

DIAGNOSTIKA VÝVOJE KAPALNÉ FÁZE V PRŮTOČNÉ ČÁSTI PARNÍ TURBÍNY

DIAGNOSTICS OF NUCLEATION PARTICLES AND LIQUID PHASE STRUCTURE IN LP STEAM TURBINE

Michal Kolovratník^{a),b)} - Václav Petr^{a)}

a) ČVUT v Praze, Fakulta strojní

b) Ústav termomechaniky AV ČR

Abstrakt

V článku jsou stručně představeny systémy vyvinuté na ČVUT v Praze pro diagnostiku struktury částic v přehřáté páře a primárních i sekundárních kapek v mokré páře v NT dílech parních turbín.

A brief presentation of instrumentation for measurement of particles structure in superheated steam and fine and coarse droplets structure in wet steam in LP part of steam turbines developed at CTU in Prague can be found in this paper.

1. Úvod

Proudění mokré vodní páry v průtočné části parních turbín je charakterizováno přídavnými energetickými ztrátami vlhkostí páry a erozí lopatek. Rozsah těchto nepříznivých jevů, které způsobují snížení termodynamické účinnosti a spolehlivosti stroje, závisí na rozměrech kapek, tj. na podmínkách vzniku a vývoje kapalně fáze v turbíně. V expandující páře nejprve vznikají heterogenně-homogenní kondenzací submikronové **primární kapky**, které tvoří rozhodující váhový podíl kapalně fáze (~90÷95 %). Následně rozpadem vodních filmů strhávaných s povrchu lopatek vznikají velké (~5÷200 μm) **sekundární kapky** [1]. Pro minimalizaci uvedených negativních vlivů kapalně fáze v průtočné části PT je nezbytná především znalost skutečných spekter velikostí a koncentrací obou skupin kapek.

S ohledem na složitost proudového pole, na řadu neznámých údajů o rozměrech a vlivu příměsí obsažených v páře na kondenzaci a na komplexnost fyzikálního procesu vzniku primárních a sekundárních kapek v PT je stále nutné v matematických modelech tvorby kapalně fáze v PT používat řadu zjednodušení, což limituje jejich úspěšnou aplikaci. Jediným řešením je proto experimentální stanovení spekter velikostí a koncentrací částic v přehřáté páře a primárních i sekundárních kapek v mokré páře v reálných podmínkách parních turbín [2].

Z uvedených důvodů byla, v rámci dlouholeté spolupráce se ŠKODA POWER s.r.o. a AV ČR, na strojní fakultě ČVUT v Praze navržena a realizována řada měřicích systémů, které jsou dále krátce představeny spolu s příklady výsledků získaných pomocí nich na turbíně 210 MW (EPR II).

2. Diagnostika částic v přehřáté páře

Dosavadní výzkum v této oblasti je zaměřen na aerosoly. Ve spolupráci ČVUT v Praze a AV ČR byl navržen nový experimentální přístup, využívající pro měření částic v přehřáté páře ověřenou, spolehlivou a přesnou instrumentaci určenou k měření aerosolů v atmosféře. Jeho realizaci umožnila mobilní odběrová trať, která vzorek přehřáté páry upraví - bez ovlivnění nesených částic - na parametry, pro které je tato instrumentace primárně navržena, tj. na atmosférický tlak a teplotu okolí (do cca 35°C). Úprava vzorku je v trati realizována ve třech krocích: zředění páry inertním dusíkem, redukce tlaku směsi a

snížení teploty. Následuje měření relativní vlhkosti upraveného vzorku pro určení množství odebírané páry a dále jeho analýza aerosolovou měřicí technikou. Paralelně se trati z místa odběru vzorkuje i přehřátá pára pro chemické analýzy.

Při měření na EPR II byl pro vzorkování páry využit vstup do odběrového potrubí z turbíny 210 MW (parametry páry v potrubí: $p=145$ kPa, $t=179^\circ\text{C}$). Příklad výsledků ukazuje obrázek 1, na kterém jsou porovnány časové průběhy měřené relativní vlhkosti $\varphi(t)$ vzorku a koncentrace částic v odebírané páře (přepočtené z vyhodnocené objemové koncentrace částic ve vzorku). Vybraný úsek měření zachycuje úmyslné testovací změny ředění vzorku páry dusíkem, které neovlivňují výsledek a dokumentují tak správnou činnost odběrové trati.

Souhrnně lze konstatovat, že v odebírané přehřáté páře byla vyhodnocena průměrná koncentrace částic $N_m = (5\div 7) \cdot 10^9 \text{ kg}^{-1}$. Struktura částic v přehřáté páře na různých elektrárnách však není uniformní. Je pravděpodobně ovlivňována ději probíhajícími mezi výrobou páry a místem měření. Možné základní příčiny tohoto rozdílu lze hledat např. v odlišných chemických režimech, odlišných koncepcích kotlů, atd. [3].

3. Diagnostika struktury primárních kapek

Pro určení reálné rozměrové struktury primárních kapek se v PT používají extinkční sondy. Pomocí nich se získá poměrné zeslabení intenzity světla $I/I_0=f(\lambda)$, procházejícího vrstvou mokré páry. Následně lze s použitím teorie rozptylu světla Mie vyhodnotit rozměr kapek D , resp. rozložení jejich velikostí $F(D)$. V principu vede problém na řešení systému Fredholmových integrálních rovnic prvního druhu:

$$\frac{1}{\ell} \ln\left(\frac{I_o}{I_i}\right) = \frac{\pi}{4} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q(D, \lambda, m) F(D) D^2 dD$$

kde ℓ je délka měřicí mezery sondy (resp. prosvětlovaná vrstva mokré páry), $Q(D, \lambda, m)$ součinitel rozptylu světla a $i=1, 2, \dots, k$ zvolený počet diskrétních vlnových délek světla λ a tedy počet rovnic systému.

Pro měření multispektrální extinkce v parních turbínách byl na ČVUT v Praze vyvinut univerzální měřicí systém, který umožňuje variantní použití extinkčních sond. Příklad měřicí hlavice jedné extinkční sondy s průměrem 25mm je na obrázku 2.

Cílem extinkčních měření v parních turbínách je získat informaci o rozložení velikosti kapek a vlhkosti páry podél lopatky v dostupných rovinách měření. Jako příklad jsou na obrázku 3 ukázány průběhy D_{32} (střední Sauterův průměr kapek) a vlhkosti y podél lopatky v oblasti před a za posledním stupněm NT dílu kondenzační PT 210 MW.

Z vypočteného rozložení výstupní vlhkosti lze při znalosti dalších charakteristik proudového pole stanovit její střední hodnotu. Tato hodnota umožňuje určení koncového bodu expanzní čary NT dílu, resp. jeho termodynamické účinnosti.

4. Diagnostika struktury sekundárních kapek

Sonda ČVUT pro diagnostiku sekundárních kapek umožňuje měřit závislost intenzity světla rozptýleného kapkami v páře pod malými úhly $I(\lambda)$ od směru vstupního paprsku monochromatického světla s intenzitou I_0 . Teoretický popis této závislosti opět podává teorie rozptylu světla Mie. S jejím využitím je pak možné zpětně vyhodnotit rozměrovou strukturu sekundárních kapek z informace obsažené ve změřeném průběhu intenzity $I(\lambda)$. Konstrukce hlavice této sondy je patrná z obrázku 4.

Zásadní otázkou interpretace výsledků měření je vhodná vyhodnocovací metoda, která z dat umožní stanovit hledané parametry kapalně fáze. Pro vyhodnocení dat je používán postup, který je schématicky naznačen na obrázku 5.

Příklad získaných hodnot Sauterova průměru sekundárních kapek D_{32} a vlhkosti odpovídající sekundárním kapkám y v oblasti středního průměru lopatkování před a za posledním stupněm NT dílu PT 210 MW je uveden v tabulce 1 [4].

5. Závěr

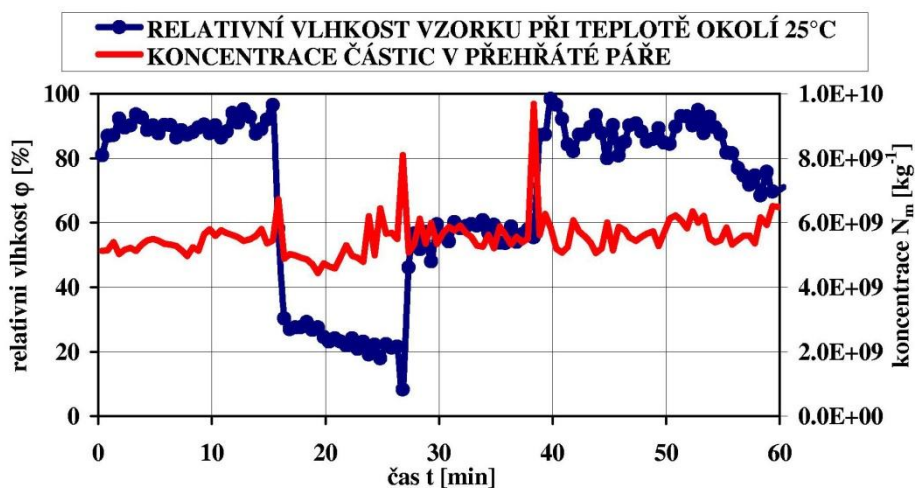
Na ČVUT v Praze byl ve spolupráci se ŠKODA POWER a AV ČR vyvinut unikátní soubor měřicích systémů, který umožňuje získat originální údaje o rozměrové struktuře částic v přehřáté a kapalně fáze v mokré páře. Tato data umožňují stanovit dopady fázového přechodu na spolehlivost a účinnost diagnostikované parní turbíny. V obecnější rovině pak představují nezastupitelné podklady pro ověřování nukleačních a kondenzačních modelů a optimalizaci nových turbínových stupňů navrhovaných pro práci v podmínkách proudění mokré vodní páry.

Poděkování

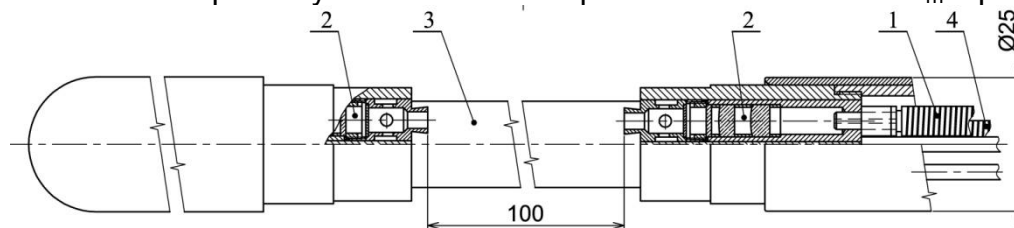
Prezentované práce vznikly za podpory projektů: GA ČR 101/09/1633, MSM 6046137304 a MPO č. FT-TA 2 /037. Dík autorů patří také pracovníkům EPR II.

Literatura

- [1] Moore, M. J. – Sieverding, C. H.: Two - phase steam flow in turbines and separators. Hemisphere Publishing Corporation, N. Y., 1976.
- [2] Petr, V. – Kolovratník, M.: Diagnostics of wet steam in LP steam turbines. 5th European Conference on Turbomachinery, Prague 2003, pp. 687-698.
- [3] Kolovratník, M. – Hrubý, J. – Ždímal, V. – Jiříček, I. – Bartoš, O. – Moravec, P.: Measurements of heterogeneous particles in superheated steam in turbines of COAL-FIRED power plants, 8th European Conference on Turbomachinery, Graz 2009, pp. 1115-1124.
- [4] Kolovratník, M. – Bartoš, O.: Měření sekundárních kapek v parní turbíně. Sborník semináře Parní turbíny a jiné turbostroje, Plzeň: Západočeská univerzita, 2008.

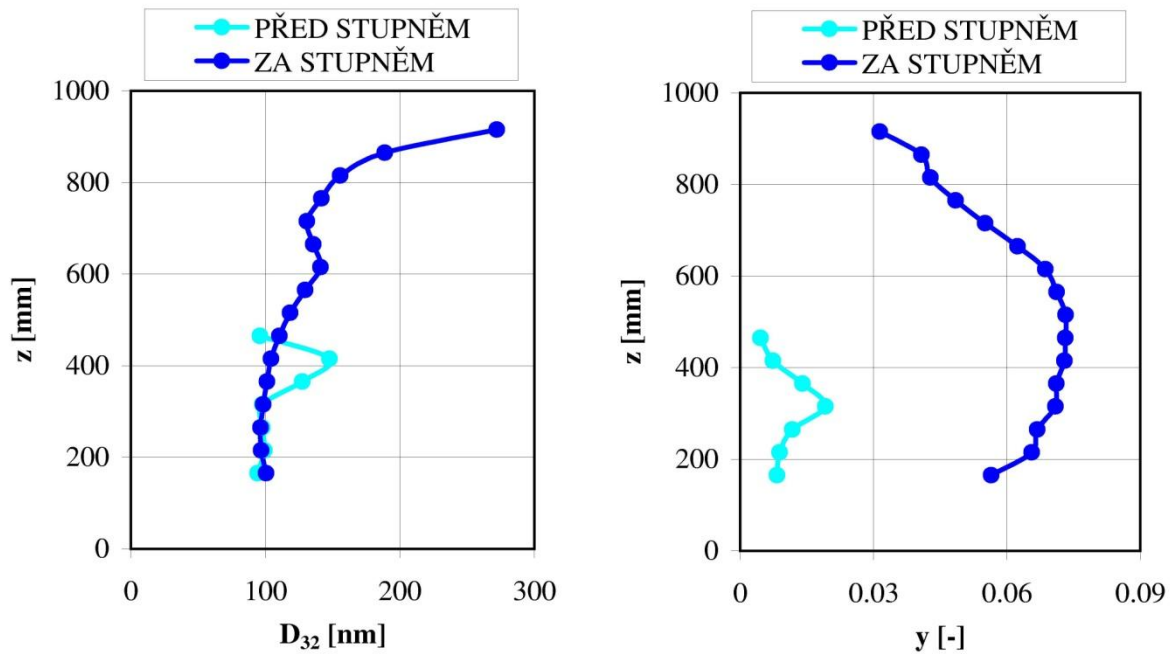


Obr. 1 Časové průběhy relativní vlhkosti ϕ a koncentrace částic N_m v páře

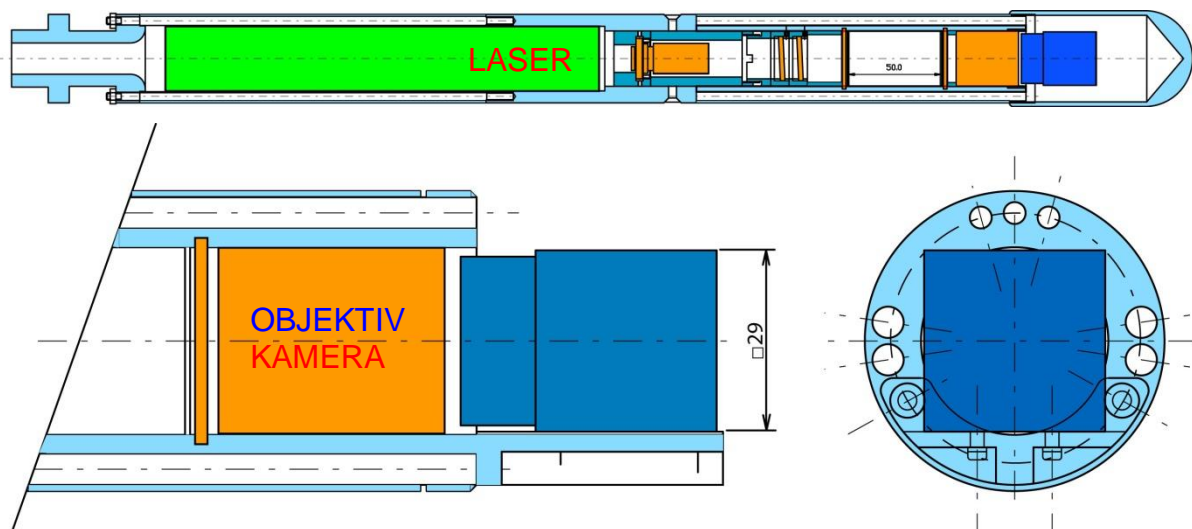


1, 4 – světlovody 2 - kolimátory 3 – měřicí prostor délky $l=100\text{mm}$

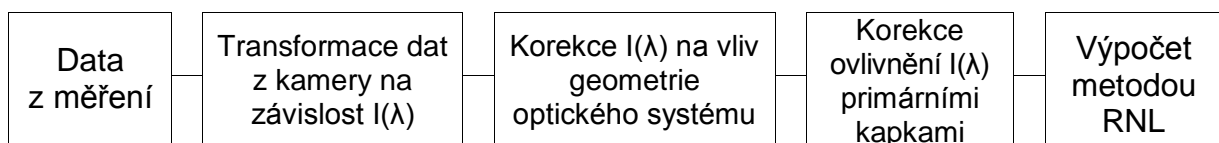
Obr. 2 Měřicí hlavice extinkční sondy pro diagnostiku primárních kapek



Obr. 3 Příklad struktury primárních kapek měřené v oblasti koncového stupně PT



Obr. 4 Měřicí hlavice rozptylové sondy pro diagnostiku sekundárních kapek



Obr. 5 Schéma postupu vyhodnocování optických měření sekundárních kapek

Tabulka 1 Sauterův průměr D₃₂ sekundárních kapek a jim odpovídající vlhkost y v oblasti středního průměru lopatkování posledního stupně PT 210 MW

měření	D ₃₂ [μm]	y [-]
před stupněm	3.10	0.00103
za stupněm	4.73	0.00879