



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ



KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI



JEDNOTLIVÝ PŘÍSPĚVEK ZE SBORNÍKU



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE ODSÁVÁNÍ SEPAROVANÉ VLHKOSTI V KONCOVÉM STUPNI PARNÍ TURBÍNY PŘI POUŽITÍ PORÉZNÍCH MATERIÁLŮ

BARTOŠ Ondřej, KOLOVRATNÍK Michal, PETR Václav

The aim of this paper is to present of the wetness separation research in the last stage of steam turbines with the use of porous metallic materials. The paper describes the experimental set-up for the testing the porous material in similar conditions which are in the steam turbine. The experiments with several porous materials helped to found a good sample for application in the steam turbine. In the second part of the paper preliminary results of a long term measurement in the steam turbine are presented.

Klíčová slova: Wetness separation, Steam turbine, Porous material

Úvod

Odsávání vodního filmu z povrchu rozváděcích lopatek koncového stupně parní turbíny (PT) s použitím odsávacích štěrbin představuje standardní opatření ke zmenšení eroze oběžných lopatek i přídavných ztrát vlhkostí páry. Nevýhodou použití odsávacích štěrbin je skutečnost, že společně s vodním filmem se odsává i značné množství páry, což způsobuje ztrátu ve formě snížení výkonu koncového stupně PT. Protože kapalná fáze nevytváří na povrchu lopatky souvislý vodní film, může docházet k odsávání převážně jenom páry, a tím i k zesílení uvedeného nepříznivého efektu.

Alternativním řešením, minimalizujícím nežádoucí odsávání páry, může být překrytí prostoru odsávacích štěrbin porézní kovovou vrstvou o významně větší šířce, než je šířka štěrbin. Při vhodné volbě parametrů porézní vrstvy a tlakového spádu může tato vrstva nasycená vodou zamezit odsávání samotné páry (v důsledku celkové adhezní síly) a naopak zajistit odsávání vodního filmu v důsledku vzniku kapilárního efektu společně s vhodně zvoleným tlakovým spádem [1].

K nezbytným vstupním informacím pro analýzu možností použití porézních vrstev pro odsávání kapalně fáze z povrchu rozváděcích lopatek koncového stupně PT, a případně i stěn skříně, patří ověření průtokových vlastností porézních vrstev a ověření životnosti porézních vrstev v podmínkách proudění mokré vodní páry v PT.

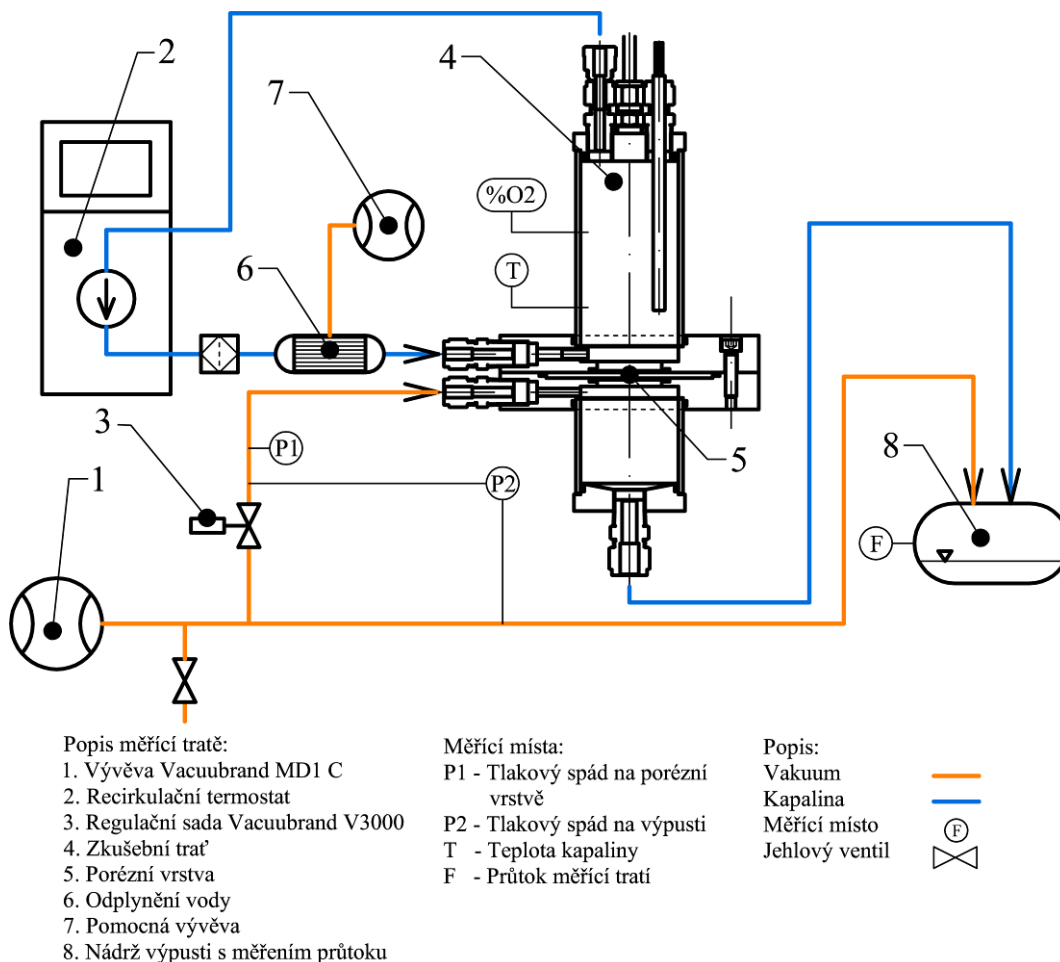
2. Popis laboratorního měření

Nově vyvinutá experimentální trať (viz obr. 1) byla navržena tak, aby bylo možné měnit v širokém rozsahu tlakový spád Δp na porézní vrstvě a tím přibližně simulovat podmínky v PT [3, 4]. Zároveň s tím bylo třeba udržovat konstantní teplotu protékajícího média. Měřicí trať umožňuje měření s vodou nebo se vzduchem. Pro určení průtoku kapaliny bylo použito vážní čidlo RS 632-736 pro rozsah 0-20 kg. Pro měření se vzduchem byl použit plynový průtokoměr Bronkhorst F-102E-AAD-33-V. Přes tento průtokoměr proudil vzduch z okolí nad porézní destičku. Pod porézní vrstvou byl nastaven požadovaný tlak.

Pro měření s vodou je nezbytné sledovat množství v ní rozpuštěných plynů z důvodu jejich možného vyloučení v porézní vrstvě a tím snížení jejího nasycení vodou. Průtokové charakteristiky porézní vrstvy lze vyjádřit permeabilitou K , kterou vyjádříme pomocí Darcyho zákona, pro zjednodušený případ laminárního průtoku ve vrstvě jako [6],

$$K = \frac{Vs\mu}{\Delta pA} \quad (1)$$

kde V je objemový průtok, s tloušťka vrstvy, μ dynamická viskozita a A průtočná plocha.



Obr. 1: Schéma upravené měřicí tratě

Měření obsahu rozpuštěného kyslíku v kapalině nad porézní vrstvou bylo prováděno sondou Hamilton Visiferm DO 160. Tato sonda využívá pro určení množství rozpuštěného kyslíku v kapalině změny optických vlastností luminiscenční vrstvy na koncentraci kyslíku. Měřicí trať byla dále vybavena modulem *Membrane contractor MiniModule 1,7x8,75* firmy Membrana pro kontinuální odstraňování rozpuštěných plynů z vody. Zapojením modulu do oběhu kapaliny se zajistilo velmi účinné odstranění rozpuštěných plynů. Nevýhodou byla nutnost použít pro modul pomocnou vývěvu.

3. Porézní vrstvy

Pro experimentální výzkum průtokových charakteristik porézních vrstev byla jako dodavatel zvolena firma GKN Sinter metals GmbH, která výrobky z porézních materiálů nabízí v širokém rozsahu permeabilit, technologií výroby, kovů a je schopna je realizovat v požadovaném tvaru [2]. Měřené vzorky porézní vrstvy měly tvar kulaté ploché destičky s průměrem 50 mm, resp. 35 mm, a s výškou 3mm. Příklad destiček je ukázán na obrázku 2. V experimentální trati byly testovány destičky z různých porézních materiálů s rozdílnou hodnotou permeability. Porézní vrstva, jejíž výsledky jsou v tomto příspěvku zmíněny, byla vybrána na základě zkušeností z úvodních experimentů. Její průměr byl snížen z 50 na 35 mm, aby se dala lépe implementovat do nosičů pro dlouhodobé expozice a měření v turbínách. Tento porézní materiál je uváděn pod názvem SIKA-R1-AX, permeabilita je $K=1.3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$. Všechny porézní vrstvy byly zhotoveny z nerez oceli 1.4404 (AISI 316L).



Obr. 2: Destičky porézního materiálu

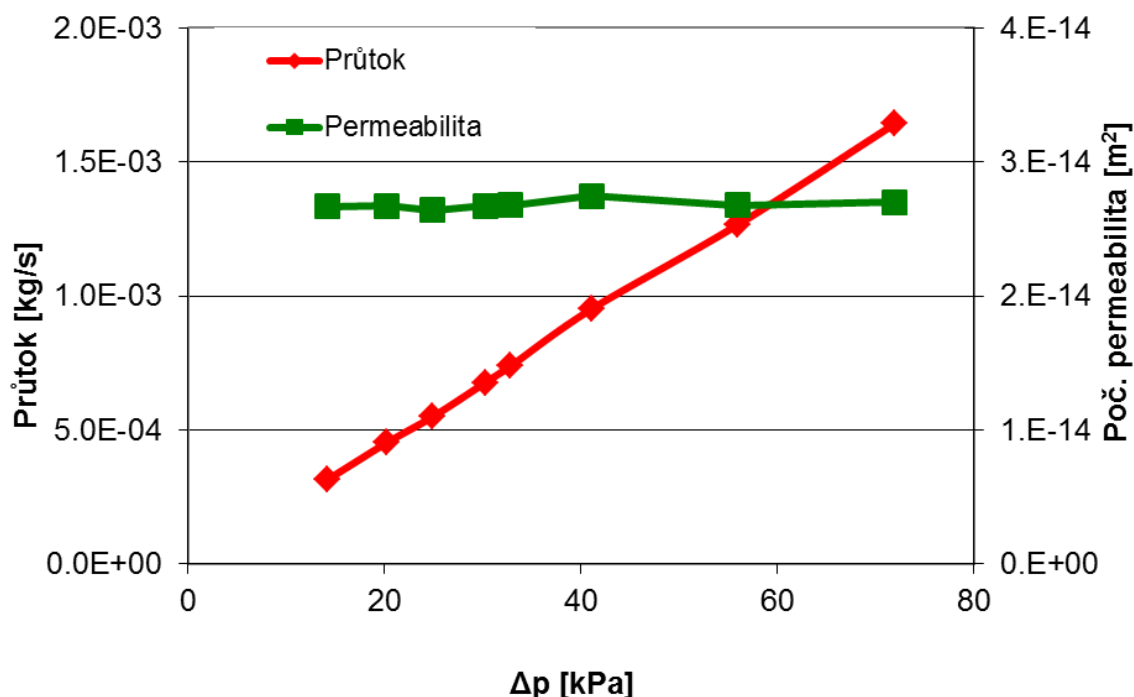
4. Výsledky měření s porézní vrstvou

Měření v experimentální trati probíhalo po ustálení parametrů, tj. teploty a tlaku vody a množství plynů rozpuštěných v protékající vodě. Data byla zaznamenávána pomocí měřicího systému NI SCXI a dále zpracována pro vyhodnocení ustáleného stavu.

Na obrázku 3 je uveden příklad měření hodnoty průtoku porézní vrstvou a vypočítaná permeabilita. Z průběhů je zřejmé, že se zvyšujícím se tlakovým spádem Δp průtok vody vrstvou lineárně roste, zatímco vypočítaná permeabilita je prakticky konstantní. Toto měření bylo prováděno při teplotní hladině $\sim 77^\circ\text{C}$ pro různé tlakové spády. V průběhu měření byl postupně měněn tlak pod vrstvou tak, aby bylo dosaženo tlaku nižšího, než je tlak sytosti pro danou teplotu. V daném případě byl tlak sytosti přibližně 42kPa. Dosažení hlubšího vakua je problematické vzhledem k možnosti nežádoucího proniknutí kapaliny do vývěvy.

Pro podrobnější zmapování vlastností porézní vrstvy byla obdobná měření jako s vodou provedena také se vzduchem. Díky těmto měřením bylo možné provést porovnání permeability

vzorku porézní vrstvy před a po expozici v parní turbíně. Z výsledků vyplynulo, že hodnota permeability vypočítaná z měření se vzduchem je obdobná jako pro měření s vodou.



Obr. 3: Průběh měřeného průtoku a vypočítané permeability v závislosti na tlakovém spádu

5. Diskuze měření

Náhrada původního termického odplynění vody odplyňovacím modulem firmy Membrana v experimentální trati přinesla výrazné ustálení parametrů a zpřesnění výsledků. Při měřeních s vodou s postupným snižováním tlaku nebyl ani po překročení parametrů sytosti zaznamenán v použitém rozsahu tlaků a teplot pokles průtoku vrstvou způsobený vývinem parní fáze v odsávané syté kapalině.

Použitá porézní vrstva vykazuje přibližně stejnou permeabilitu při měřeních s vodou a se vzduchem [5]. Shoda měřených permeabilit u této vrstvy s údaji výrobce však nebyla dosažena. Měřené hodnoty jsou zhruba o řád nižší. Na základě stále shodných výsledků mnohonásobně opakovaných měření je však možné se domnívat, že naměřené údaje jsou správné. Z těchto údajů se také vycházelo při volbě porézní vrstvy pro zkušební expozici v turbíně na elektrárně Počerady.

6. Měření v PT 200 MW

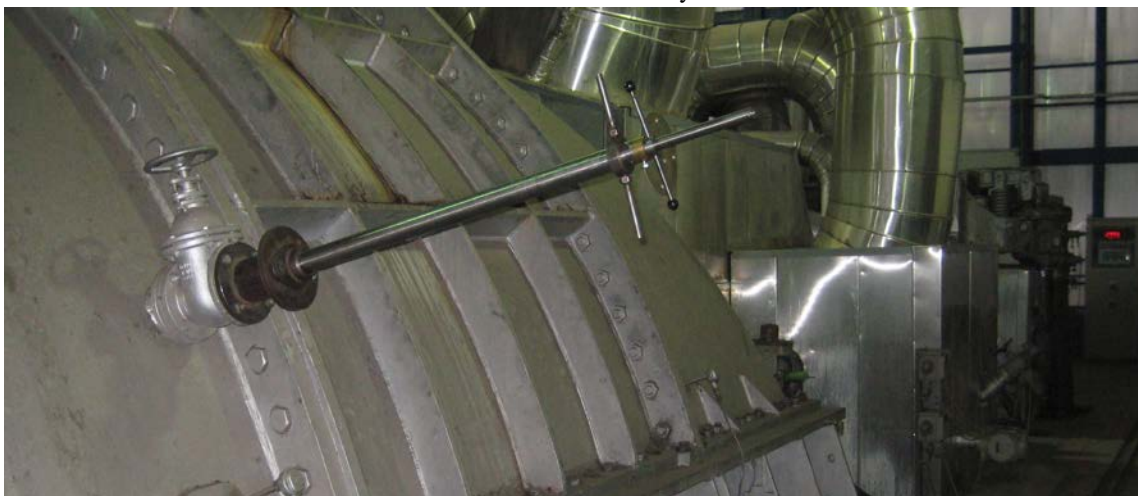
Ze vzorků porézních materiálů dlouhodobě testovaných v laboratorních podmínkách byl vybrán vzorek vrstvy pro expozici v průtočné části NT dílu parní turbíny 200 MW na elektrárně Počerady. Blok č. 3 této elektrárny byl zvolen proto, že jeho NT díl je trvale osazen přístupovými porty pro vkládání sond do prostoru koncového stupně NT dílu. Tyto porty také umožnily vložení vzorku porézního materiálu za poslední stupeň NT dílu.

Pro tento účel byla vyvinuta a realizována sonda s průměrem 51 mm a délkou 3m jako nosič porézní vrstvy. Sonda může být provozována jako pasivní, kdy vzorek je exponován pouze na vnějším povrchu dopadem proudu mokré páry, ale nedochází přes něj k aktivnímu odsávání.

Druhou variantou je aktivní provoz sondy, při kterém je na vnitřní straně vzorku vyvolán podtlak externím zdrojem vakua a v důsledku toho proudí mokrá pára přes porézní vrstvu a následně je odsávána z turbíny. Pohled na sondu při přípravě a po vložení do turbíny je uveden na obrázcích 4 a 5.



Obr. 4: Hlavice sondy



Obr. 5: Měření v parní turbíně

Na elektrárně Počerady se díky vstřícnému přístupu personálu podařilo zajistit 14ti denní kontinuální měřicí kampaň, při které byl kruhový vzorek porézní vrstvy (průměr vzorku 35 mm, tloušťka 3 mm) trvale exponován v proudu mokré páry ~200 mm za odtokovou hranou oběžné lopatky posledního stupně NT ve vzdálenosti 600 mm od paty lopatky. S ohledem na nemožnost personálního zajištění trvalé kontroly měřicí aparatury, bylo měření realizováno jako pasivní.

7. Výsledky měření vzorku před a po expozici v turbíně

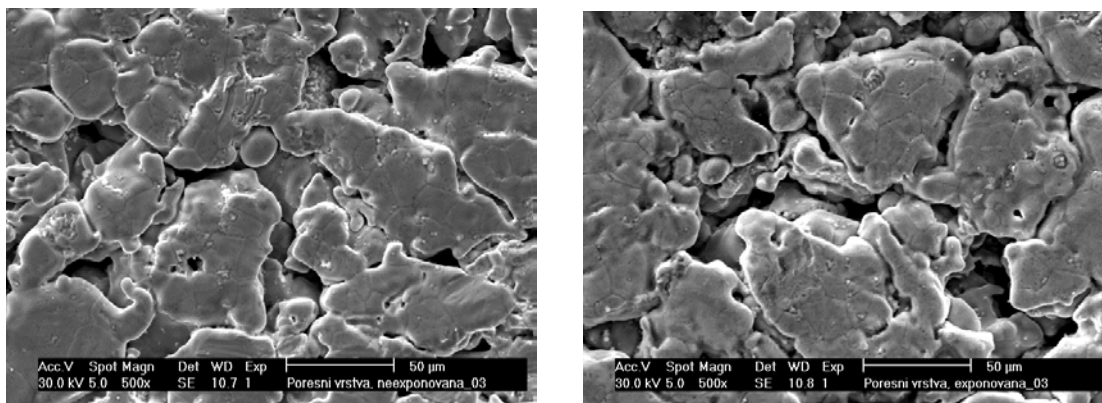
Vybraný vzorek byl velmi podrobně mapován před měřením a následně i po expozici v turbíně.

Je možné konstatovat, že po vyjmutí z turbíny vykazoval vzorek zvýšení hmotnosti asi o 10%, neboť póry byly zaplněny vodou. Po vysušení však bylo dosaženo původní hmotnosti vzorku, stanovené před vložení do turbíny.

Vizuální porovnání povrchu vzorku před a po expozici v turbíně dokumentuje následující dvojice snímků z elektronového mikroskopu na obrázku 6. Na pravém snímku je možné při zvětšení 500x pozorovat drobná poškození povrchu některých zrn, která mohou být způsobena korozními procesy při expozici v turbíně.

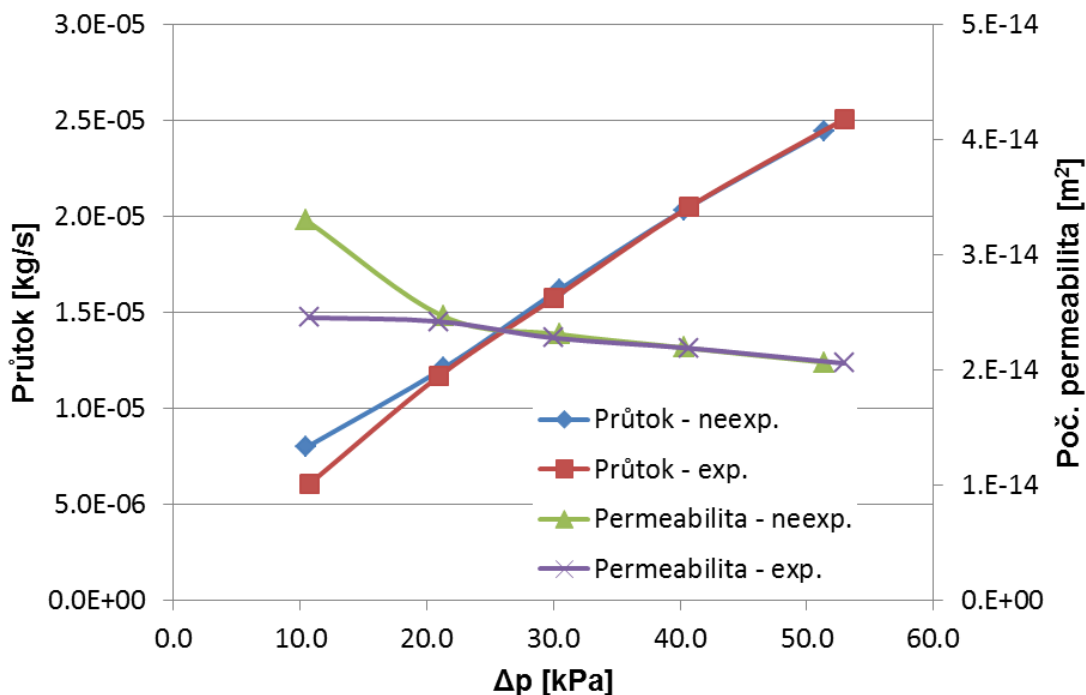
Laboratorní kontrola permeability zkoušeného vzorku před a po expozici v turbíně ukázala, že 14denní expozice v mokré páře propustnost vzorku neovlivnila. Porovnání měřených průtoků a

vypočítaných permeabilit pro vzorek porézní vrstvy před a po expozici v turbíně usnadňuje obrázek 7.



Obr. 6: Povrchy vzorku porézní vrstvy na snímku z elektronového mikroskopu, zvětšení 500x

Vzorek porézní vrstvy změřený v laboratorních podmínkách nevykázal významnou změnu sledovaných parametrů před a po 14denní expozici v PT. Z průběhů na obrázku 7 není patrný rozdíl, který by ukazoval na změnu průtokových vlastností vrstvy.



Obr. 7: Průběhy měřeného průtoku a vypočítané permeability pro porézní destičku před a po expozici v turbíně

Všechny komparační kontroly provedené prostým i mikroskopem vyzbrojeným okem a měřením propustnosti i hmotnosti vzorku tedy nevykázaly patrný vliv 14denní přímé expozice vzorku v mokré páře na její povrchové strukturu a s ohledem na nezměněnou propustnost se zřejmě neprojeví ani na struktuře vnitřní.

Je známo, že i v oblasti posledních stupňů kondenzačních parních turbín, tedy v průtočné části protékané mokrou parou, dochází k vytváření nánosů a dlouhodobých úsad. Právě tyto úsady jsou, vedle možného mechanického poškození, jedním z potenciálních nebezpečí pro aplikaci porézních materiálů v průtočné části turbíny, neboť představují riziko postupného zanášení

mikropórů v porézní struktuře. Ačkoliv toto riziko nebylo možné ve výše popsaném 14denním provozním testu v turbíně ověřit, není ho možné ani vyloučit. Proto konečné rozhodnutí o zanášení porézních materiálů, resp. jeho intenzitě, bude možné provést až na základě dlouhodobých testů.

Pokud by výrobci turbín projevíli zájem porézní materiály v průtočné části turbín ať už na stěnách či na lopatkových profilech skutečně aplikovat, bude nezbytné výrazně prodloužit periodu zkušebních expozicí, pro získání časově relevantních informací o případných změnách charakteristik porézních vrstev při dlouhodobém provozu v podmínkách proudění mokré páry.

V rámci řešeného projektu nebylo možné takové dlouhodobé testy realizovat, byla však vyvinuta a vyzkoušena instrumentace pro jejich provedení.

Závěr

Pro výzkum separace vlhkosti při použití porézních materiálů v posledním stupni PT byla postavena experimentální trať pro ověřování jejich vlastností. Parametry tratě umožňují posuzovat porézní vrstvu v podobných podmínkách, jaké jsou v reálné PT. Z výsledků experimentů s různými porézními vrstvami byla vybrána vrstva pro déletrvající zkoušky v PT s cílem ověřit reálnost dlouhodobého nasazení porézních materiálů v průtočné části PT. Následně byla realizována sonda umožňující pasivní i aktivní expozici vzorků porézních vrstev v průtočné části parních turbín. Sonda byla testována s vybraným vzorkem v kontinuálním 14denním testu v mokré páře v oblasti za posledním stupněm NT dílu turbíny 200 MW bloku TG3 na elektrárně Počerady. Na základě porovnání průtokových charakteristik vzorku měřeného před a po expozici v turbíně na laboratorní trati a na základě vizualizací povrchu vzorku lze konstatovat, že expozicí nebyly vlastnosti porézního vzorku prakticky ovlivněny.

Autoři doporučují i v dalším období pokračovat ve výzkumu porézních vrstev zaměřeném na jejich aplikace v parních turbínách. Základní náplň pro návazné práce lze shrnout do následujících bodů:

- výzkum odsávání vlhkosti na vhodné experimentální turbíně
- dlouhodobé ověřovací testy porézních materiálů v PT
- aplikace modelu dvoufázového proudění v porézní vrstvě pro stanovení vhodných vlastností porézních materiálů - především permeability, která by ve vybraných částech NT dílů PT zajistila odsátí potřebného množství separované vlhkosti.

Literatura

- [1] Bohn D., Rahut Ch.: *Experimental Investigation of Open – Porous Metallic Foams for Water– Extraction in Low – Pressure Steam Turbines*. Conference Proceedings, 8th European Conference on Turbomachinery 2009, Graz-Austria, pp. 1157-1165.
- [2] GKN Sinter Metals: *Filter-Elemente*. Firemní katalog porézních materiálů.
- [3] Petr V., Kolovratník M., Bartoš O.: *Odsávání separované vlhkosti v koncovém stupni parní turbíny - I. část*. Zpráva FS ČVUT v Praze, Ústav mechaniky tekutin a energetiky, Z-570/2009, Praha 2009.

- [4] Petr V., Kolovratník M., Bartoš O.: *Odsávání separované vlhkosti v koncovém stupni parní turbíny - II. část.* Zpráva FS ČVUT v Praze, Ústav mechaniky tekutin a energetiky, Z-573/2010, Praha 2010.
- [5] Petr V., Kolovratník M., Bartoš O.: *Odsávání separované vlhkosti v koncovém stupni parní turbíny - III. část.* Zpráva FS ČVUT v Praze, Ústav energetiky, Z-576/2011, Praha 2011.
- [6] Pinder G.F., Gray W.G.: *Essentials of Multiphase Flow and Transport in Porous Media.* John Wiley and Sons, Inc., 2008.

Poděkování

Tento výzkum byl realizován s podporou projektu MPO FR-TIP/458.

Ing. Ondřej Bartoš, PhD., ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav energetiky, Technická 4, Praha 6, 166 07, +420 224352543, ondrej.bartos@fs.cvut.cz
Doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc., ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav energetiky, Technická 4, Praha 6, 166 07, +420 224352540, michal.kolovratnik@fs.cvut.cz
Prof. Ing. Václav Petr, DrSc., ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav energetiky, Technická 4, Praha 6, 166 07, +420 224352539, vaclav.petr@fs.cvut.cz