

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270013 – Stavba energetických strojů a zařízení

Studijní specializace: Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh systému chlazení a topení pro mlžnou komoru

Autor: Bc. Jiří Frank

Vedoucí práce: Ing. Michal Volf

Konzultant: Ing. Martin Pelikán

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojí
Akademický rok: 2021/2022

Studijní program: Stavba energetických strojů a zařízení
Forma studia: Prezenční
Specializace/kombinace: Stavba jaderně energetických
zařízení (SJEZ)

Podklad pro zadání DIPLOMOVÉ práce studenta

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří FRANK**
Osobní číslo: **S21N0039P**
Adresa: Luční 21, Aš, 35201 Aš 1, Česká republika
Téma práce: Návrh systému chlazení a topení pro mlžnou komoru
Téma práce anglicky:
Jazyk práce: Čeština
Vedoucí práce: Ing. Michal Volf
Katedra energetických strojů a zařízení

Zásady pro vypracování:

1. Popis mlžné komory a definice podmínek její funkčnosti.
2. Konstrukční návrh vizualizačního prostoru včetně 3D modelu.
3. Návrh systému chlazení a topení včetně souvisejících. bilančních výpočtů.
4. Ekonomické zhodnocení provedeného návrhu.
5. Závěr.

Konzultant DP: Ing. Martin Pelikán (Katedra energetických strojů a zařízení)

Seznam doporučené literatury:

- WILSON, J. G.: The Principles of Cloud-Chamber Technique, Cambridge University Press, 2014, ISBN 978-1107680890
- Woithe, J. (2016). CLOUD CHAMBER. S'Cool LAB – Do-it-yourself manual. Version 7, online: <https://scoollab.web.cem.ch/>
- Clinton Chaloner. (1997). The Most Wonderful Experiment in the World: A History of the Cloud Chamber. The British Journal for the History of Science, 30(3), 357–374. <http://www.jstor.org/stable/4027867>
- Hubka, Vladimír. Konstrukční nauka: obecný model postupu při konstruování. Zürich: Heurista, 1995. ISBN 80-901135-0-8

Podpis studenta:

Datum:

Podpis vedoucího práce:

Datum:

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Volfovi za mnoho užitečných rad, ochotu a hlavně čas, který mi věnoval v průběhu psaní mé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu, kterou mi poskytovali během psaní diplomové práce a po celou dobu studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Frank	Jméno Jiří		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Volf	Jméno Michal		
PRACOVISTĚ	ZČU - FST - KKE			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh systému chlazení a topení pro mlžnou komoru			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	58	TEXTOVÁ ČÁST	55	GRAFICKÁ ČÁST	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato diplomová práce obsahuje návrh chlazení mlžné komory. V rámci toho vznikl konstrukční návrh vizuálního prostoru mlžné komory a vypočet cyklu chladicí smyčky s jeho ekonomickým zhodnocením. Tato mlžná komora je plánována postavit na fakultě strojní.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	mlžná komora, kondenzace, záření, chlazení

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Frank	Name Jiří
STUDY PROGRAMME	N0715A270017 Design engineering of machines and technical devices	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Volf	Name Michal
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of the cooling and heating system for the cloud chamber	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power system engineering	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	58	TEXT PART	55	GRAPHICAL PART	-
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis contains the design of the cooling system of the cloud chamber. It includes the structural design of the visual space of the cloud chamber and the calculation of the cooling loop cycle with its economic evaluation. This cloud chamber is planned to be built at the Faculty of mechanical Engineering.
KEY WORDS	cloud chamber, condensation, radiation, cooling

Obsah

Úvod	7
1 Mlžná komora	8
1.1 Vývoj mlžných komor	8
1.1.1 Wilsonova expanzní mlžná komora	8
1.1.2 Langsdorfova difúzní mlžná komora	10
1.1.3 Bublínkové komory	12
2 Záření v mlžných komorách	14
2.1 Neionizující záření	14
2.2 Ionizující záření	14
2.2.1 Záření alfa (α)	15
2.2.2 Záření beta+ (β^-)	15
2.2.3 Záření beta- (β^+)	15
2.2.4 Záření gama (γ)	16
2.2.5 Neutronové záření	16
2.3 Kosmické záření	17
2.4 Zdroje záření	18
3 Podmínky funkčnosti mlžné komory	20
3.1 Tvorba zkondenzovaných kapiček	21
3.2 Tvorba kapiček na nabitých částicích	21
3.3 Určení teplotního spádu	23
4 Konstrukční návrh vizuálního prostoru	26
4.1 Černá deska	27
4.2 Chladič	28
4.3 Vnitřní rám s úkosem	29
4.4 Žlábek a nožičky	30
4.5 Vnitřní a vnější sklo	31
4.6 Konstrukce rámu pro smyčku pod napětím	32
4.7 Smyčka vyhřívání	33
4.8 Vnější rám	33
5 Návrh systému chlazení a topení	35
5.1 Výpočet odvedeného tepla	35
5.2 Návrh systému chlazení	37
5.2.1 Sekundární okruh chlazení	38
5.2.2 Primární okruh chlazení	39

5.3	Systém topení.....	45
6	Ekonomické zhodnocení provedeného návrhu.....	46
6.1	Ekonomické zhodnocení konstrukce vizuálního prostoru.....	46
6.1.1	Černá deska.....	46
6.1.2	Chladič.....	46
6.1.3	Vnitřní rám.....	46
6.1.4	Žlábek a nožičky.....	46
6.1.5	Krycí skla.....	47
6.1.6	Rám elektrického Pole.....	47
6.1.7	Odporový kabel k vyhřívání alkoholu.....	47
6.1.8	Vnější rám.....	47
6.1.9	Celkové shrnutí nákladů konstrukčního řešení vizuálního prostoru.....	47
6.2	Ekonomické zhodnocení komponent systému chlazení.....	48
6.2.1	Čerpadlo sekundárního okruhu chlazení.....	48
6.2.2	Výparník.....	48
6.2.3	Kompresor.....	48
6.2.4	Kondenzátor.....	48
6.2.5	Expanzní ventil.....	48
6.2.6	Celkové zhodnocení komponent systému chlazení.....	48
6.3	Ekonomické zhodnocení provozu mlžné komory.....	49
6.4	Závěr ekonomického hodnocení.....	49
7	Závěr.....	50
	Použitá literatura.....	51

Přehled použitých zkratk a symbolů

α	Součinitel přestupu tepla [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$]
p	Tlak [Pa]
γ	Povrchové napětí [N/m]
r	Poloměr kondenzačního jádra [m]
M	Molární hmotnost [kg/mol]
R	Relativní plynová konstanta [$\text{J}/(\text{mol K})$]
T	Termodynamická teplota [K]
ρ	Hustota [kg/m^3]
e	Hodnota elementárního náboje [C]
ε	Permeabilita [H/m]
S	Hodnota přesycení [-]
D	Koeficient difuze [m/s]
λ, κ	Součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}/(\text{m K})$]
c_p	Měrná tepelná kapacita [$\text{J}/(\text{kg K})$]
\dot{m}	hmotnostní tok [kg/s]

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem chlazení a topení mlžné komory, která se plánuje postavit na Katedře energetických strojů a zařízení Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. Cílem výstavby modelu je propagace energetiky širší veřejnosti, a hlavně potenciálním studentům na Fakultě strojní. Mlžná komora je zařízení, které v minulosti sloužilo ke studiu kvantových částic a s tím spojeného záření. V dnešní době však byla mlžná komora nahrazena sofistikovanějšími zařízeními, které dokážou přesněji klasifikovat vlastnosti dané částice. Díky své atraktivnosti je mlžná komora využívána jako pedagogická pomůcka k znázornění termodynamických jevů při vypařování a kondenzaci kapalin a vizualizaci ionizujícího záření kolem nás.

V úvodní kapitole je stručně popsána funkce mlžné komory a její vývoj Charlesem Thomsonem Reesem. Další kapitola je věnována druhům záření, které je možno v komoře sledovat a jakým způsobem toto záření vzniká. Třetí kapitola se zabývá stanovením podmínek funkce návrhu mlžné komory. V rámci toho je popsán detailnější princip chodu mlžné komory, působení nabitých částic jako kondenzační jádra přesyceného alkoholu a vliv teplot na hodnoty přesycení alkoholových par v komoře. Ve čtvrté kapitole je předveden návrh vizuálního prostoru mlžné komory a jsou okomentovány nejdůležitější komponenty této komory. Pátá kapitola se zabývá výpočtem systému chlazení a topení komory. V kapitole je uvedeno schéma chlazení a uvedeny parametry charakteristické pro tento cyklus. Výpočet byl proveden pro dvě chladiva, a to chladivo R410A a chladivo R134A. V poslední kapitole je provedeno ekonomické zhodnocení navrženého konstrukčního řešení a provozních nákladů mlžné komory.

1 Mlžná komora

Mlžná komora je jedním z nejjednodušších zařízení určených pro zkoumání elementárních částic. Jejím základním principem je přesycení plynné látky v uzavřeném prostoru, které vyvozuje nestabilní stav dané látky. Při průchodu ionizujícími částicemi přesycenou látkou pak vytváří kondenzační stopu, která znázorňuje trajektorii částice. Pomocí délky, tvaru, tloušťky a dalších charakteristik kondenzační stopy se dají zjistit vlastnosti prolétající částice, avšak v dnešní době jsou pro detekci ionizujícího záření využity modernější sofistikovanější zařízení. V průběhu let se z významného výzkumného zařízení vyvinula spíše pedagogická pomůcka, která slouží k vysvětlení základních fyzikálních principů termomechaniky a částicové fyziky. Vzhledem k atraktivnosti mlžné komory a jejímu využívání v minulosti slouží hojně jako propagační zařízení jaderné energetiky. [1]

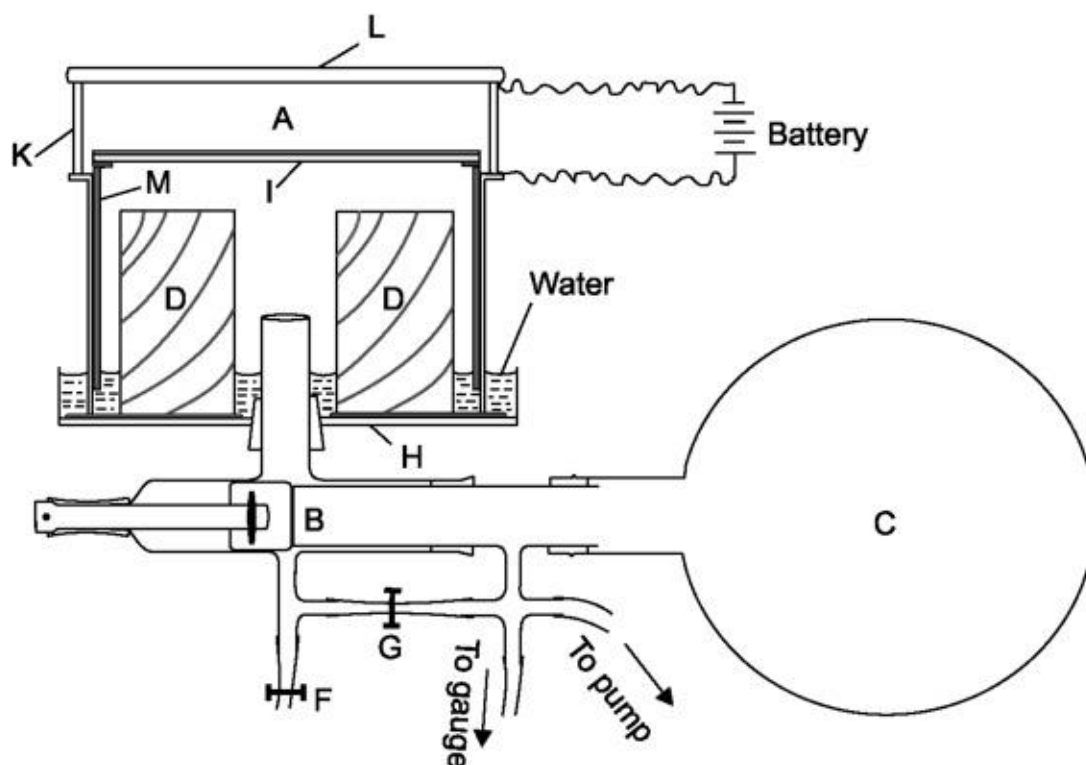
Dostatečně přesyceného stavu plynů lze dosáhnout pomocí různých konstrukčních provedení mlžné komory. V následujících podkapitolách je přiblížen vývoj mlžných komor a princip jejich funkce.

1.1 Vývoj mlžných komor

1.1.1 Wilsonova expanzní mlžná komora

Princip mlžné komory poprvé studoval Charles Thomson Rees Wilson v laboratoři v Cambridge v roce 1910, jako součást svého výzkumu atmosférických jevů. Konkrétně se zabýval vznikem kondenzačních jader a s tím související tvorbou mlhy. U původní Wilsonovi mlžné komory bylo dosahováno požadovaného přesycení par pomocí cyklického ochlazení vzduchu pod bod kondenzace vody, které bylo vyvozeno pomocí adiabatické expanze. Vzhledem k využití adiabatické expanze proto hovoříme o tzv. **expanzní mlžné komoře**. Kvůli cyklickému ochlazení však dostatečné přesycení trvalo pouze 10 až 20 milisekund, což způsobovalo, že ionty vzniklé průletem ionizující částice mezi jednotlivými expanzemi, se stačili rozptýlit dříve, než na nich stihla pára zkondenzovat. Důsledkem toho vznikalo více nekoherentní stop, které však měly nulovou vypovídající hodnotu o vlastnostech prolétající částice. Aby se Wilson tomuto problému vyhnul, doplnil vizuální prostor o zdroj elektrického pole, které tyto ionty odvedlo pryč z vizuálního prostoru. Schematický náčrt původní Wilsonovi mlžné komory je ukázán na obrázku Obr. 1. [1] [2]

Jak již bylo popsáno výše, Wilsonova Mlžná komora pracovala na principu adiabatické expanze. Ta byla vyvozena předchozím stlačením, které obstarával píst. Na Obr. 1 je schéma Wilsonovi mlžné komory s popisem jednotlivých částí. Písmenem **A** je označen vizuální prostor mlžné komory. Jednalo se o skleněný válec o průměru 16,5 cm a výšce 3,4 cm. Pod touto komorou byl umístěn píst **M**, který stlačoval parovzdušné směsi v komoře **A**. Pohyb pístu byl vyvozen tlakovými rozdíly v komoře **A** a v oblasti pod pístem, která byla z části zaplavena

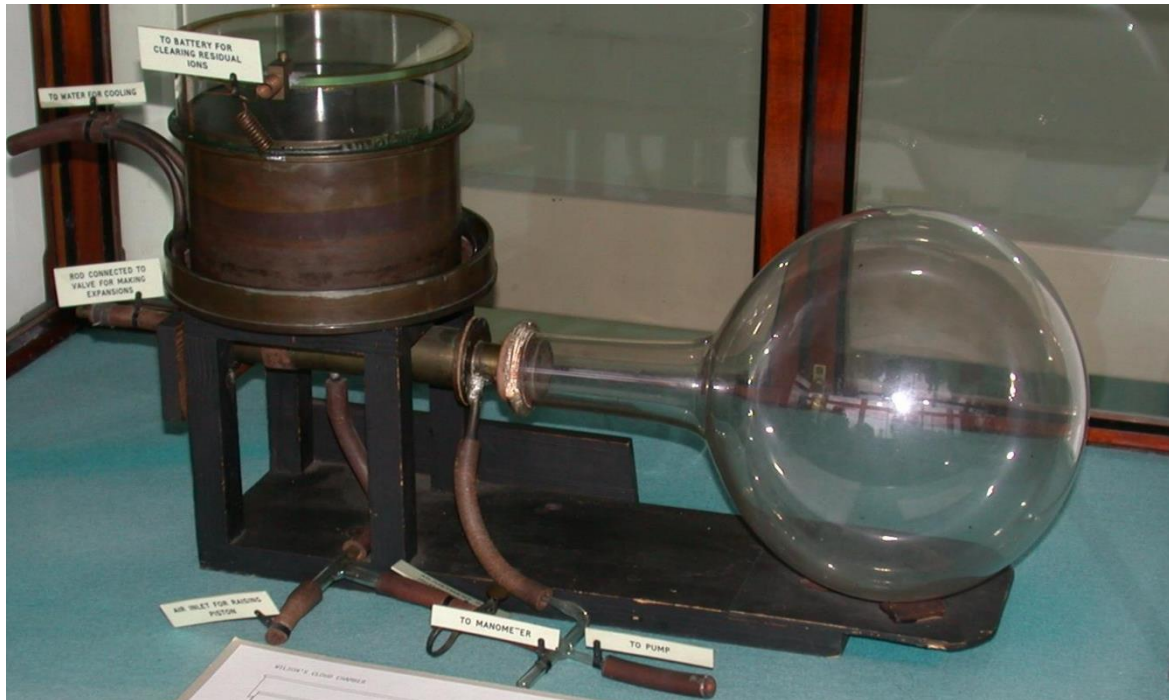


Obr. 1 Původní návrh Wilsonovi mlžné komory [3]

vodou do výšky 2 cm. Kulatá skleněná komora **C** sloužila jako komora pro tvorbu vakua, kterého bylo dosaženo pomocí vývěvy. Přenastavením ventilu **B** došlo k prudkému snížení tlaku v oblasti pod pístem a tím tedy i k posunutí pístu směrem dolů. Tento pohyb zapříčinil rychlé zvětšení objemu směsi v komoře **A**, téměř bez výměny tepla s okolím, což způsobilo prudké ochlazení směsi. Pohyb pístu byl propojen se spouští fotoaparátu, takže bylo možné v době maximálního podchlazení zaznamenat průlet částice a vzniklou kondenzační stopu. Písmeny **F** a **G** jsou označeny kohouty na pryžových hadičkách, které sloužily k naplnění komory vzduchem a ke správnému nastavení pístu pro požadovaný počáteční a konečný objem. **D** je dutý dřevěný válec, který snižuje objem vzduchu procházejícího spojovacími trubicemi při každé expanzi. **L** a **K** jsou skleněné stěny nádoby vizuálního prostoru. Pod skleněným dnem **I** byl vršek pístu natřen černou barvou, aby došlo ke zvýšení kontrastu kondenzačních stop. Dno **H** prostoru pod pístem **M** bylo potaženo pryží, aby tlumilo náraz od pístu. [3] [4]

Přestože dobu expanze se podařilo udržet pouze několik milisekund, bylo možné tímto zařízením studovat veškeré tehdy známé ionizující záření a potvrdit tak několik fyzikální zákonitosti. V roce 1923 Wilson potvrdil Comptonův jev objevem Comptnova zpětného rázu elektronů. Dále byla pomocí mlžné komory objevena první antičástice *Pozitron*, první částice druhé generace, *Mion* a první podivná částice *Kaon*. Díky zkonstruování mlžné komory byl proto Charles Thomson Rees Wilson v roce 1927 oceněn Nobelovou cenou za Fyziku. [1] [3]

V roce 1933 Wilson inovoval konstrukci mlžné komory, čímž se stala snáze vyrobiteľnou. Chlazení parovzdušné směsi bylo vyvozeno adiabatickým poklesem tlaku, avšak nevýhoda v přerušování chlazení přetrvávala. Tento problém byl částečně překonán použitím Geigerových čítačů umístěných nad a pod vizuální komorou, které spouštěly její aktivaci, když zaznamenaly, že komorou prošla částice. [1] [5]

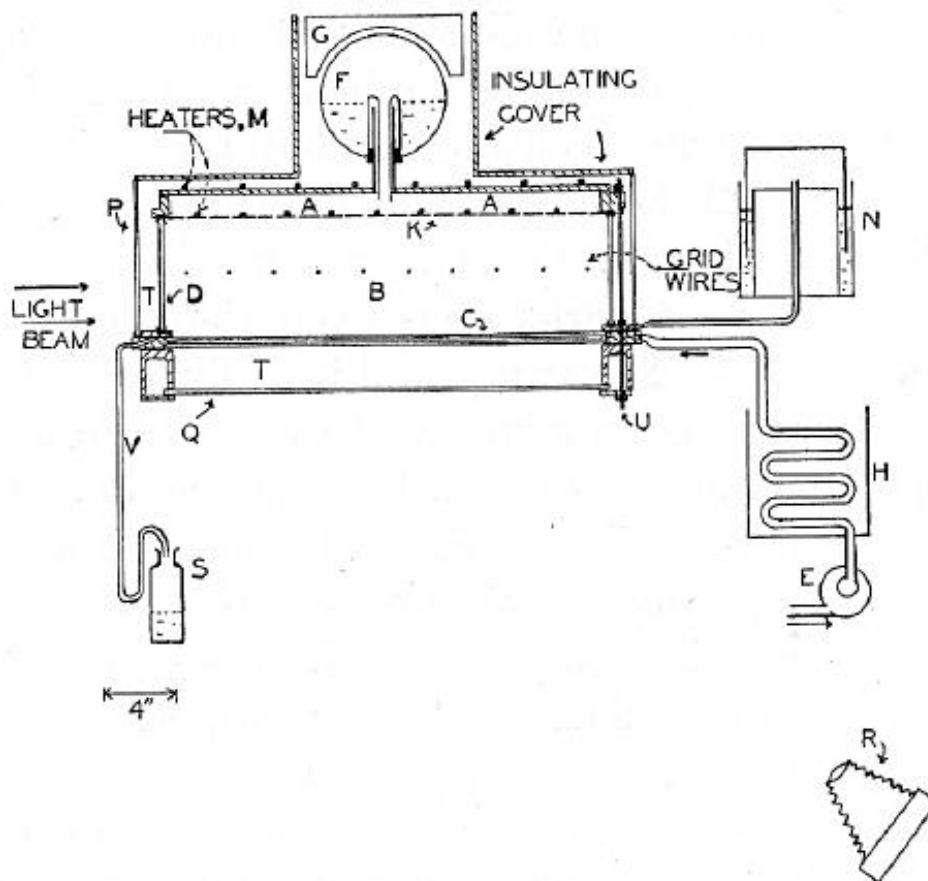


Obr. 2 Wilsonova mlžná komora [4]

1.1.2 Langsdorfova difúzní mlžná komora

Ve snaze zefektivnit konstrukci mlžné komory tak, aby bylo možno sledovat částice nepřetržitě, sestrojil Alexander Langsdorf v roce 1938 **difúzní mlžnou komoru**. Ta zajišťovala stabilní kontinuální podchlazení paroplynové směsi, takže bylo možné sledovat průlety částic v delším časovém horizontu. Schéma jeho návrhu je vyobrazeno na Obr. 3. [1] [6]

Difúzní mlžná komora pracuje na podobném principu jako expanzní, avšak potřebného podchlazení paroplynové směsi je docíleno jinou cestou. Na rozdíl od expanzních komor, kde se potřebného stavu směsi dosahuje adiabatickou expanzí, u difúzních komor je k dosažení potřebného nestabilního stavu použito kontinuálního chlazení, které zajistí že v malé vzdálenosti kolem chladicí desky se utvoří vrstva přesycené směsi. Průletem částice dojde k narušení nestabilního stavu což způsobí tvorbu kondenzační stopy. Další odlišností od Wilsonovi expanzní komory bylo to, že jako médium tvořící paroplynou směs byl použit alkohol, konkrétně methanol, který díky své těkavosti vytvoří potřebnou koncentraci alkoholu v okolní atmosféře rychleji než vodní páry. Jako druhá plynná složka směsi byl použit oxid uhličitý [6].



Obr. 3 Schéma Langsdorffovi mlžné komory [6]

Na Obr. 3 je vyobrazeno schéma původní Langsdorffovi difuzní mlžné komory s popsanými prvky. Písmenem **B** je označen vizuální prostor, ve kterém docházelo ke zvýraznění letících částic pomocí kondenzačních stop. Stěny této komory **D** byly vyrobeny ze skla. Písmenem **K** je označen vršek vizuálního prostoru, který byl vyroben z děrovaného plechu. Tyto otvory měly za úkol propojení komory **B** s komorou **A** a zajistit tak rovnoměrnou distribuci alkoholových par do vizuálního prostoru. Komora **A** byla propojena s rezervoárem alkoholu **F** ve kterém docházelo k odparu alkoholu a tvorbě paroplyné směsi. Děrovaná deska byla vyhřívána pomocí elektrických ohříváků **M**, aby byl zvýšen teplotní rozdíl mezi teplotou směsi na vstupu a teplotou na dně vizuální komory. Dno vizuální komory **C** bylo tvořeno dvěma pláty skla, mezi kterými proudilo chladící médium. Médium pohánělo čerpadlo **E** a bylo chlazeno průchodem skrz chladící spirálu **H**. Jako chladící médium byl použit suchý led, který byl obklopen kolem chladící spirály. Suchý led zaručoval dostatečné podchlazení až na -40°C . Zahřátá pára v horní části komory difundovala skrz plynný oxid uhličitý směrem dolů, dokud nedosáhla dna, tedy oblasti ochlazené pod kondenzační teplotu alkoholových par. Zde přesycené páry částečně kondenzovaly a zbylé nezkondenzované páry vytvořily přesycenou vrstvu o tloušťce přibližně jednoho palce. Zkapalněná látka byla posléze odvedena do rezervoáru **S**. Vzhledem k tomu že stěny a dno bylo vyrobeno ze skla, musel být celý proces prováděn za atmosférického tlaku, aby nedošlo k prasknutí skelných desek. Tento tlak měl vyrovnávat „kompenzátor objemu“ **H**. Mezi další zdokonalení patří mřížka z drátů, které při připojení ke zdroji vybudili elektrické

pole, což pomohlo usměrnit prolétající částice do pozorovací oblasti. Ionty, které vznikaly ve vrchní části komory, by bez tohoto elektrického pole padaly kolmo na desku ve formě nežádoucího „iontového deště“, který může způsobit vznik mlhy a následné snížení kvality kondenzačních stop ve spodní části komory. Usměrnění ionizujících částic elektrickým polem dále zvyšuje množství kondenzačních událostí, a tedy zlepšuje chod mlžné komory. I přes tyto pozitivní vlastnosti je možné tento typ komory provozovat i bez tohoto elektrického pole, avšak s horšími parametry. [6] [7]

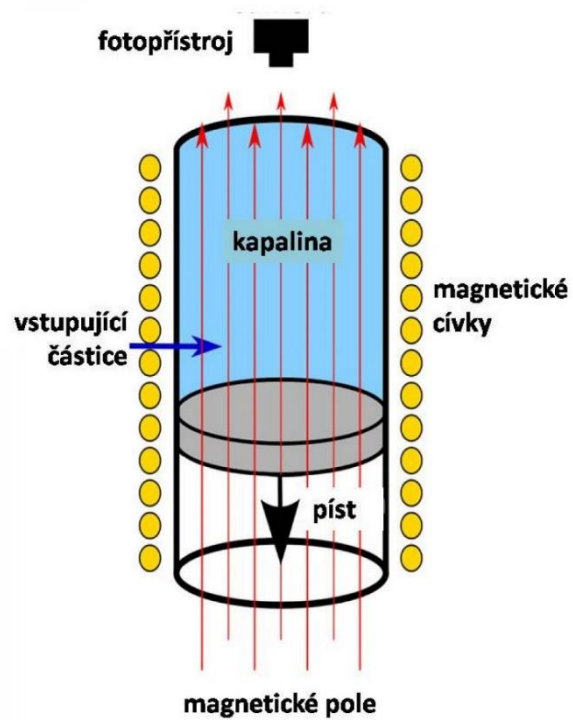
I přes velké množství výhod však měla Langsdorfova difúzní mlžná komora některé nevýhody. První takovou nevýhodou byla nutnost vodorovné pracovní plochy, což je nevhodné pro studium kosmického záření, které dopadá na zem převážně vertikálně. Velké rozměry komory komplikovaly využívání rovnoměrných magnetických polí pro vychylování drah. Omezená zásoba par ztěžovala použití silných ionizačních zdrojů. Kvůli vysoké koncentraci alkoholových par, na jakémkoli radioaktivním zdroji umístěném v komoře, kondenzovaly páry alkoholu, což snižovalo hodnotu přesycení ve vizuální části. Pro studium ionizujících částic a kondenzačních dějů byla jednoznačně lepší než expanzní mlžná komora, a to díky neustálému udržování přesyceného stavu. Právě proto se tento typ mlžné komory stal nejpoužívanějším a na stejném principu jsou vyráběny i soudobé mlžné komory. [1] [8]

Difúzní mlžné komory se však ve výzkumu jaderné a částicové fyziky začali používat až v 50. letech a byly brzy vytlačeny vynálezem Bublínkové komory, která se pro výzkum stala praktičtější. Difúzní mlžné komory se ale staly atraktivní pomůckou pro propagaci jaderné a částicové fyziky a zůstávají jí dodnes.

1.1.3 Bublínkové komory

Bublínková komora je jedním z prvních a velmi úspěšných zobrazovacích detektorů. Byla zkonstruována pro sledování částic ve vysokoenergetických srážkách částic. Klasická bublínková komora se skládá z uzavřené nádoby naplněné zkapalněným plynem. Komora je konstruována tak, aby bylo možné rychle měnit tlak uvnitř nádoby. Principem funkce bublínkové komory je krátkodobé přehřátí kapaliny v okamžiku, kdy se očekává průchod částic. To zajišťovalo větší stabilitu procesu oproti mlžným komorám a umožňovalo to také snadnější resetování celého procesu měření. Přehřátí kapaliny bylo dosaženo náhlým snížením tlaku, čímž se snížil bod varu zkapalněného plynu, a ten se tak přeměnil na přehřátou kapalinu. Když částice procházely touto kapalinou, vytvářely husté stopy lokalizovaných elektronových párů. Energie dodaná kapalině během tohoto procesu vytvořila podél dráhy částice drobné bublinky. Celá komora byla osvětlena a fotografována kamerou s vysokým rozlišením. Fotografie se pak analyzuje offline pro identifikaci částic a měření. Bublínkové komory byly velmi oblíbené v počátcích výzkumu fyziky vysokoenergetických částic, kdy aplikace vnějšího magnetického pole umožňovala měření hybnosti částic, a tím usnadňovala jejich identifikaci. Nevýhodou bublínkové komory je, že je velmi obtížné ji použít pro online analýzu a spouštění. Bublínkové komory byly nahrazeny jinými typy detektorů, např. drátovými komorami, které již fungovaly na principu elektrické detekce částic, což umožnilo systematičtější sběr dat. [1] [9]

Schéma bublinkové komory



Obr. 4 Princip bublinkové komory. [39]

2 Záření v mlžných komorách

Záření je energie, která se pohybuje z jednoho místa na druhé ve formě, kterou lze popsat jako vlny nebo částice. Jsme mu vystaveni v každodenním životě. Mezi nejznámější zdroje záření patří slunce, mikrovlnné trouby a rádia, Většina tohoto záření nepředstavuje pro naše zdraví žádné riziko. Některá však ano. Obecně platí, že záření je při nižších dávkách méně rizikové, ale při vyšších dávkách může být spojeno s vyššími riziky. V závislosti na druhu záření je třeba přijmout různá opatření, která chrání naše tělo a životní prostředí před jeho účinky a zároveň nám umožňují využívat jeho četné aplikace. Různé druhy záření vyžadují různá ochranná opatření, např. nízkoenergetická forma nazývaná "neionizující záření" může vyžadovat méně ochranných opatření než "ionizující záření" s vyšší energií. Normy pro ochranu lidí a životního prostředí stanovuje mezinárodní organizace pro atomovou energii (MAAE), která se dále stará o mírové využívání ionizujícího záření. [10] [11]

2.1 Neionizující záření

Neionizující záření je záření s nižší energií, které nemá dostatek energie na to, aby dokázalo svým působením odtrhnout elektrony od atomů nebo molekul, ať už v hmotě nebo v živém organismu. Jeho energie však může tyto molekuly rozkmitat, a tak produkovat teplo. Toto je kupříkladu typický projev **mikrovlnného záření**, a proto se používá v mikrovlnných troubách k ohřevu potravin. Pro většinu lidí neionizující záření nepředstavuje zdravotní riziko, avšak pracovníci, kteří jsou v pravidelném kontaktu s některými zdroji neionizujícího záření, mohou potřebovat ochranné pomůcky například před vznikajícím teplem. Mezi další příklady neionizujícího záření patří **rádiové vlny** a **viditelné světlo**. Viditelné světlo je typem neionizujícího záření, které může vnímat lidské oko. A rádiové vlny jsou typem neionizujícího záření, které je pro naše oči a další smysly neviditelné, ale které lze dekódovat pomocí tradičních rádií. [10] [11]

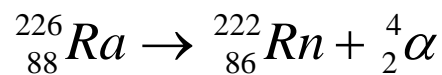
2.2 Ionizující záření

Ionizující záření je druh záření, které má takovou energii, že dokáže svým působením odtrhnout elektrony od atomů nebo molekul, což při interakci s hmotou včetně živých organismů způsobuje změny na atomové úrovni. Vytržení elektronů zapříčiní vznik iontů, a proto se používá termín "ionizující" záření. Ve vysokých dávkách může ionizující záření poškodit buňky nebo orgány, což může vést i ke smrti. Při správném použití, dávkách a při dodržení nezbytných ochranných opatření, má tento druh záření mnoho užitečných využití při výrobě energie, v průmyslu, ve výzkumu a v lékařské diagnostice, či léčbě různých onemocnění, jakou je rakovina. [10] [11]

Ionizující záření lze rozdělit na 4 základní druhy, kterými jsou záření (α), záření (β), záření (γ) a neutronové záření (**n**).

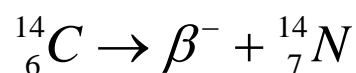
2.2.1 Záření alfa (α)

Záření α je tvořeno proudem částic jader helia, které se skládají ze dvou protonů a dvou neutronů, což dává tomuto záření kladný charakter. Vzhledem k hmotnosti dvou protonů a dvou neutronů jsou poměrně těžké v porovnání s ostatními částicemi. Zdrojem záření bývá rozpad těžkých atomů s nukleonovým číslem $A > 150$. Díky své hmotnosti má záření velkou energii 2 až 8 MeV, což spolu s kladným nábojem způsobuje velký vliv na své okolí. Při průchodu skrz jinou látku silně ionizuje atomy podél své dráhy, čímž ztrácí svoji energii až se postupně zastaví. Kvůli tomu je záření α ze všech záření nejméně pronikavé a jeho pronikavost klesá s hustotou procházeného materiálu. Kvůli svému náboji mění směr v magnetickém i elektrickém poli. Záření α vzniká přeměnou alfa, která spočívá v rozpadu jádra na částici α (jádro hélia) a jádro s hodnotou protonového čísla o dvě nižší než jádro výchozí. Příkladem může být rozpad radonu. [12] [10]



2.2.2 Záření beta+ (β^-)

Je tvořeno proudem elektronů, vzniklých při přeměně neutronů na protony. Zdrojem tohoto záření jsou lehké a středně těžké atomy. Při přeměně β^- vznikne z původního jádra radionuklidu nové jádro se stejným počtem nukleonů. Vzhledem k zápornému charakteru proudu elektronů se jedná o ionizující záření. Při pohybu beta částice uvolňují fotony, a proto se energie záření postupně snižuje, avšak v porovnání s částicemi alfa se do okolí rozptyluje více a je pronikavější. Díky svému zápornému charakteru se vychyluje v elektrickém a magnetickém poli. Beta záření vzniká přeměnou neutronu na proton za vzniku elektronu a neutrina. Mezi nestabilní atomy, které vyzařují záření beta, patří izotop vodíku ${}^3\text{H}$ (tritium) a uhlík ${}^{14}\text{C}$. Tritium se používá mimo jiné v nouzových světlech, která například označují východy ze tmy. Je to proto, že beta záření tritia způsobuje, že fosforový materiál při interakci se zářením svítí, a to bez použití elektřiny. Uhlík ${}^{14}\text{C}$ se používá například k datování historických předmětů. Rovnici níže je uveden případ přeměny uhlíku na dusík za vzniku záření beta. [12] [10]

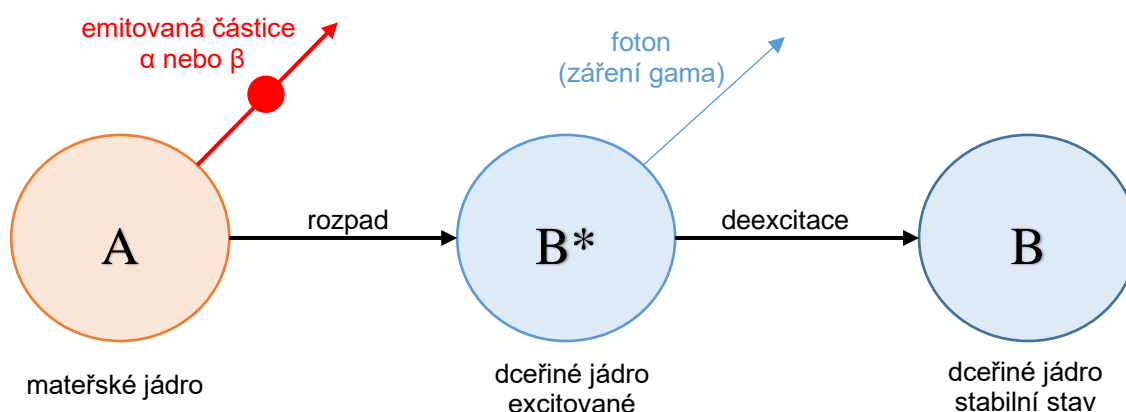


2.2.3 Záření beta- (β^+)

Je tvořeno proudem pozitronů. Vzniká a projevuje se obdobně jako záření β^- , avšak výchozím stavem je proton, který se rozpadá na jeden pozitron a neutrino. Pozitron je inverzní částice vůči elektronu (antičástice), což dodává záření kladný charakter. V přírodě se však vyskytuje vzácněji než záření β^- . [12] [13]

2.2.4 Záření gama (γ)

Záření γ je tvořeno proudem fotonů, a proto se jedná o elektromagnetické záření velmi krátkých vlnových délek. Toto záření obvykle doprovází alfa a beta záření, tím dochází ke snížení přebytečné energie jader. Samotné gama záření pouze snižuje energii jádra, nemá tedy vliv na jeho složení. S látkou interaguje vždy celý foton (může být pohlcen, rozptýlen, vyrazit z atomu elektron apod.). Toto záření nemá náboj, proto se nevychyluje v magnetickém ani v elektrickém poli. Je velmi pronikavé, ve vzduchu uletí stovky metrů, ve vodě několik desítek centimetrů a v kovech několik centimetrů. Odstínit ho lze silnější vrstvou těžkých kovů. [12]



Obr. 5 Vznik záření gama [14]

Vzhledem k tomu, že záření gama nemá samo o sobě náboj, tak se v podstatě o ionizující záření nejedná. Záření ionizuje okolní prostředí nepřímo pomocí doprovodného záření alfa nebo beta. Záření gama tedy průnikem mlžnou komorou neinteraguje pomocí svého náboje s okolním prostředím za vzniku iontů, které by sloužili jako kondenzační jádra při kondenzaci par v mlžné komoře. Proto je tedy záření gama v mlžné komoře nedetekovatelné. [14]

2.2.5 Neutronové záření

Neutronové záření je tvořeno proudem neutronů. Neutrony jsou relativně hmotné částice, které jsou jednou ze základních složek jádra. Neutrony nemají náboj, a proto neionizují okolní prostředí přímo, jejich interakce s okolními atomy však může vést ke vzniku částic alfa, beta nebo záření gama a rentgenovému záření, které pak vede k ionizaci. Neutrony jsou pronikavé a mohou být zastaveny pouze silnou vrstvou betonu, vody nebo parafínu. [10]

Neutrony mohou vznikat různými způsoby, například při jaderných reakcích uvnitř jaderných reaktorů nebo při jaderných reakcích iniciovaných vysokoenergetickými částicemi ve svazcích urychlovačů. Neutrony mohou představovat významný zdroj nepřímo ionizujícího záření. [10]

bylo objeveno v roce 1912 rakouským fyzikem Victorem Hessem při balónových experimentech ve výšce až 5 300 metrů. S rostoucí výškou stoupala ionizace atmosféry, a tím byl prokázán kosmický původ záření. Za objev získal Hess v roce 1936 Nobelovu cenu za fyziku. [15]

Na Obr. 6 je vyobrazena interakce kosmického záření s atmosférou a vznik spršky sekundárního záření. Srážky energetických částic s částicemi atmosféry doprovází časté zachyty elektronů v atomárních obalech. Proto se na schematickém obrázku nezachovává elektrický náboj. Z obrázku je dále patrné, že sekundární kosmické záření je tvořeno různými typy záření částicového nebo vlnového charakteru. V mlžný komorách je možné pozorovat pouze záření tvořené proudem nabitých částic, takže nemůžeme detekovat rovnou záření gama, ale pouze produkty jeho interakce s okolním prostředím, tím mohou být i různé druhy kvantových částic, které pak můžeme detekovat pomocí mlžných komor. Právě proto je mlžná komora neodmyslitelně spojena s tímto druhem záření. [15]

2.4 Zdroje záření

Záření je všude kolem nás. V kapitole výše jsou popsány různé typy záření a jedním z nich je i záření kosmické, které na nás působí neustále. Existuje však spousta jiných zdrojů záření, které na nás každý den působí. Zdroje záření můžeme jednoduše rozdělit na přírodní a umělé. [16]

Přírodní záření je přirozené pozadí radiace pocházející z vesmíru i pozemských zdrojů. Úroveň tohoto záření je v různých místech Země velmi rozdílná. Kosmické záření je částečně odstíněno magnetickým polem a atmosférou, a proto jeho intenzita roste s nadmořskou výškou tak, že ve výšce 3000 metrů nad mořem dosahuje celkové přirozené pozadí téměř dvojnásobku přímořské úrovně. Všechny přírodní zdroje dohromady představují asi 83 % středního ročního dávkového ekvivalentu pro jednotlivce. Zbytek ročního dávkového ekvivalentu tvoří umělé zdroje, jako např. rentgenová a radioizotopová lékařská vyšetření a terapie; atmosférické zkoušky jaderných zbraní, jaderné elektrárny s celým palivovým cyklem (výroba paliva a zpracování odpadu), některé spotřební výrobky nebo stavební materiály. [16] [17]

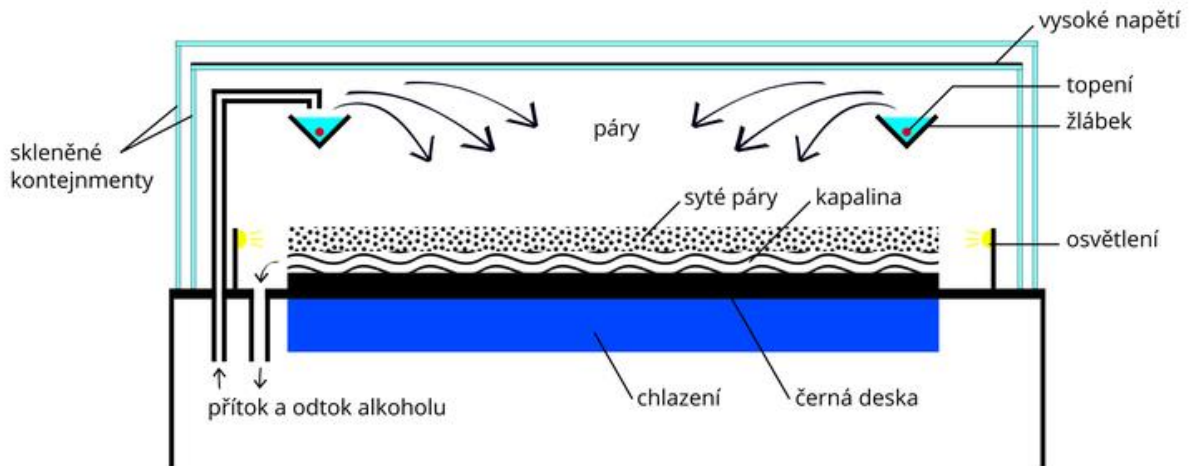
Přehled ročních dávek z přirozených a umělých zdrojů je uveden v Tab. 1. Z tabulky je patrné, že mezi umělými zdroji jednoznačně dominují lékařské aplikace a mezi přírodními dominuje radon uvolňovaný ze stavebních materiálů. Vliv jaderných elektráren na radiační zatížení člověka je velmi malý. Mnohem větší význam má bydlení v nížinách nebo v horských oblastech, či časté létání letadlem. Podle vědeckého výboru OSN pro účinky atomového záření obdrží každý obyvatel naší planety v průměru roční radiační dávku 2,5 mSv. Za nízké dávky záření se považují dávky, které jsou stonásobně vyšší než průměrná radiační dávka, tj. až 250 mSv. První negativní zdravotní účinky se objevují až při dávkách kolem 1000 mSv. [16]

Zdroje ionizujícího záření			Dávka [mSv]
Přirodní záření	Kosmické záření	v úrovni moře	0,3
		ve výšce 300 m nad mořem	0,325
		ve výšce 600 m nad mořem	0,375
		ve výšce 1 000 m nad mořem	0,45
	potraviny a nápoje		0,35
	průměrné ozáření z půdy a z radonu		1,35
Umělé záření	topení uhlím, nebo bydlení poblíž uhelné		0,04
	spad po zkouškách jaderných zbraní		0,01
	bydlení na hranici pozemku jaderné elektrárny		0,002
	bydlení 1,5 km od jaderné elektrárny		0,0002
	bydlení 5 km od jaderné elektrárny		0,00002
	rentgen plic		0,08
	rentgen trávicího traktu		4
	radiofarmaceutické vyšetření		0,3
	cesta letadlem na vzdálenost 4 000 km		0,25
	hodinky s luminofory		0,01
	Roční limit pro pracovníky s ionizujícím zářením		
Roční limit pro obyvatelstvo			5
Jednorázová smrtelná dávka			6 000

Tab. 1 Přehled ročních dávek z přirozených a umělých zdrojů [16]

3 Podmínky funkčnosti mlžné komory

Z počátku této kapitoly je důležité shrnout princip difusní mlžné komory pomocí schématického obrázku.



Obr. 7 Princip difusní mlžné komory [40]

Ve vrchní části komory se nachází žlábek, do kterého je čerpadlem kontinuálně přečerpáván alkohol v kapalné formě. Alkohol je ve žlábků vyhříván a udržován při konstantní teplotě, aby se zvětšil odpar alkoholu do vnitřku komory. Vzniklé páry poté putují směrem dolů k chlazené desce. Kvůli teplotnímu spádu a k tomu odpovídající hodnotě přesycení se nad deskou utvoří vrstva přesycených alkoholových par, která vytvoří kondenzační stopu z kapiček podél trajektorie prolétající ionizující částice. Ke zviditelnění kondenzačních stop slouží osvětlení, které osvětluje kapičky páry a ty pak odráží světelné paprsky směrem k pozorovateli. Pro zvýšení kondenzačních událostí se používá elektrické pole, které je umístěno nad vizuálním prostorem. Efekt elektrického pole funguje na podobném principu jako magnetické pole Země. Svým působením na prolétající částice mění jejich trajektorii, a to tak aby prolétaly v ideálním případě tečně k povrchu chlazené desky. Tím pádem se pak více projeví efekt kondenzace v mlžné komoře. Za předpokladu, že by zde elektrické pole nebylo, by komora fungovala také, akorát by výskyt kondenzačních událostí nebyl tak častý a jejich trajektorie by směřovala více směrem do černé desky.

Svémi stavy uvnitř komory jsou difusní mlžné komory zajímavé i z pohledu termodynamiky a jsou užitečné k modelování nestabilních stavů kapalin a s tím spojenou tvorbu mlhy. Pro správný chod mlžných komor hrají zásadní roli kondenzační jevy v okolí chlazené desky ve spodku komory. Pochopení těchto procesů umožňuje určit vhodné podmínky pro správné navržení mlžné komory. V této kapitole bude proveden přehled hlavních vlivů na správné nastavení parametrů pro kontinuální chod mlžné komory. [1]

3.1 Tvorba zkondenzovaných kapiček

Základem pro správný chod mlžné komory je stanovení podmínky pro vznik zkondenzovaných kapiček ethanolu. V důsledku povrchového napětí je tlak p_r nasycených par na povrchu kapky o poloměru r vyšší než tlak nasycených par na rovinném povrchu p_∞ o hodnotu danou Ostwaldova-Freundlichova rovnicí (3.1). [1] [18]

$$p_r = p_\infty \exp\left(\frac{2\gamma}{r} \frac{M}{RT\rho}\right) \quad (3.1)$$

kde γ je povrchové napětí, ρ hustota vznikající kapaliny, M molární hmotnost, R Univerzální plynová konstanta a T je termodynamická teplota.

Z rovnice (3.1) lze vyjádřit vztah pro nasycení S které je poměrem tlaků P_r/P_∞ . Pro upravenou rovnici platí, že pro hodnoty $S \leq 1$ jsou kapky nestabilní, protože exponent na pravé straně rovnice bude vždy kladný a kapky tak na svém povrchu vyžadují mnohem vyšší tlak p_r , než je tlak nasycení p_∞ . Pokud se alkoholové páry nenachází v přesyceném stavu, kdy $p_r > p_\infty$, tak kondenzace nebude nikdy dosaženo a alkohol zůstane pouze v podobě páry. Z Ostwaldovy-Freundlichovy rovnice navíc vyplývá, že kapky nemohou vznikat samovolně, jelikož pro nekonečně malou kapku, kdy $r \rightarrow 0$, je třeba dosáhnout nekonečně velkého přesycení S . Pokud však budou podmínky vhodné a vznikne stabilní kapička o dostatečně velkém poloměru, může kapička posloužit jako kondenzační jádro a okolní páry budou na této kapce dále kondenzovat, čímž bude kapička zvětšovat svou velikost, až nakonec dosáhne viditelné velikosti. [1]

Z výše uvedené rovnice je tedy patrné, že při kondenzaci plyných látek je nutné, aby v soustavě byly přítomny malé částice, které fungují jako kondenzační jádra a umožní tak prvotní vznik kapiček, které vlivem další kondenzace par zvětšují svou velikost až do rozměrů, které jsou viditelné pouhým okem. [1]

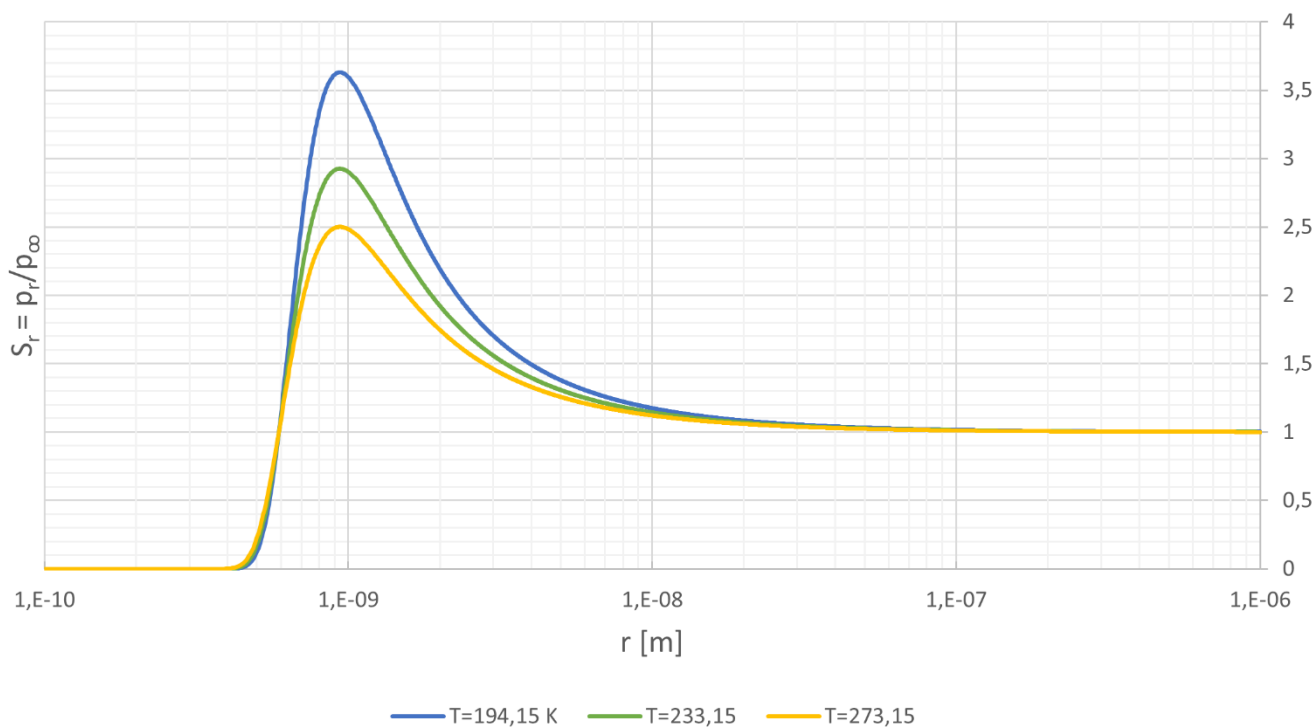
3.2 Tvorba kapiček na nabitých částicích

V mlžných komorách slouží jako kondenzační jádra nabitě částice, které vznikají ionizací od průletu ionizačního záření. Přesycená paroplynová směs tak kondenzuje na těchto částicích způsobem, jaký je popsán výše. S uvažováním náboje nabyté částice pak lze vztah (3.1) upravit na následujícího tvaru. [1] [18]

$$p_r = p_\infty \exp\left[\frac{M}{RT\rho} \left(\frac{2\gamma}{r} - \frac{e^2}{32\pi^2 \varepsilon r^4}\right)\right] \quad (3.2)$$

kde ε je dielektrická konstanta okolního prostředí a e je hodnota elementárního náboje. Z upraveného vztahu však není analýza stability kapek tak jednoznačná jako v předchozím případě a je lepší ji graficky popsat pomocí Obr. 8, který znázorňuje potřebnou hodnotu přesycení na povrchu stabilní nabitě kapky S_r jako funkci jejího poloměru r .

Přesycení v závislosti na velikosti poloměru kondenzačního jádra



Obr. 8 Graf závislosti nasycení na poloměru kondenzačního jádra

Obr. 8 můžeme rozdělit na dvě oblasti. V první oblasti je funkce S_r rostoucí funkcí a v druhé oblasti již funkce klesá. V oblasti, kde funkce S_r roste kapky nemohou samovolně růst, a proto v této oblasti potřebují vyšší hodnotu přesycení pro další růst. Pokud velikost kapky dosáhne hodnoty poloměru odpovídající maximální hodnotě S_r , poté již bude kapka samovolně růst až dosáhne rozměrů viditelných pouhým okem, protože potřebná hodnota přesycení v této oblasti klesá. Z grafu však můžeme udělat zajímavý závěr, a to takový, že pro nabitou částici může vznikat kapička o nekonečně malém poloměru, protože hodnota potřebného přesycení se v této oblasti blíží k nule. Pro výše uvedené vlastnosti nabitých kondenzačních jader byl odvozen vztah pro kritické přesycení po výšce komory. [1]

$$S_c = \exp \left[\frac{3M}{2RT\rho} \gamma^{4/3} \left(\frac{16\pi^2 \varepsilon}{e^2} \right)^{1/3} \right] \quad (3.3)$$

Hodnota tohoto kritického přesycení je nejdůležitějším parametrem pro správný chod mlžných komor. Vzhledem k tomu že funkce S_c je funkcí teploty, je podstatným parametrem, který hodnotu přesycení ovlivňuje teplotní spád uvnitř mlžné komory. [1]

3.3 Určení teplotního spádu

Jak je popsáno výše, hlavním kritériem pro správnou funkci mlžné komory je hodnota přesycení, potažmo teplotního spádu uvnitř komory. Tento spád je dán dvěma referenčními hodnotami a těmi je teplota vyhřívajícího kapalného alkoholu uvnitř žlábků a teplota na chlazené desce, kde slouží k podchlazení paroplynové směsi. Pro výpočet průběhu teploty po výšce komory byl použit vztah (3.4):

$$T_{(y)} = T_0 + \frac{1 - e^{-ay}}{1 - e^{-ah}} (T_1 - T_0) \quad (3.4)$$

kde $T_{(y)}$ je funkce teploty po výšce y , h je výšky, T_1 a T_0 jsou teploty na žlábků alkoholu a teploty na spodní chlazené desce. Koeficient a který charakterizuje vlastnosti použitého média je dán následujícím vztahem (3.5):

$$a = \frac{c_p P D_1}{\kappa R T_0^2} \Gamma \quad (3.5)$$

kde c_p je měrná tepelná kapacita par ethanolu při konstantním tlaku. P je tlak uvnitř komory, D_1 je difúzní koeficient ethanolových par uvnitř komory při teplotě T_1 , κ je součinitel tepelné vodivosti paroplynové směsi uvnitř komory. Koeficient Γ byl určen dle vztahu (3.6):

$$\Gamma = \frac{T_1 - T_0}{h} \frac{\ln \left[1 - \frac{P_{\infty(T_1)}}{P} \right]}{\ln \left(\frac{T_0}{T_1} \right)} \quad (3.6)$$

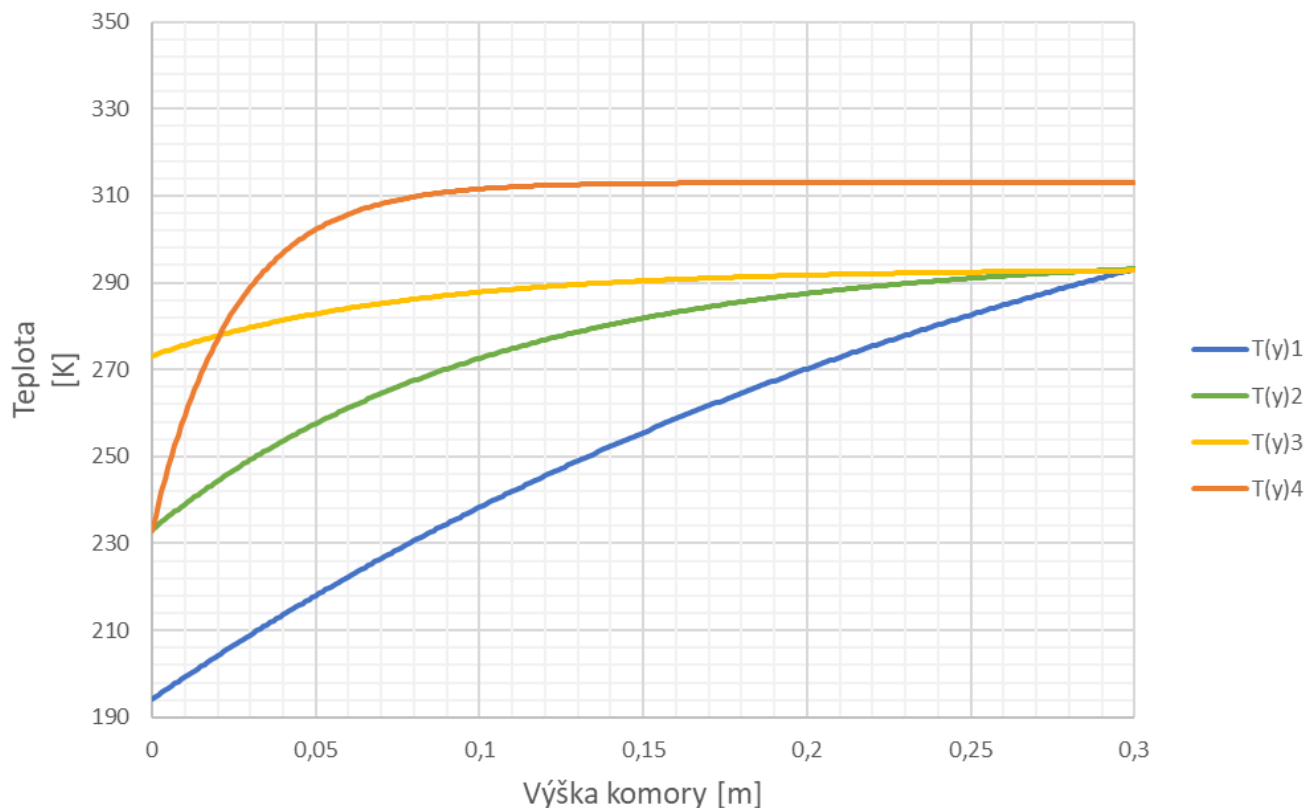
kde tlak $P_{\infty(T)}$ je parciální tlak ethanolových par při difuzi do okolního prostředí.

Pomocí výše uvedených vztahů byly napočteny 4 varianty teplotních spádů. Jako okrajové hodnoty byly zvoleny 3 různé teploty na chlazené desce, kde je očekáván větší vliv na teplotní spád než vliv teploty vyhřívajícího alkoholu. Pro teplotu chlazené desky 273,15 K byly zvoleny dvě teploty vyhřívání alkoholu konkrétně 293,15 K a 313,15 K. Okrajové podmínky jednotlivých variant jsou uvedeny v Tab. 2 a napočtené hodnoty byly posléze vyneseny do grafu viz. Obr. 9.

označení	Teplota T_0	Teplota T_1
$T_{(y)1}$	194,15	293,15
$T_{(y)2}$	233,15	293,15
$T_{(y)3}$	273,15	293,15
$T_{(y)4}$	233,15	313,15

Tab. 2 Tabulka teplot T_1 a T_0 použitých pro výpočet teplotního spádu v komoře

Průběh teploty po výšce komory



Obr. 9 Průběh teploty po výšce komory

Pro teplotní spády uvedené v Obr. 9 byly dále napočteny odpovídající hodnoty přesycení podle vztahu (3.7):

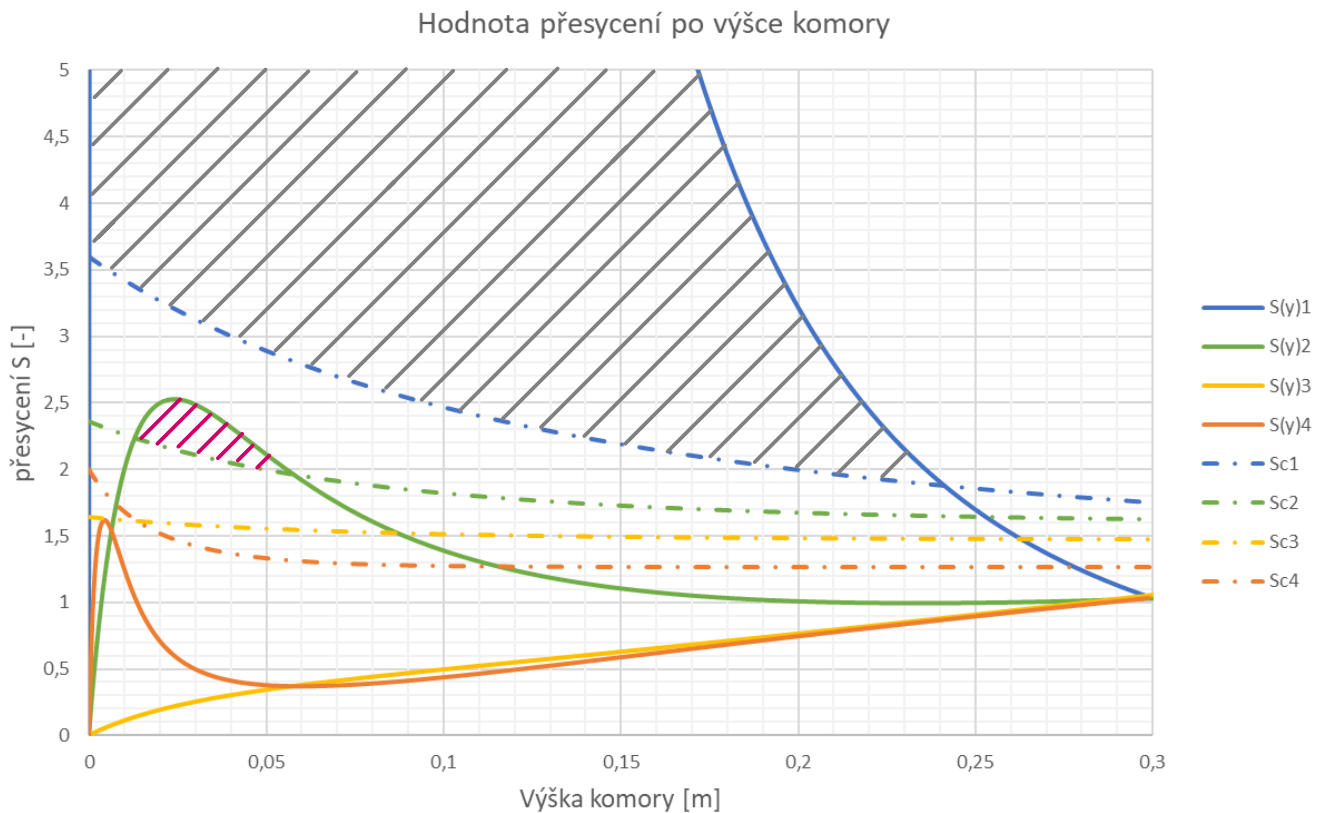
$$S_{(y)} = P \frac{1 - T_0^{\frac{\Gamma}{A}} [Ay + T_0]^{-\frac{\Gamma}{A}}}{p_{\infty}(T_{(y)})} \quad (3.7)$$

kde $A = (T_1 - T_0) / h$ je parametr, který byl definován pro splnění podmínky, že paroplynová směs je ve výšce h tvořena nasycenou směsí ethanolu ve vzduchu, tedy $S_{(h)} = 1$.

Rozložení pro různé okrajové podmínky na spodku a vršku komory jsou definovány spojitými křivkami na Obr. 10. Čerchovaná křivka na témže obrázku představuje hodnotu kritického přesycení S_c vypočtená dle vztahu (3.3) pro jednotlivé teplotní spády. Pro hodnoty vyšší, než je hodnota tohoto kritického přesycení S_c platí, že každá jednotlivá nabitá částice, která proletí touto oblastí zapříčiní vznik iontů, které posléze fungují jako kondenzační jádra, na kterých kapka může růst. Šrafovaná oblast mezi průsečíky spojitě křivky aktuálního přesycení s čerchovanými křivkami kritického přesycení představují oblast, ve které se vytvoří dostatečně přesycená vrstva ethanolových par. To znamená, že každá částice, která proletí v této výšce komory způsobí vznik kondenzační stopy.

Jak je vidět uvedená podmínka pro překročení kritického přesycení je splněna pouze u 2 teplotní spádu. Vrstva dostatečného přesycení pro přesycení $S_{(y)1}$ je podle uvedeného grafu až zbytečně veliká. Navíc potřebné chlazení by potřebovalo podstatně větší příkon elektrické energie pro odvod tohoto tepla, takže proto byla tato kombinace krajních teplot vybrána jako nevhodná. Oproti tomu přesycení odpovídající křivce $S_{(y)2}$ se zdá být vhodné z hlediska dostatečného přesycení v blízkosti chlazené desky a také snížené energetické náročnosti.

Z Obr. 10 je dále patrné, že zvýšení teploty na vyhřívání alkoholu ve žlábkku má spíše negativní vliv na průběh přesycení. Zvyšovaná teploty alkoholu ve žlábkku, také způsobí mírné zvýšení teploty v celé komoře a průběh teploty je tedy z počátku strmější viz. Obr. 9. Toto zvýšení však potlačuje stav přesycení, a proto nebylo dosaženo kritické hodnot S_c .



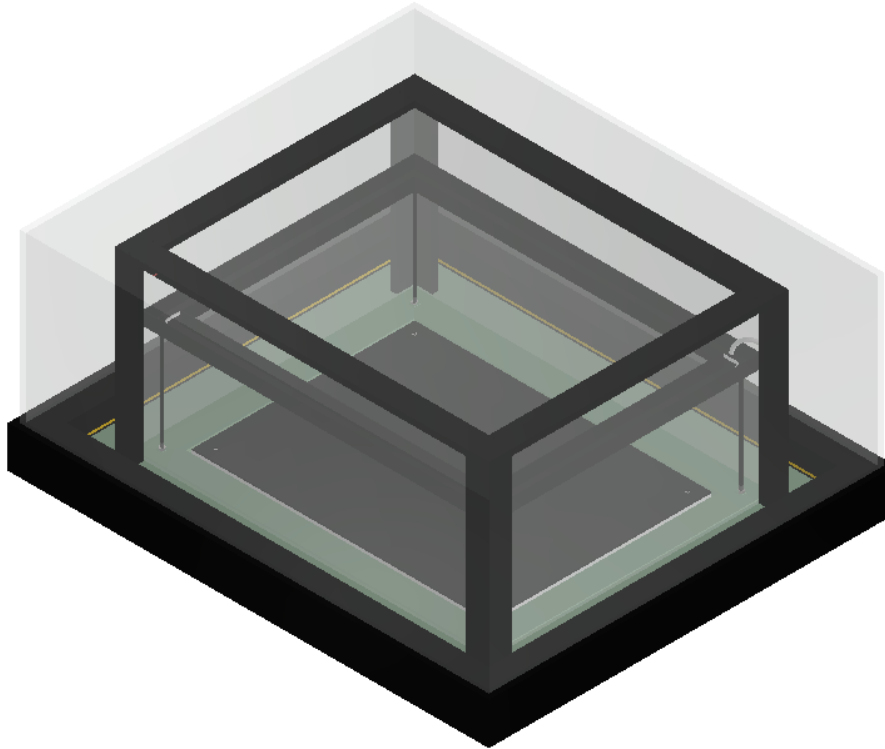
Obr. 10 Rozložení přesycení po výšce komory

4 Konstrukční návrh vizuálního prostoru

V rámci této kapitoly bude předveden konstrukční návrh vizuálního prostoru mlžné komory. Vizuální část se skládá z komponent uvedených v Tab. 3. Celkový pohled na sestavu je potom vyobrazen na Obr. 11. Maximálními rozměry komory jsou její vnější šířka, délka a výška. Vnější šířka a délka je totožná s šířkou a délkou vnějšího rámu, který má rozměry 810 mm šířky a 685 mm délky. Maximální vnější výška komory je dána výškou vnějšího rámu a výškou vnějšího krycího skla, což dohromady dává výšku 352 mm. Nejpodstatnější komponenty mlžné komory jsou okomentovány v podkapitolách níže. Rozměry jsou voleny podle konstrukčního návrhu v rámci navazující bakalářské práce, která se zabývá konstrukcí zbylých částí komory.

označení	Název	počet
1	Černá deska	1
2	Chladič	1
3	Šroub M3	4
4	Vnitřní rám s úkosem	1
5	Nožičky žlábků	4
6	Matice M5x1	4
7	Odporový kabel vyhřívání	1
8	Trubička přívodu ethanolu	1
9	Žlábek pro ethanol	1
10	Vnitřní krycí sklo	1
11	Nožička rámu pro el. pole	4
12	Rám el. pole	1
13	Led svícení pásek	1
14	Vnější rám	1
15	Vnější krycí sklo	1

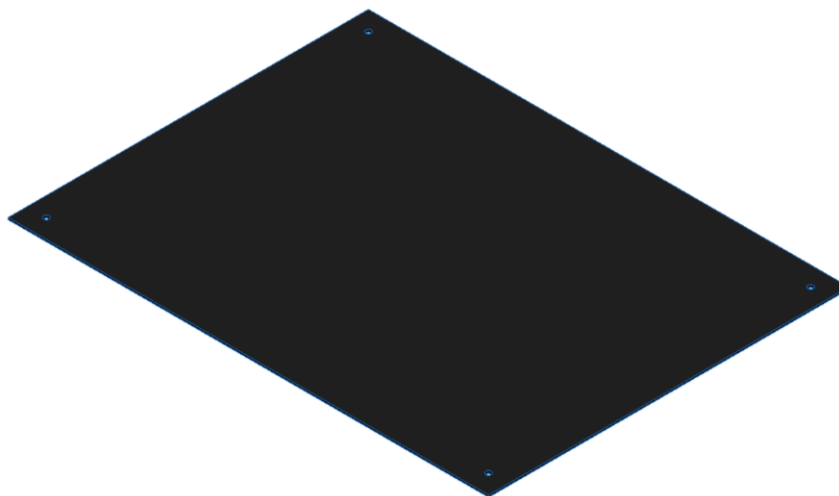
Tab. 3 Soupis komponent vizuálního prostoru



Obr. 11 Sestava vizuálního prostoru mlžné komory

4.1 Černá deska

Jedná se součást, která musí dobře odvádět teplo, a proto byla jako materiál pro desku zvolena měď, která má poměrně vysoký součinitel tepelné vodivosti. Deska má rozměry 500x375 mm a její tloušťka je 2 mm. Aby byla zajištěna dobrá viditelnost bude deska „očerněna“ metodou brynýrování. Jedná se o chemické černění kovových povrchů, hojně využívané v modelářství. Díky tomu bude deska odolnější korozním procesům [19]. Tato povrchová úprava zajistí dobrý

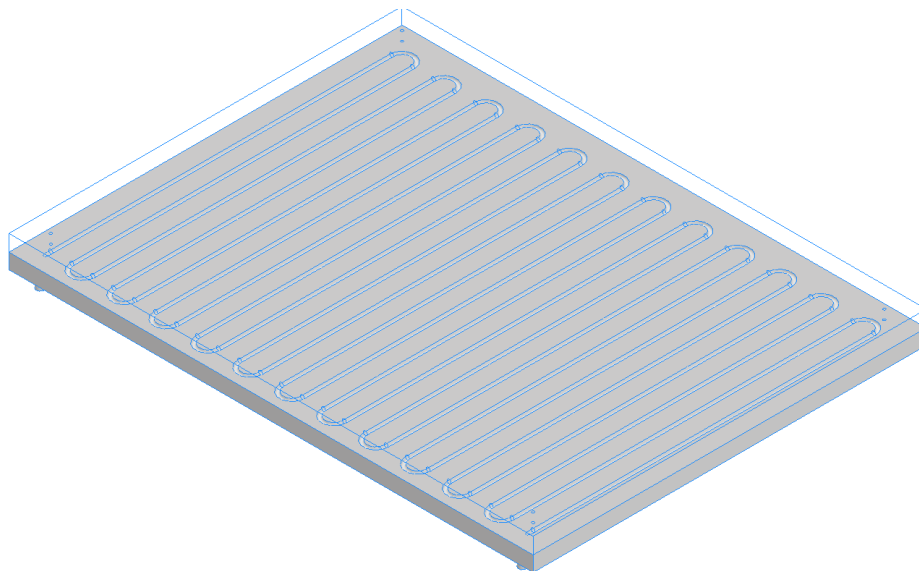


Obr. 12 Černá deska

kontrast odrazu světla od kapiček ethanolu a černého pozadí. Deska je pak přišroubována ke spodnímu chladiči šrouby se zápusťnou kuželovou hlavou a závitem M6.

4.2 Chladič

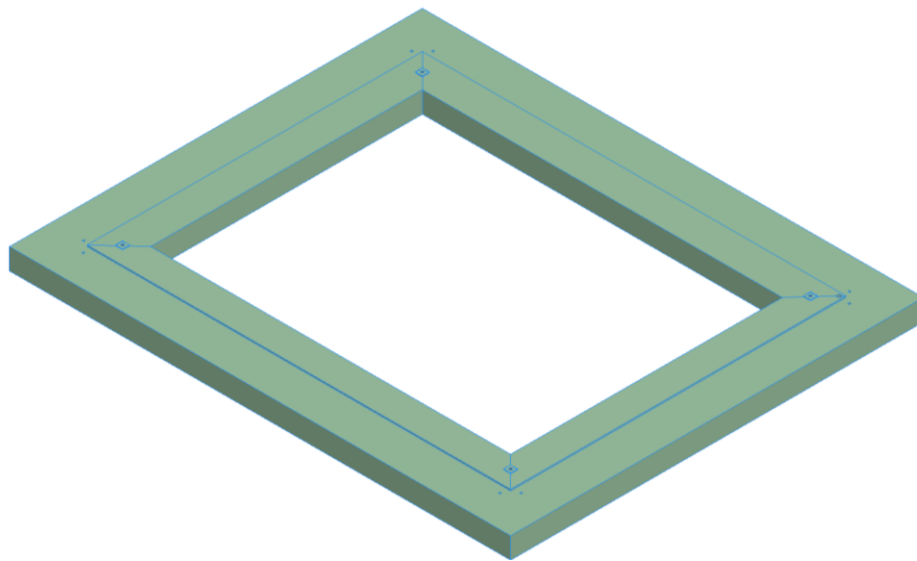
Chladič má za úkol předat odvedené teplo z komory chladicímu médiu. Pro tuto funkci je v plánu, že vznikne chladicí deska ze slitiny hliníku, která v sobě bude mít chladicí spirálu, jak je vyobrazeno na obrázku Obr. 13. Vzhledem k problematice vyrobiteľnosti takové komponenty, bude muset být deska tvořena ze dvou kusů, kde jedna část v sobě bude mít vyfrézované drážky ve tvaru spirály, jak je ukázáno na obrázku níže. Druhá deska bude hladká a obě desky budou spolu spojeny pomocí šrouby. Mezi deskami bude umístěno těsnění, které zajistí integritu systému. Toto chlazení by mělo zajistit rovnoměrné odčerpávání tepla z vrchní části komory. Šířka a délka chladiče kopíruje šířku a délku vrchní měděné desky. Celková délka spirály je necelých 15,5 m.



Obr. 13 Chladič

4.3 Vnitřní rám s úkosem

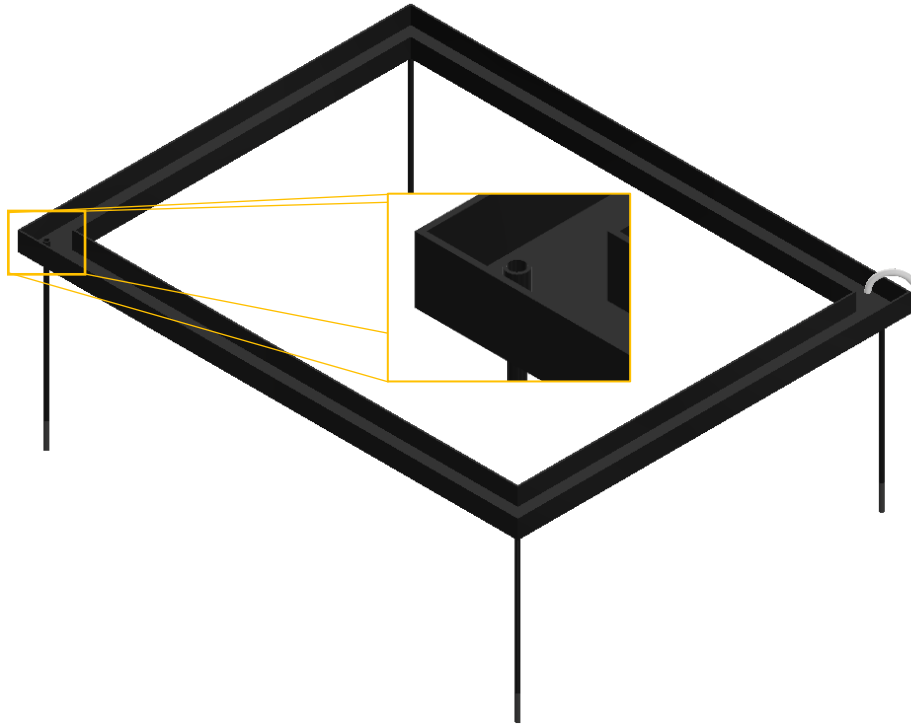
Hlavní funkce vnitřního rámu je spolu s vnitřním sklem utěsnit prostory, aby neunikala paroplynová směs alkoholu a vzduchu ven z komory. Na vnitřní straně skla je vymodelován úkos, který vymezení umístění vnitřního skla a dále odvede alkohol, který zkondenzuje mimo černou desku do drenážní žlábků mezi rámem a chladicí deskou. Dále jsou pak do rámu zašroubovány nožičky pro uchycení žlábků s alkoholem ve vrchní části komory a vyvrtány otvory pro přívodní hadičku a odvod alkoholu ze žlábků. U tohoto komponentu se vybízí využít 3D tisk, kdy by se jako materiál použil plast ABS anebo PTG, který má poměrně velkou chemickou odolnost. Šířka a délka této komponenty je 710x585 mm a výška je 30 mm. Velikost úkosu je přibližně 2,5°.



Obr. 14 Vnitřní rám s úkosem

4.4 Žlábek a nožičky

Žlábek slouží jako rezervoár pro kapalný alkohol, které se následně odpařuje do prostoru komory. Žlábek je navržen jako U profil, u kterého bude konstantní plocha hladiny. Žlábek je v každém rohu podepřen nožičkou, která se napřed zašroubuje do vnitřního rámu a následně

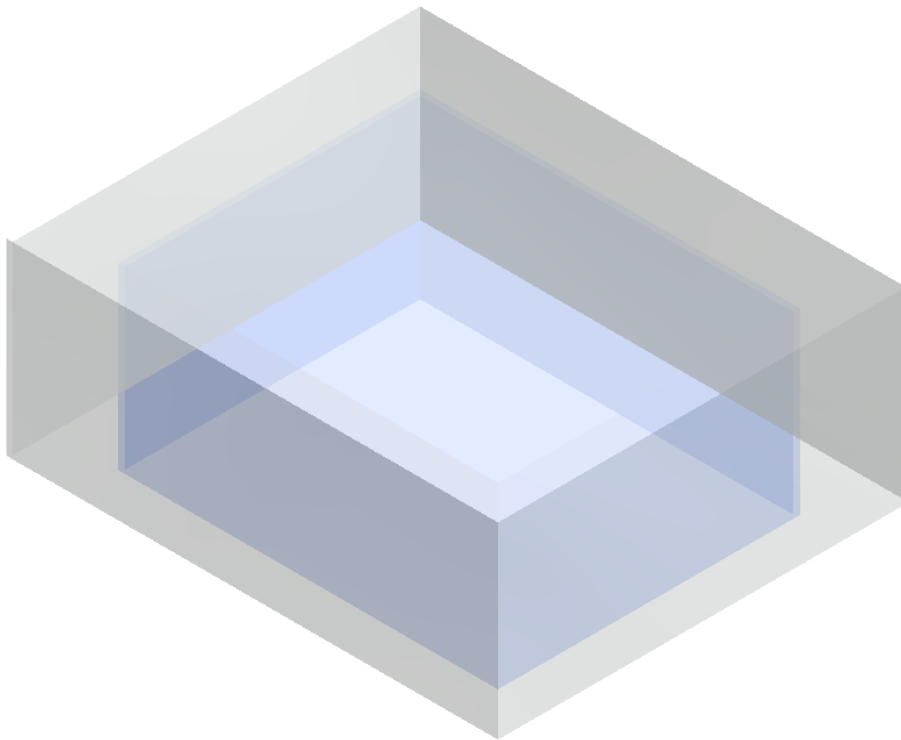


Obr. 15 Návrh žlábků s nožičkami

přitáhne maticí. Po namontování nožiček se žlábek na nožičky položí. Vystředění žlábků na nožičky je zajištěno pomocí čepů, které se zasunou do otvoru v nožičce. Čepy jsou na spodní části namontované napevno. Nožičky jsou vymodelovány jako duté trubičky, takže se u jedné z nich předpokládá, že bude sloužit jako odvod přebytečného alkoholu ze žlábků pryč. Ve žlábků je v tomto místě vyvýšena trubička, která slouží jako přepad, který ústí do vnitřku jedné z nožiček viz. Obr. 15. Díky přepadu bude zajištěn konstantní objem alkoholu ve žlábků. Na Obr. 15 je dále vyobrazen přívod alkoholu v podobě šedivé trubičky, která bude protažená skrz vnitřní rám. Kvůli potřebné tuhosti bude žlábek kovový včetně podepírajících nožiček. Celková vnější šířka a délka žlábků je 584x459 a vnitřní šířka a délka 516x391. Tloušťka stěny žlábků je 2 mm a výška žlábků od černé desky je 202 mm. Šířka U profilu žlábků je 30 mm a výška 20 mm výška přepadu je 10 mm.

4.5 Vnitřní a vnější sklo

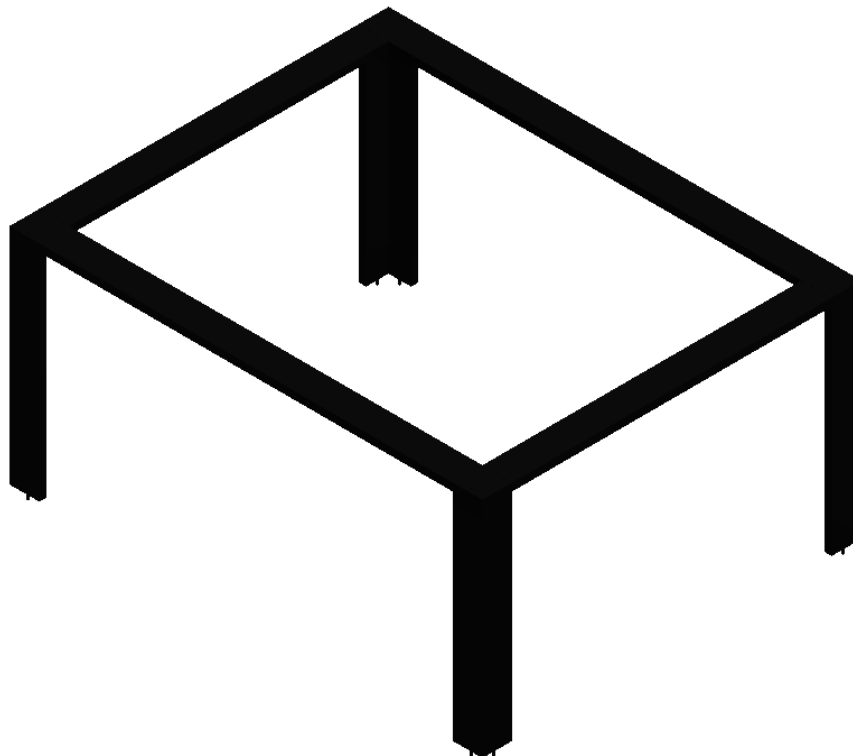
Vnitřní sklo komory slouží jako bariéra, která zabraňuje úniku alkoholu do prostoru mezi vnitřním a vnějším sklem. Vnější slouží jako ochranný prvek, aby se nepoškodila smyčka pod napětím, která vytváří elektrické pole. Dále zabraňuje vniknutí nežádoucích nečistot do prostoru mezi oběma skly. Vzhledem k tomu že obě skla musí zajišťovat průhlednost není možné využít umělé polymery, jelikož ty časem degradují a dochází k zežloutnutí. Polymerní plexiskla dále nevhodně reagují s alkoholy a dochází také k jejich „zabělení“. Vzhledem k tomu budou krycí skla vyrobena z tvrzeného vícevrstvého skla, které má velkou stálost, co se týče průhlednosti, ale i mechanických vlastností. Vícevrstvá skla slouží lépe jako tepelný izolant, takže se tím sníží energetická náročnost modelu. Vnitřní sklo má rozměry 610x485x287 mm s tloušťkou stěny 5 mm a vnější sklo má rozměry 790x665x302 mm s tloušťkou stěny 5 mm. Prostor mezi skly pak vychází na 85 mm na boku komory a na výšce komory 35 mm.



Obr. 16 Vnitřní a vnější krycí sklo

4.6 Konstrukce rámu pro smyčku pod napětím

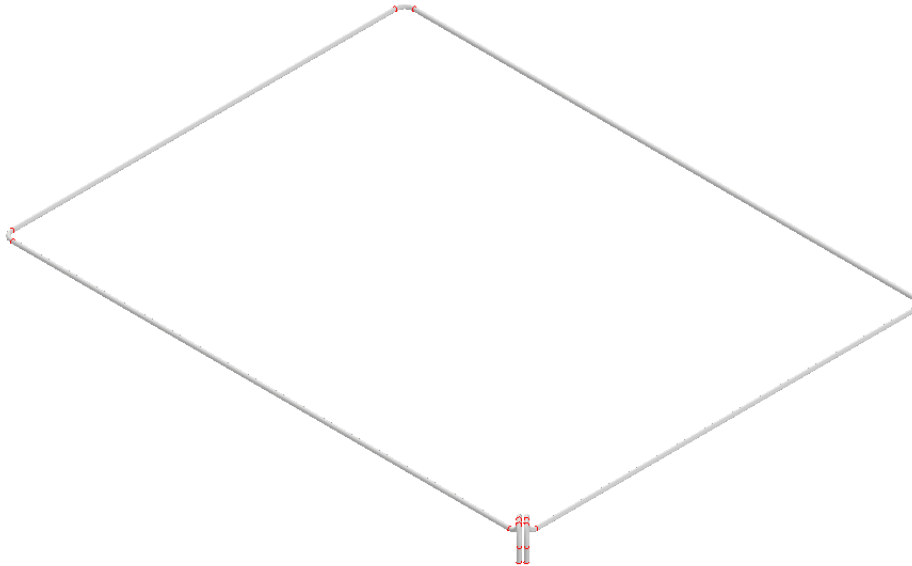
Smyčka pod napětím vytváří elektrické pole, které působí na částice prolétající skrz komoru. Konstrukce rámu elektrického pole se skládá ze čtyř nožiček, které drží celou konstrukci. Nožičky jsou umístěny do vnitřního rámu v rozích kolem vnitřního skla. Samotný rám se skládá z 8 plochých částí, které jsou k sobě slepeny do tvaru celého rámu. Každá tato část má v sobě vymodelován žlábek, do kterého bude vložen drát, který se připojí ke zdroji napětí. Vzhledem k tomu, že zde nejsou kladeny velké nároky na pevnost. Je možné tyto součásti vyrobit pomocí 3D tisku z plastu ABS.



Obr. 17 Konstrukce rámu el. pole

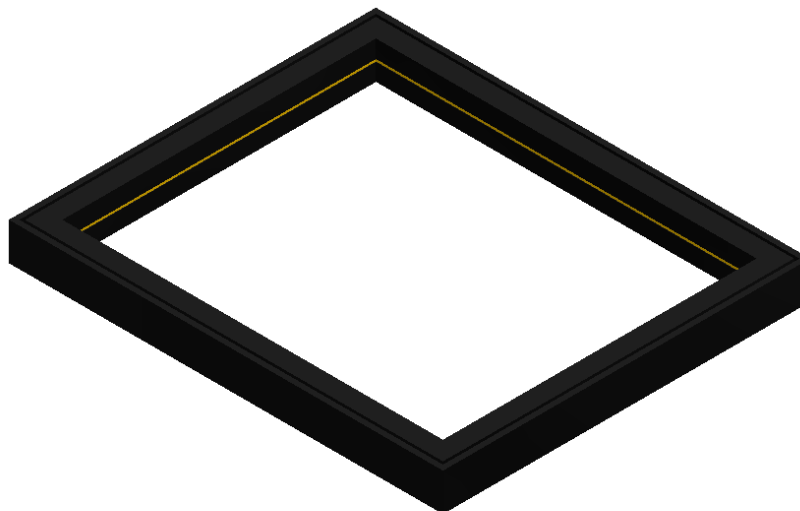
4.7 Smyčka vyhřívání

Smyčka pro vyhřívání ethanolu ve žlábkku je tvořena odporovým drátem. Drát je potom ponořen do alkoholu na dně žlábkku. Úkolem odporového drátu je udržovat teplotu alkoholu na konstantní hodnotě, aby tak množství odpařované látky bylo také stejné. Průměr drátu je 4 mm celková délka smyčky uvnitř žlábkku vychází přibližně na 2 m.



4.8 Vnější rám

Vnější rám spolu s vnějším sklem tvoří bariéru vnější komory. Sklo bude zasunuto do drážky v rámu, a tak spolu utvoří neprodyšnou bariéru. Na vnitřní straně vnějšího rámu je dále vymodelována drážka pro led pásek, který bude sloužit jako nasvícení mlžné komory. Umístění



led pásku je zvoleno tak, aby svítilo do místa, kde je očekávána vhodná hodnota přesycení alkoholových par. Vzhledem k tomu že vnější rám má za úkol chránit vnitřní části komory, není vhodné použít 3D tisk z plastových materiálů, jako u vnitřního rámu. Vhodnější materiál se proto jeví použití kovu, konkrétně hliníková slitina, která bude dostatečně pevná a zároveň lehká. Vnější rozměry odpovídají vnějším rozměrům komory tedy 810x685 mm. Vnitřní rozměry jsou 710x585 mm a výška rámu je 70 mm.

5 Návrh systému chlazení a topení

Pro systém chlazení bylo prvořadým úkolem určit teplo které je soustavě nutné odebrat, aby bylo docíleno požadovaných teplot na černé desce. Tato hodnota byla stanovena v kapitole 3.3 spolu s teplotou vyhřívání alkoholu ve žlábků. Získané okrajové podmínky jsou ve výpočtech označeny jako T_h teplota na povrchu výhřevného drátu a teplota T_4 která odpovídá teplotě na povrchu černé desky.

5.1 Výpočet odvedeného tepla

Výpočet odvedeného tepla byl proveden se zavedením určitých zjednodušení. Zaprvé byl proveden 1D výpočet, tedy v jedné ose, která byla vedena po výšce komory. Stěny žlábků a vnitřního skla byly pro zjednodušení výpočtu uvažovány jako adiabatické. Dále byl zanedbán vliv volné konvekce a očekává se, že teplo je v kapalině a paroplynové směsi šířeno pouze kondukcí (vedením). Na hranicích tekutiny a pevné látky je počítán přestup tepla. Na Obr. 18 je znázorněn očekávaný průběh teploty po výšce komory. Odvedené teplo poté bylo vyjádřeno z rovnic vyjadřující teplo sdílené na jednotlivých úsecích z grafu. Výsledný vztah byl tedy vyjádřen ve tvaru (5.1):

$$Q = \frac{(T_4 - T_h)}{\left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot S_h} + \frac{d_1}{\lambda_{C_5H_5OH} \cdot S_1} + \frac{d_2}{\lambda_{MIX} \cdot S_1} + \frac{d_3}{\lambda_{MIX} \cdot S_2} + \frac{d_4}{\lambda_{C_5H_5OH} \cdot S_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot S_2} \right)} \quad (5.1)$$

kde α_1 je součinitel přestupu tepla pro ethanol ve žlábků, α_2 je součinitel přestupu tepla pro z kondenzovaný ethanol na černé desce, součinitele $\lambda_{C_5H_5OH}$ je součinitel tepelné vodivosti ethanolu, λ_{MIX} je součinitel tepelné vodivosti směsi ethanolu a vzduchu, S_i jsou plochy přes které se jednotlivé plochy šíří. viz. Obr. 19.

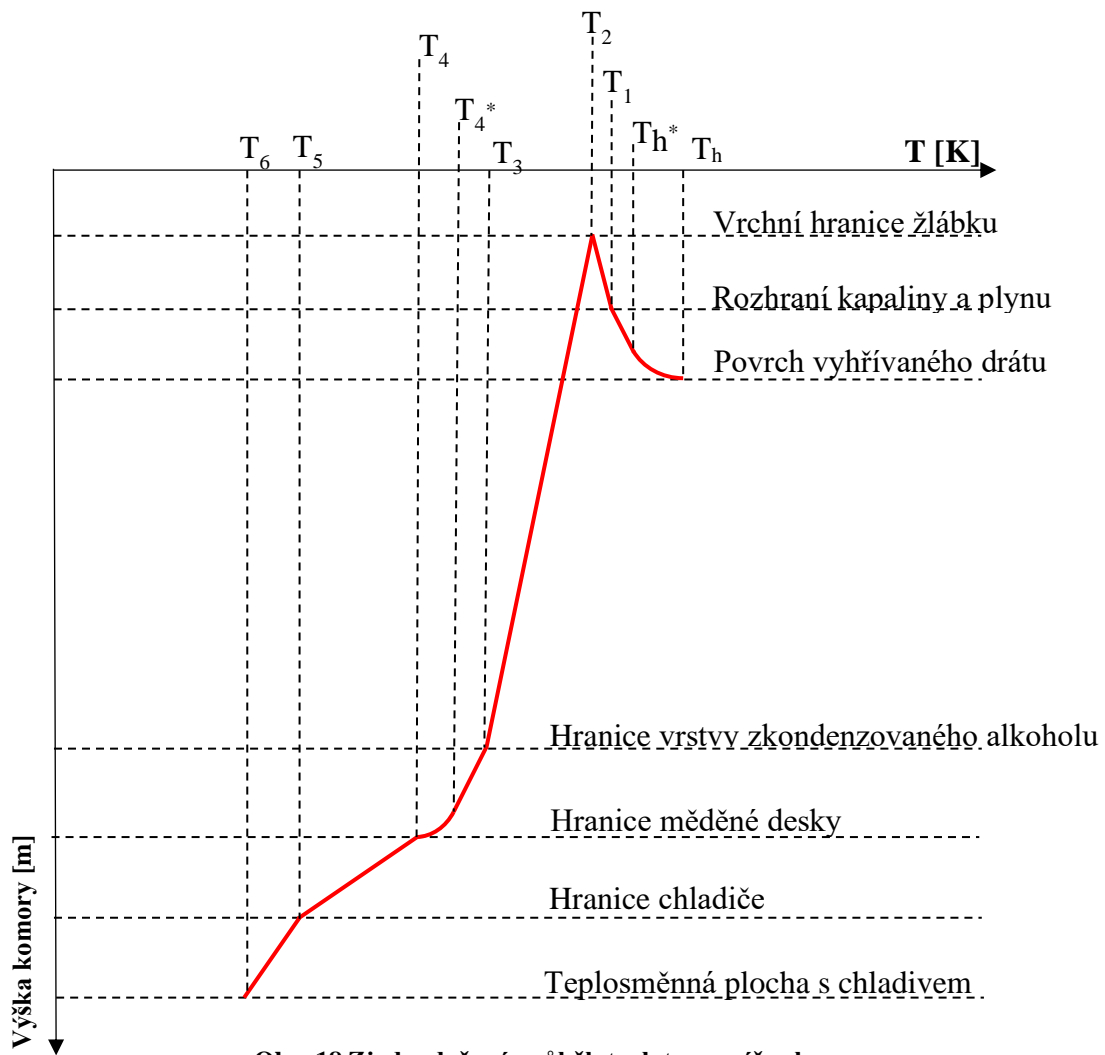
Pomocí tepla vypočteného ze vztahu (5.1) byla následně dopočtena teplota T_6 na teplosměnné ploše chladiče a chladiva.

$$T_6 = Q \cdot \left(\frac{d_5}{\lambda_{cu} \cdot S_2} + \frac{d_6}{\lambda_{Al} \cdot S_2} \right) + T_4 \quad (5.2)$$

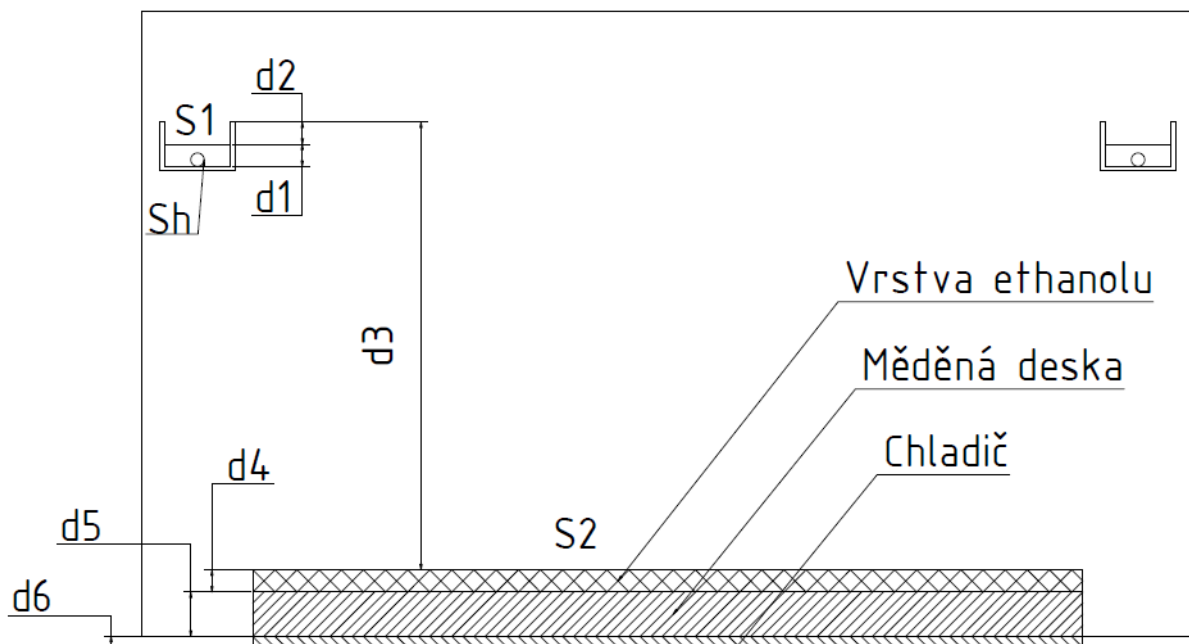
Vypočtené hodnoty tepla Q a teploty T_6 jsou uvedeny v Tab. 4

Q [W]	2115,9
T_6 [K]	229,59

Tab. 4 Výsledné hodnoty Q a T_6



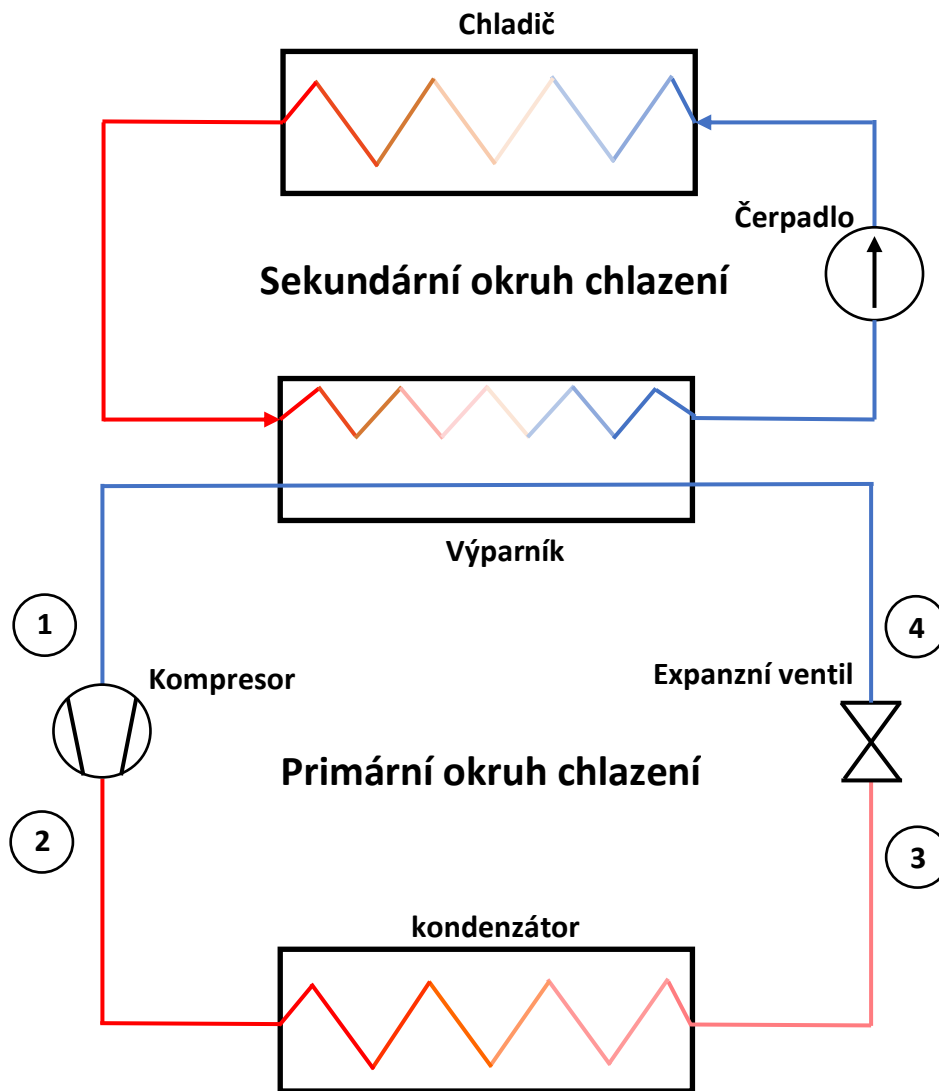
Obr. 18 Zjednodušený průběh teploty po výšce komory



Obr. 19 Schematické znázornění rozměrů použitý pro výpočet tepla

5.2 Návrh systému chlazení

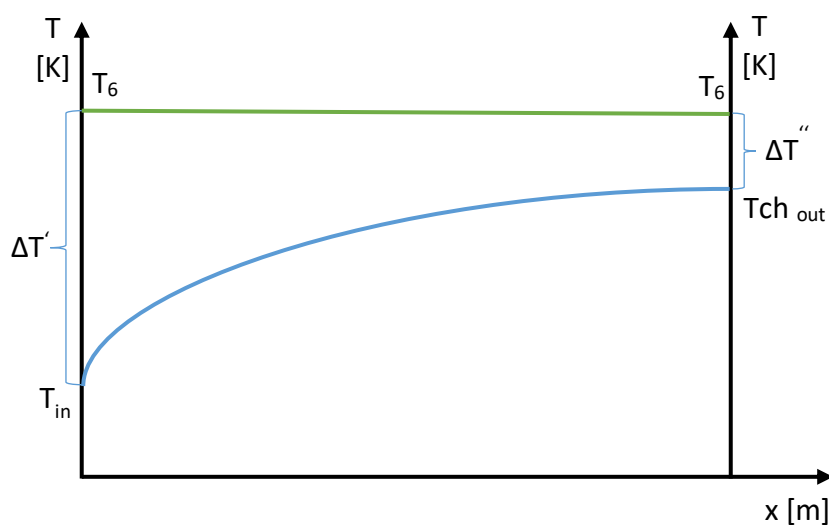
Pro parametry napočteného tepla byl navrhnout chladicí cyklus, jehož schéma je znázorněno na Obr. 20. Celý cyklus se dělí na dvě oddělené smyčky, a to na **sekundární okruh chlazení** a **primární okruh chlazení**. Sekundární okruh je vložený okruh, který má za úkol odčerpat teplo z chladiče pod černou deskou a předat ho ve výparníku primárnímu okruhu cyklu.



Obr. 20 Schéma chladicího cyklu komory

5.2.1 Sekundární okruh chlazení

Jedná se o okruh, který má za úkol odčerpat teplo z chladiče umístěné pod černou deskou. Do cyklu se tedy zapojuje chladič, výparník a čerpadlo, které pohání chladicí médium. Chladivo sekundárního okruhu je voleno jako 80% roztok ethanolu a vody. Které zajistí dostatečný odvod tepla a zároveň se sníží nároky na ekologičnost a s tím spojenou problematiku ohledně skladování a doplňování. Jak je popsáno výše, jako teplosměnná plocha chladiče je brána spirála, které vede skrz celý hliníkový chladič a tím pádem by se mělo docílit homogenního rozložení teploty na desce. Z odvedeného tepla skrze teplosměnnou plochu byla vypočteny teplota na vstupu do chladiče. Na výstupu chladiče byla volena podmínka, aby teplotní rozdíl na výstupu byl roven $\Delta T'' = 5 \text{ K}$. Průběh teplot uvnitř chladiče je nastíněn na Obr. 21.



Obr. 21 Průběh teplot v chladiči

Pro výpočet vstupní teploty byl zaveden předpoklad, že teplota T_6 při průběhu chladiva je konstantní. Pro tento předpoklad byl vypočten střední logaritmický spád pomocí vztahu (5.3).

$$\Delta T_s = \frac{Q}{\alpha_3 \cdot S_T} \quad (5.3)$$

kde α_3 součinitel přestupu tepla do chladiva a S_T je teplosměnná plocha na chladiči.

Z hodnoty středního logaritmického spádu byl poté určen rozdíl teplot na vstupu do chladiče a z něj dopočtena teplota na vstupu T_{in} . Vztah pro střední logaritmický spád je uveden v rovnici (5.4).

$$\Delta T_s = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}} \quad (5.4)$$

Hodnota rozdílu teplot na vstupu $\Delta T'$ do chladiče zde byla dopočtena pomocí iterační metody. Dle vztahu (5.5) byla stanovena hodnota T_{in} , kde výsledky jsou shrnuty v Tab. 5

$$T_{in} = T_6 - \Delta T' \quad (5.5)$$

1. Teplota	2. Hodnota [K]
3. T_6	4. 229,59
5. $\Delta T'$	6. 10,14
7. $\Delta T''$	8. 5
9. T_{in}	10. 219,45
11. T_{out}	12. 224,59

Tab. 5 Hodnoty teplot na chladiči

Pomocí odvedeného tepla Q a dopočtených teplot T_{in} a T_{out} na vstupu a výstupu chladiče byl spočten potřebný průtok v okruhu, aby byly splněny podmínky pro zadané parametry. Hodnota průtoku byla spočtena pomocí vztahu (5.6).

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \cdot (T_{out} - T_{in})} \quad (5.6)$$

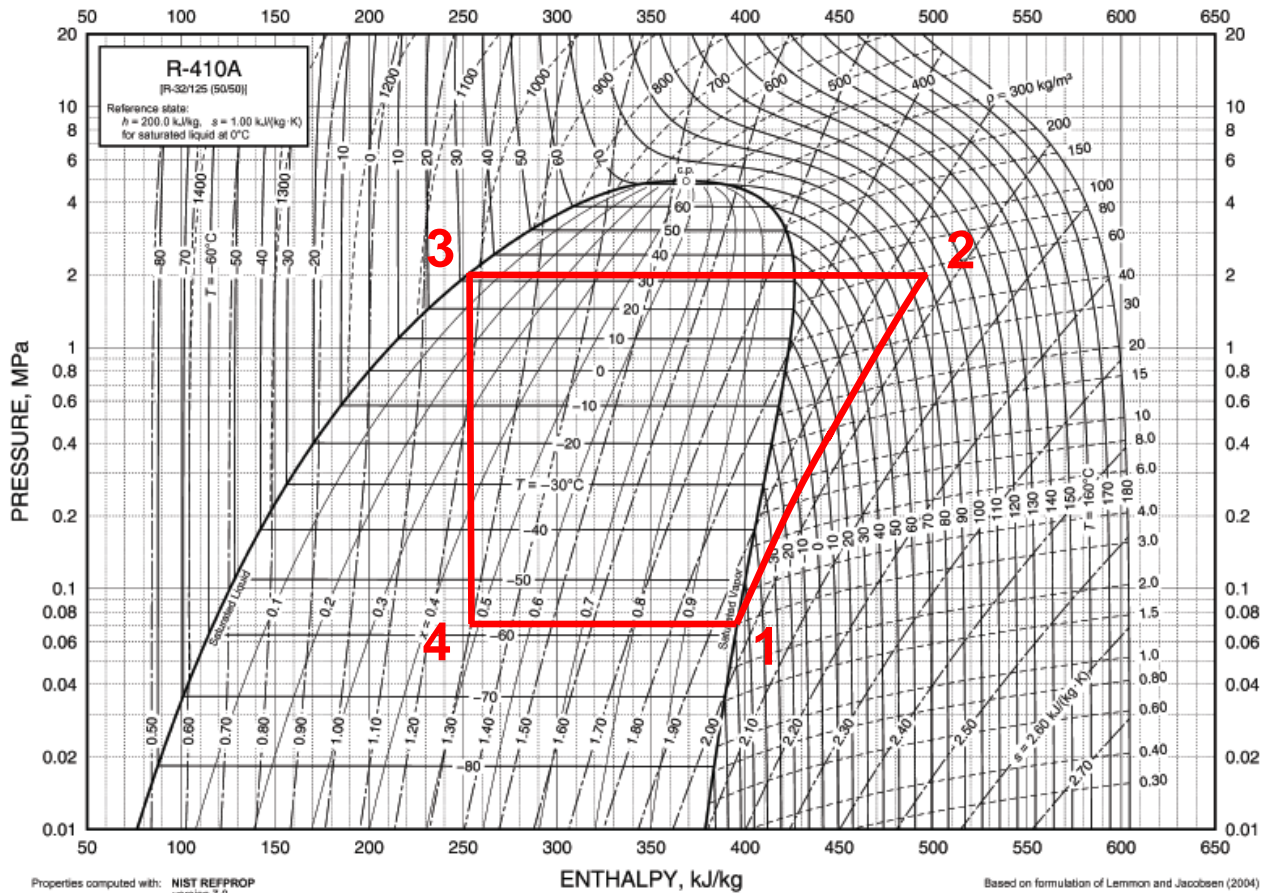
kde c_p je měrná teplotná kapacita 80% směsi ethanolu a vody

průtok	Hodnota [kg/s]
\dot{m}	0,13

Tab. 6 Hodnota průtoku v sekundárního okruhu chlazení

5.2.2 Primární okruh chlazení

Primární okruh chlazení má za úkol odvést teplo ze sekundárního okruhu do okolí. Skládá se z výparníku, kompresoru, kondenzátoru a expanzního ventilu. Pro výpočet byl vzat ideální cyklus, tedy děj 1-2 je brán jako adiabatická komprese chladiva děj 2-3 je brán jako izobarická kondenzace, děj 3-4 je izoentálpická expanze (škrcení) a děj 4-1 je izotermické vypařování média. Schéma termodynamického cyklu je znázorněn v p-h diagramu chladiva R410A viz. Obr. 22.



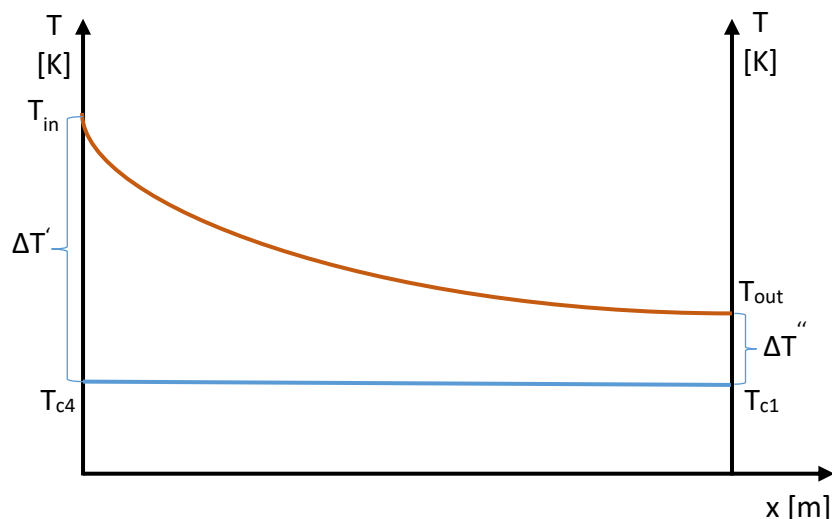
Obř. 22 Schéma primárního okruhu chlazení

K vyčíslení charakteristických stavů cyklu bylo potřeba vypočítat podmínky podle kterých bude tento cyklus pracovat. Těmito podmínkami je teplota a tlak za kterých se bude médium vypařovat ve výparníku. Vzhledem k tomu, že vypařování je fázová přeměna, ke které dochází za konstantní teploty, pak pro výpočet teploty vypařování vyjdeme z tepla Q a teplot T_{in} a T_{out} na sekundární straně výparníku. Za předpokladu, že uvažujeme nulové tepelné ztráty bude se vstupní teplota výparníku T_{in} rovnat výstupní teplotě na kondenzátoru a výstupní teplota výparníku T_{out} se bude rovnat vstupní teplotě na kondenzátoru.

Obdobným způsobem jako je uveden výše byl vypočítán logaritmický teplotní spád dle vztahu. (5.7). Dále byl podle vztahu (5.4) určen teplotní rozdíl $\Delta T''$ a následně spočtena teplota $T_{c1} = T_{c4}$. Pro výpočet $\Delta T''$ byl zvolen rozdíl teplot $\Delta T' = 10 K$ a pro výpočet ΔT_s byla zvolena stejná teplosměnná plocha jako je teplosměnná plocha chladiče.

$$\Delta T_s = \frac{Q}{\alpha_4 \cdot S_T} \quad (5.7)$$

kde α_4 je součinitel přestupu tepla a S_T je velikost teplosměnné plochy.



Obr. 23 Průběh teplot ve výparníku

V tabulce Tab. 7 jsou uvedeny výsledné hodnoty teplot na primární straně výparníku.

Teplota	Hodnota [K]
$\Delta T'$	10
$\Delta T''$	5,09
$T_{in} = T_{out}$	214,47

Tab. 7 Výsledné hodnoty teplot na výparníku

Pro výpočet cyklu byly použity dvě různá chladicí média. Prvním je již zmíněné chladivo R410A, což je hojně užívané médium pro klimatizace. R410A je směs pentafluorethanu, R125 a difluormethanu R32 a nepodléhá žádným zákazům či omezením. Oproti jiným chladivům má vysokou objemovou chladivost a energetickou efektivnost. [20] [21]

Mezi vlastnosti R410A patří bezbarvost, nehořlavost, teplota kondenzace při 20 °C při tlaku 1 atm, éterický zápach, teplota varu -51,6 ° při tlaku 1 atm, relativní hustota 1,062 g/cm³ při 25 °C. [20]

Druhým chladivem, které bylo pro výpočet použito je chladivo R134A. Patří mezi nejvyužívanější chladiva pro klimatizace budov a osobních vozidel a veřejné dopravy. S tímto typem se lze setkat také v chladírenském průmyslu a u tepelných čerpadel. [20]

Mezi vlastnosti R134a patří bod varu -26,3 °C při 1013 mbar, nízká hustota v kapalně formě, vysoká hustota v plynně formě, kritická teplota 101,1 °C, kritický tlak 40,6 bar, bezbarvost plynu se slabým éterickým zápachem. [20]

Parametry v jednotlivých bodech cyklu 1-4 s chladivem jsou uvedeny v Tab. 8 - Tab. 11.

stav 1 (sání kompresoru)				
Chladivo	R410A		R134A	
Teplota	T_{c1}	214,4707	214,4707	[K]
Tlak	P_{c1}	70949,27	17323	[Pa]
Entalpie	h_{c1}	398007,6	362150	[J/kg]
Entropie	s_{c1}	1965,355	1798	[J/(kg*K)]
Suchost	x_{c1}	1	1	[-]

Tab. 8 Stav 1 (sání kompresoru)

stav 2 (ústí kompresoru)				
Chladivo	R410A		R134A	
Teplota	T_{c2}	362,4211	332,56	[K]
Tlak	P_{c2}	2000000	850000	[Pa]
Entalpie	h_{c2}	498598,2	443520	[J/kg]
Entropie	s_{c2}	1965,355	1798	[J/(kg*K)]

Tab. 9 Stav 2 (ústí kompresoru)

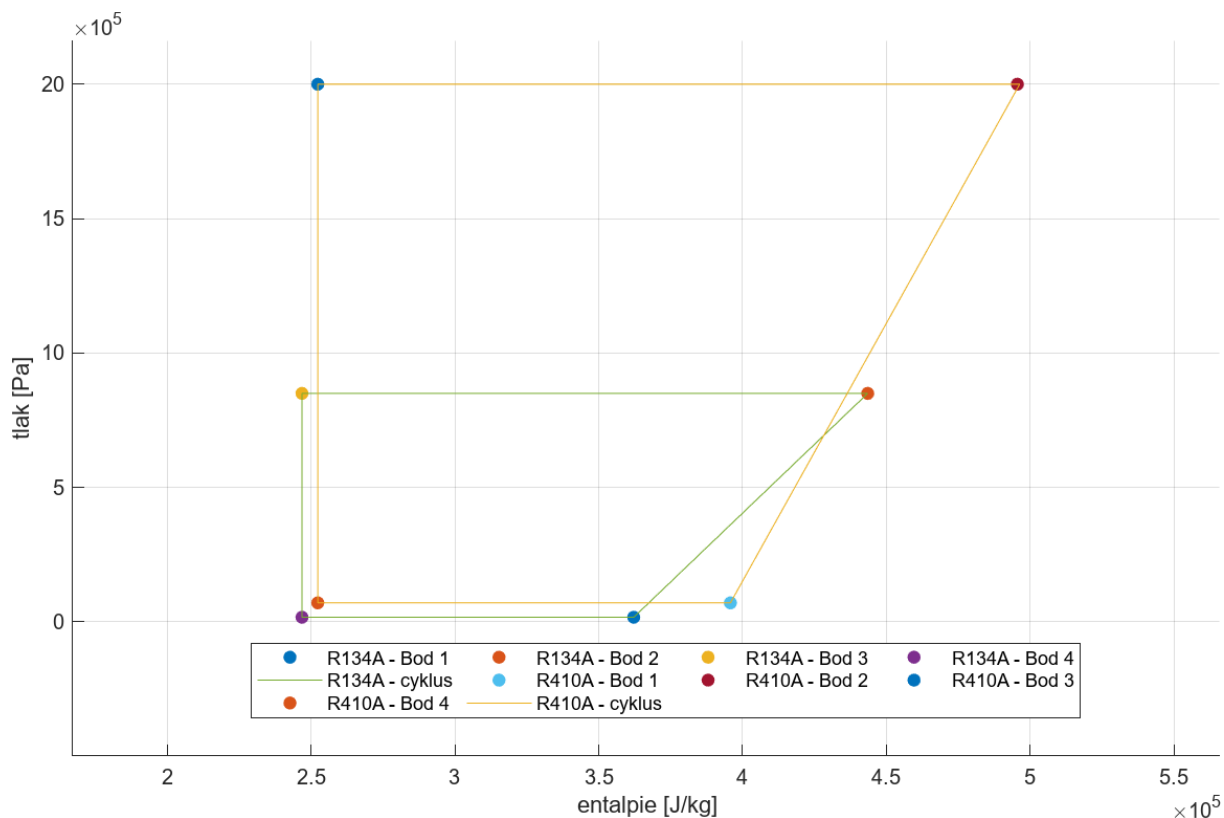
stav 3 (ústí kondenzátoru)				
Chladivo	R410A		R134A	
Teplota	T_{c3}	305,4775	306,62	[K]
Tlak	P_{c3}	2000000	850000	[Pa]
Entalpie	h_{c3}	253156,7	246770	[J/kg]
Entropie	s_{c3}	17522,87	1159,8	[J/(kg*K)]

Tab. 10 Stav 3 (ústí kondenzátoru)

stav 4 (za expanzním ventilem)				
Chladivo	R410A		R134A	
Teplota	T_{c4}	214,4707	214,4707	[K]
Tlak	P_{c4}	70949,27	17323	[Pa]
Entalpie	h_{c4}	253156,7	246770	[J/kg]
Entropie	s_{c4}	137771,6	1300,7	[J/(kg*K)]

Tab. 11 Stav 4 (za expanzním ventilem)

Hodnoty byly získány pomocí tabulkových hodnot pro toto chladivo. [22] [23]



Obr. 24 Porovnání cyklů s různými chladivý

Na Obr. 24 jsou porovnány cykly s chladivem R410A a chladivem R134A. Z obrázku jsou patrné rozdílnosti obou cyklů. Ze spojnice bodů 1 a 2 je patrný odlišný trend stoupání tlaku, což naznačuje menší práci vykonanou kompresorem, avšak tento vliv je potlačen vysokým tlakem na ústí kompresoru potřebným pro správnou funkci kondenzátoru. I přesto je však práce vykonaná čerpadlem nižší u chladiva R410A než u chladiva R134A viz Tab. 12. Plocha uzavřené smyčky cyklu udává práci vykonanou celým cyklem, která je očividně větší pro cyklus s chladivem R410A, což je další důvod pro použití tohoto cyklu.

Je nutné poznamenat, že spojnice bodů 1 a 2 na Obr. 24 neodpovídá teoretickému průběhu pracovní křivky, po které dochází ke stlačení chladiva. Teoretická křivka by neměla lineární průběh, ale měla by průběh izoentropie, neboť není uvažována výměna tepla s okolím.

Z vypočtených hodnot cyklu byl následně dopočítán průtok chladícího média, kompresní poměr mezi body 1-2, práce potřebná na pohon kompresoru, teplo přivedené do cyklu na výparníku a teplo odvedené z cyklu v kondenzátoru. Pro výpočet cyklu je důležitá teplota na výstupu z kondenzátoru T_{c4} , protože tato teplota musí být vyšší než teplota prostředí, aby se kondenzátor dostatečně chladil. Pro náš případ byla teplota zvolena na hodnotě 306 K, což odpovídá 33 °C. Hodnota teploty T_{c4} je ovlivňována tlakem kterého se dosáhne stlačením v kompresoru, proto byl tlak na ústí kompresoru zvolen tak, aby bylo dosaženo požadované teploty T_{c4} . V Tab. 12 - Tab. 15 jsou porovnány charakteristické hodnoty cyklu.

Kompresor		R410A	R134A	jednotky
průtok chladiva	\dot{m}	0,015	0,018	kg/s
tlak na vstupu kompresoru	P_{in}	70949	17323	[Pa]
tlak na výstupu kompresoru	P_{out}	2000000	850000	[Pa]
práce vykonaná kompresorem	W_c	1469	1492	[W]

Tab. 12 Charakteristické veličiny cyklu na kompresoru

Výparník		R410A	R134A	jednotky
Chladicí zatížení výparníku	Q_v	2116	2116	[W]

Tab. 13 Charakteristické veličiny cyklu na výparníku

Kondenzátor		R410A	R134A	jednotky
odvedené teplo kondenzátorem	Q_k	3585	3608	[W]

Tab. 14 Charakteristické veličiny cyklu na kondenzátoru

kompresní poměr			
R410A	ε	28,2	[-]
R134A	ε	49,1	[-]

Tab. 15 kompresní poměr v cyklu

Vzhledem k uvedeným hodnotám v tabulkách se jeví vhodnější chladící médium R410A u kterého bylo dosaženo téměř polovičnímu kompresnímu poměru před a za kompresorem. Dále je pro chladivo R410A mírně nižší práce vykonaná kompresorem, což přispívá k hospodárnějšímu provozu chlazení. Jedinou nevýhodou je více než dvojnásobný tlak na ústí kompresoru, který ovlivní dimenzování spojovacích trubiček chladícího cyklu.

Hodnoty v tabulkách byly dopočteny pomocí vztahů (5.8) - (5.12)

$$\dot{m} = \frac{Q}{h_{c1} - h_{c4}} \quad (5.8)$$

kde h_{c1} a h_{c4} jsou hodnoty entalpie za a před výparníkem a Q_v je teplo přijaté ve výparníku.

$$W_c = (h_{c2} - h_{c1}) \cdot \dot{m} \quad (5.9)$$

kde h_{c1} a h_{c2} jsou hodnoty entalpie na sání a ústí kompresoru a \dot{m} je hmotnostní tok dopočtený pomocí vztahu (5.8).

$$Q_v = (h_{c1} - h_{c4}) \cdot \dot{m} \quad (5.10)$$

kde h_{c1} a h_{c4} jsou hodnoty entalpie na výstupu a vstupu výparníku a \dot{m} je hmotnostní tok dopočtený pomocí vztahu (5.8).

$$Q_k = (h_{c3} - h_{c2}) \cdot \dot{m} \quad (5.11)$$

kde h_{c2} a h_{c3} jsou hodnoty entalpie na vstupu a výstupu kondenzátoru a \dot{m} je hmotnostní tok dopočtený pomocí vztahu (5.8).

$$\varepsilon = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (5.12)$$

kde P_{out} a P_{in} jsou hodnoty tlaku na ústí a sání kompresoru.

5.3 Systém topení

Topení alkoholu ve žlábků bude provedeno pomocí topného odporového kabelu, který bude pomocí samoregulační jednotky regulován na konstantní teplotu alkoholu. Předpoklad pro toto zařízení je, že by se celý systém nakoupil včetně potřebného termostatu.

6 Ekonomické zhodnocení provedeného návrhu

V rámci této kapitoly je provedeno ekonomické zhodnocení návrhu mlžné komory a přibližná kalkulace výrobních a provozních nákladů. Kapitola je rozdělena na část věnovanou samotné konstrukci vizuálního prostoru komory a část věnovanou systému chlazení a topení a k tomu nezbytných podpůrných komponent.

6.1 Ekonomické zhodnocení konstrukce vizuálního prostoru

V této podkapitole je provedeno ekonomické zhodnocení navrženého konstrukčního řešení vizuálního prostoru komory. Jsou zde uvedeny přibližné ceny jednotlivých komponent dle průzkumu trhu. Ceny komponenty jsou vždy uvedeny včetně DPH.

6.1.1 Černá deska

Černá deska bude vyrobena z měděného plechu o tloušťce 2 mm. Cena měděného plechu o rozměrech 500x375x2 mm vychází na 3 223 Kč [24]. Jak je popsáno výše, povrch desky bude očerněn pomocí chemikálie, která na povrchu vytvoří černou pasivační vrstvu. 90 ml této chemikálii se pohybuje kolem 400 Kč a předpokládá se, že by na celou jednu stranu desky bylo potřeba 180 ml. Náklady na povrchovou úpravu vyjdou tedy na 800 Kč. Celkové náklady na desku by se tedy měly pohybovat kolem 4 023 Kč.

6.1.2 Chladič

Chladič bude vyroben ze dvou bloků 500x375x15 mm a do jedné strany bude vyfrézována drážka pro vedení chladiva. Cena těchto dvou bloků je 5 463 Kč [25]. Obrobení bude provedeno v rámci kooperace s jinými pracovišti FST, a tudíž nejsou náklady na výrobu počítány

6.1.3 Vnitřní rám

Vnitřní rám bude vyroben pomocí plastového 3D tisku z materiálu ABS. 1 kg materiálu stojí 659 Kč [26]. Za předpokladu plné výplně modelu by rám vážil 7,058 kg. Rám by však bylo s největší pravděpodobností tisknout se sníženou hodnotou výplně, takže pro stanovení ceny je počítáno s 80% výplní. Tomu odpovídá hmotnost 5,646 kg a cena 3 721 Kč.

6.1.4 Žlábek a nožičky

Nožičky žlábků jsou trubičky o vnějším rozměrech 6/4,2x200 mm, tedy vnější průměr je 6 mm vnitřní průměr je 4,2 mm a délka 200 mm. 1 metr takové mosazné trubičky stojí 223 Kč [27], což by mělo stačit na všechny 4 nožičky.

Žlábek je vyroben z hliníkového profilu o rozměrech 30x20x2 mm, tedy šířce 30 mm, výšce 20 mm a tloušťce stěny 2 mm. Na výrobu je potřeba 2156 mm tohoto profilu, kdy 2 metry takového profilu stojí 355 Kč [28]. Výsledná cena výroby žlábků se tedy odhaduje přibližně na 400 Kč.

6.1.5 Krycí skla

Cena vnitřního a vnějšího skla se dá určit obtížněji, protože se očekává, že skla budou vyrobeny na míru. Samotné skleněné tabule však stojí 2381 Kč na metr čtvereční [29]. Na skla bude potřeba přibližně 2,3 m². Cena samotného skla by se tedy měla pohybovat kolem 5476 Kč. Pro dostatečnou rezervu bylo k částce opět přidáno 20% ceny materiálu na potřebnou výrobu. Očekávaná cena je 6571 Kč.

6.1.6 Rám elektrického Pole

Jak je popsáno výše u tohoto rámu se očekává, že by byly jeho prvky vytištěny pomocí plastového 3D tisku. 1 kg materiálu stojí 659 Kč [26]. Celý rám by měl mít hmotnost přibližně 1,7 kg. U tohoto rámu se neočekává větší nosnost tedy bude stačit 50% výplně tištěného materiálu. Výsledná cena tohoto rámu s nožičkami by měla být přibližně 570 Kč.

6.1.7 Odporový kabel k vyhřívání alkoholu.

Odporový drát o potřebné délce se samoregulačním systémem by se měl cenově pohybovat kolem částky 1750 Kč [30].

6.1.8 Vnější rám

Vnější rám bude vyroben z hliníkového profilu, který bude uzpůsoben k osazením vnějším sklem a ledkovým páskem pro osvětlení vizuální části. Pro sestavení rámu je potřeba přibližně 3 m které by měly stát. 1847 Kč [31]

6.1.9 Celkové shrnutí nákladů konstrukčního řešení vizuálního prostoru

Celkové náklady komponent byly spočteny na 25 660 Kč. Avšak tato částka nezahrnuje práci lidí, kteří na sestavení budou pracovat a energetickou náročnost výrobního procesu jako je frézování drážek chladiče nebo energie spotřebovaná v průběhu 3D tisku plastových součástí.

6.2 Ekonomické zhodnocení komponent systému chlazení

V této podkapitole bude zhodnocena cena nejdůležitějších komponent chladicího cyklu a náklady potřebné k jeho provozu. Ceny komponenty jsou vždy uvedeny včetně DPH-

6.2.1 Čerpadlo sekundárního okruhu chlazení

Čerpadlo sekundárního okruhu musí splnit podmínku dostatečného průtoku chladiva. Hodnota hmotnostního toku v cyklu je 0,13 kg/s, což přibližně odpovídá 0,5 m³/h. Pro tento hmotnostní tok se pohybují čerpadla v cenové relaci kolem 5 000 Kč. [32]

6.2.2 Výparník

Jako výparník je v plánu použit deskový výměník o potřebné teplosměnné ploše dle parametrů. Tento výměník však bude potřeba objednat na míru dle specifikací cyklu. obdobné teplené výměníky se pohybují kolem 12 000 Kč [33].

6.2.3 Kompresor

Kompresor je volen jako rotační kompresor, který je přímo určen pro práci s chladivem R410A. Součástka o potřebných parametrech vychází přibližně na 15 235 Kč [34].

6.2.4 Kondenzátor

Obdobně jako domácích ledniček a mrazáků je kondenzátor řešen spirálou, která bude na míru vyrobena z trubiček mědi, aby byl prostup tepla co nejlepší. U domácích ledniček se cena kondenzátoru pohybuje kolem 1000 Kč [35].

6.2.5 Expanzní ventil

Expanzní ventil pro chladivo R410A se pohybuje v cenové hladině 1882 Kč. [36]

6.2.6 Celkové zhodnocení komponent systému chlazení

Z uvedených cen jednotlivých součástí plyne že náklady na tyto komponenty jsou 35 117 Kč. K této částice je však potřeba připočítat náklady na materiál trubek, kterým budou komponenty spojeny a tomu odpovídající množství chladiva v systému, kde 10 kg tohoto chladiva stojí 9 136 Kč [37].

6.3 Ekonomické zhodnocení provozu mlžné komory

Hlavní komponenta, která bude napájena elektrický proudem, je kompresor primárního chladicího cyklu. Z výpočtu plyne, že potřebný příkon kompresoru je 1470 W. Při ceně 5,9 Kč/KWh pak vyjde denní spotřeba elektrické energie na provoz kompresoru přibližně na 208 Kč a roční 75,975,48 Kč. V rámci úspory bude mlžná komora spouštěna pouze v době od 9 do 17 hodin, což je doba, kdy je v budově univerzity nejvíce studentů. Díky tomu klesnou denní náklady na provoz na 69 Kč za den a 25 325 Kč za rok.

Čerpadlo sloužící pro cirkulaci na sekundární straně chlazení má příkon 18 W. Tomuto příkonu pak odpovídá cena na denní provoz od 9 do 17 hodin 0,8 Kč na den. A 310 Kč na rok.

Dohromady tedy cena na provoz či ní přibližně 25 635 Kč na rok. Ceny jsou uváděny včetně DPH.

6.4 Závěr ekonomického hodnocení

V rámci ekonomického hodnocení byla provedena přibližná kalkulace komponent chlazení, kde podle prozatímních známých komponent vychází náklady na 35 117 Kč včetně DPH. K tomu je ovšem třeba připočíst náklady na armatury, základní řídicí systém (např. v podobě Raspberry PI) a personální náklady s tím spojené.

Jako alternativní řešení pro chlazení je možné nakoupit samostatnou chladicí jednotku, která se připojí na sekundární okruh. Chladicí jednotka pak nahradí celý primární okruh chlazení. Velkou výhodou takového řešení je i jednodušší nakládání s chladivem, které bude v případě výstavby celého kompresorového cyklu náročné a bude třeba dodržet zásady BOZP při nakládání s chladivem. Jednotka o potřebných nákladech se pohybuje v cenové hladině 60 000 až 65 000 Kč [38] včetně DPH. Náklady na provoz jednotky by byly srovnatelné s náklady navrženého cyklu. Na Obr. 25 je ilustrační foto takové jednotky, jejíž rozměry jsou 650x550x900 mm, takže by bylo možné jednotku schovat ve vnitřní části celé komory.



Obr. 25 Ilustrační foto chladicí jednotky [41]

7 Závěr

V rámci této diplomové práce byl popsán vývoj a funkce mlžné komory a shrnuty jí detekovatelná záření. Hlavní částí bylo zjištění potřebných provozních podmínek, které byly popsány v kapitole 3. Parametry difuzní mlžné komory, které byly v této kapitole určeny jsou teplota na černé desce, kde kondenzují alkoholové páry a teplota výhřevu. Teplota chlazené desky byla stanovena na 233,15 K (-40 °C) a teplota výhřevu na 293,15 K (20 °C). Pro tyto teploty byl následně napočten cyklus chlazení, který se skládá z primární a sekundární části. Sekundární část má za úkol odvézt teplo z chladiče komory do primárního okruhu. Primární okruh je aktivní a skládá se z kompresoru, kondenzátoru, expanzního ventilu a výparníku. V práci byl proveden výpočet pro dva druhy chladiva R410A a R134A, která se běžně používají v chladírenství a tepelných čerpadlech a neplatí pro ně prozatím žádná omezení ohledně jejich používání.

Dále byl v této diplomové práci navržen vizuální prostor mlžné komory, který je vyobrazen na Obr. 11. Hlavními komponentami jsou černá deska, na které kondenzují páry, chladič, žlábek, který slouží jako rezervoár pro odpařovaný alkohol, vnitřní rám, který spolu s vnitřním sklem tvoří bariéru proti úniku alkoholu, rám elektrického pole a vnější rám s vnějším sklem. Ke konci této práce pak bylo provedeno ekonomické zhodnocení komponent použitých v návrhu mlžné komory a zhodnocení ekonomických nákladů na provoz mlžné komory.

Tato diplomová práce bude v budoucnu rozšířena o bakalářskou práci, kterou student v letošním roce neodevzdal. Spolu pak poslouží jako materiál ke skutečné výstavbě mlžné komory na Katedře energetických strojů a zařízení na Fakultě strojní ZČU v Plzni.

Použitá literatura

1. **Muñoz, Iván Esteban.** Bachelor Thesis. *Detection of particles with a cloud chamber.* Leioa : autor neznámý, 2015.
2. **Vlková, Kateřina.** Praha : autor neznámý. Difúzní mlžná komora.
3. **L'Annunziata, Michael.** *Radioactivity, Introduction and History, From the Quantum to Quarks.* místo neznámé : Elsevier, 2016. 978-0-444-63489-4.
4. **Cloudylabs.** Cloudylabs. *About diffusion cloud Chambers.* [Online] 2013. [Citace: 25. Březen 2023.] <https://www.cloudylabs.fr/wp/>.
5. **Wilson, C. T. R.** On a New Type of Expansion Apparatus. London : Proceedings of the Royal Society of London, 1933. Sv. 142, 846.
6. **Alexander Langsdorf, Jr.** A Continuously Sensitive Diffusion Cloud chamber. Berkely : autor neznámý, 1939.
7. **T. S. Needels, C. E. Nielsen.** A Continuously Sensitive Cloud Chamber. Ohio : autor neznámý, 1950.
8. **P. J. DeMott, A. J. Prenni, G. R. McMeeking, R. C. Sullivan, M. D. Petters, Y. Tobo, M. Niemand.,** Integrating laboratory and field data to quantify the immersion. 2015.
9. **Ahmed, Syed Naeem.** Physics and Engineering of Radiation Detection. místo neznámé : Elsevier, 2015.
10. **Galindo, Andrea.** What is Radiation? *International Atomic Energy Agency.* [Online] 25. leden 2023. [Citace: 30.. duben 2023.]
11. **Protection, United States Environmental.** Radiation Protection. *United States Environmental Protection.* [Online] 13. únor 2023. [Citace: 30. duben 2023.]
12. **Morbacherová, Mgr. Jana.** *Atomová, jaderná a kvantová fyzika.*
13. **Turjap, Vladimír.** Záření beta. *Fyzika atomového jádra.* [Online] 2005. [Citace: 1. 5 2023.] http://www.turjap.cz/atomove_jadro/stranky/radioaktivita_2.html.
14. **Ullman, Vojtěch.** Biologické účinky ionizujícího záření - rizika a využití pro zdraví. *astronuklfyzika.* [Online] [Citace: 5. 5 2023.] <https://astronuklfyzika.cz/PaprskyZivotaSmrti.htm>.
15. **Vaněk, Ondřej.** *Kosmické záření a projekt Pierre Auger.* místo neznámé : AGA (Aldebaran Group for Astrophysics), 2005.
16. **Králová, Mgr. Magda.** Techmania Science Center. *Zdroje radioaktivního záření.* [Online] 2007. [Citace: 5. 5 2023.] <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/detekce-ionizujiciho-zareni/zdroje-radioaktivniho-zareni>.
17. **United States Environmental protection Agency.** United States Environmental protection Agency. *Radiation Sources and Doses.* [Online] 16. 2 2023. [Citace: 5. 5 2023.] <https://www.epa.gov/radiation/radiation-sources-and-doses>.
18. **Thomson, J.J.** *Application of dynamics to physics and chemistry.* London : Macmillan and Co., 2023.
19. **Jan Hlaváček, Jan Plutnar.** Černění mosazných dílů pomocí přípravku Brass Black Metal Finish. *Honzikovy vláčky.* [Online] 0. 0 2017. [Citace: 15. 5 2023.]

<http://www.honzikovyvzlacky.cz/2017/05/31/cerneni-mosaznych-dilu-pomoci-pripravku-brass-black-metal-finish/>.

20. **e-chladiva.cz**. Chladiva a jejich rozdělení. *e-chladiva*. [Online] 2023. [Citace: 5. 5 2023.] <https://www.e-chladiva.cz/chladiva-rozdeleni-p112.htm>.

21. **ACHS**. Advanced cooling and heating systems. *Základní chladiva užívaná v současné době v klimatizacích (R410-A, R407c, R32)*. [Online] 18. 10 2018. [Citace: 7. 5 2023.] <https://achs.cz/rady-klimatizace/zakladni-chladiva-uzivana-v-soucasne-dobe-v-klimatizacich-r410-a-r407c-r32/>.

22. **ASHRAE Inc**. *THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF REFRIGERANTS*. 2009.

23. **The Chemours Company FC**. *Freon™ 410A*. 2023.

24. **Zbraně liberec**. Zbraně liberec. *BIRCHWOOD CASEY Brass Black Metal Finish 90ml, brynýr za studena*. [Online] 2023. [Citace: 5. 15 2023.] <https://www.zbraneliberec.cz/pece-o-zbrane/brynyry-galvanika/birchwood-casey-brass-black-metal-finish-90ml-brynyr-za-studena-cerneni-na-mosaz>.

25. **Manema S.R.O**. Manema S.R.O. *AW5083*. [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://www.ehutni.cz/kategorie/hutni-material/hlinik-slitiny-hliniku/plechy/hladke-bez-upravy/prirezy/aw5083/>.

26. **Josef Průcha**. Prusa Research by Josef Prucha. *ASA/ABS*. [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.]

27. **Pecka-modelář**. Pecka-modelář. *Mosazná trubička tvrdá 6,0/4,2x1000 mm*. [Online] 2023. [Citace: 15. 5 2023.] <https://www.peckamodel.cz/2225645-mosazna-trubka-prumer-6-0-4-2-mm>.

28. **Hornbach**. Alu U Profil 30x20x2mm / 2m. *Hornbach*. [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://www.hornbach.cz/p/alu-u-profil-30x20x2mm-2m/6368195/>.

29. **Nobio**. Tvrzené čiré sklo 4 mm s leštěným. *Nobio*. [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://nobio.cz/kalena-skla-na-miru/26583-tvrzene-cire-sklo-4-mm-s-lestenym-okrajem-na-zakazku.html>.

30. **Drimpl**. Odporový topný kabel. *Drimpl napaječky*. [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://www.drimpl-napajecky.cz/cz/skot/topne-kabely-vyhrivani-potrubi/odporovy-topny-kabel-3-75m-s-nerozovym-opletem-230v-75-w-2014685.html>.

31. **Ehlinik**. Ehlinik. *Hliníková tyč plochá/čtvercová 70x50 6063 3m*. [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://www.ehlinik.cz/hlinikova-tyc-plochactvercova-70x50-6063-3m/pro-QPS0000101.html>.

32. **Bola**. Elektronické oběhové čerpadlo Grundfos. *Bola*. [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://www.bola.cz/elektronicke-obehove-cerpadlo-grundfos-alpha2-25-40-99411165>.

33. **RS online**. Kapalinový výměník, řada: BP400, 214.5 x 80.7 x 24.1mm. *RS online*. [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://cz.rs-online.com/web/p/deskove-tepelne-vymeniky/1449311>.

34. **Kovoslužba ots**. kompresor rotační R410a 2,1kW Toshiba PA93M1C-4DZDE1. *Kovoslužba ots*. [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] https://www.kovoslužbaots.cz/index.php?PaggingValues=2%3A24%3A2%3B&_ShopSearch%5BSearchType%5D=1&_ShopSearch%5BSearch%5D=kompresor+R410A+2+Kw&IdPage=29&_Box%5B1481%5D%5BId%5D=1484&btnSearch=.

35. **V.N.D.** Kondenzátor V 1480mm W 530mm pro prosklenou lednici D 6,5mm. *V.N.D.* [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://www.vnd.cz/kondenzator-pro-prosklenou-lednici-w-530mm-d-6-5mm-v-1480mm>.
36. **pragopolair.** Ventil expanzní TLEX 1,5/R410A. *pragopolair.* [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://eshop.pragopolair.cz/ventily/10642-ventil-expanz-tlex-1-5-r410a-4019837553166.html>.
37. **Echladiva.** Chladivo R410A (10kg). *Echladiva.* [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] <https://www.e-chladiva.cz/chladivo-r410a-10kg-e621.htm>.
38. **Alibaba.** 2.5KW 2500W Mini Low Temperature Lab Water Chiller. *Alibaba.* [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] https://www.alibaba.com/product-detail/2-5KW-2500W-Mini-Low-Temperature_60805259841.html.
39. **Bohumil, Tesařík.** O vynálezci bublinkové komory Donaldu Glaserovi . *Třípól.* [Online] 1. listopad 2016. [Citace: 15. duben 2023.] <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/biografie/1924-o-vynalezci-bublinkove-komory-donald-glaserovi>.
40. **Jagu s.r.o.** Nuledo. *O mlžných komorách.* [Online] 2023. [Citace: .. 5 2023.] <https://www.nuledo.com/>.
41. **SEAVOA.** Water Chiller NovaChiller-2.5KW. *SEAVOA.* [Online] 2023. [Citace: 20. 5 2023.] http://www.seavova.com/products_show.asp?p_id=1123.

Seznam obrázků

Obr. 1	Původní návrh Wilsonovi mlžné komory [3]	9
Obr. 2	Wilsonova mlžná komora [4]	10
Obr. 3	Schéma Langsdorfovi mlžné komory [6]	11
Obr. 5	Princip bublinkové komory. [39]	13
Obr. 6	Vznik záření gama [14]	16
Obr. 7	Sprška sekundárního kosmického záření. [15]	17
Obr. 8	Princip difusní mlžné komory [40]	20
Obr. 9	Graf závislosti nasycení na poloměru kondenzačního jádra.....	22
Obr. 10	Průběh teploty po výšce komory.....	24
Obr. 11	Rozložení přesycení po výšce komory	25
Obr. 12	Sestava vizuálního prostoru mlžné komory.....	27
Obr. 13	Černá deska.....	27
Obr. 14	Chladič.....	28
Obr. 15	Vnitřní rám s úkošem	29
Obr. 16	Návrh žlábků s nožičkami	30
Obr. 17	Vnitřní a vnější krycí sklo	31
Obr. 18	Konstrukce rámu el. pole.....	32
Obr. 19	Zjednodušený průběh teploty po výšce komory	36
Obr. 20	Schematické znázornění rozměrů použitý pro výpočet tepla	36
Obr. 21	Schéma chladicího cyklu komory	37
Obr. 22	Průběh teplot v chladiči	38
Obr. 23	Schéma primárního okruhu chlazení.....	40
Obr. 24	Průběh teplot ve výparníku.....	41
Obr. 25	Porovnání cyklů s různými chladivými.....	43
Obr. 26	Ilustrační foto chladicí jednotky [41].....	49

Seznam tabulek

Tab. 1	Přehled ročních dávek z přirozených a umělých zdrojů [16]	19
Tab. 2	Tabulka teplot T_1 a T_0 použitých pro výpočet teplotního spádu v komoře	23
Tab. 3	Soupis komponent vizuálního prostoru.....	26
Tab. 4	Výsledné hodnoty Q a T_6	35
Tab. 5	Hodnoty teplot na chladiči.....	39
Tab. 6	Hodnota průtoku v sekundárního okruhu chlazení	39

Tab. 7	Výsledné hodnoty teplot na výparníku.....	41
Tab. 8	Stav 1 (sání kompresoru).....	42
Tab. 9	Stav 2 (ústí kompresoru)	42
Tab. 10	Stav 3 (ústí kondenzátoru).....	42
Tab. 11	Stav 4 (za expanzním ventilem).....	42
Tab. 12	Charakteristické veličiny cyklu na kompresoru.....	44
Tab. 13	Charakteristické veličiny cyklu na výparníku	44
Tab. 14	Charakteristické veličiny cyklu na kondenzátoru	44
Tab. 15	kompresní poměr v cyklu	44