

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Ing. Michal Kolovratník, CSc.

Vznik a vývoj kapalné fáze v parních turbínách
Droplet Nucleation in Steam Turbines

Summary

Existing continuous effort for higher steam turbine efficiency and reliability has been still limited with incomplete knowledge of the nucleation process occurring in the LP steam turbine flow path. The liquid phase formed by polydispersed system of droplets is responsible for numerous unfavourable phenomena comprising mainly additional energy losses, blade erosion and blade failures due to the corrosion effects in the phase transition zone, thus, resulting in the decreased turbine efficiency and reliability. The knowledge of structure of the droplets is needed for solution and minimizing of these wet steam effects.

The lecture deals with the structure of droplets in steam turbine from the point of view of the corresponding diagnostics and modelling.

Souhrn

Trvalá snaha o dosažení vyšší účinnosti a spolehlivosti parních turbín je stále limitována neúplnou znalostí nukleačních jevů v průtočné části NT dílu parních turbín. Kapalná fáze tvořená polydisperzním systémem kapek je zodpovědná za řadu nepříznivých jevů zahrnujících především přídavné energetické ztráty, erozi lopatek a poškození lopatek v důsledku korozních jevů v oblasti fázového přechodu, které snižují účinnost a spolehlivost turbíny. Pro řešení a minimalizaci těchto vlivů mokré páry je nezbytná znalost struktury kapek.

Přednáška se zabývá strukturou kapek v parních turbínách z pohledu diagnostiky a modelování.

Klíčová slova:

Parní turbíny, mokrá pára, příměsi páry, nukleace, diagnostika mokré páry

Keywords:

Steam turbines, wet steam, steam chemistry, nucleation, diagnostic of wet steam

OBSAH

1. Úvod	6
2. Struktura kapalné fáze mokré páry	6
3. Fázový přechod v expandující vodní páře.....	6
4. Měření struktury kapalné fáze mokré páry v parních turbínách	12
5. Použitelný model vzniku a vývoje kapalné fáze v parních turbínách.....	15
6. Závěr.....	19
Literatura.....	20

1. ÚVOD

Energetické nároky společnosti jsou v rozhodující míře kryty z neobnovitelných zdrojů primární energie. Podle údajů světové energetické rady (WEC) zůstane celosvětově až do roku 2020 celkový podíl fosilních nosičů energie a jaderné energie na výrobě elektřiny přibližně konstantní na dnešní úrovni kolem 80%. Podobný trend nepochybně přetrvá i v následujícím období.

V technologických řetězcích zušlechťovacích přeměn na sekundární formy energie dochází trvale ke značným energetickým ztrátám s negativními dopady na ekonomiku a životní prostředí. Cestou ke zlepšení je zvyšování účinnosti a spolehlivosti energetických systémů. Nezastupitelné místo mezi nimi mají parní oběhy v tepelných elektrárnách. Dosud stále nevyužitý potenciál pro další zvyšování účinnosti parních oběhů je ve zlepšení dílů kondenzačních parních turbín, které pracují s mokrou párou. Mokrý pára se v turbínách projevuje velmi negativně [1-3]. Obecně známé jsou eroze, korozní jevy a také přídavné energetické ztráty vlhkostí. Intenzita všech těchto nepříznivých projevů je výrazně ovlivněna strukturou kapalně fáze mokré páry (tj. rozměrovým spektrem a počtem kapek) [4]. Znalost této struktury mokré páry v reálných parních turbínách a faktorů, které tuto strukturu ovlivňují, má tedy značný význam.

Přednáška stručně mapuje problematiku fázového přechodu v parních turbínách a shrnuje poznatky z experimentálního výzkumu struktury mokré páry v parních turbínách uhelné elektrárny 210 MW a jaderné elektrárny 1000 MW a z testování modelů vzniku a vývoje kapalně fáze v těchto turbínách.

2. STRUKTURA KAPALNÉ FÁZE MOKRÉ PÁRY

Struktura kapalně fáze mokré páry je v podmínkách parních turbín formována v principu dvěma fázemi: vlastním vznikem a následným vývojem v proudovém poli. V důsledku kondenzace se tvoří tzv. primární kapky s poloměrem $r \sim 0.05-0.5 \mu\text{m}$. Část z nich je transportována (přímou impakcí a turbulentní difuzí) na povrch lopatek za vzniku vodních filmů. Ty jsou proudem páry strhávány a rozpadají se na hrubě disperzní, tzv. sekundární kapky s poloměrem $r \sim 5-100 \mu\text{m}$. Jejich váhový podíl v celkové vlhkosti je obvykle menší než 10%. Sekundární kapky způsobují erozi lopatek a mají i významný podíl na přídavných ztrátách vlhkostí. Uvedené transportní mechanismy, ovlivňující tvorbu sekundárních kapek, jsou závislé na rozměrech kapek primárních. To zdůrazňuje nezbytnost znalosti reálné struktury primárních kapek. Předmětem trvalého zájmu je proto výzkum charakteru fázové změny v proudící páře, tedy poznání vzniku a vývoje kapalně fáze.

3. FÁZOVÝ PŘECHOD V EXPANDUJÍCÍ VODNÍ PÁŘE

Historie výzkumu fázových přechodů je starší než 100 let. Na konci 19. století ji zahájil ucelenými experimenty s homogenní a heterogenní kondenzací Wilson (1897). Krátce po něm Thomson (1906) navrhl a ověřoval teorii kondenzace na

iontech. Jejich výsledky aplikoval v prvním kvantitativním výzkumu kondenzace páry v dýzách Stodola (1927), který jako první zjistil, že pro vznik kondenzace v proudící mokré páře je třeba dosáhnout určitého podchlazení. Ve třicátých letech minulého století vznikají ucelené teorie homogenní nukleace a probíhá řada výzkumů kondenzace páry, ve kterých je stanovena poloha místa, kde nastává proces kondenzace v proudící mokré páře (Wilsonův bod). Oswatitsch (1942) provedl kompletní kinetickou a termodynamickou analýzu expanze vodní páry v dýze a dosáhl dobrého souhlasu s experimenty.

Tyto práce byly základem pro intenzivní výzkum proudění mokré vodní páry v Lavalových dýzách, který byl jako odezva na zájem výrobců parních turbín zahájen v šedesátých letech minulého století. Společným výsledkem těchto výzkumů bylo potvrzení platnosti teorií homogenní kondenzace o fyzikálním principu vzniku kapalně fáze v expandující čisté vodní páře.

Podle těchto teorií přechází expandující přehřátá pára po překročení rovnovážné meze sytosti do podchlazeného, tedy nestabilního stavu. Dochází v ní ke tvorbě a rozpadu shluků molekul. Při dosažení potřebné velikosti podchlazení se z původně nestabilních shluků molekul stávají kondenzační jádra. Ta dále rostou - vznikají primární kapky. Převáděním uvolňovaného kondenzačního tepla do parní fáze klesá její podchlazení. Proudící pára přechází ze stavu metastabilního do stavu blízkého rovnovážnému. Experimentálně bylo ověřeno, že počátky kondenzace lze v *i-s* diagramu spojit čarami, které jsou zhruba ekvidistantní k mezní křivce a jejichž poloha závisí na rychlosti expanze. Obecně by podle těchto výsledků mělo ke vzniku kapalně fáze v expandující vodní páře dojít v pásu vymezeném v *i-s* diagramu 2-4 % rovnovážné vlhkosti - ve Wilsonově oblasti.

Naproti tomu měření v parních turbínách [1] ukázala, že kondenzaci lze v proudící páře lokalizovat před Wilsonovou oblastí, jejíž poloha je stanovena pro parametry v jádru proudu. Obvykle se uvádí dva základní důvody tohoto „předčasného“ výskytu kapalně fáze:

- prostorový charakter proudění v turbínách,
- přítomnost příměsí v páře.

Proudění v průtočné části parních turbín se zásadně liší od jednorozměrného proudění v dýzách. Projevuje se zde výrazně dvou, resp. třírozměrný charakter proudového pole v turbínovém stupni, efekty turbulence a nestacionárních fluktuací parametrů proudu, existence úplavových vírů a sekundárním prouděním vyvolaných koncových vírů. V takovém proudovém poli může být lokálně dosaženo potřebné podchlazení pro start homogenní kondenzace dříve, než by odpovídalo proudovým poměrům podél střední proudnice. Kapky vznikající v těchto místech přecházejí do jádra proudu. Tvoří-li dostatečný kondenzační povrch, proběhne zde vlastní kondenzace autoheterogenně (jádra jsou tvořena stejnou látkou, ale nevznikají v daném místě homogenní nukleací). Není proto třeba vysokých podchlazení na homogenní tvorbu jader. Prakticky to

znamená, že se kapalná fáze může objevit již v oblasti průchodu expanzní čáry mezní křivkou. Charakter autoheterogenní kondenzace byl experimentálně ověřován na dýzách. Prokázalo se, že při dostatečném počtu kapek na vstupu do dýzy je homogenní proces zcela potlačen.

Další z možných příčin „předčasné“ kondenzace v parních turbínách je ovlivnění nukleačního děje a vývoje kapalné fáze příměsemi obsaženými v páře. Je známo, že přítomnost příměsí ve vodě a páře podstatně mění jejich vlastnosti: vodní roztoky různých látek mají vyšší kritickou teplotu a mají znatelnou teplotní depresi, což přirozeně zdvíhá křivku nasycení roztoků vzhledem ke křivce sytosti čisté páry. Přes intenzivní výzkum však procesy vzniku kapalné fáze z páry za přítomnosti příměsí nejsou dosud plně prozkoumány. Předpokládá se, že vedle mechanismu homogenní kondenzace se v parních turbínách uplatňují a možná i dominují heterogenní mechanismy tvorby kapalné fáze na cizích zárodcích nesených proudem páry.

Přítomnost příměsí v páře na jedné straně silně komplikuje či prakticky znemožňuje modelování fázového přechodu, zároveň avšak představuje významnou možnost pro aktivní ovlivnění struktury kapalné fáze. Pracovním médiem parních oběhů není nikdy chemicky čistá látka. Přestože moderní elektrárenské bloky mají vysoce kvalitní systém úpravy doplňované vody a často i 100% úpravu kondenzátu, obsahuje oběhová voda i pára stále velký počet různých příměsí. Jejich zdroje lze rozdělit do pěti skupin:

- použitý chemický režim úpravy vody
- průniky nečistot
- produkty koroze materiálů v oběhu
- produkty eroze materiálů, nánosů, nátěrů
- produkty chemických reakcí

V okruhu provozovaného zařízení je část příměsí v pracovním médiu přítomna v důsledku trvalých zdrojů. Zbytek příměsí do okruhu vniká nebo v něm vzniká při poruše zařízení nebo chybou obsluhy.

O různorodosti příměsí v páře svědčí řada prací opírajících se o výsledky průzkumu usazenin z velkého počtu turbín a analýzy faktografického materiálu. Uvádí se více než 160 spolehlivě identifikovaných sloučenin (především oxidů, silikátů, sulfátů, fosfátů, uhličitanů, chloridů) i prvků nevázaných ve sloučeninách. Kromě usazených látek bylo ve vodě a v kondenzátu páry některých energobloků objeveno i mnoho organických a také neorganických kyselin. Pára obsahuje také některé plyny. Navíc jsou do parovodního traktu úmyslně dodávány úpravné reagenty. Z uvedeného je vidět, že počet příměsí v páře je značný.

Množství těchto příměsí lze stručně dokumentovat následující tabulkou 1, kde jsou jako příklad shrnuty výsledky rozborů kondenzátu páry odebírané z výstupů NT dílů parních turbín v uhelné elektrárně Pruněřov II 210 MW a v jaderné elektrárně Temelín 1000 MW.

Tabulka 1

Turbína [MW]	F ⁻ [ppb]	Cl ⁻ [ppb]	NO ₂ ⁻ [ppb]	NO ₃ ⁻ [ppb]	SO ₄ ²⁻ [ppb]	katex. vodivost [μS/cm]	Na [ppb]	K [ppb]	SiO ₂ [ppb]
210	0.86	0.41	<0.18	0.18	1.02	0.0865	-	-	7
1000	0.19	1.38	<0.18	0.37	1.58	0.0872	6.0	6.0	3.7

V běžném provozu jsou tedy koncentrace příměsí páry velmi nízké. Otázkou zůstává, zda - jak tvrdí řada autorů - i v tomto množství mohou příměsí výrazně a možná rozhodujícím způsobem ovlivnit nukleaci, a tím i místo vzniku a vývoj struktury kapalně fáze. O tom rozhoduje vedle množství příměsí i jejich stav.

Příměsí jsou parou nesené jako heterogenní částice v nejrůznějších formách. Mohou to být ionty, kapky koncentrovaných roztoků nebo pevné částice různých fyzikálních vlastností: inertní, chemicky reagující, elektricky nabitě. Na kondenzaci expandující páry se tak mohou podílet homogenní a různé heterogenní kondenzační mechanismy.

Dnes je známa řada teorií o možných vlivech jednotlivých forem příměsí páry na nukleaci a kondenzaci. Většinou tyto teorie nejsou uzavřené. Zabývají se stanovením kritického rozměru jader a energetickou náročností jejich tvorby. Ne vždy je uváděna intenzita vzniku jader a prakticky se neuvádějí vlivy příměsí na další růst kapek. V teoriích je současně zavedena řada parametrů, pro jejichž kvantifikaci není dostatek podkladů. Tím je vytvořeno mnoho stupňů volnosti, kterými lze ovlivnit výsledek případných modelových výpočtů. U „důkladnější“ teoreticky propracované unární homogenní kondenzace je takovým stupněm volnosti např. neznalost hodnoty povrchového napětí. K němu se zde však připojují další. Úspěšné použití vyvíjených multikomponentních modelů je navíc komplikováno neznalostí konkrétního stavu, složení a rozměrové struktury příměsí - heterogenních jader v turbínách.

V současnosti neexistují žádná přímá měření struktury heterogenních kondenzačních jader v expandující páře. První poznatky v tomto směru by mohly přinést nové experimentální tratě a postupy navržené a realizované v poslední době na ČVUT [5, 6], zatím však tyto práce nejsou dokončeny. I pouhý odhad počtu heterogenních jader, které lze v páře očekávat, je poměrně problematický. S využitím údajů z tabulky 1 je možno pouze naznačit horní limit počtu jader tvořených iontovými sloučeninami. Za předpokladu, že jádra jsou heteromolekuly tvořené m molekulami soli a n molekulami vody, kde počty m a n odpovídají nasycenému roztoku, lze stanovit počty a přibližné rozměry takových heteromolekul v 1 kg páry. V tabulce 2 jsou uvedeny tyto koncentrace N_{HET} a orientační poloměry r_{HET} pro dva vybrané typy heteromolekul ($m \cdot \text{NaCl} + n \cdot \text{H}_2\text{O}$) a ($m \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 + n \cdot \text{H}_2\text{O}$) a měřená množství iontů Cl⁻ a SO₄²⁻ v páře na výstupu z NT dílu parních turbín 210 a 1000 MW.

Tabulka 2

			NaCl		Na ₂ SO ₄			
			KONCENTRACE		KONCENTRACE		KONCENTRACE	
			210 MW		210 MW		210 MW	
			0.674 ppb		2.27 ppb		1.57 ppb	
			1000 MW		1000 MW		1000 MW	
			2.27 ppb		2.27 ppb		2.34 ppb	
			2.27 ppb		2.27 ppb		2.34 ppb	
m	n	r _{HET} [nm]	N _{HET} [kg ⁻¹]		n	r _{HET} [nm]	N _{HET} [kg ⁻¹]	
1	8	0.408	6.95·10 ¹⁵	2.34·10 ¹⁶	11	0.462	6.64·10 ¹⁵	9.90·10 ¹⁵
10	80	0.88	6.95·10 ¹⁴	2.34·10 ¹⁵	110	0.997	6.64·10 ¹⁴	9.90·10 ¹⁴
100	800	1.9	6.95·10 ¹³	2.34·10 ¹⁴	1100	2.148	6.64·10 ¹³	9.90·10 ¹³

Z tabulky je zřejmé, že pokud budou příměsi v páře v iontové podobě, či jako heteromolekuly s jednou molekulou soli, bude v obou turbínách jejich limitní koncentrace v kg páry s přihlédnutím na obsah dalších iontů řádově $\sim 10^{17}$. Při vyšším počtu iontů či molekul v jádru by koncentrace logicky klesla. Zajímavá je konfrontace takto stanoveného horního limitu koncentrace heterogenních jader s koncentrací kapek vody N, měřenou extinkčními sondami našeho pracoviště na stejných turbínách za posledním stupněm NT dílů [7, 8]:

Tabulka 3

Turbína	210 MW	1000 MW
N [kg ⁻¹]	8.99·10 ¹⁶	2.35·10 ¹⁵

Je patrné, že pokud nedochází v procesu vývoje kapalně fáze v PT k výrazné koagulaci, bude - především v parním oběhu s turbínou 1000 MW - počet „aktivních“ heterogenních jader menší než uvedený horní limit koncentrace.

Obecně lze z porovnání údajů v tabulkách 2 a 3 usuzovat na nezanedbatelný vliv příměsí v páře na kondenzační děj. Dílčím potvrzením těchto úvah jsou výsledky získané při výzkumu na experimentálních i provozovaných, parních turbínách [9]. Ty prokázaly existenci kapalně fáze před Wilsonovou oblastí, resp. nad mezní křivkou. Zároveň byl v tomto "prvním" kondenzátu naměřen vysoký obsah solí. To kvantitativně potvrzují i pozdější práce [10].

O tom, zda se heterogenní kondenzace na příměsích uplatňuje v průtočné části nebo zda má dokonce rozhodující vliv na průběh kondenzačních dějů v parních turbínách, není zatím možno jednoznačně rozhodnout. Ani vysoký obsah příměsí v prvním kondenzátu, uváděný některými autory, není dostatečně průkazný. Za současného stavu měřících metod a technik nelze určit, zda příměs byla primárním heterogenním centrem, nebo přešla-li do již existujícího vodního kondenzačního jádra. Bez ohledu na to může přítomnost příměsí v kondenzačních jádrech (při dostatečné koncentraci) ovlivnit chování mokré páry především disperzní strukturu kapalně fáze. Pokusy provedené v podmínkách spontánní

tvorby kapalné fáze potvrdily, že příměsí v páře mohou měnit rychlost růstu a rozměr kapek vznikajících při kondenzaci.

Pozorovaný výskyt kapalné fáze před Wilsonovou oblastí lze tedy vysvětlit jak heterogenní kondenzací na částicích příměsí, tak i mechanismem autoheterogenní kondenzace bez uvažování vlivu příměsí. Oba mechanismy jsou teoreticky možné a experimentálně dílčím způsobem ověřené. To dokumentuje složitost podmínek ovlivňujících vznik kapalné fáze v průtočné části parních turbín a zároveň naznačuje, proč (na rozdíl od dýzových experimentů) není charakter kondenzace v turbínách doposud jednoznačně objasněn. Ukazuje se nutnost podrobného výzkumu jednotlivých jevů spolupůsobících při kondenzaci. Řešení této problematiky zůstává v popředí zájmu řady pracovišť. V experimentální oblasti je možno sledovat dva základní směry výzkumu:

a) Měření na parních turbínách za provozu, které má přinést informace o skutečných poměrech v průtočné části. Sledují se různé cíle:

- lokalizace místa vzniku kapalné fáze,
- analýzy složení „prvního“ kondenzátu,
- stanovení rozměrů primárních resp. sekundárních kapek,
- určení hodnot vlhkosti v proudící mokré páře.

b) Výzkum na experimentálních tratích. Projevuje se zde snaha přiblížit podmínky experimentu podmínkám v průtočné části parních turbín.

- Sleduje se vliv časově proměnného proudového pole na počátek kondenzace. Tyto náročné výzkumy zatím nepřinesly jednoznačné závěry.
- Ověřuje se vliv příměsí cíleně dávkovaných do proudu páry na charakter kondenzace v dýzách při různých rychlostech expanze. Souhrnně tyto práce ukazují na konkurenční vztah mezi homogenním a heterogenním mechanismem kondenzace. Přítomnost cizích jader různého charakteru (inertní částice, ionty, povrchově aktivní látky) potlačila v řadě případů projevy homogenní nukleace ve srovnání s případy expanze čisté páry.
- Zkoumá se kondenzace technicky čisté páry při nízkých rychlostech expanze [11]. Při těchto výzkumech byla fotometrickým měřením prokázána přítomnost kapalné fáze v expandující páře dříve, než lze očekávat na základě modelu homogenní nukleace. Tomuto modelu neodpovídá ani měřená výsledná struktura kapalné fáze, tvořená zde menším počtem kapek větších rozměrů. Za příčinu byl stanoven heterogenní start kondenzace na jádrech tvořených příměsemi v páře. Na základě modelových výpočtů vlivu koncentrace inertních heterogenních jader na charakter kondenzace při různých expanzních rychlostech lze konstatovat, že s klesající rychlostí expanze postačuje pro potlačení homogenní kondenzace nižší počet heterogenních jader. Není-li však takový počet jader v páře přítomen, převládá po heterogenním startu homogenní mechanismus kondenzace.

Obecně lze tedy při expanzi vodní páry určité čistoty očekávat výraznější projevy heterogenní nukleace při nižších rychlostech expanze. Dále je pravděpodobné ovlivnění průběhu podchlazení parní fáze během expanze a zřejmě i struktury kapalně fáze tímto mechanismem.

Jak již bylo řečeno v úvodu, je znalost struktury vznikajících kapek nezbytná pro stanovení intenzity nepříznivých projevů přítomnosti mokré vodní páry v parních turbínách. Protože možnosti numerických simulací průběhu nukleace a kondenzace ve složitých podmínkách proudění technicky čisté páry v PT jsou dosud omezeny, jsme při získávání údajů o reálné struktuře kapalně fáze odkázáni především na výsledky experimentů. Ty zároveň představují jediné podklady pro testování a fitování modelů fázového přechodu v parních turbínách.

Výzkumu vzniku a vývoje kapalně fáze v expandující vodní páře je řadu let věnována velká pozornost i na našem pracovišti. Dále je jako dílčí příspěvek k této velice složité problematice ukázáno několik příkladů výsledků tohoto výzkumu.

4. MĚŘENÍ STRUKTURY KAPALNĚ FÁZE MOKRÉ PÁRY V PARNÍCH TURBÍNÁCH

Stanovení struktury kapalně fáze, tj. reálného rozměrového spektra kapek a vlhkosti páry při provozu turbíny, je mimo jiné komplikováno faktem, že rozhodující podíl vlhkosti tvoří submikronové kapky, které se pohybují rychlostí stovek m/s. K měření se proto od konce 70tých let minulého století využívají indirektní fotometrické metody [12, 13]. Také na ČVUT v Praze byla v rámci spolupráce se ŠKODA ENERGO s.r.o. postupně vyvinuta a provozně ověřena řada extinkčních sond pro měření v parních turbínách [14].

Extinkční sondou se při měření v parních turbínách měří nejprve referenční závislost intenzity světla I_0 na vlnové délce λ při průchodu světla měřicí mezerou sondy, ve které nejsou kapky vody rozptylující světlo. Následuje měření závislosti intenzity světla I na vlnové délce λ při průchodu světla měřicí mezerou, kterou proudí mokrá pára. V důsledku rozptylu světla na vodních kapkách je intenzita I nižší než referenční hodnota I_0 . Z vypočtené závislosti poměrného zeslabení intenzity světla $I/I_0=f(\lambda)$ se s použitím Mie teorie rozptylu světla na kapkách vyhodnocuje rozměr kapek D , resp. rozložení jejich velikostí $\Phi(D)$ a následně vlhkost páry y . V principu vede problém na řešení soustavy Fredholmových integrálních rovnic prvního druhu [1]:

$$\frac{1}{\ell} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)_i = \frac{\pi}{4} \int_0^{D_\infty} Q(D, \lambda_i, m) \cdot \Phi(D) \cdot D^2 dD \quad (1)$$

kde ℓ je délka měřicí mezery sondy (resp. tloušťka prosvětlované vrstvy mokré páry), $Q(D, \lambda, m)$ součinitel rozptylu světla, $m = f(\lambda)$ relativní index lomu světla a $i=1, 2, \dots, n$ zvolený počet diskrétních vlnových délek světla λ a tedy počet rovnic soustavy. Řešení této soustavy je trvale komplikováno špatnou podmíněností rovnic projevující se velikou citlivostí výsledku na malé změny

vstupních dat. To klade velké nároky na kvalitu měřicího systému, přesnost měření i použitý rozsah vlnových délek světla, který rozhoduje o množství informací získaných o měřených polydispersních systémech kapek.

4.1 Příklad výsledků z provozních měření

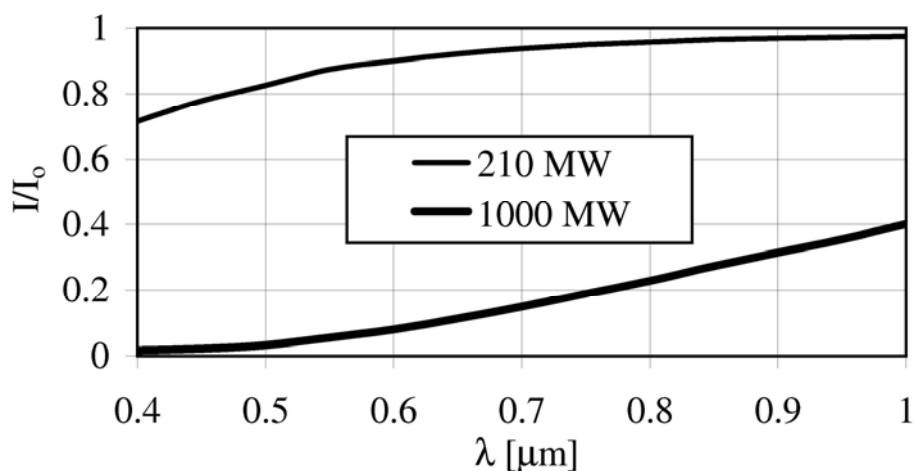
Pomocí extinkčních sond vyvinutých na ČVUT byla provedena četná měření na turbínách v uhelných elektrárnách Počerady, Pruněrov II a v jaderné elektrárně Temelín. Měření přinesla první informace o rozložení velikosti kapek a vlhkosti páry podél lopatky v oblasti za posledními stupni NT dílů těchto turbín. Potvrdilo se, že struktura a rozložení kapalně fáze v průtočné části se u jednotlivých strojů značně liší. Projevují se vlivy parametrů páry, provozních stavů i vlastního řešení lopatkových stupňů.

S ohledem na značný rozsah provedených měření je v rámci této přednášky možné ukázat pouze příklad získaných výsledků. Pro dokumentování rozdílů struktury kapalně fáze v jednotlivých strojích vhodně poslouží data získaná na elektrárně Pruněrov II - turbína 210 MW [7] a na jaderné elektrárně Temelín - turbína 1000 MW [8]. Konkrétně jsou uvedeny výsledky vyhodnocené z měření v oblasti středního průměru lopatkování na výstupu NT dílů při nominálním výkonu strojů. Odpovídající parametry páry na vstupu a výstupu NT dílů uvádí tabulka 4.

Tabulka 4

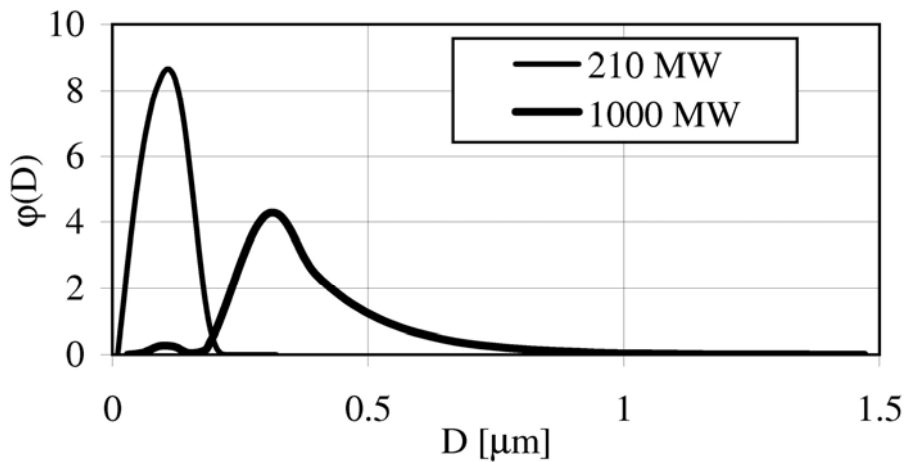
Turbína		210 MW	1000 MW
Tlak před NT	[kPa]	131	690
Teplota před NT	[°C]	181	249
Tlak za NT	[kPa]	4.8	7.8

Primárním výsledkem měření jsou závislosti poměrného zeslabení intenzity světla $I/I_0(\lambda)$. Porovnání jejich průběhů v oblasti středního průměru lopatkování umožňuje obrázek 1.



Obr. 1

Výrazné rozdíly patrné z obrázku 1 dokumentují značný vliv provozního stavu na měřenou extinkci světla. Z těchto závislostí $I/I_0(\lambda)$ byla vypočtena rozložení $\Phi(D)$, znázorněná v normovaném tvaru $\varphi(D)$ na obrázku 2.



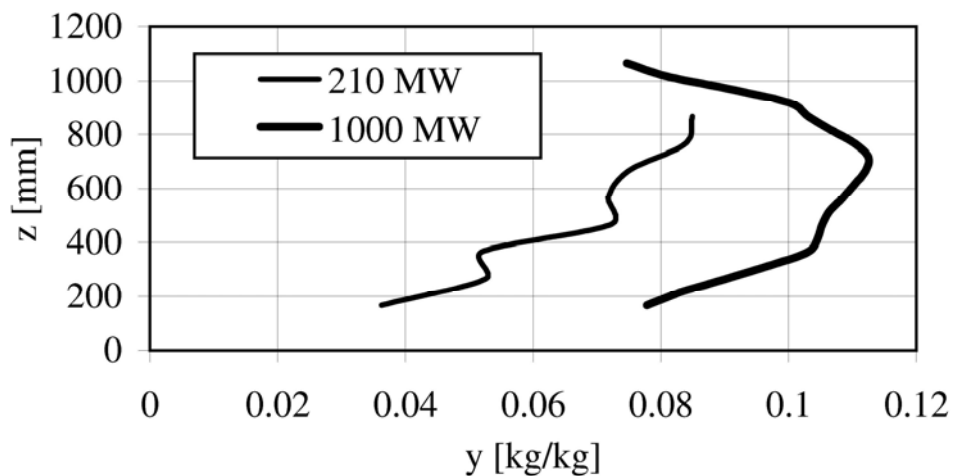
Obr. 2

Tato rozložení umožnila určit hodnoty vlhkosti páry v místě měření podle rovnice

$$y = \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi \rho'}{6 \rho''} \int_{D_0}^{D_\infty} \Phi(D) D^3 dD \right]^{-1}} \quad (2)$$

Pozn.: Hodnoty tlaku v místě měření, nezbytné pro stanovení hustoty syté vody ρ' a syté páry ρ'' , byly získány z paralelních měření pneumatickou sondou realizovaných pracovníky Škoda ENERGO s.r.o..

Obdobně byla vypočtena i vlhkost v dalších měřicích polohách mezi patou a špičkou lopatky. Průběhy rozložení vlhkosti páry podél lopatky v oblasti za posledním stupněm NT dílu jsou pro obě vybrané turbíny porovnány na obrázku 3.



Obr. 3

4.2 Využití výsledků měření

Výsledkem extinkčních měření jsou tedy údaje o struktuře a vlhkosti páry v proměřované oblasti průtočné části dané parní turbíny při konkrétním provozním stavu. Tyto výsledky lze využít:

- konkrétně – tedy přímo ve vazbě na turbínu, na které měření probíhá. Zde se jedná především o možnost stanovení koncových bodů expanze v mokré páře a následně účinnosti NT dílu turbíny, a to jak pro účely garančních měření, tak i pro zhodnocení vlivu dlouhodobého provozu nebo provedených provozních a konstrukčních změn na tuto účinnost. Podobně lze diagnostikovat vliv zamýšlených a testovaných změn chemického režimu energobloku na strukturu kapalné fáze, a tím získat podklady pro posouzení vhodnosti či nevhodnosti takových změn.
- obecně – tedy v oblasti výzkumu podmínek vzniku a proudění mokré vodní páry. Údaje o reálné struktuře mokré páry jsou nenahraditelné pro ověření a případně pro fitaci modelů nukleace, kondenzace, koagulace, erozních mechanismů a transportu kapalné fáze v parních turbínách. Takto ověřené modely lze dále využít při optimalizaci nově navrhovaných lopatkových stupňů pro podmínky proudění mokré vodní páry s přihlédnutím k minimalizaci přídavných energetických ztrát vlhkostí.

Oběma uvedeným oblastem využití je na našem pracovišti logicky věnována značná pozornost.

5. POUŽITELNÝ MODEL VZNIKU A VÝVOJE KAPALNÉ FÁZE V PARNÍCH TURBÍNÁCH

Výsledky měření extinkční sondou na výstupu z NT dílu parní turbíny poskytují dobrou příležitost k ověření výpočtových modelů tvorby kapalné fáze v průtočné části turbíny při respektování provozních podmínek. Jako příklad bude dále ukázáno takové využití výsledku měření na turbíně 1000 MW jaderné elektrárny Temelín.

Modelování nukleace

Pracovním médiem parních turbín je technicky čistá pára, tedy pára s širokým spektrem, velmi nízkou koncentrací a prakticky neznámým stavem příměsí. Z důvodů trvalých nejistot ve vstupních datech, zvláště pokud jde právě o stav chemických příměsí v oblasti vzniku kapalné fáze, není možné použít stávající multikomponentní nukleační modely. Proto je nutné volit jiný přístup. To znamená nasadit modely jednodušší, nepokrývající celé spektrum spolupůsobících faktorů, a na základě výpočtové analýzy vybrat takový model, který poskytuje přijatelné výsledky - definované shodou s měřenými daty.

Při takové výpočtové analýze byly na našem pracovišti testovány následující nukleační modely:

- unární homogenní nukleace
- binární homogenní nukleace
- nukleace na iontech

Jako základní nukleační model byl použit model unární homogenní nukleace čisté páry podle klasické teorie Becker - Döringa [1]. Kritický poloměr kapek r_{kr} a nukleační rychlost J se tedy stanoví podle rovnic

$$r_{kr} = \frac{2\sigma_{\infty}}{\rho_k R T_p \ln [p/p_s (T_p)]} \quad (3)$$

$$J = \sqrt{\frac{2\sigma_{\infty}}{\pi m_k^3}} \cdot \frac{\rho_p^2}{\rho_k} \cdot \exp\left(-\beta \cdot \frac{4\pi r_{kr}^2 \sigma_{\infty}}{3 k_B \cdot T_p}\right) \quad (4)$$

kde: σ_{∞} je povrchové napětí, ρ_k je hustota vody, ρ_p je hustota páry, R je plynová konstanta, T_p je teplota páry, p je tlak, p_s je tlak sytosti, m_k je hmotnost molekuly H_2O , k_B je Boltzmannova konstanta a β je korekce zahrnující stávající nejistoty modelu.

Dále byl použit model binární homogenní nukleace podle Maršíka [15] pro soustavu H_2O - $NaCl$. Koncentrace zvoleného reprezentanta chemických příměsí – $NaCl$ – v páře byla určena v soulase s výsledky chemických analýz odběrů páry provedených ze sledované turbíny (viz tabulka 1 a 2).

Testován byl i model nukleace molekul H_2O na záporně nabitých iontech, který vychází z původní práce Matuszkiewiczze [16].

Nukleace probíhající v expandující páře v průtočné části parní turbíny představuje složitý problém, ze kterého je dosud objasněna pouze malá část. Proto každý z uvedených nukleačních modelů použitých při simulačních numerických výpočtech je ve skutečnosti neúplný. Tak např. model unární homogenní nukleace vyžaduje určení korekčního faktoru β v exponenciálním členu rovnice (4). Podobně v binárním nukleačním modelu je zaveden volitelný parametr $kT \ln(S_2)$ [15]. V případě nukleace na iontech je takovým volitelným parametrem počet iontů N_q , které se nukleace účastní.

S výjimkou unárního modelu, u kterého lze na základě dýzových experimentů [17] faktor β určit podle následujícího korelačního vztahu

$$\beta = 1.328 p_{os}^{0.3} \pm 0.05 \quad (5)$$

(kde p_{os} [bar] je tlak sytosti v průsečíku expanzní čáry s mezní křivkou), je možné míru shody výpočtu s měřenými daty částečně ovlivnit volbou předem neznámých parametrů v nukleačních modelech.

Bez ohledu na to, dříve než se podaří zlepšit naše znalosti o nukleaci, může zjednodušený přístup k jejímu modelování posloužit jako užitečná metoda při návrzích turbín pro mokrou páru, pro které je správné stanovení rozměrových spekter kapek nezbytné.

Růst kapek během kondenzace byl při použití všech uvedených nukleačních modelů stanoven podle Gyarmathyho rovnice [1]

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{\ell_{32} \cdot \rho_k} \frac{\lambda_p}{r} \frac{1}{1 + 3.18Kn} \Delta T \left(1 - \frac{r_{kr}}{r} \right) \quad (6)$$

kde: r je poloměr kapky, t je čas, ℓ_{32} je skupenské teplo, λ_p je tepelná vodivost páry, Kn je Knudsenovo číslo, ΔT je podchlazení páry.

Nukleace a kondenzace v průtočné části mnohastupňové turbíny je počítána s použitím systému standardních rovnic zachování pro kondenzující páru [1].

Jako výpočtová metoda je použit statistický Lagrangeův přístup zahrnující 2D jevy. Metoda je založena na náhodném charakteru disipace v částici páry procházející vícestupňovou turbínou v závislosti na náhodně vybrané proudnici v jednotlivých lopatkových mřížích s daným rozložením polytropické účinnosti podél rozteče [18]. V jednotlivých částicích páry tak dochází k nukleaci za různých podmínek, což ovlivňuje strukturu kapek a výsledně se projeví v širokém spektru rozměrů. Náhodný charakter dráhy částice páry plyne z relativního pohybu satorových a rotorových mříží.

Jednotlivé uvedené nukleační modely byly postupně použity při simulačních výpočtech vývoje kapalné fáze v průtočné části sledované turbíny mezi místem vzniku kapek a místem měření extinkční sondou. Při výpočtech se respektovaly provozní podmínky (viz tabulka 4). Za míru shodnosti výsledků numerických simulací s měřenými daty $(I/I_o)_i$ byla zvolena střední odchylka:

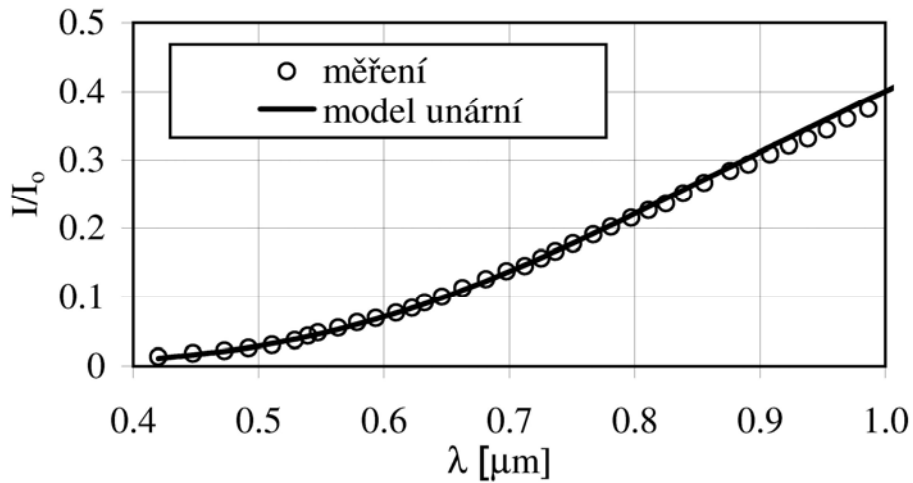
$$\varepsilon = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n [(I/I_o)_i - (I/I_o)_{mod,i}]^2} \quad (7)$$

kde: $(I/I_o)_{mod,i}$ je závislost poklesu intenzity světla stanovená podle rovnice (1) pro rozložení rozměrů $\Phi(D)_{mod}$ získané z modelového výpočtu a n je počet užitých vlnových délek světla ($n = 40$).

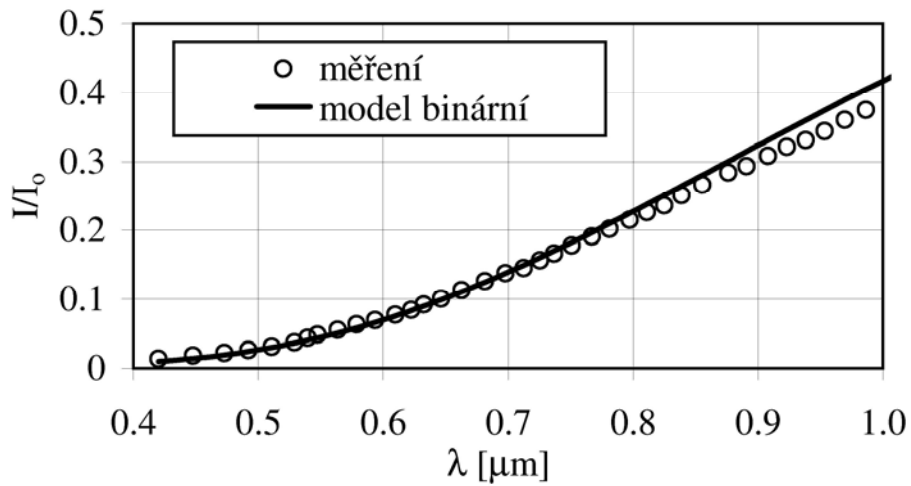
Měřený pokles intenzity světla $I/I_o(\lambda)$, byl pro testování modelů zvolen záměrně. Nese v sobě informaci o rozměrové struktuře kapek a na rozdíl od rozložení $\Phi(D)$ není zatížen chybou inverse špatně podmíněné soustavy rovnic (1).

Testování neúplných modelů nukleace má parametrický charakter. Sestává z minimalizace střední odchylky ε pomocí změn hodnoty „volitelných“ parametrů. Očekávaným výsledkem je stanovení modelu a odpovídající hodnoty „volitelného“ parametru, který zajistí nejlepší shodu počítaného a měřeného zeslabení intenzity světla na výstupu z NT dílu sledované turbíny.

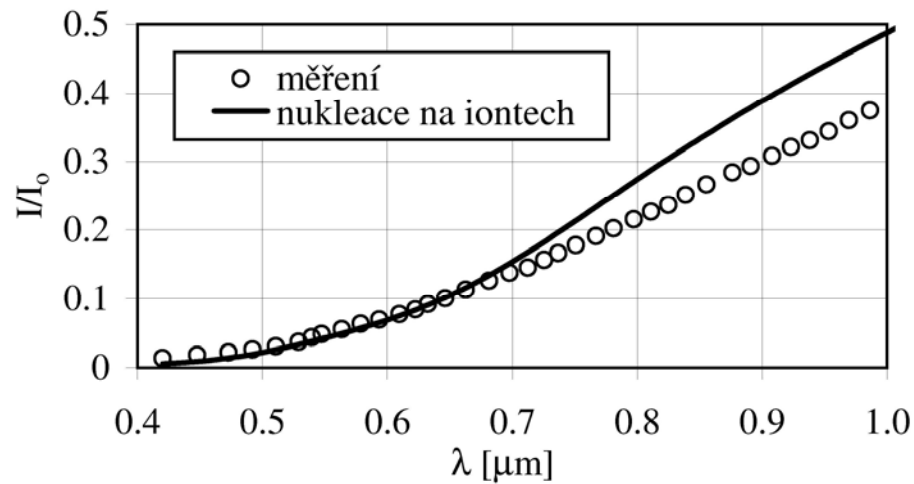
Jako příklad jsou na obrázcích 4 až 6 uvedeny výsledky, které byly získány pro nejlepší shodu každého použitého nukleačního modelu s měřeným poklesem intenzity světla $I/I_o(\lambda)$ v parní turbíně 1000 MW jaderné elektrárny Temelín [8].



Obr. 4



Obr. 5



Obr. 6

Tyto výsledky jsou doplněny porovnáním měřených a vypočtených hodnot středního Sauterova průměru D_{32} a počtu kapek N v tabulce 5. V tabulce jsou zároveň uvedeny i výsledné hodnoty střední odchylky ε a „volitelných“ parametrů testovaných nukleačních modelů.

Tabulka 5

	měření	model nukleace		
		unární	binární	na iontech
D_{32} μm	0.5296	0.536	0.477	0.505
N kg^{-1}	$2.35 \cdot 10^{15}$	$2.11 \cdot 10^{15}$	$3.31 \cdot 10^{15}$	$2.65 \cdot 10^{15}$
ε	-	0.0011	0.0023	0.0089
parametr modelu	-	dle (5)	„volitelný“	
		$\beta=1.4$	$kT \ln(S_2)=1.25 \cdot 10^{-19} \text{ J}$	$N_q=2.65 \cdot 10^{15} \text{ kg}^{-1}$

Uvedené výsledky naznačují, že všechny použité nukleační modely mohou v principu dát podobné hodnoty D_{32} a N a s výjimkou modelu nukleace na iontech i průběhy $I/I_0(\lambda)$. Nejlepší shoda modelu s experimentem, ve smyslu nejnižší hodnoty odchylky ε , byla dosažena při použití modelu unární nukleace.

Obdobné výsledky byly získány i při simulačních výpočtech vzniku kapalně fáze v průtočné části turbín 200 a 210 MW uhelných elektráren [18-20].

Za této situace je možné shrnout, že klasický model unární homogenní nukleace, jehož použití vyžaduje pouze jeden na tlaku závislý parametr β , určený podle rovnice (5), poskytuje přiměřenou shodu s experimentálními výsledky v turbínách. Při současném stavu znalostí o reálném nukleačním ději v průtočné části parních turbín může tedy sloužit jako užitečný nukleační model.

6. ZÁVĚR

Intenzita nepříznivých projevů mokré páry v průtočné části parních turbín je úzce spjata se strukturou polydispersní kapalně fáze. Znalost této struktury je nezbytná pro úspěšnou realizaci opatření potlačujících erozní a korozně erozní projevy i přídavné energetické ztráty vlhkostí. Je tedy klíčem k využití potenciálu pro zvyšování účinnosti a spolehlivosti parních turbín pracujících s mokrou párou.

Vznik kapalně fáze a její další vývoj probíhá v průtočné části parní turbíny v podmínkách složitěho 3D, vazkého a nestacionárního proudění. Výsledná struktura kapek je navíc pravděpodobně ovlivněna širokým spektrem příměsí páry. Přes trvalou snahu o pochopení fázového přechodu v parních turbínách a vytvoření jeho komplexního modelu se zahrnutím zásadních spolupůsobících faktorů je dosud praktická využitelnost numerických simulací pro stanovení struktury kapalně fáze značně omezena. Proto jsme při získávání údajů o reálné struktuře kapalně fáze v parních turbínách zatím odkázání především na výsledky experimentů. Jako vhodný nástroj se pro tento účel jeví optické měřicí systémy, např. extinkční sondy.

Pomocí extinkčních sond lze na parních turbínách, které za provozu umožňují přístup měřicí aparatury do průtočné části, získat údaje o reálné struktuře kapalně fáze mokré páry. Tyto údaje, tedy rozložení rozměrů a počet primárních kapek, jsou však vázány s provozními podmínkami, konstrukcí průtočné části, složením páry a oblastí měření. Jsou tedy unikátní a jejich využití, např. při stanovení vlhkosti páry a termodynamické účinnosti, je možné pouze pro danou turbínu. To potvrzují i měření extinkční sondou na dvou turbínách 210 MW a 1000 MW, která identifikovala zcela rozdílné struktury kapalně fáze, porovnaná v této přednášce. Vzhledem k rozdílnosti jednotlivých turbín tedy nelze získané poznatky o struktuře kapalně fáze volně zobecnit.

Výsledky extinkčních měření však poskytují jediný údaj o reálné struktuře kapalně fáze v turbínách. Představují tedy jedinečnou možnost pro ověřování modelů a výpočtových postupů vzniku a vývoje mokré páry v průtočné části mnohostupňové turbíny. Logickou podmínkou je zde respektování provozních podmínek v průběhu měření a geometrie stroje. Takto ověřené modely by měly mít obecnější platnost a najít uplatnění jak u existujících turbín, tak při návrzích nových turbín určených pro mokrou páru. V přednášce je uvedené využití dat z extinkčních měření stručně ukázáno na příkladu porovnání různých modelů nukleace. Nejlepší shoda s měřenou extinkcí byla dosažena při použití modelu unární homogenní nukleace. Pro řešení použita statistická Lagrangeova metoda dává s tímto modelem, za současného omezeného stavu znalostí o reálném nukleačním ději, nadějný nástroj pro modelování vzniku a vývoje kapalně fáze mokré vodní páry v parních turbínách.

LITERATURA

- [1] Moore, M.J., Sieverding, C.H. (1976). Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators. Mc Graw-Hill, New York.
- [2] Moisture Nucleation in Turbines (1997). Proceedings EPRI State-of-art Workshop (N.F. Rieger, R.B. Dooley, Eds.), EPRI TR – 108942, Rochester, N.Y. (1995).
- [3] Steam Chemistry, and Corrosion in the Phase Transition Zone of Steam Turbines. (1999). Vol. 1, Key Results, Summary and Interpretation, EPRI, Palo Alto, CA, TR – 108 184 – VI.
- [4] Gyarmathy, G. (1962). Grundlagen einer Theorie der Nassdampfturbine. Juris-Verlag, Zürich.
- [5] Petr, V., Kolovratník, M., Hanzal, V. (2003). Instrumentation and Tests on Droplet Nucleation in LP Steam Turbines. PowerPlant Chemistry (ISSN 1438 5325), V 5, N 7, 389-395.
- [6] Kolovratník, M., Hrubý, J., Ždímal, V. (2003). Využití nových metod měření aerosolů pro výzkum struktury heterogenních kondenzačních jader ve vodní páře, ÚT AV ČR, výzkumná zpráva Z-1334/2003.

- [7] Petr, V., Kolovratník, M. (2000). Měření kapalně fáze na turbíně 200 MW a 210 MW. Praha, ČVUT, Fakulta strojní, Z-533/2000.
- [8] Kolovratník, M., Petr, V. (2002). Vlhkost páry za koncovým stupněm turbíny 1000 MW. Praha, ČVUT, Fakulta strojní, Z-542/2002.
- [9] Stelz, W.G., Lee, P.K., Lindsay, W.T. (1983). The Verification of Concentrated Impurities in Low-Pressure Steam Turbines. *TASME J. of Engineering for Power*, 1, 192-198.
- [10] Svoboda, R., Pflug, H.D., Warneke, Th., Koebel, M. (2004). Investigations into the Composition of the Early Condensata in Steam. *VGB*, 11, 74-79.
- [11] Dibelius, G.H., Mertens, K., Pitt, R.U., Strauf, E. (1987). Investigation of Wet Steam Flow in Turbines. *Proceedings Inst. Mech. Engrs., Conference on Turbomachinery-Efficiency, Prediction and Improvement*, Cambridge, UK, 135-143.
- [12].Walters, P.T., Skingley, P.C. (1979). An Optical Instrument for Measuring the Wetness Fraction and Droplet Size of Wet Steam Flow in LP Turbines, *IMEchE Proceedings: Steam Turbines for the 1980's*, London, 337-348.
- [13] Ederhof, A. (1977). Bestimmung der Flüssigkeitsbeladung mit Tropfen von Zweiphasenein- bzw. -mehrkomponentenströmungen mittels Streulichtmessung, *Dissertation RWTH Aachen*.
- [14] Kolovratník, M., Petr, V. (2003). Kenntnis der Dampfnässestruktur - ein Schritt auf dem Weg zur Wirkungsgradsteigerung bei Dampfturbinen. *XXXV. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Turbomaschinen in Energieanlagen*, Dresden, V40 1-10.
- [15] Maršík, F., Bláha, J., Hrubý, J., Hošek, J., Sopuch, P. (1999). Condensation Waves in Fast Expansion of Steam with Admixtures. *Steam, Water and Hydrothermal Systems: Physics and Chemistry Meeting the Needs of Industry*, *Proceedings of the 13th International Conference on the Properties of Water and Steam* (Editors: Hill P.G. et. al), Toronto, NRC Press. Ottawa, 2000.
- [16] Matuszkiewicz, A. (1983). Stabilność termodynamiczna pary w polu elektrycznym jonow. *Zeszyty naukowe, IMP Gdansk PAN*.
- [17] Deitch, M. Je., Fillipov, G. A. (1981). *Fluid Dynamics of Two-Phase Flows*. Energoizdat, Moscow.
- [18] Petr, V., Kolovratník, M. (1999). Modelling of the Droplet Size Distribution in LP Steam Turbine. *3rd European Conference on Turbomachinery, ImechE Conference Transactions 1999-1B*, London, 771-782.
- [19] Petr, V., Kolovratník, M., (2001). Heterogeneous Effects in the Droplet Nucleation Process in LP Steam Turbines – *Proceedings: 4th European Conference on Turbomachinery, Firenze-Italy*, 783-792.
- [20] Petr, V., Kolovratník, M., (2003). Diagnostics of Wet Steam in LP Steam Turbines. – *Proceedings: 5th European Conference on Turbomachinery, Prague*, 687-698.

Ing. Michal Kolovratník, CSc.

Datum a místo narození	12.1.1960	Chrudim
Vzdělání	Ing. 1984	Fakulta strojní ČVUT v Praze
	CSc. 1993	obor stavba energetických strojů a zařízení FS ČVUT v Praze
Praxe	1985-88	aspirantura, FS ČVUT v Praze
	1988-	odborný asistent na Fakultě strojní ČVUT v Praze
Současné pracovní zařazení	odborný asistent na ústavu mechaniky tekutin a energetiky FS ČVUT v Praze	
Odborné zaměření	Energetika	
Užší specializace	zdroje energie, tepelné turbíny, tepelné oběhy, fázové přechody	

Výzkumné aktivity

Řešitel popř. spoluřešitel:

- grantu AV ČR reg.č. S2076010 Vývoj a ověření metod experimentálního zkoumání nestacionárního proudění a vlastností vodní páry v parní turbíně, 2000-2004,
- grantu GA ČR č.101/05/2524 Využití nových metod měření aerosolů pro výzkum struktury heterogenních kondenzačních jader v parní turbíně, 2005-2007.

Spolupracovník popř. vedoucí dílčího týmu při řešení:

- grantu GA ČR č.101/99/0625 Proudění stlačitelné tekutiny s interakcí homogenní a heterogenní kondenzace, 1999-2001,
- grantu GA ČR č.101/02/0364 Proudění vodní páry s příměsemi plynů a pevných částic, 2002-2004,
- projektu MPO č.FD-K/011 Vývoj parních turbín velkých výkonů 150-500 MW. KONZORCIUM, 2001-2003,
- projektu MPO č.FT-TA/085 Parní turbína s vysokou účinností TANDEM, 2004-2006.

Realizovaná díla:

- fotometrická sonda s křemíkovou optikou pro měření v parních turbínách,
- kombinovaná optická-nábojová sonda pro měření v parních turbínách,
- parní trať s Lavalovou dýzou pro výzkum fázového přechodu v expandující vodní páře.