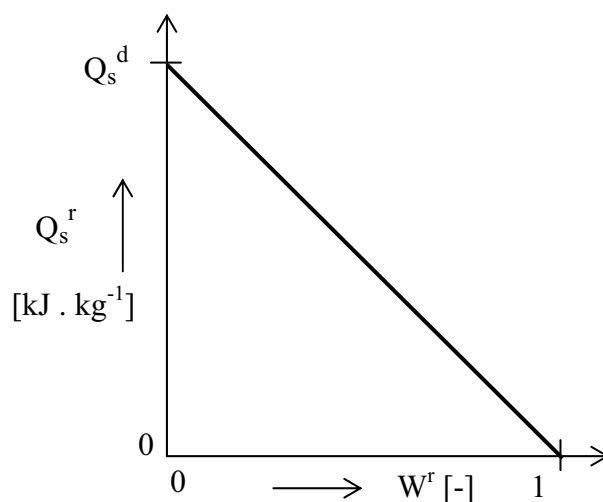
je spalné teplo lineární funkcí obsahu vody

$$Q_s^r = Q_s^d (1 - W) \quad (8)$$

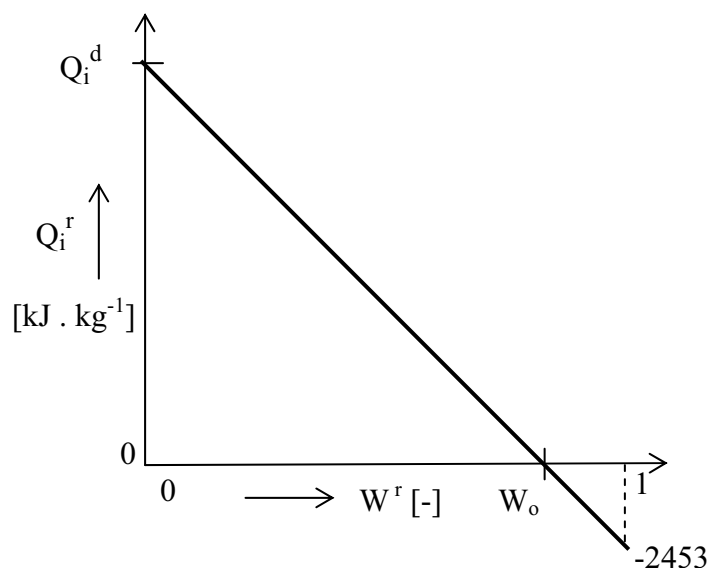
Spalné teplo paliva podle obr. 1 klesá s obsahem vody lineárně ze spalného tepla bezvodého vzorku při nulovém obsahu vody na nulu při hypotetickém obsahu vody $W=1$.

Pro výhřevnost paliva platí přepočet ze spalného tepla

$$Q_i^r = Q_s^r - 2453(8,94H^r + W^r) \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]} \quad (9)$$



Obr.1 Závislost spalného tepla na obsahu vody v palivu



Obr.2 Závislost výhřevnosti na obsahu vody v palivu

S výhřevností bezvodého vzorku

$$Q_i^d = (Q_s^{daf} - 2453.8,94H^{daf})(1 - A^d) \quad (10)$$

je vidět, že i výhřevnost paliva je lineární funkcí obsahu vody

$$Q_i^r = Q_i^d(1 - W) - 2453W \quad (11)$$

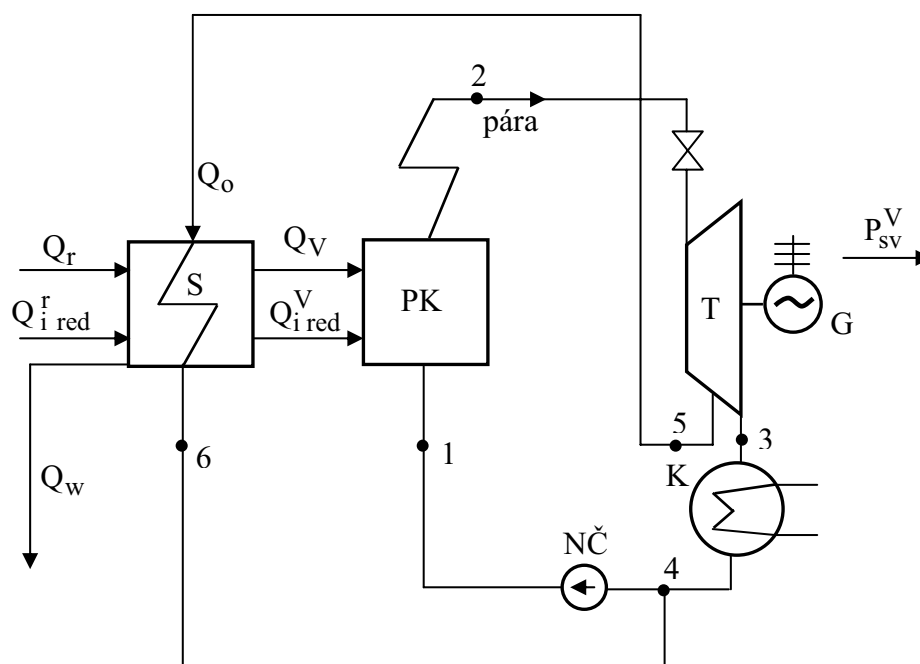
Z tohoto vztahu vyplývá, že při obsahu vody podle obr. 2

$$W_0 = \frac{Q_i^d}{Q_i^d + 2453} \quad (12)$$

by byla výhřevnost nulová. Rovněž výhřevnost paliva klesá s obsahem vody lineárně z výhřevnosti bezvodého vzorku při nulovém obsahu vody na nulu, při mezním obsahu vody W_0 .

S uvažováním citelného tepla paliva je redukovaná výhřevnost paliva

$$Q_{ired}^r = Q_i^r + [(1 - W^r)c_p + W^r c_w]t^r \quad (13)$$



Obr. 3 Schéma elektrárny s odběrem páry z turbíny pro sušku

3. Hmotnostní a tepelná bilance sušky

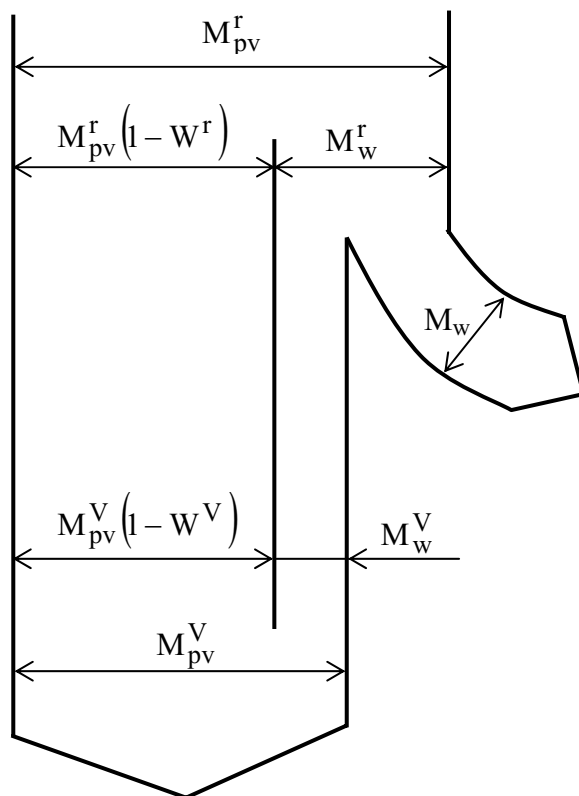
Uspořádání tepelného oběhu se zařazenou suškou je na obr. 3. Do sušky se přivádí palivo M_{pv}^r [$kg \cdot s^{-1}$] v původním stavu o obsahu vody W^r a v sušce se vysuší na obsah vody W^v odběrovou párou z turbíny. Palivo se suší při atmosférickém tlaku. Hmotnostní bilanci sušky znázorňuje obr. 4. S označením obsahů vody

$$W^r = \frac{M_w^r}{M_{pv}^r} \quad (14)$$

$$W^v = \frac{M_w^v}{M_{pv}^v} \quad (15)$$

plyne z bilance hmotnostní tok paliva vycházejícího ze sušky

$$M_{pv}^v = M_{pv}^r \frac{1 - W^r}{1 - W^v} \quad (16)$$



Obr. 4 Hmotnostní bilance sušky

a hmotnostní tok odloučené vody

$$M_w = M_{pv}^r \frac{W^r - W^V}{1 - W^V} \quad (17)$$

Původním palivem o teplotě t^r je do sušky přiváděno množství citelného tepla

$$Q_r = M_{pv}^r [(1 - W^r) c_p + W^r c_w] t^r \quad [kW] \quad (18)$$

a ze sušky vysušeným palivem o teplotě t^V odváděno citelné teplo

$$Q_V = M_{pv}^V [(1 - W^V) c_p + W^V c_w] t^V \quad (19)$$

Vysušená voda z paliva bude ze sušky odváděna ve formě páry na mezi sytosti s entalpií i_s , proto teplo odváděné touto párou je

$$Q_w = M_w i_s \quad (20)$$

Z tepelné bilance sušky podle obr. 3 vyplývá, že na vysušení paliva bude potřeba přivést odběrovou párou množství tepla

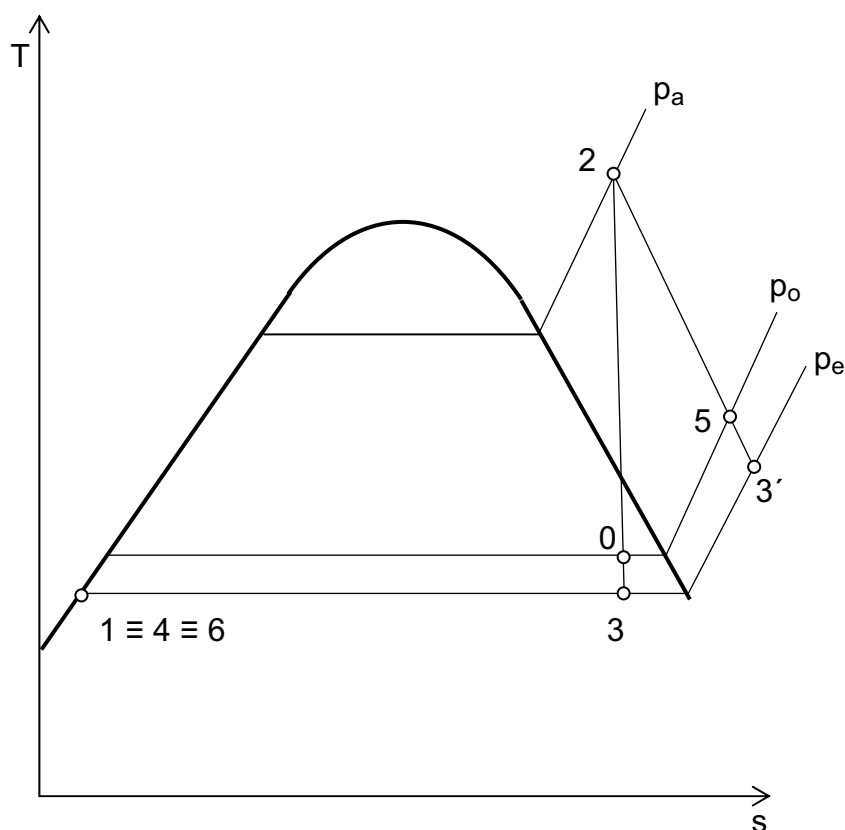
$$Q_o = Q_V + Q_w - Q_r \quad (21)$$

a tedy podle obr. 5 a obr. 6 je množství odběrové páry

$$M_o = \frac{Q_o}{i_s - i_1} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (22)$$

4. Tepelný oběh s odběrem páry pro sušení paliva

Uspořádání zjednodušeného Rankin-Clausiova tepelného oběhu bez odběru páry a s odběrem páry pro sušení paliva je znázorněno v T-s diagramu na obr. 5 a expanze páry v turbíně též v i-s diagramu na obr. 6. Rankin-Clausioův tepelný oběh s odběrem páry z turbíny pro sušku paliva, která je předřazena parnímu kotli, bude porovnán s tepelným oběhem bez odběru páry. Jsou proto uvedeny základní veličiny Rankin-Clausiova tepelného oběhu s odběrem páry pro sušení paliva před jeho spalováním v parním kotli.



Obr. 5 Tepelný oběh v diagramu T-s

Výrobní výkon parního kotle s účinností kotle η_k^V a se spalováním vysušeného paliva je

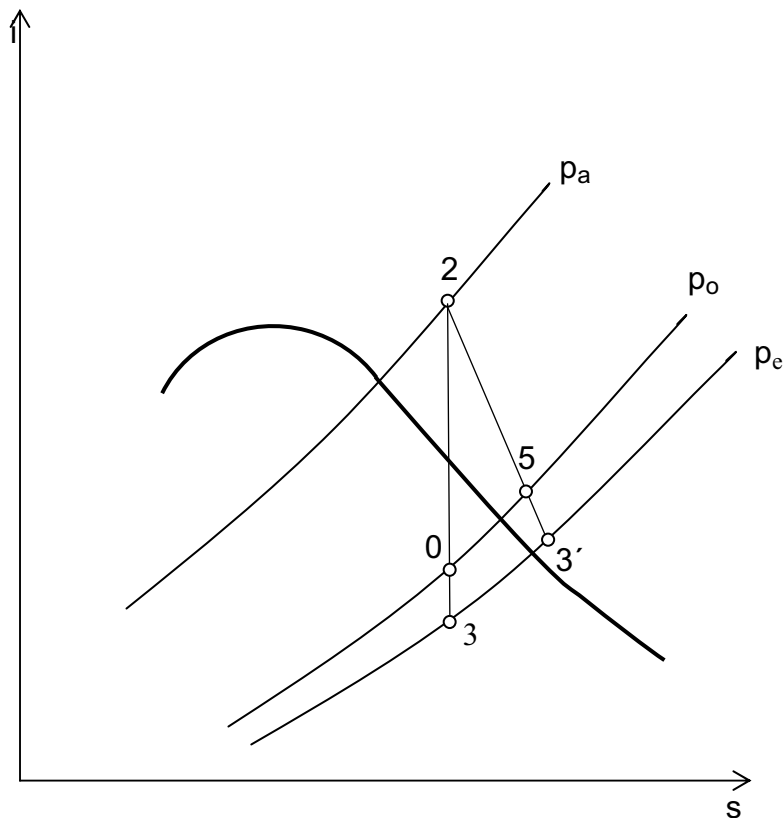
$$Q_{výr}^V = M_{pv}^V Q_{ired}^V \eta_k^V \quad (23)$$

a parní výkon podle obr. 5 s entalpiemi odpovídajícími bodům 1 a 2

$$M_{pa}^V = \frac{Q_{výr}^V}{i_2 - i_1} \quad (24)$$

S označením podílu odebírané páry

$$\alpha = \frac{M_o}{M_{pa}^V} \quad (25)$$



Obr. 6 Expanze páry v diagramu i-s

je vnitřní výkon turbíny

$$P_{ti}^V = M_{pa}^V (i_2 - i_3 - \alpha(i_o - i_3)) \quad [kW] \quad (26)$$

a svorkový výkon

$$P_{SV}^V = P_{ti}^V \eta_{td} \eta_m \eta_G \quad (27)$$

S vyjádřením termické účinnosti tepelného oběhu

$$\eta_t^V = \frac{i_2 - i_3 - \alpha(i_o - i_3)}{i_2 - i_1} \quad (28)$$

a zavedením účinku sušky

$$\eta_s = \frac{1 - W^r}{1 - W^V} \frac{Q_{ired}^V}{Q_{ired}^r} \quad (29)$$

s přihlédnutím k ostatním udaným vztahům je nyní svorkový výkon

$$P_{SV}^V = M_{pv}^r Q_{ired}^r \eta_s \eta_k^V \eta_t^V \eta_{td}^V \eta_m^V \eta_G^V \quad (30)$$

Celkovou účinnost svorkovou

$$\eta_{SV}^V = \frac{P_{SV}^V}{M_{pv}^r Q_{ired}^r} \quad (31)$$

lze též vyjádřit jako součin dílčích účinností

$$\eta_{SV}^V = \eta_S \eta_k^V \eta_t^V \eta_{id}^V \eta_m^V \eta_G^V \quad (32)$$

Oproti celkové účinnosti energetického bloku bez odběru páry k předsoušení paliva je v součinu navíc účinek sušky.

Za předpokladu stejných účinností kotle, účinností termodynamické, mechanické a generátoru v případě spalování vysušeného a nevysušeného paliva je poměr celkových účinností

$$\frac{\eta_{SV}^V}{\eta_{SV}^r} = \frac{\eta_S \eta_t^V}{\eta_t^r} \quad (33)$$

Z rovnosti výkonů na svorkách generátoru a s označením hmotnostního toku paliva přiváděného do sušky $M_{pv}^S [kg.s^{-1}]$ je za stejných předpokladů poměrná úspora paliva

$$\frac{M_{pv}^r - M_{pv}^S}{M_{pv}^r} = 1 - \frac{\eta_t^r}{\eta_t^V \eta_S} \quad (34)$$

5. Závěr

Vlivem zmenšení obsahu vody v palivu výrazně vzroste výhřevnost paliva, takže přesto, že sušením se zmenší hmotnostní tok paliva a mírně zhorší termická účinnost tepelného oběhu, je díky účinku sušky $\eta_S > 1$ výsledkem zlepšení celkové účinnosti přeměny chemické energie paliva v energii elektrickou [3]. Efekt je tím větší, čím větší je rozdíl obsahu vody původního paliva a vysušeného paliva. Efekt sušky je kvantitativně vyjádřen účinkem sušky rov. (29), což je nově zavedený vztah a termín.

Tepelná bilance sušky vyjadřuje stacionární proces. Nevystihuje dynamiku procesu sušení a potřebnou dobu na vysušení paliva z původního obsahu vody na obsah vody žádaný. Doba sušení závisí na mnoha faktorech, na počátečním obsahu vody, konečném obsahu vody, na hustotě paliva, či pórovitosti, na velikosti částic, na velikosti jejich povrchu a na příkonu tepla do částice. Proces sušení je však tak složitý, že jeho sledování je zatím možné jen experimentálními metodami [14].

Seznam označení

A [-]	obsah popela
C [-]	obsah uhlíku
H [-]	obsah vodíku
M [$kg.s^{-1}$]	hmotnostní průtok
N [-]	obsah dusíku
P [kW]	výkon
Q [kW]	tepelný tok
$Q_i [kJ.kg^{-1}]$	výhřevnost paliva
$Q_s [kJ.kg^{-1}]$	spalné teplo

$Q_{výr}$ [kW] –	výrobní výkon parního kotle
Q_{ired} [kW] –	redukovaná výhřevnost
[S] –	obsah síry
[W] –	obsah vody
c [$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$] –	střední měrná tepelná kapacita
i [$kJ.kg^{-1}$] –	entalpie
t [$^{\circ}C$] –	teplota
η_G [-] –	účinnost generátoru
η_k [-] –	účinnost kotle
η_m [-] –	mechanická účinnost turbosoustrojí
η_{SV} [-] –	účinnost svorková
η_s [-] –	účinek sušky
η_t [-] –	termická účinnost tepelného oběhu
η_{td} [-] –	termodynamická účinnost turbíny

Horní indexy

d – bezvodý vzorek
d_{af} – hořlavina
r – původní vzorek
V – vysušený vzorek

Dolní indexy

p_a - pára
p_v – palivo
w - voda

6. Poděkování

Tato práce vznikla za laskavé podpory manželky.

7. Literatura

- [1] Jirouš, F.: Vliv obsahu vody v palivu na parametry spalování. ENERGETIKA 2001,č.10, str.308-310.
- [2] Jirouš, F.:Termodynamika přestavby výtopenského provozu na teplárenský.TEPLO, TECHNIKA, TEPLÁRENSTVÍ 2003, č.2, str.5-9.
- [3] Jirouš, F.:Rankinův-Clausinův tepelný oběh s odběrem páry pro předsušení paliva. ENERGETIKA 56, 2006 č.1, str.22-26.
- [4] Teyssler, J.:Sušení paliva v elektrárnách. ENERGETIKA 18, 1958, Příloha.
- [5] Klutz, H.J., Klöcker, K.J., Lambertz, J.: Das WTA-Verfahren als Vortrocknungsstufe für moderne Kraftwerkskonzepte auf Basis Braunkohle. VGB KRAFTWERKSTECHNIK 53, 1996, č.3, str.224-229.

- [6] Klutz, H.-J., Ewers, J.: Entwicklung der WTA-Feinkorntrocknung. VGB Berichte Nr.1495, 1999, str. 259-286.
- [7] Elsen., R., Blumenthal, U., Götte, CH., Kamm, J., Kossak, Th.: Planung und Bau der Pilot-Trocknungsanlage Niederaußem. VGB POWERTECH 2001, č.6, str. 69-72.
- [8] Martin, J.S., Höhne, O., Krautz, H.J.: Druckaufgeladene Dampfwirbelschichtstrocknung von Braunkohlen-Inbetriebnahme und erste Untersuchungsergebnisse am Versuchstrockner der BTU Cottbus. Sborník XXXVI Kraftwerkstechnisches Kolloquium, TU Dresden, 19.-20.10.2004, příspěvek V20.
- [9] Böhlmann, M., Bertina, CHr., Strau, K., Berger, S.: Mechanical-Thermal-Dewatering and its beneficial effects on efficiency and performance of lignite fired power stations. Sborník konference DNY PLAMENE'99. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 8.-9.6.1999, str.135-142.
- [10] Dlouhý, T.: Zařízení na zpracování biomasy jejím spalováním. Užitný vzor, č. zápisu 13175, Praha 2003.
- [11] Dlouhý, T., Samek, P.: Perspektivní metody sušení pevných paliv. Část I-Přehled metod. ENERGETIKA 53, 2003, č.2, str. 30-35.
- [12] Dlouhý, T., Samek, P.: Perspektivní metody sušení pevných paliv. Část II-Porovnání metod. ENERGETIKA 53, 2003, č.4, str. 113-115.
- [13] Dlouhý, T.: Výroba elektřiny na bázi spalováním vlhké biomasy. ENERGETIKA 53, 2003, č.11, str. 366-369.
- [14] Kudra, T., Mujumdar, A.S.: Advanced Drying Technologies. Marcel Dekker Inc., New York, ISBN 0-8247-9618-7.