

IZKORIŠČANJE ODPADNE TOPLOTE Z ORC KROŽNIMI PROCESI TUDI V SLOVENIJI

Andrej SENEGAČNIK, Mihael SEKAVČNIK

POVZETEK

Članek obravnava ORC (Organic Rankine Cycle) proces. To je delovni krožni proces za pretvorbo nizko temperaturne toplote v mehansko delo. Delovna snov je organsko hladivo. Zaradi spremenjenih lastnosti hladiva ima tudi ORC proces nekatere posebnosti. V članku je predstavljen ORC proces, ki bo apliciran v slovenski industriji z električno močjo generatorja 120 kW. Obravnavane so nekatere posebnosti ORC procesov in tudi vpliv izvedbe prenosnikov toplote. Analiziran je tudi vpliv temperature hladilne vode na delovanje ORC procesa.

ABSTRACT

The article deals with ORC (Organic Rankine Cycle) process. This is a working cycle for conversion of low temperature heat into mechanical work. The working fluid is an organic refrigerant. Due to specific properties of refrigerant also the ORC process has some peculiarities. The article presents the ORC process, which will be applied in the Slovenian industry providing a generator power of 120 kW. Some specific features of ORC processes are addressed and the impact of implementation of heat exchangers is analysed. Analysis of the impact of cooling water temperature on the operation of ORC process is also provided.

1. UVOD

Zaradi vedno večjih zahtev po zmanjševanju onesnaževanja okolja na globalni ravni in zmanjševanju toplogrednega učinka uporabe fosilnih goriv se išče razne niše toplotnih virov za proizvodnjo mehanskega dela oz. električne energije. Izraziti, do sedaj prezrti viri toplote so odpadni energijski tokovi v industriji. Ti viri so navadno nizko in srednje temperaturni dimni plini in včasih celo nizkotlačna vodna para. Termodinamika nas uči, da je možno pridobiti mehansko delo, če imamo na razpolago toplo in hladno telo in nek toplotni stroj. Sadi Carnot je leta 1824 odkril enega izmed temeljnih naravnih zakonov o omejeni pretvorljivosti toplote v mehansko delo. Carno-jev teorem določa, da je razmerje med pridobljenim mehanskim delom, količino dovedene, ter tudi odvedene toplote (termični izkoristek procesa) proporcionalno temperaturam dovedene in odvedene toplote. V idealnem primeru je izkoristek $\eta_C = 1 - T_{od}/T_{do}$. Realni toplotni stroji pa so optimirani v smislu maksimalnega pridobivanja mehanskega dela in ne največjega izkoristka. Proces z največjim

izkoristkom bi namreč potekali izredno počasi bi imeli majhno mehansko moč in bili zelo dragi. Courzon–Ahlborn-ov teorem pojasni [2], da se zaradi neizogibne nepovračljivosti prenosa toplote v in iz procesa (omejena prenosna površina in omejen čas) termični izkoristek dodatno zmanjša na $\eta_{CA} = 1 - (T_{od}/T_{do})^{1/2}$. Pri termičnem izkoristku η_{CA} dosežemo optimum pri katerem ima realni toplotni stroj največjo mehansko moč. To velja tudi za primer ORC procesov, saj se vrednost realnega izkoristka obravnavanega ORC procesa zelo približa izkoristku η_{CA} .

Pri izvajanju projekta izrabljanja nizko temperaturnih odpadnih toplotnih tokov za proizvodnjo električne energije v slovenski industriji je predvideno uvajanje ORC procesov (Organic Rankine Cycle) [1]. Klasični Rankinovi krožni procesi potekajo med dvema izobarama in dvema izentropama z vmesnim faznim prehodom delovne snovi in vodo kot delovno snovjo. V primerih, ko se v proces dovaja nizko temperaturna toplota voda ni več primerna delovna. Uporabi se organska delovna snov in dobimo tako imenovani ORC – organski Rankinov krožni proces. Kot delovna snov se uporablja neka organska snov z ustreznimi lastnostmi – npr. fluorirani ogljikovodiki, ki se uparja pri bistveno nižjih parametrih (temperaturi) kot voda. Glede na dane temperaturne pogoje dovoda in odvoda toplote se izbere ustrezna organska delovna snov [8].

2. ORC PROCES V SLOVENIJI

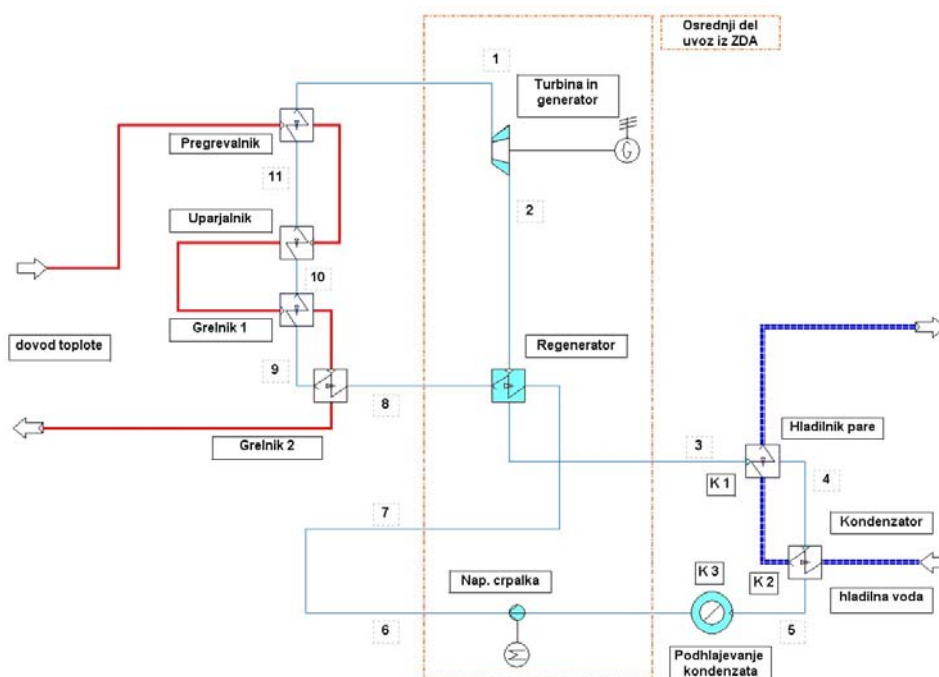
Projekt uvajanja ORC v Sloveniji, ki ga sofinancirajo tudi slovenska ministrstva predvideva izrabo nizko temperaturne odpadne toplote na več lokacijah v slovenski industriji. Testni zagon prvega ORC postrojenja je predviden v maju 2010. Osnovni pogoj, ki ga mora izpolnjevati določena lokacija je, dovolj velik toplotni tok odpadne toplote, ~1 MW, ustrezne temperature in možnost odvoda toplote iz ORC procesa v okolico. S tem namenom so bile pregledane tudi že štiri možne lokacije, ki izpolnjujejo osnovne tehnološke zahteve po količini in temperaturnem nivoju odpadne toplote. V slovenski industriji namreč ne obstaja veliko ustreznih lokacij, ker nimamo velikih postrojenj. Zahteva za ~1 MW odpadne toplote izhaja iz dejstva, da je ponudnik osnovne enote ORC procesa iz ZDA (družba Calnetix), kjer je število ustrezno "velikih" lokacij bistveno večje.

2.1 Osnovni opis ORC procesa

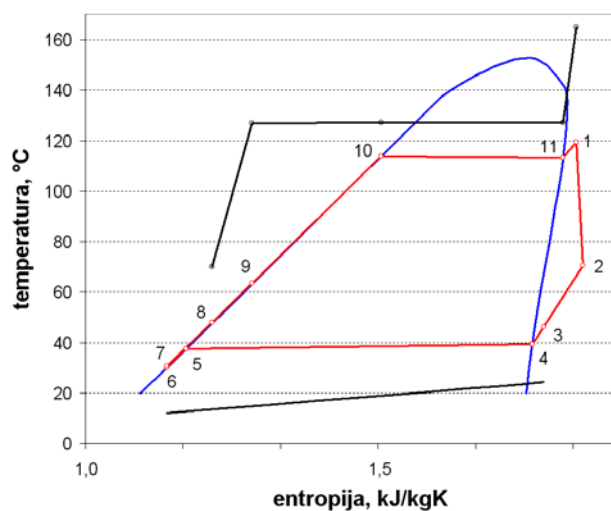
Shematsko je ORC proces predstavljen na sliki 1, pripadajoči diagram $T-s$ pa na sliki 2. Sliki prikazujeta situacijo ko se toplota v ORC proces dovaja s pregreto vodno paro. Ker se dovod toplote izvaja v različnih termodinamičnih procesih (gretje, uparjanje, pregrevanje,...) je to v shemi predstavljeno v več elementih. Na sliki 1, je označen tudi osrednji del postrojenja, ki se kot zaključena celota uvozi iz ZDA. V okviru izvedbe projekta, je potrebno projektirati dva prenosnika toplote – za dovod toplote za odvod toplote (kondenzator) glede na razpoložljive parametre toplotnega vira in odvoda toplote v okolico.

Osnovne značilnosti ORC procesa, ki bo apliciran v Sloveniji, so:

- delovna snov krožnega procesa – hladilno sredstvo R245 fa – 1,1,1,3,3-pentafluoropropane
- parametri sveže pare R245 fa pred vstopom v turbino: 16,7 bar, 120 °C
- parametri kondenzacije: 2,3 bar, 38 °C
- masni pretok R245 fa: 4,02 kg/s
- električna moč generatorja: 120 kW
- dovedeni toplotni tok z vodno paro: 930 kW
- odvedeni toplotni tok s hladilno vodo: 810 kW



Slika 1: Osnovna shema ORC procesa

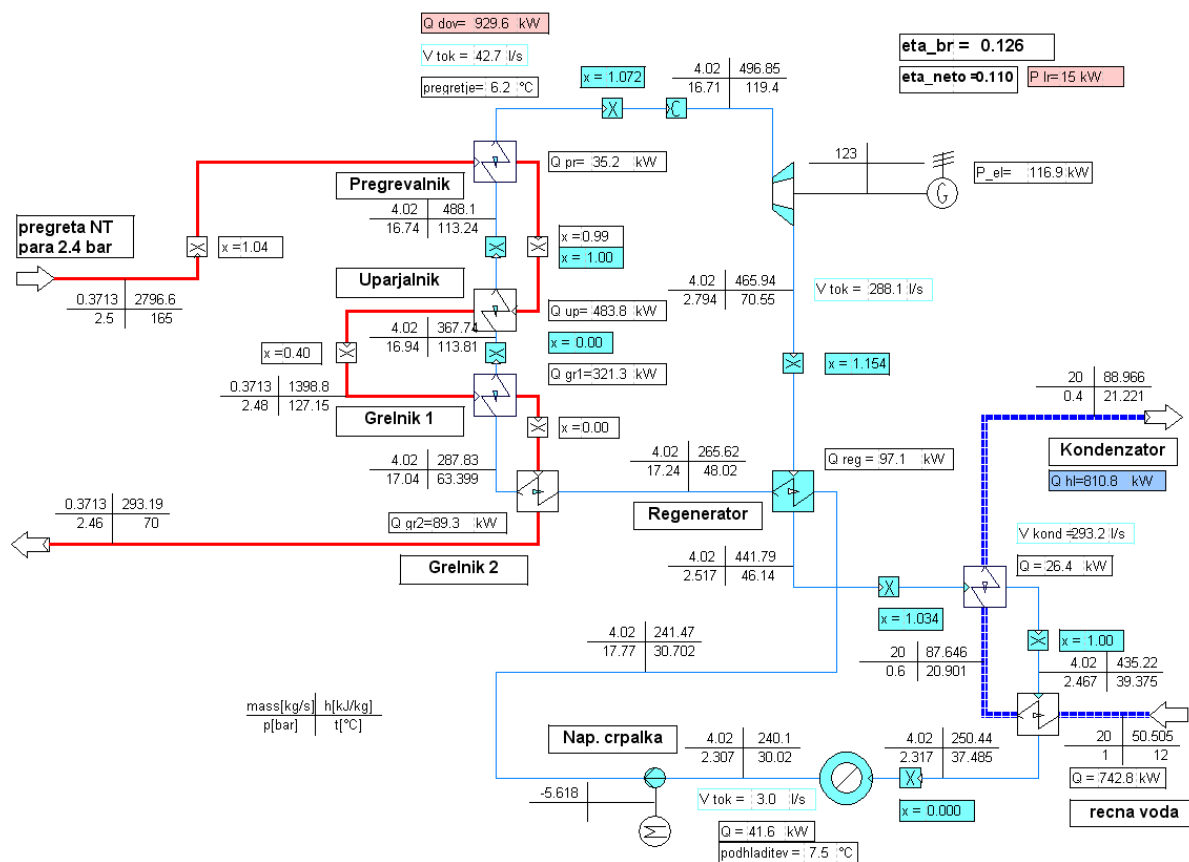


Slika 2: Diagram T - s ORC procesa

Kot je razvidno iz diagrama T - s je za ORC proces značilna delovna snov z nadvito mejno krivuljo, zaradi česar para pri ekspanziji v turbini postaja vedno bolj pregreta. Ker z izentropno ekspanzijo nikakor ne moremo doseči rosilne krivulje, se para po ekspanziji v turbini najprej ohlaja v regenerativnem grelniku, kjer segreva napajalni – kapljeviti freon za napajalno črpalko in šele nato vstopa v kondenzator. To je torej čisto klasično regenerativno gretje napajalnega freona, s to razliko, da grelni medij pri tem ne kondenzira. V diagramu T - s , slika 2, sta s črno linijo vrisani tudi temperaturni karakteristiki izvora in ponora toplote.

2.2 Termodinamični parametri ORC procesa

Slika 3 prikazuje ORC proces s podanimi termodinamični parametri (masni pretok, tlak, temperatura, in entalpija, suhost pare,...). Kot izvor toplote se uporablja pregreta vodna para tlaka 2,4 bar in temperature 165 °C. Smiselnost uporabe vodne pare za pogon ORC je seveda vprašljiva, zlasti še takrat, ko je to odjemna para iz industrijske kogeneracije. V tem primeru je to upravičeno, ker je goltnost nizkotlačnega dela parne turbine premajhna in zaradi prestrukturiranja proizvodnje v zadnjih letih ni potreb po nizkotlačni odjemni pari. Izkoristek pretvorbe v električno energijo je seveda nekoliko slabši, toda še vedno zadovoljivo primerljiv. To velja še zlasti, če je proizvodnja električne energije iz ORC deklarirana kot "zelena" (država garantira odkup po garantirani ceni), ker je osnovno gorivo parnega kotla lesna biomasa. Pri segrevanju freona se ogrevna vodna para skondenzira. Termodinamično so to štirje različni procesi in so zato obravnavani ločeno; grelnik 1, grelnik 2, uparjalnik in pregrevalnik. Podobno je tudi pri odvodu toplote, kjer imamo najprej hladilnik pare, kondenzator in nato podhlajevanje kondenzata. Navedeni parametri na sliki 3 so bili dobljeni pri prevzemnih preizkusih postrojenja v ZDA.



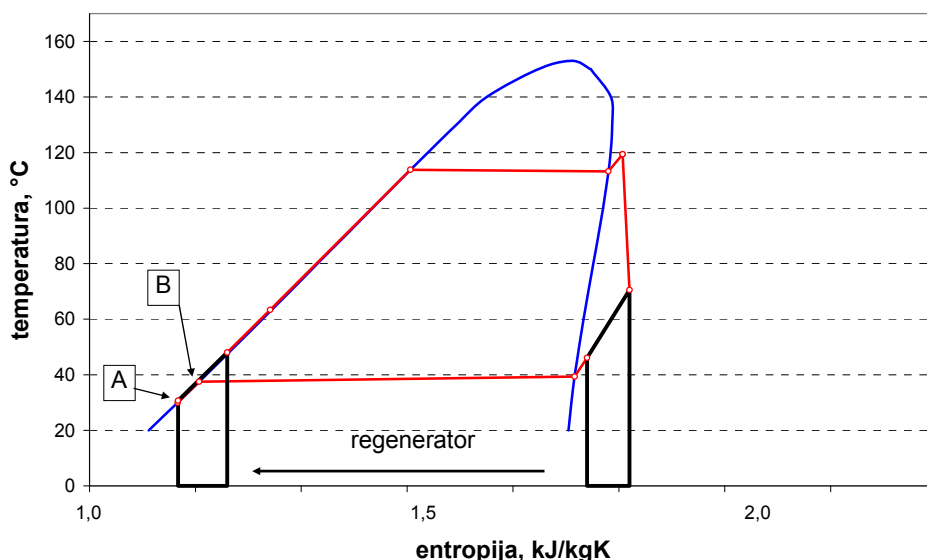
Slika 3: Parametri ORC postrojenja pri električni moči generatorja 117 kW

3. NEKATERE POSEBNOSTI ORC PROCESA

3.1 Podhlajevanje kondenzata

Ker je električna moč ORC procesov relativno majhna, največ do 2 MW_e, so relativni investicijski stroški na instaliran kW električne moči že v izhodišču visoki. Zato se skuša celotno postrojenje narediti čim enostavneje z vgradnjo nekaterih tipskih elementov. Tu so predvsem mišljeni prenosniki toplote za dovod in odvod toplote. Zaradi enostavnosti in cenenosti se vgrajujejo tipski ploščni prenosniki toplote. Sprememba volumenskega toka organske delovne snovi pri fazni spremembi para-kapljevina je bistveno manjša kot pri vodi in je zato v teh primerih možno uporabiti ploščne prenosnike [4, 5, 6, 7]. Negativni vpliv te poenostavitve pa je v izredno omejenem vplivu na temperaturne razmere pri prenosu toplote. Sama konstrukcija prenosnika vedno enako razporedi masna tokova in tudi med samim procesom prenosa toplote ne moremo nikakor več vplivati nanj. V parnem kotlu se npr. prenos toplote izvaja v več zaporednih ogrevalnih površinah z možnostjo vmesnega hlajenja. Zato v primeru kondenzacije freona v ploščnem prenosniku nehotе dosežemo veliko

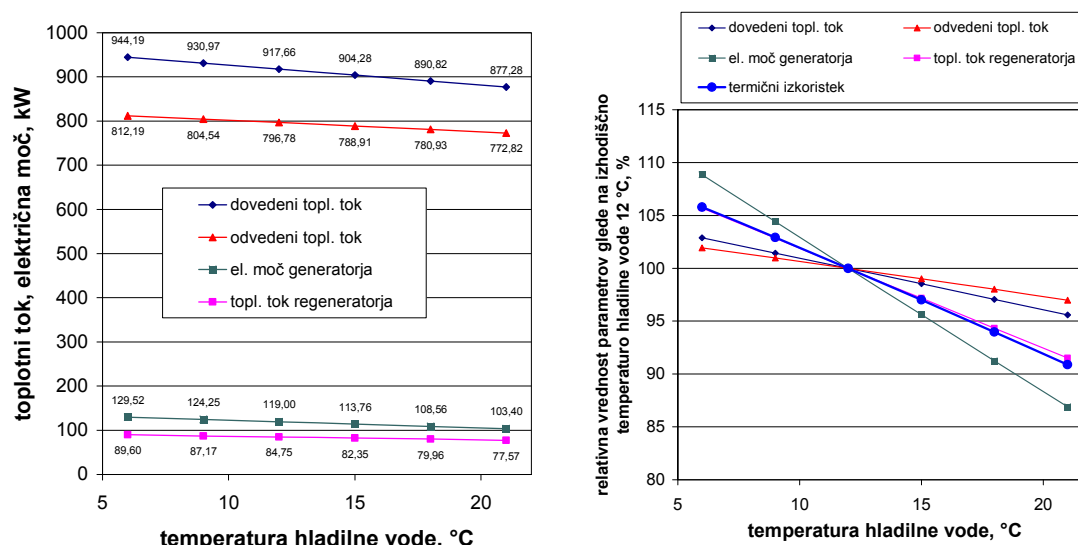
podhladitev kondenzata, tudi do 8 °C. Če bi podhladitev hoteli zmanjšati, pa bi se močno zvišal tlak kondenzacije in električna moč generatorja bi se bistveno zmanjšala. Tak realno izmerjeni primer podhladitve kondenzata prikazuje spodnja slika 4. Kondenzat doseže stanje točke A, namesto idealnega stanja v točki B, slika 4. Posledično moramo zato v proces dovesti več toplote, kar pomeni tudi nižji izkoristek.



Slika 4: ORC proces z vrisano regeneracije toplote pri podhladitvi kondenzata za 7,5 °C v točki A

3.2 Odvod toplote

Podobno, kot pri vseh krožnih procesih je potrebno zagotoviti odvod toplote v okolico pri čim nižji temperaturi. V primeru ORC procesa je to še zlasti pomembno, ker se krožni proces izvaja v ozkem temperaturnem intervalu. Za pridobitev ustrezne količine mehanskega dela, moramo zagotavljati ustrezni entalpijski padec. Regulacija procesa je izvedena namreč tako, da se v primeru povečanja pregretosti pare na vstopu v turbino, zviša tlak napajalne črpalke in s tem tlak pare na vstopu v turbino. Iz diagrama $T-s$ je razvidno, da termodinamičnih razlogov za višanje temperature pregretosti ni, ker smo z ekspanzijo v turbini stalno v pregretem področju. Istočasno se s tem brez potrebe povečuje toplotni tok v regeneratorju (in tudi njegovo velikost). Regulacija skuša stalno zagotavljati pregretost ~5 °C, kar zadostuje za preprečitev erozije turbine v primeru vlažne pare R245 fa. Iz diagrama $T-s$ vidimo, da razpoložljivi entalpijski padec na spodnjem koncu omejuje izobara kondenzacije, ki je enolična funkcija temperature kondenzacije. Zato je potrebno zagotavljati čim nižjo temperaturo kondenzacije. Izredno močen vpliv temperature hladilne vode na delovanje ORC procesa pa je prikazan na sliki 5. Simulacija ORC procesa je bila izvedena s programskim paketom IPSE 4.0. [3]



Slika 5: Vpliv temperature hladilne vode na parametre ORC procesa

4. ZAKLJUČEK

Članek obravnava ORC (Organic Rankine Cycle) proces. To je delovni krožni proces namenjen izkoriščanju nizko temperaturnih virov – npr. odpadnih tokov v dimnih plinih. ORC proces je klasični Rankinov krožni proces, pri katerem se namesto vode uporablja organska delovna snov – razna organska hladila. Značilnost organskih hladil je tudi nadvita mejna krivulja zaradi česar se para pri izentropni ekspanziji pregreva. Zaradi tega imajo ORC procesi nekatere posebnosti in se nekoliko razlikujejo od krožnih procesov, ki uporabljajo vodo za delovno snov. V članku je predstavljen ORC proces, ki bo apliciran v slovenski industriji. Osnovne značilnosti tega ORC procesa so: delovna snov R245 fa, masni tok 4 kg/s, temperatura pare na vstopu v turbino 120 °C, električna moč generatorja 120 kW, dovedeni toplotni tok 930 kW, izkoristek procesa ~11 %.

Predstavljene so nekatere posebnosti ORC procesa, kot so npr. regeneracija toplote in tudi vpliv izvedbe prenosnikov toplote. Za čim cenejšo izvedbo postrojenja se prenosniki toplote izvedejo s tipskimi ploščnimi prenosniki. Ti pa lahko povzročijo večje tlačne upore in omejijo možnost regulacije temperatur, kar se lahko odrazi v preveliki pregretosti pare ali podhladitvi kondenzata. V članku je analiziran tudi močan vpliv temperature hladilne vode na delovanje ORC procesa.

5. LITERATURA

- [1] Senegačnik A., Sekavčnik M., Termodinamične karakteristike nizko temperaturnega delovnega krožnega procesa z organsko delovno snovjo pri implementaciji v različna industrijska okolja, Fakulteta za strojništvo, št. 03-01/1-10-AS, januar 2010

- [2] Curzon F.L., Ahlborn B., Efficiency of a Carnot engine at maximum power output, Am. J. Phys., vol. 43, 1975, 22-24
- [3] SimTech, IPSEpro Process Simulation Environment, System version 4.0, Graz, Austria, 2003
- [4] Longo G.A., Gasparella A., Heat transfer and pressure drop during HFC refrigerant vaporisation inside a brazed plate heat exchanger, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 2007, 5194–5203
- [5] Garcia-Cascales J.R. et al., Assessment of boiling and condensation heat transfer correlations in the modelling of plate heat exchangers, International Journal of Refrigeration, vol. 30, 2007, 1029-1041
- [6] Jokar A., et al., Dimensional analysis on the evaporation and condensation of refrigerant R-134a in minichannel plate heat exchangers, Applied Thermal Engineering, vol. 26, 2006, 2287–2300
- [7] Giovanni A. Longo, Andrea Gasparella, HFC-410A vaporisation inside a commercial brazed plate heat exchanger, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 32, 2007, 107–116
- [8] Förster H., Der Sorptionskraftprozess, BWK, 1/2, Springer VDI Verlag, 2010, 67–74

NASLOVA AVTORJEV

izr. prof. dr. Andrej Senegačnik, univ. dipl. inž. – Fakulteta za strojništvo, Ljubljana
izr. prof. dr. Mihael Sekavčnik, univ. dipl. inž. – Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6

SI-1000 Ljubljana

e-pošta: andrej.senegacnik@fs.uni-lj.si