

EMPIRIČNI MODEL KONVEKTIVNEGA PRENOSA TOPLOTE V ROTIRAJOČI AKSIALNI KASKADI

Mitja MORI, Mihael SEKAVČNIK

POVZETEK

V prispevku je predstavljena metoda sklapljanja numeričnih in eksperimentalnih rezultatov ter empirični model konvektivnega prenosa toplote v rotirajoči aksialni kaskadi. Metoda predstavlja kombinacijo uporabe infrardeče termografije in numerične simulacije in je uporabna v rotirajočih okoljih, ki so sicer zelo problematična za izvajanje kakršnih koli meritev zaradi težke dostopnosti. Metoda pomeni znatno poenostavitev pridobitve porazdelitve Nusseltovih števil po opazovani površini in tako omogoča študij konvektivnega prenosa toplote. Temperatura opazovane površine je merjena z IR termografijo. Eksperimentalno pridobljene temperaturne porazdelitve so ovrednotene z numerično dobljenimi z uporabo statistične metode. Za izračun Nu števila je nadalje uporabljen numerično izračunan toplotni tok in izmerjena temperaturna porazdelitev, ob znani geometriji aksialne kaskade. Rezultati so prikazani v obliki 2D porazdelitve Nu števil za različne tokovne razmere (Re) in pri različnih rotacijskih hitrostih (Ro). Izpeljan je empirični model, ki podaja odvisnost porazdelitve Nu števil od vpliva rotacije (Ro) in tokovnih razmer (Re).

ABSTRACT

This paper presents a method of combining numerical and experimental results and empirical model for convective heat transfer in rotating axial cascade. The method is a combination of infrared thermography and numerical simulations and is useful in rotating environments, which are highly problematic to implement any measurement. The method represents a considerable simplification of the acquisition of the distribution of Nusselt numbers at the observed surface and allows the study of convective heat transfer. The observed surface temperature is measured by infrared thermography. Experimentally obtained temperature distributions are evaluated by numerically obtained by using statistical method. To calculate the Nu number is further used numerically calculated heat flux and measured temperature distribution for the known geometry of the axial cascade. The results are presented as a 2D distribution of Nu numbers for different flow conditions (Re) and at different rotational speeds (Ro). The empirical model is derived, which gives the dependence of Nu number distribution from the influence of rotation (Ro) and flow conditions (Re).

1. UVOD – UPORABA IR TERMOGRAFIJE V ROTIRAJOČIH OKOLJIH

Študije konvektivnega prenosa toplote na rotirajočih merilnih objektih so v literaturi zastopane v manjšem obsegu kot študije prenosa toplote na stacionarnih merilnih objektih. Glavni razlog je slabša dostopnost merilne opreme v področje merilnega objekta z rotirajočimi površinami, omejen optičen dostop in težave pri uporabi različnih merilnih metod, zajema izmerkov in njihove nadaljnje obdelave. Večina objavljenih študij je bila najpogosteje izvedena na hitro rotirajočih kolutih v mirujočem zraku [1] - [3], hitro rotirajočih kolutih na katere je brizgan curek zraka [1] in znotraj 180° rotirajočih »U« pravokotnih kanalov [1], [3].

Na *rotirajočih kolutih* so bile raziskave usmerjene v študij odvisnosti prenosa toplote od prehoda iz laminarnega v turbulentni tok na podlagi Reynoldsovega in Nusseltovega števila in študij nekaterih tokovnih fenomenov ob robu koluta [1], [3]. V določenih študijah je pred rotirajoč kolut postavljen stator, ki omogoča dodatne študije interakcij med statorjem in rotorjem ter vpliv le-teh na konvektivni prenos toplote oz. porazdelitev Nusseltovih števil [3]. Tako se je pokazalo, da prisotnost statorja povzroča večje vrednosti Nusseltovih števil na rotirajočem kolutu glede na rotirajoč kolut v mirujočem zraku, kar je posledica tokovnih razmer, ki se formirajo znotraj reže med rotorjem in statorjem.

Študije konvektivnega prenosa toplote so v primeru *rotirajočih 180° pravokotnih U kanalov* še posebej zanimive, saj je z njimi možno neposredno simulirati tokove znotraj konvektivno hlajenih rotirajočih turbinskih lopatic [1], [4]. Cilj teh študij je bilo ovrednotiti konvektivni prenos toplote na posameznih segmentih sten znotraj pravokotnega kanala na podlagi porazdelitve Nusseltovih števil. Pokazano je bilo, da rotacija vpliva na povečanje Coriolisovih in vzgonskih sil, kar povzroča popolnoma drugačno porazdelitev Nusseltovih števil glede na primer brez rotacije.

V nasprotju s predstavljenimi študijami na zelo enostavnih geometrijah, pa je v primeru predstavljene študije obravnavan *konvektivni prenos toplote na površini rotirajoče rotorske lopatice* [5] - [8]. Dodatno je bil ovrednoten vpliv značilnih tokovnih parametrov, merilne metode in rotacije na konvektivni prenos toplote. Rezultati študije so uporabni za primer konvektivno hlajenih lopatic plinske turbine s poudarkom vpliva glavnega zunanjskega toka na prenos toplote.

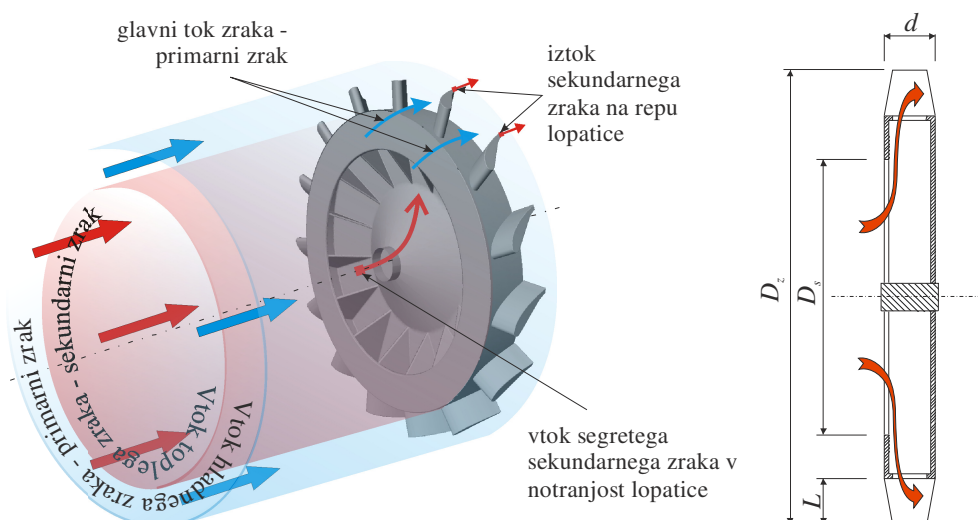
2. EKSPERIMENT

Študij konvektivnega prenosa toplote smo izvedli v nizko-temperaturnem preizkuševališču znotraj aksialne rotorske kaskade, katere kanal ima difuzorsko obliko. Nizko-temperaturna preizkuševališča nam ob ustrezni brezdimenzijski analizi omogočajo enako kvalitativno obravnavo kot visoko temperaturna, [9]. Prenos toplote je bil vzpostavljen v sistemu zrak-zrak (Slika 1), saj se spreminjanje termodinamskih lastnosti dimnih plinov s spremljanjem

temperature in tlaka podreja enakim zakonom kot spreminjanje lastnosti zraka, [11]. Poleg tega je presežek zraka v dimnih plinih plinskih turbin reda velikosti 4, [11].

Shema glavnih tokov v sistemu:

Glavne dimenzije rotorja:

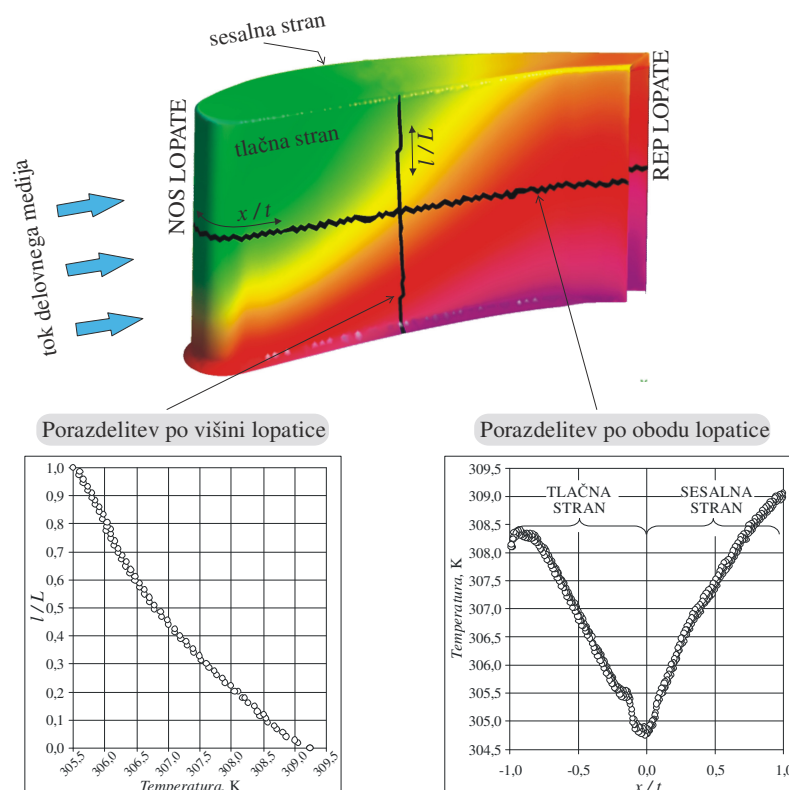


Slika 1: Sistem primarnega ter sekundarnega zraka in glavne dimenzije rotorja

Merilna postaja sestoji iz dveh cevovodov za dotok primarnega in sekundarnega zraka (Slika 2). Tok primarnega zraka je zagotovljen z ustrezno izbiro rotorja, ki je aksialni ventilator, medtem ko za zadosten dotok sekundarnega zraka skrbi dodaten radialni ventilator. Aksialni ventilator je gnan z elektromotorjem, ki je krmiljen s frekvenčnim regulatorjem, kar nam omogoča zvezno spreminjanje vrtljajev rotorja od mirovanja do nazivnih vrtljajev elektromotorja (1500 min^{-1}). Masni tok primarnega zraka smo regulirali z vrtilno hitrostjo rotorja. Elektromotor radialnega ventilatorja je prav tako krmiljen s frekvenčnim regulatorjem, kar nam omogoča zvezno nastavitev masnega toka sekundarnega zraka v območju dobavnih količin ventilatorja. Kot za vzpostavitev prenosa toplote je potrebno segrevati sekundarni zrak, ki ga grejemo z uporabo električnega grelnika moči 2000 W , ki je vstavljen v tok sekundarnega zraka in krmiljen z variakom, s katerim imamo možnost spreminjati dovedeni toplotni tok sekundarnemu zraku.



Izbira ustreznega merilnega sistema je tesno povezana z značilnostmi opazovanih površin ter zahtevami delovanja merilnega sistema. Izkaže se, da je v primeru določanja temperaturne porazdelitve na opazovanih rotirajočih površinah turbinskih strojev zelo primerna infrardeča termografija. Značilnosti opazovanih površin so opisane z velikostjo opazovane površine, njeno oddaljenostjo, značilnostjo gibanja in pričakovanim temperaturnim razponom. Značilnosti IR merilnega sistema pa so popisane s temperaturno ločljivostjo, integracijskim časom zajemanja celotne slike, formatom oz. velikostjo slike, itd [1]. Pri uporabi IR kamere je potrebno biti pozoren na **absorpcijo** in **refleksivnost** vpadnega sevanja. Oddaljenost optike IR kamere od opazovane površine (rotorska lopatica) v primeru našega preizkusa je 730 mm, tako da je absorpcija zanemarljiva in je nismo upoštevali pri vrednotenju rezultatov, [12]-[14]. Pojavo refleksije oziroma odbitega sevanja smo se izognili z antirefleksnim premazom (mat črno barvo) na vseh relevantnih površinah, [15].



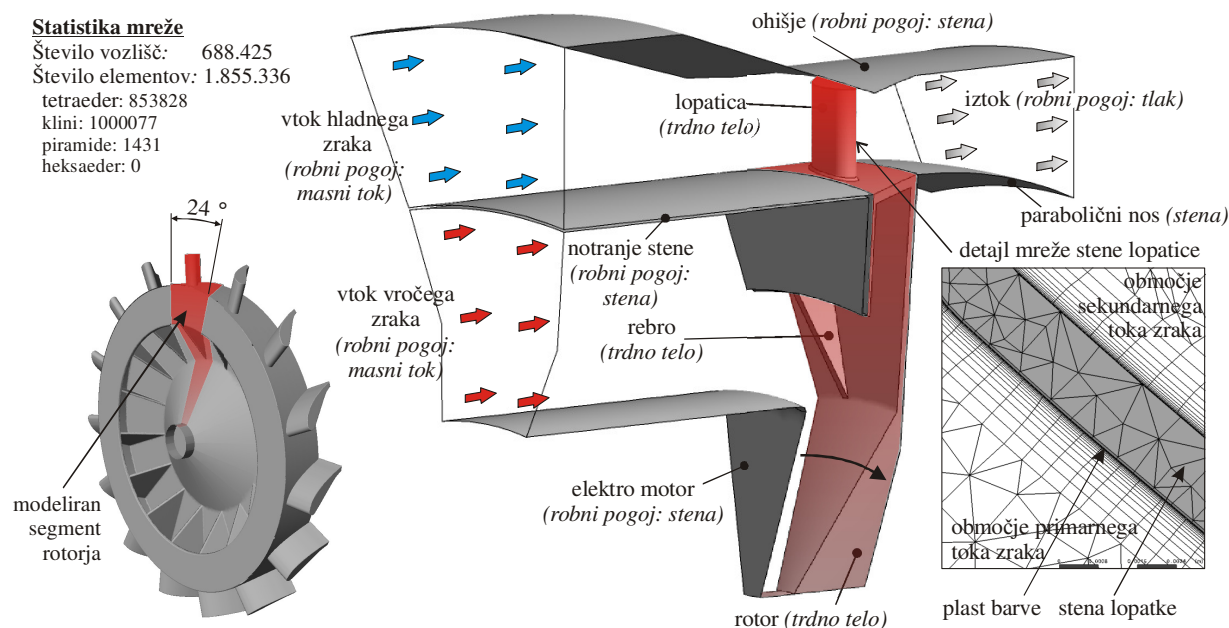
Slika 3: Porazdelitev temperature na površini lopatice

2.2 Numeričen Eksperiment

Geometrija numeričnega modela (Slika 4) je bila modelirana glede na tokovne razmere in geometrijo rotorja ter preizkuševališča. Geometrija rotorja je bila modelirana zelo natančno vključno s sekundarnimi in primarnimi tokovi in rezo med okrovom in vrhom lopatice. Uporabljena je bila nestrukturirana mreža sestavljena iz tetraedrov in prizem. Prizmatični elementi so bili uporabljeni na omočenih površinah rotorja, kjer mejna plast igra pomembno vlogo pri prenosu toplote. Na površini lopatice in pesta je bil generiran dodaten sloj prizmatičnih elementov, s katerim smo modelirali tanek sloj barve, [5]. Preverjenih je bilo več mrež z različno gostoto elementov ob steni. Preizkus mrež je bil namenjen predvsem primerjavi metod obravnave razmer ob steni (stenske funkcije in metoda nizkega Re). Ker so bile med rezultati izračunov po obeh metodah bistvene razlike, ter zaradi dejstva, da so stenske funkcije v splošnem znane kot manj natančna metoda, so bile v nadaljevanju uporabljane le mreže, primerne za metodo nizkega Re , [8]. Na podlagi priporočil raziskave [16] in testiranj različnih gostot mreže [6] je bil izbran model nizkih Re števil in mreža velikosti 1,85 milijona elementov.

Robni pogoji so bili izbrani tako, da bi se čimbolj približali dejanskim razmeram v preizkuševališču. Primarni in sekundarni tok zraka sta bila nastavljena kot masna tokova z aksialno smerjo vtoka. Vstopne temperature so bile nastavljene glede na izmerjene temperature. Robni pogoj na iztoku je bil nastavljen kot statični tlak. Stene so bile modelirane

kot hidravlično gladke. Razen sten rotorja in lopatice je bil robni pogoj na vseh stenah adiabatna stena, kar sicer ni popolnoma v skladu z realnimi razmerami, a ima skoraj zanemarljiv vpliv na opazovane stene rotorske lopatice. Celoten numerični model je bil simuliran kot rotirajoč, z nastavitvami rotacijske hitrosti glede na preizkus. Tekočina v modelu je bila idealen zrak s konstantnimi transportnimi lastnostmi. Material rotorja pa je bilo jeklo toplotne prevodnosti 60,5 W/mK.



Slika 4: Numeričnega modela z ustreznimi robni pogoji

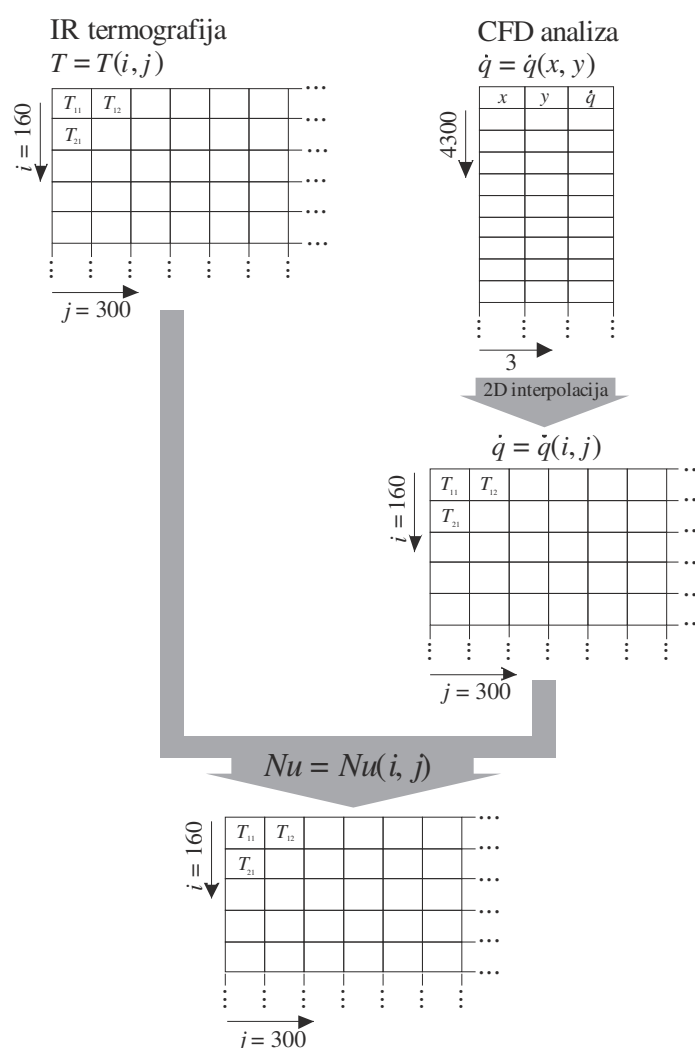
Kriterij konvergence je bil dosežen, ko so vrednosti maksimalnih ostankov enačb o zakonu o ohranitvi mase, gibalne količine in energije padle pod vrednost $1 \cdot 10^{-3}$. To je bilo doseženo med 150 in 200 iteracijami.

3. REZULTATI

3.1 Metoda spajanja eksperimentalnih in numeričnih rezultatov

Rezultat eksperimentalnega dela so bile 2D temperaturne porazdelitve za vse obratovalne točke. Splošna uporabnost rezultatov zahteva dodatno brezdimenzijsko analizo. Na področju prenosa toplote v turbinskih strojih to pomeni 2D ali 1D porazdelitev Nusseltovega števila po opazovani površini ali liniji (največkrat sredina višine lopatice pomeni referenčno lokacijo za študij razmer na lopatici). Ker je v primeru predstavljene merilne postaje in aksialnega rotorja toplotni tok nemogoče izmeriti brez velikih dodatnih posegov v merilno postajo in rotor, uporabimo vrednosti toplotnega toka iz vzporedne numerične študije. Statistično pokazano ujemanje rezultatov temperaturnih porazdelitev med izmerjenimi in izračunanimi

temperaturnimi porazdelitvami nam služi kot predpogoj za spajanje rezultatov dobljenih na podlagi različnih pristopov (eksperimentalnega, numeričnega). Tako za nadaljnjo obravnavo problema in izvedbo brezdimenzijske analize kombiniramo oz. spojimo izmerjene temperature z izračunanimi vrednostmi toplotnega toka z uporabo programske kode napisane v programskem okolju Matlab 7. Tako smo spojili rezultate IR meritev in rezultate numerične analize ter rezultate prikazali v brezdimenzijski obliki 1D in 2D porazdelitve Nusseltovih števil. Princip spajanja rezultatov je prikazan na sliki 5.



Slika 5: Metoda spajanja numeričnih in eksperimentalnih rezultatov

V prvem koraku koda spremeni signal IR kamere v temperaturnega glede na kalibracijske podatke v postopku umerjanja IR kamere, nadalje IR sliko ustrezno obrne in iz celotne IR slike, kjer je lopatica z vso okolico (okrov, obroč), izloči le območje obravnavanega dela lopatice (matrika rezultatov se zmanjša). V naslednjem koraku prebere podatke o vrednosti porazdelitve toplotnega toka iz naslova numerične analize. Ker je numerični model, 3D model, in rezultati izračunani v 3D koordinatnem sistemu, jih je potrebno najprej

transformirati v 2D koordinatni sistem, ki je uporabljen pri IR meritvah. To je izvedeno v okviru CFD analize v programskem okolju ANSYS CFX 11 [17]. Koda nadalje prilagodi in interpolira matriko rezultatov dobljenih z numerično analizo glede na matriko rezultatov IR meritev kot je shematično prikazano na sliki 5. V zadnjem koraku izračuna toplotno prestopnost na površini lopatice po en. 1 in na podlagi toplotne prevodnosti za zrak [18] pri parametrih okolice in geometrije lopatice, izračuna še porazdelitev Nusseltovega števila po en. 2. Rezultati so prikazani v obliki 2D porazdelitve.

$$\alpha_{(i,j)} = \frac{\dot{q}_{(i,j)num}}{T_{(i,j)} - T_z} \quad (1)$$

$$Nu_{(i,j)} = \frac{\alpha_{(i,j)} \cdot t}{\lambda} \quad (2)$$

V en. 1 in en. 2 i in j pomenita določeno točko v matriki rezultatov, t je tetiva lopatice, α toplotna prestopnost na površini lopatice in $\dot{q}_{(i,j)num}$ numerično izračunana vrednost toplotnega toka. Ko imamo izračunano porazdelitev Nusseltovega števila po površini tlačnega dela rotorske lopatice za vse obratovalne točke, lahko naredimo podrobnejšo analizo vpliva značilnih parametrov na konvektivni prenos toplote oz. na porazdelitev Nusseltovega števila.

Metoda spajanja oz. kombiniranja eksperimentalnih rezultatov z numeričnimi je bila razvita za primer študije konvektivnega prenosa toplote na površinah do katerih imamo zelo omejen dostop, [7]. To so visoko temperaturna okolja ali rotirajoči se stroji oz. njihovi deli. Plinske turbine spadajo v obe naštetih kategoriji.

3.2 Model vpliva Reynoldsovega in rotacijskega števila

Matrika eksperimenta

Na diagramu na sliki 6 so obratovalne točke definirane z uporabo brezdimenzijskega Reynoldsovega (Re) in rotacijskega števila (Ro) ob konstantnem masnem razmerju med sekundarnim in primarnim zrakom, $\chi = 2,70$ (en. 3). Re (en. 4) in Ro (en. 5) sta izračunana na podlagi merjenih obratovalnih parametrov in ustreznih snovnih lastnosti za zrak za posamezno obratovalno točko. Vse snovne lastnosti za zrak so računane po F. Brandt, [18].

Masno razmerje med sekundarnim in primarnim tokom zraka

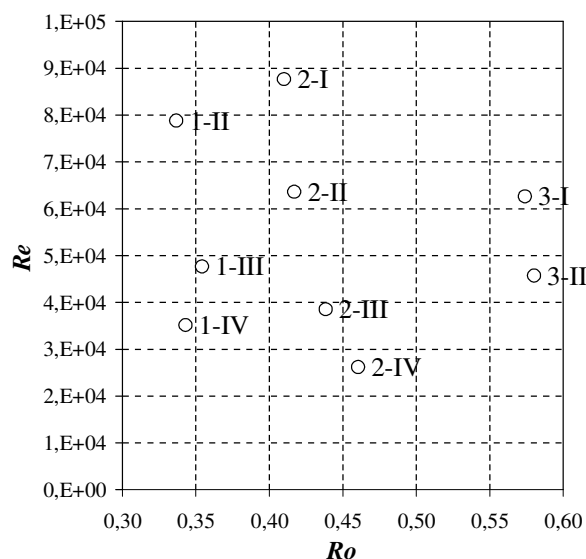
$$\chi = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} = 0,027 \quad (3)$$

Reynoldsovo število (vpliv tokovnih razmer)

$$Re = \frac{\bar{v}_{z,p} \cdot t}{\nu} \quad (4)$$

Rotacijsko število (vpliv rotacije)

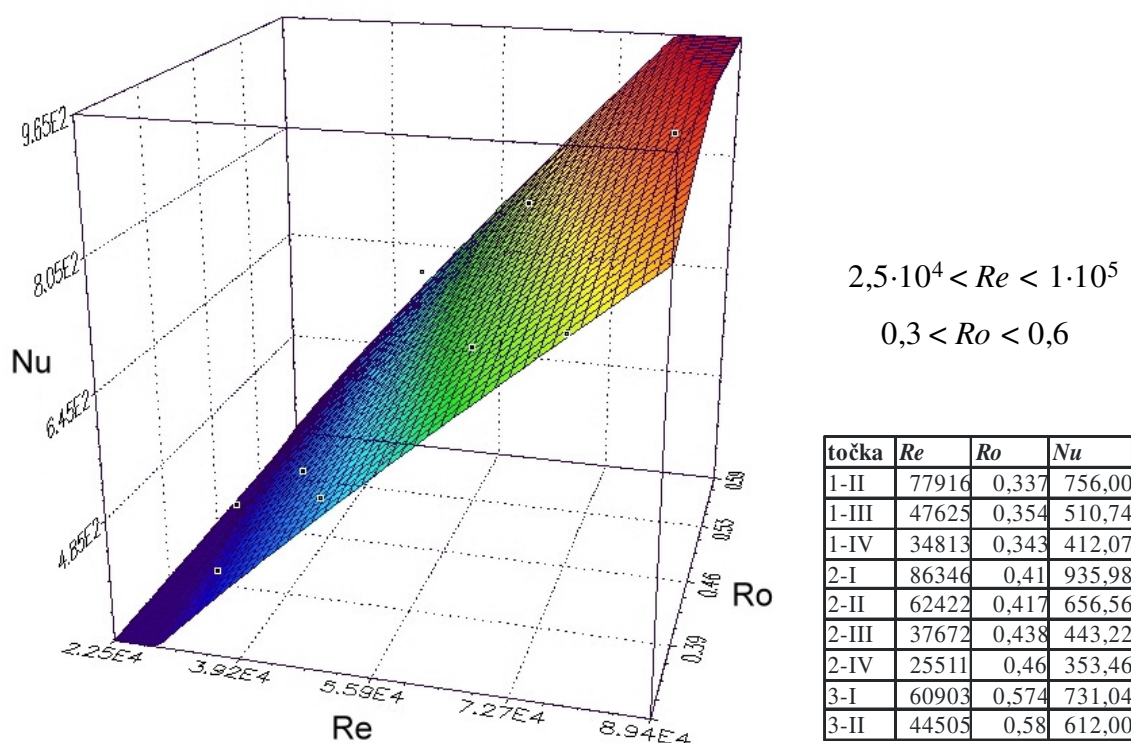
$$Ro = \frac{\omega_{rotor} \cdot t}{v_{z,p}} \quad (5)$$



Slika 6: Obratovalne točke definirane z uporabo Re in Ro

Vpliv rotacije

Če izločimo vpliv posameznega brezdimenzijskega števila na porazdelitev Nu števila na značilnih višinah lopatice, se izkaže da tako Re kot Ro vplivata na intenzivnost prenosa toplote. Medtem, ko je vpliv Re že dodobra raziskan in pokazano je, da višji Re pomeni intenzivnejši prenos toplote, [9], [5], pa je vpliv Ro težje izdvojiti.



Slika 8: Porazdelitev Nu števila v odvisnosti od Re in Ro na $\frac{1}{2}$ višine lopatice v zastojni točki

Na sliki 8 so prikazane vrednosti Nusseltovega števila v odvisnosti od Re in Ro števila na $\frac{1}{2}$ višine lopatice v območju zastojne točke, ki predstavlja mesto najintenzivnejšega prenosa toplote. Na diagramu so prikazane tudi obratovalne točke, na podlagi katerih so bili ravninski profili izračunani. Nu število je odvisno od vpliva Re in Ro števila, saj se s povečevanjem le enega števila ob nespremenljivem drugem vrednost Nu števila povečuje. Pričakovano je vpliv Re števila na vrednost Nu števila izrazitejši kot vpliv Ro števila. Vpliv Ro števila na vrednost Nu števila je evidenten za celotno polje izmerjenih vrednosti. Za obratovalne točke, ki so definirane z Ro in Re (slika 6) so bile za $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ (slika 8) in $\frac{3}{4}$ višine lopatice izpeljane relacije, ki v odvisnost postavljajo $Nu = f(Re, Ro)$ v obliki enačbe:

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Ro^c \quad (6)$$

Tabela 1: Konstante a , b in c (en. 6) za tri višine v območju zastojne točke

Višina	a	b	c
$\frac{1}{4} \cdot L$	1,65E-01	7,46E-01	2,58E-01
$\frac{1}{2} \cdot L$	9,25E-02	8,36E-01	3,58E-01
$\frac{3}{4} \cdot L$	9,50E-02	8,35E-01	4,48E-01

L je višina lopatice

Meje veljavnosti odvisnosti so $2,5 \cdot 10^4 < Re < 1 \cdot 10^5$ in $0,3 < Ro < 0,6$.

4. ZAKLJUČKI

V prispevku je predstavljena metoda študije konvektivnega prenosa toplote na rotirajoči aksialni kaskadi, ki predstavlja sklapljanje numeričnih in eksperimentalnih rezultatov. Na podlagi rezultatov in brezdimenzijske analize je ovrednoten vpliv tokovnih razmer (Re) in rotacije (Ro) na konvektivni prenos toplote (Nu) ter izpeljan empiričen model odvisnosti $Nu = Nu(Re, Ro)$. Na podlagi rezultatov lahko zaključimo:

- Rezultati numeričnih analiz se dobro ujemajo z eksperimentalno dobljenimi podatki. To omogoča uporabo izračunanih vektorskih in skalarnih polj v pretočnem traktu turbinske stopnje pri podrobnem študiju in interpretaciji mehanizmov konvektivnega prenosa toplote.
- S pomočjo analize dobimo posplošitev rezultatov na druge aplikacije in empirično enačbo za preračun poenostavljenega 1D konvektivnega prenosa toplote, ki omogoča hitro inženirsko presojo prenosa toplote na lopaticah.
- Meritve potrjujejo prevladujoč vpliv Re števila. Ro število ima največji vpliv na Nusseltovo število v področju zastojne točke. Rezultate meritev in CFD analize smo uporabili za izpeljavo empiričnih relacij za določitev Nu števil, ki v območju veljavnosti omogoča uporabo na realnih aplikacijah. Na podlagi teh je bil pokazan vpliv rotacije na intenzivnost konvektivnega prenosa toplote tudi na površinah znotraj aksialnih kanalov turbinskih strojev.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] Astrita, T.; Cardone, G.; Carlomagno, G.M.; Meola, C.: A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements, *Optics and Laser Technology* 32: 593–610, 2000
- [2] Boutarfa, R.; Harmand, S.: Local convective heat exchanges and flow structure in a rotor – stator system, *International Journal of Thermal Sciences* 42: 1129–1143, 2003
- [3] Cardone, G.; Astarita, T.; Carlomagno, G.M.: Infrared heat transfer on the rotating disk, *Optical Diagnostics in Engineering* 1: 1–7, 1996
- [4] Cardone, G.; Astarita, T.; Carlomagno, G.M.: Wall heat transfer in static and rotating 180° turn channels by quantitative infrared thermography, *Rev Gen Therm* 37: 644–652, 1998
- [5] Mori, M.; Novak, L.; Sekavčnik, M.: Measurements on rotating blades using IR thermography, *Exp. therm. fluid sci.* (2007) vol. 32, nr. 2, p. 387-396
- [6] Novak, L.; Mori, M.; Sekavčnik, M.: Heat transfer study in rotating cascade using IR thermography and CFD analyses, *Heat Mass Transfer* (2008) vol. 44, no. 5, p. 559-567
- [7] Sekavčnik, M.; Mori, M.; Novak, L.; Smrekar, J.; Tuma, M.: Heat transfer evaluation method in complex rotating environments employing IR thermography and CFD, *Experimental Heat Transfer* (2008) vol. 21, nr. 2, p. 155-168

- [8] Mori, M; Novak, L; Sekavčnik, M; Kuštrin, I.: Application of IR thermography as a measuring method to study heat transfer on rotating surface, *Forschung Ingenieurwes.* (2008) vol. 72, p. 1-10
- [9] Lakshminarayana, B.: *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*, John Wiley & Sons, 1996
- [10] Han, J.-C.; Dutta, S.; Ekkad, S.V.: *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology*, Taylor & Francis, New York, 2000
- [11] Bejan, A.: *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993
- [12] Bohren, C. F.; Clothiaux, E. E.: *Fundamentals of Atmospheric Radiation*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006
- [13] Nicholas, J. V.; White, D. R.: *Traceable temperatures*, John Wiley & Sons Ltd, 1994
- [14] Sugiura, R., Noguchi, N., Ishii, K.: Correction of low-altitude thermal images applied to estimating soil water status, *Biosystems Engineering*, 96 (3), p. 301-313, 2007
- [15] Han, J.-C.; Dutta, S.; Ekkad, S.V.: *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology*, Taylor & Francis, New York, 2000
- [16] Lacovides, H.; Launder, B.E.: Computational fluid dynamics applied to internal gas-turbine cooling: a review, *Int J Heat and Fluid Flow* 16 (1995), 454-470
- [17] ANSYS CFX v.11: *Documentation: Mathematical Models and Solution Algorithms*, 2006
- [18] Brandt, F.: *Wärmeübertragung in Dampferzeugern und Wärmeaustauschen*, Essen 1985
- [19] Traun, C.: *Spatial Interpolation*,
<http://www.giac.montana.edu/geog501/interpolationframe.htm>
- [20] Dokumentacija programskega paketa Surfer[®] 7, Golden Software, Inc., 2000

NASLOV AVTORJEV

Dr. Mitja Mori
Izr.prof.dr. Mihael Sekavčnik

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

Tel: + 386 1 4771 715 Fax: + 386 1 2518 567
Elektronska pošta: mitja.mori@fs.uni-lj.si