

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2026

Ing. Ivan Martinček



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Ivan Martinček

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Tepelný manažment zásobníka vodíka s metalhydridovou zliatinou
pomocou fázovej premeny pracovnej látky**

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Energetické stroje a zariadenia

Žilina 2026

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre energetickej techniky.

Predkladateľ: Ing. Ivan Martinček
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky

Školiteľ: prof. Ing. Jozef Jandačka, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky

Oponenti: 1. prof. Ing. Róbert Olšiak, PhD. STU Bratislava
2. prof. Ing. Ladislav Dzurenda, PhD. TU Zvolen
3. prof. RNDr. Milan Malcho, CSc. ŽU Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 30.06.2026

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 26.08.2026 o 8:00 hod. v miestnosti BC309 na Sjf, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Energetické stroje a zariadenia, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu Sjf, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Ing. Jozef Jandačka, PhD.
predseda komisie pre obhajobu
dizertačnej práce

ÚVOD

Vodík predstavuje sekundárny nosič energie, ktorého využitie je úzko spojené s možnosťou bezpečného a technicky realizovateľného skladovania. Vzhľadom na nízku hustotu plynného vodíka možno na jeho uloženie použiť vysokotlakové, kryogénne alebo materiálové spôsoby, medzi ktoré patrí aj reverzibilné viazanie vodíka v metalhydridových zliatinách. Metalhydridové zásobníky umožňujú skladovať vodík pri nižších pracovných tlakoch ako vysokotlakové nádoby, ich prevádzka však významne závisí od prívodu a odvodu tepla. Absorpcia vodíka do metalhydridovej zliatiny je exotermický proces, pri ktorom sa uvoľňuje teplo, zatiaľ čo desorpcia je endotermický proces vyžadujúci dodávanie tepla do lôžka.

Významným obmedzením metalhydridových zásobníkov je nízka efektívna tepelná vodivosť práškoveho lôžka, ktorá vedie k vzniku teplotných gradientov a môže predlžovať čas absorpcie a desorpcie. Jednou z možností pasívneho prenosu tepla je použitie slučkovej tepelnej trubice, v ktorej sa teplo prenáša odparovaním a kondenzáciou pracovnej látky bez potreby mechanického obehového čerpadla.

Dizertačná práca sa zaoberala návrhom, experimentálnym overením a matematickým opisom tepelného manažmentu metalhydridového zásobníka vodíka. V prvej etape bol vytvorený simulovaný zásobník s prúdiacim monopropylglykolom a v druhej etape metalhydridový zásobník s náplňou Hydralloy C5.

Tézy dizertačnej práce

1. Analýza procesov prebiehajúcich pri absorpcii a desorpcii vodíka v metalhydridových zliatinách.
2. Návrh systému tepelného manažmentu s využitím slučkových tepelných trubíc (Loop HP) pre metalhydridový zásobník vodíka.
3. Vytvorenie matematického modelu pre simuláciu tepelného manažmentu metalhydridového zásobníka s použitím Loop HP.
4. Návrh fyzikálneho modelu a experimentálne overenie funkčnosti navrhnutého tepelného manažmentu v laboratórnych podmienkach.
5. Porovnanie výsledkov experimentov s numerickým modelom a validácia matematického modelu zásobníka vodíka.
6. Hodnotenie a optimalizácia energetickej účinnosti na báze slučkových tepelných trubíc.

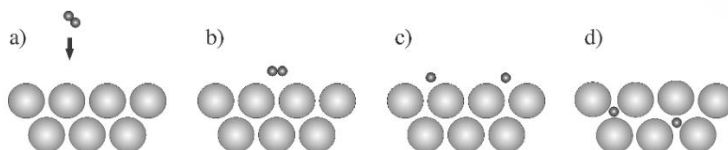
Skladovanie vodíka pomocou metalhydridov

Schopnosť kovov absorbovať vodík bola pozorovaná už v roku 1866 pri paládiu. Vodík sa pri tomto procese neviaže iba na povrchu materiálu, ale preniká do intersticiálnych polôh kryštálovej mriežky a vytvára tuhý roztok alebo hydridovú fázu (Dornheim, 2011).

Absorpcia vodíka je exotermický proces, pri ktorom sa teplo uvoľňuje, zatiaľ čo pri desorpcii je potrebné teplo do systému dodávať. Rýchlosť oboch procesov preto závisí nielen od tlaku vodíka,

ale aj od schopnosti zásobníka odvádzať alebo privádzať teplo (Sakintuna et al., 2007; Dornheim, 2011).

Proces absorpcie prebieha v niekoľkých krokoch. Molekula H_2 sa najskôr fyzikálne adsorbuje na povrchu, následne disociuje na atómy vodíka a po prekonaní povrchovej bariéry difunduje do kryštálovej mriežky. Pri vhodných tlakových a teplotných podmienkach vzniká hydridová fáza. Pri desorpcii prebieha postup opačným smerom (Dornheim, 2011).



Obr. 1 Proces absorpcie vodíka v metalhydridovej zliatine (Dornheim, 2011)

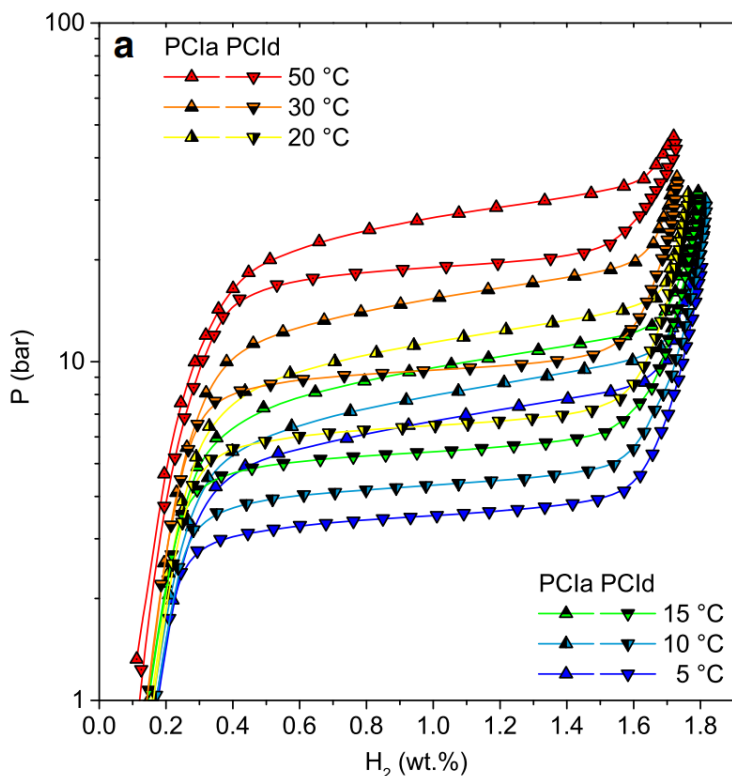
Na obrázku 1 je schematicky znázornené priblíženie molekuly vodíka k povrchu, jej adsorpcia a disociácia, difúzia atómov do materiálu a vznik hydridovej fázy. Pri desorpcii atómy difundujú späť k povrchu, rekombinujú na molekuly H_2 a uvoľňujú sa do plynnej fázy.

Analýza procesov absorpcie a desorpcie vodíka v Hydralloy C5

Pre experimentálnu časť bola zvolená komerčná metalhydridová zliatina Hydralloy C5 typu AB_2 na báze Ti-Zr-Mn-V-Fe (Kölbig et al., 2021). Zliatina je určená na reverzibilné viazanie vodíka pri teplotách blízkych teplote okolia a vyznačuje sa rýchlou absorpciou a

desorpciou, ktorá však vyžaduje účinný tepelný manažment (Capurso et al., 2016; Kölbig et al., 2021).

Pri absorpcii musí byť tlak vodíka dostatočne vysoký, aby sa vodík viazal do štruktúry zliatiny. Pri desorpcii musí byť tlak na výstupe zo zásobníka nižší, aby sa vodík mohol zo zliatiny uvoľniť. Nižšia teplota podporuje absorpciu, zatiaľ čo vyššia teplota je výhodnejšia pre desorpciu.



Obr. 2 Tlakovo-kompozičné izotermy Hydralloy C5 pri rôznych teplotách (Capurso et al., 2016)

Obrázok 2 znázorňuje tlakovo-kompozičné izotermy Hydralloy C5. So zvyšujúcou sa teplotou je na dosiahnutie rovnakého obsahu vodíka v zliatine potrebný vyšší tlak. Pri absorpcii preto musí platiť:

$$p_{H_2} > p_{eq,abs} \quad (3)$$

a pri desorpcii:

$$p_{H_2} < p_{eq,des} \quad (4)$$

Rozdiel medzi absorpčnou a desorpčnou vetvou predstavuje hystereziu typickú pre metalhydridové materiály. Ak uvedené tlakové podmienky nie sú splnené, proces prebieha veľmi pomaly alebo sa prakticky zastaví.

Výpočet tepelnej energie pri absorpcii a desorpcii vodíka

Pre Hydralloy C5 sa uvažovala využiteľná kapacita (Kölbig et al., 2021):

$$w_{H_2} = 1,3 \text{ hm. \%}$$

Jeden kilogram zliatiny preto uloží 13 g vodíka. Látkové množstvo vodíka je:

$$n_{H_2} = \frac{13}{2,016} = 6,45 \text{ mol}$$

Pri reakčnej entalpii desorpcie $27,8 \text{ kJ mol}_{\text{H}_2}^{-1}$ sa množstvo tepla vypočíta:

$$Q = n_{\text{H}_2} \Delta H \quad (5)$$

$$Q = 6,45 \cdot 27,8 = 179 \text{ kJ}$$

Po prepočte:

$$E = \frac{179}{3,6} = 49,7 \text{ Wh} \quad (6)$$

Pre 1 kg Hydralloy C5 je teda pri absorpcii potrebné odviešť približne 179 kJ, respektíve 49,7 Wh. Pri desorpcii treba rovnaké množstvo tepla dodať.

Pre zásobník s náplňou 2,2 kg vychádza:

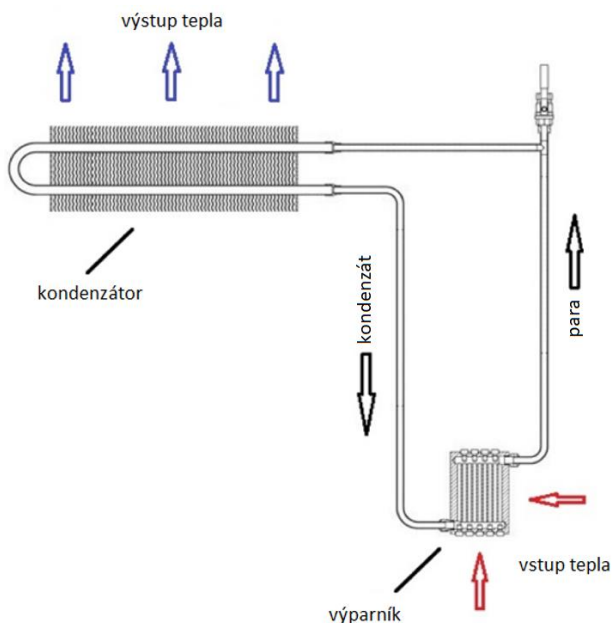
$$Q = 2,2 \cdot 179 = 394 \text{ kJ}$$

$$E = \frac{394}{3,6} = 109 \text{ Wh} \quad (7)$$

Pri absorpcii 2,2 kg Hydralloy C5 treba zo zásobníka odviešť 109 Wh reakčného tepla a pri desorpcii rovnaké množstvo tepla dodať. Ide iba o reakčné teplo zliatiny; v reálnom zásobníku treba zohľadniť aj tepelnú kapacitu konštrukcie, pracovnej látky, izolácie a tepelné straty do okolia.

Tepelný manažment metalhydridového zásobníka s využitím slučkových tepelných trubíc

Slučkové tepelné trubice (Loop Heat Pipe alebo Loop HP) zabezpečujú pasívny prenos tepla pomocou odparovania a kondenzácie pracovnej látky. Systém pozostáva z výparníka a kondenzátora prepojených samostatným potrubím na paru a kondenzát. Vo výparníku pracovná látka prijíma teplo a odparuje sa. Para prúdi do kondenzátora, kde odovzdá teplo, skondenzuje a gravitačne sa vracia späť do výparníka.



Obr. 3 Princíp funkcie slučkovej tepelnej trubice (Polačiková et al., 2022)

Režim ohrevu

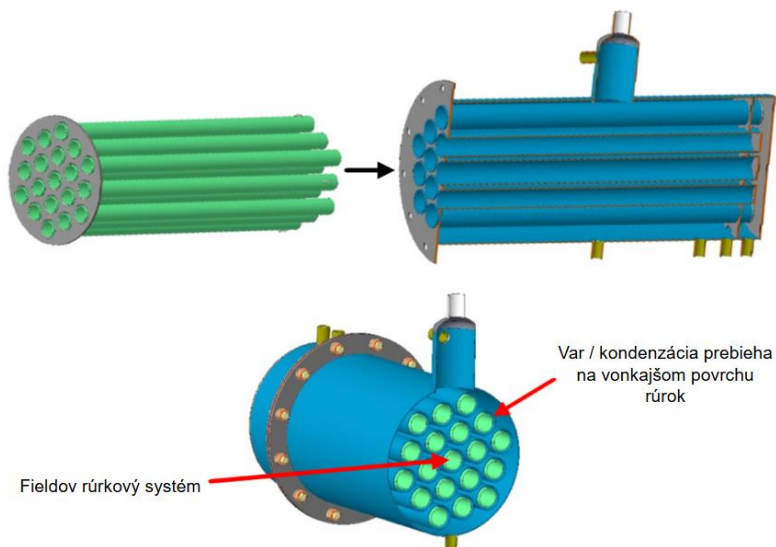
V režime ohrevu Loop HP prenáša teplo z výparníka do metalhydridového zásobníka. Dodané teplo podporuje endotermickú desorpciu vodíka z metalhydridovej zliatiny.

Režim chladenia

Pri absorpcii sa v metalhydridovej zliatine uvoľňuje reakčné teplo. Loop HP ho odvádza zo zásobníka do kondenzátora a následne do chladiaceho média. Výhodou systému je intenzívny prenos tepla pri malých teplotných rozdieloch bez použitia aktívneho čerpadla v dvojfázovom okruhu.

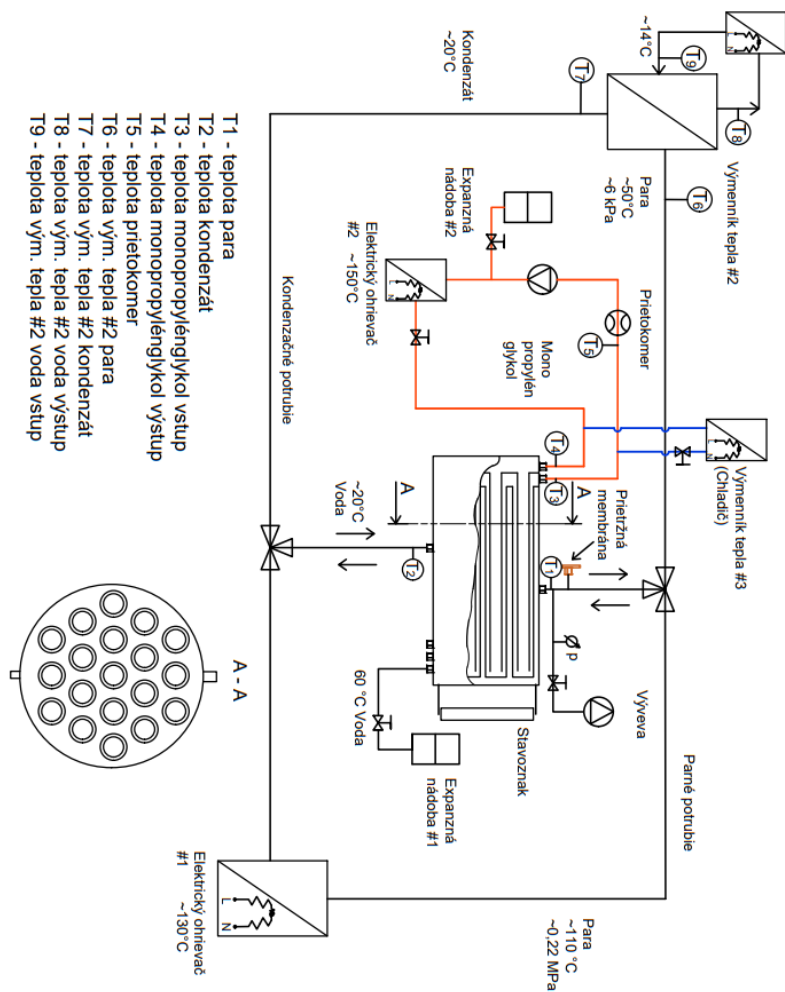
Návrh tepelného manažmentu simulovaného metalhydridového zásobníka

Simulovaný zásobník bol navrhnutý na experimentálne overenie prenosu tepla pomocou slučkovej tepelnej trubice. Cieľom nebolo modelovať chemickú reakciu konkrétneho hydridu, ale určiť tepelný výkon, účinnosť a odozvu systému medzi pracovnou látkou, stenou zásobníka a médiom simulujúcim metalhydridové lôžko. Základným prvkom bol zväzok 19 Fieldových rúrok integrovaný do horizontálneho valcového zásobníka. Na vonkajšom povrchu rúrok prebiehala kondenzácia alebo var pracovnej látky, zatiaľ čo vnútornými priestormi rúrok a medzikružím prúdil monopropylénglykol.



Obr. 4 Konštrukcia simulovaného zásobníka s integrovaným Fieldovým rúrkovým systémom

Každá Fieldová rúrka je tvorená dvojicou súosých rúrok usporiadaných v koncepcii rúrka v rúrke. Na vonkajšom povrchu vonkajšej rúrky prebieha kondenzácia pary alebo var pracovnej látky, zatiaľ čo vo vnútorných priestoroch rúrok prúdi monopropylénglykol. Rozhodujúca časť prestupu tepla prebieha v oblasti medzikružia, kde kvapalné médium prichádza do priameho kontaktu so stenou vonkajšej rúrky.



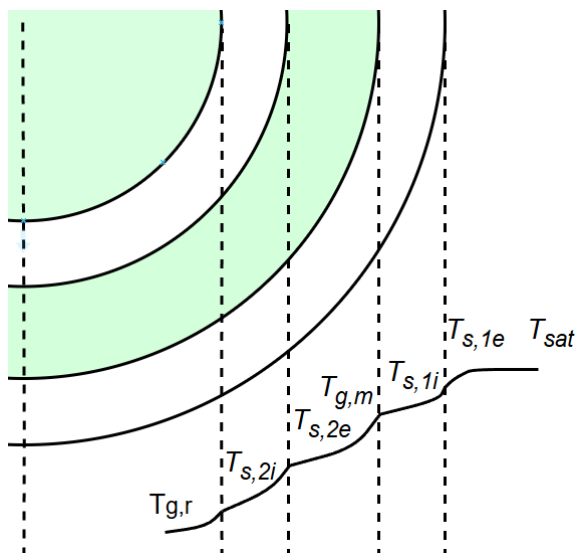
Obr. 5 Schéma experimentálnej zostavy simulovaného zásobníka s vyznačenými meracími bodmi

Merali sa vstupné a výstupné teploty monopropylénglykolu, jeho objemový prietok, teplota pracovnej látky, tlak v dvojfázovom okruhu a teploty výmenníkov. Z nameraných údajov bol určený

prenesený tepelný výkon a zostavené matematické modely pre režim ohrevu a chladenia.

Matematický model ohrevu zásobníka

Model ohrevu opisoval prestup tepla z kondenzujúcej pracovnej látky cez stenu vonkajšej Fieldovej rúrky do monopropylénglykolu v medzikruží. Sekundárny tepelný tok prebiehal medzi monopropylénglykolom v medzikruží a kvapalinou vo vnútornej rúrke.



Obr. 6 Schéma prestupu tepla v jednej Fieldovej rúrke

Hlavná vetva preštupu tepla bola vyjadrená ako séria čiastkových tepelných odporov:

$$T_{sat} \rightarrow \frac{1}{\alpha_e 2\pi r_{1e} L} \rightarrow T_{s,1e} \rightarrow \frac{\ln(r_{1e}/r_{1i})}{2\pi \lambda_w L} \rightarrow T_{s,1i} \rightarrow \frac{1}{\alpha_i 2\pi r_{1i} L} \rightarrow T_{g,m} \quad (8)$$

kde α_e predstavuje súčiniteľ preštupu tepla pri kondenzácii, α_i súčiniteľ preštupu tepla na strane monopropylénglykolu a λ_w tepelnú vodivosť steny rúrky.

Výsledný výkon bol najviac ovplyvnený konvekčným odporom na strane monopropylénglykolu v medzikruží. Preto boli porovnané viaceré formulácie Nusseltovho čísla:

$$Nu_i = \begin{cases} Nu_{\text{Hausen}} \\ Nu_{\text{Shah and London}} \\ Nu_{\text{Bergman et al.}} \\ Nu_{\text{Shah and London-Wilson}} \end{cases} \quad (9)$$

Matematický model chladenia zásobníka

Pri chladení bol smer tepelného toku opačný. Monopropylénglykol odovzdával teplo cez stenu vonkajšej rúrky pracovnej látky, ktorá sa na jej vonkajšom povrchu odparovala. Tepelný tok bol následne odvádzaný do kondenzačnej časti slučkovej tepelnej trubice.

Hlavná vetva preštupu tepla bola zapísaná:

$$T_{g,m} \rightarrow \frac{1}{\alpha_i 2\pi r_{1i} L} \rightarrow T_{s,1i} \rightarrow \frac{\ln(r_{1e}/r_{1i})}{2\pi \lambda_w L} \rightarrow T_{s,1e} \rightarrow \frac{1}{\alpha_b 2\pi r_{1e} L} \rightarrow T_{sat} \quad (10)$$

kde α_b predstavuje súčiniteľ prestupu tepla pri vare pracovnej látky.

V modeli chladenia nebola použitá Wilsonova korekcia. Porovnávali sa štyri nekalibrované korelácie:

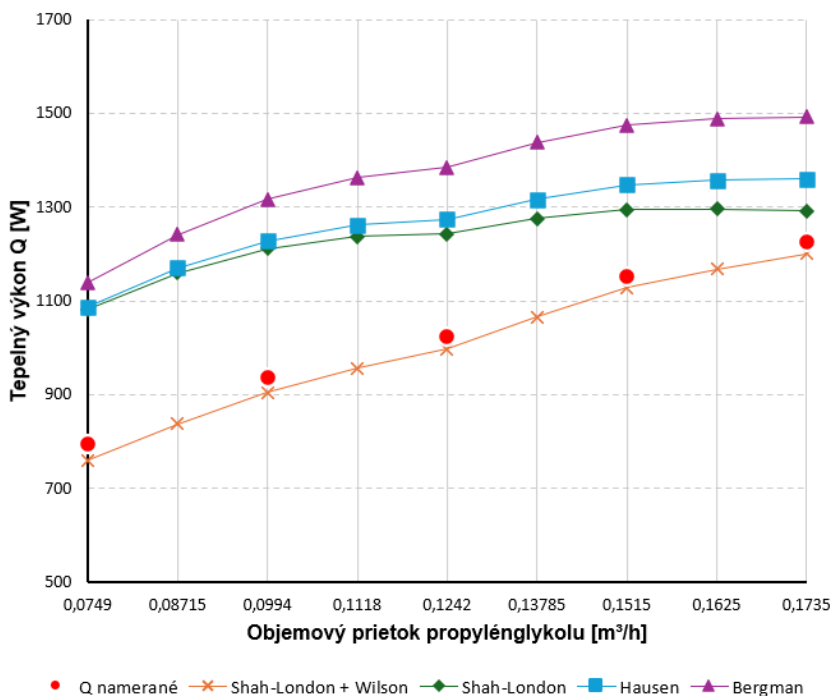
$$Nu_i = \begin{cases} Nu_{\text{Hausen}} \\ Nu_{\text{Bergman}} \\ Nu_{\text{Gnielinski}} \\ Nu_{\text{Sieder-Tate}} \end{cases} \quad (11)$$

Porovnanie modelov ohrevu a chladenia s experimentom

Experimentálny výkon bol určený z energetickej bilancie monopropylénglykolu a porovnaný s matematickými modelmi. Pri ohreve pracovná látka kondenzovala na vonkajšom povrchu Fieldových rúrok, zatiaľ čo pri chladení na rovnakom povrchu prebiehal var.

Režim ohrevu

Experimentálny tepelný výkon sa pohyboval približne od 795 do 1225 W a so zvyšujúcim sa prietokom monopropylénglykolu rástol.



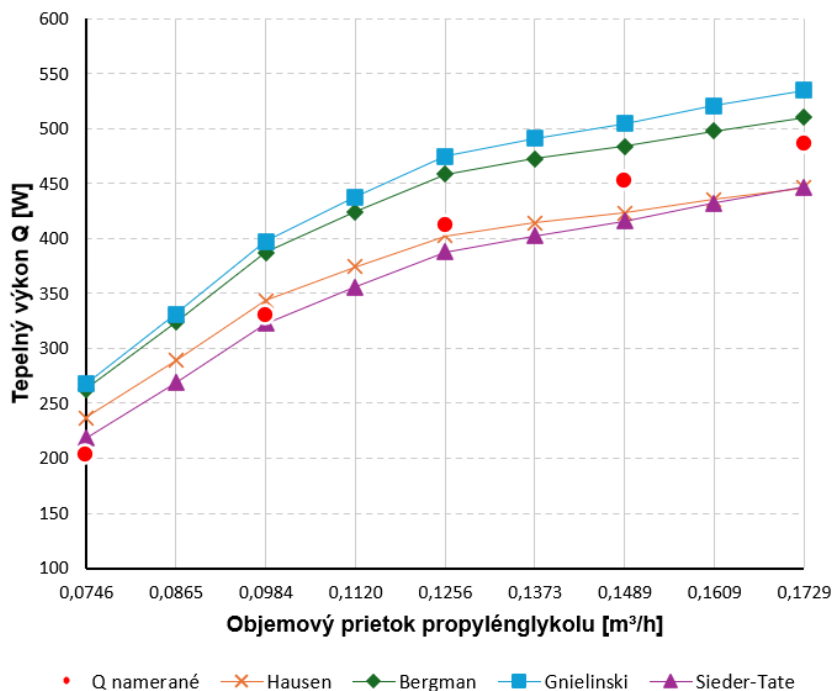
Obr. 7 Porovnanie experimentálneho a modelovo vypočítaného tepelného výkonu v režime ohrevu

Nekalibrované Nusseltove korelácie modelový výkon systematicky nadhodnocovali. Wilsonova korekcia umožnila odvodiť efektívne Nusseltovo číslo pre konkrétnu geometriu a zlepšiť zhodu modelu s experimentom.

Pri Shahovej–Londonovej korelácii s Wilsonovou korekciou sa relatívna odchýlka pohybovala od $-4,28\%$ do $-1,91\%$. Priemerná absolútna relatívna odchýlka bola približne $2,90\%$.

Režim chladenia

Pri chladení boli porovnané Hausenova, Bergmanova, Gnielinského a Siederova–Tateova korelácia. Wilsonova korekcia sa nepoužila.



Obr. 8 Porovnanie experimentálneho a modelovo vypočítaného tepelného výkonu v režime chladenia.

Experimentálny chladiaci výkon sa pohyboval približne od 204 do 486 W. Nižší výkon v porovnaní s ohrevom súvisel s menším teplotným rozdielom medzi monopropylénglykolom a saturačnou teplotou pracovnej látky.

Najlepšiu zhodu poskytla Siederova–Tateova korelácia. Jej relatívna odchýlka sa pohybovala od +7,18 % do –8,24 % a priemerná absolútna relatívna odchýlka bola 6,32 %.

Celkové porovnanie ukázalo, že model správne zachytil rast tepelného výkonu so zvyšujúcim sa prietokom v oboch režimoch. Pri ohreve bola na dosiahnutie dobrej zhody potrebná Wilsonova korekcia. Pri chladení poskytla najvyrovnanejšie výsledky Siederova–Tateova korelácia.

Účinnosť bola definovaná ako pomer užitočne preneseného tepelného výkonu k dodanému alebo odoberanému výkonu systému:

$$\eta = \frac{Q_{už}}{Q_{dod}} \cdot 100 \quad (12)$$

Maximálna experimentálne stanovená účinnosť pôvodného systému bola 55,7 % pri ohreve a 63,1 % pri chladení.

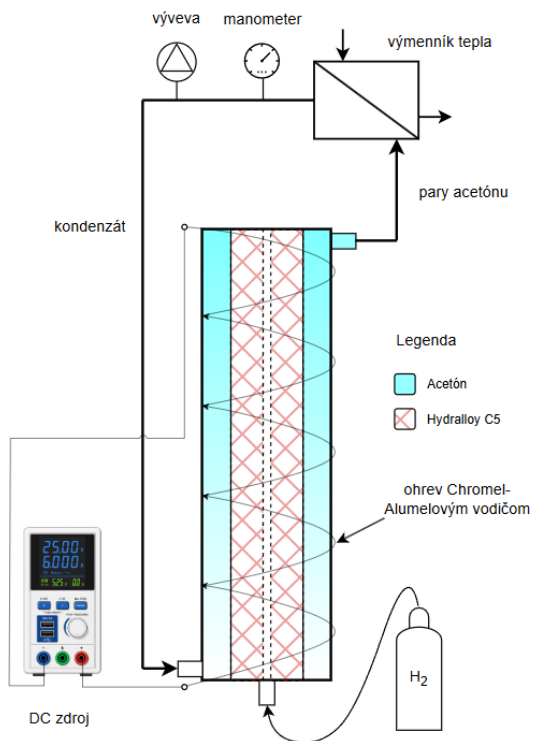
Výsledky potvrdili funkčnosť slučkovej tepelnej trubice v oboch smeroch prenosu tepla, ale zároveň poukázali na potrebu konštrukčnej úpravy s cieľom zvýšiť využiteľný tepelný výkon a znížiť tepelné straty.

V ďalšej časti dizertačnej práce je preto uvedený návrh metalhydridového zásobníka s modifikovaným tepelným manažmentom. Cieľom úpravy je zvýšiť účinnosť prenosu tepla medzi slučkovou tepelnou trubicou a metalhydridovým lôžkom v režime ohrevu.

Metalhydridový zásobník s modifikovaným tepelným manažmentom

V pôvodnom experimentálnom systéme bol vnútorný objem simulovaného zásobníka nahradený prúdiacim monopropylénglykolom. Maximálna experimentálne stanovená účinnosť dosiahla 55,7 % pri ohreve a 63,1 % pri chladení. Pri reálnom metalhydridovom zásobníku však kvapalinu nahrádza pórovité pevné lôžko, v ktorom sa teplo šíri prevažne vedením a jeho prenos obmedzuje nízka efektívna tepelná vodivosť.

Cieľom modifikácie bolo skrátiť tepelnú cestu pri ohreve. Zdroj tepla bol preto umiestnený priamo na vonkajší plášť zásobníka. Teplo sa následne prenáša cez vonkajšiu stenu, acetónový medzikružný priestor, vnútornú stenu a metalhydridové lôžko. Pri ohreve, ktorý zodpovedá desorpcii vodíka, sa acetón neuvažuje ako dvojfázová pracovná látka prenášajúca latentné teplo, ale ako vrstva s vlastným tepelným odporom. Pri chladení, zodpovedajúcom absorpcii vodíka, je smer tepelného toku opačný. Reakčné teplo sa odvádza z lôžka cez stenu zásobníka do acetónu, ktorý sa odparuje a vzniknutá para prúdi do kondenzačnej časti slučkovej tepelnej trubice. Acetón bol zvolený preto, že pri tlaku približne 6 kPa dosahuje saturačnú teplotu $-8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, čo umožňuje vytvoriť nízkoteplotnú úroveň vhodnú na odvod tepla.



Obr. 9 Schéma modifikovaného metalhydridového zásobníka s prenosom tepla cez vonkajší plášť

Navrhnutý zásobník predstavuje fyzikálny model reálneho metalhydridového zariadenia s náplňou Hydralloy C5. Matematický model vychádzal z geometrie zásobníka, hmotnosti náplne, využiteľnej kapacity zliatiny, reakčného tepla a experimentálne stanovenej efektívnej tepelnej vodivosti lôžka.

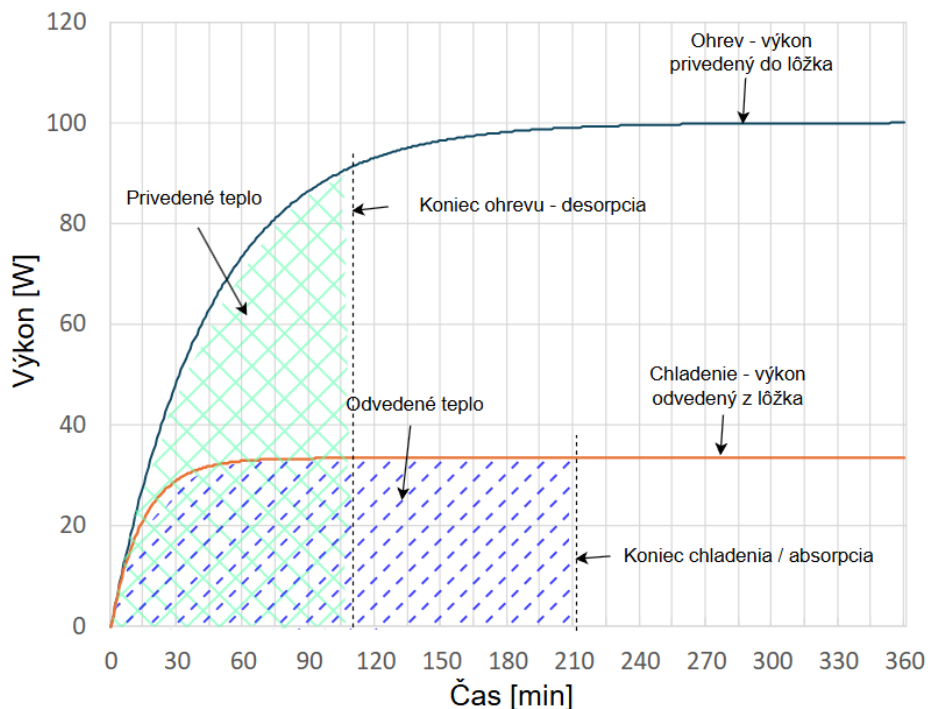
Porovnanie ohrevu a chladenia

Pri oboch režimoch bolo uvažované rovnaké reakčné teplo 109 Wh. Rozdiel medzi časom ohrevu a chladenia vyplýva z rozdielneho dostupného výkonu a z rozdielnej tepelnej zotrvačnosti systému.

Tab. 3 Porovnanie časov ohrevu a chladenia metalhydridového zásobníka

Režim	Dej v hydridovom lôžku	Reakčné teplo	Ustálený/ maximálny výkon	Čas so zohľadnením nábehu
Ohrev	Desorpcia	109 Wh	100 W	106 min
Chladenie	Absorpcia	109 Wh	33,45 W	210 min

Pri ohreve bol ideálny čas dodania energie približne 65 min, ale po zohľadnení nábehu výkonu sa predĺžil na 106 min. Pri chladení bol ideálny čas približne 196 min a po zohľadnení nábehu výkonu 210 min.



Obr. 10 Časový priebeh výkonu a kumulovaného tepla pri ohreve a chladení metalhydridového zásobníka s náplňou Hydralloy C5 podľa matematického modelu pri využiteľnej kapacite 1,3 hm. % H_2

Krivka ohrevu sa približuje k ustálenému výkonu 100 W, zatiaľ čo krivka chladenia k maximálnej hodnote 33,45 W. Vyšrafované plochy pod krivkami predstavujú teplo dodané do metalhydridového lôžka alebo z neho odvedené. Koniec procesu je určený okamihom, keď plocha pod príslušnou krivkou dosiahne 109 Wh.

Výsledky ukazujú, že modifikovaný zásobník je z hľadiska prenosu tepla použiteľný. Pri ohreve dosahuje vyšší dostupný výkon a modelovo stanovenú účinnosť 82,3 %, čo je viac ako experimentálna účinnosť pôvodného systému 55,7 %. Pri chladení je absorpcia limitovaná maximálnym výkonom acetónového okruhu.

Dôležitým parametrom oboch režimov je efektívna tepelná vodivosť metalhydridového lôžka. Jej nižšia hodnota zvyšuje tepelný odpor, znižuje využiteľný výkon a predlžuje čas potrebný na výmenu reakčného tepla. Skrátene času absorpcie by preto vyžadovalo znížiť tepelný odpor medzi lôžkom a pracovnou látkou, zvýšiť efektívnu tepelnú vodivosť Hydrallloy C5 alebo zväčšiť teplovýmennú plochu.

DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Cieľom práce bolo vytvoriť a experimentálne overiť matematický model tepelného manažmentu metalhydridového zásobníka vodíka s využitím slučkových tepelných trubíc. Riešenie bolo posudzované samostatne pre režim ohrevu, zodpovedajúci desorpcii vodíka, a pre režim chladenia, zodpovedajúci absorpcii vodíka.

Experimentálne overenie pôvodného systému potvrdilo, že slučková tepelná trubica umožňuje prenášať teplo v oboch smeroch. Maximálna experimentálne stanovená účinnosť dosiahla 55,7 % pri ohreve a 63,1 % pri chladení. Výsledky potvrdili funkčnosť dvojfázového prenosu tepla, zároveň však ukázali, že časť dodanej energie sa pri ohreve strácala v jednotlivých častiach tepelného okruhu, v konštrukcii zariadenia a do okolia.

Na základe výsledkov bol navrhnutý modifikovaný tepelný manažment, v ktorom boli oddelené spôsoby ohrevu a chladenia. Pri desorpcii bol použitý priamy odporový ohrev vonkajšieho plášťa

zásobníka. Tým sa skrátila tepelná cesta medzi zdrojom tepla a metalhydridovým lôžkom a odstránila sa potreba prenášať teplo cez samostatný výparník a ďalší dvojfázový okruh. Pri absorpcii zostalo zachované pasívne odvádzanie reakčného tepla pomocou slučkovej tepelnej trubice. Pre modifikovaný zásobník bola modelovo stanovená účinnosť ohrevu 82,3 %, čo predstavuje zvýšenie využiteľnosti dodanej energie v porovnaní s pôvodnou experimentálnou účinnosťou 55,7 %. Hlavný prínos modifikácie spočíva v tom, že teplo sa už neprenáša cez viacero medzičlánkov, ale vstupuje do zásobníka priamo cez jeho plášť. Pri chladení zostáva použitie slučkovej tepelnej trubice vhodné, pretože umožňuje pasívny odvod reakčného tepla bez obehového čerpadla. Výkon chladenia je však ovplyvnený veľkosťou teplovýmennej plochy, tepelným odporom metalhydridového lôžka, stenou zásobníka a podmienkami varu pracovnej látky. Možnosťou ďalšieho zlepšenia je zväčšenie výparnej plochy, použitie rebier alebo materiálov s vyššou tepelnou vodivosťou. Výsledky ukazujú, že slučkové tepelné trubice sú pre metalhydridové zásobníky vhodné najmä v režime chladenia.

Prínos pre vedecko-výskumnú oblasť

Hlavným vedeckým prínosom práce je vytvorenie a overenie matematického modelu tepelného manažmentu metalhydridového zásobníka vodíka s využitím fázovej premeny pracovnej látky.

Model bol najskôr vytvorený pre simulovaný zásobník, v ktorom bola metalhydridová náplň nahradená prúdiacim monopropylénglykolom. Toto usporiadanie umožnilo samostatne analyzovať režim ohrevu a chladenia, určiť tepelný výkon a experimentálne overiť schopnosť slučkovej tepelnej trubice prenášať teplo v oboch smeroch. Významným prínosom bolo porovnanie

literárnych Nusseltových korelácií s experimentálnymi údajmi pre Fieldov rúrkový výmenník. Ukázalo sa, že pre skúmanú geometriu je potrebné použiť korekčný postup. Wilsonova korekcia umožnila upraviť efektívne Nusseltovo číslo na strane monopropylénglykolu a presnejšie určiť súčiniteľ prestupu tepla, celkový tepelný odpor a prenesený výkon.

Pôvodný model bol následne rozšírený na modifikovaný zásobník s reálnou náplňou Hydralloy C5. V tomto modeli bolo prúdiace médium nahradené pórovitým metalhydridovým lôžkom, v ktorom sa teplo šíri prevažne vedením. Model tak umožnil posúdiť vplyv efektívnej tepelnej vodivosti lôžka na dostupný výkon a čas absorpcie alebo desorpcie.

Prínos pre technickú prax

Praktickým prínosom práce je návrh a posúdenie modifikovaného tepelného manažmentu malého metalhydridového zásobníka. Pri ohreve bol navrhnutý priamy odporový ohrev vonkajšieho pláštia, ktorý zjednodušil tepelnú cestu a zvýšil využiteľnosť dodanej energie. Pri chladení bolo zachované použitie slučkovej tepelnej trubice na pasívny odvod reakčného tepla.

Práca zároveň poukazuje na potrebu zohľadniť pri návrhu metalhydridového zásobníka efektívnu tepelnú vodivosť lôžka, veľkosť teplovýmennej plochy, pracovné tlaky a teploty, kompatibilitu materiálov, tesnosť, mechanickú stabilitu a ekonomické náklady.

Resumé v anglickom jazyku

The dissertation thesis focused on the development and experimental verification of a mathematical model for the thermal management of a metal hydride hydrogen storage tank using a loop heat pipe. The system was evaluated separately for heating during hydrogen desorption and cooling during hydrogen absorption.

The original experimental system demonstrated that the loop heat pipe could transfer heat in both directions. The maximum experimentally determined efficiency was 55.7% during heating and 63.1% during cooling. The results confirmed the functionality of the phase-change heat-transfer system, but also showed that part of the supplied energy was lost in the thermal circuit, the device structure and the surroundings.

Based on these findings, a modified thermal management concept was proposed. During desorption, direct electrical resistance heating of the outer tank shell was used to shorten the heat-transfer path between the heat source and the metal hydride bed. During absorption, the loop heat pipe was retained for passive removal of reaction heat without a mechanical circulation pump.

The mathematical model predicted a heating efficiency of 82.3% for the modified configuration, compared with the experimentally determined value of 55.7% for the original system. This value represents a model-based estimate. Acetone was identified as a suitable working fluid for low-temperature cooling. At a pressure of approximately 6 kPa, its saturation temperature is about -8.3°C .

Literatúra

- [1] BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2011.
- [2] CAPURSO, G.; SCHIAVO, B.; JEPSEN, J.; LOZANO, G.; METZ, O.; SACCONI, A.; DE NEGRI, S.; BELLOSTA VON COLBE, J. M.; KLASSEN, T.; DORNHEIM, M. Development of a modular room-temperature hydride storage system for vehicular applications. Applied Physics A. 2016, 122, 236. DOI: 10.1007/s00339-016-9771-x.
- [3] DORNHEIM, M. Thermodynamics of Metal Hydrides: Tailoring Reaction Enthalpies of Hydrogen Storage Materials. In: Thermodynamics – Interaction Studies – Solids, Liquids and Gases. InTech, 2011, s. 891–914. DOI: 10.5772/21662.
- [4] HAUSEN, H. Darstellung des Wärmeüberganges in Rohren durch verallgemeinerte Potenzbeziehungen. Z. VDI-Beiheft Verfahrenstechnik. 1943, č. 4, s. 91–98.
- [5] KÖLBIG, M.; BÜRGER, I.; LINDER, M. Thermal applications in vehicles using Hydralloy C5 in single and coupled metal hydride systems. Applied Energy. 2021, 287, 116534. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116534.
- [6] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. NIST Chemistry WebBook, SRD 69: Acetone. [Online]. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C67641> [cit. 22. 6. 2026].
- [7] POLAČIKOVÁ, M.; NEMEC, P.; MALCHO, M.; JANDAČKA, J. Experimental Investigations of a Passive Cooling System Based on the Gravity Loop Heat Pipe Principle for an Electrical Cabinet. Applied Sciences. 2022, 12(3), 1634. DOI: 10.3390/app12031634.
- [8] SAKINTUNA, B.; LAMARI-DARKRIM, F.; HIRSCHER, M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. International Journal of

Hydrogen Energy. 2007, 32, s. 1121–1140. DOI:
10.1016/j.ijhydene.2006.11.022.

[9] VDI E. V. VDI Heat Atlas. 2nd ed. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010.
DOI: 10.1007/978-3-540-77877-6. ISBN 978-3-540-77876-9.

[10] WILSON, E. E. A Basis for Rational Design of Heat Transfer Apparatus.
Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. 1915, 37, s.
47–70. DOI: 10.1115/1.4059736.

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI DOKTORANDA

ADF – Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

ADF 01

MARTINČEK, I. – KADUCHOVÁ, K. – JANDAČKA, J. Utilization of supercapacitors for energy storage in sustainable off-grid photovoltaic system. In: *Advances in Thermal Processes and Energy Transformation*. 2023, roč. 6, č. 3, s. 46–51. ISSN 2585-9102. DOI: 10.54570/atpet2023/06/03/0046.

AFC – Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC 01

MARTINČEK, I. – JANDAČKA, J. – MALCHO, M. Metal hydride hydrogen storage as a safe alternative to traditional hydrogen storage methods. In: *System Safety: Human – Technical – Facility – Environment: 13th International Conference, Zakopane 2024, Hybrid Conference, 11–13 December 2024*. 1. vyd. Varšava: De Gruyter

Poland, 2024, roč. 6, č. 1, s. 218–226. ISSN 2657-5450. ISBN 978-83-67405-91-1. e-ISBN 978-83-67405-90-4. DOI: 10.2478/czoto-2024-0024.

AFD – Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD 01

MARTINČEK, I. – MALCHO, M. – JANDAČKA, J. – ČAJOVÁ KANTOVÁ, N. – CHUPÁČ, R. Inovatívny spôsob ohrevu a chladenia vodíkového zásobníka na báze metalhydridu. In: *Zborník medzinárodnej vedeckej konferencie RESpect 2024*. 1. vyd. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2024, s. 43–49. ISBN 978-80-553-4731-8. [CD-ROM].

AFD 02

MALCHO, M. – JANDAČKA, J. – MARTVOŇOVÁ, L. – HRUŠKOVÁ, N. – **MARTINČEK, I.** Experimentálna verifikácia systému na spätné získavanie tepla v malých zdrojoch pomocou LHP. In: *Vykurovanie 2024: zborník prednášok z 32. medzinárodnej vedecko-odbornej konferencie na tému – Zelená dohoda a budúcnosť zásobovania teplom*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2024, s. 129–136. ISBN 978-80-8284-024-0. [USB kľúč].

AFD 03

MARTINČEK, I. – JANDAČKA, J. – MALCHO, M. – HOLUBČÍK, M. – KADUCHOVÁ, K. Superkondenzátory ako energetické úložisko v ostrovných fotovoltických systémoch. In: *Vykurovanie 2024: zborník prednášok z 32. medzinárodnej vedecko-odbornej konferencie na tému – Zelená dohoda a budúcnosť zásobovania teplom*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2024, s. 307–316. ISBN 978-80-8284-024-0. [USB kľúč].

AFH – Abstrakty príspevkov z domácich konferencií

AFH 01

MALCHO, M. – JANDAČKA, J. – MARTINČEK, I. – KADUCHOVÁ, K.
Zariadenie na simuláciu tepelného manažmentu zásobníka vodíka s metalhydridovou náplňou. In: *42nd Meeting of the Departments of Fluid Mechanics and Thermomechanics & 24 The Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy: Collection of Abstracts*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2025, s. 22. ISBN 978-80-554-2213-8.

ČLÁNKY PRIJATÉ NA PUBLIKOVANIE

MARTINČEK, I.; MARTINČEK, I. Optical Fiber Tip PDMS Fabry–Perot Cavity for Sensor Applications in Gases and Liquids. *International Journal of Optics*. Research Article. Prijaté na publikovanie, in production. DOI: 10.1155/ijo/6624881. Manuscript ID: 6624881.

ČLÁNKY V RECENZNOM KONANÍ

MARTINČEK, I.; JANDAČKA, J.; MALCHO, M.; KADUCHOVÁ, K.; LENHARD, R. Heat Transfer Modeling and Wilson-Based Nusselt Correction for a Field-Tube Thermosyphon Condenser. Rukopis predložený do časopisu *Heat Transfer Engineering*, v recenznom konaní. Manuscript No. HTE-3126.