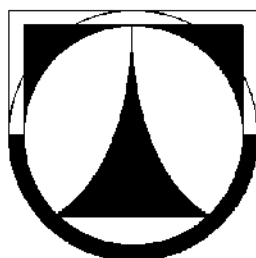


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA STROJŮ PRŮMYSLOVÉ DOPRAVY



Bakalářská práce

**ODPAŘOVÁNÍ KAPALNÉHO VODÍKU A ZEMNÍHO
PLYNU PRO SPALOVACÍ MOTORY**

2006

LUKÁŠ SLANAŘ

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Prohlášení :

Místopřísežně prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

.....

Lukáš SLANAŘ

V Mladé Boleslavi, leden 2006

Poděkování :

Poděkování patří doc. Ing. Celestýnu Scholzovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce a Ing. Urbáškoví za přínosné konzultace. Dále bych chtěl poděkovat všem ostatním, kteří se na této práci podíleli.

Zvláštní poděkování patří rodičům, kteří mi umožnili studium na TUL.

OBSAH

1.	Úvod	12
2.	Rozbor zkapalněných plynných paliv	13
2.1.	LPG	13
2.1.1.	Obecné vlastnosti LPG	13
2.1.2.	Vlastnosti LPG	14
2.1.3.	Fyzikální vlastnosti LPG	14
2.2.	Zkapalněný zemní plyn	15
2.2.1.	Obecné vlastnosti zemního plynu	15
2.2.2.	Vlastnosti zkapalněného zemního plynu	16
2.2.3.	Fyzikální vlastnosti zemního plynu	16
2.3.	Vodík	17
2.3.1.	Obecné vlastnosti vodíku	17
2.3.2.	Vlastnosti vodíku	18
2.3.3.	Fyzikální vlastnosti vodíku	19
3.	Skladování a odpařování plynných paliv	20
3.1.	Skladování plynných paliv	20
3.1.1.	LPG nádrž	20
3.1.2.	LH ₂ nádrž	22
3.1.3.	LNG nádrž	23
3.2.	Popis LNG palivového systému	24
3.2.1.	Komponenty palivového systému	25
3.3.	Metoda řízeného odpařování paliva	29
3.4.	Palivové potrubí	30
3.4.1.	LNG potrubí	30
3.4.2.	LH ₂ potrubí	31
4.	Návrh výměníku tepla a regulace pracovního tlaku	32
4.1.	Výměník tepla	32
4.2.	Výpočet výměníku tepla pro LNG a LH ₂	33
4.3.	Regulace pracovního tlaku	44
5.	Výsledky výpočtů	46
6.	Diskuse výsledků	52

6.1.	Diskuse výsledků LNG a LH ₂ odpařovače	52
6.2.	Výkresová dokumentace	53
7.	Závěr	54
	Literatura	55
	Seznam příloh	55

Seznam použitých zkratk a symbolů :

c	-	měrná tepelná kapacita	[J/kg.K]
c_p	-	měrná tepelná kapacita média	[J/kg.K]
c_v	-	měrná tepelná kapacita vody	[J/kg.K]
$D_{1;2;3;4;5}$	-	průměry výměníku	[m]
d_1	-	vnitřní průměr trubky pro médium	[m]
$d_{2;3}$	-	průměry trubky pro médium	[m]
d_e	-	ekvivalentní (hydraulický) průměr	[m]
g	-	gravitační zrychlení (9,81)	[m/s ²]
Gr	-	Grashoffovo číslo	[-]
H_u	-	výhřevnost paliva	[J/kg]
k	-	součinitel prostupu tepla	[W/m ² .K]
L	-	měrné výparné teplo	[J/kg]
L, l	-	délka výměníku	[m]
LH_2	-	zkapalněný vodík	
LNG	-	zkapalněný zemní plyn	
LPG	-	zkapalněný propan - butan	
$\dot{m}_p$	-	hmotnostní tok paliva	[kg/s]
$\dot{m}_v$	-	hmotnostní tok vody	[kg/s]
n	-	počet trubek	[-]
Nu	-	Nusseltovo číslo	[-]
o	-	omočený obvod	[m]
p	-	tlak	[Pa]
p_c	-	tlak v kritickém bodě	[Pa]
p_p	-	tlak média	[Pa]
p_T	-	tlak v trojném bodě	[Pa]
P_{ej}	-	střední efektivní výkon motoru	[W]
Pr	-	Prandtlovo číslo	[-]
Q	-	tepelný tok	[W]
r	-	poloměr	[m]
r	-	měrná plynová konstanta	[J/kg.K]
r_p	-	měrná plynová konstanta média	[J/kg.K]

Re	-	Reynoldsovo číslo	[-]
S	-	průřez, teplosměnná plocha	[m ²]
S _p	-	průřez trubky média	[m ²]
t _c	-	kritická teplota	[°C]
t _p	-	teplota média	[°C, K]
t _{p1}	-	teplota média na vstupu do výměníku	[°C, K]
t _{p2}	-	teplota média na výstupu z výměníku	[°C, K]
t _s	-	teplota stěny	[°C, K]
t _T	-	teplota v trojném bodě	[°C]
t _u	-	určující teplota	[°C, K]
t _v	-	teplota vody	[°C, K]
t _{v1}	-	teplota vody na vstupu do výměníku	[°C, K]
t _{v2}	-	teplota vody na výstupu z výměníku	[°C, K]
Δt	-	střední logaritmický rozdíl teplot	[-]
Δt ₁	-	teplotní rozdíl	[°C, K]
Δt ₂	-	teplotní rozdíl	[°C, K]
w	-	rychlost proudění	[m/s]
w _p	-	rychlost proudění média	[m/s]
w _v	-	rychlost proudění vody	[m/s]
z	-	počet závitů trubky	[-]
α	-	součinitel přestupu tepla	[W/m ² .K]
β	-	teplotní objemová roztažnost	[1/K]
δ	-	tloušťka stěny	[m]
ε	-	opravný součinitel	[-]
η _c	-	účinnost motoru	[-]
θ	-	teplotní rozdíl	[°C]
λ	-	součinitel tepelné vodivosti	[W/m.K]
μ	-	dynamická viskozita	[Pa.s]
ν	-	kinematická viskozita	[m ² /s]
π	-	Ludolfovo číslo (3,14159)	[-]
ρ	-	měrná hustota	[kg/m ³]
ρ _p	-	měrná hustota média	[kg/m ³]

ρ_v - měrná hustota vody [kg/m³]

Dolní indexy :

p - plynné palivo (médium)

v - voda



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA STROJŮ PRŮMYSLové DOPRAVY



Obor: Stroje a zařízení

Zaměření: Dopravní stroje a zařízení

ODPAŘOVÁNÍ KAPALNÉHO VODÍKU A ZEMNÍHO PLYNU PRO SPALOVACÍ MOTORY

VAPORIZATION OF LIQUID HYDROGEN AND NATURAL GAS FOR INTERNAL-COMBUSTION ENGINE

Lukáš SLANAŘ

KSD – BP – 81

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.

Rozsah práce a příloh :

Počet stran : 55

Počet obrázků : 19

Počet tabulek : 12

Počet výkresů : 1

Počet příloh : 7

V Mladé Boleslavi, 5. srpna 2005



Hálkova 6, 461 18 Liberec
Tel.: 485 353 130, fax: 485 353 139

ANOTACE

JMÉNO:	Lukáš Slanař
OBOR:	Stroje a zařízení
ZAMĚŘENÍ:	Dopravní stroje a zařízení
ZADÁNÍ PRÁCE:	Odpařování kapalného vodíku a zemního plynu pro spalovací motory
ČÍSLO PRÁCE:	KSD – BP – 81
VEDOUcí PROJEKTU:	doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.
KONZULTANT:	doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku zkapalněných plyných paliv, jejich uskladňování a způsobu řízeného odpařování. Jejím cílem je navrhnout odpařovací zařízení pro získání plyných paliv. Teoretická část je zaměřena na seznámení s plynými palivy a jejich fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Vysvětluje princip kryogenní nádrže a způsob odpařování ve výměníku tepla. Experimentální část obsahuje výpočet výměníku tepla pro LNG a LH₂.



Hálkova 6, 461 18 Liberec
Tel.: 485 353 130, fax: 485 353 139

ANNOTATION

NAME:	Lukáš Slanař
SPECIALIZATION:	Machines and devices
FOCUSING:	Transport machines and devices
THEME OF BSC WORK:	Vaporization of liquid hydrogen and natural gas for internal-combustion engine
NUMBER OF BSC WORK:	KSD – BP – 81
LEADER OF BSC WORK:	doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.
CONSULTANT:	doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.

This dissertation specifies problems of liquid gaseous fuels, their storage and drive vaporization method. Its aim is to propose evaporative device for conversion gaseous fuel. Theoretic part is aimed to giving information about gaseous fuels and their physical and chemical characteristics. It explains principle of cryogenic tank and method of vaporization in heat exchanger. Experimental part includes calculation of heat exchanger for LNG and LH₂.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA STROJŮ PRŮMYSLové DOPRAVY



1. Úvod

Omezené zásoby tradičních pohonných látek, neustále se zvyšující počet motorových vozidel, s tím související rostoucí úroveň znečištění životního prostředí a trvale rostoucí náklady na provoz vozidel vedou k hledání jiné cesty pohonu vozidel. Tradiční pohonné látky pro spalovací motory jako benzin a nafta začínají být nahrazovány alternativními palivy, především jde o plynná motorová paliva. Do plyných paliv, o které v současné době začíná být velký zájem, patří zemní plyn (CNG), propan – butanová směs (LPG), zkapalněný zemní plyn (LNG) a také vodík, nebo jeho nejčastější forma zkapalněný vodík (LH₂).

Tato plynná paliva mají spoustu výhod, především jde o vyšší světové zásoby. Vodíkové zásoby jsou například prakticky nevyčerpatelné, jsou šetrnější k životnímu prostředí, protože produkují méně škodlivých emisí než je tomu u běžně používaných paliv pro motory jako jsou benzin či nafta, a proto je velmi důležité se těmito palivy zabývat. Také zpracování plyných paliv není nijak složité, i když se kladou velké nároky na splnění bezpečnosti. Právě bezpečnost je jednou z velkých výhod plyných paliv. Další výhodou jsou nižší náklady při provozu motoru s plynými palivy. Nevýhodou plyných paliv však zůstává vysoká cena komponentů a příslušenství. Největší měrou se na ceně podílí kryogenní nádrž, která vyžaduje velmi dobrou tepelnou izolaci. Dalším problémem je vysoká hmotnost kryogenní nádrže s palivem a kratší dojezd vozidel.

Jeden ze základních požadavků pro efektivnější využívání zkapalněných paliv (LPG, LNG, LH₂) spočívá v dokonalé znalosti jejich fyzikálních a chemických vlastností. Každé z paliv má jiné vlastnosti měrné hmotnosti při bodu varu, teplotu varu a změnu skupenství, výhřevnost, plynovou konstantu atd..

Abychom mohli plynná paliva uskláňovat a převážet ve větším množství, bývají zkapalněna. Zkapalnění se provádí ochlazením plynu na teplotu tuhnutí (LNG má teplotu zkapalnění okolo minus 182°C a LH₂ okolo minus 250°C). Takto podchlazený zkapalněný plyn se uchovává v kryogenních nádržích. Nádrže bývají konstruovány na maximální provozní přetlak a musí mít velmi dobré izolační vlastnosti.

U plynových motorů vybavených běžným plynovým palivovým příslušenstvím je potřebné přivádět k motoru plyn o určitém minimálním tlaku a teplotě, která se pohybuje max. plus 20°C. Proto kryogenní nádrže jsou vybaveny příslušenstvím, které je schopno tyto funkce plnit. K zajištění těchto funkcí je potřeba palivový uzavírací ventil, kontrolní průtokový ventil, výměník tepla (odpařovač), ventil přívodu paliva a regulátor přívodu paliva.

Problematikou skladování a řízeného odpařování plynných paliv se zabývá tato bakalářská práce.

V této práci je rozebrána funkce kryogenní nádrže, která plní funkci skladování, a odpařovače, který má za úkol měnit zkapalněné palivo na plynné.

Experimentální část práce se zabývá výpočtem odpařovače pro LNG a LH₂.

Dosažené výsledky jsou uvedeny v závěru bakalářské práce.

2. Rozbor zkapalněných plynných paliv

2.1. LPG

2.1.1. Obecné vlastnosti LPG

LPG (Liquified Petroleum Gas) je směs propanu a butanu, je to směs uhlovodíků, která byla zkapalněna. Zkapalnění se může snadno provést např. stlačením pod tlakem cca 1,5 MPa nebo ochlazením, neboť při běžné teplotě a tlaku je v plynném stavu. Za normálních podmínek jej lze přepravovat a skladovat v zásobnících (tlak 2,5 MPa). Výhodou zkapalnění je, že plyn v tomto stavu zaujímá zlomek svého původního objemu, což velmi usnadňuje jeho uskladnění ve vozidle.

Propan-butan je plyn charakteristického zápachu, je nejedovatý, ale nedýchatelný. V plynné fázi je těžší než vzduch, v kapalně fázi pak lehčí než voda.

Při zkapalňování propan-butanu dochází ke značné objemové koncentraci (zmenšení objemu) a to přibližně 250:1, což znamená, že z 250 litrů plynné fáze se získá 1 litr kapaliny (resp. z 1 m³, tj. 1000 litrů plynu vzniknou 4 litry kapaliny). Tato vlastnost je u této směsi velmi důležitá, protože je možno v nádrži o minimálním objemu skladovat v kapalně formě poměrně velké množství energie. Tuto vlastnost, tj. značnou změnu objemu při změně skupenství, je třeba mít neustále na paměti. Je třeba si uvědomit, že odpařením i malého množství kapaliny vznikne značné množství plynu, který pak ve směsi se vzduchem může poměrně snadno vytvořit výbušnou směs. Rovněž je třeba si uvědomit, že plyn, který je těžší než vzduch, se v případě úniku hromadí zejména u podlahy, případně může naplnit i různé prostory pod úrovní terénu.

Zvláštní vlastností LPG je schopnost rozpouštět tuky, oleje, laky. Způsobuje deformaci přírodního kaučuku. Proto ohebná potrubí, která tvoří zařízení, jsou konstruována ze syntetických materiálů příslušné kvality.

2.1.2. Vlastnosti LPG

LPG poskytuje energii vyšší kvality a využívá se mimo jiné i v oblasti dopravy. Protože se LPG nabízí jako plnohodnotná alternativa benzínu či nafty, je zajímavé porovnat některé vlastnosti těchto paliv.

Je zjištěno, že benzin a nafta mají bod varu vyšší než běžná atmosférická teplota, zatímco LNG vře při nižších teplotách. To znamená, že benzin a nafta v zásobnících jsou za běžných teplot a při atmosférickém tlaku v tekutém stavu, ale pro LNG je v zásobnících nutno udržovat určitý přetlak, aby byl kapalný.

Z porovnání hodnot oktanového čísla zjišťujeme, že LPG má lepší antidetonační vlastnosti než benzin.

Výhřevnost LPG je vyšší v porovnání s naftou a benzinem, pokud uvažujeme hmotnostní jednotku (kg), ale menší, pokud uvažujeme objemové jednotky (litry) paliva.

Pro porovnání spotřeb jednotlivých druhů paliv u obdobných motorů se používá koeficient ekvivalentu paliva, kterým se vynásobí spotřeba benzínu, a výsledkem je spotřeba srovnatelného paliva. Tento koeficient, který je stanoven jako poměr výhřevnosti benzínu k výhřevnosti srovnávaného paliva, vlastně vyjadřuje objem srovnávaného paliva, ve kterém je obsaženo stejné množství energie jako v 1 litru benzínu.

2.1.3. Fyzikální vlastnosti LPG

Hlavní složky propan-butanu jsou propan chemická značka C_3H_8 a butan C_4H_{10} . Čistý propan-butan je směs zkapalněných alifatických (tj. necyklických) uhlovodíků propanu a butanu. V praxi se jedná o směsi zkapalněných uhlovodíků, převážně se třemi až čtyřmi uhlíky (C) v molekule, a to jak nasycených, tak i nenasycených.

Obsah dalších plynů ve směsi je minimální, proto je můžeme zanedbat. Vlastnosti propan-butanu jsou tedy dány vlastnostmi jeho dvou hlavních složek.

Směs propan-butanu je dodávána dle ročního období jako letní směs od 1.4. do 30.9. v roce s minimálním obsahem uhlovodíků C_3 (propanu) 30%. V období tj. od 1.10. do 31.3. je dodávána tzv. zimní směs s minimálním obsahem uhlovodíků C_3 55% ve směsi.

Vlastnosti LPG pro jeho využití jako nosiče energie pro motorová vozidla jsou v tabulce 1.

Tabulka 1. Vlastnosti LPG

Parametr	Jednotka	Hodnota	Hodnota
Plyn		Propan	Butan
Chemický vzorec		C_3H_8	C_4H_{10}
Hustota kapalná fáze při 20°C	kg / l	0,498	0,578
Hustota plynné fáze při 15°C	kg / m ³	2,019	2,59
Hustota plynné fáze (vzduch = 1)		1,562	2,091
Tlak par při 37,8°C	bar	12,1	2,6
Teplota bodu varu při tlaku 101,3 kPa	°C	-42,6	-0,5
Teplota bodu tání při tlaku 101,3 kPa	°C	-190,16	-134,96
Teplota vzplanutí (na vzduchu)	°C	510	490
Výhřevnost (kapalná fáze)	MJ / kg	46,34	47,7
Výhřevnost	MJ / l	23,4	26,5
Výhřevnost (plynná fáze)	MJ / m ³	93,57	123,55
Oktanové číslo		100	89

/8/, /10/

2.2. Zkapalněný zemní plyn

2.2.1. Obecné vlastnosti zemního plynu

Zemní plyn je z chemického hlediska směs plynných uhlovodíků s poměrným množstvím neuhlovodíkových plynů. Hlavní složkou je metan, jeho obsah se mění podle místa těžby 80 až 99 %. Zemní plyn je hořlavý, výbušný, bez barvy, chuti a zápachu, ale není jedovatý. Světová spotřeba tohoto plynu je v současné době cca 3 miliardy m³ za rok, přesto se jeho zásoby pro další vývoj považují za dostatečné. Pro využití zemního plynu v dopravě jako paliva se používá ve stavu CNG nebo LNG.

CNG – stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas).

LNG – zkapalněný zemní plyn (Liquified Natural Gas).

Každé z těchto paliv má svá specifika.

V této kapitole se budu zabývat pouze LNG palivem, které má větší perspektivu do budoucnosti oproti CNG.

2.2.2 Vlastnosti zkapalněného zemního plynu

Zkapalněný zemní plyn je studená, namodralá, průzračná kapalina bez zápachu, nekorozivní, netoxická s malou viskozitou. Při atmosférickém tlaku má teplotu -160 až -162 °C a zaujímá zhruba 570krát menší objem než zemní plyn v plynné fázi, což je významná výhoda jeho uskladnění. Fyzikální vlastnosti LNG závisí na jeho složení. Zemní plyn obsahuje podle míst těžby 80 až 99 % metanu, další uhlovodíky, dusík, oxid uhličitý, vodu a sloučeniny síry. Fyzikální vlastnosti zkapalněného metanu jsou uvedeny v tabulce 5. Zemní plyn dodávaný do ČR již delší dobu obsahuje více než 98 % metanu. V tabulce 2 jsou též parametry důležité z hlediska spalování metanu v zážehovém motoru, jako je stechiometrické množství vzduchu, teplota zapálení, rozmezí zápalnosti směsi paliva se vzduchem a antidetonační odolnost. Rozmezí zápalnosti palivové směsi je vymezeno hodnotami součinitele přebytku vzduchu palivové směsi pro její zapálení elektrickou jiskrou ve válci motoru. Antidetonační odolnost je vyjádřena oktanovým číslem zjišťovaným výzkumnou metodou.

2.2.3. Fyzikální vlastnosti zemního plynu

Vlastnosti zkapalněného zemního plynu pro jeho využití jako nosiče energie pro motorová vozidla jsou shrnuta v tabulce 2.

Tabulka 2. Vlastnosti zemního plynu

Parametr	Jednotka	Hodnota
Měrná hmotnost při bodu varu	kg / m ³	415
Teplota bodu varu při 101,3 kPa	°C	-161,4
Teplota bodu tuhnutí	°C	-182,5
Výhřevnost	MJ / kg	49,9
Plynová konstanta	J / kg . K	518,8
Stechiometrické množství vzduchu	kg / kg	17,2
Zápalná teplota stechiometrické palivové směsi	°C	520
Rozmezí zápalnosti palivové směsi	lambda	0,7 až 1,9
Oktanové číslo		130

Před zkapalněním musí být ze zemního plynu (NG) odstraněny nežádoucí příměsi tak, aby jejich maximální množství nepřekračovalo hodnoty uvedené v tabulce 3.

Tabulka 3. Přípustné množství nečistot ve zkapalněném zemním plynu

Příměsi	Jednotka	Množství
Voda	ppm obj.	1
Oxid uhličitý	ppm obj.	50 - 1000
Sloučeniny síry	mg / Nm ³	20 - 30
Rtuť	ng / Nm ³	10
Aromat. uhlovodíky	ppm obj.	5 - 10

/6/, /7/, /10/

2.3. Vodík

2.3.1. Obecné vlastnosti vodíku

Důvody, pro které byl vodík vybrán jako nositel čisté energie, vyplývají z jeho všestranného použití. Vodík umožňuje efektivněji zpracovávat méně hodnotná paliva při jejich zplynování, výrobu syntetických uhlovodíků pro palivové a petrochemické účely, výrobu amoniaku, chlorovodíku, významný podíl má i jako redukční činidlo v metalurgii nebo při svařování a tavení kovů. Vodík je v podstatě nezničitelný zdroj energie. Volný se sice vyskytuje v přírodě jen v nepatrném množství ve vyšších sférách atmosféry, ale sloučen s kyslíkem tvoří vodu, která je nejrozšířenější sloučeninou na naší planetě. Samotný se přitom může získat hned několika způsoby. Zatím jsou jeho nejčastějším a nejlevnějším zdrojem ještě fosilní paliva, odtud se získává parní reformací. To však nelze samozřejmě považovat za dlouhodobě udržitelné řešení. Co by bylo platné rozvádět a spalovat čistý vodík, kdyby při jeho výrobě bylo do ovzduší uvolněno stejné nebo ještě větší množství oxidu uhličitého jako při použití klasických paliv. Tak se jeho nejhodnotnější zdroj stává především voda, odkud se získává elektrochemickým štěpením nebo tepelným rozkladem na vodu a kyslík.

Tato ekologicky vhodná metoda je při dostatečně výkonných elektrolyzérch vítána tam, kde jsou postačující klasické zdroje pro získávání levného elektrického proudu a pak dnes i tam, kde při rozvoji solárních, větrných, vodních způsobů získávání elektřiny se vodík stává

vhodnou látkou pro její akumulaci. Takovou funkci nakonec může vodík hrát i při výrobě a akumulaci elektřiny v jaderných elektrárnách nebo využitím tepla v budoucích termojaderných zdrojích elektrické energie. Na výrobu vodíku jako sekundárního zdroje energie a na jeho skladování a dopravu je tedy třeba vynaložit určitou energii, kterou pak ale při jeho zpětném využití opět s určitou účinností získáváme.

2.3.2. Vlastnosti vodíku

Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru a třetím nejrozšířenějším prvkem na Zemi. Největší množství vodíku je vázáno ve vodě a je vázán i v různých organických i anorganických sloučeninách. Je to také významný biogenní prvek. V přírodě se vyskytuje jako směs tří izotopů :

- protium (lehký vodík) – ^1_1H
- deuterium (těžký vodík) – ^2_1H nebo také ^2_1D
- tritium – ^3_1H označovaný také jako ^3_1T (je radioaktivní)

Za běžných podmínek je vodík bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Ve vodě a v rozpouštědlech je nepatrně rozpustný. Skládá se z dvouatomových molekul H_2 , kde atomy jsou vázány kovalentní vazbou. Je více než 14krát lehčí než vzduch. Molekuly vodíku jsou malé, dokáží snadno pronikat materiály. Vodík reaguje téměř se všemi prvky s výjimkou vzácných plynů a některých kovů. Molekulový vodík je poměrně stabilní a díky vysoké hodnotě vazebné energie také málo reaktivní. S většinou prvků se proto slučuje až za zvýšené teploty nebo za přítomnosti některých kovů (Pt, Ni), které katalyzují jeho rozpad na atomy a tím zvyšují jeho reaktivitu. Ve směsi se vzduchem nebo kyslíkem se prudce slučuje na vodní páru a tvoří výbušnou směs.



Zapálená směs je výbušná tím více, čím se její složení blíží k poměru 2:1. Čistý vodík hoří nesvítivým plamenem, pokud se do plamene vhání kyslík, dosahuje teplota plamene až 3000°C . Atomový vodík je také silné redukční činidlo, ale existuje velmi krátkou dobu a slučuje se na vodík molekulový. Jinak je to typický nekov, který tvoří vodíkové můstky s dusíkem, kyslíkem a fluorem.

2.3.3. Fyzikální vlastnosti vodíku

Vlastnosti vodíku v kapalném i plynném skupenství, důležité pro jeho využití jako nosiče energie pro motorová vozidla, jsou shrnuty v tabulce 4.

Tabulka 4. Vlastnosti vodíku

Parametr	Jednotka	Hodnota
Měrná hmotnost při 20°C	kg / m ³	0,089
Měrná hmotnost při -252,8 °C	kg / m ³	70,8
Teplota bodu varu	°C	-252,7
Teplota zapálení	°C	585
Plynová konstanta	kJ / kg.K	4,127
Výhřevnost	MJ / kg	120
Rozmezí zápalnosti palivové směsi	lambda	0,5 - 10,5

V porovnání s jinými motorovými palivy pro zážehové motory, např. benzinem, zemním plynem, případně tekutými rafinérskými plyny, má vodík následující, výrazněji odlišné vlastnosti:

- malá měrná hmotnost a malý obsah energie v objemové jednotce plynu (obtížné uskladnění na vozidle),
- velmi nízká teplota kapalného vodíku (problematické uskladnění kapalného vodíku na vozidle),
- nízká energie potřebná k zapálení směsi vodíku se vzduchem (snadná zápalnost a sklon k samozápalům, k zapálení postačuje elektrická jiskra s malou energií),
- velmi široké rozmezí zápalnosti palivové směsi vodíku se vzduchem (umožňuje spalování i velmi chudých palivových směsí),
- vysoká rychlost hoření palivové směsi a nízká antidetonační odolnost stechiometrické palivové směsi (vyžaduje relativně nízký kompresní poměr),
- palivová směs vodíku se vzduchem neobsahuje uhlík (výfukové plyny neobsahují oxid uhličitý ani uhlovodíky, pro snížení oxidu dusíku pomocí katalyzátoru není ve výfukových plynech potřebný uhlík).

3. Skladování a odpařování plynných paliv

Tato kapitola se bude zabývat skladováním zkapalněných plynných paliv (LH₂, LNG, LPG), popisem LNG palivového systému a odpařováním plynných paliv.

3.1. Skladování plynných paliv

3.1.1. LPG nádrž

Plynová nádrž slouží k uskladnění plynu ve vozidle. Pro uskladnění LPG můžeme rozlišit dva základní druhy nádrží z hlediska jejich tvaru a umístění:

- válcové – umísťují se zpravidla v zavazadlovém prostoru automobilu a mohou mít objem od cca 30 do 110 litrů. Ukázka válcové nádrže je na obrázku 1.
- toroidní – montují se do prostoru pro rezervní pneumatiku, což s sebou přináší určitou výhodu; nádrž nám nebude překážet v zavazadlovém prostoru. Problémem je, že se zmenší objem daný prostorem pro rezervní pneumatiku. Ukázka toroidní nádrže je na obrázku 2.

LPG je v nádrži uskladněno v kapalném stavu a udržováno pod určitým tlakem, jehož maximální výše smí dosáhnout až 2,5 MPa. Tato hodnota je ale skutečně hodnotou mezní, po dosažení které již vstoupí v činnost ochranné systémy (přetlakové ventily). Ve skutečnosti je tlak v nádrži nižší a odpovídá tzv. tlaku par, což je tlak, který musí být při určité teplotě dosažen nad hladinou LPG, abychom zachovali jeho kapalně skupenství.

Nádrže se vyrábějí v mnoha objemových velikostech, v rozmezí cca 30 až 120 litrů. Výjimku tvoří nádrže toroidní, jejichž objem je omezen prostorem pro rezervní pneumatiku, takže v tomto případě se musíme spokojit s jejich kapacitou do cca 60 litrů, v praxi ovšem počítejme spíše s 40-45 litry.

Do nádrže můžeme natankovat LPG maximálně do 80 % jejího objemu. Toto omezení máme dáno fyzikálními vlastnostmi paliva a s tím souvisejícími bezpečnostními opatřeními. LPG je v závislosti na teplotě velice rozpínavé, navíc se s teplotou zvyšuje tlak par nad hladinou paliva. Když do nádrže načerpáme palivo, které má teplotu kolem 15 °C a nádrž je umístěná v zavazadlovém prostoru, který je často součástí interiéru vozidla, ve kterém může v létě teplota velmi snadno přesáhnout 50 °C, zjistíme, že pokud bychom načerpali nádrž až tzv. „po hrdlo“, došlo by v lepším případě k odpouštění paliva přetlakovými ventily mimo automobil. V horším případě, při selhání pojistných ventilů, by mohlo dojít k roztržení nádrže.

Možnosti naplnění nádrže na více než zmíněných 80 % jejího objemu nám musí zabránit technické zařízení, konkrétně k tomu určený ventil, jenž kontroluje hladinu paliva v nádrži a při dosažení mezního stavu uzavře přívod plynu od plnicí přípojky směrem dovnitř.

Obrázek 1. LPG nádrž válcového tvaru



Obrázek 2. LPG nádrže toroidního tvaru

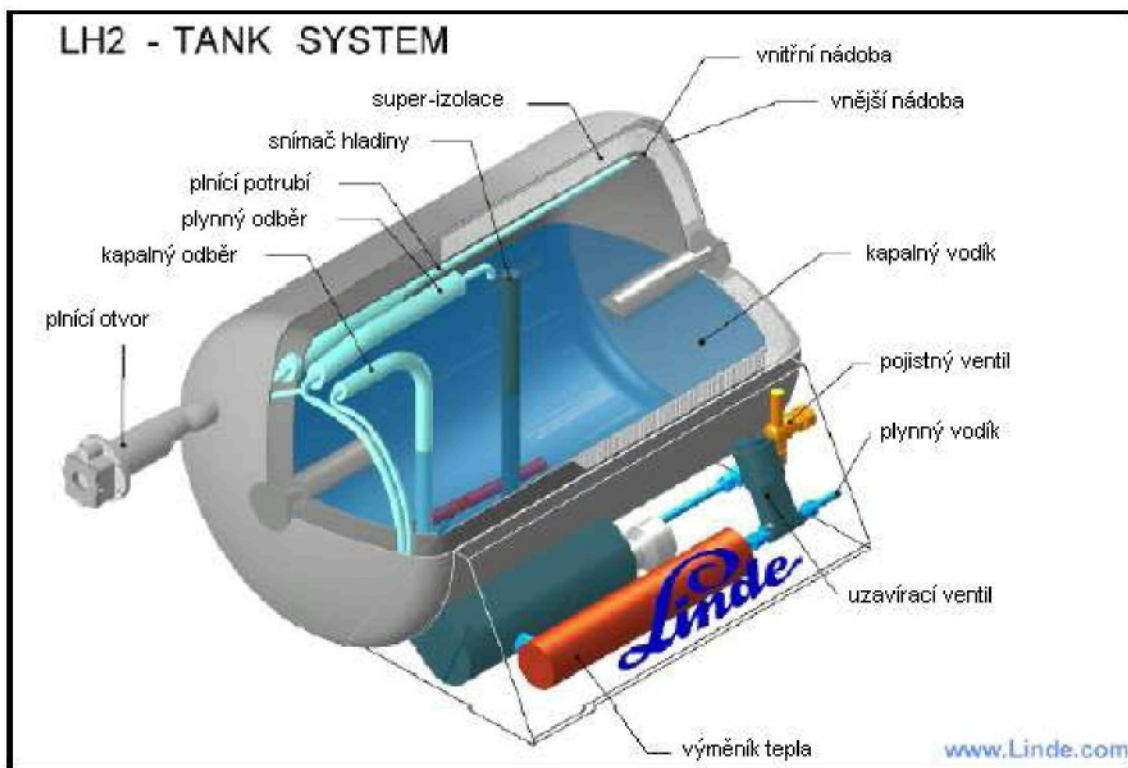


/8/, /10/

3.1.2. LH₂ nádrž

Uskladnění hluboce zchlazeného kapalného vodíku vyžaduje zvláštní vybavení. Zkapalněný vodík se uskládá v kryogenní nádobě. Kryogenní nádoba je tvořena dvěma oddělenými nádobami, jedna uvnitř druhé. Vnitřní nádoba, která obsahuje kryogenní tekutinu, je potažena více vrstvou izolací. Takto izolovaná vnitřní nádoba je namontovaná do vnější nádoby přes speciálně navržená vnitřní upevnění. Prostor mezi nádobami je vakuován z důvodů tepelné izolace.

Obrázek 3. LH₂ nádrž společnosti Linde



Legenda :

Plnicí otvor – slouží k plnění nádrže a zabráňuje zpětnému proudění kapaliny během plnění.

Snímač hladiny – ukazuje množství paliva v nádrži.

Kapalný odběr – odebírající trubice pro dodávku tekutého paliva.

Plnicí potrubí – umožňuje naplnění nádrže.

Super izolace – slouží k získání tepelné izolace. Zaručuje uchování vodíku v kapalném stavu.

Vnitřní nádoba – obsahuje kryogenní tekutinu, je potažena izolací.

Vnější nádoba – odolává vnějším vlivům, většinou namáháním od nerovnosti vozovky.

Kapalný vodík – vodík v kapalném stavu s teplotou -253°C .

Pojistný ventil – použití pro řízení maximálního provozního tlaku v nádrži.

Plynný vodík – palivo v plynné formě dodávané pro motor.

poznámka: u systémů směšováním vodíku se vzduchem v motoru je výhodné mít plyn H_2 o nízké teplotě (-60°C). Snižuje teplotu hořlavé směsi a problémy s před zážehem před řízeným zážehem elektrickou jiskrou zapalovací svíčky.

Výměník tepla – slouží pro převedení kapalného paliva na plynné.

Uzavírací ventil – jeho funkcí je škrtnutí palivo dodávané pro motor.

/10/

3.1.3. LNG nádrž

LNG palivová nádrž je obdobně jako nádrž LH_2 kryogenní nádoba, která je tvořena dvěma oddělenými tlakovými nádobami, jedna uvnitř druhé. Ve vnitřní nádobě je uskladněn LNG v kapalině formě. Vnitřní nádrž je potažena mnoha vrstvami nehořlavé izolace z odrazové fólie (super izolace). Prostor mezi nádobami je vakuován z důvodů získání tepelné izolace. Vnější nádoba je navržena tak, aby odolávala namáháním od nerovností vozovky. Vnitřní nádoba je chráněna proti přetlakování dvěma pojistnými odlehčovacími ventily. První se otevírá primární ventil. Ten je navržen tak, aby bezpečně ventiloval nadměrný tlak ve vnitřní nádobě, který vzrůstá buď z důvodů tepelného prostupu skrz vnější izolaci a přidružené systémy, nebo v případě požáru. Sekundární ventil s vyšším nastaveným otevíracím tlakem zajišťuje ochranu i v případě poruchy nebo zablokování primárního ventilu.

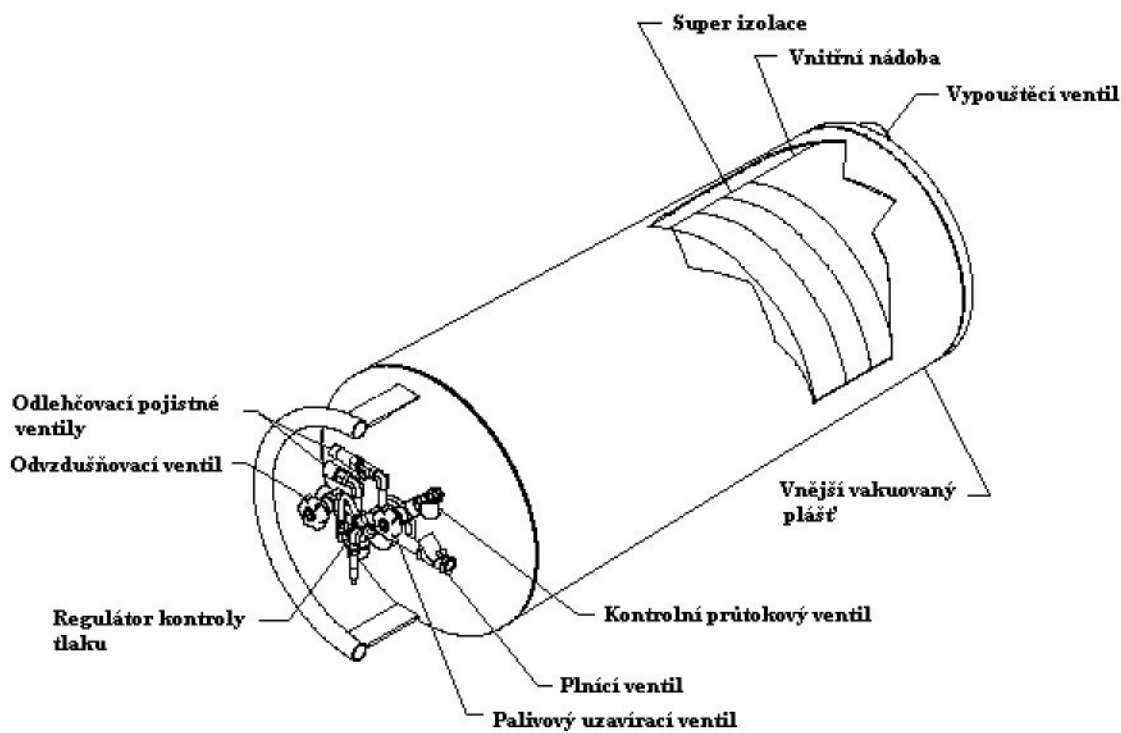
Venkovní nádrž je chráněna proti přetlakování kruhovým odsávacím konektorem. V případě úniku z vnitřní nádoby do vnější se odsávací konektor otevře a bezpečně odventiluje nadbytečný tlak. V případě úniku plynu vně nádrží dochází k nadměrnému orosení a pokrytí jinovatkou venkovní nádrže. Malá jinovatka a kondenzace na koncích vedení je normální.

Všechny komponenty jsou umístěny na jedné straně nádrže a jsou chráněny proti poškození ochranným kruhem, nebo záštitou.

Nádrže fy Chart jsou běžně dimenzovány na pracovní tlak až 16 bar (230 psig).

V mém případě budu využívat maximálně tlak z nádrže okolo 15 bar (220 psig).

Obrázek 4. LNG palivové nádrže



/10/

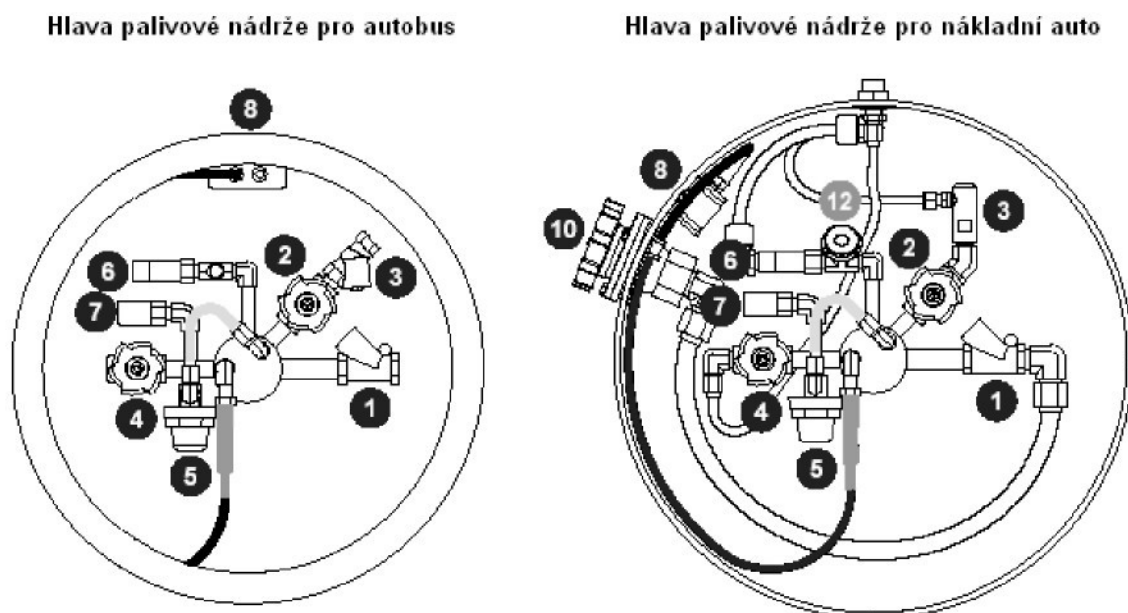
3.2. Popis LNG palivového systému

Tento systém je sestaven pro příjem, skladování a zásobování plynem automobilového motoru.

Síla potřebná pro dodávku paliva k motoru je poskytnutá tlakem paliva, není potřeba žádné pumpy v systému. Kapalně natlakované palivo přirozeně protéká z nádrže směrem k motoru. Podchlazené natlakované palivo pak prochází přes výměník tepla. Výměník tepla využívá chladicí kapalinu z motoru k vypařování kapalného paliva na plynné. Jakmile výměník tepla přemění kapalinu na ohřátý plyn, je plyn dopraven k motoru. Regulátor tlaku přesně dodává palivo potřebného tlaku k motoru.

3.2.1. Komponenty palivového systému

Obrázek 5. Hlavy palivové nádrže pro LNG



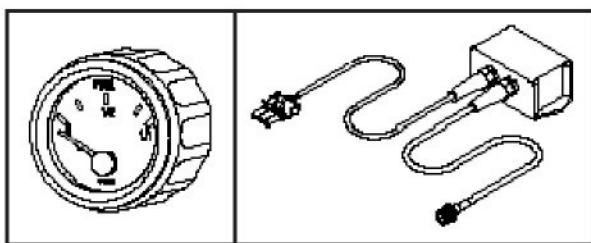
Legenda :

1. Plnicí ventil – plnicí kontrolní ventil je většinou z bronzové slitiny a jeho funkcí je zabránit zpětnému proudění kapaliny z nádrže během plnění.
2. Palivový uzavírací ventil – je vyráběn z bronzové slitiny a jeho funkcí je škrcení paliva a udržování pracovního tlaku.
3. Kontrolní průtokový ventil – je určen k tomu, aby průtok paliva nepřekračoval určité požadavky pracovního tlaku. Jeho funkcí je zajišťovat snadný průchod mezi nádrží a výměníkem tepla, např. před neřízeným uvolňováním paliva při nehodě.
4. Odvzdušňovací ventil – nebo taky větrací ventil je vyráběn z bronzu. Jeho funkcí je odvzdušňování nádrže.
5. Regulátor kontroly tlaku – jeho funkcí je řízení maximálního provozního tlaku v nádrži. Požadovaná hodnota regulátoru je nastavena od výrobce.

6. Primární pojistný ventil – je vyráběn z mosazi, pro kryogenní teploty. Pojistný ventil pracuje s maximálním pracovním tlakem dodávaným z nádrže. Jeho funkcí je ventilovat produkt do atmosféry, jestliže je nádrž přetlakovaná. Je propojen s plnicím potrubím a tím poskytuje dostatečné bezpečí a vyrovnává tlak v nádrži během plnicí operace.

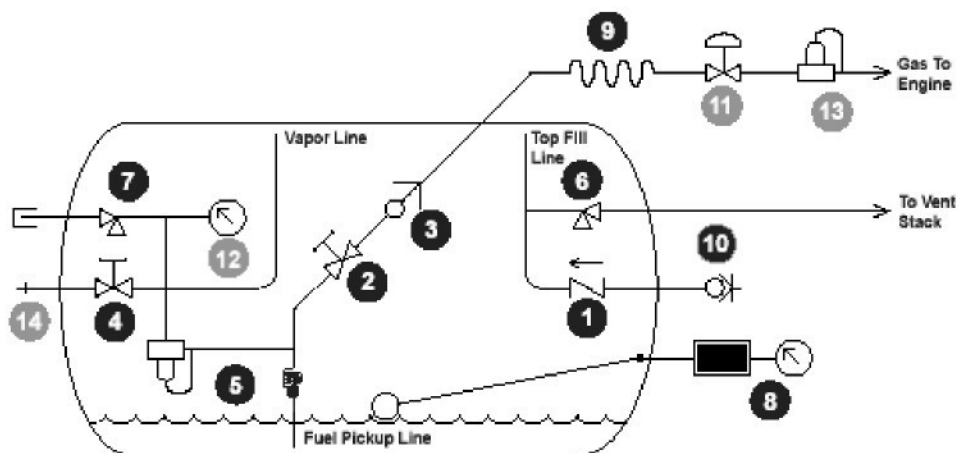
7. Sekundární plnicí ventil – je vyráběn z mosazi, pro kryogenní teploty. Pojistný ventil musí být 1,5krát pevnější než maximální přípustný pracovní tlak z nádrže. Jeho funkcí je ventilovat produkt do atmosféry a zabránit poruše z nádrže v případě nesprávného chodu primárního pojistného ventilu.

8. Ukazatel obsahu paliva – Každá LNG palivová nádrž je vybavená elektronickou zárukou obsahu paliva. Záruka se dělí na dvě části, tou první je ukazatel zásoby paliva, tou druhou je únik paliva. Je namontovaný k nádrži, přesně vysílá skutečné množství v nádrži a je neovlivněn od výrobce. Ukazuje také teplotu a tlak v nádrži.

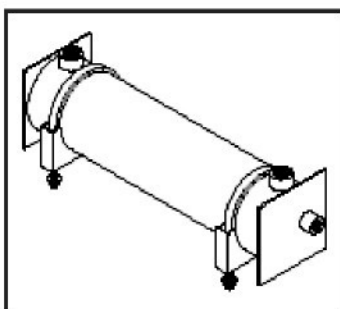


Obrázek 6. Ukazatel obsahu paliva

Obr 7. Schéma dopravování LNG paliva



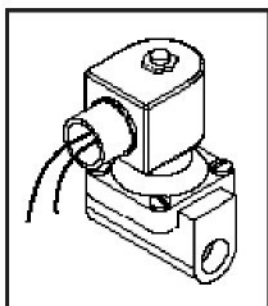
9. Výměník tepla - Každá LNG palivová soustava musí obsahovat tepelný výměník. Funkcí tepelného výměníku je odpařovat kryogenní kapalné palivo a doručovat ohříváný plyn k motoru. Tepelný výměník je namontován v blízkosti palivové nádrže. Ten bere své teplo z chladicího systému motoru. Tepelný výměník ovlivňuje palivo tím, že zvedne teplotu dodávaného paliva a mění ho z kapalného na plyné.



Obrázek 8. Výměník tepla

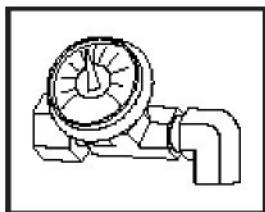
10. Plnicí přípojka - Každá palivová soustava musí obsahovat plnicí přípojku pro nízké teploty. Funkcí plnicí přípojky je poskytnout spojení směřované k doplnění paliva, které povolí pro nízké teploty, tlak se přemísťuje. Plnicí otvor pozitivně vypne zařízení a zabrání unikání paliva. Každá pohonná látka potřebuje být namontovaná k vozidlu v položení schopném odolávat 250 psig (17,2 bar).

11. Automatický ventil přívodu paliva – Každá LNG palivová soustava musí obsahovat automatický ventil přívodu paliva. Jeho funkcí je škrtnout palivo dodávané pro motor. Jeho umístění je za tepelným výměníkem a umožňuje tak jeho rozsah. Pro nízké teploty může být namontován přímo ke kapalnému ventilu přívodu paliva, namísto průtokového ventilu. Toto uspořádání však není doporučující, tak jak to vyžaduje použití pojistného ventilu v palivovém potrubí.



Obrázek 9. Automatický ventil přívodu paliva

12. Tlakoměr nádrže – Každá palivová nádrž může obsahovat mechanický tlakoměr, který je spojený se sekundárním plnicím ventilem. Ukazuje aktuální tlak v nádrži.



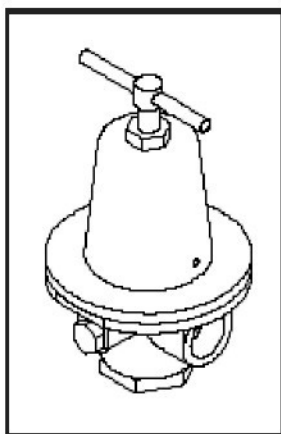
Obrázek 10. Tlakoměr nádrže

13. Regulátor nadměrného tlaku - Některé plynové motory jsou nezpůsobivé k přijímání tlaku z nádrže. Palivový systém pro motory potřebuje být vybavený regulátorem tlaku pro dodržování provozního tlaku a udržování ho v přijatelných hranicích pro motor. Regulátor nadměrného tlaku je namontován před motorem a za výměníkem tepla a automatickým ventilem přívodu paliva. Pracuje s kontrolním regulátorem tlaku na palivové nádrži. Nastavování hodnot na těchto dvou regulátorech zajistí, aby motor dostal vždy potřebný tlak podle svého pracovního rozsahu.

Fy Chart nabízí dva typy regulátorů a to podle potřebného tlaku :

červený : 30 - 100 psig = 2 – 6,89 bar

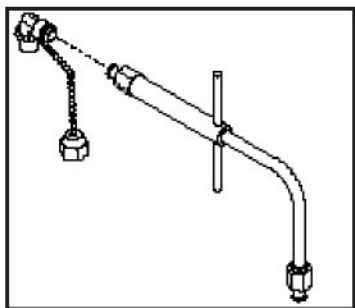
hnědý : 100 - 200 psig = 6,89 – 13,79 bar



Obrázek 11. Regulátor nadměrného tlaku

14. Ventilační otvor – Některé stanice při doplňování paliva požadují, aby měly rezervu pro odvětrávání z nádrže během tankování. Vozidla tankující v těchto stanicích by měla být vybavena ventilačním otvorem, kompatibilním s palivovou stanicí.

Obrázek 12. Ventilační otvor



/10/

3.3. Metoda řízeného odpařování paliva

K odpařování plyných paliv se používá výměník tepla (odpařovač). Palivo v nádrži se vyskytuje ve dvou skupenstvích, tj. v podobě podchlazené páry a podchlazené kapaliny a je dopravováno k odpařovači přes palivový uzavírací ventil a kontrolní průtokový ventil. Ventily udržují potřebný pracovní tlak. Při dodání paliva do odpařovače v plyné, kapalně nebo smíšené fázi dochází v odpařovači k ohřátí a k přechodu pouze na plynnou fázi. Odpařovač je propojen s chladicím okruhem spalovacího motoru. Proud chladicí kapaliny protéká odpařovačem ve stejném směru jako proudí plyné palivo. LNG palivo prochází skrz odpařovač ve spirálovité trubce, která je uložena ve válcovém plášti pro chladicí kapalinu a pro lepší obtékání trubek se středovou zaslepovací trubicí.

Po průchodu odpařovačem je palivo dopraveno k automatickému přívodu paliva, kde se palivo škrtí, a dále je dopravováno do regulátoru nadměrného tlaku, kde palivo dostane potřebný tlak pro motor.

Odpařovač může být namontován jak horizontálně, tak vertikálně. Pro nejlepší účinnost je doporučena vzdálenost od nádrže maximálně 2400 mm. Pro délku chladicího potrubí větší než 3000 mm je vyžadován průměr chladicího potrubí 16 mm. Doporučený průtok chladicí kapaliny je 3,8 l/min. Odpařovač musí být umístěn také níže než je chladicí okruh z důvodů předcházení zavzdušnění. Vstupní a výstupní rozměry otvoru pro plyn mají doporučen průměr 10 mm a otvory pro vstup a výstup chladicí kapaliny mají průměr 12,7 mm.

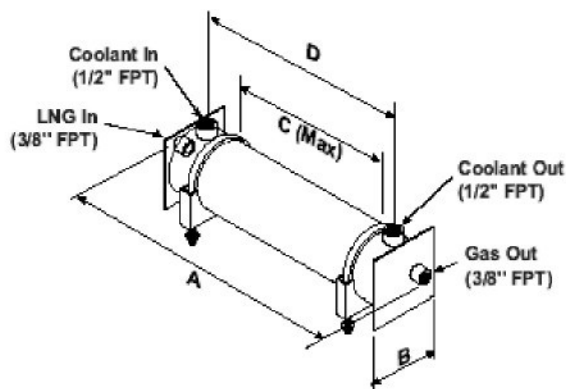
Poznámka : V odpařovači se nemění tlak paliva, mění se pouze teplota a skupenství paliva.

Obrázek 13. Odpařovače LNG firmy Chart

Part No.	Horsepower Rating	A	B	C	D	E
10682851	150	11-1/4	4-1/2	5-1/2	7-1/2	4-5/8
9722999	300	19-1/4	4-1/2	14-3/4	15-3/4	4-5/8
10668725	450	27-1/4	5	21-1/2	22-1/2	5-1/2

Specifications:

Max. Operating Pressure (LNG): 300 p.s.i.g.
Max. Coolant Pressure: 50 p.s.i.g.



Rozměry výměníku tepla jsou uvedeny na obrázku 13. Přepočtení rozměrů je uvedeno v tabulce 21 na příloze 7.

/10/

3.4. Palivové potrubí

Celistvost a těsnost palivového potrubí nesmí být porušitelná vibracemi, krutovým nebo ohybovým namáháním přenášeným z vozidla v normálních provozních podmínkách. Potrubí musí být chráněno zároveň před mechanickým poškozením.

Palivové potrubí a všechny orgány, kterými prochází palivo, musí být chráněny nadměrným teplem. Je nepřijatelné, aby palivo z potrubí, popřípadě ze zařízení namontovaných v jeho obvodu odkapávalo a odpařovalo se na horké části vozidla.

3.4.1. LNG potrubí

Trubky pro dopravu LNG paliva k odpařovači a dále pak k motoru jsou z nerezové oceli. Musí tedy odolávat vysokým teplotním změnám.

3.4.2. LH₂ potrubí

Trubky pro dopravu LH₂ paliva jsou z nerezové oceli a musejí odolávat vysokým teplotním změnám, ale také vodíkové křehkosti.

Vodíková křehkost je děj, který způsobuje snížení houževnatosti nebo tažnosti kovu v důsledku absorpce vodíku. Vodíková křehkost často doprovází vývoj vodíku, např. korozi nebo elektrolýzou, a může způsobit praskání.

/6/, /10/

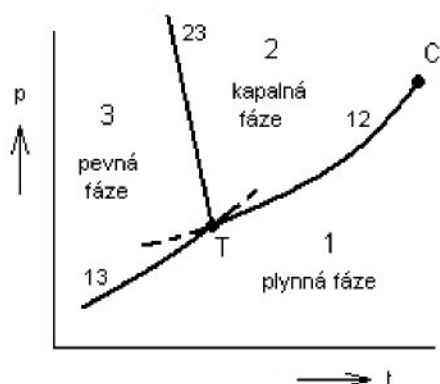
4. Návrh výměníku tepla a regulace pracovního tlaku

Tato experimentální část se zabývá stanovením vzorců k výpočtu výměníku tepla LNG a LH_2 pro motor ML 636 ENE a regulací pracovního tlaku pro palivový systém motoru.

4.1. Výměník tepla

Výměník tepla je velmi složité zařízení jak konstrukčně, tak na změny skupenství, které v něm probíhají. Ve výměníku tepla se mění kapalné médium na plynné.

K lepší orientaci, jak se ve výměníku tepla mění skupenství z kapalné formy na plynnou slouží, rovnovážný diagram na obrázku 14.



Obrázek 14. Rovnovážný diagram s trojným bodem

Legenda:

C – kritický bod – je důležitý fyzikální stav látky. Každá látka má individuální kritický bod s určitou kritickou teplotou, kritickým objemem a kritickým tlakem. Kritický bod je významný tím, že se v něm fyzikální vlastnosti kapalné a plynné fáze ztotožňují. Měrný objem obou fází v kritickém bodě je týž. Kapalina i plyn v kritickém bodě mají stejnou hustotu. Nejvyšší teplota, které kapalná fáze látky může dosáhnout, je kritická teplota. Nad kritickou teplotou existuje látka pouze v plynné fázi. V kritickém bodě se stýkají oblasti kapaliny, plynu a mokré páry.

Hodnoty kritického bodu pro H_2 a CH_4 jsou uvedeny v tabulce 5.

T – trojný bod – je bod, kde se stýkají tři fáze čisté látky. Rovnováha může nastat jen při zcela určité teplotě a určitém tlaku. Tento stav je ve fázovém diagramu p-t na obr. 14, znázorněn

bodem T, do něhož se sbíhají tři mezní křivky, určující rovnovážné stavy vždy mezi dvěma fázemi, a to křivka 13 mezi pevnou a plynnou fází, křivka 23 mezi pevnou a kapalnou fází a křivka 12 mezi kapalnou a plynnou fází. Proto se stav koexistence tří fází nazývá trojný bod. Trojný bod je jednoznačný stav látky. Je významný tím, že pod ním nemůže nastat tání, takže pod trojným bodem neexistuje kapalná fáze. Látka může existovat v kapalném stavu pouze mezi trojným bodem a kritickým bodem. Pod trojným bodem se vyskytuje pouze pevná a plynná fáze látky.

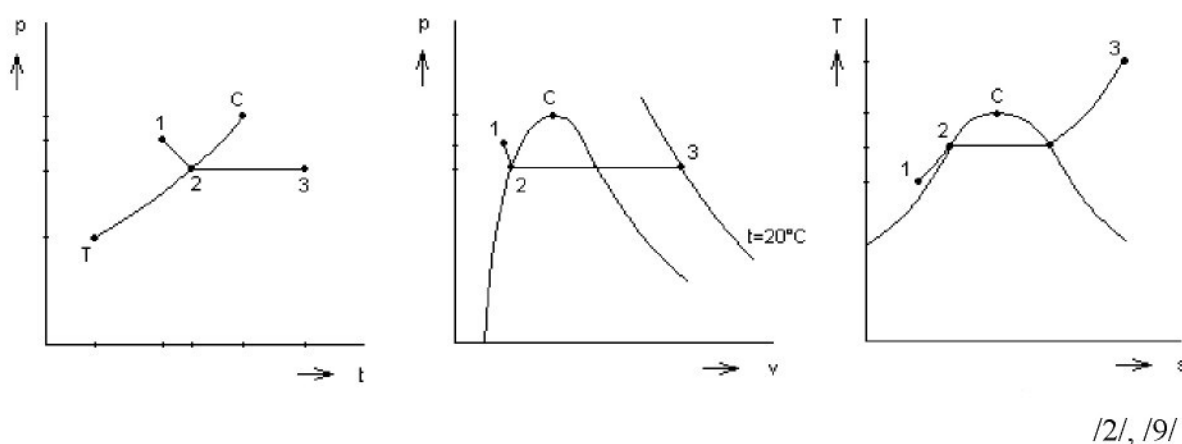
Hodnoty trojného bodu pro H_2 a CH_4 jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5. Hodnoty kritického a trojného bodu pro H_2 a CH_4 .

Látka	Kritická teplota t_c (°C)	Kritický tlak p_c (10^5 Pa)	Teplota v trojném bodě t_T (°C)	Tlak v trojném bodě p_T (Pa)
vodík	-239	12,93	-259	7042,1
metan	-83	46	-183	11743,6

Přesnější průběh změny stavu média z kapalně formy na plynou je zobrazen v diagramech (p-t, p-v, T-s), viz obr. 15.

Obrázek 15. Změny stavu z kapaliny na plyn.



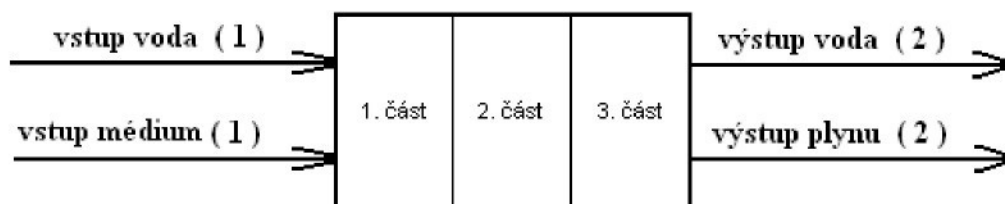
4.2. Výpočet výměníku tepla pro LNG a LH_2 .

Ve výměníku tepla se mění teplota, která má vliv na ostatní veličiny, jako jsou ρ , c_p , λ , ν , μ . Proto jsme celý výměník tepla rozdělili na tři části (obr. 16).

Část 1 – zde se nachází médium v kapalném skupenství. Vstupní teplota podchlazené kapaliny se zde mění na teplotu bodu varu média. Hodnoty hustoty a měrné tepelné kapacity jsou voleny pro kapalné skupenství podle tabulek. Ostatní hodnoty, λ , ν , μ , ..., jsou voleny podle vypočtené určující teploty.

Části 2 a 3 – zde se médium už vyskytuje pouze v plynném stavu. Teplota se zde mění, a to z teploty bodu varu, na začátku části 2, až na požadovanou konečnou teplotu 20°C. Hodnoty ρ , c_p jsou voleny pro plynné skupenství podle tabulek. Ostatní hodnoty, λ , ν , μ , ..., jsou voleny podle vypočtené určující teploty.

Obrázek 16. Schéma výměníku.



Výpočet trubkového výměníku tepla LNG a LH₂ pro motor ML 636 ENE o efektivním výkonu 210 [kW] a účinnosti motoru 0,35.

Výpočet hmotnostního toku paliva pro motor ML 636 ENE z rovnice :

$$P_{ej} = \dot{m}_p \cdot Hu \cdot \eta_c \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

Po úpravě rovnice dostaneme vztah pro hmotnostní tok média :

$$\dot{m}_p = \frac{P_{ej}}{Hu \cdot \eta_c} \quad [\text{kg/s}] \quad (2)$$

Rovnice zachování energie (tepelná bilance) vyjadřuje, že teplo odevzdané teplejší tekutině je rovno teplu přivedenému chladnější tekutině.

$$Q_T = \dot{m}_p \cdot [L + c_p \cdot (t_{p2} - t_{p1})] = \dot{m}_v \cdot c_v \cdot (t_{v1} - t_{v2}) \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Rovnice zachování energie na straně média :

$$Q_T = \dot{m}_p \cdot [L + c_p \cdot (t_{p2} - t_{p1})] \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Rovnice zachování energie na straně vody :

$$Q_T = \dot{m}_v \cdot c_v \cdot (t_{v1} - t_{v2}) \quad [\text{W}] \quad (5)$$

Hmotnostní tok vody je dán vztahem :

$$\dot{m}_v = \frac{Q_T}{c_v \cdot (t_{v1} - t_{v2})} \quad [\text{kg/s}] \quad (6)$$

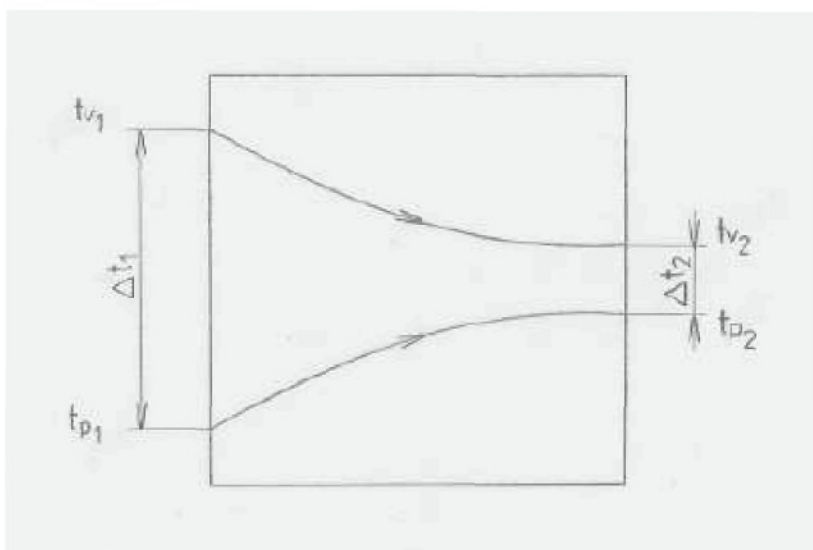
Střední teplotní rozdíl

Souproud

Po obou stranách stěny proudí tekutina. Teplo se sdílí stěnou z teplejší tekutiny do chladnější, čímž se teplejší tekutina směrem proudu ochlazuje, chladnější otepluje. Sledujeme ustálený průtok, přičemž v každém místě plochy teploty tekutin jsou konstantní. Zanedbáme teplo, které se sdílí do okolí mimo dělicí stěnu.

Tekutiny proudí se stěnou souběžně ve stejném smyslu (obr. 17.), takže teplota ve směru kolmém k proudu se nemění. Teplota je tudíž jen funkcí délky ve směru proudění (jednorázové teplotové pole).

Obrázek 17. Průběh teplot tekutin při souproudu



Střední logaritmický rozdíl obou teplot (pro souproud) Δt :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad [\text{K}] \quad (7)$$

Teplotní rozdíly Δt_1 a Δt_2 se určí ze vztahu :

$$\Delta t_1 = t_{p1} - t_{v1} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8)$$

$$\Delta t_2 = t_{v2} - t_{p2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (9)$$

Ekvivalentní průměr

Výpočet ekvivalentního průměru pro vodu.

Ekvivalentní průměr je při úlohách proudění nazýván hydraulickým průměrem. Poněvadž hnací tlakové síly působí v celém průtočném průřezu a třecí síly podél omočeného obvodu, je třeba hydraulický průměr d_{hydr} volit tak, aby poměr obou sil odpovídal poměru u kruhového průřezu. Pak bude :

$$d_{\text{hydr}} = (4 \cdot \pi \cdot d^2 / 4) / \pi \cdot d = d_e = \frac{4 \cdot S}{o} \quad [\text{m}] \quad (10)$$

Výpočet plochy průřezu S

Hodnoty průřezů určíme pomocí průměrů (obr. 18.), hodnoty jsou navržené.

Pro výpočet průřezu S platí vztah :

$$S = S_1 + S_2 \quad [\text{m}^2] \quad (11)$$

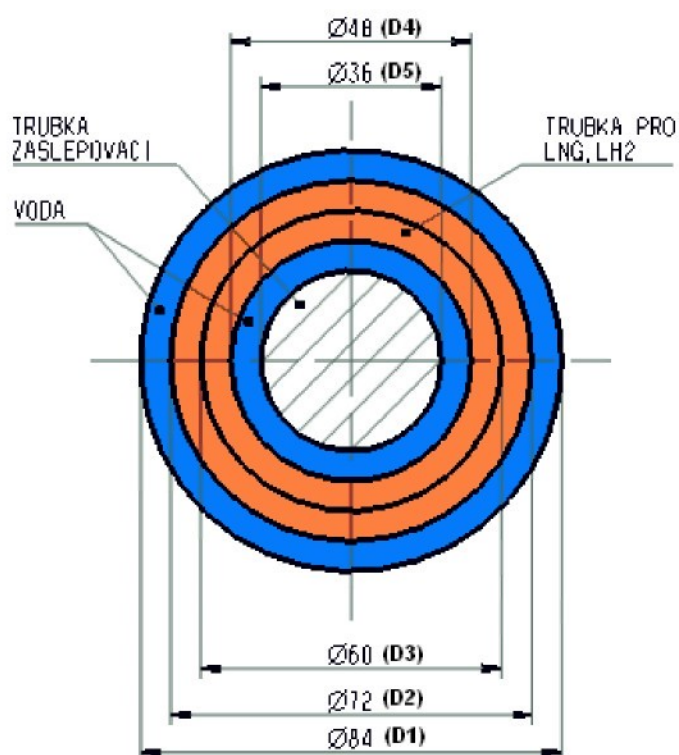
kde průřez S_1 se spočítá ze vztahu :

$$S_1 = \frac{\pi \cdot (D_1^2 - D_2^2)}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (12)$$

a průřez S_2 :

$$S_2 = \frac{\pi \cdot (D_4^2 - D_5^2)}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (13)$$

Obrázek 18. Průřez výměníkem



Omočený obvod

U výměníku, kde se jedná o trubku v trubce, se teplo sdílí pouze vnitřní plochou mezikruží, zatímco vnější plocha je izolovaná.

Pro mezikruží se sdílením tepla na vnitřní straně (obr. 18.) se omočený obvod vypočítá jako :

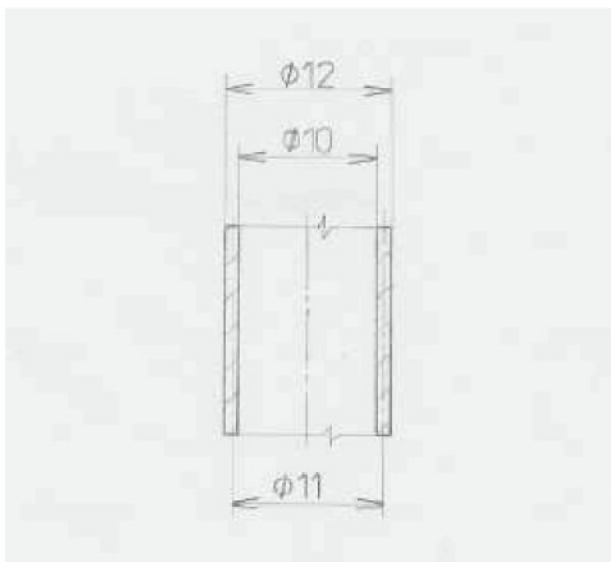
$$o = \pi \cdot D \quad [\text{m}] \quad (14)$$

kde průměr $D = D_2$ [m]

Ekvivalentní průměr d_e pro médium.

Ekvivalentní průměr d_e volíme jako střední průměr trubky podle obr. 19.

Obrázek 19. Průřez trubky pro médium



d_1 – vnitřní průměr trubky pro médium [m], $d_1 = 10$ [mm]

d_2 – střední průměr trubky pro médium [m], $d_2 = 11$ [mm]

d_3 – vnější průměr trubky pro médium [m], $d_3 = 12$ [mm]

Rychlost proudění vody

Rychlost proudění vody spočítáme ze vztahu pro průtočné množství :

$$\dot{m}_v = S_v \cdot w_v \cdot \rho_v \quad [\text{kg/s}] \quad (15)$$

kde průřez $S_v = S$ [m²]

Po úpravě rovnice dostaneme vztah pro rychlost proudění vody :

$$w_v = \frac{\dot{m}_v}{S_v \cdot \rho_v} \quad [\text{m/s}] \quad (16)$$

Kinematická viskozita ν

Kinematickou viskozitu pro vodu určíme ze závislosti na určující teplotě t_u .

Určující teplota t_u se vypočítá, jako střední hodnota teploty vstupu a výstupu z výměníku, ze

vztahu :

$$t_u = \frac{t_{v1} + t_{v2}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (17)$$

Podle teploty t_u [°C] určíme kinematickou viskozitu ν [m²/s] pro vodu pomocí tabulky 13 na příloze 1.

Reynoldsovo číslo Re

Reynoldsovo číslo je poměr mezi zrychlujícími a třecími silami. Ze vztahu :

$$Re = \frac{w_v \cdot d_e}{\nu} \quad [-] \quad (18)$$

Podle vypočteného Re určíme o jaký druh proudění se jedná, zda je to proudění laminární, nebo turbulentní. Toto určení je důležité pro další výpočet.

Přechodová oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním se nazývá kritická oblast. Kritické Reynoldsovo číslo $Re_{kr} = 2300 [-]$ představuje spodní hranici. Pod ní vzniká vždy laminární proudění a nad touto hranicí vzniká proudění turbulentní.

Je-li $Re < Re_{kr}$ - jedná se o laminární proudění.

Je-li $Re > Re_{kr}$ - jedná se o turbulentní proudění.

Výpočty pro laminární proudění

Grashoffovo číslo Gr

Grashoffovo číslo charakterizuje poměr vztlakové síly pro element objemu k jeho setrvačným silám. Ze vztahu :

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \vartheta \cdot d_e^3}{\nu^2} \quad [-] \quad (19)$$

kde : β je teplotní objemová roztažnost $[1/K]$

g je gravitační zrychlení $[m/s^2]$, $g = 9,81 [m/s^2]$

ϑ je teplotní rozdíl $[^\circ C]$

d_e je ekvivalentní průměr $[m]$

ν je kinematická viskozita $[m^2/s]$

Teplotní objemovou roztažnost $\beta [1/K]$ určíme podle určující teploty $t_u [^\circ C]$ z tabulky 13 na příloze 1.

Teplotní rozdíl ϑ , se vypočítá ze vztahu :

$$\vartheta = t_s - t_{p2} \quad [^\circ C] \quad (20)$$

kde : t_s je teplota stěny, kterou volíme jako střední hodnotu teploty vody na vstupu a na výstupu z výměníku.

$$t_s = \frac{t_{v1} + t_{v2}}{2} \quad [^\circ C] \quad (21)$$

Prandtlovo číslo Pr

Prandtlovo číslo Pr [-] určíme z tabulky 13 na příloze 1, pomocí určovací teploty t_u [°C]

Nusseltovo číslo Nu

Nusseltovo číslo má též určitý geometrický význam. Nu určíme ze vztahu :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda} \quad [-] \quad (22)$$

kde : λ je součinitel tepelné vodivosti [W/mK]

Součinitel tepelné vodivosti λ [W/mK] určíme podle určující teploty t_u [°C] z tabulky 13 na příloze 1.

d_e je ekvivalentní průměr [m]

α je součinitel přestupu tepla [W/m²K]

Vliv volné konvence na nucené proudění

Z empirických vzorců pro laminární proudění v literatuře nejlépe vyhovuje vztah :

$$Nu = 0,74 \cdot Re^{0,2} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot Pr^{0,2} \quad [-] \quad (23)$$

Při turbulentním proudění, u kterého nastává intenzivní promíchávání částic tekutiny, je dáno Nusseltovo číslo rovnicí :

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad [-] \quad (24)$$

Součinitel přestupu tepla α

Součinitel přestupu tepla udává množství tepla, sdíleného jednotkou povrchu při rozdílu 1 [K] mezi teplotou tekutiny a teplotou stěny.

Součinitel přestupu tepla závisí na vlastnostech tekutiny, jejím pohybovém stavu, na tvaru povrchu tělesa a nezávisí na materiálu stěn, ze kterých se teplo sdílí. Přestup tepla závisí tedy na mnoha činitelích.

Součinitel přestupu tepla spočítáme z rovnice (22).

Po úpravě rovnice (22) dostaneme vztah :

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e} \quad [W/m^2K] \quad (25)$$

Výpočet α_x pro laminární proudění ze vztahu :

$$\alpha_x = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e} \quad [W/m^2K] \quad (26)$$

U trubek délky $L < 50d$ je nutné brát ohled na tzv. tepelnou stabilizaci. Během této tepelné stabilizace se mění, vzhledem k proměnnosti proudových i tepelných poměrů, místní součinitel přestupu tepla α_x podle délky potrubí, a v důsledku toho i střední součinitel přestupu tepla α .

Za tepelně stabilizované lze považovat potrubí o minimální délce $L = 50d$. Pro $L < 50d$ je třeba součinitel přestupu tepla α , vypočítaný ze vztahu (25) násobit opravným součinitelem ε_L podle tabulky 19 na příloze 6.

kde : L je délka výměníku [mm]

d je průměr trubky výměníku [mm], $d = D_1$

Je-li podmínka $L < 50d$ splněna, můžeme použít hodnotu opravného součinitele ε_L z tabulky 19 na příloze 6.

Výpočet součinitele přestupu tepla α se vyjádří jako součinitel α_x , vynásobený opravným součinitelem ε_L ze vztahu :

$$\alpha = \alpha_x \cdot \varepsilon_L \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (27)$$

Pro výpočet α_x pro turbulentní proudění, použijeme rovnice (26).

Hodnota součinitele přestupu tepla α vypočteného ze vztahu (26) je správná jen pro hydraulicky hladké, přímé, kruhové potrubí stálého průřezu o délce $L > 50d$. Nejde-li o tento případ, je třeba vypočtené α opravit.

Vzhledem k tepelné stabilizaci není součinitel přestupu tepla α při turbulentním proudění, podobně jako tomu bylo při proudění laminárním, stálý po celé délce potrubí. Hodnota středního součinitele přestupu tepla je větší pro krátká potrubí než pro potrubí delší. Pro $L/d > 50$ je rozdíl nepatrný, a proto se k němu nemusí v technických výpočtech přihlížet; je to těž vidět na vzorcích. Je-li $L/d < 50$, je nutné hodnotu α podle rovnice (25) násobit korekčním součinitelem ε_L z tabulky 20 na příloze 6.

kde : L je délka výměníku [mm]

d je průměr trubky výměníku [mm], $d = D_1$

Je-li podmínka $L/d < 50$ splněna, můžeme použít hodnotu korekčního součinitele ε_L z tabulky 20 na příloze 6.

Výpočet součinitele přestupu tepla α se vyjádří jako součinitel α_x vynásobený korekčním součinitelem ε_L ze vztahu :

$$\alpha = \alpha_x \cdot \varepsilon_L \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (28)$$

Vztahy pro médium

Rychlost proudění média spočítáme ze vztahu pro průtočné množství :

$$\dot{m}_p = S_p \cdot w_p \cdot \rho_p \quad [\text{kg/s}] \quad (29)$$

kde: S_p je plocha průřezu trubky pro médium. S_p určíme ze vztahu :

$$S_p = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (30)$$

kde: d_1 je vnitřní průměr trubky pro médium v [m], (obr. 19).

Po úpravě rovnice (29) dostaneme vztah pro rychlost proudění média :

$$w_p = \frac{\dot{m}_p}{S_p \cdot \rho_p} \quad [\text{m/s}] \quad (31)$$

Určující teplota t_u se vypočítá jako střední hodnota teploty na vstupu a na výstupu z výměníku, ze vztahu :

$$t_u = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} \quad [^\circ\text{C}] \quad (32)$$

Podle teploty t_u [$^\circ\text{C}$] určíme dynamickou viskozitu μ [Pa.s] pro médium z tabulky 14 na příloze 2 a z tabulky 18 na příloze 5.

Kinematickou viskozitu ν určíme ze vztahu :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_p} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (33)$$

Výpočet Reynoldsova čísla Re , stejně jako pro vodu, ze vztahu (18).

Platí podmínka pro proudění :

Je-li $Re < Re_{kr}$ - jedná se o laminární proudění.

Je-li $Re > Re_{kr}$ - jedná se o turbulentní proudění.

Prandtlovo číslo Pr

Prandtlovo číslo Pr pro médium určíme ze vztahu :

$$Pr = \frac{\nu \cdot \rho_p \cdot c_p}{\lambda} \quad [-] \quad (34)$$

kde : λ je součinitel tepelné vodivosti [W/mK].

Součinitel tepelné vodivosti λ určíme podle určující teploty t_0 [°C] pro médium, z tabulky 15 na příloze 2 a z tabulky 17 na příloze 4.

Přestup tepla při turbulentním proudění v trubce $Re > 10^4$

Při turbulentním proudění, u kterého nastává intenzivní promíchávání částic tekutiny, je dáno Nusseltovo číslo rovnicí :

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad [-] \quad (35)$$

Součinitel přestupu tepla α [W/m²K] určíme ze vztahu (25).

Zakřivená trubka, určení $\alpha_{zakř}$ [W/m²K]

V zakřivených potrubích, např. kolenech, hadech apod., vzniká v tekutině následkem působení odstředivé síly příčná, tzv. druhotná cirkulace. Tím se zvětší turbulence nejen v místě zakřivení, ale i v sousedních úsecích, do kterých se její vliv přenáší, a v důsledku toho se zvětší i součinitel přestupu tepla α .

Pro $\alpha_{zakř}$ platí vztah :

$$\alpha_{zakř} = (1 + 1,77d/r) \cdot \alpha \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (36)$$

kde : d je střední průměr trubky pro médium [m], $d = d_2$ [m]

r je poloměr šroubovice hada, viz (obr.16.), $r = D_3$ [m]

Prostup tepla

Součinitel prostupu tepla k , tj. tepelný výkon ve watech, který se sdílí jednotkovou plochou z teplejší tekutiny 1 do chladnější tekutiny 2 při teplotním rozdílu 1 [K] mezi oběma tekutinami. Součinitel prostupu tepla určíme ze vztahu :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (37)$$

kde : α_1 je součinitel přestupu tepla na straně vody, α_1 [W/m²K]

α_2 je součinitel přestupu tepla na straně média, α_2 [W/m²K]

δ je tloušťka stěny, viz (obr. 19.), δ [m]

λ je součinitel tepelné vodivosti

Pro trubku, kterou bude procházet médium, je zvolen materiál, chromoniklová ocel, s chemickým složením : 17...19 Cr, 8 Ni, 0,1...0,2 C.

Pro tuto ocel a teplotu 100 [°C] určíme hodnotu tepelné vodivosti

$\lambda = 15,701$ [W/mK] z tabulky 16 na příloze 3.

Velikost tepelného toku Q_T

$$Q_T = k \cdot S \cdot \Delta t \quad [\text{W}] \quad (38)$$

Po úpravě rovnice (38) dostaneme vztah pro velikost teplosměnné plochy S [m²]

$$S = \frac{Q_T}{k \cdot \Delta t} \quad [\text{m}^2] \quad (39)$$

Délka výměníku se spočítá ze vztahu :

$$l = \frac{S}{\pi \cdot d \cdot n \cdot z} \quad [\text{m}] \quad (40)$$

kde: d je střední průměr trubky pro médium [m], $d = d_2$ [m]

n je počet trubek

z je počet závitů šroubovice

/1/, /2/, /3/, /9/

4.3. Regulace pracovního tlaku

Pro správný chod palivového systému motoru vyžaduje motor určitý pracovní tlak pro jeho správnou funkci. Tlak plynu je po průchodu odpařovačem několikrát upravován na požadovanou hodnotu. Úpravu tlaku po průchodu odpařovačem zajišťuje automatický ventil přívodu paliva (viz kapitola č. 3.2.1.), který škrtí palivo dodávané pro motor. Další úpravu tlaku po průchodu automatickým ventilem zajišťuje regulátor nadměrného tlaku (viz kapitola č. 3.2.1.). Regulátor zajišťuje takový pracovní tlak, který je potřebný dodávat pro motor.

Právě firma Chart nabízí přesně takové typy regulátorů podle tlaků, který motor potřebuje.

Pro nízké tlaky slouží červeně označený regulátor, který má rozsah 30 - 100 psig = 2 – 6,89 bar = 206,8 kPa – 689,5 kPa.

Pro vyšší tlaky slouží hnědě označený regulátor, který má rozsah 100 - 200 psig = 6,89 – 13,79 bar = 689,5 kPa – 1379 kPa.

Pro náš případ použijeme hnědě označený regulátor, tedy pro vyšší tlaky. Tento regulátor plně zajistí potřebný pracovní tlak pro motor, který se pohybuje okolo 10 bar.

/10/

5. Výsledky výpočtů

Výsledky výpočtů LNG a LH₂ výměníků tepla jsou uvedeny v následujících tabulkách 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12.

Tabulka 6. Zadané hodnoty pro motor

Parametr	Zkratka	Jednotka	Hodnota
Střední efektivní výkon motoru	P_{ej}	[kW]	210
Účinnost motoru	η_c	[-]	0,35

Tabulka 7. Zadané hodnoty pro vodu

Parametr	Zkratka	Jednotka	Hodnota
Měrná tepelná kapacita	c_v	[J/kgK]	4186
Měrná hustota	ρ_v	[kg/m ³]	1000
Teplota vody na vstupu do výměníku	t_{v1}	[°C]	80
Teplota vody na výstupu z výměníku	t_{v2}	[°C]	40

Tabulka 8. Zadané hodnoty pro médium

Parametr	Zkratka	Jednotka	Hodnota			Hodnota		
Médium			LNG			LH ₂		
Rozdělení výměníku			1.část	2.část	3.část	1.část	2.část	3.část
Měrná plynová konstanta	r_p	[J/kgK]	518,8			4127		
Tlak	p_p	[kPa]	1100	1000	1000	1100	1000	1000
Měrná hustota (kapalina)	ρ_p	[kg/m ³]	422,6			70,8		
Měrná hustota (plyn)	ρ_p	[kg/m ³]		1,82			1,34	
Teplota média na vstupu do výměníku	t_{p1}	[°C]	-170	-163	-90	-255	-253	-100
Teplota média na výstupu z výměníku	t_{p2}	[°C]	-163	-90	20	-253	-100	20
Výhřevnost paliva	Hu	[kJ/kg]	49900			120000		
Měrná tepelná kapacita (kapalina)	c_p	[J/kgK]	3500			9690		
Měrná tepelná kapacita (plyn)	c_p	[J/kgK]		2220			14890	
Měrné výparné teplo	L	[J/kg]	509880			445590		

Tabulka 9. Zadané hodnoty rozměrů výměníků

Parametr	Zkratka	Jednotka	Hodnota			Hodnota		
Médium			LNG			LH ₂		
Rozdělení výměníku			1.část	2.část	3.část	1.část	2.část	3.část
Průměr D ₁	D ₁	[m]	0,084			0,084		
Průměr D ₂	D ₂	[m]	0,072			0,072		
Průměr D ₄	D ₄	[m]	0,048			0,048		
Průměr D ₅	D ₅	[m]	0,036			0,036		
Vnější průměr trubky pro médium	d	[m]	0,012			0,012		
Střední průměr trubky pro médium	d	[m]	0,011			0,011		
Vnitřní průměr trubky pro médium	d _i	[m]	0,01			0,01		
Poloměr šroubovice	r	[m]	0,03			0,03		
Tloušťka stěny trubky	δ	[m]	0,001			0,001		
Součinitel tepelné vodivosti oceli	λ	[W/mK]	15,701			15,701		
Počet trubek	n	[-]	1			1		
Počet závitů	z	[-]	14			14		

Tabulka 10. Vypočtené hodnoty

Parametr	Zkratka	Jednotka	Hodnota			Hodnota		
Médium			LNG			LH ₂		
Rozdělení výměníku			1.část	2.část	3.část	1.část	2.část	3.část
Hmotnostní tok paliva	$\dot{m}_p$	[kg/s]	0,012	0,012	0,012	0,005	0,005	0,005
Tepelný tok	Q_T	[W]	6425	1949	2936	2325	11391	8934
Hmotnostní tok vody	$\dot{m}_v$	[kg/s]	0,0384	0,01164	0,0175	0,014	0,068	0,053
Teplotní rozdíl	Δt_1	[°C]	250	243	170	335	333	180
Teplotní rozdíl	Δt_2	[°C]	203	130	20	293	140	20
Střední logaritmický rozdíl teplot	Δt	[°C]	226	180,6	70	313,5	222,7	72,8
Průřez S ₁	S ₁	[m ²]	0,00147			0,00147		
Průřez S ₂	S ₂	[m ²]	0,000792			0,000792		
Průřez S	S	[m ²]	0,002262			0,002262		
Omočený obvod	o	[m]	0,226195			0,226195		
Ekvivalentní průměr pro vodu	d _e	[m]	0,04			0,04		
Ekvivalentní průměr pro médium	d _e	[m]	0,011			0,011		

Tabulka 11. Vypočtené hodnoty na straně vody

Parametr	Zkratka	Jednotka	Hodnota			Hodnota		
Médium			LNG			LH ₂		
Rozdělení výměníku			1.část	2.část	3.část	1.část	2.část	3.část
Rychlost proudění vody	w_v	[m/s]	0,017	0,005	0,00775	0,00614	0,03	0,0236
Určující teplota	t_u	[°C]	60			60		
Kinematická viskozita (z tabulek)	ν	[m ² /s]	$4,75 \cdot 10^{-7}$			$4,75 \cdot 10^{-7}$		
Reynoldsovo číslo	Re	[-]	1430	433	653	517	2530	1990
Teplotní objemová roztažnost	β	[1/K]	$5,23 \cdot 10^{-4}$			$5,23 \cdot 10^{-4}$		$5,23 \cdot 10^{-4}$
Gravitační zrychlení	g	[m/s ²]	9,81			9,81		9,81
Teplota stěny	t_s	[°C]	60			60		60
Teplotní rozdíl	ϑ	[°C]	223	150	40	313		40
Grashoffovo číslo	Gr	[-]	$3,25 \cdot 10^8$	$2,18 \cdot 10^8$	$5,82 \cdot 10^7$	$4,56 \cdot 10^8$		$5,28 \cdot 10^7$
Prandtlovo číslo	Pr	[-]	3			3		
Součinitel tepelné vodivosti vody	λ	[W/mK]	0,652			0,652		
Nusseltovo číslo	Nu	[-]	31,2	12,3	22,5	26,4	19	28,1
Součinitel přestupu tepla	α_x	[W/m ² K]	509	385	366,5	430	307	458
Opravný součinitel	ε_L	[-]	1,44	1,44	1,44	1,44	1,18	1,44
Součinitel přestupu tepla	α	[W/m ² K]	733	555	528	619	363	659

Tabulka 12. Vypočtené hodnoty na straně média

Parametr	Zkratka	Jednotka	Hodnota			Hodnota		
Médium			LNG			LH ₂		
Rozdělení výměníku			1.část	2.část	3.část	1.část	2.část	3.část
Plocha průřezu trubky	S_F	[m ²]	$7,85 \cdot 10^{-5}$			$7,85 \cdot 10^{-5}$		
Rychlost proudění média	w_F	[m/s]	0,362	84,12	84,12	0,9	47,5	47,51
Určující teplota	t_u	[°C]	-166,5	-126,5	-35	-254	-176,5	-40
Dynamická viskozita (z tabulky)	μ	[Pa s]	$4,45 \cdot 10^{-6}$	$5,15 \cdot 10^{-6}$	$8,68 \cdot 10^{-6}$	$1,12 \cdot 10^{-6}$	$4,05 \cdot 10^{-6}$	$7,52 \cdot 10^{-6}$
Kinematická viskozita	ν	[m ² /s]	$1,05 \cdot 10^{-8}$	$2,83 \cdot 10^{-6}$	$4,77 \cdot 10^{-6}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$3,02 \cdot 10^{-6}$	$5,61 \cdot 10^{-6}$
Reynoldsovo číslo	Re	[-]	$3,78 \cdot 10^5$	$3,27 \cdot 10^5$	$1,94 \cdot 10^5$	$6,25 \cdot 10^5$	$1,73 \cdot 10^5$	$9,31 \cdot 10^4$
Součinitel tepelné vodivosti	λ	[W/mK]	0,0107	0,01564	0,026	0,1	0,072	0,15232
Prandtlovo číslo	Pr	[-]	1,456	0,73	0,74	0,10853	0,838	0,735
Nusseltovo číslo	Nu	[-]	775	523	347	410	332	192
Součinitel přestupu tepla	α_x	[W/m ² K]	754	744,5	819,5	3727	2173	2660
Součinitel přestupu tepla	α	[W/m ² K]	1243	1228	1351	6146	3584	4386
Součinitel prostupu tepla	k	[W/m ² K]	448	373	370,5	542,7	323	553
Výpočet teplosměnné plochy	S	[m ²]	0,0636	0,0289	0,113	0,0137	0,159	0,222
Délka výměníku	l	[m]	0,131	0,06	0,234	0,028	0,328	0,459

6. Diskuse výsledků

6.1. Diskuse výsledků LNG a LH₂ odpařovače

Z výsledků uvedených v předchozích tabulkách 10 až 12 vyplývá, že pro LNG odpařovač je potřeba méně tepelné energie obsažené v hmotnostním toku vody než je tomu pro odpaření LH₂. Hodnoty hmotnostního toku paliva ($\dot{m}_p$), uvedené v tabulce 10, jsou ovlivněny výhřevností paliva.

Hodnoty rychlosti proudění vody (w_v), uvedené v tabulce 11, dokumentují, že pro LH₂ odpařovač je potřeba větší rychlosti proudění chladicí kapaliny než pro LNG odpařovač. Je to způsobeno větší teplotou podchlazení vodíku. Pro LNG odpařovač vychází hodnota Reynoldsova čísla (Re) ve všech částech menší než 2300, z toho vyplývá, že se jedná o laminární proudění. U odpařovače LH₂ vyšla ve 2 částí hodnota (Re) větší než 2300, jedná se tedy o turbulentní proudění. V částech 1 a 3 jsou hodnoty (Re) menší než 2300, proto je zde laminární proudění. Hodnota Reynoldsova čísla (Re) a následně vypočtené Nusseltovo číslo (Nu) má vliv na výpočet hodnoty součinitele přestupu tepla (α).

V tabulce 12 jsou uvedeny hodnoty rychlosti proudění média (w_p) pro LNG a LH₂ odpařovač. Jsou zde vypočteny hodnoty určující teploty (t_u), podle kterých se v tabulkách určí veličiny dynamické viskozity (μ) a součinitele tepelné vodivosti (λ). Jejich určení je pouze přibližné, neboť se uplatňuje zjednodušení průtoku ve třech úsecích, v kterých jsou zadány střední hodnoty, podle (t_u) nejsou v tabulkách uvedeny. Veličina dynamické viskozity (μ) ovlivňuje spolu s hustotou média (ρ_p) kinematickou viskozitu (ν), která se spolu s rychlostí média (w_p) podílí na výpočtu Reynoldsova čísla (Re). U obou odpařovačů vychází hodnoty (Re) větší než je kritická hodnota 2300, jedná se proto o turbulentní proudění. Veličina součinitele tepelné vodivosti (λ) ovlivňuje výpočet Prandtlova čísla (Pr), které má vliv na získání Nusseltova čísla (Nu). Podle (Nu) získáme hodnotu součinitele přestupu tepla (α).

Hodnoty součinitele přestupu tepla (α) vychází pro LH₂ odpařovač značně vyšší než je tomu u LNG odpařovače. Podle hodnot (α) na straně vody a média, tloušťky stěny a tepelné vodivosti oceli určí součinitel prostupu tepla (k), který je důležitý pro získání velikosti hodnoty teplosměnné plochy (S). Velikost teplosměnné plochy (S) je větší na straně LH₂ odpařovače, z toho vyplývá, že i vypočtené délky jsou větší pro LH₂ odpařovač než pro LNG odpařovač.

6.2. Výkresová dokumentace

Zhotovený projekční náčrt pro výměník tepla LNG je přiložen k bakalářské práci v měřítku 1:2 ve formátu A3 pro lepší čitelnost.

7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo obeznámení s problematikou zkapalněných plyných paliv. Popsal jsem zde funkci kryogenní nádrže pro skladování zkapalněných plyných paliv, funkci palivového systému pro LNG palivo a také jeho způsob odpařování ve výměníku tepla. Při návrhu výměníku tepla jsem použil podklady od firmy Chart. Byly sestaveny vzorce sloužící k výpočtu výměníku tepla pro LNG a LH₂. Při řešení výměníku tepla nastaly problémy s teplotou, která se ve výměníku mění a ovlivňuje řadu veličin sloužících k přesnému výpočtu. Pro veličiny dynamické viskozity (μ) a součinitele tepelné vodivosti (λ) jsme nezískali z tabulek přesné hodnoty pro tak nízké teploty, proto jsou tyto veličiny určeny jen orientačně. Podobně je to i u měrné hustoty média (ρ_p), která se též mění s rostoucí teplotou ohřívaného média ve výměníku.

Vypočtené hodnoty jak pro LNG, tak pro LH₂ výměník tepla musíme brát pouze orientačně, a doporučuje se jejich korekce po provedení experimentu. Navíc firmy zabývající se problematikou odpařování zkapalněných plyných paliv podobné výpočty nenabízejí.

Byl zhotoven také výkres LNG výměníku tepla, jeho přesnou konstrukci neznáme a také ostatní firmy je neradi zveřejňují z důvodů komercializace. Výkres byl zhotoven podle návrhu odpařovače od firmy Chart. Rozměry výměníku byly navrženy nebo přibližně určeny z výpočtů a předpokládá se jejich ověření před komerčním nasazením.

Použitá literatura :

- /1/ Sýkora, K. : Základy sdílení tepla, Liberec, 1961.
- /2/ Kalčík, J.; Sýkora, K. : Technická termomechanika, Academia, Praha, 1973.
- /3/ Sazima, M.; Kmoníček, V.; Schneller, J. a kol. : Teplo, SNTL, Praha, 1989.
- /4/ Ražnjevič, K. : Termodynamické tabulky, ALFA, Bratislava, 1984.
- /5/ Urbášek, J. : Teoretické základy energetických zařízení, vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1985.
- /6/ Laurin, J. : Autobus s palivovým systémem LNG (studie), Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2000.
- /7/ Chrz, V.; Zeman, J.: Využití zkapalněného plynu v dopravě. In: Autosympo 2000, konference AP. Brno 2000.
- /8/ Štěřba, P.; Kryžický, O. : Jak na LPG, Computer Press, Praha, 2002.
- /9/ Horák, Z.; Krupka, F. : Fyzika, SNTL/ALFA, Praha 1976.
- /10/ INTERNETOVÉ STRÁNKY : www.nexgenfueling.com
<http://krejcio.wz.cz>
www.cng.cz
www.novagas.cz
www.vscht.cz/met/stranky/koroze/pojmy/pojmy.htm
www.linde.com

Seznam příloh :

- Příloha 1 : Fyzikální parametry pro vodu.
- Příloha 2 : Dynamická viskozita metanu.
Koeficient tepelné vodivosti metanu.
- Příloha 3 : Koeficient tepelné vodivosti oceli.
- Příloha 4 : Koeficient tepelné vodivosti vodíku.
- Příloha 5 : Dynamická viskozita vodíku.
- Příloha 6 : Hodnoty součinitele ε_L pro různé L/d .
Hodnoty ε_L při turbulentním proudění.
- Příloha 7 : Odpařovače LNG firmy Chart (přepočet rozměrů z tabulky na obrázku 13).

PŘÍLOHA 1

Tabulka 13. Fyzikální parametry pro vodu

teplota t [$^{\circ}\text{C}$]	tlak p [MPa]	měrná hmotnost, hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	měrné teplo c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	výparné teplo ℓ [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	tepelná vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	izob.souč. obj.rezt. $\beta\cdot 10^3$ [K^{-1}]	dynam. viskozita $\mu\cdot 10^6$ [Pa.s]	kinem. viskozita $\nu\cdot 10^6$ [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	tepletní vodivost $a\cdot 10^6$ [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	Prandt. číslo Fr [1]	povrch. napětí $\sigma\cdot 10^3$ [Nm^{-1}]
0	0,0981	999,8	4217,8	2500,7	0,522	-0,07	1792	1,792	0,131	13,67	75,6
10	0,0981	999,7	4192,2	2477,3	0,578	+0,088	1308	1,307	0,138	9,47	74,1
20	0,0981	998,2	4181,8	2453,5	0,598	0,206	1003	1,004	0,143	7,01	72,6
30	0,0981	995,7	4178,4	2430,0	0,614	0,303	798	0,801	0,148	5,43	71,0
40	0,0981	992,2	4178,4	2406,1	0,628	0,385	653	0,658	0,151	4,35	69,4
50	0,0981	988,0	4180,5	2382,3	0,641	0,457	548	0,554	0,155	3,57	67,8
60	0,0981	983,2	4184,3	2358,0	0,652	0,523	467	0,475	0,158	3,00	66,0
70	0,0981	978,8	4189,7	2333,3	0,661	0,585	404	0,413	0,161	2,56	64,3
80	0,0981	971,8	4196,4	2308,2	0,669	0,643	355	0,265	0,164	2,23	62,5
90	0,0981	965,3	4205,2	2282,6	0,676	0,698	315	0,326	0,166	1,96	60,7
100	0,10136	958,4	4216,1	2256,7	0,682	0,752	283	0,295	0,169	1,75	58,8
120	0,19860	943,1	4245,4	2202,7	0,686	0,860	234	0,2485	0,171	1,45	54,8
140	0,36148	926,1	4287,3	2144,9	0,684	0,975	199	0,215	0,172	1,25	50,8
160	0,61826	907,4	4308,7	2082,5	0,682	1,098	171	0,189	0,173	1,09	46,4
180	1,0030	886,9	4341,7	2015,1	0,676	1,233	150,6	0,1697	0,172	0,98	42,2
200	1,5556	864,7	4496,6	1940,6	0,666	1,392	136,6	0,1579	0,171	0,92	37,8
220	2,3209	840,3	4609,7	1857,7	0,653	1,597	125,1	0,1488	0,168	0,88	33,3
240	3,3491	813,6	4760,4	1765,6	0,636	1,852	115,6	0,1420	0,164	0,87	28,7
260	4,9956	784,0	4978,1	1661,3	0,612	2,21	107,0	0,1365	0,157	0,87	24,0
280	6,4213	750,7	5308,9	1542,8	0,581	2,70	99,6	0,1325	0,145	0,91	19,3
300	8,5946	712,5	5861	1404,2	0,541	3,46	92,5	0,1298	0,129	1,00	14,6
320	11,293	667,0	6615	1237,6	0,491	4,60	85,6	0,1282	0,111	1,15	9,9
340	14,613	609,5	8373	1027,0	0,430	8,25	77,5	0,1272	0,084	1,5	5,4
360	18,680	542,5	13397	719,7	0,349		68,5	0,1306	0,050	2,6	1,5
374,2	22,13	326		0	0,209		50,6	0,155	0		0

PŘÍLOHA 2

Plyn	Chemický vzorec	Teplota		Dynamická viskozita	
		t	T	$\eta \times 10^4$	
		°C	°K	kps/m ²	Ns/m ²
Metán	CH ₄	— 80	193,15	0,755	7,4
		— 60	213,15	0,826	8,1
		— 30	233,15	0,897	8,8
		— 20	253,15	0,969	9,5
		0	273,15	1,055	10,35
		20	293,15	1,108	10,87
		50	323,15	1,203	11,80
		100	373,15	1,357	13,31
		150	423,15	1,500	14,71
		200	473,15	1,637	16,05
		250	523,15	1,759	17,25
		300	573,15	1,897	18,60
		380	653,15	2,066	20,26
		499	772,15	2,309	22,64

Tabulka 14. Dynamická viskozita metanu

Plyn	Chemický vzorec	Teplota		Tepelná vodivost	
		t	T	λ	
		°C	°K	kcal/hm °K	W/m °K
Metán	CH ₄	— 150	123,15	0,0111	0,01291
		— 100	173,15	0,0158	0,01838
		— 75	198,15	0,0183	0,02128
		— 50	223,15	0,0208	0,02419
		— 25	248,15	0,0234	0,02721
		0	273,15	0,0260	0,03024
		20	293,15	0,0285	0,03315
		50	323,15	0,0320	0,03722

Tabulka 15. Koeficient tepelné vodivosti metanu

PŘÍLOHA 3

Tabulka 16. Koeficient tepelné vodivosti oceli

Zliatina	Zloženie v %	Teplota		Hustota	Tepelná vodivosť	
		t	T	ρ	λ	
		°C	°K	kg/m ³	kcal/hm °K	W/m °K
Oceľ chrómníková	0,8 Cr, 3,5 Ni, 0,4 C	20	293,15	8100...8700	30	34,890
		100	373,15		31	36,053
		200	473,15		32	37,216
		400	673,15		32	37,216
		600	873,15		27	31,401
	17...19 Cr, 8 Ni, 0,1...2 C	20	293,15	8100...9000	12,5	14,538
		100	373,15		13,5	15,701
		200	473,15		14,5	16,864
		300	573,15		16	18,608
		500	773,15		18	20,934

PŘÍLOHA 4

Tabulka 17. Koeficient tepelné vodivosti vodíku

Plyn	Chemický vzorec	Teplota		Tepelná vodivost	
		t	T	λ	
		°C	°K	kcal/hm °K	W/m °K
Vodík	H ₂	—200	73,15	0,0443	0,05152
		—150	123,15	0,0792	0,09211
		—100	173,15	0,1001	0,11639
		— 50	223,15	0,1260	0,14654
		0	273,15	0,1503	0,17543
		20	293,15	0,1602	0,18631
		40	313,15	0,169	0,19655
		60	333,15	0,179	0,20810
		80	353,15	0,188	0,21064
		100	373,15	0,197	0,22911
		120	393,15	0,206	0,23958
		140	413,15	0,215	0,25005
		160	433,15	0,223	0,25935
		180	453,15	0,230	0,26749
		200	473,15	0,237	0,27563
		220	493,15	0,243	0,28261
		240	513,15	0,248	0,28842
		260	533,15	0,251	0,29191
		280	553,15	0,253	0,29424
		300	573,15	0,266	0,30940
		500	773,15	0,330	0,38379
		1000	1273,15	0,510	0,59313

PŘÍLOHA 5

Tabulka 18. Dynamická viskozita vodíku

Plyn	Chemický vzorec	Teplota		Dynamická viskozita	
		t	T	$\eta \times 10^4$	
		°C	°K	kps/m ²	Ns/m ²
Vodík	H ₂	-250	23,15	0,112	1,1
		-200	73,15	0,337	3,3
		-150	123,15	0,489	4,8
		-100	173,15	0,622	6,1
		-50	223,15	0,744	7,3
		0	273,15	0,857	8,4
		50	323,15	0,959	9,4
		100	373,15	1,050	10,3
Vodík	H ₂	200	473,15	1,234	12,1
		300	573,15	1,417	13,9
		400	673,15	1,570	15,4
		500	773,15	1,723	16,9
		600	873,15	1,866	18,3
		700	973,15	1,999	19,6
		800	1073,15	2,141	21,0

PŘÍLOHA 6

Tabulka 19. Hodnoty součinitele ε_L pro různé L/d.

L/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_L	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

Tabulka 20. Hodnoty ε_L při turbulentním proudění.

L/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
Re = $1 \cdot 10^4$	1,65	1,5	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,1	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,1	1,08	1,04	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,1	1,08	1,06	1,03	1,02	1
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

PŘÍLOHA 7

Tabulka 21. Odpařovače LNG firmy Chart (přepočet rozměrů z tabulky na obrázku 13)

Typ výměníku	Výkon	A	B	C	D	E
	[kW]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
10582851	111,855	0,28575	0,1143	0,1651	0,1905	0,11748
9722999	223,71	0,48895	0,1143	0,37465	0,3937	0,11748
10668725	335,655	0,6731	0,127	0,5461	0,5715	0,13018