

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2024

Ing. Branislav Zvada



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Branislav Zvada

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Spaľovanie zmesi zemného plynu a vodíka v zdrojoch tepla

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

Žilina 2024

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

Predkladateľ: Ing. Branislav Zvada
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky

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

Oponenti:	1. prof. Ing. Miroslav Rimár, CSc.	TU Košice
	2. prof. Ing. František Urban, PhD.	STU Bratislava
	3. doc. Ing. Richard Lenhard, PhD.	ŽU v Žiline

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 26.8.2024 o 9:00 hod. v miestnosti BC309 na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenu 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

Obsah

ÚVOD	5
1 Vodík	5
2 Výpočtový model fyzikálnych vlastností zmesi zemného plynu s vodíkom	7
2.1 ISO 6976:2016.....	7
2.2 Referenčná stavová rovnica GERG-2008 pre zemné plyny a podobné zmesi	7
3 Vplyv vodíka na fyzikálno – chemické vlastnosti plynného paliva	8
3.1 Medza horľavosti.....	8
3.2 Vplyv vodíka na stechiometrický pomer	9
3.3 Vplyv vodíka na zmenu rýchlosti šírenia plameňa.....	9
3.4 Zhášacia vzdialenosť.....	10
3.5 Adiabatická teplota plameňa.....	11
3.6 Spalné teplo.....	12
3.7 Hustota, relatívna hustota.....	12
3.8 Výtoková rýchlosť z dýzy	13
3.9 Zmena objemu spaľovacieho vzduchu	13
3.10 Prietok plynu dýzou.....	14
3.11 Priebeh výkonu pri rôznych koncentráciách vodíka.....	15
3.12 Produkcia emisií pri rôznych koncentráciách vodíka.....	15
3.13 Experimentálne potvrdenie zhášacej vzdialenosti	15
3.14 Úprava horáka atmosférického kotla	16
ZÁVER	17
Prínos pre vedecko-výskumnú oblasť	18
Prínos pre technickú prax.....	18
Prínos pre pedagogickú činnosť	18
Zoznam použitej literatúry	19
Zoznam vlastných vedeckých publikácií	21
RESUME	23
SUMMARY	23

ÚVOD

Rozšíreniu vodíka bráni množstvo problémov, ako sú vysoká cena produkcie, nedostatočná infraštruktúra, neexistujúca legislatíva podporujúca vodík, množstvo technických výziev, ktoré nie sú vyriešené na dostatočnej úrovni, aby mohlo prísť k akceptácii vodíka v širšom meradle. Napriek tomuto všetkému vodík poskytuje vysokú variabilitu a ponúka vysoký potenciál pre znižovanie emisií, takže je pravdepodobné, že bude hrať dôležitú úlohu v prechode na nízko uhlíkové hospodárstvo.

V tejto práci sa budem venovať možnostiam produkcie vodíka okrajovo, hlavným zameraním je možnosť využitia ako energetického nosiča, paliva pre spaľovanie zemného plynu obohateného vodíkom v zdroji tepla, v atmosférickom kotly určenom pre domácnosť. Vodík primiešaný v zemnom plyne mení fyzikálne vlastnosti takejto zmesi, čo následne vplýva na zmenu spaľovacích vlastností horáka. A taktiež mení výkonové a emisné charakteristiky plynového kotla a spôsobuje signifikantné zmeny v spoľahlivosti a bezpečnosti prevádzky. Práca sa venuje celkovému stanoveniu týchto zmien a navrhuje opatrenia, ktoré sú nevyhnutné na prevádzku zvoleného atmosférického plynového kotla na zmes zemného plynu s vodíkom do obsahu 20 % obj.

Ciele dizertačnej práce

Dizertačná práca sa zaoberá numerickou simuláciou fázových prechodov vyparovania a kondenzácie v uzavretých priestoroch s využitím výpočtovej dynamiky tekutín (CFD) v programe ANSYS Fluent. Cieľom je optimalizácia numerického modelu medzifázového transportu hmoty a zvýšenie presnosti CFD simulácií v porovnaní s reálnymi meraniami.

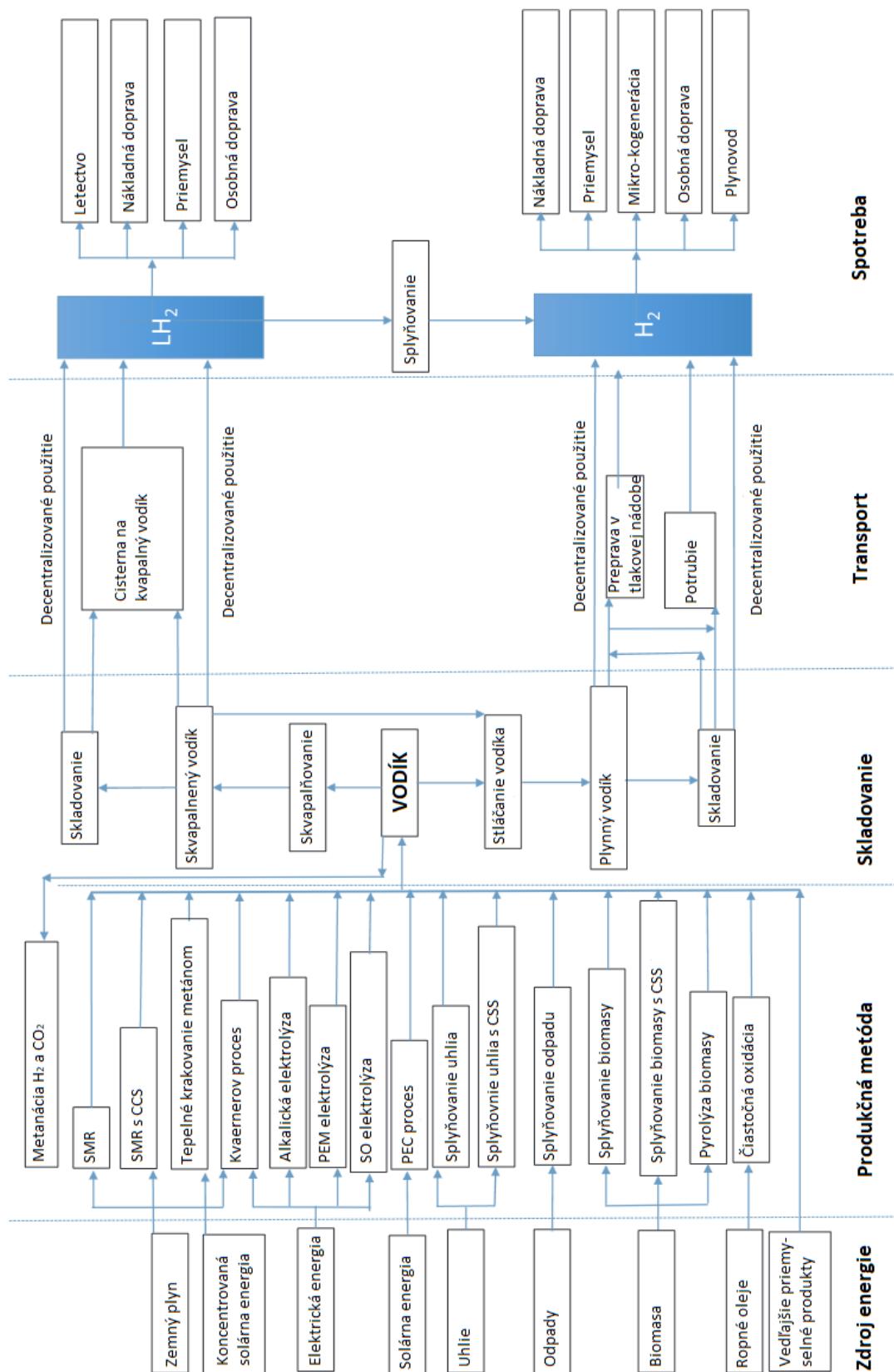
Práca analyzuje súčasný stav riešenia viacfázových prúdení, pričom sa zameriava na Lee model a jeho korelačné koeficienty, ktoré sú kľúčové pre presnosť simulácií fázových premien v programe ANSYS Fluent. Keďže štandardné hodnoty týchto koeficientov často nezodpovedajú reálnym podmienkam, práca sa snaží experimentálne stanoviť ich optimálne hodnoty pre dané podmienky a následne ich využiť na presnejšie prispôsobenie CFD simulácií reálnym procesom.

K splneniu cieľa práce bolo potrebné naplniť nižšie uvedené čiastkové úlohy:

- Zhodnotenie súčasného stavu a analýza transportu tepla pri fázových prechodoch
- Numerické modely viacfázového prúdenia s vyparovaním a kondenzáciou v ANSYS Fluent
- Optimalizácia numerického modelu medzifázového transportu hmoty v uzavretom priestore
- Návrh a realizácia experimentálneho merania kondenzácie a vyparovania v uzatvorenom priestore
- Vyhodnotenie výsledkov numerickej simulácie a experimentálneho merania

1 Vodík

Vodík (H – hydrogenium) je chemický prvok s protónovým číslom 1. Vo voľnej prírode sa atómy vodíka nenachádzajú a pri zrode sa okamžite spájajú do molekuly H₂. Vodík je najrozšírenejším prvkom vo vesmíre, napriek tomu tvorí asi len 0,14 % hmotnosti zemskej kôry.



Obrázok 1 Potenciálne cesty vodíka do roku 2050

2 Výpočtový model fyzikálnych vlastností zmesi zemného plynu s vodíkom

2.1 ISO 6976:2016

Najrozšírenejším nástrojom na stanovovanie fyzikálnych vlastností zemného plynu aj s obsahom vodíka je norma ISO 6976:2016, ktorá stanovuje metódy na výpočet:

- spálneho tepla,
- výhrevnosti,
- hustoty,
- relatívnej hustoty,
- hrubého Wobbeho indexu,
- čistého Wobbeho indexu

zemného plynu a iných horľavých plynných palív, ak je známe zloženie plynu v molárnych zlomkoch. Uvedené metódy poskytujú prostriedky na výpočet vlastností plynu pri štandardných podmienkach. [57]

Norma sa vzťahuje na zemný plyn, a iné horľavé plyny, ktoré sa bežne používajú v priemyselných a komerčných aplikáciách. Patria sem zemný plyn a plyny s vysokým podielom metánu. Norma sa nepoužíva na výpočet vlastností zmesí plynov, ktoré obsahujú kvapalné alebo pevné látky. [57]

Vyššie uvedená norma je však uplatniteľná len pri splnení určitých podmienok, ktoré sú:

- Minimálny obsah metánu v zmesi musí byť 0,5 molu,
- Obsah dusíka v zmesi nesmie presiahnuť 0,3 molu,
- Oxid uhličitý a etán nesmú presiahnuť 0,15 molu v zmesi,
- Ostatné komponenty a teda aj vodík nesmú presiahnuť 0,05 molu v zmesi,
- Plyn musí byť v podmienkach nad krivkou nasýtenia.

Z uvedeného teda vyplýva, že norma ISO 6976:2016 je použiteľná pre výpočty pri štandardných podmienkach a pri zmesiach zemného plynu z obsahom vodíka do 0,05 molu. [57]

2.2 Referenčná stavová rovnica GERG-2008 pre zemné plyny a podobné zmesi

Presná znalosť termodynamických vlastností zemných plynov a iných zmesí pozostávajúcich zo zložiek zemného plynu má nenahraditeľný význam pre inžinierstvo a vykonávanie technických procesov. Spracovanie, preprava potrubím alebo lodnou prepravou, skladovanie a skvapalňovanie zemného plynu sú príklady technických aplikácií, kde sa vyžadujú termodynamické vlastnosti rôznych zmesí zložiek zemného plynu. Pre tieto procesy si návrh kompresorov, výmenníkov tepla a skladovacích zariadení vyžaduje výpočty vlastností v širokom rozsahu zloženia zmesí a prevádzkových podmienok v homogénnych plynných, kvapalných a superkritických oblastiach a pre rovnovážne stavy para-kvapalina. [58]

Neexistuje však žiadna stavová rovnica pre zemné plyny, ktorá by bola vhodná pre všetky príkladné aplikácie a ktorá by vyhovovala požiadavkám na presnosť popisu termodynamických vlastností v celej oblasti. Toto tvrdenie zahŕňa nielen stavovú rovnicu AGA8-DC92, ktorá platí len pre obmedzený rozsah v oblasti homogénneho plynu. Zahŕňa tiež rôzne kubické stavové rovnice a najmä korelačné rovnice aplikované pre obmedzený rozsah v kvapalnej oblasti. [58]

Preto bola vyvinutá široko rozsahová stavová rovnica pre zemné plyny a iné zmesi, ktorá spĺňa požiadavky štandardných a pokročilých aplikácií zemného plynu. Tento výskumný projekt podporili európske plynárenské spoločnosti E.ON Ruhrgas (Nemecko), Enagás (Španielsko), Gasunie (Holandsko), Gaz de France (Francúzsko), Snam Rete Gas (Taliansko) a Statoil (Nórsko), ktoré sú členmi GERG (Groupe Européen de Recherches Gazières). Prvá verzia stavovej rovnice zahŕňa zmesi pozostávajúce až z 18 zložiek. Na rozdiel od rovnice AGA8-DC92 neexistujú v podstate žiadne obmedzenia v rozsahu koncentrácie. [58]

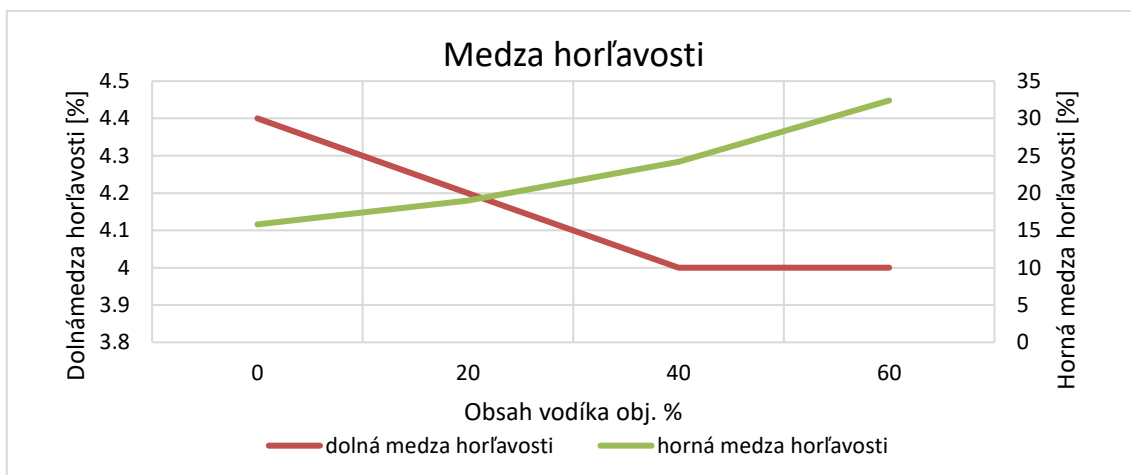
V roku 2008 bola dokončená expanzia GERG-2004 o začlenenie troch zložiek n-nonán, n-dekán a sírovodík. Rovnicu teda možno teraz použiť na zmesi pozostávajúce z ľubovoľnej kombinácie 21 zložiek. Táto rozšírená stavová rovnica sa nazýva GERG-2008. Stavová rovnica GERG-2008 bola prijatá ako norma ISO (ISO 20765-2) pre zemné plyny a podobné zmesi. [58]

Zoznam zložiek: metán, dusík, oxid uhličitý, etán, propán, n-bután, izobután, n-pentán, izopentán, n-hexán, n-heptán, n-octán, n-nonán, n-decán, vodík, sulfán, oxid uhoľnatý, voda, kyslík, argón, hélium. [58]

3 Vplyv vodíka na fyzikálno – chemické vlastnosti plynného paliva

Fyzikálno-chemické vlastnosti vodíka sa líšia od metánu, ktorý je hlavnou zložkou zemného plynu, a preto nie je možné ľubovoľne miešať vodík so zemným plynom. Pri primiešavaní vodíka do zemného plynu je potrebné brať do úvahy možné dôsledky tejto zmesi. Vplyv obsahu vodíka v zmesi so zemným plynom vyplýva z pravidiel, ktoré platia pre zameniteľnosť jednotlivých skupín plynných palív.

3.1 Medza horľavosti



Obrázok 2 Závislosť obsahu vodíka a medze horľavosti

Objem vodíka v zmesi na úrovni 20 % obj. je prvou hranicou pripravenosti plynárenskej infraštruktúry, nazýva sa aj H2-20 ready. Z tohto dôvodu je celá práca zameraná na určovanie ovplyvnenia vodíkom práve pri takejto koncentrácii. Z uvedeného grafu môžeme konštatovať, že pridaním vodíka v medzi do 20 % obj. dochádza k minimálnemu ovplyvneniu medze horľavosti a to menovite pri dolnej medzi horľavosti z hodnoty 4,4 % na 4,2 % a pri hornej medze horľavosti z hodnoty 15 % na hodnotu 19 % objemu plynu vo vzduchu. [51]

3.2 Vplyv vodíka na stechiometrický pomer

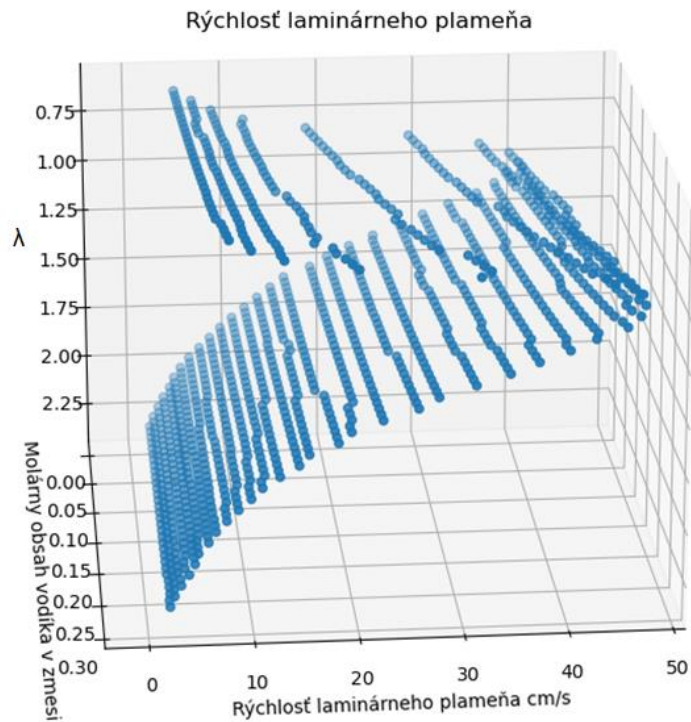


Obrázok 3 Vplyv vodíka na stechiometrický pomer

Pri primiešavaní vodíka do zmesi zemného plynu klesá potreba objemu spaľovacieho vzduchu pre stechiometrický pomer. Pri koncentrácii vodíka 20 % obj. v zmesi zemného plynu dochádza k poklesu hodnoty pomeru objemu stechiometrického vzduchu z hodnoty 9,729 na hodnotu 8,256. Vďaka tomuto efektu dochádza k výraznému ovplyvneniu horenia v zdroji tepla.

3.3 Vplyv vodíka na zmenu rýchlosti šírenia plameňa

Na stanovenie rýchlosti čela plameňa v tejto práci bol použitý spaľovací model v prostredí programovacieho jazyka Python. Vďaka tomuto modelu môžeme simulovať rýchlosť čela plameňa pri rôznych pomeroch vzduchu k palivu a rôznych koncentráciách vodíka v výpočtovej zmesi, model používa pokročilý mechanizmus Yaml, vďaka ktorému ponúka vysokú presnosť výpočtu.

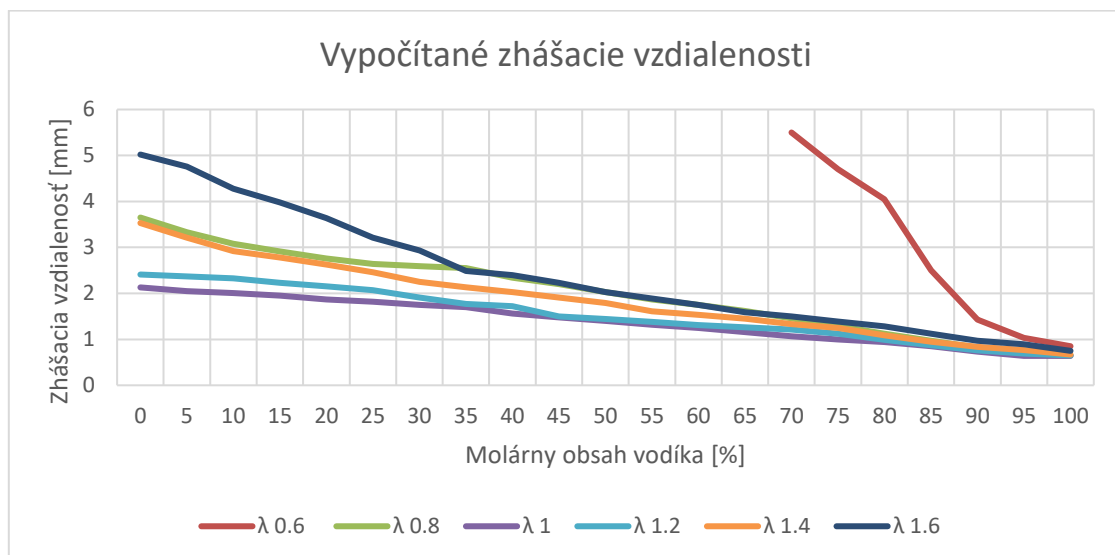


Obrázok 4 Graf závislosti rýchlosti čela plameňa pri rôznych koncentráciách vodíka a pomeroch λ z výpočtového modelu.

Výslednú rýchlosť čela plameňa v prvom rade výrazne ovplyvňuje hlavne parameter λ a v druhom rade obsah vodíka. Avšak zmenou koncentrácie vodíka v zmesi sa mení aj výtoková rýchlosť z dýzy a teda nastáva zmena vo výtokovej kinetickej energii zmesi, ktorá narastá a teda sa zmes v dôsledku zvýšeného ejekčného účinku posúva do oblastí s vyšším obsahom vzduchu ako pri zmesi bez obsahu vodíka. Z uvedených výpočtov je nutné konštatovať, že na rýchlosť horenia má väčší vplyv parameter λ než samotná koncentrácia vodíka v zmesi, čím potvrdzujeme zistenia iných autorov, že koncentrácia vodíka do 20 % obj. má na rýchlosť plameňa malý vplyv, posun z hodnoty 40,7 na 43,7 cm/s tj. o 7,3 %. Taktiež môžeme pozorovať výrazne strmý nárast v rýchlosti čela plameňa pri posune pomeru zmesi z oblasti bohatej do oblasti stechiometrickej kde dochádza k najvyšším hodnotám rýchlosti čela plameňa. Z uvedeného môžeme konštatovať, že vodík má zásadný vplyv na rýchlosť šírenia čela plameňa pri vyšších koncentráciách. Pri nižších koncentráciách je vplyv najmä z dôvodu zmeny výtokovej rýchlosti a tým ovplyvneniu ejekčného účinku dýzy.

3.4 Zhášacia vzdialenosť

Zhášanie akéhokoľvek plameňa nastáva, keď tepelné strata z plameňa je vyššia ako teplo generované chemickou reakciou horenia, takže chemická reakcia z dôvodu nedosiahnutia aktivačnej energie molekúl nemôže pokračovať.



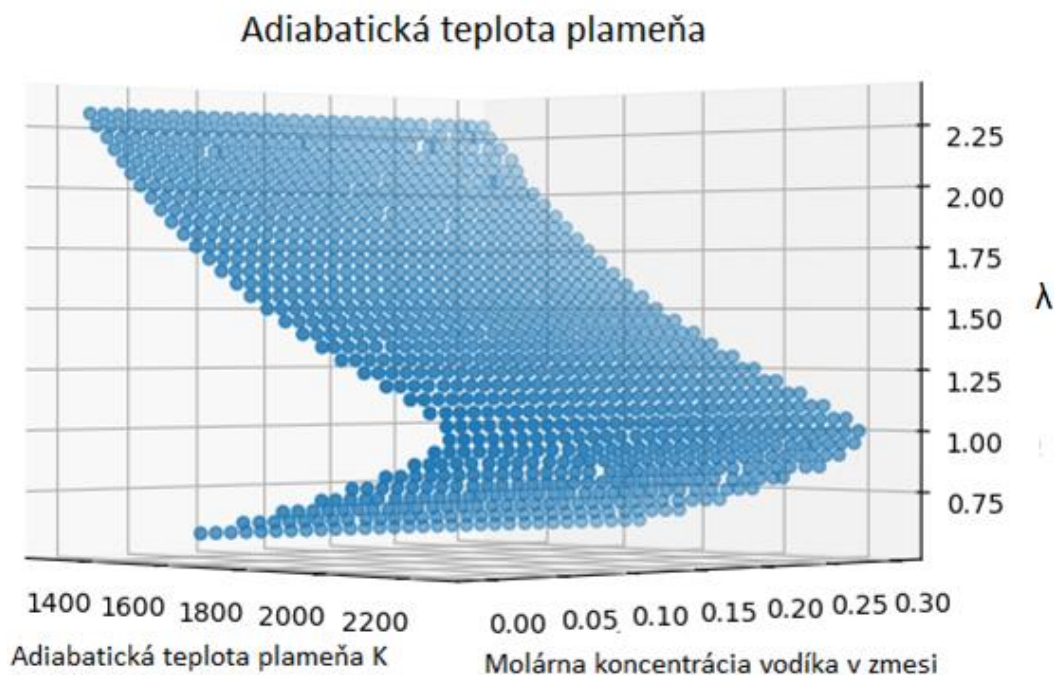
Obrázok 5 Graf vypočítaných zhášacích vzdialeností pre rôzne pomery λ a koncentrácie vodíka.

Najnižší charakteristický rozmer kanála sa dosahuje pri stechiometrickom pomere zmesi a pri maximálnej koncentrácii vodíka, taktiež môžeme pozorovať výrazný vplyv vodíka pri horení chudobnej zmesi $\lambda=1,6$ kedy je ovplyvnenie najprudšie a môžeme konštatovať, že pri horení čistého vodíka nemá λ tak silný vplyv ako pri horení zemného plynu. Prudký pokles pri horení bohatej zmesi je z dôvodu zmeny limitov medze horľavosti. Ďalej na základe modelu môžeme konštatovať, že zhášaciu vzdialenosť vodík silne ovplyvňuje a preto predstavuje pre prevádzku kotlov bezpečnostné riziko spätného vzplanutia do priestoru horáka. Teda dochádza k dvom efektom. Keďže zmes s vodíkom má vyššiu kinetickú energiu a teda má horák vyšší ejekčný účinok, resp. sací účinok okolitého vzduchu, dochádza k posunu zmesi od bohatej k stechiometrickej a teda sa zmenšuje potrebný charakteristický rozmer kanála potrebný na zhášaciu vzdialenosť. A zároveň je zhášacia vzdialenosť ovplyvnená koncentraciou vodíka v zmesi.

Z dôvodu komplikovanosti stanovenia presných pomerov λ v širokom spektre už nainštalovaných plynových zariadení je odporúčané zabezpečiť také úpravy týchto zariadení aby charakteristický rozmer kanála spĺňal podmienky na bezpečné zhášanie plameňa na dohodnutú hodnotu obsahu vodíka v zemnom plyne. V súčasnosti, čo potvrdzuje aj najnovšia nemecká technická norma, ktorá špecifikuje vlastnosti zemného plynu pri 20 % koncentrácii vodíka, že to bude hodnota 20 % vodíka v zmesi zemného plynu. Pre túto určenú hodnotu bude postačovať charakteristický rozmer kanála 1,87 mm avšak z dôvodu možného navyšovania tejto koncentrácie by bolo vhodné opatriť tieto zariadenia úpravou rozmeru kanála na rozmer 1,50 mm a zabezpečiť tak odolnosť voči spätnému vzplanutiu až do koncentrácie 40 % vodíka v zemnom plyne.

3.5 Adiabatická teplota plameňa

Teplota adiabatického plameňa je teoretická teplota, ktorú dosiahne plameň pri ideálnych podmienkach horenia a teda jedná sa o maximálnu dosiahnuteľnú teplotu plameňa pre dané palivo. Táto teplota je dôležitým parametrom pri navrhovaní spaľovacích zariadení a motorov. V praxi nikdy nedosahujeme adiabatickú teplotu plameňa, pretože vždy dochádza k stratám tepla do okolia. Skutočná teplota plameňa je preto vždy nižšia ako vypočítaná teplota adiabatického plameňa. Na stanovenie tejto teploty bol použitý výpočtový model v prostredí programovacieho jazyka Python.



Obrázok 6 Graf závislosti adiabatickej teploty plameňa pri rôznych koncentráciách vodíka a λ pomeroch z výpočtového modelu.

Výslednú adiabatickú teplotu plameňa ovplyvňuje hlavne parameter λ a až následne obsah vodíka. Zmenou koncentrácie vodíka v zmesi sa však mení aj výtoková rýchlosť z dýzy a teda nastáva zmena vo výtokovej kinetickej energii zmesi, ktorá narastá a teda sa zmes vďaka zmene ejetčného účinku posúva do oblastí s vyšším obsahom vzduchu ako pri zmesi bez obsahu vodíka. Z uvedených výpočtov je nutné konštatovať, že na adiabatickú teplotu plameňa má väčší vplyv parameter λ než samotná koncentrácia vodíka v zmesi. Taktiež môžeme pozorovať výrazne strmý nárast v adiabatickej teplote plameňa pri posune pomeru zmesi z oblasti bohatej do oblasti stechiometrickej, kde dochádza k najvyšším hodnotám adiabatickej teploty plameňa. Z uvedeného môžeme konštatovať, že vodík má zásadný

vplyv na adiabatickú teplotu plameňa nie však z dôvodu primárnej zmeny teploty plameňa ale z dôvodu zmeny výtokovej rýchlosti a tým ovplyvneniu ejekčného účinku dýzy. Pri 20 % obj. vodíka dochádza k nárastu adiabetickej teploty plameňa len o 0,5 % pri stechiometrickom pomere.

3.6 Spalné teplo

Spalné teplo po anglicky (Gross Calorific Value) vyjadruje množstvo tepla, uvoľneného pri chemickej reakcii horenia teda úplného spálenia paliva, ktoré získame ak všetky produkty horenia privedieme do východzej teploty reaktantov, paliva a oxidizéra, a dochádza ku kondenzácii vodných pár. Spalné teplo plynu je teda množstvo tepla, ktoré sa uvoľní spálením jednotky objemu paliva.

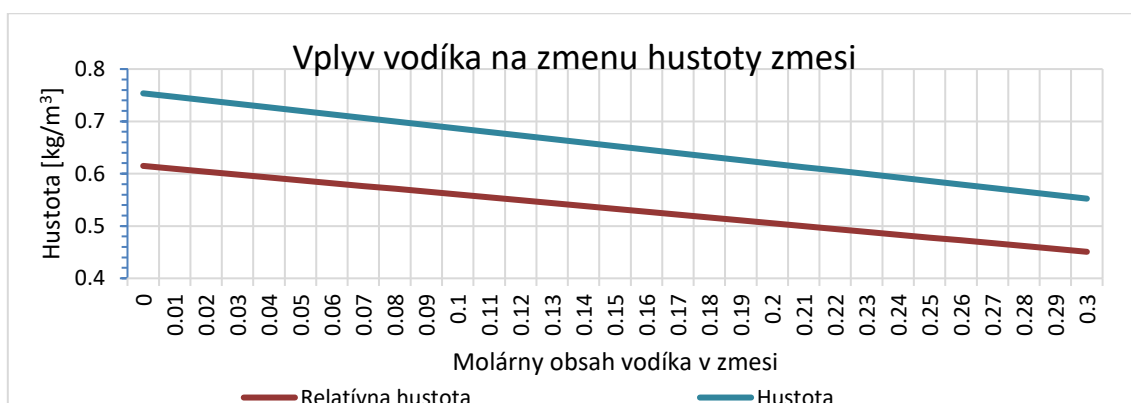


Obrázok 7 Vplyv obsahu vodíka v zmesi na spálne teplo podľa modelu GERG-2008

Nárastom vodíka v zmesi môžeme pozorovať výraznú zmenu v hodnote spalného tepla zmesi. Toto je spôsobené tým, že vodík má značne nižšie spalné teplo na m³, objemovú výhrevnosť. Pri koncentrácii vodíka 20 % obj. dochádza k poklesu spalného tepla z hodnoty 11,46 MJ/m³ na hodnotu 9,83 MJ/m³ čo predstavuje pokles o 14 %.

3.7 Hustota, relatívna hustota

Hustota je pomer medzi hmotnosťou a objemom, alebo hmotnosťou na jednotku objemu. Relatívna hustota je podiel hustoty plynu a hustoty suchého vzduchu s referenčným zložením pri rovnakých podmienkach. Výpočet zmeny hustoty so zmenou obsahu vodíka bol vypočítaný podľa matematického modelu v prostredí jazyka Python. Model využíva pri výpočte najnovšiu stavovú rovnicu GERG – 2008.

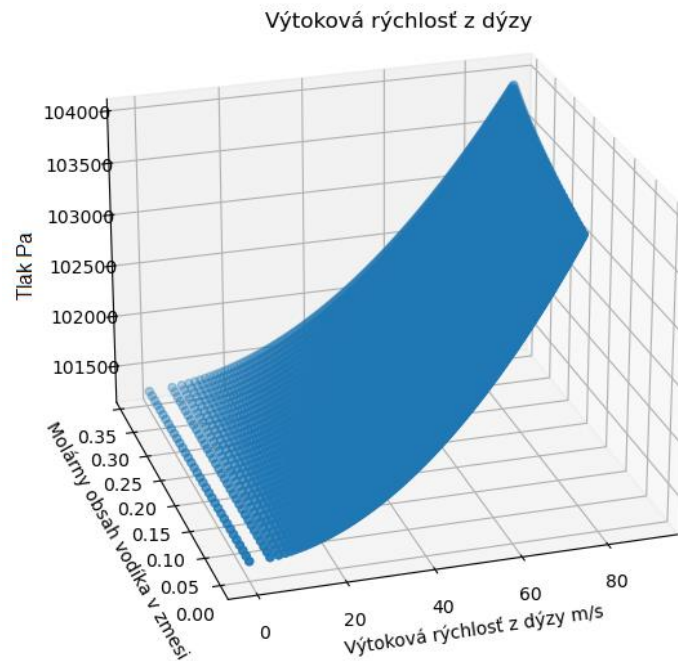


Z výsledkov môžeme sledovať lineárny pokles hodnoty hustoty na základe koncentrácie vodíka v zmesi. Pri koncentrácii vodíka 20 % obj. nastáva zmena hustoty z hodnoty 0,753 kg/m³ na hodnotu 0,626

kg/m³. Obdobne nám poklesne aj relatívna hustota zmesi. Zmena hustoty je zásadným faktorom keďže nám výrazne ovplyvňuje správanie sa plynu pri výtoku dýzou a to najmä zmenou rýchlosti výtoku.

3.8 Výtoková rýchlosť z dýzy

Ako bolo preukázané v texte vyššie na výtokovú rýchlosť z dýzy má vplyv tlakový pomer na vstupe do dýzy a tlaku okolia na výstupe z dýzy a taktiež hustota prúdiaceho média. Keďže vodík má nižšiu hustotu ako všetky ostatné zložky v zemnom plyne a teda vyššia koncentrácia vodíka v prúdiacom plyne má za následok zvýšenie výtokovej rýchlosti z dýzy. Pre účely tohto výpočtu bola použitá dýza s výtokovým priemerom 0,76 mm a číslom výtokovej účinnosť 0,89.

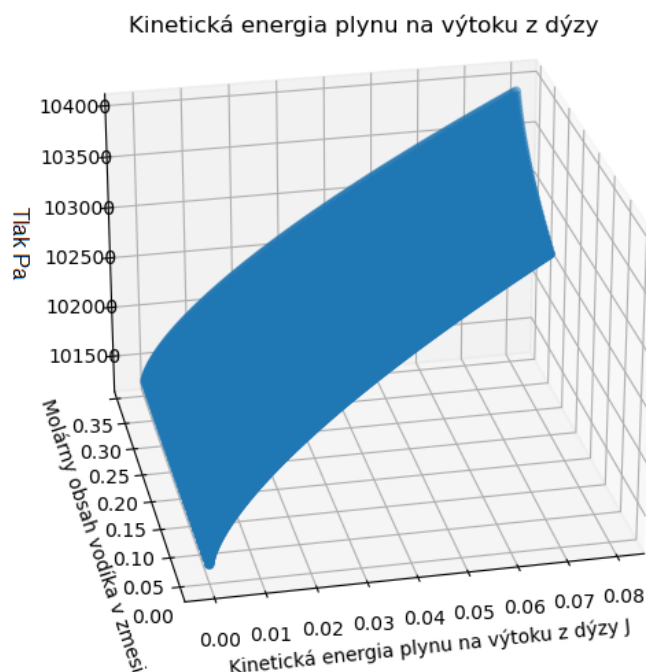


Obrázok 8 Výtoková rýchlosť z dýzy.

Vplyvom nárastu koncentrácie vodíka zmesi nám poklesne hustota zmesi. Pokles hustoty zmesi spôsobí nárast výtokovej rýchlosti z dýzy, keďže výtoková rýchlosť je daná Sain-Venant-Wantzelovým vzťahom a je funkciou tlakového spádu a hustoty. Z výsledkov modelu vidíme ovplyvnenie rýchlosti výtoku pri 20 % vodíka v zmesi kedy výtoková rýchlosť dosahuje hodnoty 80,89 m/s pri tlakovom spáde 2,6 kPa.

3.9 Zmena objemu spaľovacieho vzduchu

Množstvo nasávaného primárneho vzduchu do horákov závisí od veľkosti podtlaku, vyvolaného ejekčným účinkom plynu, vytekajúceho z dýzy horáka. Ejekčný účinok je daný kinetickou energiou prúdu plynu, ktorá je súčinom hmotnosti plynu pretekajúceho dýzou a kvadrátu jeho rýchlosti. Výtoková rýchlosť s rastúcim obsahom vodíka v zmesi rastie a hmotnosť klesá a nasávané množstvo primárneho vzduchu sa zvyšuje, pričom teoretické množstvo spaľovacieho vzduchu potrebné na spálenie 1 m³ zmesi klesá. Pri zmesiach zemného plynu s vodíkom sa oproti spaľovaniu čistého zemného plynu spaľné teplo znižuje úmerne s rastúcim obsahom vodíka v zmesiach. Pri znižovaní spaľného tepla pod menovitú hodnotu zemného plynu rastie násobok stechiometrického objemu spaľovacieho vzduchu nad hodnotu, pre ktorú bol horák konštruovaný



Obrázok 9 Priebeh kinetickej energie plynu na výtoku z dýzy.

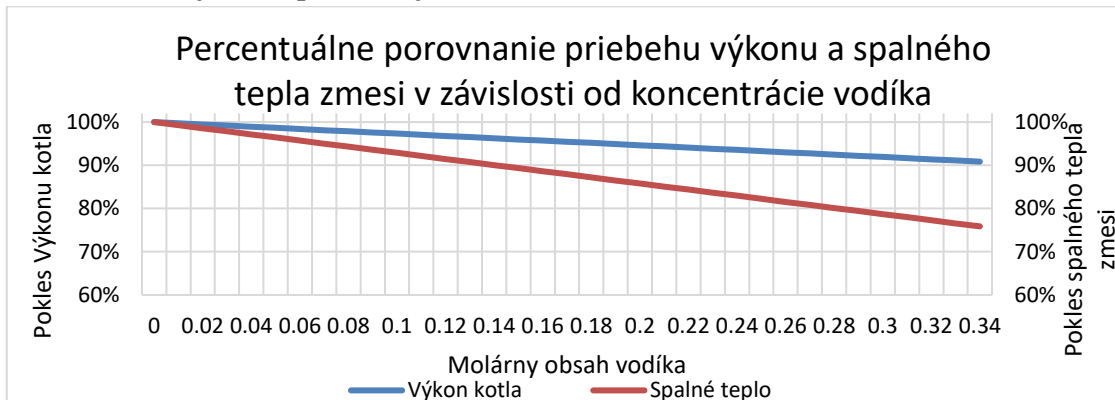
Keďže obsahom vodíka rastie výtoková rýchlosť plynu, ale zároveň klesá jeho hmotnosť, výtoková kinetická energiu plynu rastie keďže je závislá od štvorca jeho rýchlosti, nerastie však lineárne a táto krivka nekopíruje priebeh výtokovej rýchlosti. Parameter výtokovej kinetickej rýchlosti je dôležitý najmä z dôvodu nasávania primárneho vzduchu do telesa horáka. Z výpočtového modelu môžeme konštatovať, že pri 20 % vodíka v zmesi dochádza k nárastu kinetickej energie na výtoku z dýzy o 11 %.

3.10 Prietok plynu dýzou.

Keďže sa obsahom vodíka zvyšuje výtoková rýchlosť bude výsledný objemový prietok plynu dýzou vyšší, avšak ako sa znižuje hustota danej zmesi bude hmotnostný tok dýzou nižší.

Molárny zlomok H ₂ [% mol.]	Objemový prietok plynu dýzou [m ³ /h]	Hmotnostný prietok plynu dýzou [kg/s].10 ⁻⁵
0	0,119	2,46
5	0,122	2,40
10	0,125	2,34
15	0,128	2,29
20	0,131	2,23
25	0,135	2,17
30	0,139	2,11
35	0,143	2,04

3.11 Priebek výkonu pri rôznych koncentráciách vodíka



Obrázok 10 Percentuálny pokles výkonu a spalného tepla

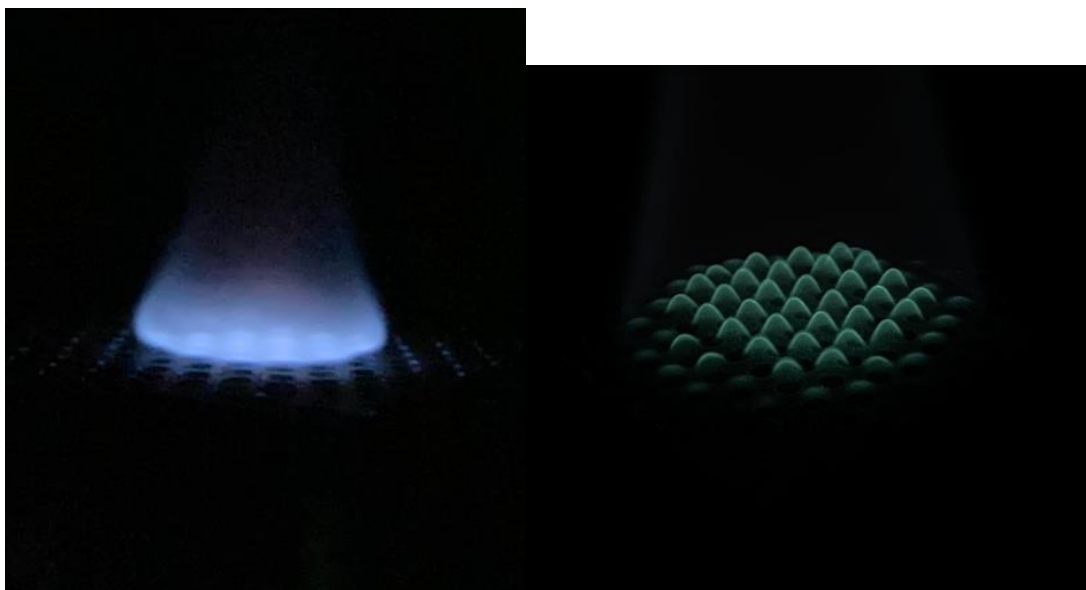
Aj na základe meraní výkonu kotla sa potvrdilo tvrdenie stanovené výpočtami, a to, že k poklesu výkonu kotla nedochádza v priamej závislosti od poklesu spalného tepla v zmesi a pri 20 % obj. vodíka v zmesi dochádza k reálnemu poklesu výkonu kotla o 7 %, zatiaľ čo pokles spalného tepla predstavuje 14 %. K uvedenému dochádza, keďže zvýšeným obsahom vodíka dochádza k nárastu prietoku plynu dýzou kotla. Pri porovnaní vypočítaného a nameraného výkonu kotla môžeme konštatovať, že z dôvodu zvýšeného prietoku vzduchu spôsobeného zvýšeným ejetčným účinkom dochádza k zvýšeniu straty teplotou odchádzajúcich spalín, teda poklesne jeho účinnosť o zhruba 2 %.

3.12 Produkcia emisií pri rôznych koncentráciách vodíka

K nepatrnému nárastu dochádza z dôvodu posunu horenia plameňa z bohatej zmesi k horeniu plameňa pri stechiometrických podmienkach, čo sa prejavuje zvýšením teploty v jadre plameňa a teda k väčšej tvorbe termických NOx. K poklesu produkcie emisií CO dochádza z dvoch dôvodov. Prvým dôvodom je zníženie obsahu uhlíka v dodávanom plyne a teda k poklesu objemu uhlíka, či už ako emisie oxidu uhličitého alebo oxidu uhoľnatého. Druhým dôvodom je, že z dôvodu väčšieho množstva privádzaného vzduchu dochádza k dokonalejšiemu vyhoreniu privádzaného paliva, a teda sa znižuje obsah emisií oxidu uhoľnatého v spalinách. Pri 20 obj. % vodíka v zmesi poklesne produkcia emisií CO o 37 %, čo je však v absolútnych číslach iba 16 ppm. Avšak môžeme konštatovať, že priamy vplyv pridávania vodíka do zemného plynu nevedie k významnej zmene produkcie emisií.

3.13 Experimentálne potvrdenie zhášacej vzdialenosti

Vyššie uvedené vypočítané hodnoty zhášacích vzdialeností boli aj experimentálne overené na laboratórnom horáku typu Mekker-Fischer a potvrdzujú, že pri rozmere kanála 1,50 mm dochádza k spoľahlivému zhášaniu plameňa a zabráneniu rozšíreniu plameňa do priestoru horáka. Časť experimentu bola zameraná aj na stanovenie zhášacej vzdialenosti pre koncentráciu 20 % vodíka v zemnom plyne a je nutné poznamenať, že na spoľahlivé zabránenie spätného šírenia plameňa postačuje aj rozmer kanála 2,50 mm. Toto je ale spôsobené tým, že plameň v tomto konkrétnom zariadení horí v oblasti bohatej zmesi a veľká časť potrebného vzduchu je do plameňa dodávaná z okolia horáka difúzne. Preto sa na tento údaj nie je možné spoľahnúť pre všetky typy zariadení, keďže v iných zariadeniach môže prebiehať spaľovanie pri iných pomeroch λ .



Obrázok 11 Ukážka z experimentu so zadrživačmi plameňa.

Na ľavom obrázku môžeme pozorovať efekt, kedy plameň na mriežke horí v tenkej vrstve a vďaka rozmeru kanála nemôže prejsť do priestoru horáka. Na obrázku vpravo môžeme pozorovať horenie plameňa s obsahom vodíka 15 % pri nízkej výtokovej rýchlosti.

3.14 Úprava horáka atmosférického kotla

Na základe týchto poznatkov bola následne navrhnutá úprava horáka plynového kotla, a to aplikovaním sita s charakteristickým rozmerom kanála. Dôvod tejto úpravy vyplýva z rizika spätného vzplanutia plameňa, najmä pri minimálnom výkone horáka. Minimálny výkon horáka sa dosahuje zregulovaním, znížením tlaku plynu. V dôsledku toho dochádza k zníženiu rýchlosti výtoku zmesi plynu dýzou a následne k zníženiu rýchlosti na ústí horáka. K spätnému vzplanutiu dochádza v bode, kedy výtoková rýchlosť v ústí horáka je nižšia ako rýchlosť šírenia čela plameňa. Aplikovaním vhodného sita s charakteristickým rozmerom kanála zabránime plameňu šíriť sa smerom do telesa horáka.



Obrázok 12 Upravený horák pomocou sita s rozmerom oka 1,5 x 1,5 mm.

Takéto riešenie, teda sito s hrúbkou vypletacieho drôtu 1,5 mm, sme zvolili najmä z dôvodu dobrého pomeru plochy otvorov k celkovej ploche sita. Keďže v predchádzajúcom experimente sa dokázalo, že spoľahlivo zabraňuje spätnému šíreniu plameňa až do koncentrácie 30 % vodíka v zemnom plyne. Meranie prebiehalo v celom regulačnom rozsahu zariadenia, aby sa vylúčilo riziko pri poklese výtokovej rýchlosti pri minimálnom výkone spaľovacieho zariadenia. Takéto riešenie sa javí ako spoľahlivé a počas experimentu, pri ktorom sa spaľovala zmes s obsahom vodíka 20 %, nedošlo k spätnému vzplanutiu plameňa do telesa horáka, a to ani pri minimálnych výkonoch zariadenia, kedy je takéto riziko z dôvodu nízkej výtokovej rýchlosti plynu najvyššie. Počas experimentu pri minimálnom výkone síce dochádzalo k zhášaniu plameňa na jednotlivých segmentoch horáka, avšak nikdy nedošlo k úplnému zhasnutiu plameňa na celom horáku.

ZÁVER

Táto práca sa zaoberala vplyvom vodíka na prevádzkové charakteristiky atmosférického kotla na zemný plyn. Atmosférický kotol bol zvolený najmä z dôvodu, že v súčasnosti je v prevádzke stále veľké množstvo takýchto zariadení, ktoré neboli navrhované s ohľadom na vyššie koncentrácie vodíka v zemnom plyne.

V teoreticko-výpočtovej časti práce je zostavený komplexný model na výpočet vplyvu vodíka v zemnom plyne na charakteristické vlastnosti zmesi, ako je napríklad hustota, rýchlosť šírenia zvuku, kompresibilný faktor, spalné teplo a iné. Tento model je zostavený v programovacom jazyku Python s použitím najmodernejšej rovnice stavov GERG-2008, ktorá využíva Helmholtzovu energiu na presné stanovenie vlastností zemného plynu s vyššími koncentraciami vodíka. Následne zostavený model počíta charakteristické zmeny pri horení takéhoto paliva, ako sú rýchlosť šírenia čela plameňa, stechiometrický pomer, zhášacia vzdialenosť alebo adiabatická teplota plameňa. V poslednej časti je modelovaný priamy vplyv vodíka na prevádzkové parametre horáka, ako je zmena kinetickej energie na výtok, zmena energetického toku dýzou a iné. Pomocou CFD simulácie bol naznačený vplyv vodíka na zmenu Venturiho efektu a pomeru paliva a primárneho vzduchu.

V praktickej časti práce boli všetky teoreticko-výpočtové parametre experimentálne overené. Experimentálne sa stanovil vplyv vodíka na zhášaciu vzdialenosť, efekt nasávania vzduchu, na tvorbu emisií, na výkon kotla a v neposlednom rade na tepelné namáhanie spaľovacej komory. Následne boli navrhnuté také úpravy, aby bola prevádzka zvoleného zariadenia spoľahlivá a bezpečná do koncentrácie vodíka v plyne 20 % obj., najmä s ohľadom na zmenu zhášacej vzdialenosti, ktorá predstavuje najväčšie riziko prevádzky.

Zhrnutím práce je, že vplyvom vodíka v zmesi so zemným plynom dochádza ku komplexným fyzikálnym zmenám, ktoré vplývajú na prevádzkové parametre zdrojov tepla. Pri koncentrácii vodíka v zmesi na úrovni 20 % obj. dochádza k zníženiu hustoty zmesi o 17 %, čím sa dosahuje na výtok z dýzy o 7,3 % vyššia rýchlosť, ktorá spôsobuje zvýšenie kinetickej energie na výtok o 11 % a tým aj zvýšenie ejekčného účinku. Zvýšený ejekčný účinok má následne vplyv na množstvo nasávaného vzduchu. Tento efekt sa spojí so skutočnosťou, že zmesi klesne hodnota spalného tepla o 14 % a zníži sa potrebný stechiometrický pomer o 16 %. Teda horenie, ktoré je v takýchto zdrojoch čiastočne predmiešané, teda s nedostatočným množstvom primárneho vzduchu, sa posúva smerom k stechiometrickej, prípadne až k chudobnej zmesi, čo spôsobí celkové ovplyvnenie parametrov zdroja tepla. Ďalším vplyvom je pokles teoretického výkonu kotla o 5,6 % a pokles reálneho výkonu o 7 %. Je to spôsobené zmenou prietoku

paliva dýzou, kedy sa objemový prietok zvýši o 10 %, ale zároveň hmotnostný poklesne o 9 %. Výraznejšia zmena produkcie emisií NO_x nebola pre daný kotol zaznamenaná a pokles emisií CO je možné vysvetliť z dvoch dôvodov. Primárnym dôvodom je zníženie uhlíka v palive a druhým je zvýšené množstvo vzduchu v zmesi, a teda zmes dokonalejšie prehorí. Zvýšené tepelné zaťaženie spaľovacej komory nebolo pozorované.

Prínos pre vedecko-výskumnú oblasť

Dosiahnuté výsledky dizertačnej práce predstavujú prínos pre vedeckú výskumnú oblasť najmä preto, že predstavujú komplexný model, ktorý umožňuje presne vypočítať vplyv vodíka na vlastnosti zemného plynu a jeho horenie s využitím najmodernejšej rovnice stavov GERG-2008. Tento model je cenným nástrojom pre ďalší výskum a vývoj v oblasti využitia vodíka ako nosiča energie. Práca nielenže teoreticky modeluje vplyv vodíka, ale aj experimentálne overuje získané výsledky. Tým sa zvyšuje dôveryhodnosť modelu a poskytujú sa konkrétne údaje o vplyve vodíka na prevádzku atmosférických kotlov. Ďalej práca identifikuje zhášaciu vzdialenosť ako najkritickejší parameter ovplyvnený prímiesou vodíka. Toto zistenie je dôležité pre návrh bezpečnostných opatrení pri prevádzke zariadení na zemný plyn s prímiesou vodíka. Pri experimentoch a výpočtoch sa práve táto oblasť ukázala ako oblasť, na ktorú by sa mal výskum hlbšie zamerať.

Prínos pre technickú prax

Práca pre technickú prax poskytuje najmä konkrétne odporúčania pre úpravy atmosférických kotlov, ktoré umožňujú ich bezpečnú prevádzku s prímiesou vodíka. Tieto odporúčania môžu byť aplikované aj na iné zariadenia spaľujúce zemný plyn, čím sa uľahčí ich adaptácia na vodíkové palivá. Tiež poskytuje komplexný pohľad na vplyv vodíka na prevádzku atmosférických kotlov, vrátane zmien fyzikálnych vlastností zmesi, horenia, výkonu, emisií a bezpečnosti. Tieto poznatky sú cenné pre identifikáciu kritických vplyvov v oblasti využitia vodíka a prispievajú k lepšiemu pochopeniu komplexných zmien spôsobených vodíkom v energetických systémoch. V neposlednom rade podporuje rozvoj vodíkovej infraštruktúry tým, že ukazuje, že existujúce zariadenia môžu byť s určitými úpravami prispôsobené na spaľovanie zmesí zemného plynu s vodíkom, a to z dôvodu, že jasne stanovuje charakteristický rozmer kanála potrebný na zhášanie plameňa zemného plynu s obsahom vodíka do 20 % obj. To môže uľahčiť postupné zavádzanie vodíka do energetického systému a znížiť náklady na prechod na vodíkové technológie.

Prínos pre pedagogickú činnosť

Práca demonštruje, ako teoretické modely a výpočty môžu byť aplikované na riešenie praktických problémov v energetike. To môže pomôcť vo vzdelávacom procese lepšie pochopiť význam teoretických poznatkov a ich využitie v praxi. Taktiež je príkladom medziodborovej spolupráce medzi energetikou, strojárstvom, chemickým inžinierstvom a informatikou, a teda ukazuje, že riešenie problémov je takmer vždy interdisciplinárnou úlohou. Ďalej sa zaoberá aktuálnou a dôležitou témou prechodu na nízkoemisné technológie a využitia vodíka ako nosiča energie. To môže pomôcť v pedagogickom procese lepšie pochopiť aktuálne trendy v energetike a pripraviť sa na budúce výzvy v tejto oblasti.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] **ABNISA F. – DAUD W.** 2014. *A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil*, In: Energy Conversion and Management. [online]. 2014, [cit. 2022-02-11]. ISSN 0196-8904
- [2] **ALIDA D.** 2022. *Density: Definition, Formula & Practice Problems*. [online]. 2022, [cit. 2022-03-04]. Dostupné na internete:
- [3] **BIOGRADLIJA A.** 2021. *Ways2H and valecom to develop waste – to – hydrogen project in the Caribbean*.
- [4] **BOULAHLIB M. – MEDAERTS F. – BOUKHALFA M.** 2021. *Experimental study of a domestic boiler using hydrogen methane blend and fuel-rich staged combustion*. In: International Journal of Hydrogen Energy.
- [5] **DELPHIPAGES.LIVE.** 2020. *Využitie uhlia – splyňovanie*. [online] 2020, [cit. 2022-01-25]. Dostupné na internete: <<https://delhipages.live/sk/zmiesany/gasification>>.
- [6] **DOUCEK A. – JANÍK L. – TENKRÁT D. – DLOUHÝ P.** 2010 *Využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie*. In: CHEMAGAZÍN. [online]. 2010, [cit. 2022-01-20].
- [7] **EN 437:2021.** *Test gases, test pressures and categories of appliances*.
- [8] **EUSTREAM.** 2021. *Spoločnosť Eustream*. [online]. 2021, [cit. 2022-02-14].
- [9] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_hydrogen_fuel
- [10] <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>
- [11] <https://h2-industries.com/en/hydrogen/>
- [12] **FÍK J. – ČAPLA L. – ŽAHOUREK J.** 2021. *Spalování směsí zemního plynu s vodíkem v domácích plynových spotřebičích – 1. část*.
- [13] **GÁLIK T.** 2021. *Posouzení dopadů využívání zemního plynu obohaceného vodíkem*. [diplomová práce]. Brno, Vysoké učení technické v Brne, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, 2021,
- [14] **GUPTA R.** 2008. *Hydrogen Fuel – Production, Transport, and Storage*. 2008. 624 s. ISBN 9781420045758.
- [15] **Nikolaidis, Pavlos; Poulikkas, Andreas** *A comparative overview of hydrogen production processes*. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS; 2017; 67, 597-611. ISSN:1364-0321
- [16] **HARRISON S.** 2021. *Pyrolysis for waste to hydrogen and products*. [online]. 2021, [cit. 2022-02-06].
- [17] **HOSSEIN E. – MAHMOOD M. – SEYED H. – ALIZERA A. – MOHAMMAD A.** 2019. *Techno-economic evaluation of a new CCHP system with a hydrogen production unit*. In: International Journal of Low-Carbon Technologies. [online]. 2019, [cit. 2022-01-16]. Dostupné na internete
- [18] **HYTEP.** 2010. *Česká vodíková technologická platforma*. [online]. 2010, [cit. 2021-11-18].
- [19] **CHAI Y. – GAO N. – WANG M. – WU CH.** 2020. *H2 production from co-pyrolysis/gasification of waste plastics and biomass under novel catalyst Ni-CaO-C*. In: Chemical Engineering Journal
- [20] **CHTF STUBA.** 2021. *Fakulta chemickej a potravinárskej technológie STU v Bratislave*. [online] 2021,
- [21] **ISO 6976:2016.** *Natural gas – Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition*
- [22] **KIRKPATRICK A.** 2022. *Stoichiometry – Thermodynamics*. [online]. 2022,
- [23] **KLELL M. – EICHLSEDER – H. – SARTORY M.** 2012. *Mixtures of hydrogen and methane in the internal combustion engine – Synergies, potential and regulations*. In: International Journal of Hydrogen Energy.
- [24] **KMEŤ J.** 2021. *Smart mobilita - ako je to s energetickou účinnosťou vozidiel poháňaných vodíkovým palivovými článkami v praxi?*.
- [25] **LETOHRAD.** 2022. *Elektrolýza vody*.
- [26] **LIVESCIENCE.** 2015. *Facts about hydrogen*.
- [27] **MAYRHOFER M. – KOLLER M. – SEEMANN P. – PRIELER R. – HOCHENAUER CH.** 2021. *Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces*. In: International Journal of Hydrogen Energy.

- [28] **PARK CH. – LEE N. – KIM J. – LEE J.** 2021. *Co-pyrolysis of food waste and wood bark to produce hydrogen with minimizing pollutant emissions*. In: Environmental Pollution.
- [29] **SANTOLI L. – BASSO G. – BRUSCHI D.** 2013. *Energy characterization of CHP (combined heat and power) fuelled with hydrogen enriched natural gas blends*. In: Energy.
- [30] **SCHIRO F. – STOPPATO A. – BENATO A.** 2020. *Modelling and analyzing the impact of hydrogen enriched natural gas on domestic gas boilers in a decarbonization perspective*. In: Carbon Resources Conversion
- [31] **SIMPSON A. – LUTZ A.** 2007. *Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming*. In: International Journal of Hydrogen Energy
- [32] **ZHAO Y. – MCDONELL V. – SAMUELSEN S.** 2019. *Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cooktop burner*. In: International Journal of Hydrogen Energy.
- [33] **Zhao, Y., McDonell, V., Samuelsen, S.,** (2019). Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 44(4), 26049-26062
- [34] **Latosov, E., Pakere, I., Murauskaite, L.,** (2021). Impact of Grid Gas Requirements on Hydrogen Blending Levels. *ENVIRONMENTAL AND CLIMATE TECHNOLOGIES*, 25(1), 688-699
- [35] **Cellek, MS., Pinarbasi, A.,** (2018). Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 43(2), 1194-1207.
- [36] **Boulahlib, MS., Medaerts, F., Boukhalfa, M.,** (2021). Experimental study of a domestic boiler using hydrogen methane blend and fuel-rich staged combustion. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 46(75), 37628-37640.
- [37] **Lo Basso, G., Nastasi, B., Garcia, DA.,** (2017). How to handle the Hydrogen enriched Natural Gas blends in combustion efficiency measurement procedure of conventional and condensing boilers. *ENERGY*, 123, 615-636.
- [38] **Subramani, B. V.** (2015). *Compendium of Hydrogen Energy Volume 1: Hydrogen Production and Purification*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- [39] **Sorensen, B.** (2005). *Hydrogen and fuel cells: Emerging technologies and applications*. Elsevier Academic Press
- [40] **Ying, YY., Liu, D.,** (2019). Detailed influences of chemical effects of hydrogen as fuel additive on methane flame. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 40(9), 3777-3788.
- [41] **Kakoulaki, G., Kougiyas, I., Taylor, N.,** (2021). Green hydrogen in Europe - A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 228, 113649.
- [42] **Kong, M., Feng, S., Xia, Q.,** (2021). Investigation of Mixing Behavior of Hydrogen Blended to Natural Gas in Gas Network. *SUSTAINABILITY*, 13(8), 4255
- [43] **Kouchachvili, L., Entchev, E.,** (2018). Power to gas and H-2/NG blend in SMART energy networks concept. *RENEWABLE ENERGY*, 125, 456-464.
- [44] **Yangaz, M., Ozdemir, MR., Sener, R.,** (2020) Combustion performance of hydrogen-enriched fuels in a premixed burner. *ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY*, 41(1), 2-13.
- [45] **Santoli, L., et. al.** (2013), Energy characterization of CHP (combined heat and power) fuelled with hydrogen enriched natural gas blends. In: *ENERGY*. [online]. 2013, [cit. 2022-02-28]. ISSN 0360-5442.
- [46] **Schiro, F., et. al.** (2020), Modelling and analyzing the impact of hydrogen enriched natural gas on domestic gas boilers in a decarbonization perspective. In: *CARBON RESOURCES CONVERSION*. [online] 2020, [cit. 2022-02-20]. ISSN 2588-9133.
- [48] <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/21989-spalovani-smesi-zemniho-plynu-s-vodikem-v-domacich-plynovych-spotrebicich-2-cast>
- [49] <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/21952-spalovani-smesi-zemniho-plynu-s-vodikem-v-domacich-plynovych-spotrebicich-1-cast>
- [50] **Dehaeseleer J.:** The Effects of Injecting Hydrogen, EASEE-gas GMOM, March 2018 Budapest (Maďarsko)
- [51] Report MARCOGAZ – UTIL – GQ-17-29 (Impact of hydrogen in natural gas on end-use applications)

- [52] Schweitzer J., Bruun J., Sadegh N., Jørgensen L., de Wit J.: Gas Quality Requirements WP2, Future Gas Nov. 2019
- [53] Altfeld K., Pinchbeck D.: Admissible Hydrogen Concentrations in Natural Gas Systems, Gas for Energy, GERG 3/2013
- [54] <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/2153-horaky-pro-spalovani-zemniho-plynu-i>
- [55] https://www.thermo.ruhr-uni-bochum.de/thermo/forschung/zustandsgleichung_gemische.html.en
- [56] https://www.thermo.ruhr-uni-bochum.de/thermo/forschung/wagner_GERG.html.de
- [57] Kunz, O., Klimeck, R., Wagner, W., Jaeschke, M. The GERG-2004 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures. GERG TM15 2007. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 6, Nr. 557, VDI Verlag, Düsseldorf, 2007; also available as GERG Technical Monograph 15 (2007)
- [58] Kunz, O., Wagner, W. The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures. An expansion of GERG-2004. J. Chem. Eng. Data 57 (2012), 3032-3091. <https://doi.org/10.1021/je300655b>
- [59] ISO-Standard 20765-2. Natural gas-Calculation of thermodynamic properties – Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application, Reference number ISO 20765-2: 2015 (E).
- [60] Setzmann, U., Wagner, W. A new method for optimizing the structure of thermodynamic correlation equations. Int. J. Thermophysics 10 (1989), 1103-1126. <https://doi.org/10.1007/BF00500566>
- [61] <https://evoleap.com/blog/natural-gas-pipeline-operations-with-increased-hydrogen/>
- [62] David G. Goodwin, Harry K. Moffat, Ingmar Schoegl, Raymond L. Speth, and Bryan W. Weber. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. <https://www.cantera.org>, 2023. Version 3.0.0. doi:10.5281/zenodo.8137090
- [63] <https://www.slovgas.sk/inovacie/uskalia-prepravy-vodika-plynarenskou-infrastrukturou/>
- [64] Filip Van den Schoor, Roy Hermanns, Comparison and evaluation of methods for the determination of flammability limits, applied to methane/hydrogen/air mixtures. <https://www.researchgate.net/publication/6275698>
- [65] Kalčík J., Sýkora K. 1973 Technická termomechanika
- [66] Ilbas et. al, Laminar burning velocities of methane/hydrogen/air mixtures.
- [67] Halter et. al, Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures" Proceedings of the Combustion Institute, 30:201-8
- [68] Fukuda M., Korematsu K. Quenching distance of mixtures of methane and hydrogen wit air

Zoznam vlastných vedeckých publikácií

- [1] KLAČKO, Andrej a kol. : Energetické zhodnocovanie komunálneho odpadu na Slovensku.In: Peter Tauš, Peter Sivák : RESpect 2022 : zborník medzinárodnej vedeckej konferencie : zborník medzinárodnej vedeckej konferencie. - 1. vyd. - Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2022. - 61 s. - ISBN 978-80-553-4123-1. - s. 20-23.
- [2] ZVADA, Branislav : Porovnanie vplyvov regulácie výkonu malých zdrojov tepla na produkciu tuhých znečisťujúcich látok. In: Peter Tauš, Peter Sivák : RESpect 2022 : zborník medzinárodnej vedeckej konferencie : zborník medzinárodnej vedeckej konferencie. - 1. vyd. - Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2022. - 61 s. - ISBN 978-80-553-4123-1. - s. 24-30.
- [3] NOSEK, Radovan a kol. : Vplyv aditív na teplotu tavitelnosti popola a emisií pri spaľovaní fytomasy.In: Peter Tauš, Peter Sivák : RESpect 2022 : zborník medzinárodnej vedeckej konferencie : zborník medzinárodnej vedeckej konferencie. - 1. vyd. - Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2022. - 61 s. - ISBN 978-80-553-4123-1. - s. 24-30.
- [4] ZVADA, Branislav a kol. : Numerical predictive combustion model of hydrogen enriched natural gas.In: editors: R. Lenhardt, K. Kaduchová : 40th Annual Conference - Meeting of the Departments of Fluid Mechanics and Thermomechanics in the connection with XXIII. International Scientific Conference - The Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy. - 1. vyd. - Les Ulis : Édition Diffusion Presse Sciences, 2022. - 450 s. [online]- (MATEC Web of Conferences, 40th MDFMT & 23th AEaNMiFmAE-2022 Vol. 369. - ISSN 2261-236X). - s. [1-8] [online].

- [5] **HOLEŠOVÁ, Natália a kol.** : Analýza viacfázových modelov transportu tepla v programe ANSYS Fluent.In: Technológ. - Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2009. - [print, online, USB-key]. - ISSN 1337-8996. - Roč. 14, č. 1 (2022), s. 53-58 [print].
- [6] **KLAČKO, Andrej a kol.** : Energetické zhodnocovanie komunálneho odpadu na Slovensku.In: Technológ. - Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2009. - [print, online, USB-key]. - ISSN 1337-8996. - Roč. 14, č. 1 (2022), s. 63-67 [print].
- [7] **ĎURČANSKÝ, Peter a kol.** : Hydrogen production possibilities in Slovak Republic.In: Applied sciences. - Bazilej : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. - [online]. - ISSN 2076-3417 (online). - Roč. 12, č. 7 (2022), s. [1-10] [online].Zaradené v: Current Content Connect ; SCOPUS ; Web of Science Core Collection
- [8] **ZVADA, Branislav a kol.** : Konvenčné spôsoby výroby vodíka z fosílnych palív.In: Technológ. - Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2009. - ISSN 1337-8996. - Roč. 14, č. 1 (2022), s. 83-87 [print].
- [9] **ĎURČANSKÝ, Peter a kol.** : Evolution of green energy production in Czech Republic.In: Applied sciences. - Bazilej : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. - [online]. - ISSN 2076-3417 (online). - Roč. 13, č. 4 (2023), s. [1-13] [online].Zaradené v: Science Citation Index Expanded ; Current Content Connect ; Web of Science Core Collection ; SCOPUS
- [10] **ĎURČANSKÝ, Peter a kol.** : Simulácia prevádzky olejového hospodárstva v kogeneračnej jednotke.In: zost. Dušan Petráš, Zuzana Švecová ; rec. Milan Dubnička, Belo Fűri : Vykurovanie 2023 : zborník prednášok.

RESUME

Hlavnou náplňou dizertačnej práce bolo určiť vplyv plynného vodíka na prevádzku zdrojov tepla na zemný plyn. V práci boli pomocou súčasných najnovších modelov využívajúcich Helmholtzovu voľnú energiu známych aj ako rovnica stavov GERG-2008 vypočítané fyzikálne vlastností zmesi zemného plynu a vodíka, ako sú hustota, spalné teplo, rýchlosť šírenia zvuku, ovplyvňujúce prevádzku zdrojov tepla na zemný plyn. Ďalej boli tieto údaje použité na zostavenie spaľovacieho modelu na určenie zmien spaľovacích vlastností menovite rýchlosť čela plameňa a adiabatickej teploty plameňa. Tieto parametre sú zásadné pri konštrukcii horáka a posudzovaní prevádzky a bezpečnosti pri použití zmesi zemného plynu a vodíka ako paliva. V práci bolo ďalej stanovené a experimentálne overené všetky hlavné dôsledky vodíka v zmesi zemného plynu na prevádzku zdrojov tepla a to hlavne vplyv na zhášaciu vzdialenosť, vplyv na výkon zariadenia, zmenu emisií a v neposlednom rade vplyv na teplotné pomery v spaľovacej komore.

SUMMARY

Main goal of dissertation thesis was determining influence of hydrogen on operation of natural gas heat sources. In this work was calculated physical properties, mainly density, gross calorific value or speed of sound for natural gas and hydrogen mixture with actual mathematical models using wide range EOS GERG-2008 based on Helmholtz energy. Further based on these calculations was made mathematical combustion model for determining of changes in flame, like adiabatic temperatures or laminar flame speed. These parameters are crucial for construction of burner, rating of security and reliability with usage of mixture of natural gas and hydrogen. Afterward in this work are next determined all main influences of hydrogen in mixture with natural gas on heat sources mainly quenching distance, power output, emissions characteristics or temperature conditions in combustion chamber.