

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

STROJNÍ FAKULTA

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení

Katedra energetických strojů a zařízení

Návrh kryogenní nádoby na kapalný H_2

Design of a cryogenic vessel for liquid H_2

Vedoucí práce: Ing. Jan Urbášek, CSc., Katedra energetických zařízení

Konzultant : Ing. Petr Záruba, Ferox a. s.

Počet stran: 77

Počet tabulek: 6

Počet obrázků: 26

Počet vzorců: 112

Počet příloh: 3

Datum odevzdání: 27. 05. 2005

Lucie Šumová

P r o h l á š e n í

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena 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 TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že si svou diplomovou práci mohu vyzvednout v Univerzitní knihovně TUL po uplynutí pěti let po obhajobě.

V Liberci, dne 27. května 2005

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Urbáškoví, CSc. a Ing. Petru Zárubovi.

Zvláštní poděkování patří mému tatínkovi, který mě po celou dobu vedl a pomáhal při měření. Také bych chtěla poděkovat firmě Ferox a.s., která mi umožnila realizaci měření a jejím pracovníkům, kteří byli velice vstřícní a ochotni pomoci.

Nemalý dík patří také mé rodině a přátelům, kteří mi pomáhali s řešením vzniklých problémů během tvorby diplomové práce.

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem kryogenní nádoby na kapalný H_2 . Pro navržené rozměry je uveden pevnostní a tepelný výpočet. Významná část práce je věnována rozboru izolací a jednotlivým přestupům tepla. V práci je uveden teoretický model výpočtu přenosu tepla izolací a vypočtené hodnoty porovnány s hodnotami naměřenými v NASA, Indian Institute of Technology a společnosti Linde.

Experimentální část je zaměřena na zjišťování efektivní tepelné vodivosti vybraných materiálů superizolace. Naměřené hodnoty byly použity pro výpočet přenosu tepla izolací a z něho byl navržen optimální počet vrstev superizolace pro navrhovanou kryogenní nádobu.

Annotation

This thesis deals with a design of a cryogenic vessel for liquid H_2 . Strength and thermal calculation is quoted for designed proportions. A significant part of this thesis is dedicated to insulation analysis and particular heat transfers. A theoretical model of calculation of heat transfer of multilayer insulation is also stated and calculated values are compared with values measured in NASA, Indian Institute of Technology and Linde company.

Experimental part is focused on measurement of effective thermal conductivity of selected superinsulation materials. Measured values were used afterwards for calculation of heat transfer through insulation and from this calculation optimal number of layers of superinsulation was designed for design of cryogenic vessel.

KLÍČOVÁ SLOVA:

- kryogenní nádoby
- tepelné izolace
- vícevrstvá izolace
- vodík
- přenos tepla

- cryogenic vessel
- thermal insulation
- multilayer insulation
- hydrogen
- heat transfer

OBSAH

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD	13
1. VODÍK.....	14
1.1 Vlastnosti vodíku.....	14
1.2 Výskyt vodíku.....	16
1.3. Výroba vodíku.....	16
1.4 Výroba kapalného vodíku.....	17
1.5 Účinnost výroby vodíku.....	17
1.6 Přeprava a skladování vodíku	18
1.6.1 Přeprava vodíku	18
1.6.2 Skladování vodíku	18
1.6.2.1 Zásobníky na stlačený vodík	19
1.6.2.2 Zásobníky na kapalný vodík.....	19
1.6.2.3 Zásobníky s kovovými hydridy	19
1.6.2.4 Chemické skladování	19
1.7 Současné využívání vodíku a jeho budoucnost	20
2. NÁVRH KRYOGENNÍ NÁDOBY.....	23
2.1 Popis kryogenní nádoby	23
2.2 Volba materiálu kryogenní nádoby.....	24
2.3 Bezpečnost při práci s vodíkem	25
2.4 Přeprava kryogenní nádoby	26
2.5 Návrhové rozměry kryogenní nádoby	26
2.6 Pevnostní výpočet kryogenní nádoby.....	28
2.7 Tepelný výpočet kryogenní nádoby.....	29
3. TEPELNÉ IZOLACE	37
3.1 Základní typy používaných tepelných izolací v kryogenní technice	37
3.1.1 Vysokovakuová izolace	38
3.1.2 Prášková a vakuoprášková izolace	38
3.1.3 Izolace pěnovými materiály	39
3.1.4 Vícevrstvá izolace – superizolace.....	41
3.1.5 Další možnost izolace	42
3.2 Model výpočtu izolace	42
3.2.1 Přenos tepla vedením tuhou fází	43
3.2.2 Přenos tepla radiací	47
3.2.3 Přenos tepla vedením v plynu	49
3.2.4 Porovnání jednotlivých způsobů přenosu tepla	51
3.2.5 Přesnost teoretického výpočtu	53

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - Zjišťování tepelných vlastností izolace	54
4.1 Matematický model výpočtu MLI podle vybraných vzorců	54
4.1.1 Měření tepelné vodivosti superizolace na přístroji ALAMBETA	55
4.1.1.1 Příprava vzorků a samotné měření	55
4.1.1.2 Popis měření	56
4.1.1.3 Závěr měření na Alambetě	56
4.1.2 Vyhodnocení matematického modelu	57
4.1.3 Závěr teoretického výpočtu	59
4.2 Měření tepelných vlastností superizolace	59
4.2.1 Měření 21 vrstev superizolace	60
4.2.2 Naměřené a vypočtené hodnoty izolace pro 21 vrstev	63
4.2.3 Měření superizolace 43 vrstev	66
4.2.4 Naměřené a vypočtené hodnoty izolace pro 43 vrstev	67
4.2.5 Měření odparu dusíku pro různé tlaky	69
4.2.6 Vyhodnocení výsledků měření superizolace	70
 5. DISKUSE	 72
 6. ZÁVĚR	 74
 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	 76

PŘÍLOHA 1 – PEVNOSTNÍ VÝPOČTY

PŘÍLOHA 2 – KONSTRUKCE KRYOGENNÍ NÁDOBY V AUTOCADu

CD

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_{in}	[m ²]	povrch vnitřní nádoby
A_m	[m ²]	plocha trubky měření 1
A_o	[m ²]	povrch vnější nádoby
A_{p2}	[m ²]	plocha středního prstence 2
A_{th}	[m ²]	průřez horního táhla
A_{td}	[m ²]	průřez dolního táhla
A_{tr}	[m ²]	plocha trubky
A_{siz}	[m ²]	střední povrch vnitřní nádoby s izolací 45 vrstev
a	[m]	rádius styčné plochy mezi stíněním a vlákny izolační vrstvy
a_f	[m]	rádius dotyku dvou vláken
b	[m]	šířka vrstvy
b'	[1]	skutečný odrazový faktor
D	[m]	tloušťka textilie
D_{Din}	[m]	vnější průměr klenutého dna vnitřní nádoby
D_i	[m]	průměr i-té vrstvy
D_{in2}	[m]	vnější průměr vnitřní nádoby
D_{in1}	[m]	vnitřní průměr vnitřní nádoby
D_m	[m]	průměr trubky měření 1
D_o	[m]	vnější průměr vnější nádoby
D_{pth}	[m]	průměr prstence uchycení táhel
D_{td}	[m]	průměr dolního táhla
D_{th}	[m]	průměr horního táhla
D_{tr}	[m]	průměr trubky
d_f	[m]	průměr vlákna
d_{tr}	[m]	vnitřní průměr trubky
d_m	[m]	vnitřní průměr trubky měření 1
E_t	[MPa]	modul pružnosti materiálu táhla
F	[N]	celková působící síla
F_b	[m ²]	optické rozhraní (hranice vláken)
F_h	[N]	síla působící na horní táhla
f_b	[m ³]	objem netkaných vláken
$G_{H,2}$	[kg/h]	odpar vodíku za hodinu
H_D	[m]	hloubka vnitřního dna
h_D	[m]	hloubka vnitřního klenutí
K_1	[1]	korekční součinitel
K_2	[1]	korekční součinitel
K_F	[Pa]	modul pružnosti materiálu vláken
K_S	[Pa]	modul pružnosti materiálu reflexní vrstvy
k	[W/mK]	tepelná vodivost materiálu
k_f	[W/mK]	tepelná vodivost vláken
k_g^*	[W/mK]	vodivost plynného dusíku
k_{gp}	[W/mK]	vodivost zbytkovým plynem uvnitř prostoru vláken
k_{gc}	[W/mK]	tepelná vodivost zbytkového plynu
k_s	[W/mK]	tepelná vodivost reflexní vrstvy

L	[J/kg]	výparné teplo
L_1	[m]	délka prstence1
L_{1D}	[m]	hloubka vnějšího dna vnější nádoby
L_2	[m]	délka prstence2
L_3	[m]	délka prstence3
L_{D1}	[m]	délka válcové části dna vnější nádoby
L_{D2}	[m]	hloubka klenutí dna vnější nádoby
L_{Dv}	[m]	délka válcové části vnitřního dna
L_{in}	[m]	délka válcové skořepiny vnitřní nádoby
L_{inc}	[m]	celková délka vnitřní nádoby
L_{m1}	[m]	délka trubky měření 1
L_{m3}	[m]	délka trubky 3
L_o	[m]	celková délka vnější nádoby
L_{os}	[m]	délka válcové skořepiny vnější nádoby
L_{td}	[m]	délka dolního táhla
L_{th}	[m]	délka horního táhla
L_{tro}	[m]	délka trubky pro odběr kapaliny
L_{trp}	[m]	délka trubky pro plnění kapaliny
L_s	[m]	délka válcové skořepiny vnitřní nádoby
L_{sp}	[m]	střední délka prstence
ΔL	[m]	výsledná vůle na dolním táhle
ΔL_1	[m]	změna délky prstence 1
ΔL_2	[m]	změna délky prstence 2
ΔL_3	[m]	změna délky prstence 3
ΔL_{pth}	[m]	zkrácení prstence pro uchycení táhel
ΔL_p	[m]	celkové zkrácení axiální podpory
ΔL_s	[m]	celkové zkrácení nádoby
ΔL_{td}	[m]	celkové zkrácení dolního táhla
ΔL_{th}	[m]	celkové prodloužení horního táhla
l	[μ m]	délka vlákna (pramene)
M	[kg/kmol]	molekulová hmotnost plynu
m_v	[kg]	hmotnost náplně (400m ³ vodíku)
N	[1]	počet vrstev
N_c	[1]	počet kontaktů
N_T	[1]	počet vláken
N_v	[N/cm]	hustota vrstev
n_{cl}	[1]	počet řad v tkanině
n_{cr}	[1]	počet sloupců v tkanině
n_f	[1]	počet vláken
Od_{par}	[1/den]	odpar vodíku
P	[Pa]	intersticiální tlak
P_1	[Pa]	zatížení ve styčném bodě
P_i	[Pa]	kontaktní tlak i-té vrstvy
p_{zbyt}	[Pa]	tlak zbytkového plynu
Q	[W]	celkový přívod tepla
Q_{ctr}	[W]	celkový tepelný zisk trubkami
Q_d	[W]	tepelný zisk dolním táhlem

Q_{dt}	[W]	celkový tepelný zisk horními táhly
Q_h	[W]	tepelný zisk horním táhlem
Q_{ht}	[W]	celkový tepelný zisk horními táhly
Q_{iz}	[W]	celkové teplo přivedené izolací
Q_{m1}	[W]	tepelný zisk trubkou 1
Q_{m1a2}	[W]	celkový tepelný zisk trubkami 1 a 2
Q_{m3}	[W]	tepelný zisk trubky
Q_{mc}	[W]	celkový tepelný zisk trubky
Q_p	[W]	tepelný zisk axiální podporou
Q_{tro}	[W]	tepelný zisk trubkou pro odběr kapaliny
Q_{trp}	[W]	tepelný zisk trubkou pro plnění kapaliny
q_{gc}	[W/m ²]	tepelný tok vedením zbytkovým plynem
q_r	[W/m ²]	tepelný tok radiací
R	[J/molK]	univerzální plynová konstanta
R_c	[m ² K/W]	tepelný odpor vedení tepla tuhými látkami
R_{cc}	[m ² K/W]	celkový tepelný odpor vedení tepla tuhými látkami
R_{ct}	[m ² K/W]	tepelný odpor v místě dotyku vláken a reflexní vrstvy
R_{ctf}	[m ² K/W]	tepelný odpor v místě dotyku dvou vláken
R_g	[m ² K/W]	tepelný odpor vodivosti plynu
R_{tc}	[m ² K/W]	tepelný odpor vedením v tuhých látkách
R_{rp}	[m ² K/W]	tepelný odpor radiací meziprostoru
R_r	[m ² K/W]	celkový tepelný odpor radiací
R_{rs}	[m ² K/W]	tepelný odpor reflexní vrstvy proti přenosu tepla radiací
R_z	[m ² K/W]	tepelný odpor v místě dotyku reflexní vrstvy a vláken
r	[m]	poloměr vlákna
r_f	[m]	poloměr vlákna
S	[m]	délka oblouku
s_{in}	[m]	tloušťka vnitřní nádoby
s_{inD}	[m]	tloušťka klenutého dna
s_o	[m]	tloušťka vnější nádoby
s_t	[m]	tloušťka stěny trubky
T_1	[K]	teplota studené stěny (kapaliny)
T_2	[K]	teplota teplé stěny (okolí)
T_s	[K/m]	teplotní spád na 1m délky
ΔT	[K]	teplotní spád
ΔT_{L1}	[K]	teplotní spád na prstenci 1
ΔT_{L2}	[K]	teplotní spád na prstenci 2
ΔT_{L3}	[K]	teplotní spád na prstenci 3
$\Delta T_{stř}$	[K]	střední teplota
t_{2skut}	[m]	skutečná tloušťka středního prstence 2
t_{iz}	[m]	tloušťka izolace 45 vrstev
t_p	[m]	tloušťka prostoru vláken
t_p	[m]	tloušťka prostoru vláken
t_s	[m]	tloušťka reflexní vrstvy
V_{H2}	[m ³ /h]	objem odpařeného vodíku za den
V_{inD}	[m ³]	objem dna vnitřní nádoby
V_{in}	[m ³]	objem vnitřní nádoby

V_p	[m ³]	objem zaujímaný prostorem vláken
V_v	[m ³]	objem kapalného vodíku
V_v	[m ³]	objem zaujímaný vlákny
W	[1]	počet vinutí
α	[1]	součinitel akomodace
α_{20}	[K ⁻¹]	součinitel tepelné roztažnosti pro T=20K
α_{140}	[K ⁻¹]	součinitel tepelné roztažnosti (pro střední teplotu 140K)
β	[1]	materiálová konstanta
γ	[1]	poissonova konstanta
δ_c	[m]	mezera mezi reflexní vrstvou a prostorem vláken
δ	[1]	poměr tuhých částic v prostoru
ϵ_{rd}	[1]	vzájemná emisivita dvou ploch
ϵ	[1]	emisivita podle Chau a Moy pro Mylarovou fólii
ε	[1]	poměrné prodloužení horního táhla
κ	[1]	poissonova konstanta
λ_t	[W/mK]	tepelná vodivost materiálu táhla
λ_p	[W/mK]	tepelná vodivost materiálu axiální podpory
λ_{tr}	[W/mK]	tepelná vodivost materiálu trubky
λ_m	[W/mK]	tepelná vodivost materiálu trubky
λ_{iz}	[W/mK]	tepelná vodivost izolace 45 vrstev
λ_o	[μm]	volná vlnová délka
λ_{iz}	[W/mK]	tepelná vodivost izolace
μ_1, μ_2	[1]	poissonovo číslo pro materiál 1 a 2
ρ	[kg/m ³]	hustota H ₂ při 20,3K
θ	[rad]	úhel sklonu vlákna
σ_s	[1]	skutečný rozptylový koeficient
σ_a	[1]	skutečný absorpční koeficient
σ_{th}	[MPa]	napětí v horním táhlu
σ	[W/m ² K ⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta
τ	[1]	součinitel transmise

ÚVOD

Na počátku 21. století prožíváme rychlý vzestup technického pokroku prakticky ve všech oblastech lidské činnosti, který je doprovázen stejně rychlým odčerpáváním světových primárních energetických zdrojů – uhlí, ropy a zemního plynu. S rostoucí životní úrovní každé země, roste její spotřeba energie. Zatímco poptávka po energii roste a s ní i cena, množství konvenčních zdrojů energie klesá. Díky této skutečnosti roste v současné době zájem o tzv. obnovitelné energetické zdroje OEZ (slunce, voda, vítr...), které by v budoucnosti mohly pokrýt převážnou část potřebné energie.

Zvýšenou pozornost OEZ věnují státy evropských zemí, které přijaly v prosinci 1997 tzv. Kjótský protokol. V tomto protokolu se státy zavázaly snížit emise skleníkových plynů do r. 2008 – 2012 v průměru o 5,7%. Pro splnění závazku zvyšují evropské země podíl vyrobené energie z OEZ a jejich využití v energetice. Nevýhodou OEZ je závislost množství vyrobené energie na klimatických podmínkách. Následkem klimatických změn dochází k dočasnému přebytku vyrobené energie, kterou nelze v daný okamžik spotřebovat. Jedna z možných variant, jak ukládat přebytečnou energii, je akumulovat ji do výroby vodíku. Vodík je ideálním spojením mezi budoucím zásobováním energií z obnovitelných zdrojů a současnou energetickou infrastrukturou. Bude hrát velkou roli nejen v energetice, ale i v dopravě.

Spolu s výrobou vodíku se otevírá otázka jeho přepravy a skladování. Značnou nevýhodou vodíku je jeho velký objem v plynném stavu, a proto se vodík převážně a skladuje převážně ve stavu kapalném. K tomuto účelu slouží kryogenní nádoby.

Ve své diplomové práci se věnuji návrhu kryogenní nádoby na kapalný vodík. Nádoba je určena ke skladování kapalného vodíku o objemu 400m^3 . Tyto nádoby mohou sloužit v energetice pro skladování vyrobeného vodíku např. z OEZ nebo v dopravě ke skladování vodíku u čerpacích stanic.

1 VODÍK

1.1 Vlastnosti vodíku

Roku 1766 objevil vodík britský fyzik a chemik Henry Cavendish, který určil i jeho vlastnosti (viz Tab.1). Vodík je první člen periodické soustavy prvků. Jeho atomy mají nejjednodušší elektronovou konfiguraci $1s^1$, nejmenší hmotnost a nejmenší poloměr. Vodík je za normálních podmínek bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Skládá se z dvouatomových molekul H_2 , ve kterých jsou atomy vodíku vázány jednoduchou nepolární kovalentní vazbou, jeho molární hmotnost je 14x menší než vzduch. Molekuly H_2 jsou tak malé, že pronikají pevnými materiály.

Podle struktury elektronového obalu je vodík s^1 -prvek, ale od alkalických kovů se vlastnostmi velmi liší. Proto se v periodické soustavě mezi ostatní s-prvky nezařazuje stejně jako helium $1s^2$. Vodík je typický nekov. Ionizační energie je ve srovnání s ostatními s^1 -prvky (alkalickými kovy) přibližně dvojnásobná, připomíná spíše halogeny. Atomy vodíku jsou za běžných podmínek nestálé. Stabilnější elektronovou konfiguraci získávají vytvořením chemické vazby. Zajímavou vlastností vodíku je jeho schopnost rozpouštět se v některých kovech, např. v palladiu.[25]

Jsou známy tři izotopy vodíku, lišící se počtem neutronů v jádře:

Protium H

Klasický atom vodíku (někdy nazývaný protium), tvořený jedním protonem a jedním elektronem. Tento izotop je nejjednodušší atom ve vesmíru a tvoří jeho převažující část. [25]

Deuterium $2H$

Atom deuteria obsahuje v jádře jeden proton a jeden neutron a od běžného vodíku se liší především relativní atomovou hmotností, která je 2,01363. Bývá mu přiřazována chemická značka D. Deuterium je stabilní izotop, který nepodléhá radioaktivní přeměně. V přírodě se běžně vyskytuje namísto normálního (lehkého) vodíku. V průměru 7 000 atomů normálního vodíku na atom deuteria. Ve spojení s kyslíkem tvoří deuterium tzv. těžkou vodu, D_2O . Tato sloučenina má významné využití v jaderném

průmyslu. Je velmi účinným moderátorem, tedy látkou zpomalující rychlost neutronů. Této vlastnosti se již od druhé světové války využívá u těžkovodních reaktorů k přípravě plutonia z uranu. Dále je využíván jako účinný stopovač biochemických reakcí. [25]

Tritium ^3H

Atom tritia má jádro složeno z jednoho protonu a 2. neutronů. Bývá někdy označován chemickou značkou T. Jeho relativní atomová hmotnost je 3,01605. Na rozdíl od deuteria je jádro tritia nestabilní a rozpadá se s poločasem rozpadu 12,4 roku za vyzáření pouze málo energetického beta záření. V přírodních podmínkách vzniká tritium především v horních vrstvách atmosféry při kolizi kosmického záření s jádrem atomu deuteria. Uměle je tritium získáváno v těžkovodních jaderných reaktorech při výrobě plutonia z přírodního uranu. Tritium slouží přitom jako jedna ze složek náplně termonukleární bomby, doposud nejničivějšího destrukčního prostředku, jaký člověk vyrobil. Tritium je také jedním ze základních meziproduktů jaderné fúze, která je pokládána za energetický zdroj všech hvězd v pozorovatelné části vesmíru.[25]

Tab. 1 Chemické a fyzikální vlastnosti vodíku

Latinský název	Hydrogenium
Chemická značka	H
Atomové číslo	1
Relativní atomová hmotnost	$A_r = 1,0079$
Molekulová hmotnost	$M = 2,01588\text{g/mol}$
Hustota plynu ($T = 0^\circ\text{C}$, $p = 101,325\text{kPa}$)	$\rho = 0,08987\text{ kg/m}^3$
Teplota tání ($p = 101,325\text{kPa}$)	$T_t = -259,2^\circ\text{C}$
Teplota varu ($p = 101,325\text{kPa}$)	$T_v = -252,8^\circ\text{C}$
Kritická teplota	$T_k = -239,9^\circ\text{C}$
Kritický tlak	$p_k = 1,29\text{ MPa}$
Teplota vznícení	$T_z \approx 560^\circ\text{C}$
Dolní mez výbušnosti se vzduchem	4 obj. %
Horní mez výbušnosti se vzduchem	77 obj. %
Výhřevnost	$10\,789\text{ kJ/m}^3$
Rozpuštěnost ve vodě (při 0°C , $p = 101,325\text{MPa}$)	1,9mg/l
Barva	bezbarvý
Zápach	bez chuti a bez zápachu
Označení nebezpečnosti	IF
Teplotní třída	T 1
Skupina výbušnosti	II C

1.2 Výskyt vodíku

Vodík je základním stavebním prvkem celého vesmíru. Vyskytuje se jak ve všech svítících hvězdách, tak v mezigalaktickém prostoru. Na Zemi se elementární vodík vyskytuje jen vzácně a to jen ve vyšších vrstvách zemské atmosféry. Patří mezi nejrozšířenější prvek vázaný zejména ve vodě a organických sloučeninách. Slučuje se téměř se všemi prvky s výjimkou vzácných plynů a některých přechodných kovů. Sloučeniny vodíku jsou organické (uhlovodíky a jejich deriváty, přírodní látky) a anorganické (hydridy, kyseliny, hydroxidy, soli). Ze sloučenin obsahujících vodík je nejvíce zastoupena voda H_2O , která pokrývá 2/3 zemského povrchu (moře a oceány). Společně s uhlíkem, kyslíkem a dusíkem patří mezi tzv. biogenní prvky, které tvoří základní stavební kameny všech organických molekul, a je proto jedním z biogenních prvků, přítomným ve všech tkáních živých organismů této planety. Díky tomu se vodík vyskytuje prakticky ve všech sloučeninách. Významné zastoupení elementárního vodíku je v zemním plynu. Molekulový vodík je mnohem méně reaktivní než samotný atom vodíku a reaguje s většinou prvků za následujících podmínek [25]:

- a) při vyšší teplotě
- b) při kontaktu s jiskrou, plamenem nebo ozářením
- c) v přítomnosti katalyzátorů

1.3 Výroba vodíku

Vzhledem k tomu, že se vodík na Zemi vyskytuje převážně v mnoha sloučeninách, je zapotřebí jej z těchto sloučenin separovat. Vodík je nosičem energie, který se dá na rozdíl od elektrické energie skladovat ve velkém množství.

Vodík lze vyrábět pomocí téměř všech ostatních energetických zdrojů. K získávání vodíku z jeho sloučenin lze použít teplo a katalýzu pro reformování uhlovodíků a jejich směsí, elektřinu pro rozklad vody nebo další procesy založené na slunci, větru, plasmových rozkladech či působení mikroorganismů. Energetický potenciál 1kg vodíku je stejný jako téměř 4 l benzínu. Nevýhodou je současná cena, která je podle použitého zdroje a způsobu výroby 2 – 6krát vyšší než cena benzínu.

Výroba vodíku z primárních energetických zdrojů je doprovázena produkcí většího nebo menšího množství oxidu uhličitého, který je zatím převážně vypouštěn do

atmosféry, což není žádoucí. Proto jsou hledány způsoby bezpečného ukládání těchto oxidů (tzv. sequestrace), nebo nové technologické procesy bez tvorby oxidů. Mezi další již zmíněné možnosti, patří využívání OZE pro výrobu vodíku elektrolýzou vody. Z primárních zdrojů mají nejvýhodnější poměr vodíku ku uhlíku zemní plyn a metan. Jejich reformování je proto jednodušší a účinnější.

Roční světová výroba vodíku je přibližně 50 milionů tun. Z toho 48 % ze zemního plynu, 30 % z ropy, 18 % z uhlí a 4 % z vody. Výroba vodíku se ročně zvyšuje o 6 % a zdvojnásobuje se každých 11 let. Zatím se převážně soustřeďuje do průmyslových oblastí ve vysokokapacitních závodech, z nichž je vodík distribuován na místo využití. [23]

1.4 Výroba kapalného vodíku

Výroba a zkapalnění vodíku jsou dva separátní energeticky náročné procesy. Výroba kapalného vodíku je proces podstatně nákladnější než např. výroba zkapalněného dusíku. Pro zkapalňování vodíku se využívá Claudeova procesu, který probíhá ve čtyřech fázích: [20]

- a) stlačení vodíku a odvedení kompresního tepla
- b) předchlazení kapalným dusíkem
- c) expanze v expanzní turbíně a s tím spojené ochlazení
- d) expanze na Joule-Thomsonově ventilu - ochlazení na teplotu $-252,7^{\circ}\text{C}$

1.5 Účinnost výroby vodíku

Ze současných způsobů výroby vodíku je zatím nejlevnější reformování zemního plynu vodní parou. Jeho účinnost se pohybuje mezi 70 a 90 % a na produkci 1 kWh ve vyrobeném vodíku se spotřebuje cca 1,7 kWh primární energie (do této primární energie se počítá i konstrukce výrobního závodu a doprava vodíku k zákazníkovi). Využití OZE pro výrobu vodíku by snížilo potřebné množství vynaložené primární energie, ale zatím je tento způsob výroby nákladnější.

Jednoznačnou výjimku zatím tvoří způsoby využívání biomasy. Při účinnosti až 65 % je zapotřebí cca 0,2 kWh primární energie na 1 kWh energie dodané vodíkem.

Výhodou jsou nižší výrobní náklady. Podobným způsobem by mělo být dosaženo produkce vodíku z různých odpadů např. komunálních při aplikaci biotechnologií.

Elektrolýza vody, jejíž účinnost se většinou pohybuje mezi 70 – 75 %, nemůže zatím cenově konkurovat, a proto jen 4 % dosud produkováného vodíku jsou vyráběna tímto způsobem. Na druhou stranu se jedná o výrobu ekologickou, produkující velmi čistý vodík. Může být zajímavá tam, kde jsou již k dispozici levné zdroje OZE, jako např. na Islandu. Potom na 1 kWh se spotřebuje jen 0,1 – 0,3 kWh energií primárních. Vyprodukovaný kyslík lze přitom použít pro zplynování suché biomasy nebo uhlí, a tím přispět k výrobě dalšího, levnějšího vodíku. Elektrolýza by pravděpodobně mohla být konkurenčně schopná i v případech rozdrobení do mnoha menších stanic v místech spotřeby, místo ve velkých centrálních závodech. Úspory na přepravních nákladech by mohly být někdy značné. [23]

1.6 Přeprava a skladování vodíku

1.6.1 Přeprava vodíku

Velkovýrobní vodíku většinou nejsou v místě spotřebitele a je třeba zajistit dopravu. Vodík lze přepravovat ve formě stlačeného plynu, zkapalněný nebo ve vazbě na různé chemické sloučeniny. Kapalný vodík lze přepravovat v kryogenních nádobách, nebo v říčních tankových lodích. Přeprava v kryogenních nádobách může kombinovat železniční a silniční dopravu s ohledem na velikost rozměrů. Kryogenní nádoby umožňují i skladování pro vyrovnaní výkyvů mezi výrobou, dopravou a spotřebou. Nevýhodou je výbušnost směsi vodíku se vzduchem, což je velké riziko při netěsnostech systému a při dopravních nehodách.

Vedle dálkového transportu kapalného vodíku, který je velice nákladný a zvyšuje tak konečnou cenu vodíku, lze dopravovat plynný vodík potrubním rozvodem jako zemní plyn. Úpravou těchto rozvodů se dá zajistit přívod vodíku jak pro velké, tak pro malé odběratele. [23]

1.6.2 Skladování vodíku

Vodík lze skladovat ve stavu plynném (tlakové zásobníky) a ve stavu kapalném (kryogenní nádoby). Skladování plynů stanovuje norma ČSN 07 8304. Nejrozšířenější způsoby skladování jsou:

1.6.2.1 Zásobníky na stlačený vodík

V současné době již některé firmy (americké Quantum Technologies, Advanced Technical Products Inc. a kanadská Dynetek Industries Ltd.) vyrábějí lehké a bezpečné zásobníky vodíku v kombinaci plastů, uhlíkatých vláken a kovových folií o tlaku 35 až 70 MPa. Tyto zásobníky budou sloužit převážně jako nádrže pro automobily. Na jednu náplň paliva budou automobily schopné ujet víc než 500 km. Výhodou je hmotnost zásobníků, které jsou lehčí než naplněné nádrže benzinem. Poměr váhy a objemu je u těchto zásobníků cca 0,3. [23]

1.6.2.2 Zásobníky na kapalný vodík

Vývoj v této oblasti je zaměřen jak na nalezení vhodného, bezpečného a lehkého konstrukčního materiálu pro výrobu velkých přepravních zásobníků, tak i na zdokonalení metody zkapalňování. [23]

1.6.2.3 Zásobníky s kovovými hydridy

Tento druh zásobníků je dnes již nepostradatelný především pro přenosné palivové články. Tyto kovové zásobníky různých velikostí obsahují specifické kombinace slitin, které jsou schopné absorbovat vodík a uvolňovat ho buď při pokojové teplotě, nebo při ohřevu. Zásobníky se mohou opakovaně plnit a vyprazdňovat z tlakových lahví. Umožňují bezpečné skladování vodíku při konstantním tlaku do 1 MPa.

Životnost zásobníků závisí na čistotě používaného plynu. Zásobníky absorbují kovové slitiny i nečistoty z vodíku, což snižuje životnost. Zásobníky jsou schopné pojmout 1 – 2 % vodíku na svou váhu. Některé jsou schopné absorbovat 5 – 7 % vodíku, ale k jeho uvolnění by bylo zapotřebí zásobník ohřát na teplotu nejméně 2 500 °C. Existují i nevratné hydridové zásobníky. Z nich lze vodík uvolnit obvykle reakcí s vodou, ale dál již se nedají používat. [23]

1.6.2.4 Chemické skladování

Vodík se může skladovat a přepravovat ve formě různých běžných sloučenin, nejlépe v kapalně formě a na místě spotřeby získávat reformovacím procesem. Jako příklad lze uvést metanol, případně jiný alkohol a čpavek. Kromě těchto v praxi používaných způsobů jsou další vývojové práce zaměřeny na nové metody, jejichž realizace se zatím nedá odhadnout. Jedná se např. o uskladňování vodíku na uhlíkatých nanovlákních, které by měly být schopné podle některých výzkumníků nasorbovat až

několik desítek procent své vlastní váhy. Zatím bylo v laboratorních podmínkách dosaženo zachycení 7 % vodíku. Další možností jsou skleněné mikrokuličky, které se v zahřátém stavu ponoří do stlačeného vodíku a díky zvýšené permeabilitě stěn pohlcují vodík, který po ochlazení uzavřou uvnitř. K jeho uvolnění dochází opět zahřátím. K poměrně jednoduchému a levnému uskladnění velkého množství vodíku je možné využít přírodních útvarů např. kavern, které zůstávají v podzemí po vyluhování kuchyňské soli.

Dále je možné využít potrubních rozvodů zemního plynu, které mají velkou kapacitu a dají se poměrně snadno a s malými úpravami přeměnit na potrubí pro vodík. [23]

1.7 Současné využívání vodíku a jeho budoucnost

V současné době je vodík využíván v metalurgickém průmyslu, kde se využívá ochranné atmosféry vodíku při tepelném zpracování, výrobě barevných kovů, skla, pájení nebo spékání. Vodík jako součást ochranných atmosfér, udržuje redukční prostředí, které zabraňuje oxidaci materiálu, zajišťuje čistotu a vyšší kvalitu. Použití vodíku je někdy omezené vzhledem k jeho vysoké ceně a především riziku možného výbuchu při kontaminaci prostředí kyslíkem nebo vzduchem za vysoké teploty. Výhodná je jeho dobrá tepelná vodivost ve srovnání s ostatními plyny, čehož se využívá především pro chlazení alternátorů turbín.

V elektrochemickém průmyslu se využívá řada aplikací s vodíkem, jako např. ochranná atmosféra při redukci oxidu křemičitého při výrobě silikonových destiček pro integrované obvody, nebo jako reagující složka a nosný plyn při výrobě bipolárních integrovaných obvodů.

Vodík využívá také potravinářský průmysl pro ztužování rostlinných olejů, chemický průmysl při syntéze čpavku, aminů a chlorovodíku. Velký význam má použití vodíku v kosmickém průmyslu, kde se využívá kapalného vodíku jako paliva k pohonu raket a raketoplánů. Na palubách kosmických lodí se využívá k výrobě elektrické energie a vody za pomoci palivových článků.

Přestože vodík nachází v současnosti řadu uplatnění, je jeho blízká budoucnost ještě příznivější. Vodík jako obnovitelná surovina je považován za jeden z nejdůležitějších zdrojů energie, kterému by mohli po určitou dobu konkurovat

metanol, plynná paliva (především zemní plyn a bioplyny), nebo biopaliva z obnovitelných zdrojů.

Předpokládá se, že vodík za pár let definitivně nahradí dosud běžně používaná paliva jako je ropa, zemní plyn či uhlí. Výrobci leteckého a automobilového průmyslu se jednoznačně shodli na nesporných výhodách, které představuje spalování vodíku a v budoucnu svůj vývoj zaměří tímto směrem. Při spalování vodíku vzniká vedle značného energetického zisku pouze ekologicky naprosto nezávadná voda. Automobilové motory na bázi spalování plynného vodíku jsou v současné době předmětem intenzivního výzkumu předních světových výrobců motorů.

Ke spalování vodíku v automobilech slouží palivový článek (viz Obr.1). Palivový článek můžeme definovat jako elektrochemické zařízení, uskutečňující přímou přeměnu chemické energie vodíku a kyslíku na energii elektrickou, vodu a teplo. Tato přeměna se děje katalytickými reakcemi na elektrodách a je v podstatě založena na obráceném principu elektrolýzy vody.



Obr. 1 Schéma palivového článku

Svou činností se palivový článek podobá klasickým akumulátorům, ve kterých rovněž probíhá přímá přeměna chemické energie na energii elektrickou. Na rozdíl od nich však používá z vnějšku dodávané palivo, což mu umožňuje libovolně dlouhý provoz. Palivem do palivových článků může být čistý vodík nebo tzv. nepřímá paliva obsahující uhlovodíky a alkoholy. Z nich je vodík uvolňován tzv. reformovacím procesem. Mezi nejvýznamnější nepřímé zdroje vodíku patří již zmíněný zemní plyn, metan, propan, metanol, etanol nebo čpavek. Nevýhodou současných palivových článků je jejich vysoká cena a fakt, že proces je doposud značně citlivý vůči katalytickým jedům a vyžaduje proto použití velmi čistých chemikálií.

Palivových článků se začíná využívat v dopravě, ale vzhledem k vysoké výrobní ceně dopravních prostředků a vodíku je realizováno jen několik prototypů. I přesto se pomalu začínají objevovat první čerpací stanice na vodík(viz Obr. 2,3,4), které si budou

moci vyrábět vodík samy přímo v místě stanice, jako např. v Hamburku, nebo budou vodík do čerpacích stanic dovážet. V místě výroby bude přečerpáván kapalný vodík do kryogenních nádob a rozvážen k zákazníkovi. Toto řešení však vyžaduje dokonalou izolaci nádoby a vysokou bezpečnost. [23]



Obr. 2 Čerpací stanice H_2 v Hamburku



Obr. 3 Čerpací stanice H_2 v Tokiu

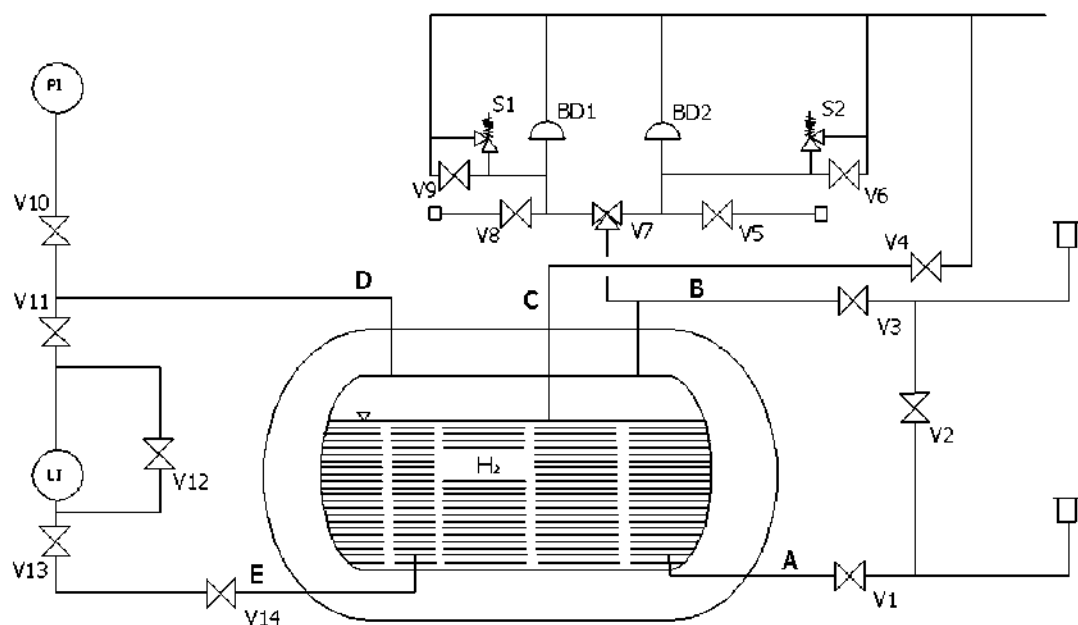


Obr. 4 Čerpací stanice H_2 na Islandu

2 NÁVRH KRYOGENNÍ NÁDOBY

2.1 Popis kryogenní nádoby

Kryogenní nádoba sloužící pro skladování kapalného vodíku byla zvolena horizontálního provedení s vícevrstvou izolací. Kryogenní nádoba se skládá z vnitřní a vnější nádoby. Vnitřní nádoba je uchycena v radiálním směru na táhlech a ve směru axiálním na jedné soustředně uložené trubkové podpoře. Bezpečnost vnitřní nádoby zajišťují dva pojišťovací ventily a dvě průtržné membrány. Tlak vnitřní nádoby je kontrolován manometrem. Vnější nádoba je uložena na sedlových podporách. Bezpečnost vnější nádoby zajišťují dvě vakuové pojišťovací klapky na vnějším plášti. Hladina ve vnitřní nádobě je sledována diferenčním manometrem a pro kontrolu max. plnění lze použít ventil max. plnění (trycock). Do spodní části je zaveden vstup a výstup kapaliny. Do horní části je zaveden vstup a výstup plynu. Tato potrubí jsou mezi sebou propojena přes uzavírací ventil, což umožňuje plnění kapaliny i přes horní část. Z tohoto důvodu jsou oba vstupy od vnější nádoby odizolovány tepelnými mosty. Schéma zapojení (viz Obr. 5).



V-ventil, S-pojišťovací ventil, BD-průtržná membrána, PI-měření tlaku, LI-měření hladiny

Obr. 5 Schéma zapojení kryogenní nádoby

Popis zapojení kryogenní nádoby:

Větev A – vstup a výstup kapaliny. Potrubí je vakuově izolované a od vnější nádoby odděleno tepelným mostem.

Větev B – vstup a výstup plynného vodíku. Potrubí je rovněž vakuově izolované od vnější nádoby odděleno tepelným mostem. Na toto potrubí navazuje potrubí pojišťovacích armatur, které není izolováno.

Větev C – kontrola max. plnění (tryckok).

Větev D – výstup plynu pro měření hladiny. Na potrubí navazuje měření tlaku.

Větev E – výstup kapaliny pro měření hladiny.

2.2 Volba materiálu kryogenní nádoby

Materiál pro kryogenní nádoby by měl splňovat tyto podmínky:

- zaručená svařitelnost
- odolnost nízkým teplotám
- nesmí vykazovat povrchové vady (bublínky, vruby, trhliny)
- nesmí obsahovat prvky reagující se skladovaným plynem

Vhodným materiálem pro vodíkové zásobníky jsou austenitické oceli, které mají dobrou svařitelnost díky nízkému obsahu uhlíku a vysokou vrubovou houževnatost. Důležité je složení a množství legujících prvků. Sleduje se také změna struktury materiálu ve svaru, kde vlivem svařování dochází ke změně koncentrace některých prvků. Ve svarech se sleduje obsah delta feritu, kterého by mělo být pod 7%.

Materiál vnitřní nádoby: vnitřní nádoba není zatížena vnější silou, ale musí odolávat nízkým teplotám. Byla zvolena vysokolegovaná ocel X6CrNiMoTi 17-12-2 EN 10028-7 (1.4571) se zaručenou svařitelností.

Materiál vnější nádoby: vnější nádoba plní funkci nosné konstrukce a je zatížena vnější silou. Není vystavena tak nízkým teplotám jako vnitřní nádoba, a proto byla zvolena ocel P275NL2, EN 10028-3 (1.1104).

Táhla: táhla zajišťují správnou polohu vnitřní nádoby a jsou namáhána na tah. Byla zvolena X5CrNi26-15 EN 10269 (1.4980), která má vysokou pevnost.

Axiální podpora: axiální podpora zajišťuje vnitřní nádobu proti pohybu v podélném směru a je namáhána na tah i tlak. Byla zvolena ocel X6CrNiMoTi 17-12-2 EN 10028-7 (1.4571).

2.3 Bezpečnost při práci s vodíkem

Vodík je bezbarvý plyn bez chuti a bez zápachu. Je nejlehčím prvkem a při atmosférických podmínkách je 14x lehčí než vzduch. Při úniku se velice rychle rozšíří do okolí, takže nevzniká nebezpečí jeho hromadění. Při zapálení hoří velmi rychle bezbarvým plamenem a nevznikají žádné saze ani kouř. Vodík tvoří se vzduchem výbušnou směs v širokém pásmu objemových koncentrací od 4 do 75 %. Na vzduchu je lehce zápalný [20]

Při skladování vodíku v kryogenních zařízeních je třeba udržovat kyslíkovou čistotu. V okolí neizolovaných částí potrubí může dojít při ochlazení na nízkou teplotu ke kondenzaci vzduchu a kapalina s vysokým obsahem kyslíku může způsobit zahoření znečištěného povrchu.

Před plněním vnitřní nádoby vodíkem se musí nádoba velmi dobře vyčistit inertním plynem (většinou dusíkem) tak, aby byl odstraněn veškerý kyslík z nádoby. Vnitřní nádoby jsou vybaveny kontrolním ventilem, který zabezpečuje správné naplnění nádoby. To je nutné zejména tehdy, předpokládá-li se naplnění kapalným plynem při atmosférickém tlaku a jeho další využití při tlacích podstatně vyšších. Dále musí být vnitřní nádoby opatřeny dvěma pojišťovacími ventily s vhodně dimenzovaným potrubím. Kryogenní nádoby se kontrolují na bezpečnost při požáru a ztrátě vakua.

2.4 Přeprava kryogenní nádoby

Cena přepravy kryogenní nádoby do místa provozu je jeden z hlavních nákladů, který se výrazně projeví na konečné ceně nádoby. Cena přepravy je závislá na rozměrech nádoby, kde nádoby o rozměrech do 2,5m na šířku lze přepravovat jako běžný náklad. Nádoby přesahující 2,5m na šířku jsou přepravovány jako nadměrný náklad bez policejního doprovodu. Vozidlo stačí pouze viditelně označit „NADMĚRNÝ NÁKLAD“. Nádoby větších rozměrů od 3m na šířku vyžadují policejní doprovod, a potom náklady na přepravu výrazně rostou. Při přepravě nadměrného nákladu se musí zjišťovat nosnost mostních konstrukcí, průjezdný profil tunelů, šířka silnic, výška kabelů elektrického vedení, atd. Problematická místa se řeší úpravou terénu (vypodložením, podpěrou, výztuhou apod.).

Návrhové rozměry kryogenní nádoby jsou průměr 5,3m a délka 27,6m. K těmto rozměrům je třeba připočítat výšku nápravy cca 0,5m. Konečné rozměry přepravované nádoby jsou výška 5,8m , šířka 5,3m a délka 27,6m. Nádoby těchto rozměrů jsou přepravovány pouze s policejním doprovodem a předem nahlášenou trasou.

Dopravu nadměrných nákladů od výrobce k zákazníkovi dnes zajišťují specializované spediční firmy. Tyto firmy zmapují terén a zvolí nejvhodnější trasu k zákazníkovi. Navrhnou také případně nutné úpravy terénu a zajistí policejní doprovod. Přepravu kryogenní nádoby schvaluje místní zastupitel ministerstva dopravy.

2.5 Návrhové rozměry kryogenní nádoby

Kryogenní nádoba je navrhována pro 400m^3 kapalného vodíku při plnění 95. % objemu vnitřní nádoby. Toto plnění se doporučuje z důvodů bezpečnosti.

Návrhové rozměry vnitřní nádoby

Objem vnitřní nádoby:

$$V_{in} := \frac{400}{0.95} \text{m}^3 \quad V_{in} = 421.053 \text{m}^3 \quad (1)$$

Vnější průměr vnitřní nádoby:

$$D_{in2} := 4.700 \text{m}$$

Tloušťka vnitřní nádoby:

$$s_{in} := 7.5 \text{mm}$$

Vnitřní průměr vnitřní nádoby:

$$D_{in1} := D_{in2} - 2 \cdot s_{in} \quad D_{in1} = 4.685 \text{m} \quad (2)$$

Objem dna vnitřní nádoby:

$$V_{inD} := 0.1298 \cdot (D_{in2} - 2 \cdot s_{in})^3 \quad V_{inD} = 13.348 \text{m}^3 \quad (3)$$

Délka válcové skořepiny vnitřní nádoby:

$$L_{in} := \frac{4 \cdot (V_{in} - 2 \cdot V_{inD})}{\pi \cdot D_{in1}^2} \quad L_{in} = 22.876 \text{m} \quad (4)$$

Tloušťka klenutého dna:

$$s_{inD} := 13.5 \text{mm}$$

Délka válcové části dna vnitřní nádoby:

$$L_{Dv} := 3 \cdot s_{inD} \quad L_{Dv} = 40.5 \text{mm} \quad \text{volím} \quad L_{Dv} := 40 \text{mm} \quad (5)$$

Hloubka vnitřního klenutí dna:

$$h_D := 0.255 \cdot D_{in2} - 0.635 \cdot s_{inD} \quad h_D = 1.19 \text{m} \quad (6)$$

Hloubka dna vnitřní nádoby:

$$H_D := L_{Dv} + h_D + s_{inD} \quad H_D = 1.243 \text{m} \quad (7)$$

Vnější průměr klenutého dna vnitřní nádoby:

$$D_{Din} := 4712 \text{mm}$$

Celková délka vnitřní nádoby:

$$L_{inc} := L_{in} + 2 \cdot H_D \quad L_{inc} = 25.363 \text{m} \quad (8)$$

Povrch vnitřní nádoby:

$$A_{in} := 2 \cdot 1.08 \cdot D_{in2}^2 + 3.14 \cdot D_{in2} \cdot L_{in} \quad A_{in} = 385.319 \text{m}^2 \quad (9)$$

Návrhové rozměry vnější nádoby:

Vnější průměr vnější nádoby: $D_o := 5000\text{mm}$

Délka válcové skořepiny vnější nádoby: $L_{os} := 25.5\text{m}$

Tloušťka vnější nádoby: $s_o := 13\text{mm}$

Délka válcové části dna vnější nádoby:

$$L_{D1} := 3.5 \cdot s_o \quad L_{D1} = 45.5\text{ mm} \quad \text{volím} \quad L_{D1} := 50\text{mm} \quad (10)$$

Hloubka vnitřního klenutí dna:

$$L_{D2} := 0.1935 \cdot D_o - 0.455 \cdot s_o \quad L_{D2} = 961.585\text{ mm} \quad (11)$$

Hloubka dna vnější nádoby:

$$L_{1D} := L_{D2} + L_{D1} + s_o \quad L_{1D} = 1.025\text{ m} \quad (12)$$

Celková délka vnější nádoby:

$$L_o := 2 \cdot L_{1D} + L_{os} \quad L_o = 27.549\text{ m} \quad (13)$$

Povrch vnější nádoby:

$$A_o := 2 \cdot 0.99 \cdot D_o^2 + 3.14 \cdot D_o \cdot (L_{os} + 2 \cdot L_{D1}) \quad A_o = 451.42\text{ m}^2 \quad (14)$$

2.6 Pevnostní výpočet kryogenní nádoby

Pevnostní výpočet vnitřní a vnější nádoby byl počítán podle EN 13458-2, ČSN 690010. Pevnostní výpočet táhel a axiální podpory je počítán podle běžných vzorců z pružnosti a pevnosti. Pevnostní výpočty jsou v Příloze č.1 a zahrnují:

- kontrolu vnější nádoby na vnější přetlak 0,1MPa
- výpočet posouvající síly a ohybového momentu vnější nádoby
- učení návrhového a zkušebního přetlaku vnitřní nádoby
- kontrolu vnitřní nádoby na vnitřní přetlak 0,43MPa
- kontrolu vnitřní nádoby na vnější přetlak 0,01MPa
- výpočet posouvající síly a ohybového momentu vnitřní nádoby
- pevnostní výpočet táhel
- pevnostní výpočet axiální podpory

2.7 Tepelný výpočet kryogenní nádoby

Velmi důležitým parametrem je hodnota odparu pracovní kapaliny z nádoby. Pro získání hodnoty odparu je nutné provést tepelný výpočet přívodů tepla. Orientační hodnotu odparu v kg/h získáme, pokud množství přivedeného tepla podělíme výparným teplem pracovní kapaliny. Hodnota odparu závisí na:

- zvoleném typu superizolace a kvalitě jejího navinutí
- hodnotě dosaženého vakua
- použitých materiálech a geometrii uchycení vnitřní nádoby
- počtu, velikosti a délce propojovacího potrubí

Tepelné výpočty obsahují:

- a) změna rozměrů vlivem prochlazení
- b) přívod tepla táhly
- c) přívod tepla axiální podporou
- d) přívod tepla trubicou plnění a odfuku
- e) přívod tepla trubicami pro měření
- f) přívod tepla izolací
- g) celkový odpar vodíku

a) Změna rozměrů vlivem poklesu teploty

Zkrácení vnitřní nádoby vlivem prochlazení od kapalného H_2

Teplotní spád	$\Delta T := 280K$	
Součinitel tepelné roztažnosti pro $T=20K$	$\alpha_{20} := 12 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$	
Délka válcové skořepiny vnitřní nádoby	$L_s := 22.876m$	
Celkové zkrácení vnitřní nádoby	$\Delta L_s := -\alpha_{20} \cdot \Delta T \cdot L_s$	(15)
	$\Delta L_s = -76.8634mm$	

**VLOŽIT MATHCAD A ROZDĚLIT
DOKUMENT NA DVĚ ČÁSTI A
OSTRÁNKOVAT**

3 TEPELNÉ IZOLACE

Tepelnými izolacemi se rozumějí prostředky, omezující přenos tepla z teplejšího na chladnější těleso. Hlavní problém tepelné izolace v kryotechnice je omezení tepelného toku mezi stěnou o pokojové teplotě a stěnou o teplotě kryokapaliny. Kryokapaliny mají bod varu hluboko pod pokojovou teplotou a jejich výparné teplo je tím menší, čím nižší je jejich bod varu. Z toho je zřejmé, že i malý tepelný tok může způsobit odpaření značného množství kryokapaliny, a proto je nutná kvalitní izolace.

Hlavní problémy tepelné izolace pro kryotechniku byly prakticky vyřešeny před 80. lety, kdy J. Dewar použil pro přechovávání kapalného vzduchu dvojstěnnou evakuovanou skleněnou nádobu s postříbřenými stěnami, a užitím aktivního uhlí jako sorbentu. Touto izolací docílil uchování kapalného vzduchu na delší dobu. Nádoby pro přechovávání kryokapalin byly pojmenovány podle autora: Dewarovy nádoby.

V kryogenice mají velký význam vícevrstvé izolace (Multi Layer Insulation). Tyto izolace se používají v kosmickém průmyslu, kde perforací MLI docílíme lepšího chování izolace při výrazných změnách tlaku (let kosmické lodi z atmosférického tlaku do vakua v kosmickém prostoru a její návrat). Pro fyzikální výzkum se využívá v urychlovačích částic a nově se předpokládá i využití pro izolaci nádob ke skladování a převážení kapalných plynů s teplotou mezi 77-4K. [1]

3.1 Základní typy používaných tepelných izolací v kryogenní technice

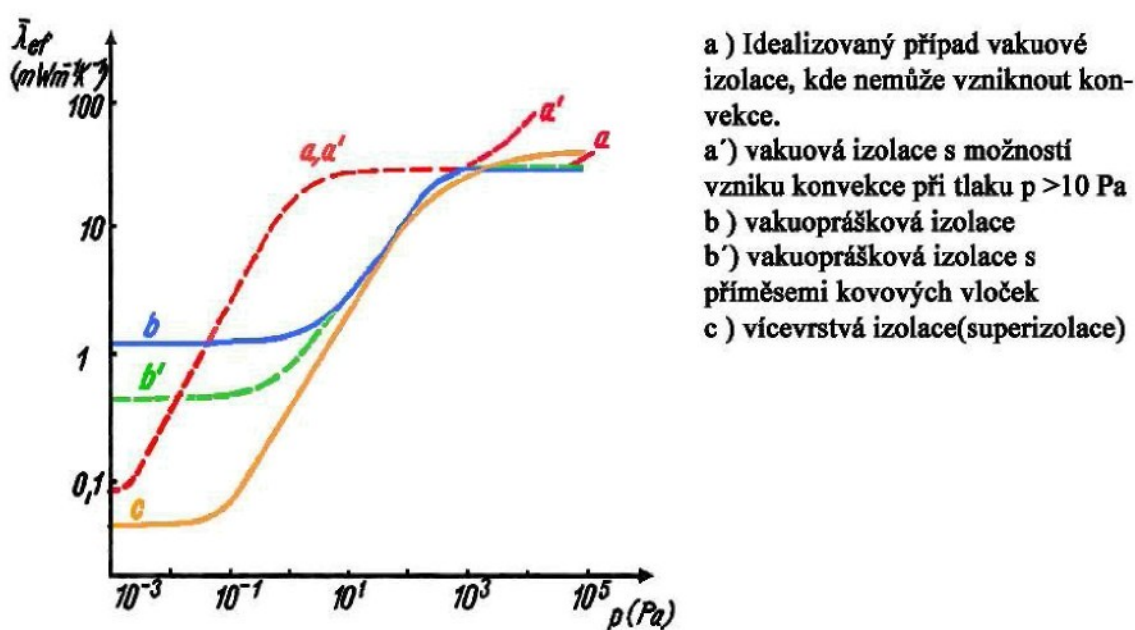
Základní typy používaných tepelných izolací jsou:

- a) Vysokovakuová izolace
- b) Prášková a vakuoprášková izolace
- c) Pěnové izolační materiály
- d) Vícevrstvá izolace - superizolace
- e) Další možnost izolování kryogenních nádob

Přehled tepelné vodivosti jednotlivých typů izolací používaných v kryogenní technice je zobrazen na Obr. 6.

3.1.1 Vysokovakuová izolace

Jejím typickým představitelem jsou stále užívané Dewarovy nádoby. Tyto nádoby slouží pro přechovávání kryokapalin s objemem do 500. litrů. Vnitřní nádoba je zavěšena pouze na úzkém hrdle, aby se docílilo minimálních tepelných ztrát. Nádrže pro větší objemy se označují jako kontejnery a mají vnitřní nádobu zavěšenou ve vnější nádobě na lanech, táhlech nebo uloženou na tepelně nevodivých podpěrách. Prostor mezi vnitřní a vnější nádobou je odsáván na tlak nižší než 10^{-3} Pa. Tím se zaručí minimální přívod tepla vedením ve zbytkovém plynu (méně než 5% radiačních ztrát).[1]



Obr. 6 Závislost efektivní tepelné vodivosti na tlaku zbytkového plynu

3.1.2 Prášková a vakuoprášková izolace

Izolační prostor je vyplněn tepelně nevodivým materiálem, čímž se zamezí vzniku konvekčních proudů plynu, které v tomto prostoru mohou být, a sníží se přenos tepla mezi stěnami. Tepelná vodivost prášku nebo vloček je velmi malá, pokud není prášek mechanicky upěchován (stlačením se tepelná vodivost zvyšuje až na dvojnásobek) a klesá při snižování tlaku. Jednotlivá zrna prášku z tepelně nevodivého materiálu jsou spolu prakticky v bodovém dotyku a dráha, kterou je teplo hranicemi zrn přes mnoho tepelných odporů vedeno, je velmi dlouhá. Prášek dělí celý izolační vakuový prostor na mikrooblasti mezi jednotlivými zrny. Tyto vzdálenosti jsou srovnatelné se střední

volnou dráhou molekul plynu i pro vyšší tlaky. Vakuový prostor není tedy třeba pro snížení přenosu tepla zbytkovým plynem odčerpávat na tak nízký tlak jako u čistě vakuové izolace. Postačí tlak přibližně 10^{-1} Pa.

Výhodou prášku je jeho částečná adsorpce zbytkového plynu ve vakuovém prostoru podobně jako aktivní uhlí. Pokud prostor odčerpáme za pokojové teploty na tlak řádově 10 Pa, dojde po prochlazení vnitřního pláště kryokapalinou v důsledku adsorpce zbylého plynu na prochlazeném prášku ke snížení tlaku na 10^{-2} Pa. Další vlastností prášku je, že pokud se součinitel záření prášku blíží $\varepsilon \rightarrow 1$, působí velké množství zrn jako radiční štít v cestě toku sálavé energie a dochází tak ke snížení přívodu tepla radiací. Nejvhodnější anorganické materiály mají tu vlastnost, že jsou částečně transparentní pro infrazáření nebo alespoň pro část jeho spektra. Aby se zabránilo průchodu radiace v celé spektru, míchá se někdy více druhů nekovových izolačních prášků s rozdílnou (selektivní) průzračností pro různé vlnové délky.

Ještě výhodnější je míchání izolačních materiálů (např. perlitu, silikagelu, aerogelu) s velmi jemným kovovým práškem (Al, Cu), kovovými vločkami nebo malými útržky fólií s dobrými odrazovými vlastnostmi. Množství kovové přísady musí být voleno tak, aby způsobilo zřetelné snížení radičních ztrát, ale nezvýšilo výrazně tepelnou vodivost vrstvy izolace stykem kovových zrn. V optimálních případech klesne tepelný tok až o jeden řád.

Izolační prášky někdy obsahují značné množství adsorbované vlhkosti, která se projeví na délce doby odčerpání. Proto je dobré prášek předem vysušit a při čerpání izolační nádobu intenzivně zahřívát.

Firma Ferox používá pro izolaci Dewarových nádob na LN_2 aktivní kysličník křemičitý-Siloxid, jehož měrná tepelná vodivost je $\lambda = 9 \cdot 10^{-4} \text{ W/mK}$. Jako kovové odrazové přísady se užívají Al vločky Albo F velikosti 40 μm . Smísením 3 až 5 hmotnostních % Al vloček do Siloxidu klesne hodnota λ na $4 \cdot 10^{-4} \text{ W/mK}$. [1]

3.1.3 Izolace pěnovými materiály

Základní izolační materiál je tvořen uzavřenými nebo otevřenými slabostěnnými komůrkami, které vznikají expandováním organických i anorganických látek působením tzv. nadouvadla (freon, kysličník uhličitý, benzen). Pěnové materiály mohou být vyrobeny např. z polystyrenu, polyuretanu, epoxidů, gumy, skla a křemene a mohou být neelastické nebo tuhé. Jejich hustota je až o řád menší než u materiálů práškových, takže vedení tepla pevnou látkou, tj. stěnami komůrek, je velmi malé a na přenosu tepla

se podílí hlavně plyn obsažený v komůrkách a nevelká radiační složka. Tepelná vodivost závisí na velikosti pórů (poměr střední volné dráhy a středního rozměru komůrky). Pro materiál s komůrkami o průměru 0,5 mm je λ asi 2x vyšší než pro průměr komůrek 0,1 mm. I když je pěnový materiál nepropustný pro vodu, komůrky nejsou dokonale neprůdušné a plyn v nich obsažený může difundovat. Proto se může po vložení do uzavřeného izolačního prostoru a jeho evakuaci tepelná vodivost snížit až na polovinu. Tam, kde nejsou pěnové materiály umístěny v evakuovaném prostoru, mohou být alespoň uzavřeny - zalepeny do hliníkového nebo nylonového obalu. Tato izolace se pro nízkou hmotnost užívá v raketové technice.

Poněvadž pěnové materiály mají vysoký součinitel teplotní objemové roztažnosti, je vhodné zabudovat je tak, aby byla možná nezávislá dilatace tohoto izolačního materiálu a kovových stěn nádoby.

Základním materiálem jsou polystyrenové granule velikosti 0,5-0,3 mm. Ty je nutno nejprve částečně napěnit (např. ve vroucí vodě) po dobu 30-100s, tak aby z nich ještě nevyrchalo všechno nadouvadlo a zůstala jim schopnost dále zvětšovat svůj objem. Částečně napěněné kuličky se přes noc vysuší na rámech se dnem z nylonové síťové tkaniny. Poté se kuličkami zasype kovová forma tvaru předmětu, který chceme vytvořit, a forma se opět vloží do vařící vody na dobu asi 20 min, kdy se v kuličkách zvýšenou teplotou uvolní zbytek nadouvadla. Kuličky, které nabudou na objemu, vyvodí zvýšený tlak v lisovací formě a dojde k jejich slisování a dokonalému vyplnění formy. Kovová forma musí mít hladké stěny, aby vytvořená nádoba měla sklovitý povrch. Před zasypáváním kuliček se forma potírá silikonovým olejem, aby nedošlo k přilepování kuliček.

Lineární součinitel tepelné roztažnosti pěnových materiálů je 2-5x větší než pro Al a 10x větší než pro korozi-vzdornou ocel, proto je nutné v některých případech, zvláště u rozměrnějších dílů, pamatovat na dilatační spojky.

Max. přípustná teplota pro pěnový materiál je od 350K a výš. Měrná tepelná vodivost je řádově 10^{-2} W/mK.

Je-li izolant z pěnového materiálu umístěn v prostředí plynného H_2 nebo He, dojde k difúzi těchto plynů do komůrek a tepelná vodivost vzroste časem až na 3násobek.

Vzhledem k tomu, že pěnové izolanty jsou většinou organické materiály, je nutné brát v úvahu nebezpečí při reakci s kyslíkem, ke které může dojít, obsahuje-li ho kryokapalina více než 30%. [1]

3.1.4 Vícevrstvá izolace – superizolace

Tato izolace se skládá z reflexních a izolačních vrstev. Reflexní vrstvy jsou většinou hliníkové nebo hliníkem pokovené fólie, které jsou vzájemně odděleny vrstvou dobře tepelně izolujícího materiálu (skleněná vlákna, vláknitá fólie, nylonová tkanina) (viz Obr. 7). Optimální počet dvojvrstev (reflexní vrstva+izolant) je 20-30 na cm. Protože je vakuový prostor fóliemi rozdělen na velký počet malých oblastí, kde střední volná dráha molekul plynu je srovnatelná se vzdáleností sousedních ploch, izoluje uspokojivě tento systém i při vyšším tlaku než u čistě vakuové izolace. Tepelná vodivost dosahuje nejnižších hodnot $\lambda=2 \cdot 10^{-5} \text{ W/mK}$ při tlaku pod 10^{-2} Pa .

Mezi další materiály vícevrstvé izolace patří tzv. Mylar. Jde o polyesterový film jednostranně nebo oboustranně pokovený Al nebo Au. Mylarová fólie zahrnuje reflexní i izolační vrstvu. Umožňuje snadnější navinutí a má vynikající izolační vlastnosti.

Při navíjení mnohovrstvé izolace je důležitým faktorem mechanické stlačení vrstev. Tepelná vodivost i při relativně malém mechanickém stlačení může vzrůst až o dva řády. Při navíjení je třeba dát pozor na to, aby nevznikala nekrytá místa na hranách a rozích izolovaného zařízení. Izolační materiál musí být proto ukládán s přesahem přes kovové fólie.

Upevnění superizolace se vytváří navíjením ze dvou cívek (Al fólie a izolačního materiálu) nebo se předem složí několik desítek listů obou fólií a potom se pokládají na izolovanou nádobu. Zlepšení odčerpávání se dosáhne střídavou perforací fólie. Při odčerpávání je dobré celou soustavu mírně vyhřívat. Velká plocha kovových povrchů však působí potíže při odplyňování, zvláště pokud jde o uvolňování vodíku. Obvyklé adsorbenty jsou při pracovní teplotě kolem 100K pro vodík neúčinné, proto se do vakuového prostoru vkládá zatavená skleněná ampule s kysličníkem palladia, která se po evakuaci zařízení rozbije a kysličník se uvolňovaným vodíkem z povrchu fólií redukuje.

Tato izolace je vhodná pro skladování LHe a LH₂, kdy odpar je často menší než 1% z celkového objemu zásobníku za den.

Podobně jako vakuoprášková izolace potřebuje i vícevrstvá izolace delší dobu (až několik dnů) k vytvoření rovnovážného stavu. Během této doby jsou ztráty vyšší než nominální. [1]

Obr. 7 Materiál superizolace -Hliníková fólie 8 μ m a skelný papír 89 μ m

3.1.5 Další možnost izolování kryogenních nádob

Mezi další možný způsob izolace kryogenních nádob patří použití dutých tenkostěnných skleněných kuliček s průměrem 15-150 μ m, na nichž je napařena Al vrstvička. Tepelná vodivost této izolace je okolo $\lambda=3\cdot 10^{-4}$ W/mK, ale na rozdíl od vícevrstvé izolace je instalace mnohem jednodušší. Izolační prostor se vyplní tímto materiálem, který má izotropní tepelně izolační vlastnosti. Hustota je asi 70 kg/m³.

3.2 Model výpočtu izolace podle S.L.Bapat et al.

Při modelu výpočtu Multi Layer Insulation - MLI jsou uvažovány tyto faktory: tloušťka reflexní a izolační vrstvy, počet vrstev, hustota vrstev, kontaktní tlak, dosažené vakuum a intersticiální tlak (tlak uvnitř materiálu izolační vrstvy). Při sestavování modelu se uvažuje přenos tepla v mnoha podobách. Jde o vedení v tuhých tělesech, vedení v dotykových plochách, vedení v plynu, radiaci mezi dvěma reflexními vrstvami (stíněním) a radiaci skrze prostor izolační vrstvy. [2]

Přenos tepla MLI byl mnohokrát popsán analyticky, experimentálně nebo užitím empirické korelace, ale zatím nebyl nalezen žádný teoretický model plně popisující daný problém.

Hlavní důvody jsou:

- 1) složitá struktura materiálu
- 2) neizotropní vlastnosti izolace
- 3) nepředvídatelné chování parametrů jako je intersticiální tlak, kontaktní tlak atd.

Je třeba si uvědomit, že hodnoty pro čistě teoretický model zahrnující všechny aspekty jako je kontaktní odpor mezi reflexní vrstvou a prostorem izolační vrstvy, kontaktní tlak a intersticiální tlak, nelze zjistit z literatury a musejí být odhadnuty nebo naměřeny. Změna intersticiálního tlaku je funkcí geometrie materiálu, teploty plynu a hodnoty odplynění materiálu. Kontaktní tlak závisí na hustotě vrstev a mění se mezi jednotlivými vrstvami.

Upozorňuji, že se jedná o doslovný překlad, a proto byly ponechány symboly a zkratky tak jak uvádí autor viz Seznam symbolů a zkratk.

3.2.1 Přenos tepla vedením tuhou fází

Model přenosu tepla vedením v tuhé fázi je zobrazen na Obr. 8. Je zde výřez zobrazující jednu část izolační vrstvy a její přilehlý prostor o tloušťce t a okrajové teplotě T_1 a T_2 .

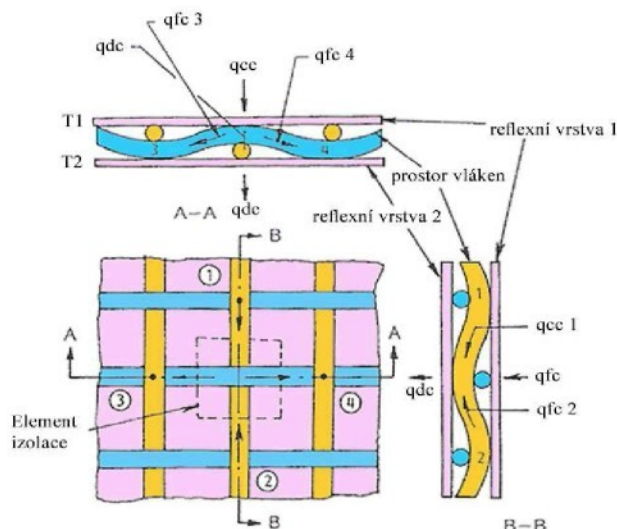
Pro zjednodušení uvažujeme:

- 1) tepelný odpor reflexní vrstvy je zanedbatelný, a tudíž jsou teploty uvažovány konstantní
- 2) tok skrze MLI je v jednom směru
- 3) izolace je homogenní
- 4) vzájemné ovlivňování mezi jednotlivými způsoby přenosu tepla je slabé a proto může být sčítáno
- 5) prostor mezi vrstvami MLI je stejný

Pokud uvažujeme reflexní vrstvy izotermní a vlákna v meziprostoru rovnoměrně rozložené, můžeme psát výraz pro tepelnou bilanci:

$$q_{fe1} + q_{fe2} + q_{ec} = q_{fe3} + q_{fe4} + q_{dc} \quad (59)$$

Potom hodnota tepelného toku v tuhé fázi je rovna $q_{ec} = q_{dc}$.



Obr. 8 Model pro přenos tepla vedením v tuhé fázi

Tepelný odpor v místě dotyku mezi reflexní vrstvou a prostorem vláken R_{ct}

Hodnota tepelného odporu spojů může být počítána podle výrazu, který navrhl Holm [3] a který je široce využíván i ostatními autory.

$$R_z = 1/(2ak) \quad (60)$$

kde: a - rádius styčné plochy

k - tepelná vodivost materiálu

Pro odlišné materiály vláken a reflexní vrstvy je Holmsův výraz upravený podle Yovonoviche a Fenecha [4] na:

$$R_{ct} = 1/(2ak_m) \quad (61)$$

$$\text{kde: } k_m = 2k_s k_f / (k_s + k_f) \quad (62)$$

k_s – tepelná vodivost reflexní vrstvy

k_f – tepelná vodivost vláken

Rádius styčné plochy mezi reflexní vrstvou a vlákny izolační vrstvy

Hertzova formule pro rádius styčné plochy mezi dvěma kulovými plochami R_1 a R_2 je dán výrazem:

$$a = [(3\pi(K_1 + K_2)R_1 R_2 P_1) / 4(R_1 + R_2)]^{1/3} \quad (63)$$

$$K_1 = (1 - \mu_1^2) / E_1 \quad (64)$$

$$K_2 = (1 - \mu_2^2) / E_2 \quad (65)$$

kde: μ_1 ; μ_2 - Poissonovo číslo pro materiál 1 a 2

$$P_1 - \text{zátížení ve styčném bodě } P_1 = P / N_c = P / N_T^2 \quad (66)$$

Skutečné uspořádání reflexních vrstev a prostoru vláken může být simulováno kontaktem dvou kulových ploch. Jedna plocha reflexní vrstvy může být zjištěna z tělesa o nekonečném rádiu a plocha vláken izolačního materiálu může být zjištěna plochou tělesa s rádiem o tloušťce izolační vrstvy t_p . Substitucí za P_1 dostaneme výraz:

$$a = [0.75\pi(K_S + K_F)P t_p / N_T^2]^{1/3} \quad (67)$$

Při navíjení izolace je udržováno konstantní napětí po celou dobu. S rostoucím průměrem vrstev dochází k proměnnému kontaktnímu tlaku ve spojích mezi reflexní vrstvou a vlákny izolační vrstvy. Pro získání kontaktního tlaku lze použít výraz:

$$P_i = 2W / bD_i \quad (68)$$

kde: W - počet vinutí

D_i - průměr i -té vrstvy

b - šířka (tloušťka) vrstvy

Potom odpor v místě dotyku mezi reflexní vrstvou 1 a vlákny izolační vrstvy a mezi reflexní vrstvou 2 a vlákny izolační vrstvy je počítán podle Lukose [5].

$$R_{ct} = (k_s + k_f) / [4k_s k_f (3\pi(K_S + K_F)P t_p / 4N_T^2)]^{1/3} \quad (69)$$

$$K_S = (1 - \mu_s^2) / E_S \quad (70)$$

$$K_F = (1 - \mu_f^2) / E_F \quad (71)$$

kde: E_S - modul pružnosti materiálu reflexní vrstvy

E_F - modul pružnosti materiálu vláken

Tepelný odpor v místě dotyku mezi jednotlivými vlákny R_{ctf}

Rádus dotyků mezi jednotlivými vlákny

Vlákna jsou různě stočena, ale pro zjednodušení předpokládáme, že se vlákna křížují. Hertzova formule pro dotkový rádus mezi dvěma křížujícími se vlákny je:

$$a = [(3/2) (1 - \mu^2) P_1 r / E]^{1/3} \quad (72)$$

kde: r – poloměr vlákna

E – modul pružnosti materiálu vláken

μ - Poissonovo číslo pro materiál vláken

Dotkový odpor mezi vlákny

Vlákna pro tkaní jsou volně stočena. Díky tomu je tvar vlákna tkaniny eliptický s vedlejší osou rovnou poloviční tloušťce vlákna. Vzhledem k tomu můžeme zjednodušeně předpokládat vlákno ve tvaru obdélníku. Po zjednodušení lze psát výraz pro rádus mezi dotykem dvou vláken:

$$a_f = [(3K_F P_{tP}) / (8N_T^2 n_f)]^{1/3} \quad (73)$$

Potom tepelný odpor v místě dotyku vláken:

$$R_{ctf} = (2n_{cl} - 1) / 2k_f n_{cr} [(3K_F P_{tP}) / (8N_T^2 n_f)]^{1/3} \quad (74)$$

kde: n_{cl} - počet řad v tkanině

n_{cr} - počet sloupců v tkanině

Tepelný odpor vedením v tuhých látkách R_{tc}

Pro získání tepelného odporu vedením lze užít Fourierova vztahu.

$$R_{tc} = t_p / k_f \quad (75)$$

Celkový odpor vedení tuhými látkami pro vzorek MLI izolace je:

$$R_{cc} = R_{ct} + R_{ctf} + R_{tc} \quad (76)$$

$$R_c = R_{cc} / N_c \quad (77)$$

3.2.2 Přenos tepla radiací

Model pro přenos tepla radiací je sestaven na základě předpokladu, že:

- 1) neuvažujeme radiační mosty křížující stínění
- 2) plyn v meziprostoru je dusík, který propouští radiaci

Teplotní odpor reflexní vrstvy proti přenosu tepla radiací R_{rs}

Užitím Stefan-Boltzmannova výrazu můžeme psát:

$$R_{rs} = \epsilon_{rd} / \sigma (1 - A_p) (T_2^2 + T_1^2) (T_2 + T_1) \quad (78)$$

$$\epsilon_{rd} = (1 / \epsilon_1) + (1 / \epsilon_2) - 1 \quad (79)$$

kde: A_p - navržená plocha vláken

ϵ_{rd} - emisivita materiálu 1 a 2

T_1 - teplota studené stěny (kapaliny)

T_2 - teplota teplé stěny (okolí)

Radiace vláknovým prostorem

Radiační záření se průchodem vláknového prostoru absorbuje, rozptýlí nebo odrazí. Tuto skutečnost popisuje Tongův výraz:

$$q_r = \sigma n^2 (T_2^4 - T_1^4) / (\epsilon_{rd} + \beta \tau) \quad (80)$$

kde: τ - součinitel transmise

β - materiálová konstanta

Pro netkané textilie

Textilie se skládá ze shluku vláken, která se vzájemně dotýkají. Podle Arosóna a Enslie [6], nemají v uvažovaném místě lom ani odraz vliv na kontaktní plochu. Tato plocha je opticky spojena a její síťový efekt redukuje rozptyl a absorpci. Skutečný rozptylový a absorpční koeficient se počítá následovně. Předpokládáme, že všechna vlákna jsou rovná a souběžná, potom je objem dán výrazem:

$$f_b = (n_f d_f^2 \pi / 4) / (D^2 \pi / 4) = n_f (d_f / D)^2 \quad (81)$$

kde: n_f - počet vláken

d_f - průměr vlákna

D - tloušťka textilie

Necht' S je délka oblouku, která se rovná střednímu zastínění okraje vzniklému kontaktem s ostatními vlákny. Potom část tvořící optickou hranici s ostatními vlákny je:

$$F_b = (f_b S)/(2\pi r_f) \quad (82)$$

$$S = (\lambda_o r_f / 2)^{1/2} \quad (83)$$

$$\sigma_s' = \sigma_s (1 - F_b) \quad (84)$$

$$\sigma_a' = \sigma_a (1 - F_b) \quad (85)$$

$$b' = b (1 - F_b) \quad (86)$$

kde: σ_s' - skutečný rozptylový koeficient

σ_a' - skutečný absorpční koeficient

b' - skutečný odrazový faktor

r_f - poloměr vlákna

λ_o - volná vlnová délka

Modifikací Tongova výrazu pro optické rozhraní pomocí skutečného absorpčního a rozptylového koeficientu, lze použít výraz pro tepelný odpor radiací prostoru vláken:

$$R_{rp} = (\epsilon_{rd} + \beta' \tau_o') / A_p \sigma n^2 (T_2^2 + T_1^2) (T_2 + T_1) \quad (87)$$

Optické vlastnosti podle Tonga [7] pro teplotu okolí byly použity jako pro skleněná vlákna. Emisivita je funkcí teploty a pro hliníkem pokovenou fólii Mylar je počítána použitím vzorce podle Chau a Moy[8].

$$\epsilon = 6.337 \times 10^{-4} T^{2/3} \quad (88)$$

Celkový tepelný odpor radací je:

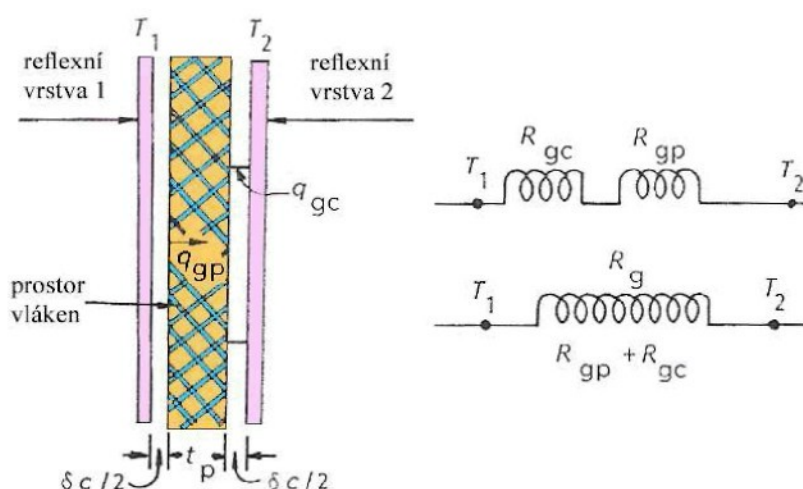
$$R_r = R_{rs} R_{rp} / (R_{rs} + R_{rp}) \quad (89)$$

3.2.3 Přenos tepla vedením v plynu

Mnoho autorů zanedbává vedení v plynu s předpokladem, že tlak mezi jednotlivými vrstvami bude nižší než 10^{-4} torr (1 torr=133.322 Pa). Pokud by došlo k vytvoření tlaku vyššího než 10^{-2} torrů museli bychom uvažovat vedení v plynu. Model pro výpočet vedení v plynu je znázorněn na Obr.9.

Vedení v plynu pro MLI obsahuje vedení zbytkovým plynem:

- 1) v mezeře mezi reflexní vrstvou a prostorem vláken
- 2) v meziprostoru vláken



Obr. 9 Model vedení ve zbytkovém plynu

Vedení zbytkovým plynem v prostoru mezi reflexní vrstvou a prostorem vláken

Vedení zbytkovým plynem v odplyněném prostoru mezi reflexní vrstvou a prostorem vláken může být počítán přirovnáním Knudsenova výrazu k Fourierovu zákonu:

$$q_g = \frac{\alpha \cdot (\gamma + 1)}{(\gamma - 1)} \cdot \sqrt{\left(\frac{R}{8 \pi M T} \right)} \cdot P \cdot (T_2 - T_1) \quad (90)$$

$$q_{gc} = k_{gc}(T_1 - T_2)/\delta_c \quad (91)$$

$$k_{gc} = \delta_c [(\gamma+1)/(\gamma-1)](R/8\pi MT)^{1/2}P \quad (92)$$

$$\text{kde: } \delta_c = (1/N_v) - (t_p + t_s) \quad (93)$$

δ_c – mezera mezi reflexní vrstvou a prostorem vláken

N_v – hustota vrstvy

P – intersticiální tlak (v torrech)

t_p a t_s – tloušťka prostoru vláken a reflexní vrstvy

α – koeficient akomodace

γ – Poissonova konstanta

Vodivost zbytkovým plynem uvnitř prázdných míst prostoru vláken

Vodivost ve zbytkovém plynu uvnitř prostoru vláken může být počítána podle Verschoorova výrazu:

$$k_{gp} = \alpha(1-\delta)k_g^* (C_L/\lambda + C_L) \quad (94)$$

kde: k_g^* - ideální vodivost plynu

C_L - charakteristická délka vyčištěného prostoru

α - součinitel akomodace

δ - tuhé částice v prostoru

Poměr tuhých částic v prostoru δ

Pro část plochy o rozměrech $h \times l$ viz Obr. 8 lze úhel sklonu vlákna vyjádřit jako:

$$\theta = \text{tg}^{-1}/2l \quad (95)$$

$$V_p = l^2 t_p \quad (96)$$

$$V_v = (\pi/4) d_f^2 n_f (2l/\cos\theta) 2 \quad (97)$$

kde: t_p - tloušťka prostoru zaujímaného vlákny

V_p - objem zaujímaný prostorem vláken

$l/\cos\theta$ - délka vlákna (98)

2 - počet vláken

V_v - objem zaujímaný vlákny

Z toho plyne poměr tuhých částic v prostoru δ :

$\delta = (\text{objem zaujímaný vlákny})/(\text{objem zaujímaný prostorem})$

$$\delta = V_v / V_p = (\pi/4)d_f^2 n_f (2l/\cos\theta) / l^2 t_p = (\pi d_f^2 n_f) / (2 l t_p \cos\theta) \quad (99)$$

Odpor vodivosti plynu:

$$R_g = R_{gp} + R_{gc} = (k_{gc} t_p + k_{gp} \delta) / (k_{gc} k_{gp}) \quad (100)$$

Součinitel akomodace α je funkcí teploty a jeho hodnota je pro každý plyn jiná. Závisí na vlastnostech povrchu. Pro hladký povrch je hodnota α pro vzduch a dusík v rozmezí 1-0.9 při teplotách 80-300K[9]. Většinou se uvažuje $\alpha = 1$. Poissonova konstanta je také funkcí teploty, ale pro zjednodušení je $\gamma = 1.4$.

Teplota T podle Knudsenova výrazu je efektivní teplota nerovnovážného stavu plynu, která má okamžitou hodnotu mezi T_1 a T_2 [9]. Pro malé teplotní rozdíly může být nahrazena $(T_1 + T_2)/2$ jak navrhl Springe [10]. Ideální vodivost plynu k_g^* je funkcí teploty. Korelace získaná Kellerem at al. [11] pro vodivost plynného dusíku je

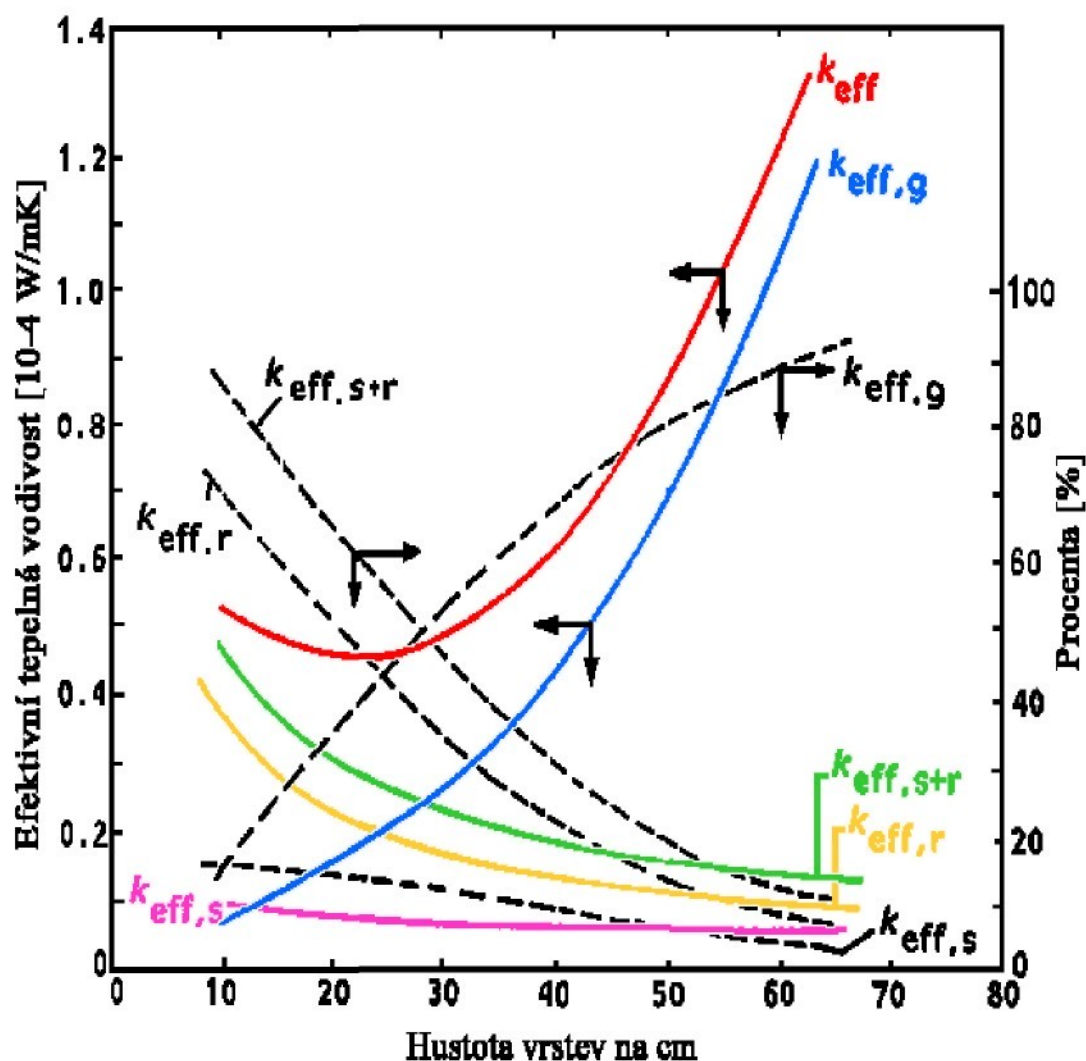
$$k_g^* = 1.38 \times 10^{-6} T^{0.92} \quad (101)$$

3.2.4 Porovnání jednotlivých způsobů přenosu tepla

Podíl jednotlivých způsobů přenosu tepla MLI je závislý na dosažených podmínkách. Přenos tepla radiací je funkcí teplotní difference se čtvrtou mocninou T^4 , a proto je podíl přenosu tepla radiací významný zejména pro vyšší teplotní difference. Přenos tepla vedením v materiálu je funkcí struktury materiálu a teploty. Přenos tepla vedením v plynu je mnohdy zanedbáván s předpokladem, že intersticiální tlak nebude vyšší jak 10^{-2} Pa. Pokud je intersticiální tlak vyšší než 10^{-2} Pa, začíná podíl přenosu tepla vodivostí v plynu strmě stoupat a výrazně převažuje nad ostatními způsoby přenosu tepla.

Rozdílné způsoby přenosu tepla pro určení součinitele tepelné vodivosti jako funkce hustoty vrstev a procentuelní změny jsou zobrazeny na Obr. 10. Z tohoto grafu vidíme, že pro hustotu vrstev nižší než 27 vrstev na cm je dominantní přenos tepla kombinací radiace a vedením v materiálu. Zatímco pro hustotu vrstev vyšší než 27 vrstev na cm je pro přenos tepla dominantní vedení v plynu. S rostoucí hustotou vrstev

roste intersticiální tlak, který přispívá k růstu vodivosti plynu, a proto musí být vedení v plynu uvažováno při výpočtech, kdy intersticiální tlak je vyšší než 10^{-2} Pa a hustota vrstev je vyšší než 35 vrstev na cm.

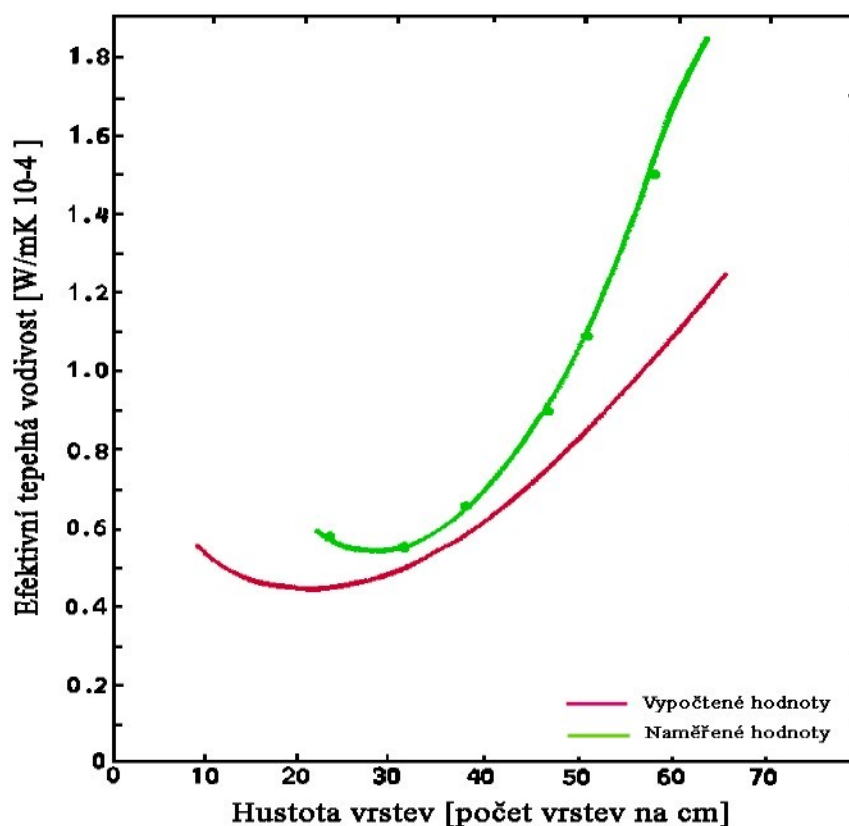


Obr. 10 Podíl jednotlivých způsobů přenosu tepla na efektivní tepelné vodivosti

3.2.5 Přesnost teoretického výpočtu

Podle tohoto modelu byly vypočtené hodnoty od S.L.Bapat et al [2] porovnány s výsledky od Kagnera [12] na Obr. 11. Graf zobrazuje podhodnocené výsledky při uvažovaném zjednodušení ve výpočtech. Chyba výpočtů je 18-25% pro hustotu vrstev 25-45 na cm. Pro nižší i vyšší počet vrstev chyba roste. Vzhledem k tomu, že nešlo o zcela stejnou strukturu materiálů, není porovnání s Kagnerem [12] přesné.

Tyto výsledky ukazují, že teoretické modely výpočtů nelze použít v širokém rozsahu počtu vrstev a tlaků, ale pouze pro určité kombinace materiálů a jen v omezeném intervalu.[2]



Obr. 11 Závislost efektivní tepelné vodivosti na hustotě vrstev

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - Zjišťování tepelných vlastností izolace

4.1 Matematický model výpočtu MLI podle vybraných vzorců

Vzhledem k problematickému odhadu vstupních hodnot pro výpočet podle S.L.Bapat et al. [2] bylo uděláno zjednodušení. Byly vybrány vzorce popisující chování MLI, které byly srozumitelné a jejich výsledky se lišily max. o $\pm 20\%$ od výsledků, které byly naměřeny v NASA. Po prostudování odborné literatury byl pro výpočet tepelné vodivosti materiálu izolace odvozen vzorec z vzorce uvedeného v [13].

Vzorec pro přepočet tepelné vodivosti superizolace byl sestaven na základě skutečnosti, že tepelná vodivost materiálu je funkcí teploty. Tepelná vodivost superizolace je přepočtena podle vzorce (102) pro naměřenou tepelnou vodivost při normálních (atmosferických) podmínkách. K určení tepelné vodivosti superizolace za normálních podmínek bylo uskutečněno měření na přístroji Alambeta.

Vzorec pro přepočet tepelné vodivosti izolace:

$$\lambda_{iz} = \lambda_{iz293} \cdot \sqrt[0.9]{\frac{T_2 + T_1}{2}} \cdot 10^{-6} \quad (102)$$

Vzorec pro výpočet přenosu tepla vedením v izolaci:

$$q_c = \frac{\lambda_{iz} \Delta T}{t_{skel.pap} \cdot N_v} \quad (103)$$

kde: λ_{iz293} – naměřená tepelná vodivost materiálu superizolace při $T=293K$

T_2 - teplota okolí

T_1 - teplota kapaliny

N_v - počet vrstev

Vzorec pro výpočet přenosu tepla vedením ve zbytkovém plynu:

$$q_g = \frac{\alpha \cdot (\kappa + 1)}{(\kappa - 1)} \cdot \sqrt{\left(\frac{R}{8 \pi M T} \right)} \cdot p_{zbyt} (T_2 - T_1) \quad (106)$$

kde: α - součinitel akomodace
 κ - poissonova konstanta
 R - univerzální plynová konstanta
 M - molární hmotnost plynu
 T - teplota okolí

Vzorec pro výpočet přenosu tepla radiací:

$$q_r = \sigma \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \cdot \varepsilon_1} \cdot A_{21} \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (107)$$

kde: ε_{1a2} - emisivita materiálů 1 a 2
 A_{12} - podíl sálajících ploch 1 a 2
 σ - Stefan-Boltzmanova konstanta

4.1.1 Měření tepelné vodivosti superizolace na přístroji ALAMBETA

Měření tepelných vlastností na přístroji ALAMBETA (viz Obr. 13 a 14) spočívá v průchodu tepelných toků $q_1(t)$ a $q_2(t)$ povrchy vzorku o teplotě t_1 - teplota měřicí hlavičky a t_2 - teplota vzorku (základny přístroje). Přístroj ALAMBETA je počítačem řízený poloautomat, který vypočítá statistické parametry měření. Obsahuje autodiagnostický program, který zabraňuje chybným operacím přístroje. Provozní podmínky jsou při $t = 18-23^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 10 – 80%. Přítlačný tlak hlavičky je kolem 200Pa.[22]

4.1.1.1 Příprava vzorků a samotné měření

Hliníková fólie a skelný papír byly nastříhány na vzorky o rozměrech 10x10mm (viz Obr.12). Vzorky byly skládány na sebe vždy jedna vrstva Al fólie a jedna vrstva skelného papíru. Tepelná vodivost byla měřena pro každou desátou vrstvu. Měření se opakovalo 6x a z naměřených hodnot byl vypočten průměr (viz Tab. 2). Tyto hodnoty pak byly dosazeny do vzorce (102) pro přepočet tepelné vodivosti.



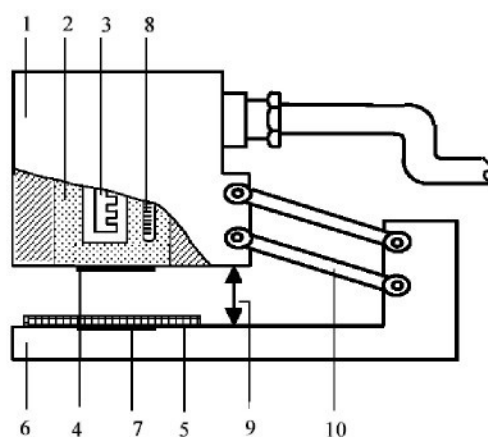
Obr. 12 Vzorky superizolace

4.1.1.2 Popis měření

Na základnu přístroje **6**, která byla vyhřívána na teplotu okolí, byl položen měřený vzorek **5**. Hlavice **1**, která byla vyhřívána na teplotu o cca 10°C vyšší než je teplota okolí (obvykle 33°C), se spustila dolů a snímače tepelného toku **4** a **7** měřili tepelné toky mezi jednotlivými povrchy. Součástí základny přístroje je termostat a teploměr, součástí měřicí hlavice je teploměr **8**, topné těleso **3**, termostat **2** a tepelná izolace. Tloušťka materiálu **h** byla měřena jako vzdálenost měřících hlav. [22]



Obr. 13 Přístroj na měření tepelných vlastností



Obr. 14 Schéma měřicího přístroje ALAMBETA

Tab. 2 Naměřené hodnoty na přístroji ALAMBETA

Počet vrstev [N]	Tepelná vodivost [W/mK]	Tloušťka [mm]
10	0,0308	2,65
20	0,0304	5,56
30	0,0332	8,18
40	0,0368	10,9
50	0,0373	13,6
60	0,0394	16,2

4.1.1.3 Závěr měření na Alambetě

Tepelnou vodivost materiálu izolace nelze přesně změřit, neboť vždy se na měření vodivosti materiálu podílí vedení plynu uvnitř mikroskopických komůrek v materiálu a radiace. Naměřená tepelná vodivost superizolace byla brána jako vstupní hodnota pro přepočet tepelné vodivosti při pracovních podmínkách a k získání tepelného toku vedením v materiálu superizolace.

4.1.2 Vyhodnocení matematického modelu

Podle vybraných vzorců byl proveden výpočet pro počet vrstev 20-60 při tlaku 0,008Pa a teploty 300K-20K. Tyto hodnoty byly porovnány s hodnotami naměřenými v:

- Indian Institute of Technology in India (viz Tab. 3,4 a Obr. 15) [2]
- NASA Obr. 16 [17]

Tab. 3 Naměřené hodnoty v Indian Institute of Technology

<i>Materiál reflexní vrstvy a výplně</i>	<i>Počet vrstev [N]</i>	<i>Hustota vrstev N [vrstva/cm]</i>	<i>Teplota teplé stěny [K]</i>	<i>Teplota studené stěny [K]</i>	<i>Naměřený Tepelný tok Q [W]</i>	<i>Tepelná vodivost keff [W/mK]</i>	<i>Tloušťka stěny t [m]</i>
Mylar a nylonová vlákna	60	31,90	301,05	79,85	0,1095	0,0000715	0,01881
	40	32,40	299,85	79,45	0,1146**	0,0000586	0,01235
	20	33,20	298,65	78,35	0,1007	0,0000190	0,00602
Hliníková fólie a nylonová vlákna	60	32,34	301,85	80,15	0,1110	0,0000949	0,01855
	40	33,64	300,15	79,35	0,1270	0,0000616	0,01189
	20	33,80	299,15	79,05	0,1370	0,0000380	0,00592
Mylar a skleněná vlákna	60	30,28	301,35	78,15	0,0690	0,0000621	0,01982
	40	28,30	303,35	78,33	0,0880	0,0000570	0,01413
	20	28,75	301,83	80,63	0,1430	0,0000515	0,00696
Hliníková fólie a skleněná vlákna	60	32,35	302,21	82,15	0,1170	0,0000827	0,01855
	40	28,45	304,62	80,65	0,1240	0,0000735	0,01406
	20	28,10	301,83	78,60	0,1360	0,0000485	0,00712

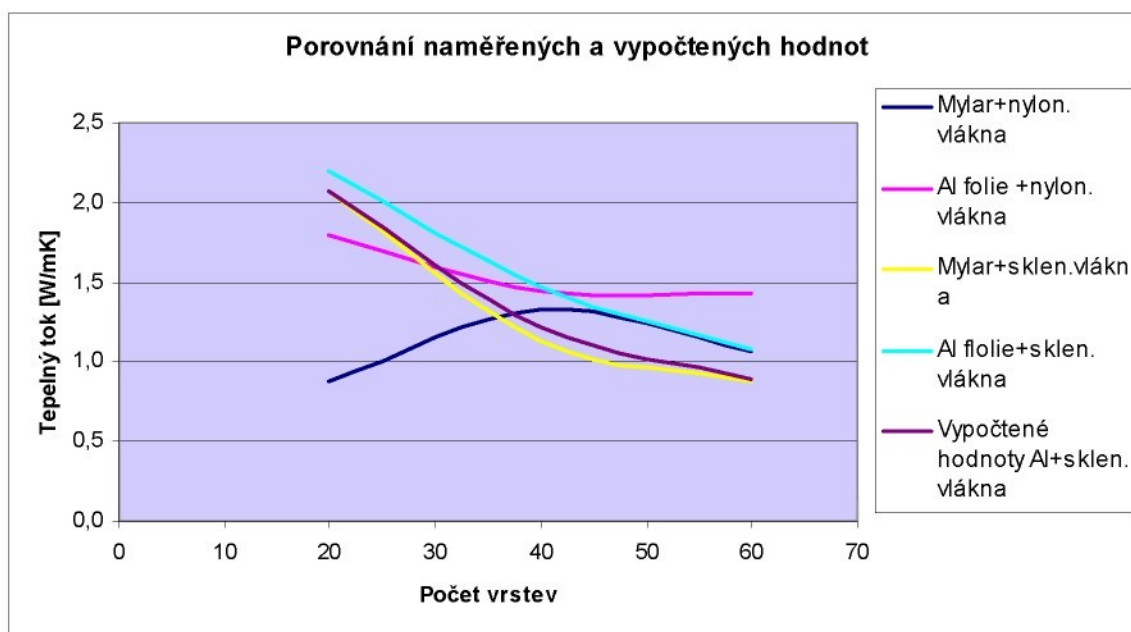
Tab. 4 Přepočet naměřených hodnot na teplotu kapalného vodíku a porovnání s matematickým modelem

<i>Materiál superizolace</i>	<i>Počet vrstev [N]</i>	<i>Teplota teplé stěny [K]</i>	<i>Teplota studené stěny [K]</i>	<i>Intersticiální tlak [Pa]</i>	<i>Tepelný tok izolací [W/m²]</i>	<i>Ef.tepelná vodivost [W/mK]</i>	<i>Přivedené teplo izolací [W]</i>
Měření v Indian Institute of Technology pro Al fólii a skleněná vlákna	60	300	20	0,0079	1,0845	0,0000827	417,01
	40	300	20	0,0079	1,4638	0,0000735	562,85
	20	300	20	0,0079	2,1966	0,0000485	844,63
Matematický model pro Al fólii a skleněná vlákna	60	300	20	0,0079	0,8872	0,0000169	341,16 ^{1818%*}
	40	300	20	0,0079	1,2243	0,0000156	470,77 ^{1639%*}
	20	300	20	0,0079	2,0746	0,0000132	797,74 ^{559%*}

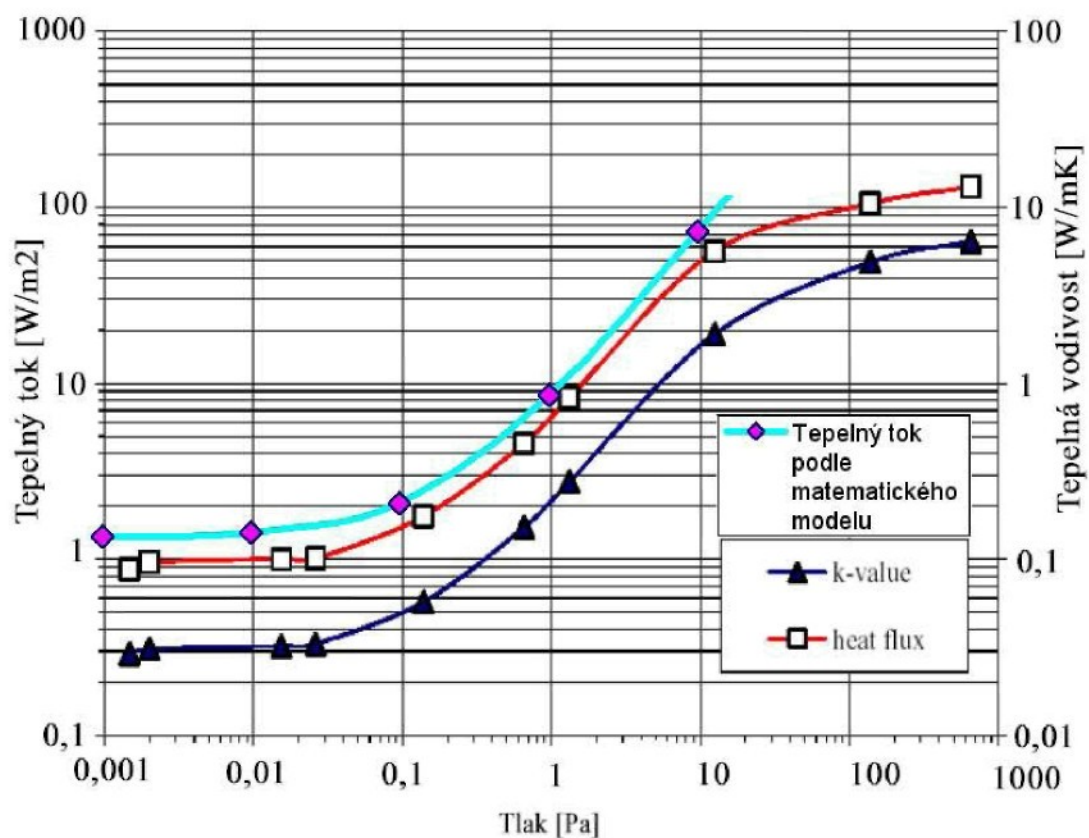
* Odchylka od naměřených hodnot v Indian Institute of Technology in India

** Tato hodnota tepelného toku se zdá být nereálná, ale vzhledem k tomu, že jde o překlad ze získaných měření v Indian Institute of Technology, ponechala jsem tuto hodnotu jak udává autor. Chování tohoto materiálu neznám a může jít o jistou anomálii.

Pokud by se zvažovalo použití této kombinace materiálu pro superizolaci nádob, doporučila bych tuto hodnotu znovu proměřit.



Obr. 15 Naměřené hodnoty v Indian Institut of Technology pro různé kombinace materiálů a vypočtené hodnoty podle vzorce pro Al fólii a skelná vlákna



Obr. 16 Naměřené hodnoty z NASA pro děrovanou Mylarovou fólii oboustranně pokovenou hliníkem a skleněná vlákna v porovnání s hodnotami vypočtenými podle uvedených vzorců

4.1.3 Závěr teoretického výpočtu

Při porovnání vypočtených hodnot s naměřenými hodnotami z Indian Institute of Technology viz Obr. 15 byly odchylky od měření do 20-ti %. Pro kombinaci materiálů - Al fólie a skleněných vláken při tlaku $6 \cdot 10^{-5}$ Torrů ($0,0079\text{Pa}$) a počtu vrstev 60 byl naměřený tepelný tok $1,0845\text{ W/mK}$ a vypočtený tepelný tok $0,8872\text{W/mK}$ tj. max. odchylka 18,18%. Pro 20 vrstev byl naměřený tepelný tok $2,19\text{W/mK}$ a vypočtený $2,07\text{W/mK}$, tj. max. odchylka 5,5%. Na Obr. 16 jsou výsledky měření z NASA pro děrovanou Mylarovou fólii oboustranně pokovenou hliníkem a skleněná vlákna, pro tlaky v rozmezí 10^{-3} - 10^3Pa s počtem vrstev 30. Při porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými pro kombinaci materiálů Al fólie a skelného papíru se výsledky lišily pro tlak v rozmezí 10^1 - 10^2Pa a stejný počet vrstev max. o 20%. Pro tlaky 10^{-3}Pa a počet vrstev 30 byla odchylka max. 50%. V tomto případě lze vzorec použít do tlaku 10Pa . Pro tlaky vyšší začíná odchylka strmě narůstat.

Hodnoty z uskutečněných měření nelze přesně porovnávat, neboť pro jednotlivá měření nebylo docíleno stejných podmínek při měření a ani složení materiálů nebylo vždy stejné. Tato skutečnost má za následek odchylky ve výsledcích měření. Z grafů je vidět, že podle vybraných vzorců jsou odchylky od měření nejnižší v oblasti tlaků 10^{-3} - 10^1Pa . Při výpočtech se můžeme dopustit chyby až o 50%, a proto lze vypočtené hodnoty použít pouze jako první přiblížení odhadu tepelného toku pro tlaky 10^{-3} - 10^1Pa .

To, že se zatím nikomu nepodařilo najít kombinaci vzorců přesně popisujících vlastnosti MLI dokazuje, jak je složité toto chování popsat. Matematické modely popisující vlastnosti MLI se v praxi nepoužívají právě z důvodů složitosti výrazů a množství chyb, které mohou vzniknout při uvažování zjednodušení, nebo při odhadu jednotlivých veličin. Pro použití v praxi jsou důležitá vlastní měření pro určitou kombinaci materiálů, která nám dají nejpřesnější výsledky, podle kterých můžeme určit tepelnou vodivost a tepelný tok superizolace.

4.2 Měření tepelných vlastností superizolace

Zjišťování tepelných vlastností izolace je důležité pro zjištění tepelných ztrát a zajištění ekonomičnosti provozu kryogenních zařízení. Z měření získáme vstupní hodnoty pro bilanční výpočty. Měření je založeno na základě vypařujícího se tekutého dusíku ve válcovém kryostatu (Obr.17). Sestava je složena z měřícího válce a

dvou ochranných-stínících válců, vyplněných tekutým dusíkem. Vzorek testované izolace je namotán kolem měřicího válce vertikálního kryostatu a měří se hodnota odparu dusíku z měřicího válce. Ze zjištěné hodnoty odparu se určí efektivní tepelná vodivost λ_{ef} [W/mK] izolačního materiálu.



Obr. 17 Měřicí kryostat

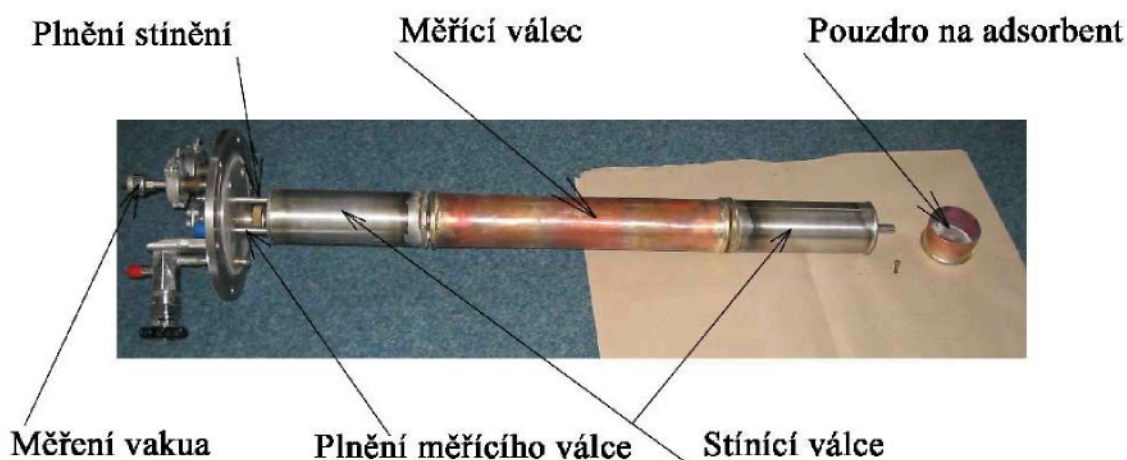
4.2.1 Měření 21 vrstev superizolace

Postup měření

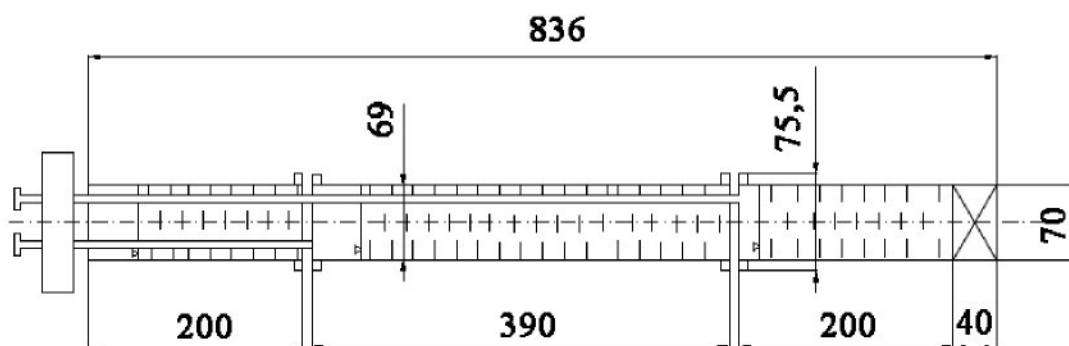
Pro získání efektivní tepelné vodivosti supreizolace byla uskutečněna dvě měření. První měření bylo předpokládáno pro 20 vrstev superizolace a druhé pro 40 vrstev superizolace. Postup byl následující:

Nejprve byl kryostat rozebrán, pečlivě očištěn acetylenem a vysušen. Do pouzdra na adsorbent (viz Obr. 18), který byl pod dolním stínícím válcem, byl nasypán zeolit, který plnil funkci adsorbentu. Poté byly připraveny vzorky superizolace. Podle předpokládaného počtu vrstev byla spočtena délka rozvinu superizolace, poté byly nastříhány vzorky. Pro superizolaci byla použita hliníková fólie o tloušťce 8 μm a skelný papír o tloušťce 89 μm . Hliníková fólie byla nastříhána na 0,5m dlouhé pruhy aby bylo zabráněno podélnému vedení. Při výpočtech se zjistilo, že pro velkokapacitní nádoby je toto vedení zanedbatelné neboť činí 0,003% z celkového přívodu tepla izolací. Ovšem pro kryostat s malým průměrem činí přívod tepla podélným vedením 21% z celkového

přívodu tepla izolací. Z tohoto důvodu nelze podélné vedení při měření na kryostatu zanedbat. Snížení přívodu tepla podélným vedením docílíme přerušováním hliníkové fólie. Při prvním měření byla folie nastříhána na pruhy 840x500mm a skelný papír zastřížen na pruh o šířce 860mm. Na pruh skelného papíru byly naskládány pruhy hliníkové fólie, které byly dále přilepeny speciální Maylarovou lepicí páskou. Tato páska byla z polyesterového filmu pokoveného hliníkem s výbornými tepelnými vlastnostmi a nízkou tenzí par. Jako podkladová vrstva byla položena hliníková fólie, která měla eliminovat nekvalitní povrch nádoby. Na ni byla přilepena a ručně navinuta první vrstva superizolace. Při navíjení byl problém udržet kryostat v rovině a dodržet všude stejnou přitlačnou sílu. Z tohoto důvodu byl pro druhé měření vyroben speciální navíjecí přípravek, který zdokonalil navíjení a zlepšil kvalitu navinuté izolace.



Obr. 18 Vnitřní část kryostatu



Obr. 19 Schéma vnitřní části kryostatu

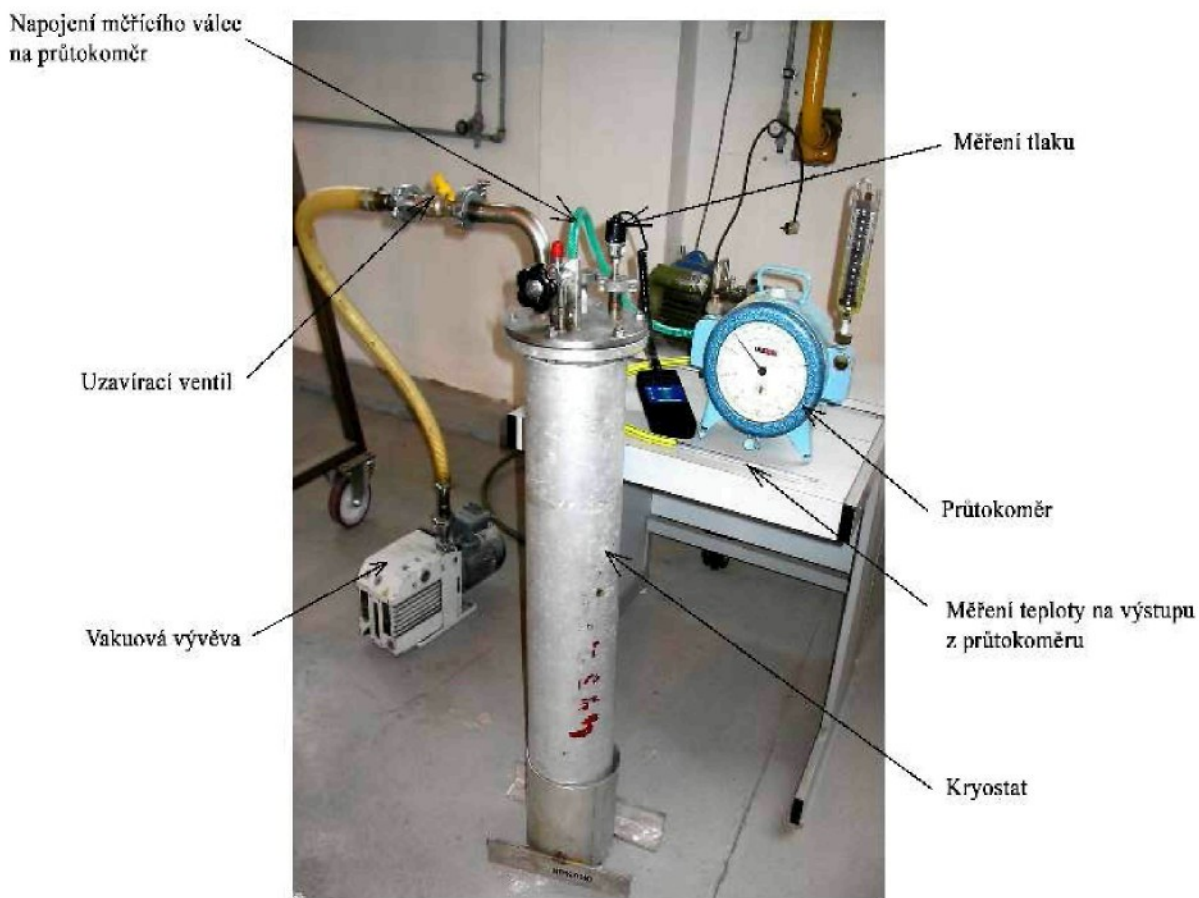
Po navinutí superizolace byl naměřen vnější průměr válce 85mm. Z této hodnoty byl vypočten přibližný počet vrstev podle vzorce (108). Počet vrstev byl 21,09. Z počtu vrstev a tloušťky navinuté izolace byla zjištěna hustota vrstev 44,2 vrstev na cm. Tato hodnota je poměrně dost vysoká, což bylo dáno způsobem navinutí.

$$n_{iz} = \frac{L_{iz}}{\pi \cdot D_s} \quad (108)$$

Kde

 L_{iz} - délka navinuté superizolace

D_s - střední průměr válce s izolací

 n_{iz} - počet vrstev

Obr. 20 Schéma zapojení měření na válcovém kryostatu

Před vyhříváním byla zasunuta měřicí část kryostatu do válcového pláště a obklopena silnou hliníkovou fólií. Do ní byly dole vystříhány otvory a jimi pak prostrčeny vyhřívací pistole. Kryostat byl přes noc vyhříván. Druhý den byl odčerpáván vzduch. Před odčerpáváním byly pečlivě promazány všechny spoje speciální vakuovou vazelinou pro zaručení maximální těsnosti spojů. V případě netěsnosti spojů by mohlo při odčerpávání dojít k vytvoření nedokonalého vakua. Hodnota vytvořeného vakua má významný vliv na konečný přenos tepla. Při odčerpávání byl měřen klesající tlak vakuoměrem Hastings HPM 4/6. Po 24 hodinách klesl tlak na 1,3Pa. Po skončení odčerpávání byl ventil k vývěvě uzavřen a vývěva dále odsávala. Nemohlo tak dojít k nasávání tlaku netěsností ventilu po celou dobu měření. Potom byl kryostat zalit tekutým dusíkem, napojen na průtokoměr a každých 10 minut byla měřena hodnota odparu (viz Obr.20).

Během prochlazování byl měřen rovněž tlak a teplota. Zpočátku klesal tlak i odpar z měřicí nádoby strmě. Po hodině se hodnota odparu i tlaku téměř ustálila na hodnotách



Obr. 21 Vrstvy superizolace

0,065dm³/min a 0,666Pa. Za 2. hodiny došla náplň ve stínících válcích a odpar z měřicího válce začal opět strmě narůstat. Tím bylo měření u konce. Po skončení měření byl kryostat odpojen od vývěvy, byl z něho vylit přebytečný dusík a poté byl rozebrán. Izolace byla rozstřížena (viz Obr.21) a byl spočítán skutečný počet vrstev superizolace. Skutečný počet vrstev byl stejný jako vypočtený, tj. 21 vrstev. Kryostat byl do druhého dne vysušen a měření se opakovalo pro 40 vrstev.

4.2.2 Naměřené a vypočtené hodnoty izolace pro 21 vrstev

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5. Průběh prochlazování plášťů je zobrazen v grafu (viz Obr. 22). Z naměřených hodnot byla vybrána nejnižší dosažená hodnota odparu. Pro tuto hodnotu odparu bylo vypočteno přivedené teplo, efektivní tepelná vodivost a tepelný tok a pro 21 vrstev superizolace.

Naměřené a vypočtené hodnoty pro 21 vrstev:

Délka měřicího válce	$L_v = 400 \text{ mm}$
Střední průměr měřicího válce	$D_s = 80 \text{ mm}$
Tloušťka izolace	$t_{iz} = 4,75 \text{ mm}$
Tech. atmosféra (<i>pro přepočet hodnot z tabulek</i>)	$p_{tech} = 735,56 \text{ mmHg}$
Naměřený tlak	$p_m = 714 \text{ mmHg}$
Teplota okolí	$T = 14^\circ\text{C} = 287,15 \text{ K}$
Naměřený min. odpar pro 20 vrstev izolace	$G_{20min} = 0,066 \text{ dm}^3/\text{min}$
Hustota dusíku při podmínkách měření	$\rho = 1,1247 \text{ kg/m}^3$
Skutečný odpar dusíku	$G_{N_2} = 1,2372 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$

Přivedené teplo izolací:

$$Q_m = G_{N_2} \cdot L_m \qquad Q_m = 0,2463 \text{ W} \qquad (109)$$

Tepelná vodivost superizolace λ :

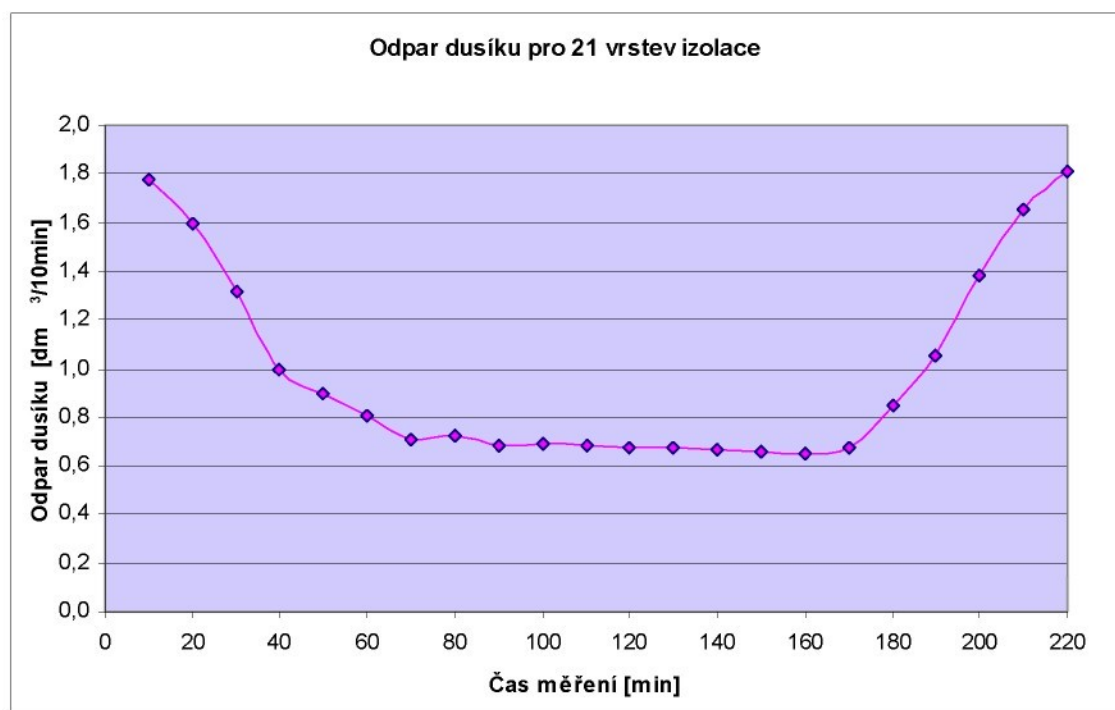
$$\lambda := \frac{Q_m \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L_v \cdot \Delta T} \qquad \lambda = 5,5018 \cdot 10^{-5} \text{ W/mK} \qquad (110)$$

Tepelný tok superizolací pro 21 vrstev:

Povrch měřicího válce	$A_v = 0,1008 \text{ m}^2$
Tepelný tok izolací	$Q = 2,4429 \text{ W/m}^2$

Tab. 5 Naměřené hodnoty pro 21 vrstev

Číslo měření	Čas	Tlak [Pa]	Teplota [°C]	Průtok [dm ³ /10min]	Průtok [dm ³ /min]
0	11:20	0,666	13,2	Zaliti dusíkem	
1	11:30	0,666	13,4	1,780	0,1780
2	11:40	0,666	14	1,600	0,1600
3	11:50	0,666	14,2	1,320	0,1320
4	12:00	0,666	14,8	0,995	0,0995
5	12:10	0,666	14,9	0,895	0,0895
6	12:20	0,666	14,9	0,810	0,0810
7	12:30	0,666	14,9	0,710	0,0710
8	12:40	0,666	14,9	0,722	0,0722
9	12:50	0,666	14,9	0,687	0,0687
10	13:00	0,666	15	0,688	0,0688
11	13:10	0,666	15	0,685	0,0685
12	13:20	0,666	15	0,675	0,0675
13	13:30	0,666	15	0,672	0,0672
14	13:40	0,666	15	0,666	0,0666
15	13:50	0,666	15	0,658	0,0658
16	14:00	0,666	15	0,650	0,0650
17	14:10	0,666	15,5	0,675	0,0675
18	14:20	0,666	15,5	0,850	0,0850
19	14:30	0,666	15,5	1,055	0,1055
20	14:40	0,666	15,5	1,385	0,1385
21	14:50	0,666	15,5	1,655	0,1655
22	15:00	0,666	15,5	1,810	0,1810



Obr. 22 Grafické znázornění průběhu měření odparu pro 21 vrstev

4.2.3 Měření superizolace 43 vrstev

Při druhém měření bylo již více zkušeností, a proto bylo provedeno několik změn. Pro lepší navinutí byl vyroben navíjecí přípravek (viz Obr. 23), do kterého byla uchycena měřicí část kryostatu a navinuta superizolace. Hliníková fólie byla nastříhávána na 12 dílů, které byly jednotlivě navíjeny a slepovány páskou. Každý díl se skládal z pruhu skelného papíru o rozměru 860x1040mm a hliníkové fólie 830x1000mm. Po navinutí superizolace byl naměřen vnější průměr 102mm. Z této hodnoty byl opět vypočten přibližný počet vrstev podle vzorce (108). Vypočtený počet vrstev byl 43 s hustotou 32,5 vrstev na cm. Pro získání lepšího vakua bylo odčerpáváno 72 hodin namísto 24 hodin. Po skončení odčerpávání tlak klesl na 0,533 Pa. Postup měření byl opakován.



Obr. 23 Navíjecí přípravek

Při zalévání došlo k problémům s čerpadlem, a proto se nepodařilo zalít měřicí válec kryostatu správně, což se odrazilo na průběhu měření. Zhruba po hodině prudce klesl odpar na $0,0004 \text{ dm}^3/\text{min}$, a to během 10-ti minut. Měření bylo ukončeno a po opravě čerpadla byly znovu doplněny měřicí a stínící válce. Další měření bylo již bez problémů.

Pro docílení ustáleného stavu a tím reálnějších výsledků, byl kryostat přes noc prochlazován. Druhý den po doplnění válců dusíkem měření pokračovalo. Hodnota odparu postupně klesala až do doby, kdy se odpar z měřicího válce ustálil, a proto bylo měření ukončeno.

4.2.4 Naměřené a vypočtené hodnoty izolace pro 43 vrstev

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6. Průběh prochlazování pláštěů je zobrazen v grafu (viz Obr. 24). Z těchto hodnot byla opět vybrána nejnižší dosažená hodnota odparu a z této hodnoty bylo vypočteno přivedené teplo, efektivní tepelná vodivost a tepelný tok pro 43 vrstev superizolace.

Vypočtené hodnoty pro 43 vrstev:

Střední průměr měřicího válce	$D_s = 88,75 \text{ mm}$
Tloušťka izolace	$t_{iz} = 13,25 \text{ mm}$
Tech. atmosféra (pro přepočet hodnot z tabulek)	$p_{tech} = 735,56 \text{ mmHg}$
Naměřený tlak	$p_m = 720,5 \text{ mmHg}$
Teplota okolí	$T = 14^\circ\text{C} = 287,15 \text{ K}$
Naměřený min. odpar pro 43 vrstev izolace	$G_{40min} = 0,037 \text{ dm}^3/\text{min}$
Hustota dusíku při podmínkách měření	$\rho = 1,1018 \text{ kg/m}^3$
Skutečný odpar dusíku	$G_{N_2} = 0,67943 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$

Přivedené teplo izolací:

$$Q_m = G_{N_2} \cdot L_m \quad Q_m = 0,1353 \text{ W} \quad (111)$$

Tepelná vodivost superizolace λ :

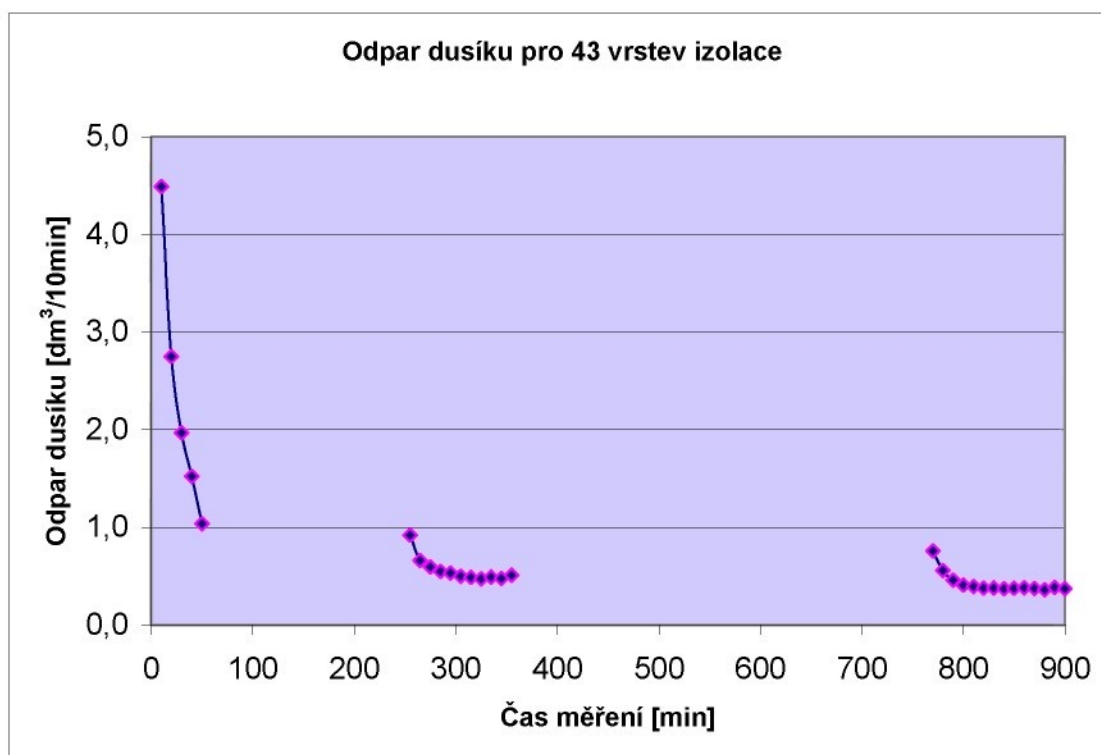
$$\lambda := \frac{Q_m \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L_v \cdot \Delta T} \quad \lambda = 7,6703 \cdot 10^{-5} \text{ W/mK} \quad (112)$$

Tepelný tok superizolací pro 43 vrstev:

Povrch měřeného válce	$A_v = 0.1115 \text{ m}^2$
Tepelný tok izolací	$Q = 1,2132 \text{ W/m}^2$

Tab. 6 Naměřené hodnoty pro 43 vrstev

Číslo měření	Čas	Tlak [torr]	Teplota [°C]	Průtok [dm ³ /10min]	Průtok [m ³ /s]
0	17:35	0,006	14,90		
1	17:45	0,006	14,90	4,490	0,00000748
2	17:55	0,006	14,90	2,750	0,00000458
3	18:05	0,006	14,90	1,970	0,00000328
4	18:15	0,005	15,00	1,520	0,00000253
5	18:25	0,005	15,00	1,035	0,00000173
Zaliti dusíkem					
6	21:50	0,004	14,00	0,92	0,00000153
7	22:00	0,004	14,40	0,66	0,00000110
8	22:10	0,004	14,40	0,592	0,00000099
9	22:20	0,004	14,20	0,546	0,00000091
10	22:30	0,004	14,10	0,532	0,00000089
11	22:40	0,004	14,00	0,497	0,00000083
12	22:50	0,004	14,00	0,487	0,00000081
13	23:00	0,004	13,80	0,471	0,00000079
14	23:10	0,004	13,80	0,493	0,00000082
15	23:20	0,004	13,50	0,475	0,00000079
16	23:30	0,004	13,40	0,513	0,00000086
Zaliti dusíkem					
17	12:30	0,004	14,90	0,758	0,00000126
18	12:40	0,004	14,90	0,557	0,00000093
19	12:50	0,004	14,90	0,46	0,00000077
20	13:00	0,004	14,90	0,409	0,00000068
21	13:10	0,004	14,90	0,393	0,00000066
22	13:20	0,004	14,90	0,377	0,00000063
23	13:30	0,004	14,90	0,38	0,00000063
24	13:40	0,004	15,00	0,372	0,00000062
25	13:50	0,004	15,00	0,378	0,00000063
26	14:00	0,004	15,00	0,38	0,00000063
27	14:10	0,004	15,00	0,375	0,00000063
28	14:20	0,004	15,00	0,362	0,00000060
29	14:30	0,004	15,00	0,384	0,00000064
30	14:40	0,004	14,90	0,369	0,00000062



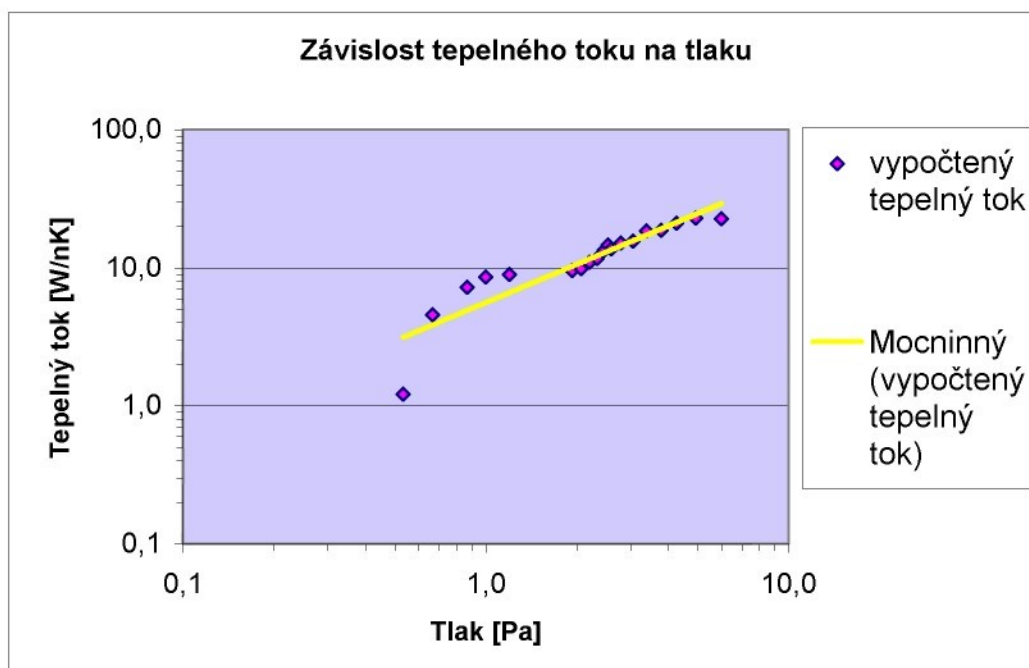
Obr. 24 Grafické znázornění průběhu měření odparu pro 43 vrstev

4.2.5 Měření odparu dusíku pro různé tlaky

Toto měření bylo uskutečněno k získání závislosti odparu dusíku na změně tlaku. Z této závislosti byl vypočten průběh tepelného toku na změně tlaku, který můžeme lépe porovnávat s výsledky dosaženými v NASA a Linde.

Zhoršení vakua bylo docíleno částečným zavzdušněním kryostatu. Po zavzdušnění začal působit adsorbent, který adsorboval částičky plynu a tlak v kryostatu začal opět klesat na původní hodnotu. Díky pozvolnému poklesu tlaku bylo možné měřit hodnotu odparu v určitém rozsahu tlaků. Z naměřených hodnot byl vypočten průměr, tepelný tok a hodnoty byly vyneseny do grafu (viz Obr. 25).

Je jasné, že tento postup měření nebyl zcela přesný, neboť při zavzdušňování se podmínky v kryostatu měnily a měření neprobíhalo v ustáleném stavu. Tím se naměřené hodnoty posunuly do vyšších absolutních hodnot. Avšak při vyhodnocení nebyly absolutní hodnoty odparu tak důležité, ale sledovala se hlavně směrnice tečny ke křivce v dané oblasti.

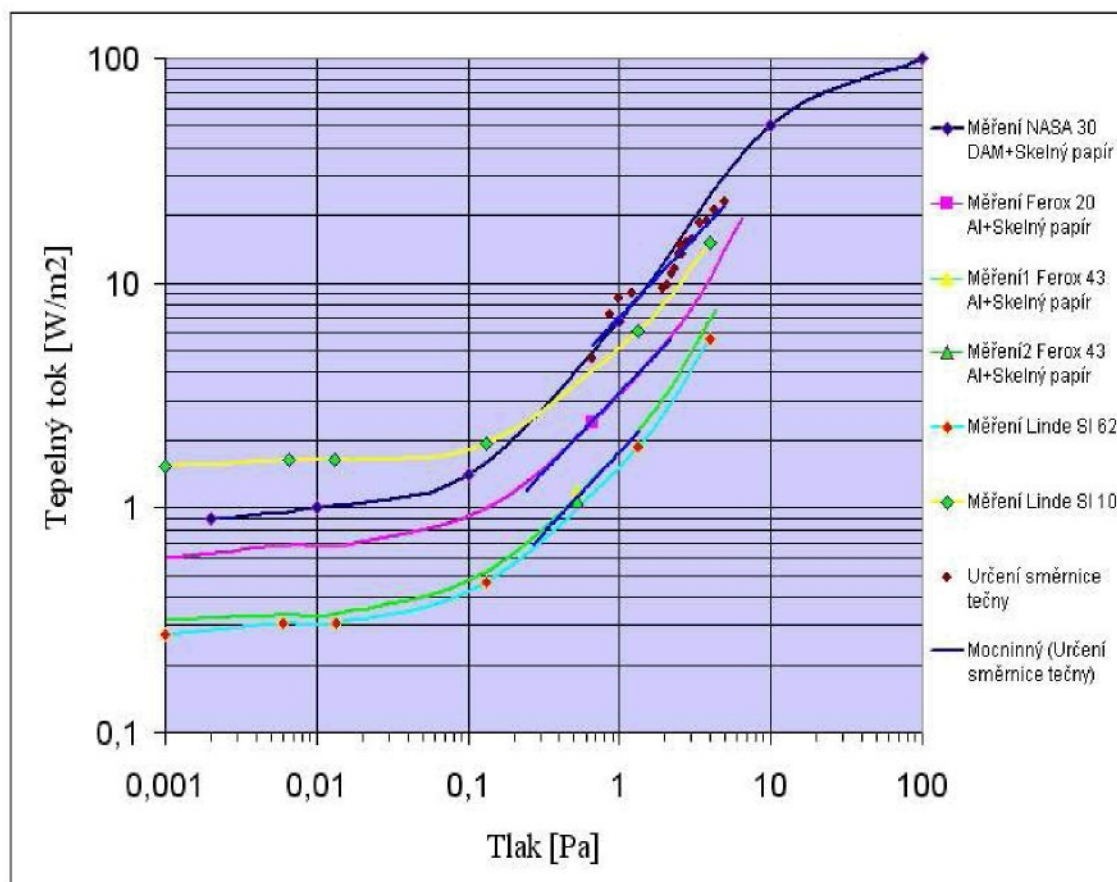


Obr. 25 Vypočtený tepelný tok z naměřených hodnot při zhoršujícím se vakuu

4.2.6 Vyhodnocení výsledků měření superizolace

Z naměřených hodnot byla vypočtena efektivní tepelná vodivost a tepelný tok. Hodnoty byly vyneseny do grafu v závislosti na tlaku viz (Obr. 26). Jako podklad pro vyhodnocení naměřených hodnot byly použity naměřené hodnoty od Lindeho (SI10 a SI62) a v NASA (Maylarová oboustranně hliníkem pokovená fólie + skelný papír). Vzhledem k tomu, že naměřené hodnoty od Lindeho nebyly v celém rozsahu tlaků, byla pro názornost použita křivka popisující Maylarovou fólii v rozsahu tlaků 10^{-3} - 10^2 Pa. Dále byly do grafu zaneseny naměřené hodnoty z Feroxu pro 21 a 43 vrstev v ustáleném stavu. Vzhledem k tomu, že nebylo možné při daných technických podmínkách dosáhnout nižšího tlaku, pro který je tato izolace navržena, byla zvolena metoda dynamického měření pro vyšší tlaky (viz kapitola 4.2.5). Naměřenými body (21 a 43 vrstev) byla proložena směrnice tečny v dané oblasti. Pro 20 vrstev byla použita ekvidistanta ke křivce zobrazující průběh tepelného toku v závislosti na tlaku pro SI10. Pro 43 vrstev byla použita ekvidistanta ke křivce SI62.

Na základě takto vytvořeného grafu pro 20 a 43 vrstev lze odhadnout nejnižší dosažitelný tepelný tok pro tlak 10^{-3} Pa. Nejnižší předpokládaná hodnota tepelného toku pro 20 vrstev bude **0,62 W/m²** a pro 43 vrstev **0,32 W/m²**.



Obr. 26 Graf naměřených hodnot v NASA, Linde a Feroxu

5 DISKUSE

Na začátku diplomové práce jsou uvedeny všeobecné informace o vodíku jeho výrobě a skladování. Zvláště je pak zdůrazněno jeho budoucí použití jako zdroje skladovatelné energie.

Při návrhu kryogenní nádoby se vycházelo z maximálně možného průměru vnější nádoby, který je možný přepravovat bez větších problémů. Při konstrukci kryogenní nádoby je uvažována změna rozměrů vnitřní nádoby od prochlazení kapalinou. Vnitřní nádoba je zavěšena na čtyřech táhlech, která umožňují minimální výchylku. Během přepravy není vnitřní nádoba pevně uchycena, ale k vymezení vůlí dojde až po přepravě a prochlazení kapalinou, kdy spodní táhla pevně dosednou na opěrné plochy. Pevnostní výpočty byly provedeny podle normy EN 13458-2, AD 2000 Merkblatt. V tepelných výpočtech byly počítány dilatace jednotlivých částí zařízení a přívody tepla do vnitřní nádoby vedením, sáláním a vedením ve zbytkovém plynu. Vzhledem k tomu, že největší přívod tepla je tepelnou izolací vnitřní nádoby, byla této kapitole věnována největší pozornost. Jsou diskutovány jednotlivé typy izolací a jejich využití v praxi. Nejlepší výsledky vykazovala vícevrstvá izolace, a proto byl proveden teoretický rozbor přenosu tepla izolací. Výsledek tohoto rozboru nemá sice přímý vliv na konečný výpočet, ale dává velmi dobrou představu o problematice přenosu tepla v MLI.

V experimentální části byly provedeny dvě měření konkrétních vzorků v měřicím kryostatu. Tato měření byla provedena na starší částečně poškozené aparatuře, kdy bylo značné nebezpečí netěsností zařízení zejména na hlavní těsnící přírubě kryostatu. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto použití určitého množství zeolitu umístěného do pouzdra na adsorbent. Zeolit eliminoval plně případné netěsnosti, ale způsobil problémy při zavzdušňování kryostatu pro zjištění směrnice tečny v dané oblasti. Zavzdušňování bylo prováděno po přesně definovaných objemech a to prostorem mezi kulovým uzavíracím ventilem a rychlospojkou do atmosféry. Největší problém byl s dosaženým min. tlakem, kde i při použití určitého množství zeolitu byl dosažen min. tlak pouze 0,5Pa. Tento tlak je o řád vyšší než tlak uvažovaný pro navrhovanou nádobu. Pro získání lepšího tlaku již nestačí pouze dvoustupňová rotační vývěva, která byla použita, ale je nutné použít difuzní vývěvu nebo turbo vývěvu. Skutečnost, že jsme nedosáhli tak nízkých hodnot tlaku, zkomplikovala celkové vyhodnocení měření. Při vyhodnocování

se muselo vycházet z naměřených hodnot, které byly porovnávány spolu s výsledky publikovanými v literatuře pro stejný typ superizolace. Získané hodnoty z měření superizolace v NASA a u Linde jsme spolu s naměřenými hodnotami ve Feroxu vynesli do společného grafu. Z tohoto grafu jsme určili efektivní tepelnou vodivost pro předpokládaný tlak v meziprostoru 0,05Pa. Přestože nebylo při měření dosaženo provozních podmínek je možné se domnívat, že zvolené hodnoty se nebudou příliš lišit od dosažené skutečnosti.

ZÁVĚR

V této diplomové práci byly uvažovány některé závažnější problémy související s návrhem, výrobou a provozem kryogenní nádoby. Výsledkem diplomové práce je návrh kryogenní nádoby na kapalný vodík s objemem 400m^3 kapaliny. Práce obsahuje tepelný výpočet a pevnostní výpočet vnitřní a vnější nádoby. Výsledkem experimentální části je určení efektivní tepelné vodivosti pro 20 a 43 vrstev superizolace. Na základě zjištěných výsledků bylo pro navrhovanou kryogenní nádobu zvoleno 45 vrstev superizolace s hustotou 30 vrstev na cm. Tlak v meziprostoru byl zvolen na základě zkušeností $0,05\text{Pa}$. Tento tlak je limitní hodnotou dosažitelnou při běžných průmyslových podmínkách. Tomuto tlaku odpovídá hodnota tepelného toku pro 43 vrstev $0,4\text{ W/m}^2$ (viz Obr.26). Vzhledem k tomu, že se nejedná o laboratorní vzorek, ale o skutečnou nádobu, která bude montována za běžných provozních podmínek, násobily se zjištěné hodnoty koeficientem 1,5. Potom navrhovaná efektivní tepelná vodivost byla $32,1 \cdot 10^{-6}\text{ W/mK}$ a tepelný tok $0,6\text{ W/m}^2$. Při této hodnotě tepelného toku je přivedené teplo izolací $233,15\text{W}$ (viz kapitola Tepelné výpočty). Celková hodnota přivedeného tepla uvažující tepelný zisk izolací, vedením v závěsech, podporách a potrubím byla $259,72\text{ W}$. Této hodnotě přivedeného tepla odpovídá odpar vodíku za den $0,18\%$ z celkového objemu.

Abychom docílili úspěšného provozu celého zařízení je důležité dodržovat některé zásady při montáži:

- a) **Čistota** - vysoká čistota povrchů, která se dosáhne pouze při práci v klimatizovaném prostředí. Před navíjením superizolace, musí být veškeré povrchy očištěny acetonem a důkladně vysušeny. Je třeba mít na paměti, že prachové částičky mají za následek zachytávání molekul plynu, které se potom velmi obtížně při odsávání uvolňují.
- b) **Suchost prostředí** - při montáži a navíjení superizolace je třeba dbát na maximální suchost. Při kontaktu superizolace s vodou je tato nepoužitelná.
- c) **Hustota vrstev** – je nutné dodržovat předepsanou hustotu vrstev, které se docílí nastavením brzdící síly na navíjecím přípravku. Během montáže je třeba tuto hodnotu kontrolovat.

- d) **Zamezení tepelných zkratů a překrývání vrstev** – tepelný zkrat je tepelný kontakt mezi dvěma sousedními (vzdálenými) vrstvami a má za následek zhoršení kvality superizolace. K překrývání vrstev dochází, pokud se teplejší vrstva dostane pod studenější. Tím dojde opět k degradaci kvality superizolace a k faktickému snížení počtu vrstev v daném místě. Zvláště je důležité dávat pozor na překrývání vrstev v místech přechodu válcové části nádoby a dna.
- e) **Izolace potrubí a nosných elementů** – potrubí na přívod a odvod kapaliny se musí izolovat po celé délce a všechna ostatní potrubí a nosné elementy vycházející z vnitřní nádoby stačí izolovat částečně.
- f) **Uvolňování plynu z povrchů** – toto uvolnění se provádí vyhříváním vnitřní nádoby, a posléze vyhřívání vnitřní nádoby s postupným odsáváním. Doporučená teplota je okolo 200°C.
- g) **Odsávání teplé nádoby na co možná nejnížší tlak** – získání nejnížšího tlaku se docílí odčerpávání pomocí difuzní vývěvy nebo turbo vývěvy po dostatečně dlouhou dobu. Předpokládá se použití dostatečně velkého odčerpávajícího hrdla (DN 80-100mm).
- h) **Těsnost zařízení** – všechny díly se kontrolují na těsnost heliovým hledačem a na závěr se provádí integrální test vnitřní a vnější nádoby.

Při dodržení všech doporučených zásad lze předpokládat, že navržená kryogenní nádoba se bude chovat podle vypočtených hodnot.

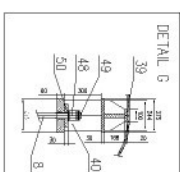
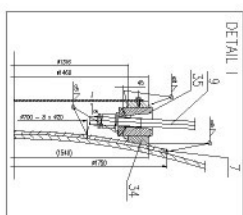
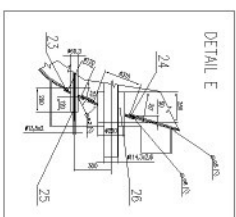
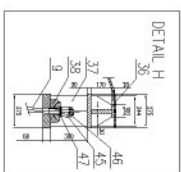
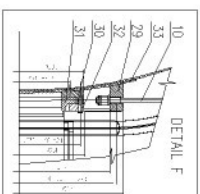
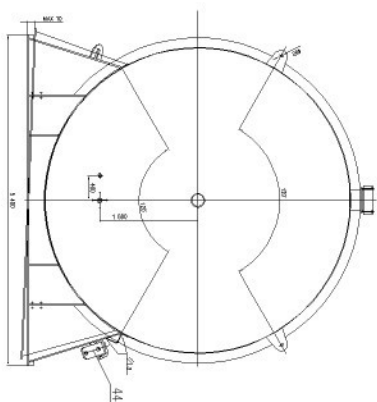
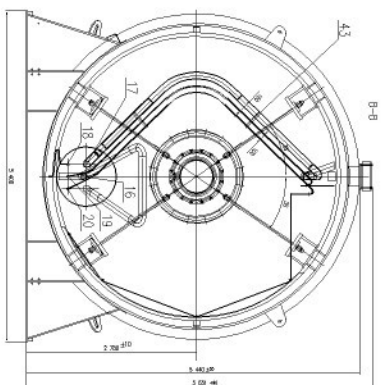
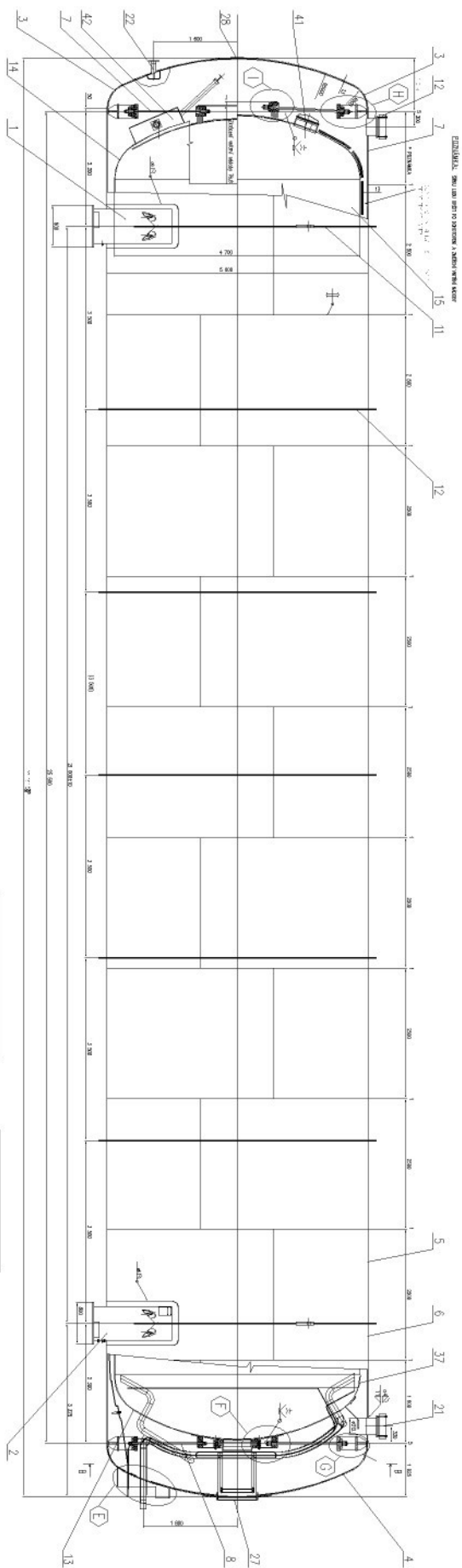
Budoucí využití těchto kryogenních nádob lze spatřovat ve skladování většího množství vodíku v místě jeho výroby např. poblíž větrných farem, kde se bude z energie vyrobené pomocí větrných elektráren vyrábět elektrolýzou vodík, nebo v místech vodíkových čerpacích stanic. S rostoucím uplatněním vodíku v energetice a v dopravě lze předpokládat zvýšený zájem o nádoby na jeho skladování a jistě vzrostou i možnosti jejich využití.

Na základě povzbudivých výsledků uvedených v této práci bylo rozhodnuto v měření dále pokračovat a využít dosažených výsledků pro návrh nízkoodparového argonového zásobníku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Jelínek, J., Málek, Z.; *Kryogenní technika*; SNTL; Praha 1982
- [2] Bapat S.L., Narayankhedkar K.G., Lukose T.P.; *Preformance prediction of multilayer insulation*; Cryogenics 1990
- [3] Holm, R. ; *Electric Contacts Handbook Springer-Verlag*; Berlin FRG 1958
- [4] Yovonovich, M.M., Fenech H.; *Thermal contact conductance of normally flat rough surfaces in a vacuum enviroment*; Progr Astro Aero 1965
- [5] Lukose, T.P.; *Preformance prediction and experimental investigations on multilayer insulations*; PhD Thesis Indian Institute of Technology; Bombay, India 1986
- [6] Arson, J.K., Enslie, A.C.; *Infrared emittance of fibrous materials*; Appl Optics 1929
- [7] Tong, T.W.C.; *Thermal radiation in fibrous insulations PhD Thesis University of California*; Berkeley; USA 1980
- [8] Chau, H., Moy, H.C.; *Thermal characteristics of multilayer insulation*; Prog Astro Aero 1971
- [9] Corrucini, A.; *Calculation of gaseous conduction in dewars*; Adv Cryog Eng 1958
- [10] Springe, G.S.; *Heat transfer in rarefied gases*; Adv Heat Transfer 1971
- [11] Keller, C.W. Cunningham, G.R. Glassford, A.P.; *Final report on thermal performance of multilayer insulation*; NASA Report CR-134477; USA 1974
- [12] Kagner, M.G.; *Thermal Insulation in Cryogenic Engineering*; Israel 1969
- [13] Chorowski, M., Grzegory P.; *Optimisation of multilayer insulation an Engineering*; Cryogenics; Praha 2000
- [14] Kututeladze S.S., Borišanskij V.M.; *Příručka sdílení tepla*; SNTL, Praha 1962
- [15] Kaganier, M.G.; *Výměna tepla v nízkoteplotních zařízeních*; Moskva 1979
- [16] Kalčík, J., Sýkora, K.; *Technická termomechanika*; Academia; Praha 1973
- [17] Fesmire, J., Augustynowicz, S., Darve, C; *Performance characterization of perforated multilayer insulation blankets*; NASA; USA 2000
- [18] Gažo, J. a kol.; *Všeobecná a anorganická chemie*; SNTL; Bratislava 1978
- [19] Leinveber, J., Řasa, J., Vávra, P. *Strojnické tabulky*; Scientita; Praha 1999

- [20] Tuček,V., Dvořáková,L., Hanzal,J.; *Vodík*, ČATP; Praha 2004
- [21] *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*, SPN; Praha 1989
- [22] *Norma pro měření vlastností na přístroji Alambeta*, TU Liberec 2004
- [23] *Závěreční zpráva*, Česká energetická agentura říjen 2003
- [23] *Firemní prospekty*, Lydall 2003
- [24] *Firemní zpráva o superizolaci*, Linde
- [25] <http://www.szes.lit.cz/pk/Vodik.htm>

[illegible][illegible]

<i>Materiál reflexní vrstvy a výplně</i>	<i>Počet vrstev [N]</i>	<i>Hustota vrsev N [vrstva/cm]</i>	<i>Teplota teplé stěny [K]</i>	<i>Teplota studené stěny [K]</i>
Mylar a nylonová vlákna	60	31,90	301,05	79,85
	40	32,40	299,85	79,45
	20	33,20	298,65	78,35
Hliníková fólie a nylonová vlákna	60	32,34	301,85	80,15
	40	33,64	300,15	79,35
	20	33,80	299,15	79,05
Mylar a skleněná vlákna	60	30,28	301,35	78,15
	40	28,30	303,35	78,33
	20	28,75	301,83	80,63
Hliníková fólie a skleněná vlákna	60	32,35	302,21	82,15
	40	28,45	304,62	80,65
	20	28,10	301,83	78,60

Výpočet prostupu tepla pro vodík

<i>Materiál reflexní vrstvy a výplně</i>	<i>Počet vrstev [N]</i>	<i>Hustota vrsev N [vrstva/cm]</i>	<i>Teplota teplé stěny [K]</i>	<i>Teplota studené stěny [K]</i>
Mylar a nylonová vlákna	60	31,90	300	20
	40	32,40	300	20
	20	33,20	300	20
Hliníková fólie a nylonová vlákna	60	32,34	300	20
	40	33,64	300	20
	20	33,80	300	20
Mylar a skleněná vlákna	60	30,28	300	20
	40	28,30	300	20
	20	28,75	300	20
Hliníková fólie a skleněná vlákna	60	28,10	300	20
	40	28,45	300	20
	20	32,35	300	20

Výpočet přívodu tepla izolací p

Přívod tepla vedením

	Počet vrstev	Přepočtená tepelná vodivost	Rozdíl teplot	Intersticiální tlak
	30	0,0000112	210	0,00001
Hliníková fólie a skleněná vlákna	30	0,0000112	210	0,00010
	30	0,0000112	210	0,00100
	30	0,0000112	210	0,01000
	30	0,0000112	210	0,10000
	30	0,0000112	210	1,0
	30	0,0000112	210	10,0
	30	0,0000112	210	100,0

Přívod tepla radiací

	počet vrstev	plocha 1	plocha2	int.tlak
	30	384,5230	449,8500	0,00001
Hliníková fólie a skleněná vlákna	30	384,5230	449,8500	0,00010
	30	384,5230	449,8500	0,00100
	30	384,5230	449,8500	0,01000
	30	384,5230	449,8500	0,10000
	30	384,5230	449,8500	1,00000
	30	384,5230	449,8500	10
	30	384,5230	449,8500	100

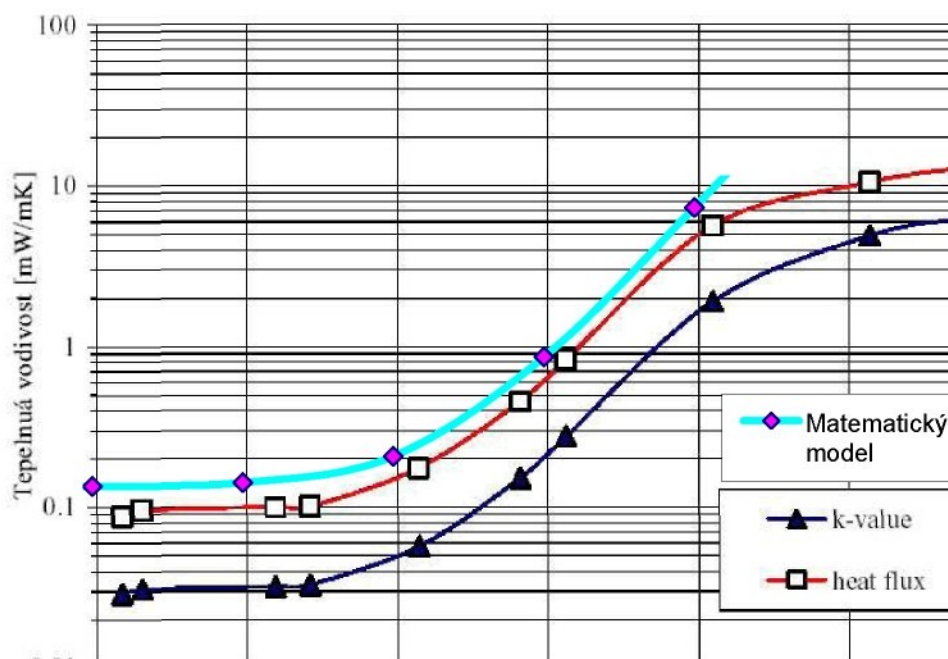
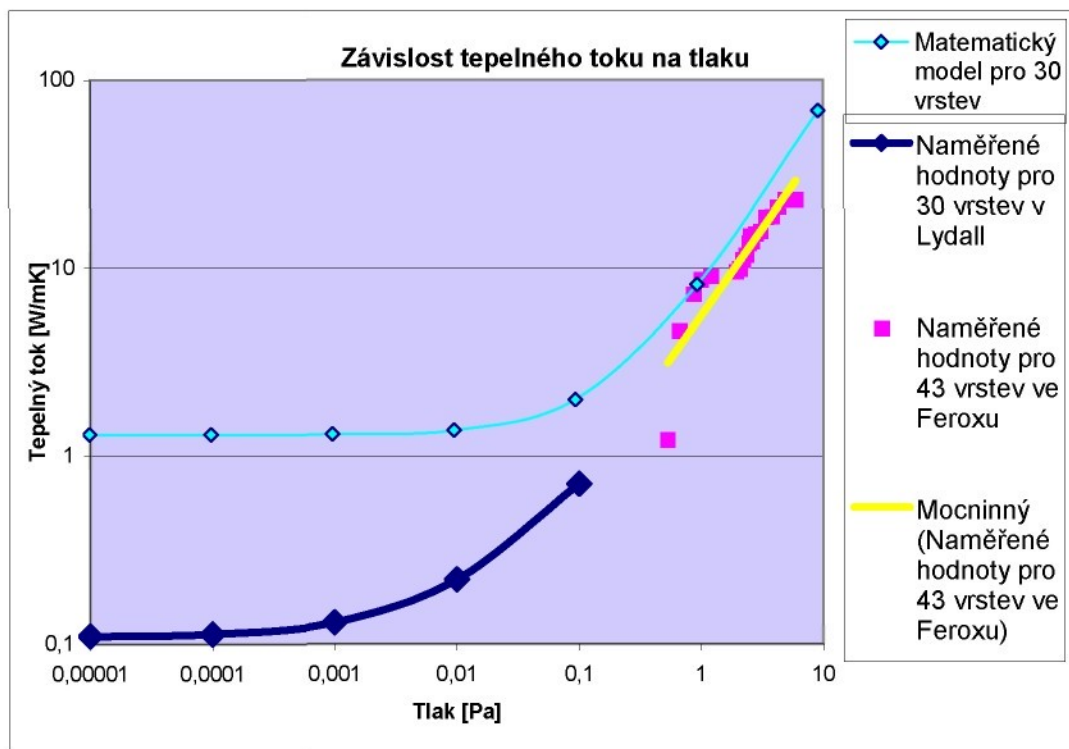
Přívod tepla zbytkovým plynem

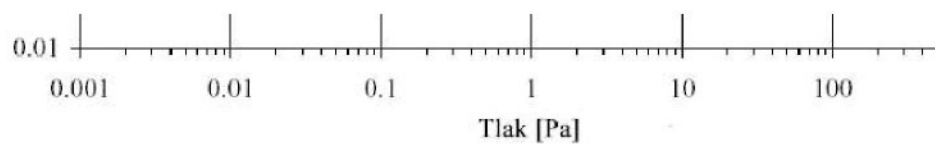
	počet vrstev	plocha 1	plocha2	souč akomodace
4	30	384,5230	449,8500	0,900
Hliníková fólie a skleněná vlákna	30	384,5230	449,8500	0,900
	30	384,5230	449,8500	0,900
	30	384,5230	449,8500	0,900
	30	384,5230	449,8500	0,900
	30	384,5230	449,8500	0,900
	30	384,5230	449,8500	0,900
	30	384,5230	449,8500	0,900

Cekový přívod tepla izolací

	Počet vrstev	Tepelná vodivost keff [W/mK]	qc	qr radiací
	30	0,0000168	0,8783	0,4417
Hliníková fólie a skleněná vlákna	30	0,0000168	0,8783	0,4417
	30	0,0000169	0,8783	0,4417

	30	0,000177	0,8783	0,4417
	30	0,0000258	0,8783	0,4417
	30	0,0001072	0,8783	0,4417
	30	0,0009208	0,8783	0,4417
	30	0,0090574	0,8783	0,4417





ALAMBETA

Počet vrstev [N]	Tepelná vodivost [W/mK]
10	0,0308
20	0,0304
30	0,0332
40	0,0368
50	0,0373
60	0,0394

<i>Naměřený Tepelný tok Q [W]</i>	<i>Tepelná vodivost k_{eff} [W/mK]</i>	<i>Tloušťka stěny t [m]</i>
0,1095	0,0000715	0,01881
0,1146	0,0000586	0,01235
0,1007	0,0000190	0,00602
0,1110	0,0000949	0,01855
0,1270	0,0000616	0,01189
0,1370	0,0000380	0,00592
0,0690	0,0000621	0,01982
0,0880	0,0000570	0,01413
0,1430	0,0000515	0,00696
0,1170	0,0000827	0,01855
0,1240	0,0000735	0,01406
0,1360	0,0000485	0,00712

<i>Efektiv. tepelná vodivost [W/mK]</i>	<i>Tepelný tok [W/m²]</i>	<i>Povrch vnitřní nádoby S [m²]</i>	<i>Přivedené teplo izolací Q_{iz} [W]</i>
0,0000715	1,0644	384,5230	409,2849995
0,0000586	1,3290	384,5230	511,0495241
0,0000190	0,8831	384,5230	339,5799518
0,0000949	1,4322	384,5230	550,7256839
0,0000616	1,4506	384,5230	557,7724524
0,0000380	1,7982	384,5230	691,4338777
0,0000621	0,8775	384,5230	337,4244696
0,0000570	1,1292	384,5230	434,1918359
0,0000515	2,0729	384,5230	797,0681136
0,0000827	1,0845	384,5230	417,0046832
0,0000735	1,4638	384,5230	562,8465026
0,0000485	2,1966	384,5230	844,6297635

Podle vzorce pro Al folii a skleněná vlákna

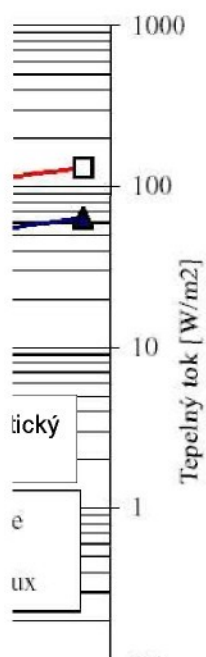
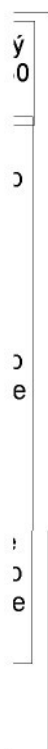
tloušťka papíru	qc	T2	T1	
0,000089	0,8783	300	78,0000	189,0000
0,000089	0,8783	300,0000	78,0000	189,0000
0,000089	0,8783	300,0000	78,0000	189,0000
0,000089	0,8783	300,0000	78,0000	189,0000
0,000089	0,8783	300,0000	78,0000	189,0000
0,000089	0,8783	300,0000	78,0000	189,0000
0,000089	0,8783	300,0000	78,0000	189,0000
0,000089	0,8783	300,0000	78,0000	189,0000

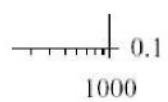
emisivita1	emisivita2	emisivita	Fs	T2 ^d	T1 ^d
0,03	0,94	0,029950976	0,854780482	8100000000	37015056
0,03	0,94	0,029950976	0,854780482	8100000000	37015056
0,03	0,94	0,029950976	0,854780482	8100000000	37015056
0,03	0,94	0,029950976	0,854780482	8100000000	37015056
0,03	0,94	0,029950976	0,854780482	8100000000	37015056
0,03	0,94	0,029950976	0,854780482	8100000000	37015056
0,03	0,94	0,029950976	0,854780482	8100000000	37015056
0,03	0,94	0,029950976	0,854780482	8100000000	37015056

souč akomod	konst	kappa	R	M	int. Tlak
1	0,006270335	1,4	8,314	28,06	0,00001
1	0,006270335	1,4	8,314	28,06	0,00010
1	0,006270335	1,4	8,314	28,06	0,00100
1	0,006270335	1,4	8,314	28,06	0,01000
1	0,006270335	1,4	8,314	28,06	0,10000
1	0,006270335	1,4	8,314	28,06	1,00000
1	0,006270335	1,4	8,314	28,06	10
1	0,006270335	1,4	8,314	28,06	100

qp plynem	Povrch nádoby	<i>Tepelný tok</i> [W/m ²]	<i>Přivedené teplo</i> <i>izolací Q_{iz}</i> [W]
0,0001	384,5230	1,3200	507,5833
0,0007	384,5230	1,3207	507,8294
0,0071	384,5230	1,3271	510,2901

0,0711	384,5230	1,3911	534,8977
0,7111	384,5230	2,0310	780,9733
7,1106	384,5230	8,4305	3241,7297
71,1056	384,5230	72,4256	27849,2934
711,0560	384,5230	712,3759	273924,9303





Tloušťka [mm]
2,65
5,56
8,18
10,9
13,6
16,2

stefan-boltz	tepelný tok radiací
5,67E-08	0,441700805
5,67E-08	0,441700805
5,67E-08	0,441700805
5,67E-08	0,441700805
5,67E-08	0,441700805
5,67E-08	0,441700805
5,67E-08	0,441700805
5,67E-08	0,441700805

rozdíl teplot	qg
210	7,11056E-05
210	0,000711056
210	0,00711056
210	0,071105597
210	0,711055969
210	7,110559689
210	71,10559689
210	711,0559689

Rozměry kryostatu

	Jednotky	První měř.	Druhé měření
Průměr měř. nádoby	[m]	0,0755	0,0755
Průměr 20-ti vrstev izolace	[m]	0,085	0,102
Délka měřeného válce	[m]	0,4	0,4
Přepočtená hustota dusíku	kg/m ³	1,1247	1,1018
Přepočtené výparné teplo	J/kg	199120,7	199142,7
Povrch měřícího válce	m ²	0,1008	0,1115
Logaritmus podílu průměrů		0,118519	0,30084
Teplotní spád	K	211,15	211,15

Číslo měření	Čas měření	Tlak [Torr]	Tlak [Pa]
1	9:00	133.322	
2	9:45	0,031	4,1330
3	10:15	0,026	3,4664
4	11:15	0,022	2,9331
5	12:15	0,019	2,5331
6	13:15	0,018	2,3998
7	14:15	0,016	2,1332
8	15:45	0,015	1,9998
9	16:15	0,015	1,9998

Druhý den

Číslo měření	Zaliti dusíkem	Tlak [Torr]	Tlak [Pa]
10	9:48	0,01	1,3332
11	9:58	0,009	1,1999
12	10:05	0,008	1,0666
13	11:05	0,008	1,0666
14	11:20	0,006	0,7999
15	11:45	0,005	0,6666

Měření odparu N₂ z měřícího válce

Číslo měření	Čas měření	Čas	Tlak [torr]	Teplota [K]	Průtok [dm ³ /10min]
0	Zaliti dusíkem	11:20	0,005	13,2	
1	10	11:30	0,005	13,4	1,780
2	20	11:40	0,005	14	1,600
3	30	11:50	0,005	14,2	1,320
4	40	12:00	0,005	14,8	0,995
5	50	12:10	0,005	14,9	0,895
6	60	12:20	0,005	14,9	0,810
7	70	12:30	0,005	14,9	0,710
8	80	12:40	0,005	14,9	0,722
9	90	12:50	0,005	14,95	0,687

10	100	13:00	0,005	15	0,688
11	110	13:10	0,005	15	0,685
12	120	13:20	0,005	15	0,675
13	130	13:30	0,005	15	0,672
14	140	13:40	0,005	15	0,666
15	150	13:50	0,005	15	0,658
16	160	14:00	0,005	15	0,650
17	170	14:10	0,005	15,5	0,675
18	180	14:20	0,005	15,5	0,850
19	190	14:30	0,005	15,5	1,055
20	200	14:40	0,005	15,5	1,385
21	210	14:50	0,005	15,5	1,655
22	220	15:00	0,005	15,5	1,810

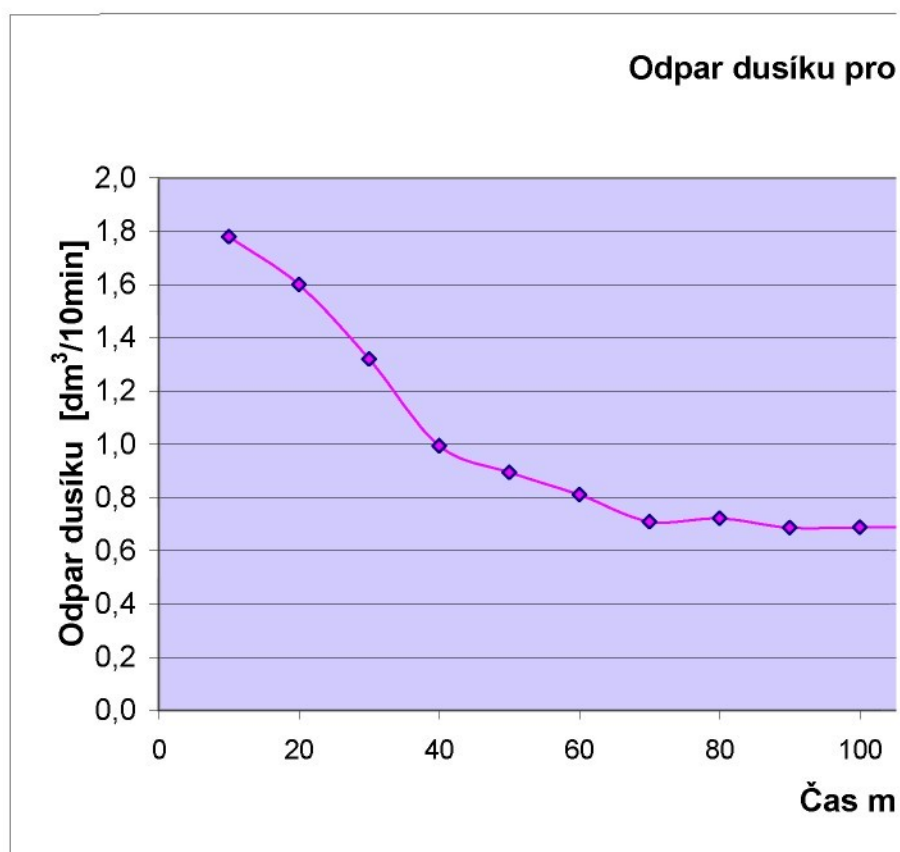
Měření odparu stínící nádoby

14:10

0,005

15,5

3,330



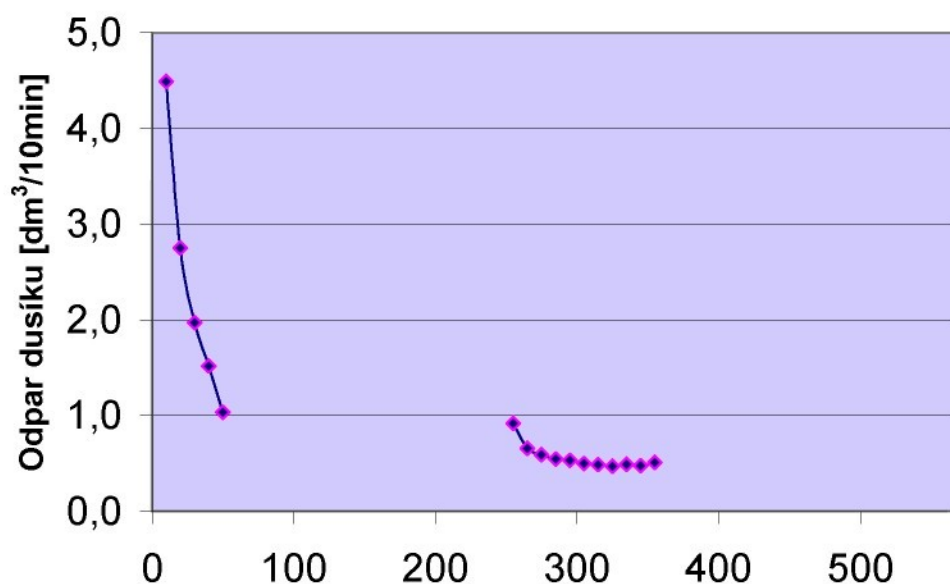
Výpočet izolace - druhé měření

Měření odparu N₂ z měřicího válce

Číslo měření	Čas	Tlak [torr]	čas	Průtok [dm³/10min]
0	17:35	0,006	0	

1	17:45	0,006	10	4,490
2	17:55	0,006	20	2,750
3	18:05	0,006	30	1,970
4	18:15	0,005	40	1,520
5	18:25	0,005	50	1,035
Zaliti dusíkem				
6	21:50	0,004	255	0,92
7	22:00	0,004	265	0,66
8	22:10	0,004	275	0,592
9	22:20	0,004	285	0,546
10	22:30	0,004	295	0,532
11	22:40	0,004	305	0,497
12	22:50	0,004	315	0,487
13	23:00	0,004	325	0,471
14	23:10	0,004	335	0,493
15	23:20	0,004	345	0,475
16	23:30	0,004	355	0,513
Zaliti dusíkem				
17	12:30	0,004	770	0,758
18	12:40	0,004	780	0,557
19	12:50	0,004	790	0,46
20	13:00	0,004	800	0,409
21	13:10	0,004	810	0,393
22	13:20	0,004	820	0,377
23	13:30	0,004	830	0,38
24	13:40	0,004	840	0,372
25	13:50	0,004	850	0,378
26	14:00	0,004	860	0,38
27	14:10	0,004	870	0,375
28	14:20	0,004	880	0,362
29	14:30	0,004	890	0,384
30	14:40	0,004	900	0,369
31				
				0,33

Odpar dusíku pro 43 vrstev izola



0	100	200	300	400	500
Čas měření [min]					

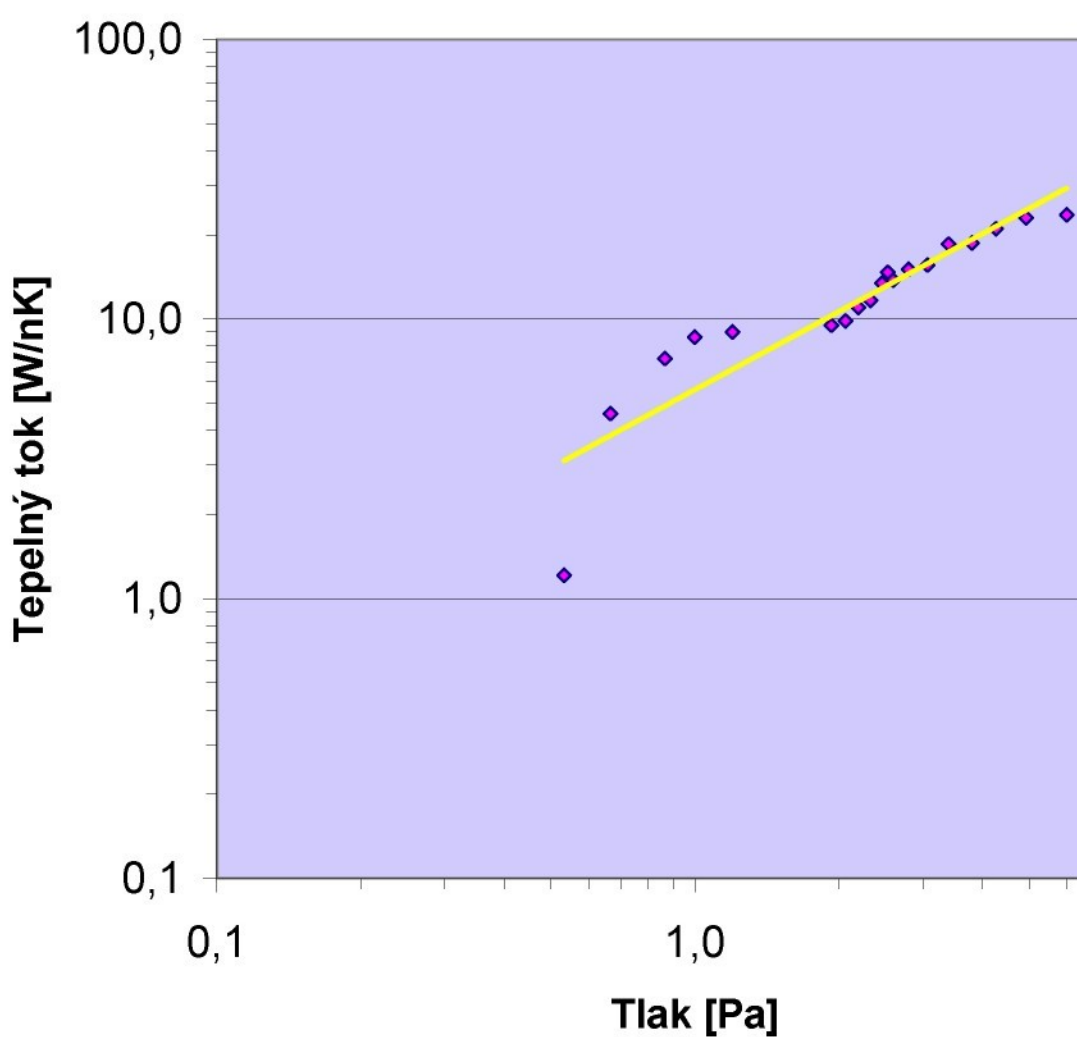
Měření odparu při zhoršování vakua

Číslo měření	Čas	Čas	Počet zavzdušnění	Tlak [torr]
	14:40			0,004
1	14:54	0,00	3	0,0050
2	15:10	16,00	3	0,0065
3	15:22	28,00	3	0,0075
4	15:36	42,00	3	0,0090
5	16:24	90,00	3	0,0060
6	16:30	96,00	9	0,0095
7	17:07	133,00	9	0,0190
8	17:21	147,00	9	0,0450
9	17:22	148,00		0,0370
10	17:23	149,00		0,0320
11	17:24	150,00		0,0285
12	17:25	151,00		0,0255
13	17:26	152,00		0,0230
14	17:27	153,00		0,0210
15	17:28	154,00		0,0195
16	17:29	155,00		0,0185
17	17:30	156,00		0,0175
18	17:31	157,00		0,0165
19	17:32	158,00		0,0155
20	17:33	159,00		0,0145

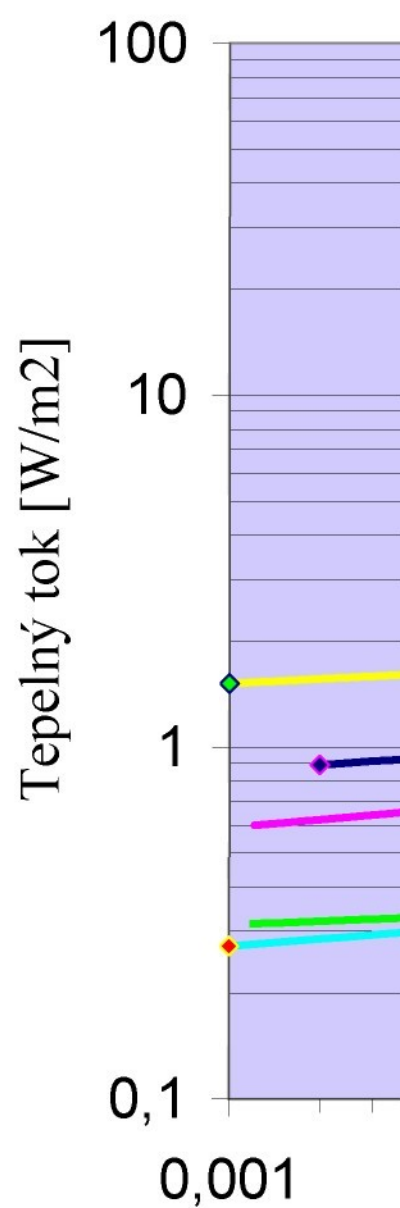
Číslo měření	Tlak [torr]	Průtok [dm ³ /min]	Průtok [m ³ /s]	Počet zavzdušnění
	0,004	0,033	0,00000055	
1	0,004	0,037	0,00000062	
2	0,0050	0,140	0,00000233	3
3	0,0065	0,220	0,00000367	3
4	0,0075	0,263	0,00000438	3
5	0,0090	0,274	0,00000457	3
6	0,0145	0,290	0,00000483	9
7	0,0155	0,300	0,00000500	
8	0,0165	0,335	0,00000558	

9	0,0175	0,355	0,00000592	
10	0,0185	0,410	0,00000683	
11	0,0190	0,448	0,00000747	9
12	0,0195	0,420	0,00000700	
13	0,0210	0,460	0,00000767	
14	0,0230	0,475	0,00000792	
15	0,0255	0,565	0,00000942	
16	0,0285	0,570	0,00000950	
17	0,0320	0,640	0,00001067	
18	0,0370	0,700	0,00001167	
19	0,0450	0,720	0,00001200	

Závislost tepelného toku na tlaku



	Tlak	Tepelný tok
NASA	0,002	0,89
NASA	0,01	1
NASA	0,1	1,4
NASA	1	6,8
NASA	10	50
NASA	100	100
Ferox 20	0,666	2,4
Ferox1 43	0,533	1,187
Ferox2 43	0,533	1,08
Linde SI 10	0,001	1,518
Linde SI 10	0,0066	1,639
Linde SI 10	0,013	1,639
Linde SI 10	0,133	1,928
Linde SI 10	1,33	6,102
Linde SI 10	3,99	15,18
Linde SI 62	0,001	0,272
Linde SI 62	0,006	0,305
Linde SI 62	0,013	0,3058
Linde SI 62	0,133	0,466
Linde SI 62	1,330	1,867
Linde SI 62	3,990	5,6165
Ferox směrnice	0,667	4,592
Ferox směrnice	0,867	7,215
Ferox směrnice	1,000	8,626
Ferox směrnice	1,200	8,987
Ferox směrnice	1,933	9,511
Ferox směrnice	2,066	9,839
Ferox směrnice	2,206	10,987
Ferox směrnice	2,330	11,643
Ferox směrnice	2,466	13,447
Ferox směrnice	2,533	14,693
Ferox směrnice	2,600	13,447
Ferox směrnice	2,800	15,087
Ferox směrnice	3,066	15,579
Ferox směrnice	3,400	18,531
Ferox směrnice	3,800	18,695
Ferox směrnice	4,266	20,99
Ferox směrnice	4,933	22,958
Ferox směrnice		



Prochlazování	0,799	14,726
Prochlazování	0,799	9,02
Prochlazování	0,666	5
Prochlazování	0,533	1,68
Prochlazování	0,399	1,18

Linde SI 43	0,001	0,29
Linde SI 43	0,006	0,305
Linde SI 43	0,013	0,3058
Linde SI 43	0,133	0,466
Linde SI 43	1,330	1,867
Linde SI 43	3,990	5,6165

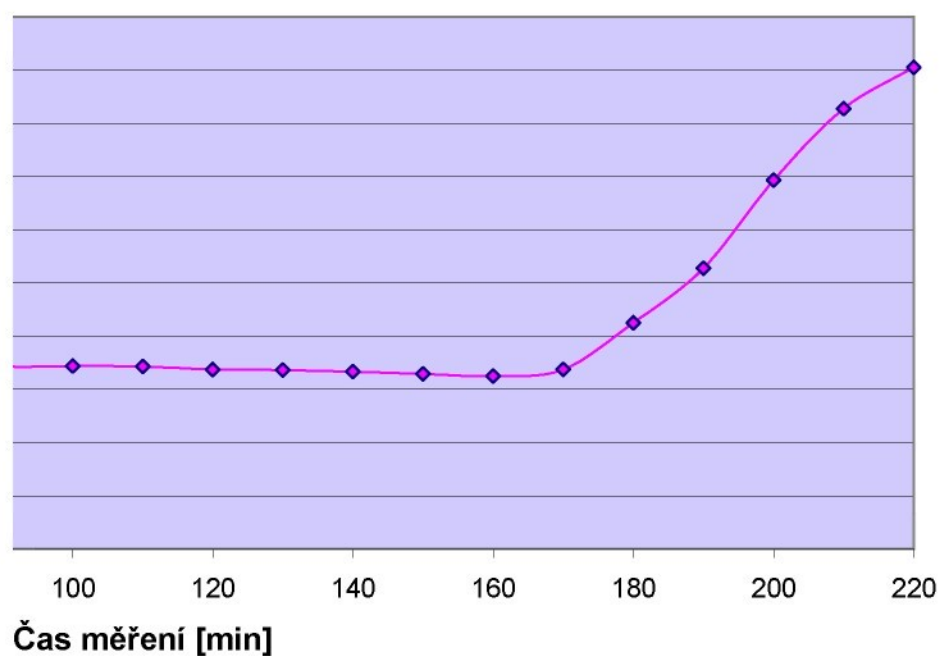
Linde SI 20	0,001
Linde SI 20	0,0066
Linde SI 20	0,013
Linde SI 20	0,133
Linde SI 20	1,33
Linde SI 20	3,99

Průtok [m ³ /s]	Skutečný odpar dusíku	Přivedené teplo izolací	Tepelný tok izolací	Souč. tepelné vodivosti
0,00000297	0,00000334	0,664388	6,5911520	0,00014846
0,00000267	0,00000300	0,597203	5,9246310	0,00013344
0,00000220	0,00000247	0,492692	4,8878206	0,00011009
0,00000166	0,00000187	0,371385	3,6843799	0,00008299
0,00000149	0,00000168	0,334060	3,3140905	0,00007464
0,00000135	0,00000152	0,302334	2,9993444	0,00006756
0,00000118	0,00000133	0,265009	2,6290550	0,00005922
0,00000120	0,00000135	0,269488	2,6734897	0,00006022
0,00000115	0,00000129	0,256424	2,5438884	0,00005730

0,00000115	0,00000129	0,256797	2,5475913	0,00005738
0,00000114	0,00000128	0,255677	2,5364826	0,00005713
0,00000113	0,00000127	0,251945	2,4994537	0,00005630
0,00000112	0,00000126	0,250825	2,4883450	0,00005605
0,00000111	0,00000125	0,248586	2,4661276	0,00005555
0,00000110	0,00000123	0,245600	2,4365045	0,00005488
0,00000108	0,00000122	0,242614	2,4068813	0,00005421
0,00000113	0,00000127	0,251945	2,4994537	0,00005630
0,00000142	0,00000159	0,317264	3,1474602	0,00007089
0,00000176	0,00000198	0,393781	3,9065536	0,00008799
0,00000231	0,00000260	0,516954	5,1285087	0,00011551
0,00000276	0,00000310	0,617732	6,1282902	0,00013803
0,00000302	0,00000339	0,675586	6,7022388	0,00015096

0,333

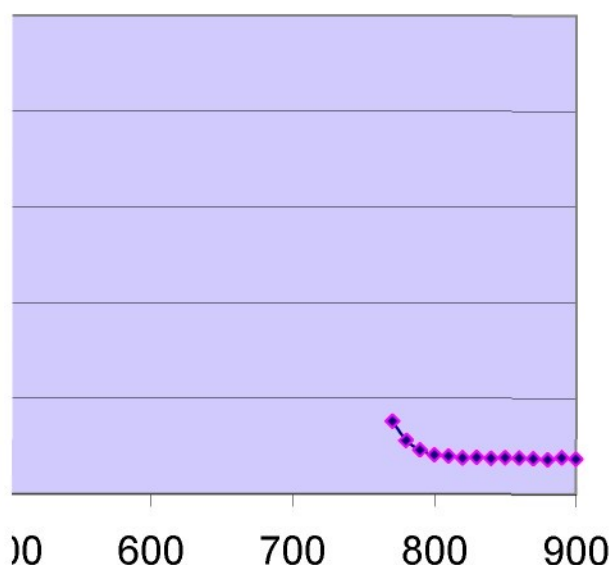
ku pro 21 vrstev izolace



Průtok [m ³ /s]	Skutečný odpor dusíku	Přivedené teplo izolací	Tepelný tok izolací	Souč. tepelné vodivosti

0,00000748	0,00000825	1,641959	14,7260877	0,00093129
0,00000458	0,00000505	1,005654	9,0193187	0,00057039
0,00000328	0,00000362	0,720414	6,4611120	0,00040861
0,00000253	0,00000279	0,555852	4,9852235	0,00031527
0,00000173	0,00000190	0,378492	3,3945436	0,00021467
0,00000153	0,00000169	0,336437	3,0173721	0,00019082
0,00000110	0,00000121	0,241357	2,1646365	0,00013689
0,00000099	0,00000109	0,216490	1,9416133	0,00012279
0,00000091	0,00000100	0,199668	1,7907447	0,00011325
0,00000089	0,00000098	0,194548	1,7448282	0,00011034
0,00000083	0,00000091	0,181749	1,6300369	0,00010309
0,00000081	0,00000089	0,178092	1,5972394	0,00010101
0,00000079	0,00000086	0,172241	1,5447633	0,00009769
0,00000082	0,00000091	0,180286	1,6169179	0,00010226
0,00000079	0,00000087	0,173704	1,5578823	0,00009852
0,00000086	0,00000094	0,187600	1,6825129	0,00010640
0,00000126	0,00000139	0,277195	2,4860522	0,00015722
0,00000093	0,00000102	0,203691	1,8268220	0,00011553
0,00000077	0,00000084	0,168218	1,5086860	0,00009541
0,00000068	0,00000075	0,149568	1,3414187	0,00008483
0,00000066	0,00000072	0,143717	1,2889426	0,00008151
0,00000063	0,00000069	0,137866	1,2364666	0,00007820
0,00000063	0,00000070	0,138963	1,2463059	0,00007882
0,00000062	0,00000068	0,136038	1,2200678	0,00007716
0,00000063	0,00000069	0,138232	1,2397464	0,00007840
0,00000063	0,00000070	0,138963	1,2463059	0,00007882
0,00000063	0,00000069	0,137135	1,2299071	0,00007778
0,00000060	0,00000066	0,132381	1,1872703	0,00007508
0,00000064	0,00000071	0,140426	1,2594249	0,00007965
0,00000062	0,00000068	0,134940	1,2102286	0,00007654
0,00000055	0,00000061	0,120678	1,0823182	0,00006845

v izolace



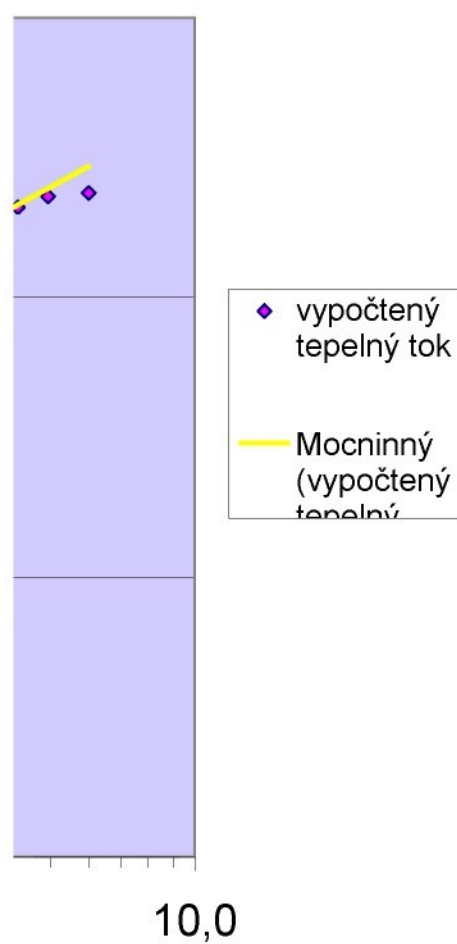
10	500	700	800	900
nin]				

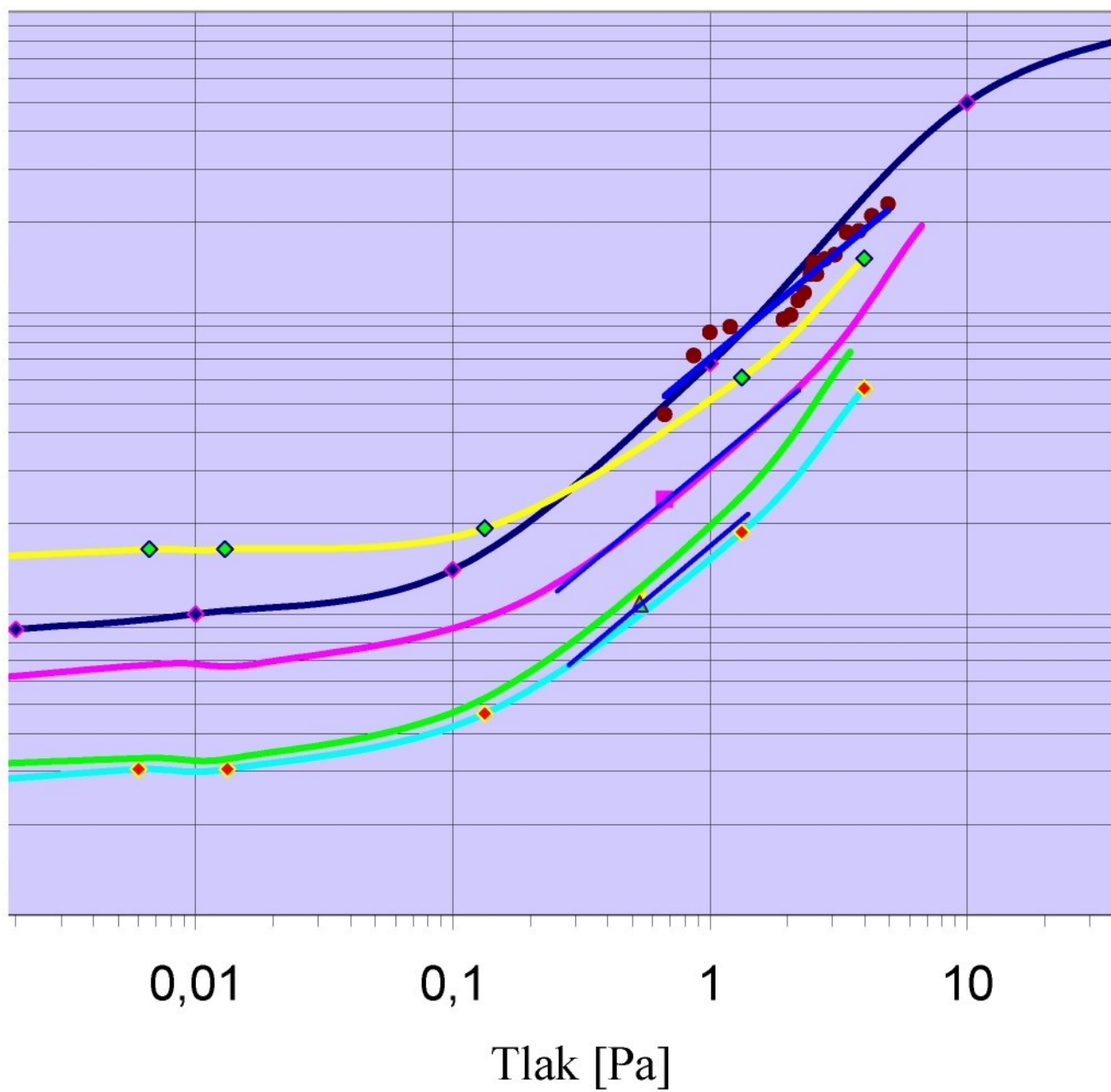
Průtok [dm ³ /min]	Průtok [m ³ /s]	Tlak [Pa]
0,0396	0,00000066	0,533288
0,140	0,00000233	0,66661
		0
0,220	0,00000367	0,866593
		0
0,263	0,00000438	0,999915
		0
0,274	0,00000457	1,199898
		0
0,057	0,00000095	0,799932
		0
0,200	0,00000333	1,266559
		0
0,448	0,00000747	2,533118
		0
0,690	0,00001150	5,99949
0,700	0,00001167	4,932914
0,640	0,00001067	4,266304
0,570	0,00000950	3,799677
0,565	0,00000942	3,399711
0,475	0,00000792	3,066406
0,460	0,00000767	2,799762
0,420	0,00000700	2,599779
0,410	0,00000683	2,466457
0,355	0,00000592	2,333135
0,335	0,00000558	2,199813
0,300	0,00000500	2,066491
0,290	0,00000483	1,933169

Tlak [Pa]	Skutečný odpar dusíku	Přivedené teplo izolací	Tepelný tok izolací	Souč. tepelné vodivosti
0,05			0	0,00003100
0,533	0,00000061	0,120678	1,082	0,00006845
0,533	0,00000068	0,135306	1,214	0,00007674
0,667	0,00000257	0,511969	4,592	0,00029038
0,867	0,00000404	0,804523	7,215	0,00045631
1,000	0,00000483	0,961771	8,626	0,00054550
1,200	0,00000503	1,001997	8,987	0,00056832
1,933	0,00000533	1,060508	9,511	0,00060150
2,066	0,00000551	1,097077	9,839	0,00062225
2,200	0,00000615	1,225069	10,987	0,00069484

2,333	0,00000652	1,298208	11,643	0,00073632
2,466	0,00000753	1,499339	13,447	0,00085040
2,533	0,00000823	1,638302	14,693	0,00092922
2,600	0,00000771	1,535908	13,775	0,00087114
2,800	0,00000845	1,682185	15,087	0,00095411
3,066	0,00000872	1,737039	15,579	0,00098522
3,400	0,00001038	2,066162	18,531	0,00117190
3,800	0,00001047	2,084447	18,695	0,00118227
4,266	0,00001175	2,340431	20,990	0,00132746
4,933	0,00001285	2,559847	22,958	0,00145191
5,999	0,00001322	2,632985	23,614	0,00149339

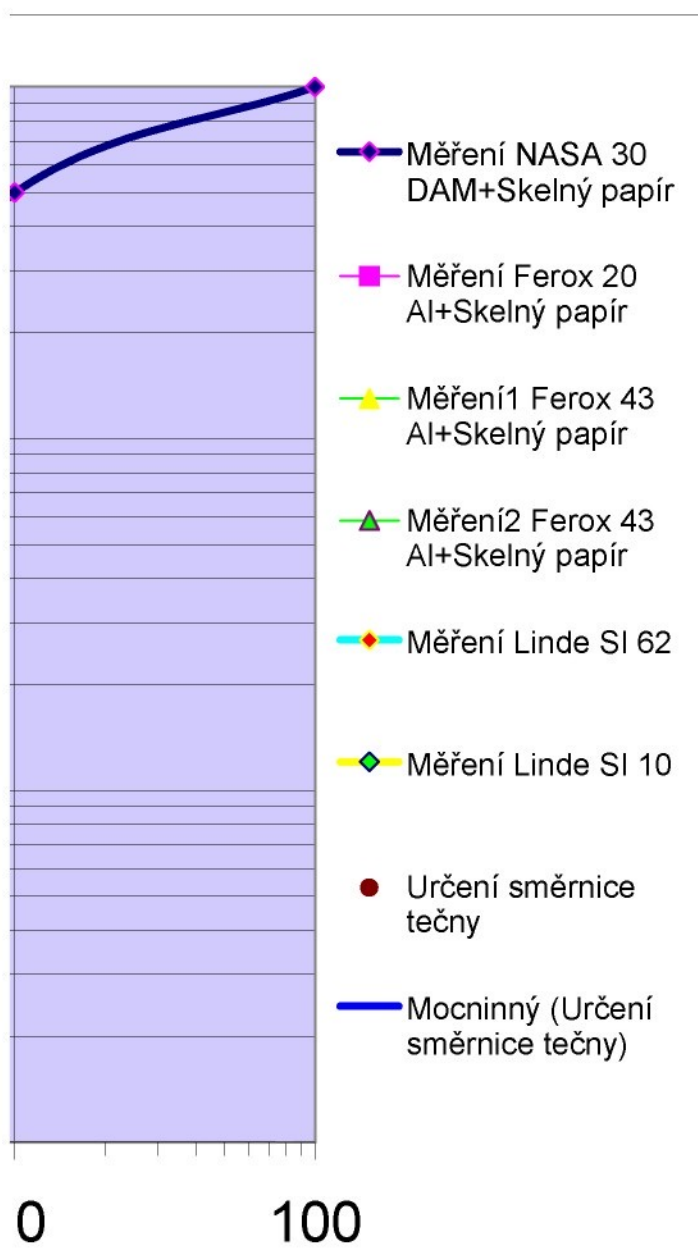
tlaku





1,518
1,639
1,639
1,928
6,102
15,18

Číslo měření	Čas	Tlak [ton]	Teplota	Průtok [dm ³ /10mi
0	17:35	0,006	14,90	
1	17:45	0,006	14,90	4,490
2	17:55	0,006	14,90	2,750
3	18:05	0,006	14,90	1,970
4	18:15	0,005	15,00	1,520
5	18:25	0,005	15,00	1,035
Zaliti dusíkem				
6	21:50	0,004	14,00	0,92
7	22:00	0,004	14,40	0,66
8	22:10	0,004	14,40	0,592
9	22:20	0,004	14,20	0,546
10	22:30	0,004	14,10	0,532
11	22:40	0,004	14,00	0,497
12	22:50	0,004	14,00	0,487
13	23:00	0,004	13,80	0,471
14	23:10	0,004	13,80	0,493
15	23:20	0,004	13,50	0,475
16	23:30	0,004	13,40	0,513
Zaliti dusíkem				
17	12:30	0,004	14,90	0,758
18	12:40	0,004	14,90	0,557
19	12:50	0,004	14,90	0,46
20	13:00	0,004	14,90	0,409
21	13:10	0,004	14,90	0,393
22	13:20	0,004	14,90	0,377
23	13:30	0,004	14,90	0,38
24	13:40	0,004	15,00	0,372
25	13:50	0,004	15,00	0,378





Protok [m ³ /s]
0,00000748
0,00000458
0,00000328
0,00000253
0,00000173
0,00000153
0,00000110
0,00000099
0,00000091
0,00000089
0,00000083
0,00000081
0,00000079
0,00000082
0,00000079
0,00000086
0,00000126
0,00000093
0,00000077
0,00000068
0,00000066
0,00000063
0,00000063
0,00000062
0,00000063

