

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta**

**Experimentální vyhodnocení efektivity sušení recipientu
pomocí vybraných vakuových technik**

Bakalářská práce

Luděk Lagron

Školitel: doc. RNDr. Vítězslav Straňák, Ph.D.

České Budějovice 2022

Bibliografické údaje

Lagron, L., 2022: Experimentální vyhodnocení efektivity sušení recipientu pomocí vybraných vakuových technik. [Experimental evaluation of recipient drying efficiency using vacuum techniques. Bc. Thesis, in Czech.] – 39 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Annotation

This bachelor thesis deals with the application of three different vacuum drying techniques with respect to their efficiency. These are the direct drying method, drying with inert gas dosing, and drying with a cycling period. The aim of the thesis is the vacuum drying of the interspace in a container serving for storage of used nuclear fuel; the thesis faces the problem solved in the Temelín nuclear power plant. The thesis introduces the problematics of used nuclear fuel storage in containers, the basics of vacuum technology, and finally reports the results of experiments to verify and evaluate the most effective method of vacuum drying.

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích,

dne

Podpis studenta

Poděkování:

Rád bych poděkoval panu doc. RNDr. Vítězslavu Straňákovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při vypracování bakalářské práce. Dále panu Ing. Ladislavovi Fialovi za poskytnuté materiály a odbornou konzultaci problematiky a v neposlední řadě rodině a kolegům ze speciální kontroly JE Temelín za jejich trpělivost.

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíle práce.....	2
3. Problematika paliva jaderné elektrárny	3
3.1. Skladování vyhořelého paliva a manipulace s ním	3
3.2. Obalový soubor na JE Temelín	5
3.3. Zavezení a odbavení OS a umístěním na SVJP.....	6
4. Základy vakuové fyziky	9
4.1. Rozdělení vakua	9
4.2. Kinetická teorie ideálních plynů.....	9
4.3. Základní zákony	11
4.4. Odchytky reálných plynů od ideálních.....	12
4.5. Maxwelllovo rozložení rychlostí	13
4.6. Tepelná vodivost plynů	13
4.7. Střední volná dráha molekul.....	14
5. Použitá zařízení.....	15
6. Sušení pomocí vakuování	22
6.1. Porovnání čidel	24
6.2. Vyhodnocení.....	24
6.3. Metoda sušení pomocí vakua na přímo	26
6.3.1. Situace bez vody	27
6.3.2. Situace s přidanou vodou.....	29
6.4. Metoda sušení pomocí vakua s cyklováním	30
6.5. Metoda sušení pomocí vakua s dávkováním inertního plynu.....	34
7. Závěr.....	38
8. Seznam literatury a použité zdroje	39

1. Úvod

Ve vyhořelém palivu jaderné elektrárny se můžeme setkat díky štěpné reakci s téměř celou periodickou tabulkou prvků. Takto vzniklé vyhořelé palivo nazýváme jaderným odpadem. Část jaderného odpadu se přepracovává zpět na klasické palivo pro jaderné elektrárny. Zbytek, který se nezpracovává je potřeba zakonzervovat a uložit. K tomu slouží tzv. obalové soubory, do kterých se vyhořelé palivo umístí a může se v nich skladovat desítky let [1]. Abychom si byli jisti, že nedojde k úniku radioaktivních látek do atmosféry, musí se u obalových souborů před jejich umístěním na sklad vyhořelého paliva provést zkoušky těsnosti. V minulosti byl na JE Temelín používán obalový soubor (dále jen „OS“) CASTOR 1000/19 od německé firmy GNS. Od roku 2019 je používán OS Škoda 1000/19. Při změně výrobce OS došlo i k několika změnám a inovacím v konstrukci. Jednou z těchto změn byla i výměna dvojice elastomerového těsnění pod primárním víkem. Přínosem této inovace byla delší životnost těsnění, ale změna měla negativní vliv na rychlost vysušení meziprostoru mezi těmito těsněními od zbytkové vody. Tato operace se v krajních případech protáhla z původních dvou hodin až na osm [2, 3].

Předložená práce se proto zabývá problematikou sušení meziprostoru těsnění primárního víka obalového souboru. Hlavní motivací a cílem je vyzkoušet více metod vakuového sušení meziprostoru mezi těsněním primárního víka OS, metody porovnat a vybrat nejefektivnější. V teoretické části práce jsou čtenáři předloženy obecné informace o palivu jaderné elektrárny, problematika OS, jeho následné odbavení a základy vakuové fyziky, která je použita při sušení. V praktické části je představeno zařízení, které bylo použito při experimentu, seznámení se třemi metodami sušení pomocí vakua a následné zpracování a vyhodnocení naměřených výsledků. Stěžejní část a vlastní přínos práce pak představují získané výsledky a zhodnocení srovnávaných metod sušení s ohledem na jejich uplatnění v technické praxi.

2. Cíle práce

Z výše uvedeného byly pro předkládanou bakalářskou práci stanoveny následující dílčí cíle:

- a) Uvést čtenáře do problematiky odbavení obalového souboru na vyhořelé palivo.
- b) Představení základů vakuové techniky důležité pro sušení jaderného paliva a odpovídajících měření.
- c) Změření efektivity sušení pomocí vakua a srovnání tří vakuových technik:
 - vakuování na přímo,
 - vakuování s pomocí dávkování inertního plynu,
 - vakuování s pomocí cyklování.
- d) Vyhodnocení naměřených výsledků – určení nejefektivnější metody.

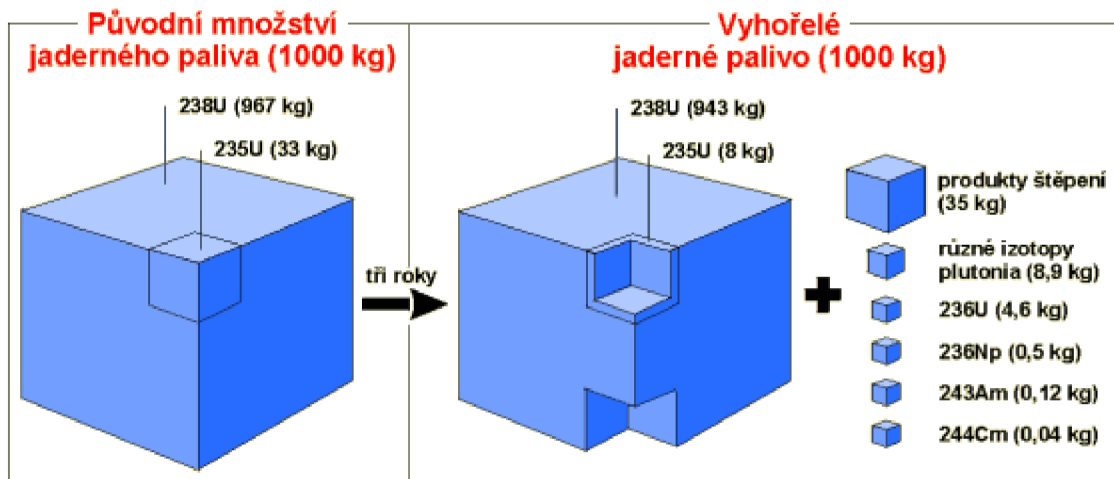
3. Problematika paliva jaderné elektrárny

Reaktor s výkonem cca 1000 MW (reaktory na jaderné elektrárně Temelín) vyprodukuje ročně kolem 30 tun jaderného odpadu, což však při vysoké hustotě paliva představuje objem pouze cca 1,5 m³. Tato vysoká hustota jaderného paliva má za následek, že vyhořelé palivo z jaderných elektráren tvoří pouze necelé 1 % objemu veškerého jaderného odpadu na světě, avšak zároveň představuje až 90 % veškeré potenciální radioaktivity. Vyhořelé palivo z jaderných elektráren Dukovany a Temelín obsahuje stále 95 % nespotřebovaného uranu, z toho 1 % štěpitelného ²³⁵U a 1 % izotopu plutonia ²³⁹Pu. Zbytek štěpných produktů dnes považujeme za odpad. Nejvýznamnější radioaktivní prvky v tomto odpadu jsou cesium ¹³⁷Cs a stroncium ⁹⁰Sr. Pro další nakládání s vyhořelým palivem je důležitý radioaktivní rozpad, který má za následek, že vyhořelé palivo postupně radioaktivitu snižuje a některé radioizotopy přecházejí na neaktivní prvky. Jsou to prvky jako platina, ruthenium, rhodium, paladium, stříbro, prvky vzácných zemin atd. Oddělení těchto prvků od jaderného odpadu by mohlo být v budoucnu ekonomicky zajímavé [4].

Palivový systém se skládá ze souborů a dalších komponent aktivní zóny. Uvnitř palivových souborů jsou umístěny svazky palivových proutků. Palivové soubory usnadňují manipulaci s palivem a jeho správné umístění v zásobníku pro skladování jak čerstvého paliva, tak následně při jeho uložení v reaktoru, bazénu skladování vyhořelého paliva, a nakonec i v samotném obalovém kontejneru na vyhořelé jaderné palivo. Komponenty aktivní zóny se zasouvají do vodících trubek souborů a dělí se na pohyblivé – klastry a nepohyblivé – diskretní vyhořívající absorbátory, sekundární neutronové zdroje a svazky s materiálovými ampulemi pro ozařování vzorků [5].

3.1. Skladování vyhořelého paliva a manipulace s ním

Na první pohled nelze rozeznat použitý, tj. vyhořelý palivový článek od čerstvého článku – oba jsou nepoškozené a čisté. Palivové články musely v reaktoru odolat teplotě okolo 300 °C a tlaku 15,7 MPa, není proto pro ně problém odolat menším teplotám a tlakům, které jsou běžné při skladování a dalších manipulacích. Pro tlakovodní reaktory (JE Temelín VVER 1000) je povrch článků pokryt slitinou zirkonia. Ta je mimořádně odolná proti korozi, a navíc vykazuje velký účinný průřez pro záchyt neutronů. Čerstvé palivové články se však pochopitelně liší od vyhořelých palivových článků v radioaktivitě, viz Obr. 1 [4].



Obr. 1: Porovnání složení použitého a nepoužitého paliva [4].

Palivové články se využívají v reaktoru v tříletých cyklech. Během jednoho cyklu se vymění zhruba třetina palivových článků za nové. Pozice palivového článku v reaktoru se sofistikovaně určuje a pravidelně mění s každou generální odstávkou (jednou ročně) podle toho, jak je potřeba rozložit výkon jednotlivých článků, aby byl reaktor ve výkonové rovnováze. Veškeré manipulace s palivem se na reaktorovém sále provádějí v bazénu pod vodou z důvodu chlazení a stínění radioaktivního záření. Palivo se po svém tříletém cyklu stává vyhořelým a pomocí zavážecího stroje je převezeno do bazénu skladování, kde setrvá 5 až 10 let [4]. Po uplynutí této doby se musí palivo uskladnit trvale.

Nejrozšířenějším způsobem uskladnění paliva ve světě je mokré skladování. Kdy se použité jaderné palivo skladuje ve vodních bazénech. Voda zajišťuje chlazení souborů a poskytuje ochranu před zářením. Výhodou mokrého skladování je snadná vizuální kontrola. Nevýhodou pak potřeba stálého chlazení a čištění vody (vznik kapalných radioaktivních odpadů) což přináší vyšší provozní náklady než u skladování suchého [4].

V jaderných elektrárnách na území ČR se používá suché skladování ve stíněných kontejnerech tzv. obalových souborech. Při delších intervalech skladování se dává přednost právě tomuto způsobu. Použité palivo se ukládá do betonových či kovových kontejnerů nebo do betonových staveb tzv. sklípků. Výhodou jsou nižší náklady než u skladování mokrého. Další výhodou je pak snazší manipulace s palivem uloženým v kontejnerech stejně jako další nakládání s vyhořelým palivem, např. rozšiřování skladů atd.

Obalové soubory umožňují, aby při transportu nebylo nutné překládat vyhořelé palivo. Kontejner s vyhořelým palivem lze převést (i dočasně uložit) bez zbytečných a časově náročných manipulací. Tento způsob skladování umožňuje uložit radioaktivní materiál

v trvalém uložišti s možností kontejner rozpečetit a palivo využít v budoucnu s pomocí nových technologií [6].

3.2. Obalový soubor na JE Temelín

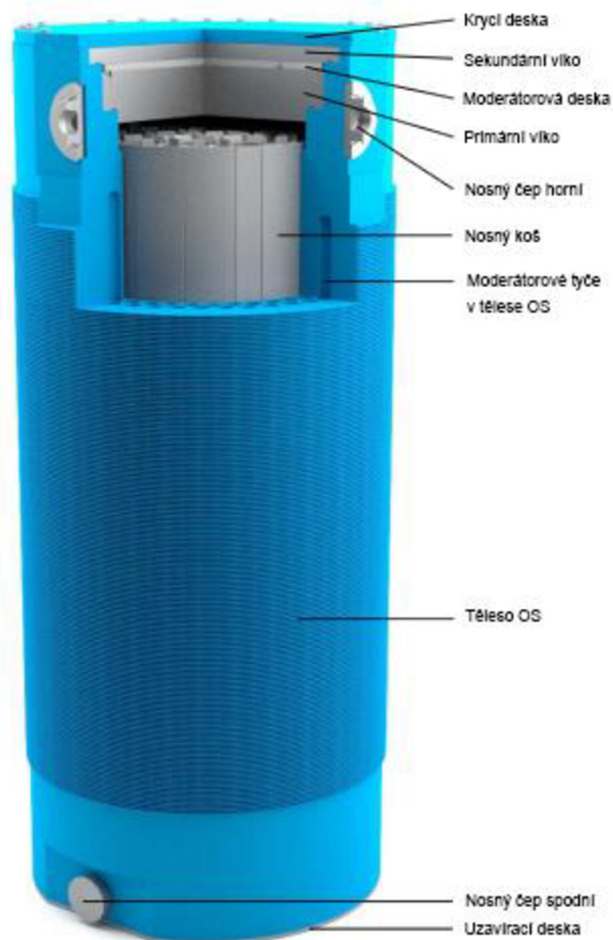
OS Škoda 1000/19 se skládá ze silnostěnného válcového tělesa z korozivzdorné oceli s uzavíracím systémem dvou vík, viz Obr. 2. Ve vnitřním prostoru OS je umístěn nosný koš, který slouží pro uložení palivových souborů. Stěna OS ve tvaru válce má tloušťku 410 mm. Z vnější strany pláště OS je vysoustruženo 185 radiálních žeber o výšce 20 mm, které slouží pro zlepšení přestupu tepla. Dno OS má tloušťku 338 mm.

OS je vybaven dvěma víky: primárním a sekundárním, které spolu tvoří uzavírací systém OS. Jsou zhotovena z korozivzdorné kované oceli a pod každým z vík je dvojice těsnění. Víka se upevňují pomocí svorníků a stažených maticemi. Obě tyto těsnící bariéry jsou na sobě nezávislé. Obě bariéry jsou ve spojení se zařízením, které monitoruje tlak v jejich meziprostoru, což umožňuje kontrolu těsnosti i během skladování. Nad uzavíracím systémem vík je umístěna krycí deska, která bariéry chrání proti mechanickým a povětrnostním vlivům.

Ve válcové stěně tělesa OS je umístěno 42 axiálních vývrtů, které jsou vyplněny moderátorovými tyčemi z vysokohustotního polyetylénu kvůli zlepšení neutronového stínění. Pod sekundární deskou a u dna tělesa jsou rovněž umístěny desky z polyetylénu. V uzavírací desce dna jsou namontovány dva ventily sloužící pro vyrovnání tlaku v prostoru moderátorové desky pod uzavírací deskou dna a v prostoru moderátorových tyčí.

Radiální žebra z vnější strany pláště OS zvětšují plochu pro přestup tepla a napomáhají tak k chlazení palivových souborů uvnitř OS. Dále jsou na vnější straně umístěny čtyři nosné čepy pro manipulaci s OS, v praxi se používají pouze dva a zbylé dva mají bezpečnostní funkci. Na straně dna jsou umístěny dva čepy pro otáčení kontejneru ze svislé do vodorovné polohy a naopak. Těmito čepy se OS připevňuje k vlečce, která OS převáží mezi výrobním blokem a skladem vyhořelého jaderného paliva (SVJP). Během přepravy na vlečce se na horní a spodní stranu kontejneru montují tlumiče nárazu.

Jak už název napovídá, OS Škoda 1000/19 je konstruován pro 19 palivových souborů z tlakovodních reaktorů VVER 1000. Vnější průměr OS je 2341 mm, výška 5600 mm včetně ochranné desky. Hmotnost je 118 988 kg včetně ochranné desky. Do OS se mohou zavést palivové soubory s maximální hmotností 14 580 kg. Výrobcem OS je Škoda JS a.s., Plzeň, Česká republika [7].



Obr. 2: Obalový soubor Škoda 1000/19 [7].

3.3. Zavezení a odbavení OS a umístěním na SVJP

Zavezení OS je prováděno pod vodou pomocí zavážecího stroje. Nejprve se OS umístí do servisní šachty v bazénu skladování vyhořelého paliva, kde proběhne vizuální prohlídka vnitřku OS a dosedacích ploch těsnění primárního víka. Následně proběhne zavezení OS palivovými soubory. Celá tato procedura probíhá pod vodou. Po zavezení opět proběhne vizuální prohlídka hlavic palivových souborů včetně kontroly výrobních čísel za asistence inspektorů mezinárodní agentury pro atomovou energii MAAE a dosedacích ploch těsnění primárního víka. Za předpokladu, že je vše v pořádku, položí se primární víko a OS se ze servisní šachty převezve na servisní místo na reaktorovém sále, kde proběhne povrchová dekontaminace a částečné odčerpání vody z vnitřního prostoru kontejneru. Poté se připojí sušící aparatura, která se skládá z rotačních olejových vývěv (dvě jednostupňové a jedna dvoustupňová), řídicí jednotky, chladicí jednotky a kondenzátorů. Zároveň se připojí zařízení pro stanovení netěsnosti. Konkrétně zapisovač, heliový detektor a soustava čidel pro měření

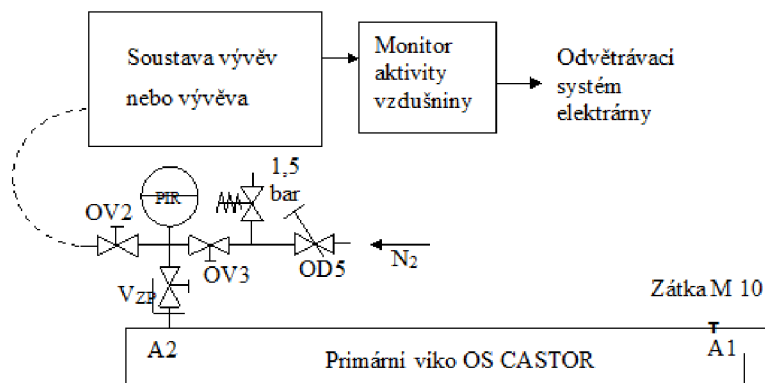
tlaku. První z těsnostních zkoušek je sušení a průkaz zbytkové vlhkosti prostoru mezi těsněními primárního víka, která je předmětem experimentální části této bakalářské práce.

Sušení a průkaz zbytkové vlhkosti prostoru mezi těsněními primárního víka

Obalový soubor se před zkouškou nachází ve stavu kdy, primární víko je namontováno a utaženo na plný utahovací moment do pevného dosednutí. Předtím byla z vnitřního prostoru obalového souboru zčásti vyčerpána kontaminovaná voda. Volné těsnící plochy na tělese obalového souboru pro sekundární víko jsou chráněny proti poškození. Prostor mezi těsněními je přístupný zkušebními otvory A1 a A2, které musí být průchozí, viz Obr. 3.

Přípravné práce:

1. Vývěvy sušící jednotky se uvedou do provozu a nechají se zahřát.
2. Kontrola průchodnosti otvorů A1 a A2.
3. Vysátí vody z kontrolního prostoru a profouknutí dusíkem.
4. Připojení ventilového rozvodu a vlnovce.
5. Kontrola zavření ventilů OV2, OV3 a OD5.



Obr. 3: Schéma vysoušení prostoru mezi těsněními primárního víka [2].

Jednotlivé aktivní části uvedené v Obr. 3 označují:

- PIR tlakový snímač s rozsahem 0,1 – 1200 hPa.
- OV2 ventil čerpací trasy.
- OV3 ventil plnicí trasy.
- OD5 dávkovací ventil.

Proces sušení meziprostoru těsnění primárního víka:

Ventil OV2 se otevře, ventily OV3 a OD5 necháme zavřené. Čas pro start sušení vyznačíme do záznamu zapisovače. Zde můžeme zvolit tři techniky sušení:

1. sušení na přímo,
2. sušení s pomocí cyklování,
3. sušení s pomocí dávkování inertního plynu.

Po dosažení tlaku ≤ 1 hPa na ukazateli tlaku PIR pokračujeme v sušení minimálně po dobu 1,5h. Čas dosažení tlaku ≤ 1 hPa vyznačíme v záznamu zapisovače.

Měření vzestupu tlaku (zkouška suchosti – průkaz zbytkové vlhkosti) se provede tak, že uzavřeme čerpací trasu zavřením ventilu OV2. Ventily OV3 a OD5 jsou stále zavřené. Odečteme ukazatel tlaku PIR a vyznačíme v záznamu zapisovače jako p_1 . Vyznačíme čas uzavření trasy t_1 . Po době 15 minut ($\Delta t = 15$ min) provedeme znovu odečet ukazatele tlaku PIR a znovu vyznačíme v záznamu zapisovače jako p_2 a čas t_2 . Stanovíme vzestup tlaku Δp dle vztahu:

$$\Delta p = p_2 - p_1. \quad (1)$$

Jestliže je rychlost poklesu tlaku $\Delta p / \Delta t$ menší nebo rovna 9 hPa / 15 min, pak musíme pokračovat v průkazu zbytkové vlhkosti prodloužením měření o dalších 45 minut. Každých 5 minut se průběh tlaku odečte z ukazatele tlaku PIR1 a vyznačíme ho v záznamu zapisovače.

Je-li míra vzestupu tlaku $\Delta p / \Delta t \leq 9$ hPa / 15 min a zároveň $\Delta p_{\max} / \Delta t$, kde $\Delta t = 5$ min ≤ 3 hPa v kterémkoli intervalu dvou po sobě jdoucích hodnot tlaku, pak je zkouška vyhovující. Byl podán důkaz o dodržení přípustné zbytkové vlhkosti pro prostor mezi těsněními [2].

Opatření pro uskladnění kontejneru

Předtím, než se obalový soubor uloží na SVJP, provede se řada těsnostních a vizuálních kontrol. Po uložení na pozici ve skladu vyhořelého jaderného paliva je ve vnitřním prostoru OS nastaven podtlak, a v prostoru mezi víky naopak přetlak. Toto opatření je pro případ vzniku netěsnosti primárního víka. Vnitřní prostor by nasával dusík z prostoru mezi víky a tím by nedošlo ke kontaminaci okolního prostředí. Rozdíly těchto tlaků jsou společně s teplotou neustále kontrolovány. Tyto předpoklady zaručují dle projektových výpočtů hermetičnost kontejnerů po statisíce let [4].

4. Základy vakuové fyziky

4.1. Rozdělení vakua

Za vakuum lze považovat každý tlak nižší než tlak atmosférický a pro technické účely jej lze rozdělit do šesti kategorií uvedených v tabulce (Tab. 1). V rámci naší problematiky se pohybujeme v oblasti hrubého vakua. V případě určování netěsnosti pomocí heliového detektoru pracujeme s tlaky v oblastech jemného a vysokého vakua.

Pásmo	p [Pa]	p [hPa]	Počet molekul [cm^3]	střední volná dráha částice
Atmosférický tlak	$\approx 1,01 \cdot 10^5$	1013,25	$2,7 \cdot 10^{19}$	68 nm
Podtlak	$1,01 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^4$	1013,25 - 300	$2,7 \cdot 10^{19} - 1 \cdot 10^{19}$	0,1 μm - 68 nm
Hrubé vakuum	$3 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^2$	300-1	$1 \cdot 10^{19} - 1 \cdot 10^{16}$	0,1-100 μm
Jemné vakuum	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^{-1}$	$1 - 1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{13}$	0,1-100 mm
Vysoké vakuum (HV)	$1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^9$	100 mm - 1 km
Ultravysoké vakuum (UHV)	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^4$	$1 - 1 \cdot 10^5$ km
Extrémně vysoké vakuum (XHV)	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-12}$	$< 1 \cdot 10^4$	$> 1 \cdot 10^5$ km

Tab. 1: Rozdělení vakua [8].

4.2. Kinetická teorie ideálních plynů

Kinetická teorie ideálních plynů spojuje mechaniku s klasickou termodynamikou. Kinetická teorie plynu považuje plyn za soustavu molekul, které jsou v neustálém pohybu a mechanickými vlastnostmi těchto částic vysvětluje termodynamické veličiny plynu [9].

Základní předpoklady:

- plyn je složen z dokonale pružných molekul,
- molekuly jsou v chaotickém pohybu, jehož kinetická energie je mírou teploty,
- při srážkách částic plynu platí zákon zachování hybnosti a zachování energie,

- molekuly na sebe silově působí pouze při srážkách,
- mezi srážkami se molekuly pohybují přímočaře.

Kromě zákonů mechaniky jsou zde uplatňovány zákony pravděpodobnosti a výsledky statické mechaniky.

Využití kinetické teorie plynů je mnohostranné. Typickým příkladem je výpočet tlaku. Molekuly se navzájem srážejí mezi sebou a stěnami nádoby, která je ohraničuje. Každým nárazem na stěnu dojde ke změně hybnosti molekuly a tuto změnu získá stěna nádoby. Všechny změny hybnosti molekul způsobené nárazy na stěnu se ve výsledku projeví jako kontinuální tlak na stěnu [9].

Hybnost molekuly:

$$B_m = m_m \cdot v, \quad (2)$$

kde: m_m je hmotnost molekuly [kg],
 v je rychlost molekuly [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] [9].

Pro efektivitu nárazů je rozhodující střední kvadratická čili efektivní rychlost molekul v_{ef} . Je to statistická veličina.

Průměrná hybnost molekuly:

$$B_m = m_m \cdot v_{\text{ef}}, \quad (3)$$

kde: v_{ef} je efektivní rychlost molekuly [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] [9].

Protože molekula si po dokonalém odrazu odnáší stejnou hybnost $m\bar{c}$, ale v opačném směru, změní se její hybnost o $2 \cdot mv_{\text{ef}}$. Tato změna hybnosti je předána stěně nádoby.

Zbývá určit, kolik molekul narazí za 1 s na 1 m^2 stěny. Molekuly se pohybují všemi směry, ale nás zajímá, kolik z nich dopadne na stěnu, přesněji ekvivalent počtu, které dopadnou kolmo. Vychází se z představy kvádrů s podstavou 1 m^2 a výškou v_{ef} . Odvozením dostaneme [10]:

$$f_i = \frac{1}{6} \cdot n \cdot v_{\text{ef}}, \quad (4)$$

kde: f_i počet nárazů molekul za 1 s na stěnu 1 m^2 [$\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$],
 $\frac{1}{6}$ statistický koeficient,

n počet molekul v 1 m^3 [m^{-3}],
 v_{ef} je efektivní rychlost molekuly [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] [9].

Potom všech $n \cdot \bar{c}/6$ molekul předá za 1 s stěně s plochou 1 m^2 hybnost:

$$\Delta B = \frac{1}{6} \cdot n \cdot \bar{c} \cdot 2 \cdot m \cdot \bar{c} = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot \bar{c}^2, \quad (5)$$

Protože je počítána změna hybnosti za čas 1 s, vychází síla působící na jednotku plochy 1 m^2 , což představuje tlak.

$$F = \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad \text{a dále} \quad p = \frac{F}{S} \quad (6)(7)$$

Z čehož vyjádříme:

$$p = \frac{1}{6} \cdot n \cdot v_{\text{ef}} \cdot 2 \cdot m \cdot v_{\text{ef}} = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v_{\text{ef}}^2 \quad (8)$$

Tento vztah představuje platnost Avogadrova zákona, který říká: *ve stejných objemech plynů za téhož tlaku a za téže teploty je vždy týž počet molekul, nezávisle na jakosti plynu*. Aby mohl plyn s lehčími molekulami zaujmout stejný objem o stejném tlaku jako plyn se stejným počtem těžších molekul, musí se lehčí molekuly pohybovat rychleji. Zvýší se jak velikost impulzů $2 \cdot m \cdot v_{\text{ef}}$, tak i jejich četnost $n v_{\text{ef}}/6$.

Když „ n “ je počet molekul v 1 m^3 a „ m “ je hmotnost molekuly [kg], pak součin $n \cdot m = M$ je hmotnost molekul v 1 m^3 , což je hustota „ $\rho = M/V$ “ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]. Potom pro výpočet tlaku také platí [10]:

$$p = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot v_{\text{ef}}^2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{M}{V} \cdot v_{\text{ef}}^2. \quad (9)$$

4.3. Základní zákony

Boylův-Mariottův zákon vyjádřený izotermou lze odvodit i ze stavové rovnice ideálního plynu:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}. \quad (10)$$

Teplota je konstantní: $T_1 = T_2 = \text{konst.}$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{\text{konst}} = \frac{p_2 \cdot V_2}{\text{konst}} \quad \rightarrow \quad p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 = \text{konst.} \quad (11)$$

Podobně lze dospět ke Gay-Lussacovu zákonu, kde předpokládáme konstantní tlak:

$p_1 = p_2 = konst.$, potom:

$$\frac{konst \cdot V_1}{T_1} = \frac{konst \cdot V_2}{T_2} \quad \rightarrow \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = konst. \quad (12)$$

Vychází nám rovnice **izobary** čili spojnice bodů o stejném tlaku.

Zbývá ještě předpoklad konstantního objemu, tedy Charlesův zákon: $V_1 = V_2 = konst$, potom:

$$\frac{p_1 \cdot konst}{T_1} = \frac{p_2 \cdot konst}{T_2} \quad \rightarrow \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = konst. \quad (13)$$

Tentokrát vychází přímková spojnice bodů o stejném objemu – **izochora** [11, 12].

Daltonův zákon:

Ve směsi plynů se chová každý plyn právě tak, jako by sám vyplňoval celý prostor, a jeho parciální tlak není pozměněn přítomností ostatních plynů. Jednotlivé složky směsi plynů si zachovávají své parciální tlaky a totální (celkový) tlak je součtem těchto parciálních tlaků. Pro sušení má Daltonův zákon význam, protože technický údaj vývěv „tolerance vodních par“ je udáván v hodnotě parciálního tlaku vodních par. Z poměru parciálního tlaku i -té složky ve směsi k totálnímu tlaku lze vypočítat objemovou koncentraci této složky [11,12]

$$C_{vi} = \frac{P_{pi}}{P_{tot}} \cdot 100, \quad (14)$$

kde: C_{vi} objemová koncentrace i -té složky [%],

p_{pi} parciální tlak i -té složky [hPa],

p_{tot} totální tlak směsi [hPa] [11].

4.4. Odchytky reálných plynů od ideálních

S odchylkami od stavové rovnice ideálního plynu je nutno počítat zejména při nízkých teplotách a vysokých tlacích. Odchytky jsou tím větší, čím je plyn snáze zkapalnitelný. Lehké plyny, jako vodík a helium lze díky jejich malým molekulám považovat ve velkém rozsahu podmínek za ideální. Na opačném konci řady je vodní pára. V pásmu jemného vakua přistupuje další mechanismus, který se stane dominantním a narušuje platnost stavové rovnice. Jedná se o sorpci, čili fyzikální vazbu molekul ke stěně a desorpci (v praxi mluvíme o odplynění, které hraje zásadní roli při sušících procesech pomocí vakua) [13].

4.5. Maxwellovo rozložení rychlostí

V praxi nelze popisovat chování jednotlivých molekul, ale musíme na ně nahlížet jako na soubor, který má své charakteristické chování. Pro popis rychlostí molekul se využívá popisu pomocí distribuční funkce, která bývá označována jako tzv. Maxwellovo rozložení rychlostí. Křivka rozložení rychlosti molekul má své výrazné maximum a lze z ní určit tři charakteristické rychlosti [9]:

$$\text{střední kvadratická rychlost: } v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}}, \quad (15)$$

$$\text{střední rychlost: } v_p = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (16)$$

$$\text{nejpravděpodobnější rychlost: } v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (17)$$

kde: k Boltzmannova konstanta, $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ [J} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$,
 T absolutní teplota [K],
 m molová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$] [9].

4.6. Tepelná vodivost plynů

Jedná se o transportní děj, při kterém plyn přenáší energii. Pro nás je tento děj důležitý při sušení a odvodu tepla z vnitřního prostoru OS. Tepelná vodivost plynů se vyjadřuje koeficientem tepelné vodivosti λ , který je funkcí střední rychlosti molekul plynu a střední volné dráhy.

Hustota tepelného toku:

$$\Gamma = \lambda \cdot \frac{dT}{dy}, \quad (18)$$

kde: Γ hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 dT/dy teplotní gradient [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$],
 λ součinitel tepelné vodivosti plynu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] [12].

Vztah pro výpočet součinitele tepelné vodivosti je:

$$\lambda = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \omega \cdot s \cdot C_V, \quad (19)$$

kde: ρ hustota plynu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 ω střední aritmetická rychlost molekul [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

- s střední volná dráha molekul [m],
 C_v měrné teplo při stálém objemu (tabulková hodnota He = 3152 [J·kg⁻¹·K⁻¹]) [12].

Helium vykazuje vysokou hodnotu měrného tepla ve srovnání se vzduchem 714 J·kg⁻¹·K⁻¹ a vodní párou 1390 J·kg⁻¹·K⁻¹. To vysvětluje, proč je helium tak dobrým chladičem, a jeho dávkování do vnitřního prostoru výrazně zlepšuje odvádění tepla z OS. Vztah pro výpočet součinitele tepelné vodivosti vysvětluje, proč je tepelná vodivost plynu v celém pásmu hrubého vakua prakticky konstantní. Při snižování tlaku sice klesá hustota ρ , ale zároveň roste střední volná dráha molekul s , která ztrátu hustoty nahrazuje. Toho je využito při sušení vnitřku OS, kdy regulátor tlaku je nastaven na rozsah 10–13 hPa, kde se tepelná vodivost ještě nesnižuje [11].

4.7. Střední volná dráha molekul

Tepelná vodivost závisí na střední volné dráze. Je to průměrná ulétnutá vzdálenost od srážky ke srážce. Vztah pro její výpočet je:

$$S = \frac{k \cdot T}{p \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma^2}, \quad (20)$$

- kde: k Boltzmannova konstanta, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J·K⁻¹,
 T absolutní teplota [K],
 p tlak [Pa],
 σ průměr molekuly [m], $\sigma_{\text{He}} = 2,18 \cdot 10^{-10}$ m [11].

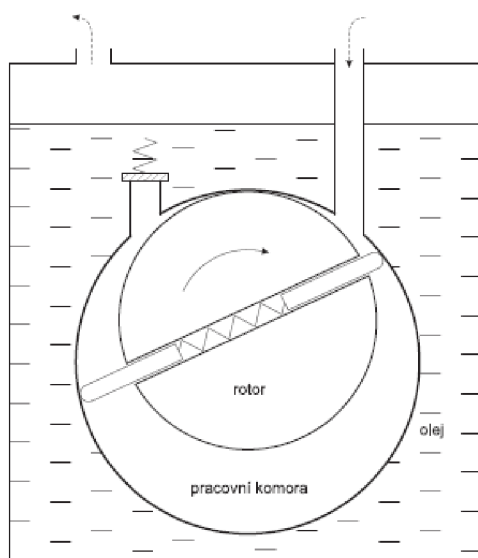
Helium má za stejných podmínek díky velkému měrnému teple a díky nejdelší volné dráze molekul 6,28krát vyšší tepelnou vodivost než vodní pára [11].

5. Použitá zařízení

V rámci řešení problematiky byla využita základní vakuová zařízení, která jsou dostupná a využívána na Jaderné elektrárně Temelín. V této kapitole jsou zařízení představena spolu s obecným popisem jejich funkce.

Rotační olejová vývěva (ROV)

Jedná se o základní druh vývěv pro získávání hrubého vakua. Často se využívá jako tzv. primární vývěva, která má za úkol snížit tlak na výstupu sekundární vývěvy dosahujících vyšších stupňů vakua. Toho je využito například u heliových detektorů, kde ROV dělá předvakuum vývěvě turbomolekulární.

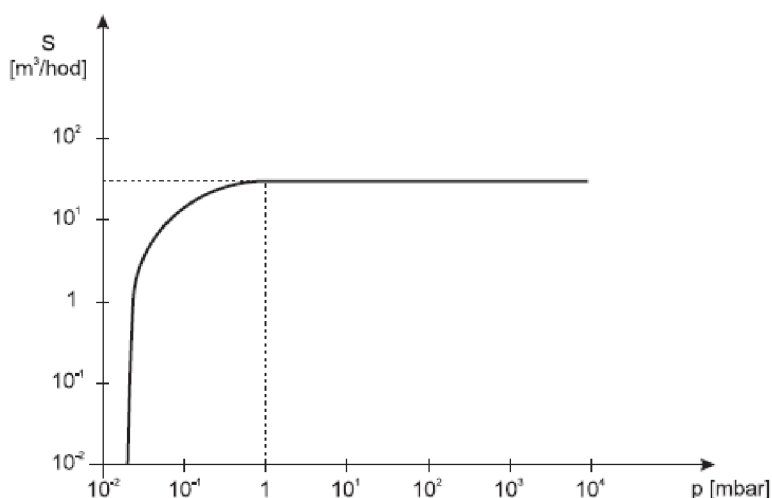


Obr. 4: Rotační olejová vývěva s rotorovými křídly [14].

Pracovní schéma rotační olejové vývěvy je uvedeno na Obr. 4. Vývěva je složena z válcové pracovní komory, ve které se otáčí rotor. Osa otáčení je ve stejné ose jako rotor, ale mimo osu pracovní komory tak, aby se rotor vždy jednou svou plochou dotýkal povrchu komory. Rotor obsahuje mezeru, ve které se pohybují dvě lopatky. Ty vytváří v pracovní komoře tři periodicky proměnné objemy. Nejprve se objem zvětšuje (vzduch se nasává), pak se objem zmenšuje (vzduch se stlačuje) a nakonec stlačený vzduch otevře výfukový ventil a opustí vývěvu [12].

Základními parametry vývěvy jsou mezní tlak a čerpací rychlost. Výrobce pak uvádí většinou i křivku skutečné čerpací rychlosti (Obr. 5). Rotační olejová vývěva pracuje typicky

v rozmezí 300–1500 ot/min, přičemž dosahuje jmenovité čerpací rychlosti v řádu jednotek až desítek l/s. Zpětný tok čerpaného plynu (tok plynu všemi netěsnostmi mezi sacím a výfukovým hrdlem, zejména nejkratší cestou, tj. stykem rotoru a statoru) a zpětný tok olejových par představuje zpětný proud vývěvy. V místech, kde dochází ke tření, je olej přehříván až dochází k jeho spalování, což má za následek odpařování oleje, který vystupuje výfukem z vývěvy v podobě kouře, který může obsahovat nebezpečné složky, v našem případě to mohou být kontaminované radioaktivní páry. Z těchto důvodů bývá vývěva napojena na centrální odsávání, nebo je výstup vývěvy opatřen filtrem [14].



Obr. 5: Křivka skutečné čerpací rychlosti ROV [11].

Olejová náplň vývěvy má několik funkcí. Těsní vývěvu, zajišťuje mazání a chlazení lopatek a dalších pohyblivých částí. Celý stator je ponořen do olejové lázně. Olej tak těsní celou komoru, do níž vniká mazacími kanálky a netěsnostmi. Ven z komory je vytlačován spolu se vzduchem výfukovým ventilem. Vytvořený olejový film mezi rotorem a státorem utěsňuje lopatky. Při tření lopatek a statoru vzniká velké množství tepla, které se olejem přenáší na vnější žebrovaný plášť. Provozní teplota vývěvy bývá 70–90 °C [12].

Rotační vývěvy pracují s velkým kompresním poměrem (10^{-1} až 10^6). Z tohoto důvodu jsou všechny páry, které se odčerpají, silně stlačovány. Pokud dojde k situaci, kdy při pracovní teplotě (např. 80 °C) dosáhne parciální tlak vodní páry 470 hPa, nedojde už k dalšímu stlačení a projeví se efekt kondenzace par. Kondenzát se následně mísí s olejem a tím se zhoršují mazací vlastnosti oleje a vývěva se může poškodit; degradace vakuového oleje. Tím se zhorší i vakuové vlastnosti oleje, což má za následek zvýšení mezního tlaku vývěvy. Pro tyto případy je vývěva opatřena ventilem (gasbalast), který ve fázi stlačování připustí do komory

atmosférický tlak. Tím stoupne tlak v oblasti stlačovaného plynu a výfukový ventil se otevře dříve, než parciální tlak páry dosáhne 470 hPa [15].

Praktické problémy provozu rotační olejové vývěvy:

1. Správné zapojení elektrické zásuvky vývěvy, ve smyslu otáčení rotoru vývěvy – zejména při použití třífázového motoru.
2. Kontrola hladiny oleje (olej se vysokou teplotou odpařuje) a včasná výměna oleje je nezbytná.
3. Potřeba zavzdušnit vývěvu po zastavení. V komoře vývěvy se nachází vakuum. Vzduch, který do komory vnikne výfukovým ventilem, může vytlačit olej z vývěvy sacím otvorem do vakuové aparatury.
4. Zpětný proud olejových par. Ten jde několika způsoby omezit.
 - a) Vývěvu provozovat v oblasti vyššího vakua, kde je proud olejových par strháván proudem čerpaného plynu ven z vakuové komory.
 - b) Umístit na vstup vývěvy filtr se sorpční látkou. Zde je ale nevýhodou, že po určité době provozu je filtr potřeba vyměnit z důvodu kontaminace olejových par a čerpaných plynů.
 - c) Použití oleje s nižší tenzí páry [11].

V našem experimentu byla použita kompaktní jednokomorová rotační olejová vývěva s podtlakovým mazáním VR 1.5/12 od české firmy Lavat Chotutice (Obr. 6). S mezním tlakem 0,1 Pa, čerpací rychlostí 1,5 m³/hod a provozní teplotou 15–60 °C.



Obr. 6: Použitá rotační olejová vývěva.

Kapacitní membránový tlakoměr CERAVAC CTR 100 a CTR 1000

Kapacitní membránový tlakoměr v našem experimentu slouží jako hlavní měřidlo pro zobrazování tlaku. Měrky tohoto typu používají tenkou pružnou membránu, kterou deformují změny tlaku. Tato membrána se chová nelineárně, a to umožňuje upravit proporcionalitu tak, aby měření vakua v preferovaném intervalu bylo přesnější. Deformace membrány jsou kapacitně snímány pomocí čidel a následně elektronicky přenášeny na zobrazovací jednotku [16].

Měrky CERAVAC od firmy Leybold (Obr. 7) jsou vybaveny celosvařovaným senzorem INCONEL®, nerezovým senzorem a mikroprocesorovou elektronikou. Díky tomu nabízejí vynikající přesnost a reprodukovatelnost. Umožňují měření tlaku nezávisle na druhu plynu. Jejich výhodou je, že dokážou korigovat tlakové rázy bez mechanického nebo fyzického poškození a bez kalibračních posunů. Připojují se většinou skrze rozhraní RS 232 [10].



Obr. 7: Použitý tlakoměr Leybold CERAVAC CTR 100.

Zobrazovací a řídicí jednotka Membranovac DM12

Tato jednotka v našem experimentu zastává řídicí funkci čidla Leybold DI 2000. Pomocí soustavy MEMBRANOVAC DM12 (Obr. 8) a Leybold DI 2000 (Obr. 9) řídíme proces cyklování. Jedná se o zobrazovací a řídicí jednotku pro měření absolutního, relativního a diferenčního tlaku v závislosti na připojeném senzoru v rozsahu od -1999 do 20000 hPa. Pracuje s proudově napájenými snímači tlaku (4 až 20 mA). Každému měřicímu kanálu jsou přiřazeny dva nastavitelné spínací body a jeden výstup. Všechny provozní stavy spouštěcího a měřicího systému jsou zobrazeny a odpovídajícím způsobem hlášeny prostřednictvím výstupů [10].



Obr. 8: Použitá řídicí jednotka Membranovac DM12.

Lineární snímač Leybold DI 2000

Toto vakuové čidlo v našem případě dostává signál od řídicí jednotky MEMBRANOVAC DM12 (Obr. 8) a dle toho uzavírá a otevírá trasu při procesu cyklování. Měří celkový tlak v rozsahu 1-2000 hPa. Může být připojen k zobrazovacím, řídicím i vyhodnocovacím jednotkám. Výstupní elektrický signál má lineární závislost na tlaku v celém rozsahu. Snímače řady DI mají výstupní signál 4–20 mA. Převodník je vybaven piezorezistivním keramickým senzorem a kompenzovaným teplotním driftem [10].



Obr. 9: Použitý lineární snímač Leybold DI2000.

Zobrazovací a řídicí jednotka Center Two

Jedná se o obdobnou jednotku jako Membranovac DM12 (Obr 8). V našem experimentu Center Two (Obr. 10) zastává pouze její zobrazovací funkce čidla CTR. Pomocí sériového portu RS 232 byla data z jednotky přenášena do PC.



Obr. 10: Použitá zobrazovací jednotka Center Two.

Manuální ventil Pfeiffer AVC 025 SX

Ventil AVC 025 SX (Obr. 11) umožňuje rychlé otevření (či uzavření) potrubí, v jehož cestě je umístěn, pomocí otočného mechanismu. Je použito vlnovcové těsnění s životností 10 000 provozních cyklů. Má pouze dvě polohy plně otevřeno/zavřeno. Má těsnost $1 \cdot 10^{-10}$ Pa·m³/s a dokáže bezpečně pracovat při přetlaku až 4000 hPa [17].



Obr. 11: Použitý ventil AVC 025 SX.

Jehlový ventil Leybold Oerlikon DN KF16

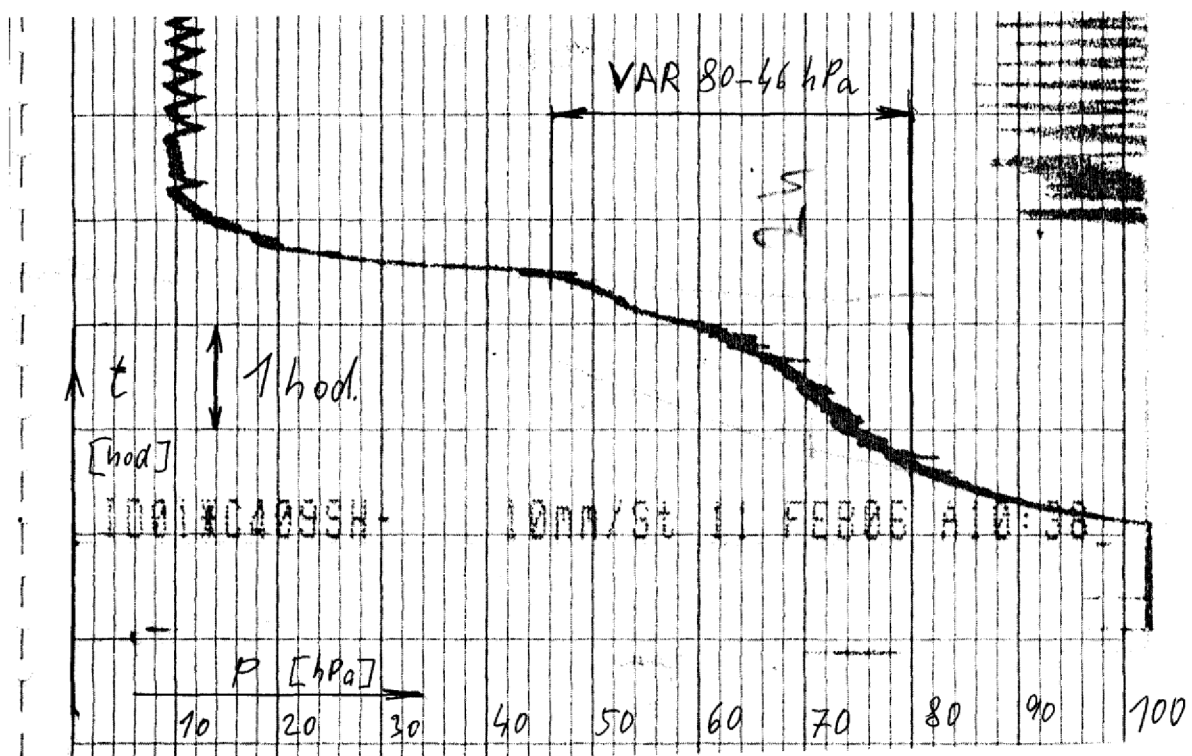
Jehlový ventil DN KF16 (Obr. 12) v našem experimentu potřebujeme pro nastavení množství helia, kterým budeme korigovat tlak v recipientu při sušení s dávkováním inertního plynu. Jedná se o variabilní ventil, který umožňuje měnit efektivní plochu potrubí a tím spojitě ovlivňovat čerpací rychlost nebo napouštění. Má těsnost $1 \cdot 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ [10].



Obr. 12: Použitý jehlový ventil od firmy Leybold Oerlikon.

6. Sušení pomocí vakuování

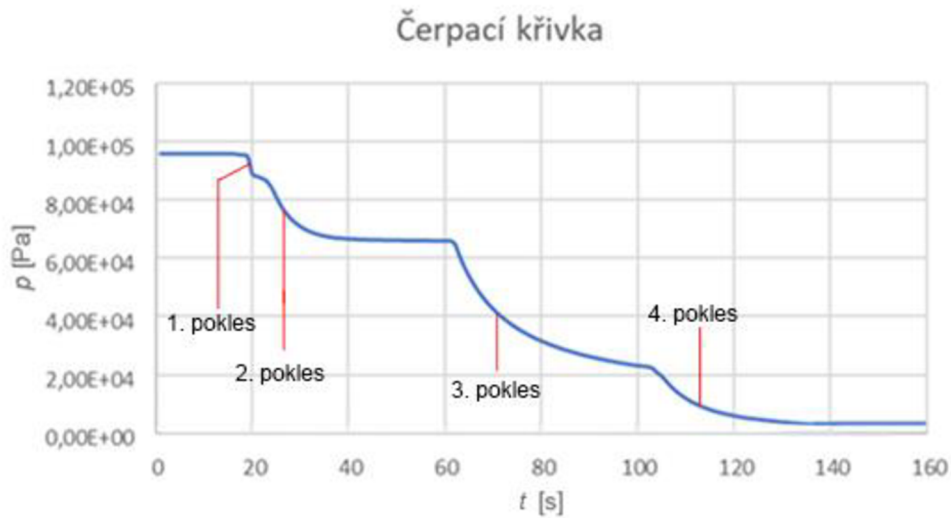
Jedná se o metodu, která se používá jak pro sušení meziprostoru těsnění primárního víka, tak vnitřního prostoru OS a prostoru mezi primárním a sekundárním víkem. Obecně se sušení dá definovat jako odstraňování látky v kapalném stavu z předmětů v pevné fázi. Sušení pomocí vakuování je založeno na principu vytvoření vakua pod hodnotu tlaku tenze par, v našem případě vody, což způsobí její var a zvýší rychlost odpařování. Tento průběh si ukážeme na historickém záznamu viz Obr. 13, který byl pořízen při sušení prvních obalových souborů na Jaderné elektrárně Dukovany [2]. Intenzivní var probíhal v rozsahu tlaků 80-46 hPa (klesající průběh) a projevil se zpomalením poklesu tlaku. Odpovídající teploty při varu, kdy je čerpána převážně vodní pára, jsou 42-31 °C (klesající průběh) [18]. Konec varu je vyznačen zřetelným zrychlením poklesu tlaku. Vlevo nahoře záznamu je vidět automatické naběhnutí předem nastavené regulace tlaku, tzv. cyklování.



Obr. 13: Historický záznam z počáteční části sušení vnitřního prostoru OS na Jaderné elektrárně Dukovany.

Při našem experimentu jsme nepoužívali zapisovač, ale naměřená data jsme zpracovávali v MS Excel, tím pádem jsme mohli na data nahlédnout více do detailu, viz Obr. 14. Pravděpodobný výklad křivky je: 1. pokles značí malé množství těkavé látky s tenzí

par 841 hPa. 2. pokles odpovídá většímu množství těkavé látky s malým výparným teplem a tenzí par 659 hPa. U 3. poklesu jde pravděpodobně o etylalkohol s tenzí par 228 hPa. 4. pokles by měla být voda s tenzí par 25,2 hPa.



Obr. 14: Příklad průběhu tlaku při sušení. Čtyři výrazné poklesy tlaku signalizují čtyři složky odčerpávaného media s různými body varu a různými skupenskými tepley.

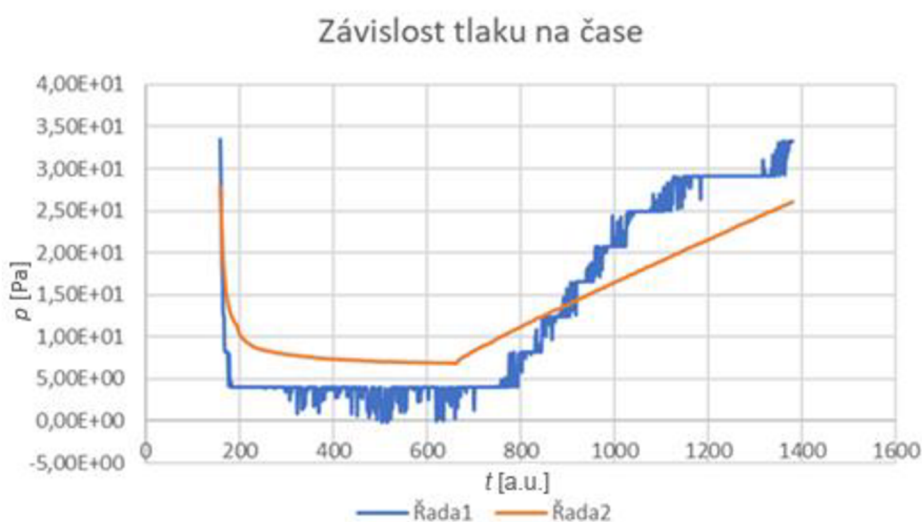
Detail čtvrtého poklesu (Obr. 15) ukazuje důležitou informaci: voda vyvřela dříve, než stačila zamrznout. Var skončil při 25,2 hPa a teplotě 22 °C [18] a voda by zamrzla při poklesu na tlak 6,106 hPa, což je dáno trojným bodem vody. Toho tlaku bylo dosaženo, když voda v kapalném stavu závčas vyvřela.



Obr. 15: Detail průběhu 4. poklesu z čerpací křivky viz Obr. 14.

6.1. Porovnání čidel

Jako první krok experimentu bylo nutné zvolit čidlo se správným rozsahem. Při sušení obalových souborů se používají dvě čidla s rozdílným rozsahem měření. První Leybold Ceravac CTR 1000 s rozsahem 1000 Torr tedy 0 - 1333,22 hPa (Řada 1). To se používá pro celkový přehled průběhu sušení. A druhé Leybold Ceravac CTR 100 s rozsahem 100 Torr, tedy 0 - 133,322 hPa (Řada 2). To díky menšímu rozsahu měří přesněji v oblasti hrubého a jemného vakua. Proběhlo tedy dvojí měření. Získaná data byla pro porovnání vložena do grafu (Obr. 16). Na ose y se nachází tlak, ten nezačíná atmosférickým tlakem kvůli separování naměřených dat z čidla CTR 1000 z důvodu odpovídajícího měřítka oproti čidlu CTR 100. Osa x, pak odpovídá času v neurčitých jednotkách kvůli proložení dvou grafů do jednoho. Graf ukazuje pouze porovnání rozsahů. Po vybrání dat přínosných pro náš experiment se na čidlu CTR 1000 projevuje kolísání výchylky a schodovitým průběhem způsobeným právě velkým rozsahem čidla. Naopak tomu čidlo CTR 100 má v této oblasti hladký průběh vhodný pro náš experiment. Z tohoto důvodu byla všechna měření provedena s čidlem CTR 100.

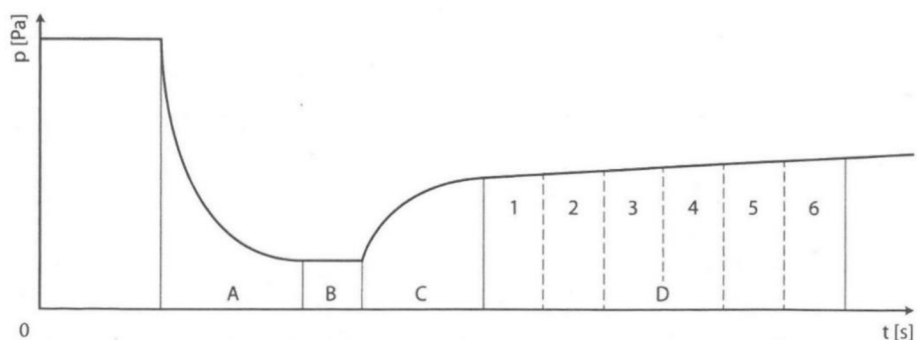


Obr. 16: Graf porovnání čidel. Schodovitý průběh čidla CTR 1000 (Řada 1) a CTR 100 (Řada 2) s hladkým a pro náš experiment vhodným průběhem.

6.2. Vyhodnocení

Vyhodnocení proběhlo metodou měření změn tlaku, konkrétně zkouškou těsnosti měřením vzrůstu tlaku ve vakuovém recipientu. Princip vychází z jednoduchého předpokladu. Pokud se v hermeticky vymezeném objemu recipientu vytvoří vakuum a tento objem se oddělí pomocí těsného uzávěru, musí v tomto objemu tlak setrvat. Zvýšení tlaku tedy může způsobit buď netěsnost, nebo přítomnost vodních par.

V praxi je tento předpoklad neúplný, jelikož ve volné atmosféře jsou na povrchu stěn adsorbované molekuly vzduchu, které se po snížení tlaku začnou z povrchu částečně uvolňovat, což se projeví nárůstem tlaku. Tento jev se nazývá odplyňování. Jeho intenzita roste s klesajícím tlakem. V oblasti hrubého a jemného vakua tedy ještě nedosahujeme hodnot, které by zásadně ovlivnily výsledek zkoušky [2].



Obr. 17: Časový průběh tlaku při vakuové zkoušce s konstantním nárůstem tlaku v úseku D [16].



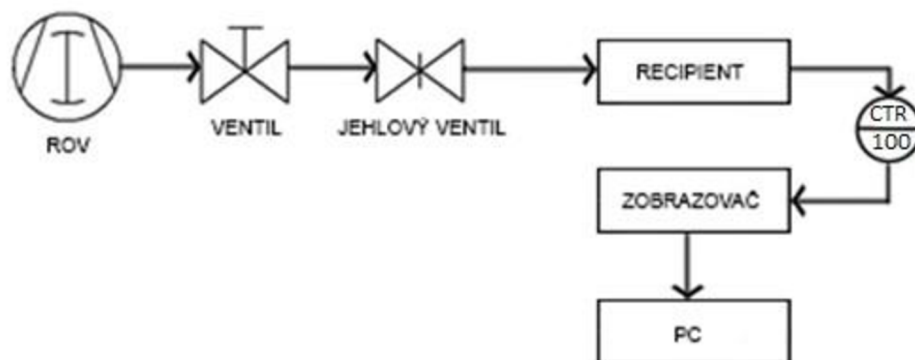
Obr. 18: Graf z měření na přímo s přidanou vodou.

Porovnání teoretického předpokladu můžeme provést na dvou následujících grafech (Obr. 17, 18). Oblast **A** odpovídá čerpání na mezní tlak. **B** je pak výdrž na dosažené úrovni vakua (odplyňování stěn), ta se na grafu (Obr. 18) nenachází, pravděpodobně to je způsobeno krátkou dobou čerpání a nedosažením mezního tlaku. Následuje **C**, tedy stabilizace systému, tj. desorpce. Úsek **D** je pak vhodný pro samotné vyhodnocení nárůstu tlaku ve vakuovém recipientu. Na grafu (Obr. 17) je úsek **D** rozdělen na šest dílů. Při stabilní situaci je nárůst tlaku přibližně stejný na všech dílčích úsecích. Avšak v kapilárním systému může vlivem různých

dějí dojit k samovolnému zavírání kapilár (projevuje se postupným snižováním nárůstu tlaku) nebo jejich otevíráním (projevuje se postupným zvětšováním nárůstu tlaku). Abychom zkoušku mohli vyhodnotit potřebujeme konstantní nárůst tlaku viz. Obr 17. Pokud tedy dojde k otevíráním, nebo zavírání kapilár není možné vypočítat výsledek a zkouška se musí opakovat [16].

6.3. Metoda sušení pomocí vakua na přímo

To znamená čerpání bez omezení. Omezení použitelnosti techniky spočívá v zamrznutí vody při poklesu pod tlak trojnásobného bodu, což je 6,106 hPa, kdy tepelná ztráta intenzivním varem vede ke snížení vnitřní energie vody a následnému zamrznutí. To platí pro čerpání menších prostorů, mezi těsněními a mezi víky. Při čerpání vnitřního objemu OS k zamrznutí nesmí dojít, jelikož zbytkový tepelný výkon paliva je nutno odvádět, proto se musí tlak ve vnitřním objemu OS udržet nad hranicí 10 hPa, při nižším tlaku tepelná vodivost plynů klesá [14]. Vakuování bez omezení je nenahraditelné tam, kde potřebujeme dosáhnout co nejnižšího tlaku. Jde o závěrečné odplyňování prostoru mezi těsněními primárního víka a prostoru mezi víky, čili tam, kde nemusíme odvádět teplo. Na schématu (Obr. 19), můžeme vidět vakuovou soustavu pro sušení metodou na přímo. Recipient čerpáme pomocí rotační olejové vývěvy, za kterou je manuální ventil, který slouží pro otevření či zavření trasy čerpání. Následuje jehlový ventil, kterým můžeme korigovat rychlost čerpání. Pak je samotný recipient, na jeho konci je připojeno čidlo CTR 100, z kterého pomocí kabelu s konektory RS 232 můžeme vidět aktuální hodnoty tlaku na zobrazovači (Center Two). Ze zobrazovače jsou hodnoty odesílány opět pomocí RS 232 do PC, kde jsou následně zpracovány v MS Excel.



Obr. 19: Blokové schéma zapojení při sušení metodou na přímo.

6.3.1. Situace bez vody

Toto měření slouží jako porovnání pro ostatní metody, kde byla přidána voda. Na grafech a hodnotách bude vidět pouze netěsnost samotného systému bez přidané vody. Na grafu (Obr. 20) můžeme vidět, že exponenciální pokles na začátku grafu (0–16 min) je pozvolný, pravděpodobně tomu bude z důvodu nízké teploty oleje ve vývěvě anebo netěsností v systému, která byla naměřena mezi tlaky p_1 a p_2 . Odplynění stěn zde není patrné, pokud by se čerpalo na mezní tlak v rámci hodin, odplynění by se projevilo výdrží na dosažené úrovni, tj. vodorovným průběhem. Díky vysušení systému před samotným experimentem a nepřítomností vody v systému zde není patrná desorpce. Ta by byla na grafu vidět hned po zastavení čerpání skokovým nárůstem tlaku. Lineární průběh růstu tlaku po zastavení čerpání ($p_1 - p_2$) svědčí o netěsnosti systému bez vlivu odpařování vody



Obr. 20: Graf závislosti tlaku na čase při sušení na přímo bez přidané vody (lineární průběh Δp).

Získané hodnoty

Pro větší přesnost měření a stanovení chyby měření bylo provedeno celkem deset měření. Důležitý je pro nás nárůst tlaku po ukončení čerpání a případné následné desorpci. Tento nárůst se počítá ze vztahu:

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (21)$$

kde: p_1 je tlak na začátku měření,
 p_2 je tlak na konci měření (5 min) [2].

Z těchto vypočtených hodnot byla následně vypočtena střední hodnota podle vztahu [19]:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}. \quad (22)$$

Poté byla spočítána střední kvadratická odchylka, dle vztahu [19]:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (23)$$

Všechny vypočítané hodnoty jsou v následující tabulce (Tab. 2).

n	Δp [hPa]
1	2,12
2	2,58
3	1,98
4	1,95
5	2,32
6	2,05
7	2,23
8	1,99
9	2,31
10	1,93
\bar{x}	2,15
$\bar{\sigma}$	0,07

Tab. 2: Vypočítané hodnoty z měření bez přidané vody.

Celkové Δp z měření na přímo bez přidané vody je tedy: $(2,15 \pm 0,07)$ hPa po pěti minutách po zastavení čerpání.

Proběhlo deset měření bez přidané vody. Ze získaných hodnot byla vypočtena střední hodnota a z ní střední kvadratická odchylka. Výsledná hodnota tohoto měření je:

$\Delta p = (2,15 \pm 0,07)$ hPa. Tato hodnota ukazuje nárůst tlaku, který způsobily netěsnosti recipientu. Jak je patrné z tabulky hodnot (Tab. 2), vypočtená chyba měření zde byla 0,067 hPa. Což je navzdory předpokladům největší střední kvadratická odchylka ze všech čtyřech měření. To bylo pravděpodobně způsobenou nízkou teplotou oleje ve vývěvě.

Nicméně se chyba nachází o tři řády níž než samotný výsledek. Tudiž výslednou hodnotu můžeme považovat za relevantní.

6.3.2. Situace s přidanou vodou

Zde se opakuje stejný postup jako u předchozího měření. Do systému bylo přidáno 10 ml vody. Jak je patrné z grafu (Obr. 21) exponenciální průběh od začátku vakuování po zastavení čerpání svědčí o netěsnosti z předchozího měření, která byla vidět na grafu (Obr. 20). Na grafu (Obr. 21) můžeme vidět větší nárůst tlaku než na grafu (Obr. 20). Je to zapříčiněno právě přidanou vodou. Hned po zastavení čerpání (oblast mezi zastavení čerpání a tlakem p_1) je vidět rychlý nárůst tlaku (desorpce), další nárůst je nelineární, což svědčí o přítomnosti vody.



Obr. 21: Graf závislosti tlaku na čase při sušení na přímo s vlivem přidané vody (Δp vykazuje nelineární, ale konstantní průběh nárůstu tlaku).

Získané hodnoty

Z naměřených údajů byly pomocí vztahů (21), (22) a (23) získány hodnoty v Tab. 3.

n	Δp [hPa]
1	3,85
2	3,96
3	3,75
4	3,98
5	3,71
6	4,02
7	3,88
8	3,90
9	4,05
10	3,79
\bar{x}	3,89
$\bar{\sigma}$	0,04

Tab. 3: Vypočítané hodnoty z měření na přímo s přidanou vodou.

Celkové Δp z měření na přímo s přidanou vodou je $(3,89 \pm 0,04)$ hPa.

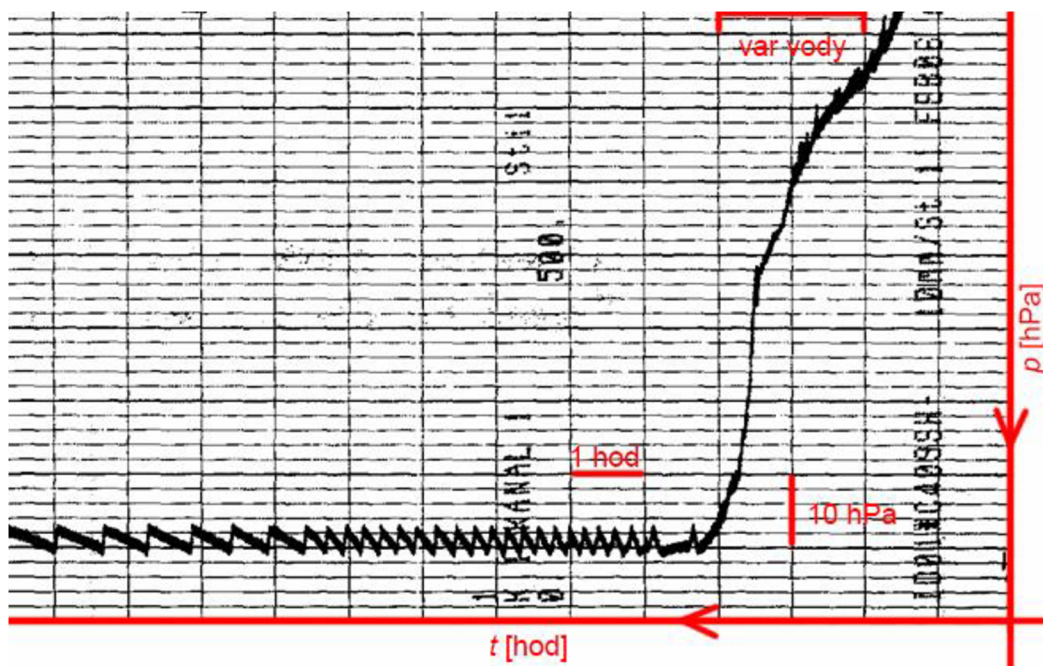
Proběhlo deset měření s přidanou vodou (Tab. 3). Zde byl nárůst tlaku už o něco větší než u experimentu bez vody. Konkrétně $\Delta p = (3,89 \pm 0,04)$ hPa. Křivka grafu (Obr. 21) nedosáhla mezního tlaku tak rychle jak jsem předpokládal, což způsobila pravděpodobně netěsnost naměřená při vakuování bez vody. Tím nedošlo k zamrznutí. Nicméně nelineární nárůst nám ukázal, že v recipientu stále zůstala zbytková vlhkost. Tu by se mi podařilo odstranit, kdyby sušení neprobíhalo 15 minut, ale delší dobu.

6.4. Metoda sušení pomocí vakua s cyklováním

Jde o metodu využívající regulaci tlaku v recipientu cyklickým uzavíráním čerpací trasy s cílem potlačit zamrznutí zbytkové kapaliny. Tento efekt je důležitý, protože proces sušení je z kapalně fáze výrazně rychlejší než z fáze pevné (led). Je to zpětnovazební regulace z měření tlaku a porovnáváním s předem nastavenými hodnotami. U dvou menších recipientů (prostor mezi těsněním primárního víka a prostor mezi primárním a sekundárním víkem) jde o předejití zamrznutí, proto je nutno udržovat minimální tlak větší než 7 hPa. U vnitřního

objemu je nutno zachovávat tepelnou vodivost vodních par, a proto je nutno udržovat tlak nad 10 hPa [2].

Fyzikální princip cyklování jde vysvětlit na historickém záznamu ze zapisovače (Obr. 22), který je pořízen ještě v době, kdy se do vnitřního prostoru OS nedávkovalo helium. Byť se jedná o záznam starší, má i tak vypovídací cenu. Jedná se o počáteční fázi sušení vnitřního objemu prvního obalového souboru na Jaderné elektrárně Temelín.

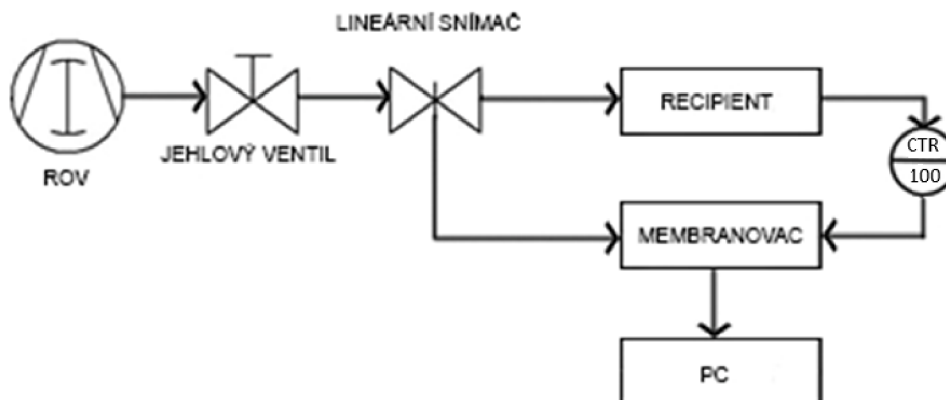


Obr. 22: Historická kopie záznamu zapisovače pořízeného při sušení vnitřního objemu OS [2].

První půl hodiny se odčerpával vzduch a vodní pára. Potom klesl totální (celkový) tlak pod hodnotu tenze par ve zbytku vody, která se začala vařit. Var probíhal po dobu cca 2 hodiny a projevoval se pomalejším poklesem tlaku. Opětné zrychlení poklesu tlaku signalizuje stav, kdy vyvěřela všechna voda. Následuje čerpání par, až je dosaženo tlaku 10 hPa a začne cyklování. To trvalo více než 1 hod. Cyklování začalo s frekvencí 5 cyklů/hod, přitom rychlost poklesu tlaku a rychlost růstu tlaku jsou zde přibližně stejné. Regulátor tlaku byl nastaven na rozsah 10-13 hPa a záznam to potvrzuje. Pilovitý průběh cyklicky udával rychlost růstu tlaku, a tak průběžně vypovídal o stavu vysušení. Sušení trvalo cca 5 hod a následovalo odplyňování. Zatím ale ani na konci zobrazeného průběhu není odplynění ještě vyhovující: rychlost nárůstu tlaku byla 1,25 hPa/15 min, namísto požadovaných 0,5 hPa/15 min.

Na schématu (Obr. 23), můžeme vidět vakuovou soustavu pro sušení vakuem s pomocí cyklováním. Recipient čerpáme pomocí rotační olejové vývěvy, za kterou je jehlový ventil,

kterým můžeme korigovat rychlost čerpání. Následuje lineární snímač DI 2000, který uzavírá a otevírá čerpací trasu podle předem nastavených mezí na řídicí a zobrazovací jednotce MEMBRANOVAC DM12.



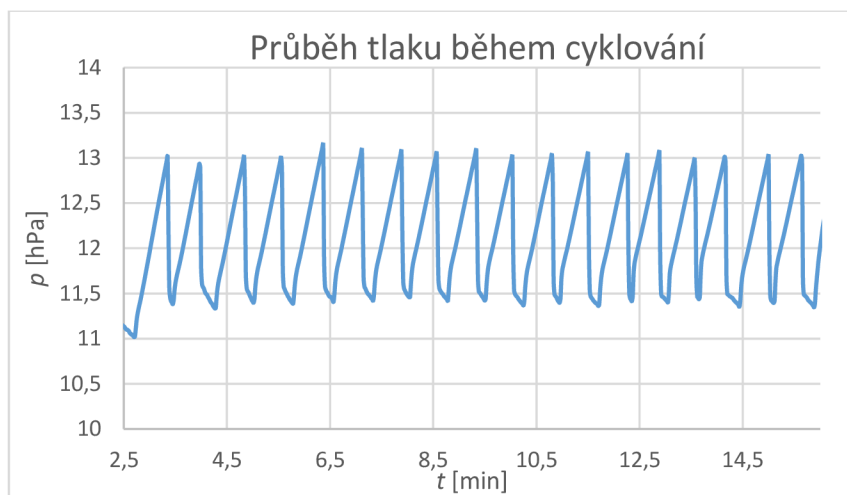
Obr. 23: Blokové schéma zapojení při sušení s cyklováním.

Reprezentativní záznam ze sušení s cyklováním viz. Obr 24, kde rychlý pokles tlaku v grafu je dán upraveným měřítkem oproti ostatním měřením, kvůli zřetelnosti jednotlivých cyklů. Průběh prvotního poklesu tlaku je stejně exponenciální jako tomu je například na grafu (Obr. 21), jen to není zřetelné právě díky zvolenému měřítku. Nárůst tlaku mezi p_1 a p_2 je nelineární, což nám opět svědčí o zbytkové vodě v recipientu.



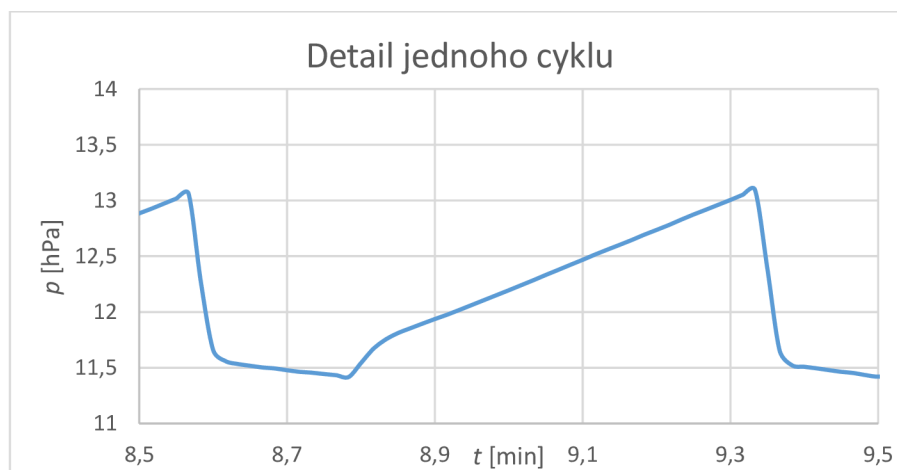
Obr. 24: Celkový náhled na průběh tlaku při sušení s pomocí cyklování, s nelineárním nárůstem tlaku Δp .

Aby průběh tlaku byl zřetelnější, museli jsme použít vhodnější měřítko viz Obr. 25. Z grafu je patrné, že se regulací podařilo udržet tlak v rozmezí cca 11,4 – 13,0 hPa. Nárůsty tlaku byly rychlé, proto MEMBRANOVAC DM12 společně s čidlem DI2000 nedodržely přesnou předem nastavenou hodnotu spodní meze 11 hPa. Nárůsty tlaku byly způsobeny především netěsností a velkým množstvím zbytkové vody, takže mechanismus sušení není zřetelný, projevil by se po delší době vakuování.



Obr. 25: Detail na průběh cyklování z grafu viz Obr. 24, na kterém jsou patrné nastavené meze.

Na detailu jednoho cyklu viz Obr. 26 můžeme vidět, že po vystoupení tlaku na cca 13 hPa je zapnuto čerpání. Počáteční pokles je rychlý, protože se ještě neprojevuje vliv vody. Náhlé zpomalení poklesu tlaku je způsobeno počátkem varu vody. K opětovnému zastavení čerpání došlo při dosažení tlaku 11,4 hPa. Počáteční rychlý vzrůst tlaku je způsoben odpařováním vody (desorpce). Přítomnost vody je opakovaně dokazována zlomovým zpomalením růstu tlaku. Následuje lineární průběh způsobený netěsností.



Obr. 26: Detailní průběh jednoho cyklu z Obr. 25. Na grafu je patrná desorpce po zastavení čerpání.

Získané hodnoty

Stejně jako u předchozího měření byly z naměřených údajů pomocí vztahů (21), (22) a (23) získány hodnoty v následující tabulce (Tab. 4).

n	Δp [hPa]
1	5,12
2	5,08
3	5,15
4	5,16
5	5,09
6	5,05
7	5,21
8	5,06
9	5,11
10	5,17
\bar{x}	5,12
$\bar{\sigma}$	0,02

Tab. 4: Vypočítané hodnoty z měření s pomocí cyklování.

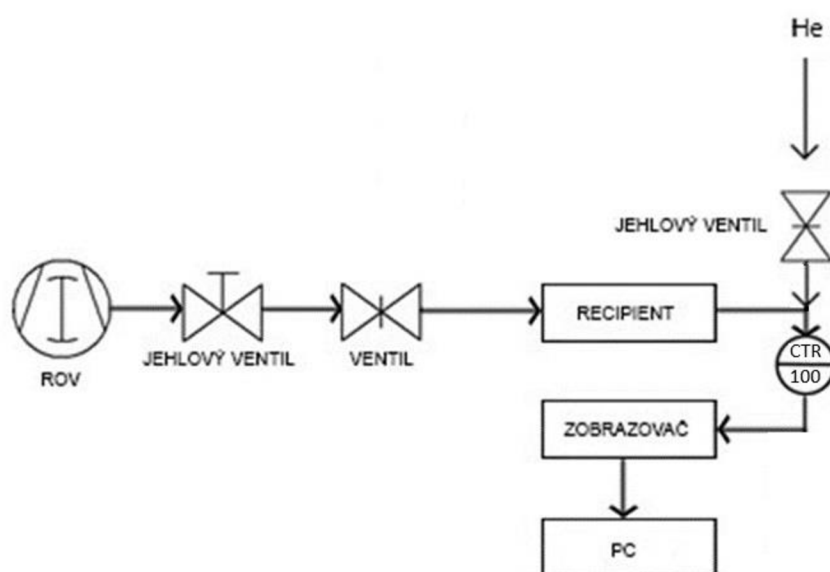
Celkové Δp z měření s pomocí cyklování je $(5,12 \pm 0,02)$ hPa.

V tomto experimentu byl do vakuového systému přidán lineární snímač, který byl připojen na jednotku MEMBRANOVAC. Meze tlaků byly nastaveny na 11 a 13 hPa. Z grafu (Obr. 25) je vidět, že zařízení fungovalo dobře. Tlak se udržel v rozmezí 13 a 11,4 hPa. Spodní mez nebyla MEMBRANOVACem dodržena přesně z důvodu přítomnosti velkého množství vody a netěsnosti recipientu. Tím pádem nastal rychlý nárůst tlaku, což mělo za následek rychlé cyklování. Cykly měly po celou dobu sušení prakticky stejný průběh, nárůst se nám nezpomaloval tak, jak je tomu na grafu (Obr. 22). Z čehož plyne, že by bylo ideálnější sušit recipient podstatně delší dobu. O tom vypovídá i výsledný spočítaný nárůst tlaku $\Delta p = (5,12 \pm 0,02)$ hPa, který je největší ze všech metod sušení.

6.5. Metoda sušení pomocí vakua s dávkováním inertního plynu

Prvně bylo zavedeno dávkování helia při závěrečné fázi sušení vnitřního prostoru. Motivem bylo zvýšení tepelné vodivosti atmosféry uvnitř obalového souboru a zlepšení

chlazení uložených palivových článků. Splnilo se také očekávání, že dávkování helia urychlí proces sušení. Odtud motivace pro sušení meziprostoru těsnění primárního víka s využitím dávkování inertního plynu. Zařízení je zapojeno stejně, tak jak tomu bylo při vakuování na přímo viz Obr. 19. Jedinou změnou je přidání jehlového ventilu k recipientu, pomocí kterého bylo dávkováno helium, které se následně mísí s vodními párami a jsou společně odsávány z recipientu pomocí vývěvy dle schéma (Obr. 27). To je důležité pro účinnost dávkování, helium je nuceno postupovat směrem od dávkovacího ventilu směrem k vývěvě, tím sebou strhává vodní páru.



Obr. 27: Blokové schéma sušení s dávkováním inertního plynu.

Jak je vidět na reprezentativním grafu viz. Obr. 28, tlak byl udržen okolo hodnoty 12 hPa. Při odbavování OS na reaktorovém sále, bývá používán kvalitnější jehlový ventil než při našem experimentu. Díky tomu bylo dosaženo rovnováhy, ale nikoli stability dávkování. Rychlý propad tlaku na konci sušení je způsoben zavřením jehlového ventilu. Před tlakem p_1 je patrná desorpce. Nelineární nárůst tlaku mezi p_1 a p_2 svědčí o zbytkovém množství vody v recipientu.



Obr. 28: Reprezentativní graf ze sušení s dávkováním inertního plynu. Z grafu je patrný nelineární nárůst tlaku způsoben vodou.

Získané hodnoty

Stejně jako u předchozích měření byly z naměřených údajů pomocí vztahů (21), (22) a (23) získány hodnoty v následující tabulce (Tab. 5).

n	Δp [hPa]
1	4,64
2	4,25
3	4,36
4	4,55
5	4,42
6	4,52
7	4,39
8	4,61
9	4,54
10	4,49
\bar{x}	4,48
$\bar{\sigma}$	0,04

Tab. 5: Vypočítané hodnoty z měření s dávkováním inertního plynu.

Celkové Δp z měření s dávkováním inertního plynu je $(4,48 \pm 0,04)$ hPa.

Před měřením této metody byl ze systému odstraněn lineární snímač a MEMBRANOVAC. Na konec recipientu byl přidán jehlový ventil, který byl připojen na tlakovou láhev s heliem. Nejprve byla zapnuta vývěva a nastaven tlak uvnitř recipientu pomocí redukčního ventilu na tlakové láhvi a jehlového ventilu na cca 12 hPa. Díky malému objemu recipientu nebylo dosaženo stability dávkování. Nelineární nárůst stejně jako u předchozích metod ukazuje zbytkové množství vody v recipientu. Opět by se tato vlhkost mohla redukovat delším časem sušení. Nicméně výsledný nárůst tlaku $\Delta p = (4,477 \pm 0,038) \text{ hPa}$ je větší než u metody, kde jsem vakuoval recipient na přímo.

7. Závěr

Práce se zabývá experimentálním vyhodnocením efektivity sušení recipientu pomocí vybraných vakuových technik. Cílem a smyslem této práce bylo zredukování časové náročnosti při sušení meziprostoru těsnění primárního víka na obalovém souboru. Obsahuje porovnání tří metod sušení pomocí vakua, vyhodnocení proběhlo metodou nárůstu tlaku ve vakuu.

První obecná část se soustředí na složení a využití použitého jaderného paliva, na jeho skladování a manipulace s ním. Velká pozornost je věnována obalovému souboru, kde je probrána jeho technická specifikace a postup při jeho odbavování před tím, než se umístí na sklad vyhořelého jaderného paliva. Zároveň zde byly uvedeny základní fyzikální zákony potřebné pro pochopení problematiky sušení pomocí vakua a funkce použitého zařízení.

V experimentální části práce je nejprve vysvětleno samotné sušení, kde je nejprve vysvětlen princip sušení vakuováním (Obr. 13) a poté byl probrán průběh tlaku při sušení s ohledem na body varu (Obr. 14,15). Důležitým bodem bylo zvolení rozsahu čidla. Po porovnání dvou čidel s rozdílnými rozsahy (100 a 1000 Torr), bylo jako vhodnější vybráno čidlo s rozsahem 100 Torr viz Obr. 16. Následuje kapitola, která se zabývá metodou nárůstu tlaku ve vakuu, kterou se vakuové techniky porovnávaly (Obr. 17, 18). Dále byla provedena samotná měření všech tří metod sušení pomocí vakuování, kde ze získaných hodnot mohu konstatovat, že jako nejefektivnější metoda se jeví sušení pomocí vakuování na přímo s výsledným nárůstem tlaku ve vakuu $\Delta p = (3,89 \pm 0,04) \text{ hPa}$. Tento výsledek je však ovlivněn netěsností vakuového systému, která byla prokázána viz Tab. 2. Při podmínkách, kdy by byl recipient ideálně těsný, došlo by k zamrznutí zbytkové vlhkosti v důsledku rychlého snížení tlaku pod tenzi par vody. S ohledem na získané výsledky se jeví jako nejefektivnější kombinace dvou metod: a) Aby se zamezilo zamrznutí vody, tak v první fázi sušení se jeví nejvýhodnější použít metodu s cyklováním anebo s dávkováním inertního plynu, které zaručí, že tlak neklesne pod tenzi par vody 6,2 hPa. Ve druhé fázi sušení je nejefektivnější použít metodu s vakuováním na přímo. U které se dosáhne nízkého mezního tlaku.

Všechny cíle práce byly splněny. Nicméně podstatně lepších výsledků bych dosáhl, kdyby proces vakuování probíhal v řádu hodin. Bohužel koronavirová situace a s ní spojená opatření mi nedovolila provádět takto časově náročný experiment z důvodu nařízeného homeoffice. Měření, až na netěsnost recipientu, proběhla bez problémů a větších odchylek. Podařilo se najít nejefektivnější metodu, respektive metody pro sušení meziprostoru těsnění primárního víka OS ŠKODA 1000/19.

8. Seznam literatury a použité zdroje

- [1] Jaderná palivo pro Českou republiku. (2006), dostupné na
https://www.technickydenik.cz/rubriky/archiv/jaderne-palivo-pro-ceskou-republiku_11130.html
- [2] Interní materiály ČEZ a.s.
- [3] Interní materiály ŠKODA JS a.s.
- [4] Radioaktivní odpady a skupina ČEZ, dostupné na
<https://www.svetenergie.cz/data/web/vzdelavaci-program-cez/tiskoviny/radioaktivni-odpady-a-skupina-cez.pdf>
- [5] Jaderný reaktor, dostupné na
<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k35.htm>
- [6] SÚJB. (2011) Národní zpráva pro účely Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady, Revize 4.0, dostupné na
https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/NZ_VP_RAO_4_0.pdf
- [7] SVOBODA, V. (2020) Obalové soubory ŠKODA pro skladování a transport vyhořelého jaderného paliva pro elektrárny Temelín a Dukovany. Plzeň: ŠKODA JS a.s.
- [8] ERBEN, M. (2008). Vakuová technika. Pardubice: Univerzita Pardubice
- [9] HALLIDAY, D., WALKER, J., RESNICK, R. (2021) Fyzika – vysokoškolská učebnice fyziky. Brno: VUT nakladatelství VUTIUM, ISBN 978-80-214-4124-1
- [10] WALTER, U. (2007) Fundamentals of Vacuum Technology. Cologne: Oerlikon Leybold
- [11] SÍTKO, V. (1966). Vakuová technika. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury
- [12] PÁTÝ, L. (1968). Fyzika nízkých tlaků. Praha: Nakladatelství ČSAV
- [13] KVASNICA, J. (1965) Termodynamika. Praha: Redakce teoretické literatury
- [14] RUSŇÁK, K. (2013) Vakuová fyzika a technika
- [15] PÁTÝ, L., & PETR, J. (1990) Vakuová technika. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-00216-0
- [16] TICHÝ, P. a kol (2020) Metoda zkoušení těsnosti stupeň II B. Praha: ATG s.r.o.
- [17] AVC 025 SX, angle valve – Pfeiffer Vacuum dostupné na
<https://www.pfeiffer-vacuum.com/productPdfs/PFA41033.en.pdf>
- [18] Tenze par vody, dostupné na
<http://www.prvky.com/voda.html>
- [19] PROCHÁZKOVÁ, E. (1989) Úvod do teorie a praxe fyzikálního měření I., České Budějovice, Přírodovědecká fakulta JČU,