



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MOŽNOSTI VNĚJŠÍHO DOCHLAZOVÁNÍ TLAKOVÉ NÁDOBY PŘI HAVÁRII S ROZTAVENÍM AKTIVNÍ ZÓNY

POSSIBILITIES OF EXTERNAL COOLING OF A PRESSURE VESSEL IN CASE OF THE ACCIDENT
WITH ACTIVE MELTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. JAN HANUŠ

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ MARTINEC PH.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Hanuš

který/která studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: Energetické inženýrství (2301T035)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Možnosti vnějšího dochlazování tlakové nádoby při havárii s roztavením aktivní zóny

v anglickém jazyce:

Possibilities of the external cooling of a pressure vessel in case of the accident with active zone melting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řešení možného roztavení aktivní zóny jaderného reaktoru v průběhu havárie patří mezi základní bezpečnostní opatření v generaci jaderných elektráren s označením GEN III+. Následně po havárii v jaderné elektrárně Fukušima - Daiči byly jako reakce na zátěžové testy řešeny možnosti aplikace chlazení roztavené aktivní zóny také pro reaktory, které ještě odvod tepla z „coria“ nemají jako součást základního projektu. Vývoj technických prostředků na základě dochlazování vnitřní části reaktoru s roztaveným „coriem“ na vnější straně reaktorové nádoby je nezbytný pro další přímou aplikaci konkrétních zařízení. Konkrétní nastavení podmínek pro dochlazování spodní části tlakové nádoby může do značné míry ovlivňovat množství odvedeného tepla i způsob průtoku dvoufázového proudu chladiva (voda – pára).

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše dostupných materiálů k vnějšímu chlazení tlakové nádoby reaktoru (TNR) v případě roztavení aktivní zóny (In Vessel Retention – IVR).
2. Rešerše materiálů k roztavené aktivní zóně a její charakteristika, rešerše dvoufázového proudění kolem TNR při IVR.
3. Seznámení se s projektem ÚJV Řež na IVR.
4. Teoretický návrh dvoufázového proudu chladiva na vyhřívané ploše, kritický tepelný tok, návrh rozměrů (tvaru) deflektoru v závislosti na rychlosti dvoufázového proudění kolem TNR pro optimalizaci chlazení.
5. Zpracování dat z experimentálních měření.

Seznam odborné literatury:

STACEY, Weston M. Nuclear reactor physics. 2nd ed., completely rev. and enlarged. Weinheim: Wiley-VCH, c2007, xxviii, 706 s. ISBN 978-3-527-40679-1.

Principles of heat and mass transfer. 7th ed., international student version. Singapore: John Wiley, c2013, xxiii, 1048 s. ISBN 978-0-470-64615-1.

Handbook of phase change: boiling and condensation. 7th ed., international student version. Philadelphia: Taylor, 1999, xlvii, 738 s. ISBN 15-603-2634-4.

NEIL E. TODREAS, Neil E. Mujid S. Nuclear systems: boiling and condensation. 2. printing. New York [etc.]: Hemisphere Publ. Comp, 1989, xlvii, 738 s. ISBN 15-603-2051-6.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 23.10.2013

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Havárie v jaderné elektrárně Fukushima Daiichi nám ukázala, že mohou nastat situace, při kterých nelze úspěšně dochlazovat aktivní zónu reaktoru. Tyto situace mohou nastat pokud se sejde více elementů jako bylo například přerušení dodávek elektrické energie k napájení čerpadel a zničení dieselařegátů vlnou tsunami. Neschopnost odvodu zbytkového tepla posléze vede k tavení aktivní zóny, jejímu přemístění na dno TNR a následnému protavení TNR a úniku radioaktivních produktů do kontejnmentu. Což může mít za následek i jeho selhání a únik štěpných produktů do životního prostředí. Jedním ze způsobů prevence tohoto scénáře může být pasivní systém zvaný IVR, který dostatečně uchládí TNR z vnějšku a zabrání protavení korby skrz její stěny. Tento systém počítá se zaplavením šachty TNR vodou, která posléze přirozenou cirkulací odvádí teplo ze stěny TNR. Aplikovatelnost tohoto systému na reaktory VVER 1000 je zatím v průběhu výzkumů. Nicméně je už teď jasné, že pouhé zaplavení šachty TNR vodou nebude dostatečné. Dalšími prvky systému budou muset být vhodný deflektor a nástřik TNR, který zajistí intenzivnější přestup a odvod tepla ze stěn TNR.

Abstract

The accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant has shown us that there may be situations where the applied technology will not be able to successfully cool the reactor core. These situations may occur when more elements such as supply of energy to power the pumps and diesel generators are destroyed for example by tsunami or earthquake, or other not expected natural disasters. The inability of the residual heat removal leads to the melting of core, relocation to the bottom of reactor pressure vessel (RPV) and failure of RPV. Result of this accident may be containment failure and leakage of fission products into the environment. One way to prevent this scenario may be a passive system called IVR (In-Vessel Retention) by using external cooling of RPV that retains melted core in. This system counts with flooding of RPV's shaft by water. After natural circulation of water provides the heat transfers from the wall of RPV. The applicability of IVR for VVER 1000 reactors is still in the course of research. However it's already clear that the submersion of RPV shaft by water will not sufficient. Other elements as suitable insulation and RPV coating which provides a more intensive heat transfer from the walls of RPV will be needed.

Klíčová slova

Kórium
IVR – In Vessel Retention
Deflektor
Vnější chlazení TNR
VVER 1000

Key words

Corium
IVR- In Vessel Retention
Insulator
External cooling of RPV
VVER 1000

Bibliografická citace

HANUŠ, J. *Možnosti vnějšího dochlazování tlakové nádoby při havárii s roztavením aktivní zóny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a literatury, uvedené v seznamu.

V Brně dne: 29. 05. 2014

.....
Bc. Jan Hanuš

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Martincovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval při vedení této práce.

Dále děkuji Ing. Vladimíru Krhounkovi a Ing. Davidu Bártkovi za neocenitelné odborné rady k výpočtu a trpělivost při kompletaci této práce.

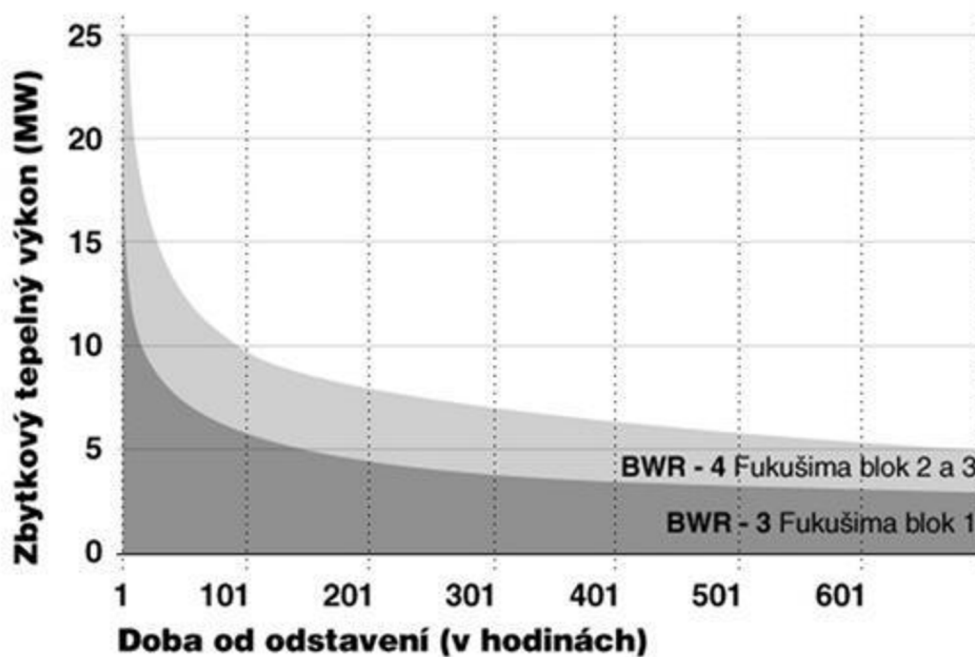
Zároveň bych zde chtěl poděkovat své rodině za podporu během celé doby studia, bez jejich pomoci by tato práce nemohla vzniknout.

Obsah

Úvod.....	15
1. Zvládání těžkých havárií	17
1.1. Způsoby zvládání havárií s tavením aktivní zóny	17
1.1.1. Princip Ex-Vessel Cooling	17
1.1.2. Princip In-Vessel Retention	19
2. Zkušenosti s IVR.....	21
2.1. Historie IVR	21
2.2. IVR pro reaktory vysokých výkonů	21
2.3. Fyzika kória	22
2.4. IVR pro JE Temelín	22
3. Cirkulace chladiva z vnější strany TNR.....	25
3.1. Experimenty na IVR ve světě.....	25
3.1.1. CYBL	25
3.1.2. SULTAN	25
3.1.3. ULPU	26
3.1.4. SBLB.....	27
3.1.5. KAIST	28
3.1.6. HERMES-HALF.....	28
3.2. Experimenty na IVR v ČR	30
3.3. Zpracování experimentálních dat	33
4. Teorie návrhu deflektoru pro tlakovou nádobu reaktoru VVER 1000	35
4.1. První přiblížení a počáteční podmínky	35
4.2. Výpočtový model	37
4.3. Zdrojový kód výpočtového programu	39
4.4. Výpočet	50
4.4.1. Geometrie	50
4.4.2. Výpočet tlakových ztrát v deflektoru	51
4.4.3. Výpočet hnací síly	55
4.5. Vzorový výpočet jednoho úseku	58
4.5.1. Geometrie	58
4.5.2. Výpočet tlakových ztrát a hnací síly	58
5. Výsledky výpočtů	62
Závěr	70
Použitá literatura a zdroje.....	71
Seznam zkratk a symbolů:.....	73
Seznam příloh.....	74

Úvod

Havárie v jaderné elektrárně Fukushima Daiichi nám ukázala, že mohou nastat situace, při kterých může dojít k neschopnosti bezpečně odvádět zbytkové teplo z aktivní zóny reaktoru. Když 11. března 2011 zasáhlo Japonsko zemětřesení, došlo k poškození elektrárny, po kterém se elektrárna ocitla bez dodávek elektrické energie. Jaderné reaktory byly okamžitě odstaveny z provozu a k havarijnímu chlazení reaktorů a odvodu zbytkového tepla musely být použity dieselaagregáty. Zbytkový tepelný výkon v době odstavení reaktorů se pohyboval okolo 7% nominálního tepelného výkonu reaktorů, v době jeden den po odstavení 1% nominálního tepelného výkonu reaktorů a pět dní po odstavení zhruba 0,5 % (Obr. 1)¹. Tento zbytkový výkon je velmi nutné odvádět z důvodu předejití zvýšení teploty a tlaku v TNR, které mohou vést až k protavení TNR a úniku štěpných produktů do okolí.^[1]



Obrázek 1: Zbytkový tepelný výkon reaktorů v závislosti na čase (Fukushima Daiichi)^[1]

Zbytkový výkon v JE Fukushima Daiichi byl úspěšně odváděn pomocí dieselaagregátů až do doby, kdy elektrárnu zasáhla vlna tsunami a zaplavila suterén budovy turbíny, kde byly uloženy. Od tohoto momentu bylo chlazení závislé na bateriích s několikahodinovou dobou životnosti. Po několika hodinách už jen na systémech nouzového chlazení:

¹ 7% nominálního tepelného výkonu odpovídá u 1. bloku hodnotě zhruba 97 MW, u 2. a 3. bloku je to přibližně 165 MW. Po jednom dni po odstavení tyto výkony byly zhruba 14 MW a 23,5 MW.

- Blok 1: Přirozená cirkulace vody zkondenzované z vodní páry
Blok 2,3: Turbočerpadlo poháněné parou generovanou ze zbytkového tepla v reaktoru

Teplota a tlak v TNR reaktoru i přes použití nouzových systému chlazení rostly. Došlo k tavení palivových tyčí a k reakci vodní páry s jejich pokrytím za vzniku vodíku. Vzhledem k vysokému tlaku v TNR bylo přistoupeno k upouštění části plynů do budovy reaktoru. Následovala řada výbuchů, jejichž videa obletěla celý svět.

Bezprostředně po havárii v JE Fukushima Daiichi probíhala jednání mezi představiteli Evropské komise s národními jadernými dozory členských států EU. Rovněž došlo také k diskuzi mezi Asociací západoevropských jaderných dozorů (WENRA) a Vysoké skupiny pro jadernou bezpečnost (ENSREG) (SUJB, 2011). Výsledkem toho byla dohoda o nutnosti zhodnocení stavu jaderných elektráren vůči extrémním situacím, které by teoreticky mohly nastat. V rámci EU byly jaderné elektrárny nuceny podstoupit sérii zátěžových testů tzv. stress testů. Jedním z bodů těchto zátěžových zkoušek bylo zjistit, jestli neexistují ještě některá další aplikovatelná opatření, která by vedla ke zmírnění následků jaderné havárie.^[2]

Tímto opatřením by pro českou jadernou elektrárnu Temelín, ale i pro další elektrárny po celém světě, mohl být systém IVR (In-Vessel Retention) na principu vnějšího chlazení TNR a odvodu zbytkového tepla kumulovaného uvnitř reaktoru. Aplikovatelností tohoto systému se v současnosti věnují lidé v ÚJV Řež a budu se mu věnovat i já v této diplomové práci.^[1]

1. Zvládání těžkých havárií

1.1. Způsoby zvládání havárií s tavením aktivní zóny

Neschopnost odvádět teplo z aktivní zóny jaderných reaktorů je velmi závažný problém, který může vést až k jejímu tavení, poškození tlakové nádoby reaktoru a úniku štěpných produktů do okolí. K této havárii může dojít například při prasknutí primárního potrubí (tzv. LOCA - Loss Of Coolant Accident) spolu s dalším technickým problémem, který se k dané havárii připojí. Tímto problémem může být třeba i vyřazení diesel agregátů z provozu spolu s neschopností obnovit dodávky elektrické energie do elektrárny jako se to stalo v japonské Fukushima.

Při těchto haváriích, kdy aktivní zóna není dostatečně chlazena, dochází vlivem zvyšujících se teplot paliva až k jejímu tavení a formování bazénku roztavených produktů na dně tlakové nádoby reaktoru (TNR). Bez opatření zmírňujících tyto následky dochází k protavení TNR a úniku tzv. kória mimo nádobu. Vně tlakové nádoby pak dochází k interakci kória z materiálu kontejnmentu, což má za následek mimo jiné vznik vodíku a oxidu uhelnatého.

V případě roztavení aktivní zóny tlakovodních reaktorů existují dva hlavní způsoby zmírnění následků této havárie. První způsob je pomocí systému zvaného ExVC (Ex-Vessel Cooling), který počítá s protavením roztavené aktivní zóny dnem TNR a jejího zachycení v „lapači aktivní zóny“, kde je následně chlazena. Druhým způsobem je systém IVR (In-Vessel Retention), který počítá s udržení roztaveného kória uvnitř TNR za pomoci jejího vnějšího chlazení. Systém ExVC je např. použit v projektu dvou typů moderních jaderných reaktorů generace III+. Jedná se o reaktory EPR 1600 a VVER 1200.^[3]

1.1.1. Princip Ex-Vessel Cooling

Funkce ExVC

Obecně lze říci, že systémy pro chlazení roztavené aktivní zóny mimo TNR by měly splňovat následující funkce:

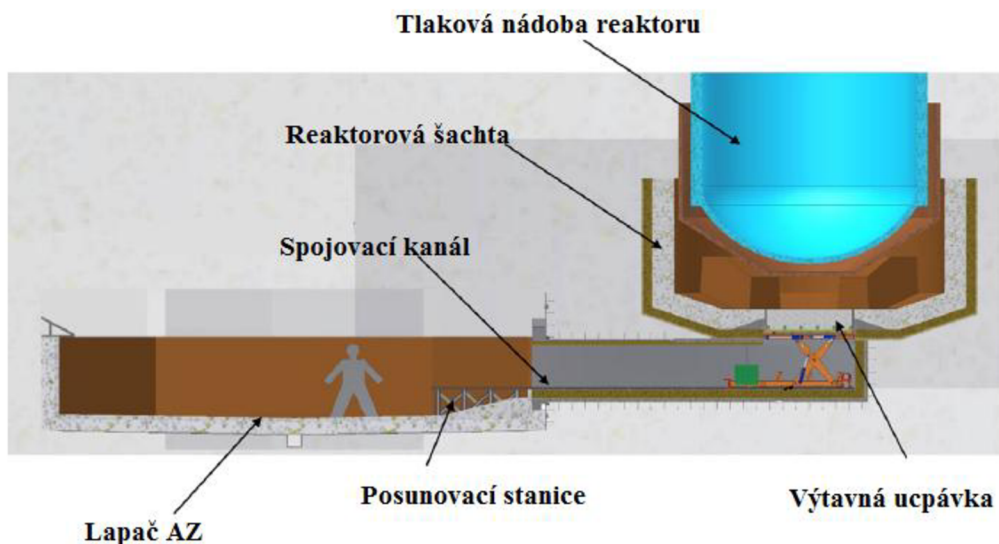
- Zachycení roztavené aktivní zóny a obětních materiálů v lapači
- Zajištění úplného vychlazení kória
- Zajistit podkritický stav kória
- Předejít úniku štěpných produktů do kontejnmentu a okolí
- Minimalizovat tvorbu vodíku

Core catcher EPR

EPR je evoluční tlakovodní reaktor o tepelném výkonu 4500 MW navržený francouzskou společností AREVA^[4]. V současné době jsou čtyři elektrárny tohoto typu ve výstavbě². Reaktorová šachta je zde navržena tak, že po protavení kória dnem reaktoru je kórium odvedeno do lapače aktivní zóny (obr. 2), kde je postupně vychlazen. Tento bezpečnostní prvek předchází interakci roztaveného kória se suterénem reaktorové budovy a je to důležitý bezpečnostní prvek, který zabraňuje selhání kontejnmentu jaderné elektrárny.

² Olkiluoto-3 ve Finsku, Flamanville-3 ve Francii a Taishan 1&2 v Číně.

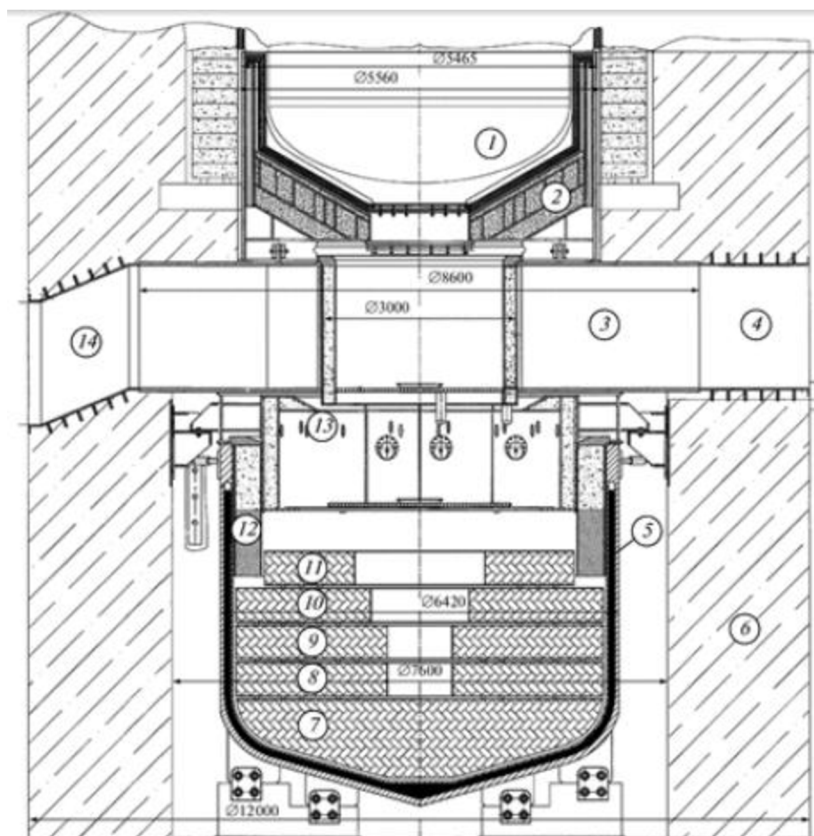
Stěny šachty reaktoru jsou pokryty tzv. obětním betonem, který je žáruvzdorný a který je částečně obětován pro zachování integrity stěn šachty. Přesun kória je zajištěn pomocí tzv. výtavné ucpávky (melt plug), která se vlivem vysokých teplot roztaví. Kórium se rozprostře v lapači aktivní zóny o ploše 170 m². Díky velké ploše lapače dochází k efektivnějšímu chlazení kória pasivními systémy a kórium je stabilizováno během několika hodin. Úplné ztuhnutí proběhne během několika dní.^[3]



Obrázek 2: Systém pro stabilizaci roztavené aktivní zóny- EPR^[4]

Core catcher VVER

U ruských reaktorů typu VVER je umístění lapače aktivní zóny řešeno odlišněji, než u reaktorů EPR. Princip funkce je ale stejný. Roztavené kórium je odvedeno do lapače aktivní zóny, kde je také následně vychlazeno. Hlavními rysy ruského typu je použití kelímkové nádoby pro lapač a chlazení, použití dvouvrstvé stěny lapače, použití oxidů železa a hliníku jakožto obětního materiálu a přidání oxidu gadolinia do těchto materiálů za účelem dosažení podkritičnosti kória.^[4]

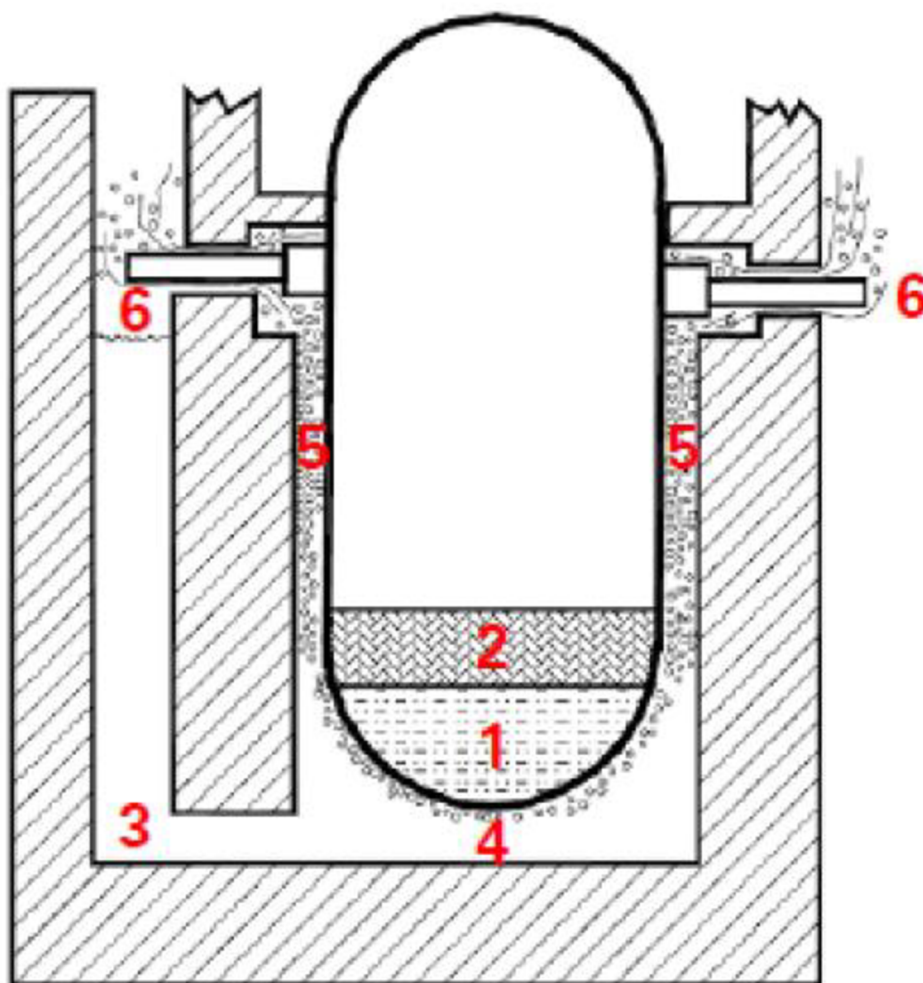


Obrázek 3: 1 – tlaková nádoba reaktoru, 2 – spodní kryt (stínění), 3 – konzolový krov, 4 – technologická chodba, 5 – nádoba lapače kória, 6 – reaktorová šachta, 7 – 11 – kazety (zásobníky) s obětním materiálem, 12 – tepelná ochrana, 13 – servisní rampa, 14 – ventilační koridor

1.1.2. Princip In-Vessel Retention

Druhým ze způsobů zmírnění následků havárie s tavením aktivní zóny je systém zvaný In-Vessel Retention (IVR) čili zadržení roztaveného kória uvnitř TNR. Pomocí vnějšího chlazení TNR je zabráněno protavení kória do kontejnmentu reaktoru. Tento koncept vnějšího chlazení je aplikován například na reaktorech typu AP1000 firmy Westinghouse. Výhodou tohoto konceptu oproti jiným zmírňujícím opatřením spojených s tavením aktivní zóny je především udržení roztaveného kória uvnitř TNR. Další nespornou výhodou je možnost aplikace na stávající jaderné elektrárny starší generace.^[5]

Princip IVR je zjednodušeně znázorněn na obrázku 4. Roztavená aktivní zóna je rozložena do dvou vrstev znázorněných pod body 1 a 2. Chlazení TNR je umožněno vodou přiváděnou kanálem (3) do reaktorové šachty. Voda chladí stěny reaktoru a začíná vařit. Tento dvoufázový mix horké vody a páry postupně stoupá (5), až dosáhne určité výšky (6), kde se horká voda odděluje a vrací zpátky do kanálu a vodní pára odchází do atmosféry kontejnmentu.^[5]



Obrázek 4: Schéma konceptu IVR (1: oxidický bazén, 2: metalická vrstva, 3: kanál s chladicí vodou, 4: reaktorová šachta, 5: stoupající dvoufázový mix voda+pára, 6: oddělení vodní a parní směsi^[5])

Toto výše popsané schéma je velmi zjednodušené, nicméně k základnímu pochopení principu IVR je zcela dostačující. Z praktického hlediska je návrh takového systému daleko složitější a je potřeba celá řada experimentů a studií než je možné takovýto systém aplikovat na určitý typ reaktoru a jaderného zařízení.

Nicméně v závislosti na stále se zvyšujících standardech jaderné bezpečnosti se k systému IVR přihlíží jako k možné bezpečnostní ochraně v jaderné elektrárně Temelín.

2. Zkušenosti s IVR

Vnější chlazení tlakové nádoby reaktoru je jednou z možností řešení programu pro zvládání těžkých havárií (SAMS = Severe Accident Management Strategy) pro stávající jaderné elektrárny. Cílem SAMS je prevence výskytu a zmírnění průběhu a následků těžkých havárií, pokud by k nim došlo. Pokud dojde k nedostatečnému chlazení během vážné havárie, mohlo by dojít až k roztavení aktivní zóny reaktoru a jejímu přesunu na dno tlakové nádoby jako se to například stalo na druhém bloku elektrárny Three Mile Island (TMI) roku 1979. Takto roztavená aktivní zóna (nazývaná kórium) na dně TNR vytvoří bazének s velmi vysokým tepelným tokem působícím na stěnu nádoby. Vlivem tohoto tepelného toku dochází k natavování a tím ztenčování stěn TNR, které v konečném důsledku může vést až k protavení kória ven z nádoby. Tento stav je nepřijatelný z hlediska jaderné bezpečnosti kvůli zvětšené pravděpodobnosti selhání kontejnmentu jaderné elektrárny a úniku štěpných materiálů do okolí.^[3]

2.1. Historie IVR

Koncept IVR byl poprvé zkoumán pro reaktor VVER 440 na finské elektrárně Loviisa. Později se o IVR začalo uvažovat i pro další jaderné elektrárny. Po rozsáhlých studiích a experimentech byl tento koncept roku 1995 přijat jako základní opatření pro strategii řešení těžkých havárií finským regulačním orgánem STUK.

U amerických reaktorů AP600 byl koncept IVR také přijat jako jedno z opatření SAMS. Výzkum použití IVR pro reaktory AP600 se konal souběžně s výzkumem pro finskou elektrárnu Loviisa a částečně probíhal na stejných zařízeních prováděných stejnými lidmi. Později se tento výzkum zaměřil i na jednotky větších rozměrů a výkonů jako je například AP1000 nebo na korejský reaktor APR 1400. Z reaktorů typu VVER byl systém vnějšího chlazení později instalován i na typech 600 a 640.

V současné době byl koncept vnějšího chlazení TNR schválen pro maďarskou jadernou elektrárnu Pakš osazenou reaktory VVER 440 a existuje celá řada projektů v jednotlivých zemích, které se zajímají možnostmi instalace systému IVR právě na jejich jaderných elektrárnách. Jedná se například o českou jadernou elektrárnu Temelín (VVER 1000) nebo slovenské Mochovce (VVER 440).

Ze zvýšeného zájmu o systém zachycení roztaveného kória v TNR pomocí vnějšího chlazení TNR lze usuzovat, že celá řada zemí přijala tento koncept jako strategii pro řešení těžkých havárií a je otázkou výzkumů a pokročilých výpočtů, zda bude tento systém aplikovatelný na reaktory vyšších výkonů, jako jsou například VVER 1000 a VVER 1200.^[6]

2.2. IVR pro reaktory vysokých výkonů

Donedávna pro vysokoenergetické reaktory jako je VVER 1000 a VVER 1200 bylo považováno, že systém IVR nebude účinný, jelikož tepelný tok z kória zformovaného na dně TNR nebude možno dostatečně efektivně odvádět vnějším chlazením ze stěn nádoby. Zbytkový výkon těchto reaktorů po odstavení je podstatně vyšší než u reaktorů nižších výkonů, např. VVER 440. Proto na těchto reaktorech není systém vnějšího chlazení TNR původně uvažován. V případě nedostatečného

odvodu tepla bude pak docházet vlivem vysokých teplot působících ze strany kória na stěnu TNR ke ztenčování její tloušťky, které by mohlo vést až k protavení kória ven.

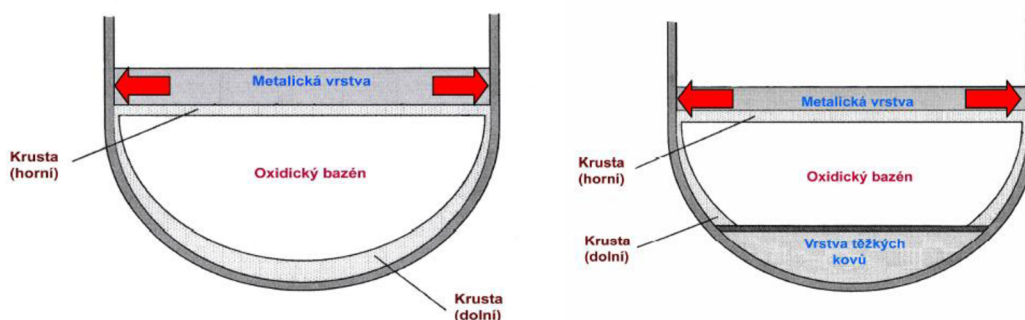
V posledních letech však celosvětově probíhá výzkum a řada experimentů, které jsou prováděny s cílem potvrdit strategie zvládnání těžkých havárií. V návaznosti na tyto výzkumy byl koncept pro zadržení kória uvnitř tlakové nádoby schválen a certifikován pro reaktor generace III+, tedy reaktor AP 1000 firmy Westinghouse. Pro korejský design reaktoru APR 1400 byl systém IVR také navržen. V návaznosti na tyto experimenty a výsledky bylo přehodnoceno stanovisko, aby systém IVR byl prozkoumán i pro vysokoenergetické reaktory typu VVER.

Je však nutné přijmout fakt, že jsou zde určité rozdíly mezi konstrukcemi reaktorů AP (APR) a VVER. Jedná se například o geometrii reaktorů, kdy dno TNR u AP (APR) je sférické, ale u reaktorů VVER je semieliptické. Je totiž daleko těžší udržet přirozenou cirkulaci požadované intenzity kolem eliptického dna. Zároveň je však nutné taky zmínit, že tepelný výkon APR 1400 je 4000 MW, což je podstatně více než u reaktorů VVER 1000 a VVER 1200.^[3]

2.3. Fyzika kória

Složení a konfigurace bazénu taveniny zformované na dně TNR je důležitá pro definování tepelných toků do stěn nádoby. Podle konfigurace analyzované současnými výpočtovými prostředky by bazén s taveninou utvořený na dně TNR by byl rozložený do dvou vrstev. Těžší vrstva nacházející se na dně se nazývá oxidický bazén a je složen převážně z oxidů uranu a zirkonia. Nad oxidickým bazénem se potom rozprostírá metalická vrstva. Tato „klasická“ konfigurace sloužila při studiu na IVR pro elektrárny typu AP600 a AP1000 a také pro jadernou elektrárnu Loviisa.

„Nová“ konfigurace odvozená z rozboru nových experimentů MASCA2 a METCOR počítá ještě s vrstvou těžkých kovů lokalizovanou na úplném dně TNR. Hlavní rozdíl mezi těmito konfiguracemi spočívá v tom, že tepelný tok zostřujícím efektem je daleko větší u třívrstvé konfigurace, jelikož stejné teplo je odváděno do významně menší plochy dané tloušťkou vrstvy.^[7]



Obrázek 5: Vlevo "klasická" konfigurace, vpravo "nová" konfigurace^[7]

2.4. IVR pro JE Temelín

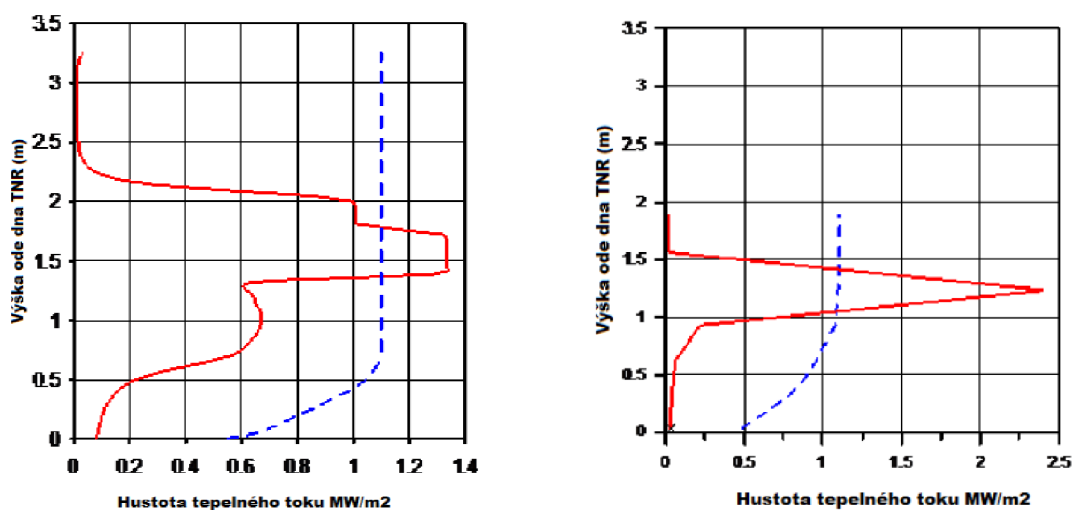
Než bude možno rozhodnout, jestli systém IVR bude možné použít i na reaktorech v jaderné elektrárně Temelín, je potřeba vykonat celou řadu analytických

MOŽNOSTI VNĚJŠÍHO CHLAZENÍ TNR PŘI HAVÁRII S TAVENÍM AKTIVNÍ ZÓNY

výpočtů a experimentů. Předběžné analýzy je možné řešit za pomoci kódů SOCRAT a ASTEC (a MELCOR), založených na simulacích dle scénářů těžkých havárií na reaktorech VVER.

V rámci řešení byl vybrán scénář havárie, který počítá s nejkratší možnou dobou tavení aktivní zóny a jejímu přesunu na dno TNR. Událostí, která tuto situaci vyvolá, je oboustranné přetržení studené větve primárního chladicího okruhu a současná ztráta vnějšího napájení elektrárny. Trhlina se bude nacházet u vstupu do TNR a voda do reaktoru bude dodávána pouze skrze systémy havarijního dochlazování.

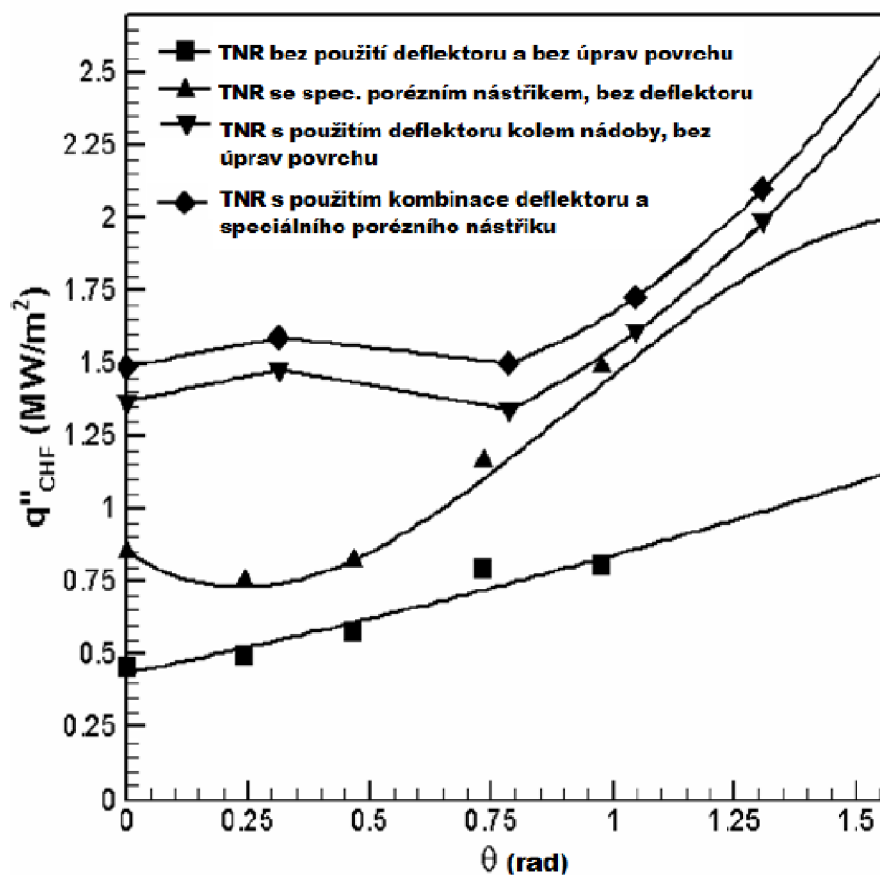
Výsledky předběžných analýz podle kódů ASTEC a SOCRAT jsou znázorněny na následujícím obrázku.^[8]



Obrázek 6: Závislost hustoty distribuce tepelného toku na výšce (bráno od reaktorového dna) v porovnání s kritickým tepelným tokem (přerušovaná modrá křivka), vlevo SOCRAT, vpravo ASTEC^[8]

Jak je vidět z obrázku 6, při aplikaci systému IVR bez dodatečných opatření hustota tepelného toku v určitých místech překračuje hodnoty kritického tepelného toku, což znamená, že systém IVR by byl v tomto případě nepoužitelný.

Jednou z možností zvýšení hodnoty kritického tepelného toku je pomocí použití deflektoru a speciálních nástřiků na povrch TNR (obr. 7). Pomocí těchto metod lze hodnoty kritického tepelného toku oproti původním hodnotám výrazně navýšit. Významnou roli v tomto navýšení bude hrát volba vhodného deflektoru a nástřiků. Konkrétní hodnoty kritického tepelného toku budou později stanoveny na základě předpokládaných zkoušek a experimentů. Jedním z cílů této práce je právě návrh deflektoru a optimalizace jeho geometrických parametrů.



Obrázek 7: Porovnání hodnot kritického tepelného toku pro různé druhy úprav^[8]

3. Cirkulace chladiva z vnější strany TNR

Ačkoliv je externí chlazení velmi důležité pro správnou funkci konceptu IVR, tak se jím zabývalo pouze několik projektů. Tyto experimentální projekty jsou například CYBL v Národní laboratoři Sandia v USA, SULTAN v Grenoblu, ULPU na univerzitě v Santa Barbaře, SBLB v Pensylvánii, CHF v Korejském institutu vědy a techniky (KAIST).

3.1. Experimenty na IVR ve světě

3.1.1. CYBL

Zařízení sloužilo pro simulace varu na vnějším povrchu dna tlakové nádoby. CYBL s torisférickým TNR byl vyhříván polem sálavých lamp, které zajišťovaly tepelný tok až $0,4 \text{ MW/m}^2$. Probíhaly zde dva typy experimentů pro ustálený var. Jeden dodával jednotný tepelný tok do nádoby a druhý dodával vyšší tepelný tok v určitém bodě. Výsledkem experimentu bylo vizuální pozorování vzniku varu a proudění dvoufázové směsi. Nicméně kritický tepelný tok nebyl při tomto experimentu měřen.^[9]

3.1.2. SULTAN

SULTAN byl založen na sérii jednodimenzionálních experimentů, zaměřených na CHF v závislosti na změně parametrů jako je tlak, šířka kanálu, sklon kanálu a hmotnostní průtok vody kanálem. Testovací sekce byla složena z rovnoměrně vyhřívajícího plochého plátu 4 metry dlouhého, 0,15 metru širokého a 1,5 milimetru tlustého ukrytého v dlouhém obdélníkovém kanálu, kde se mohla šířka mezery upravovat od 0,03 do 0,15 metru. V rámci experimentů byly upravovány jednotlivé parametry jako tlak, náklon, šířka kanálu, vyhřívající délka, hmotnostní průtok atd. Výsledkem experimentů byl závěr, že tepelný tok větší než 1 MW/m^2 by mohl být odváděn a větší výkony by mohly být odváděny ve vhodně optimalizovaném kanálu.

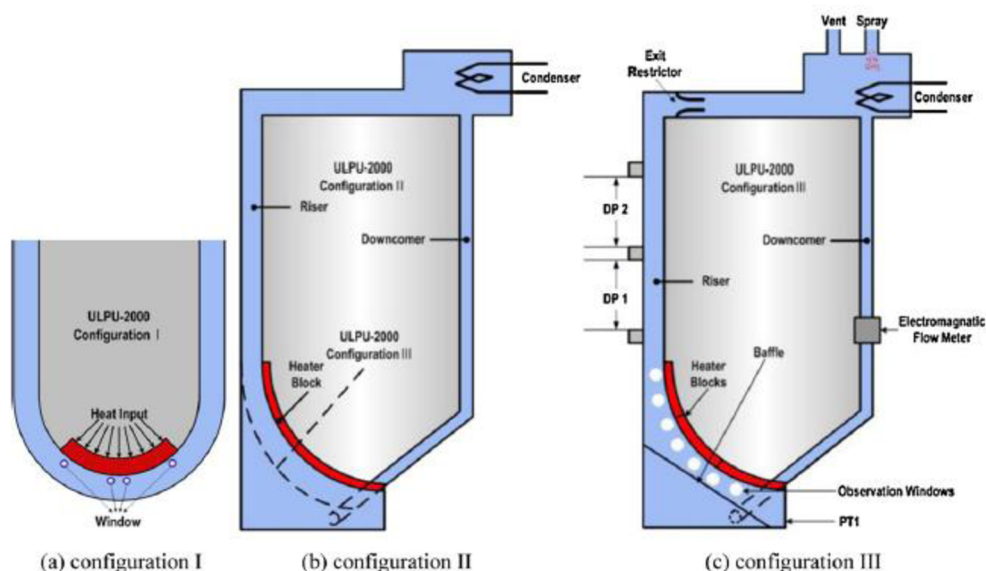
Započala nová kampaň experimentů zkoumající jeden vybraný úhel a šířku kanálu. Zanechán byl stejný tlak, vstupní podchlazení a tepelný tok, ale došlo k postupnému snižování hmotnostního průtoku, aby se přiblížilo k hranici krize varu. Byla nalezena vysušená místa menší než 6 cm^2 . Většina z nich byla situována na konci vyhřívající sekce, ale pár bylo nalezeno i v nižších výškách. Byla provedena korelace CHF a došlo se k závěru, že existuje velká šance pro dlouhodobé udržení koria uvnitř TNR pomocí přirozené cirkulace chladiva z vnějšku TNR. Extrapolovaná data na reálné geometrické podmínky běží v termo-hydraulickém kódu CATHARE následovně:

$$q_{CHF}^I = A_0(s, P, G) + A_1(s, G) \cdot x + A_2(s) \cdot x^2 + A_3(s, P, G, x) \cdot \Theta + A_4(s, P, G, x) \cdot \Theta^2$$

I když byl SULTAN pouze jednorozměrný systém, který nemohl imitovat specifický tvar deflektoru nebo vícedimenzionální var, data získaná z rovnice mohou poskytnout základní informace o efektech různých parametrů na CHF.^[9]

3.1.3. ULPU

ULPU bylo zařízení navrženo k simulaci plně rozvinutého procesu varu na externí straně spodní části TNR pomocí měděného plátku s nezávislými výhřevnými zónami. Testy sestávaly z konfigurací I, II, a III pro typ reaktoru AP600 a konfigurací IV a V pro reaktor AP1000.^[10]

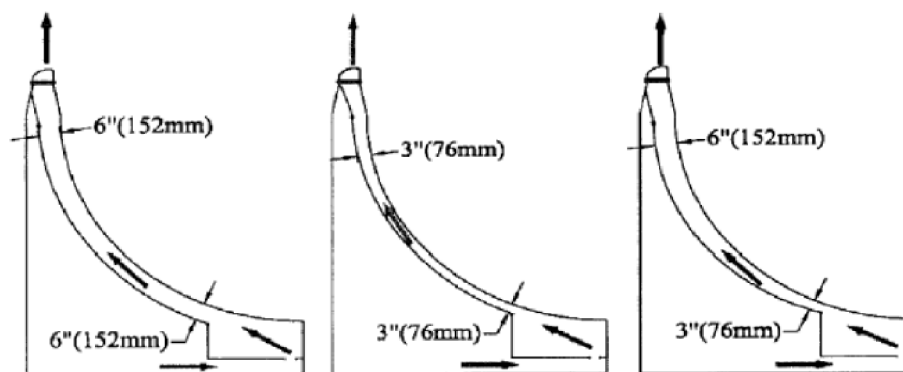


Obrázek 8: ULPU I, II, III^[10]

Konfigurace I replikuje proces varu na vnější straně dna tlakové nádoby v rozsahu $-30^\circ < \theta < 30^\circ$. Konfigurace II simuluje plnou stranu dna TNR od centra spodku až do vertikální pozice ($0^\circ < \theta < 90^\circ$). Konfigurace III má navíc i panel simulující deflektor. Naměřená data ukázala pozoruhodné hodnoty CHF v závislosti na úhlu stěny TNR. Deflektor v použití konfigurace III měl jen velmi malý efekt na změnu místního CHF.

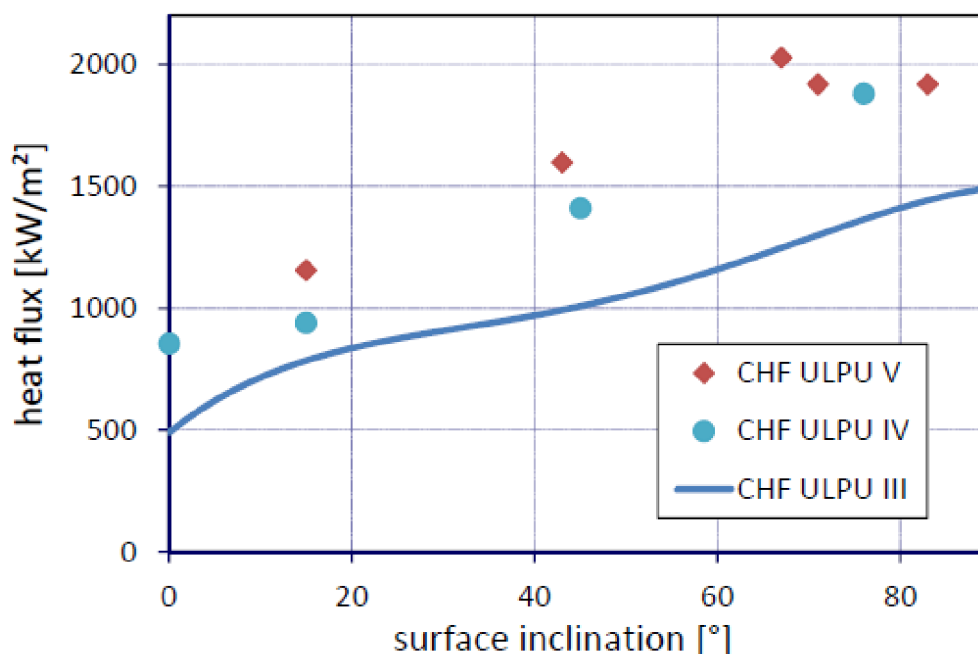
Kvůli prozkoumání možnosti použití deflektoru, který by zlepšil odváděný tepelný tok, bylo rozhodnuto vložit do konfigurace IV přepážku simulující deflektor a bylo provedeno 28 experimentů na krizi varu. Hodnoty CHF v spodní a střední části se překračovali $1,4$ a $0,9 \text{ MW/m}^2$. Kritický tepelný tok v horní části překračoval $1,88 \text{ MW/m}^2$ a v plně vertikální pozici klesl na $1,6 \text{ MW/m}^2$. Nutno podotknout, že šířka kanálu mezi deflektorem a TNR byla konstatní.

Pro konfiguraci ULPU V byly provedeny změny v kanálu kvůli prozkoumání vlivu šířky mezi TNR a deflektorem na CHF. Bylo provedeno 36 experimentů na krizi varu ve třech různých nastavení kanálu (obr. 9). Nejlepších výsledků bylo dosaženo, když se šířka palivového kanálu postupně měnila z 76 mm na 152 mm . Limity CHF v horním regionu dosahovaly $1,8 \text{ MW/m}^2$ a ve vertikální pozici 2 MW/m^2 .^[5]



Obrázek 9: Variace šířky kanálu na ULPU V^[5]

Kritický tepelný tok v závislosti na úhlu, kde dno TNR je bráno jako 0° a vertikální pozice jako 90° je ukázán na následujícím grafu.



Graf 1: Kritický tepelný tok v závislosti na úhlu^[5]

3.1.4. SBLB

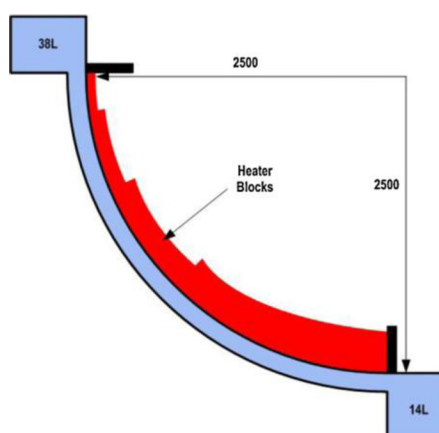
Zařízení SBLB postavené na universitě v Pensylvánii bylo určeno pro výzkum varu a kritického tepelného toku na vnější straně hemisférické tlakové nádoby. Zařízení umožňovalo 3 rozměrné simulace procesu varu na vnějším povrchu s i bez použití deflektoru. Testovací sekce zařízení byla navržena tak, že se daly velmi jednoduše simulovat různé variace varu a proudění. Pro určení základních parametrů pro pozdější srovnávání proběhl nejdříve experiment bez deflektoru, jehož výsledkem byly různé hodnoty kritického tepelného toku a lokálních limitů CHF rostoucích monotónně od spodní části TNR pro podchlazený i objemový var.^[10]

Po stanovení počátečního případu pokračovaly experimenty s použitím deflektoru. Výsledkem bylo zjištění, že přestup tepla při bublinkovém varu a kritický tepelný tok je vyšší než v případě experimentů bez deflektoru.

SBLB se skládalo z vodního tanku a kondenzátoru, vyhříváné hemisférické testovací TNR s nebo bez deflektoru a systémem pro řízení a zaznamenávání experimentu.^[10]

3.1.5. KAIST

Zařízení KAIST bylo postaveno jako simulace konfigurace reaktorů APR1400 pro proukomání kritického tepelného toku. Projekt se skládá z hlavní testovací sekce, horního vodního bazénu, tepelného výměníku, vodního rezervoáru a čerpadla zajišťující požadovaný tok chladicí směsi.^[9]

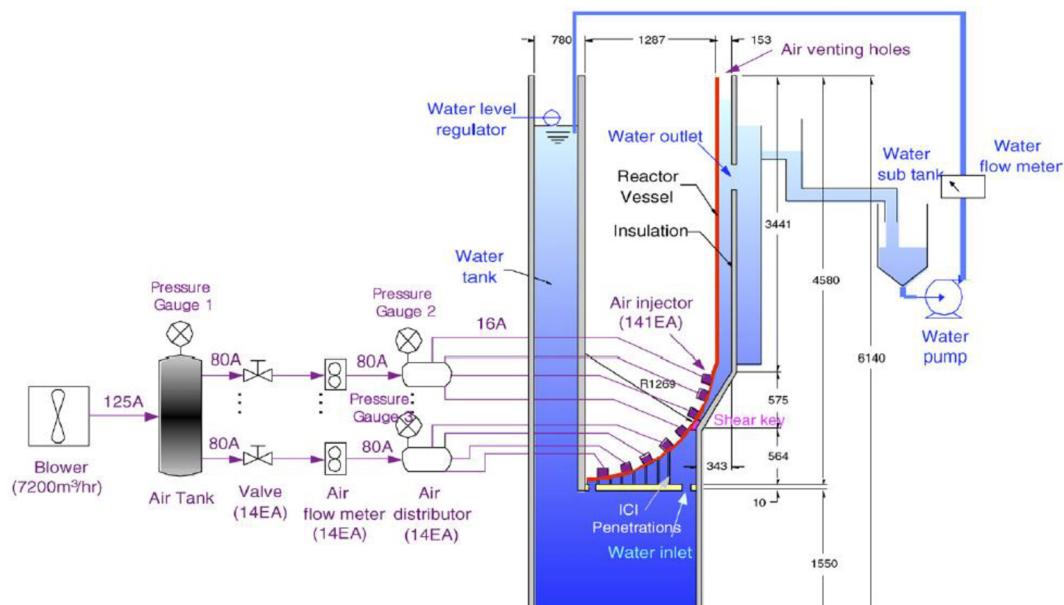


Obrázek 10: Zařízení KAIST

Měřený CHF byl nižší než tomu bylo na experimentálním zařízení ULPU, konfigurace II a III. To bylo dáno menším kanálem, jiným použitým materiálem v testovací sekci a rozdílným druhem chlazení (nucená cirkulace chladiva).

3.1.6. HERMES-HALF

Pro zjištění termo-hydraulického chování media proudícího prstencovým kanálem mezi TNR a deflektorem byly prováděny experimenty zvané HERMES-HALF. Těmito experimenty se zabývali vědci z Korejského jaderně energetického výzkumného institutu (KAERI) a byly cíleny pro korejský reaktor APR 1400. Cílem následné analýzy bylo vyhodnocení experimentálních výsledků hmotnostního průtoku vody, vstupní a výstupní plochy pro vodu a úroveň zaplavení šachty. Schéma zařízení pro experiment je na následujícím obrázku.^[12]



Obrázek 11: HERMES-HALF^[12]

Zařízení má tři hlavní části:

1. Hlavní testovací sekce
2. Systém pro dodávku vzduchu (Air Supply System)
3. Systém pro recirkulaci vody

V hlavní testovací sekci je na polovinu zmenšená TNR a deflektor, které mají představovat reaktor APR 1400. Všechny rozměry jsou zde zmenšeny na polovinu, poloměr TNR je 1,269 metru a šířka prstencového kanálu v horní části je 0,153 metru. Díky kónické konfiguraci deflektoru je nejmenší vzdálenost mezi deflektorem a stěnou TNR 0,063 metru. Pro lepší vizualizaci bylo instalováno polykarbonové okno v deflektoru. Vodní rezervoár je připraven vytvořit požadovaný tlak na vstupu do zařízení. Tento tlak je možno měnit výškou hladiny vody v něm. Vstup vody pro přirozenou cirkulaci vodní směsi je zajištěn 23 otvory ve spodní části a 35 otvory v obvodové části vstupní desky. Každý otvor má průměr 75 mm a celková vstupní plocha je 0,25 m². Výstup je proveden třemi obdélníkovými otvory rozmístěnými v různých výškách deflektoru. Plocha každého výstupního otvoru je přitom nastavitelná. Voda naakumulovaná po výstupu za zařízení v mezinádrži je přečerpána do vodního rezervoáru.

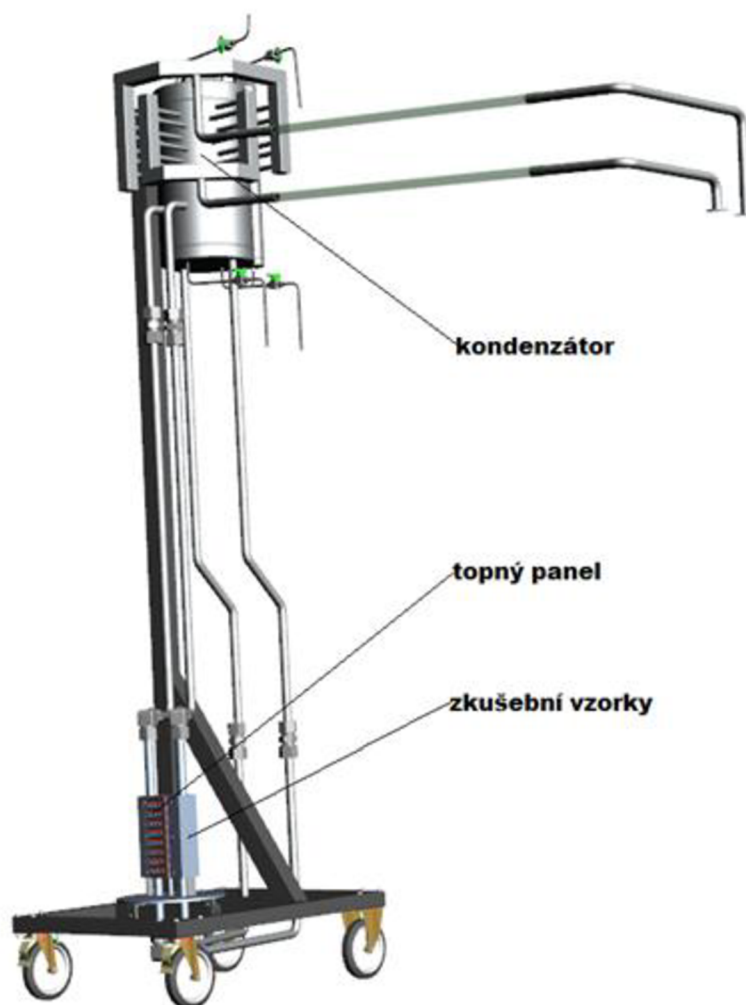
V zařízení HERMES-HALF je dvoufázové proudění směsi generováno oproti jiným experimentům „nevýhřevnou“ metodou. To znamená, že k tvorbě bublinek vodní páry není použito topné zařízení, ale bublinky páry jsou simulovány vstříkovaním vzduchu. Ventilační systém, který toto umožňuje je složen ze 141 trysek instalovaných ve dně TNR. Každá tryska obsahuje filtr, který zaručuje tvorbu bublinek požadovaných parametrů. Tepelný tok na stěnu TNR je přepočítávaný na intenzitu vzduchového vstřiku pomocí počítačového kódu MAAP4. Jelikož tepelný tok je v horní části dna TNR vyšší díky zostrujicímu efektu metalické vrstvy je v horní části umístěno více trysek než v části spodní.^[12]

Výsledkem experimentů bylo porovnání výsledků měření s výsledky programu pro termo-hydraulické výpočty RELAP5/MOD3. Toto porovnání ukázalo, že výsledky hodnot cirkulace chladiva spočtené v tomto programu jsou velmi podobné naměřeným hodnotám. Byly provedeny další detailnější experimenty jako

nahrazení vstřikování vzduchu za vstřikování páry nebo změna geometrie z polovičních rozměrů na skutečné. Výsledkem snahy vědců z KAERI bylo nakonec potvrzení strategie IVR pro APR 1400.

3.2. Experimenty na IVR v ČR

V rámci posouzení možnosti strategie IVR pro reaktor typu VVER 1000, se i v České republice rozběhl experimentální projekt na aplikovatelnost tohoto systému, konkrétně ve společnosti ÚJV Řež. Projekt nese jméno BESTH a v současné době probíhají experimenty na experimentálním standu BESTH 2, který je modifikací předchozího experimentálního zařízení BESTH 1. Modifikace se týkala především zkušebních vzorků, topného panelu a odlišného chlazení vzorků pomocí kondenzátoru. Současná podoba standu je znázorněna na obr. 11.^[13]



Obrázek 12: Experimentální stand BESTH 2^[13]

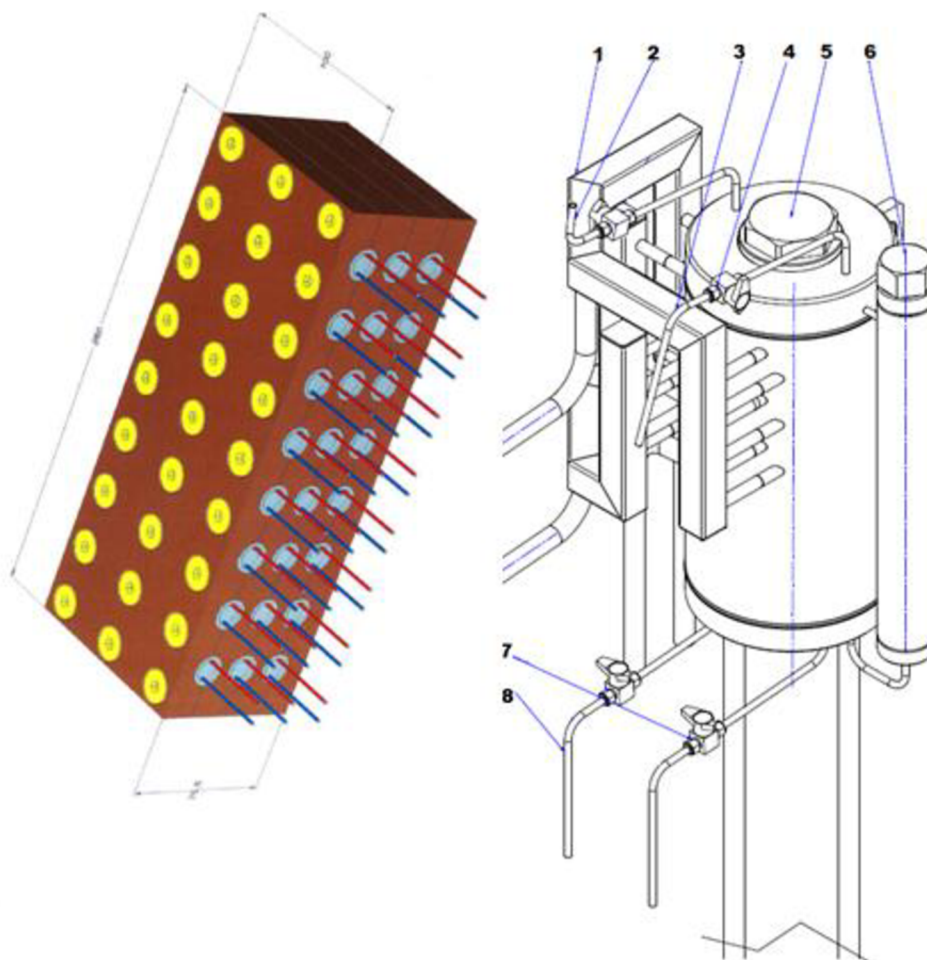
Na standu BESTH 2 je použito jako topný panel 24 článků elektrických odporových topidel o příkonu 1,2 kW. Celkový maximální příkon tedy činí 28,8 kW. Topný panel je schopný dodávat vzorkům tepelný tok až 1,1 MW/m². Výhodou tohoto topného panelu je proti předchozímu grafitovému snadná regulace výkonu od 0 do 100 %. Články jsou uloženy v měděné matici s antikorozi chromovou

MOŽNOSTI VNĚJŠÍHO CHLAZENÍ TNR PŘI HAVÁRII S TAVENÍM AKTIVNÍ ZÓNY

úpravou o rozměrech 260 x 100 x 75,5 mm. Nevýhodou tohoto topného elementu je poměrně nízká provozní teplota článků.

Dále byla původní tloušťka vzorku z korpusové uhlíkové oceli TNR vyfrézována z původních 20 mm na tloušťku 4 mm. Základní rozměry vzorků jsou tedy 260,6 x 80,6 x 4 mm. Tvar a rozměr vaničky vzorků zůstal beze změn.

V předchozím experimentálním zařízení BESTH 1 bylo chlazení vzorků provedeno dvěma chladicími okruhy (primární a sekundární) pomocí nucené cirkulace. V novém standu byl vložen do oběhu kondenzátor, přičemž předchozí chlazení zde bylo ponecháno, avšak jako sekundární a terciární okruh. Chladicí výkon kondenzátoru je 35 kW a maximální dovolený tlak je 0,5 MPa. Kondenzátor slouží k ochlazení a kondenzaci par chladicího média a k zajištění přirozené cirkulace média v oběhu.^[13]



Obrázek 13: Topný panel a kondenzátor^[13]

Před začátkem zahájení experimentální fáze na standu BESTH 2 bylo nejprve potřeba stanovit bezpečnostní podmínky při provozu. Oproti předchozímu experimentálnímu zařízení je nový stand vybaven systémem automatického vypnutí příkonu topného panelu, pro případ že by došlo ke ztrátě schopnosti účinného chlazení. Limitními hodnotami pro ostavení byla teplota v měděné matici termočlánků 650°C³ nebo přetlak v systému 0,5 MPa.

³ Maximální provozní teplota odporových elektrických topidel je 700 °C

Dalšími pozorovanými parametry jsou teploty mezi topným panelem a zkušebními vzorky, teploty chladicího média na trase vzorek-kondenzátor a kondenzátor-vzorek či příkon topného panelu kvůli regulaci.

Po proběhnutí zkušebnímu provozu stendu proběhl ve dnech 2. -6.12 2013 experiment v délce 98 hodin. Parametry měřeného experimentu byly následující:

- Příkon topného panelu byl 23 kW (zhruba 80%)
- Teploty v kontaktu vzorku a topného panelu byly v rozmezí 280-320 °C
- Teplota chladicího média cca 110-125 °C
- Přetlak systému 0,5-1,5 baru
- Dosažený tepelný tok z panelu na vzorky – 0,85 MW/m²
- Rychlost proudění chladiva na studené větvi – 1,15 m/s
- Chladicí médium – roztok kyseliny borité

V průběhu experimentu nedošlo k žádným komplikacím a zařízení bylo možno provozovat při určitých parametrech po dostatečně dlouhou dobu. Všechny systémy prokázaly svoji očekávanou funkčnost. Završením experimentu je analýza vlivu roztoku kyseliny borité na povrch vzorků. Po rozřezání experimentálních vzorků bylo zjištěno, že podléhaly velmi silnému vlivu koroze viz obrázek.^[14]



Obrázek 14: Detail vlivu koroze^[14]

Vypočtené korozní úbytky kombinace rovnoměrné a důlkové koroze činili 27 mm/rok. Tento výsledek je velmi příznivý, jelikož se předpokládá doba chlazení při těžké havárii s nutností chlazení TNR v řádu dnů maximálně týdnů. Dále byl potvrzen předpoklad, že při korozní reakci bude docházet k nezanedbatelné generaci vodíku. Množství generovaného vodíku činí přibližně 24 litrů na jeden m² povrchu chlazeného materiálu za hodinu. V případě použití samotné vody by tato generace byla nižší. Je otázkou dalších experimentů, která kombinace chlazení bude nejpríjemnější.

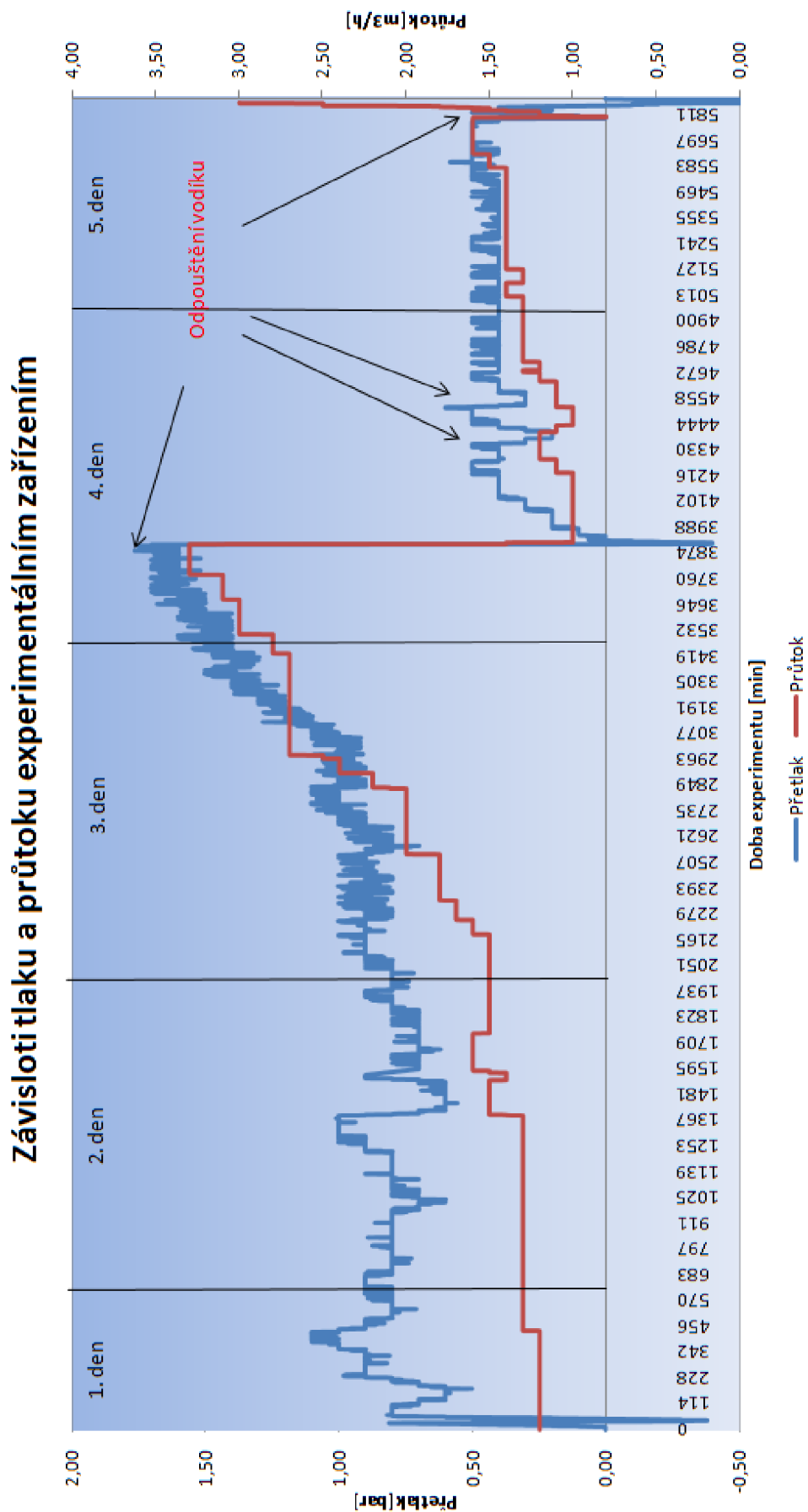
Výsledky experimentů byly tedy velmi příznivé pro další možné kroky do budoucnosti. Stend se dařilo provozovat na požadovaných parametrech a na zařízení bude možno provádět další experimenty, nejen chemické, ale i teplosměnné.^[14]

3.3. Zpracování experimentálních dat

V původní práci měly být zpracovány experimentální data z experimentálního stendu BESTH 3. Díky nim mělo dojít k lepšímu nastínění problematiky dvoufázového proudění v kanálu mezi TNR a deflektorem. Výstavba tohoto stendu byla, ale prodloužena a tudíž nebylo možné zpracovat experimentálně naměřené hodnoty z tohoto zařízení. Experimentální data zpracovávaná v této části byla naměřena v prosinci 2013 na experimentálním stendu BESTH 2, kde se jednalo o chemický experiment.

Doba tohoto experimentu trvala pět dní a zaznamenávána byla data s periodou šesti sekund. Z naměřených dat na tomto stendu jsme si vybrali hodnoty naměřených přetlaků a průtoků v závislosti na době trvání experimentu. Tyto závislosti jsou znázorněny na grafu č. 1, který je zobrazen na následující straně. Zde je vidět, jak se s přibývajícím časem zvyšuje přetlak v kondenzátoru experimentálního zařízení, na který je reagováno změnou množství průtoku v sekundární smyčce. Zvyšování přetlaku je dáno zvyšováním koncentrace vodíku v kondenzátoru. Ten zhoršuje přestup tepla a tudíž je potřeba zvýšit průtok sekundární smyčkou, aby nebyl překročen limit přetlaku, který může nastat.

Z hlediska bezpečnosti je důležité naakumulovaný vodík odpouštět. Nadměrná produkce vodíku by mohla v JE způsobit výbuch jako se tomu stalo například při havárii v JE Fukushima Daiichi. V rámci experimentu proběhlo čtyřikrát odpouštění vodíku. Nejvíce bylo odpuštěno hned při prvním odpouštění, které proběhlo čtvrtý den experimentu. Celkově se v kondenzátoru vzniklo 106 litrů vodíku, přičemž průměrně vznikalo 1,1 litrů vodíku za hodinu na ploše vzorků 0,0457 m². Pro chlazení byla použita voda s roztokem H₃BO₃ 40g/l. Zpracovaná experimentální data potvrzují, jak je důležitá instalace zařízení, které bude snižovat koncentraci vodíku v elektrárnách.

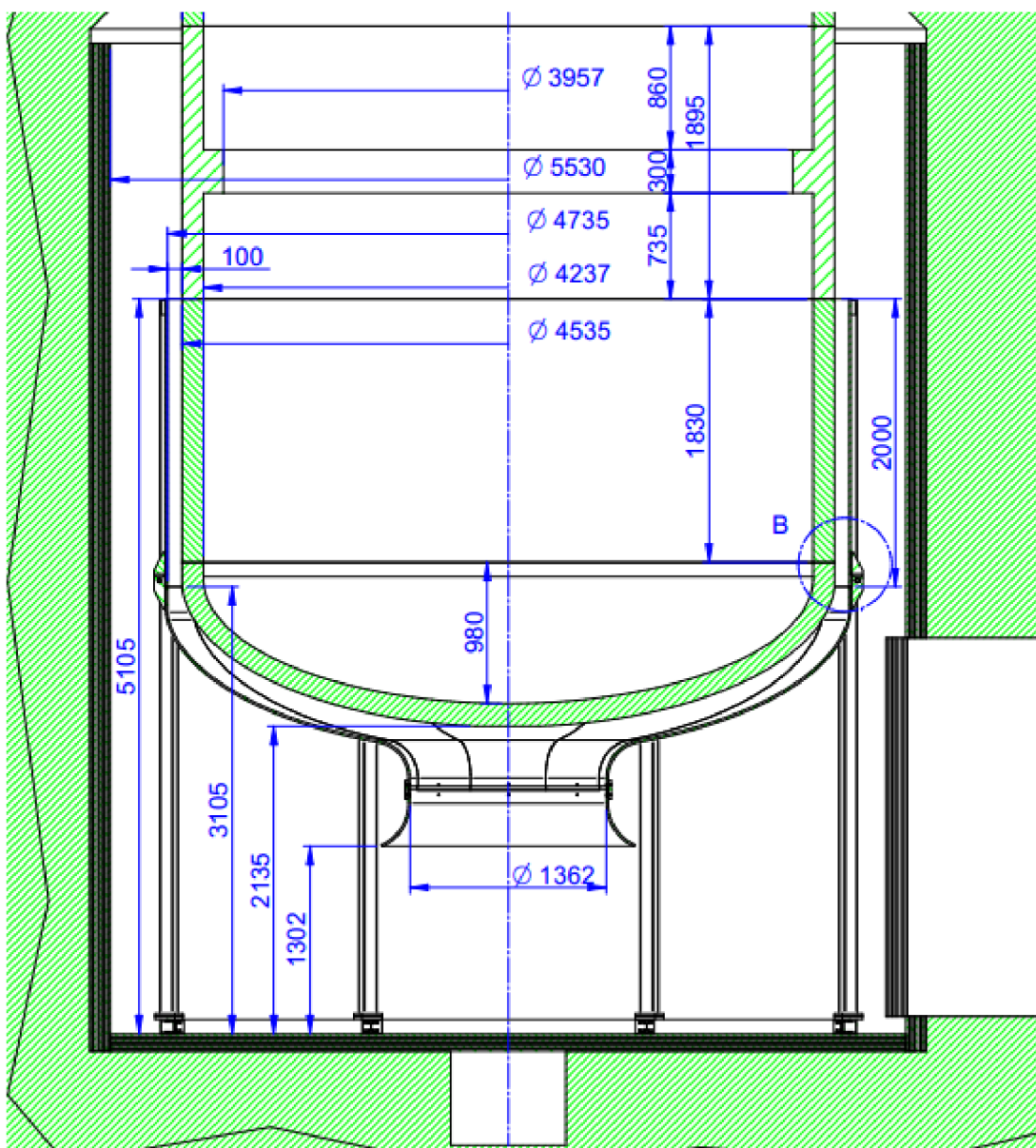


Graf 2: Závislosti tlaku a průtoku experimentálním zařízením

4. Teorie návrhu deflektoru pro tlakovou nádobu reaktoru VVER 1000

4.1. První přiblížení a počáteční podmínky

Hlavním účelem této práce je posouzení možnosti aplikace systému IVR v podmínkách jaderné elektrárny s reaktorem VVER 1000. Výstupem mělo být posouzení již navrženého deflektoru z hlediska termo-hydraulických výpočtů a optimalizace tohoto deflektoru v případě nevhodnosti dle prvotního návrhu. Původní návrh deflektoru je znázorněn na obrázku 15.



Obrázek 15: Původní návrh deflektoru

Při navrhování deflektoru pro TNR VVER 1000 byly prověřovány různé varianty, které by mohly být použity. Zajištění cirkulace chladiva v kanálu mezi deflektorem a TNR bude výsledkem optimalizace termohydraulickým výpočtem.

Jedním z faktorů, který může nabývat definované hodnoty v kontejnmentu JE je tlak (kontejnment VVER1000 rozsah cca 0,8-5), při kterém bude systém fungovat. Jedná se o absolutní tlak, kdy 0,8 je ve skutečnosti podtlak 0,2 atm. Nikdo nemůže přesně říci, co se bude v případě tavení aktivní zóny v budově reaktoru odehrávat, a které systémy havarijní ochrany budou spuštěny a ovlivní situaci v kontejnmentu. Mohou nastat případy, kdy bude elektrárna úplně bez dodávek elektrické energie zvenčí, jako tomu bylo například při havárii v JE Fukushima Daiichi. Může tedy nastat situace, že nenaběhnou ostatní havarijní systémy a tlak v kontejnmentu nebude řízen. Pro výpočet bylo nastaveno rozmezí tlaků od 1 do 5 barů. Očekávaný nejpravděpodobnější scénář pro havárii je LB LOCA (Large Break Loss Of Coolant Accident) spolu se SBO (Station Black Out).

Dalším důležitým faktorem pro správnou funkci je návrh vhodné šířky kanálu mezi deflektorem a TNR. Tato šířka nám ovlivní průtok chladicího média, rychlost proudění a celou řadu dalších parametrů, např. hustotu parovodní směsi, entalpii směsi atd. Pro náš výpočet byla prověřovaná šířka deflektoru (vzdálenost stěny deflektoru od stěny TNR) od 50 do 400 mm. Původní deflektor má dle návrhu šířku kanálu 100 mm. Při návrhu jsme hledali takovou variantu, která nám zajistí nejvyšší akceptovatelnou vstupní rychlost chladiva na dno TNR, kde se z hlediska proudění nachází nejvíce kritická oblast.

Po nalezení optimální rychlosti chladiva kanálem určité šířky bylo zapotřebí prozkoumat vliv změny výšky válcové části deflektoru na rychlosti proudění. Původní návrh deflektoru počítá s výškou válcové části deflektoru 2 metry, přičemž maximální možná použitelná výška je až 4 metry.

Pro udržení přirozené cirkulace mezi deflektorem a TNR se musí tlakové ztráty v deflektoru rovnat hnací síle, která je dána rozdílem hydrostatických tlaků vodního sloupce mimo deflektor a v kanálu mezi deflektorem a TNR. Toho je dosaženo volbou vhodného průtoku hrdlem deflektoru. Ten byl dopočítán zvolením určitého počátečního průtoku, dopočítáním tlakových ztrát a hnací síly pro tento průtok a následnou metodou půlení intervalů byl dopočítán požadovaný vhodný průtok hrdlem deflektoru, ze kterého už bylo snadné dopočítat rychlosti proudění v deflektoru. Tento výpočet byl uskutečněn pro všech pět zadaných tlaků a všech 350 různých nastavení šířek kanálu deflektoru a základě výsledků je vybrána jedna optimální varianta deflektoru pro JE s reaktorem VVER 1000.

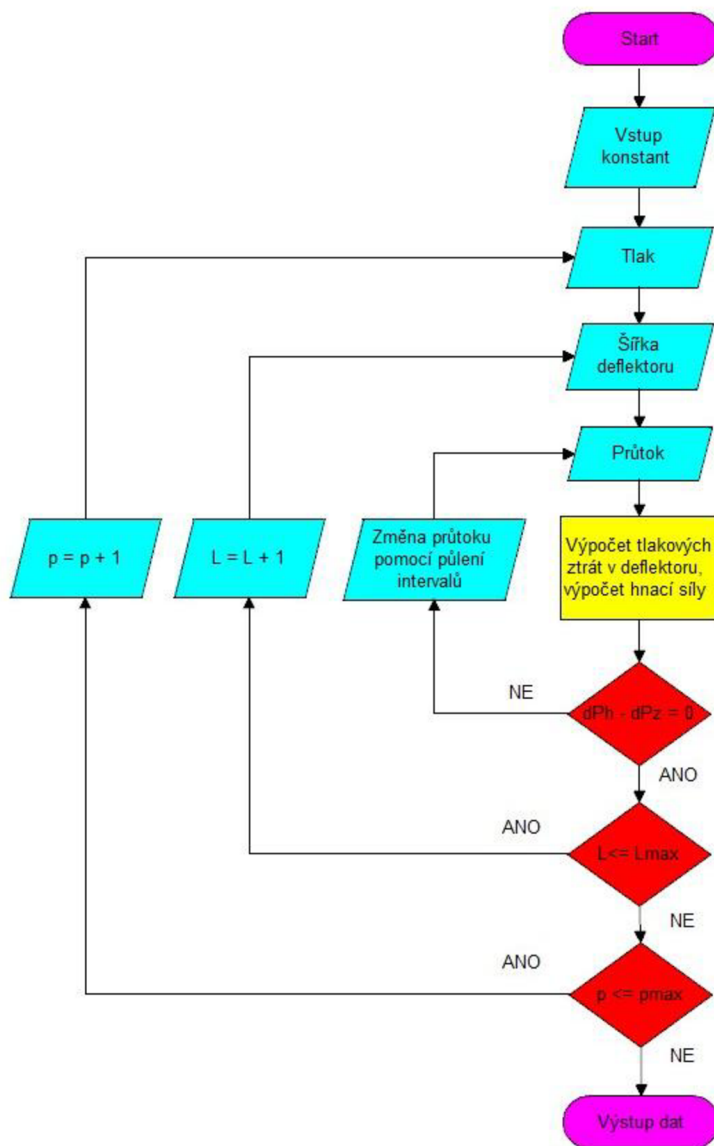
Zde jsou uvedeny vybrané počáteční parametry výpočtu:

Hloubka eliptického dna:	1180 mm
Poloměr hlavní poloosy elipsy:	2267,5 mm
Poloměr hrdla deflektoru:	681 mm
Počáteční výška deflektoru ve válcové části:	2000 mm

Proudění chladiva v kanálu je v reálných podmínkách dvoufázové (směs páry a vody). Pro náš výpočet byl zaveden zjednodušující předpoklad, že se jedná o jednofázové proudění. Kanál deflektoru byl rozdělen po perimetru na úseky 50 mm dlouhé, kde pro každý úsek došlo k přepočítání všech parametrů, a byla upravena hustota chladicího média, aby výpočet byl co nejpřesnější. Jednalo se tedy o jednofázové proudění směsi, kdy každých 50 mm byla upravena hustota chladiva, jako by se jednalo o parovodní směs.

4.2. Výpočtový model

Jelikož vypočet, tři sta padesáti různých šířek deflektoru pro pět různých tlaků, kde se bude měnit množství průtoku hrdlem deflektoru tak, aby se hnací síla rovnala tlakovým ztrátám v systému, je velmi náročný pro řešení v aplikacích typu Excel atd., bylo zapotřebí navrhnout vlastní výpočtový model, který by nám tuto práci usnadnil, a který by výsledky výpočtu přenesl do námi požadované formy. Výpočtový model byl navržen v programovacím jazyku C++. Blokové schéma tohoto programu je znázorněno na obrázku č. 16.



Obrázek 16: Blokové schéma výpočtu

V první části jsou do programu nahrány parametry veličin, které jsou pro celý výpočet konstantní. Jednalo se především o rozměry TNR :

- | | |
|-----------|---|
| $Z_0=0$ | - počáteční souřadnice výšky dna TNR |
| $R_0=0$ | - počáteční souřadnice poloměru dna TNR |
| $C=1,180$ | - délka vedlejší poloosy elipsy [m] |

B=2,2675 - délka hlavní poloosy elipsy [m]
V=2,0 - výška válcové části deflektoru

V další části programu bylo zapotřebí nadefinovat tlak, šířku chladicího kanálu a objemový průtok hrdlem deflektoru. Pro první výpočet byl použitý tlak 1 bar, šířka chladicího kanálu 50 mm a objemový průtok byl zvolen 1 m³/s. Tyto počáteční údaje vstupovaly do samotného výpočtu tlakových ztrát a hnací síly. Výstupem bylo porovnání tlakových ztrát a hnací síly.

V případě nesplnění první podmínky byl program vrácen na začátek a byl upravován průtok kanálem, dokud tato podmínka nebyla splněna. Po splnění první podmínky program postupoval podle předepsaného algoritmu, kdy postupně měnil šířku kanálu do 400 mm a tlak v reaktorové šachtě až do 5 barů.

Na základě výpočtů programu jsme byli schopni zjistit jakýkoliv parametr chladicího media v kanálu a mohli jsme rozhodnout, jaké rozměry deflektoru budou neoptimálnější.

4.3. Zdrojový kód výpočtového programu

```
#include <iostream>
#include <math.h>
#include "stdio.h"

using namespace std;
#include <fstream>

const double Z0 = 0.0;
const double R0=0.0;
const double C=1.180;
const double B=2.2675;
const double A=0.05;
const double Rdef=0.681;
const double pi=3.14159265358979323846;
const double DRN=0.032;
const double DRD=0.004;
const double G=9.80665;
const double xi= 1.36;

double V= 2.0;
double zstr, rstr, m, hstr, q, x, roostr, dH, DRS, arglambda, lambda, wstr, vstr, e, xk,
dPtr, dPek, sumdPtr, sumdPdef,dPdef, dPh, dPin, dPout, Q, w2, x2, w3;
double w4, w5, q3, q4, q5;
int main(int argc, char** argv) {

    ofstream soubor1("rychlosti_proudeni.xls");

    DRS=(DRN+DRD)/2.0;

    //zadani tlaku

    double p;

    for (int i_p=1; i_p < 6; i_p++) {
        p = i_p * 100000.0;

        double HSK;
        //entalpie syte kapaliny za konst. tlaku
        if (p <= 100000.0) {
            HSK =417400.0;
        }
        else if (p <= 200000.0) {
            HSK =504700.0;
        }
    }
}
```

```
        else if (p <= 300000.0) {
            HSK =561500.0;
        }
        else if (p <= 400000.0) {
            HSK =604700.0;
        }
        else if (p <= 500000.0) {
            HSK =640200.0;
        }
    double HSP;
        //entalpie syte pary za konst. tlaku
        if (p <= 100000.0) {
            HSP =2674900.0;
        }
        else if (p <= 200000.0) {
            HSP =2706200.0;
        }
        else if (p <= 300000.0) {
            HSP =2724900.0;
        }
        else if (p <= 400000.0) {
            HSP =2738100.0;
        }
        else if (p <= 500000.0) {
            HSP =2748100.0;
        }
    double ROL;
        //hustota syte kapaliny za konst. tlaku//
        if (p <= 100000.0) {
            ROL =958.64;
        }
        else if (p <= 200000.0) {
            ROL =942.94;
        }
        else if (p <= 300000.0) {
            ROL =931.81;
        }
        else if (p <= 400000.0) {
            ROL =922.88;
        }
        else if (p <= 500000.0) {
            ROL =915.28;
        }
    double ROP;
        //hustota syte pary za konst. tlaku//
        if (p <= 100000.0) {
            ROP =0.59;
        }
        else if (p <= 200000.0) {
```



```

z[1]= 0.054;
r[1]= 0.681;

zstr= (z[0]+z[1])/2;
rstr= (r[0]+r[1])/2;

m=G0 * ROL;

double Win=m/(pi*Rdef*Rdef*ROL);
//vstupni rychlost do deflektoru//
double w[2]={ Win,0.0};

dPin=xi* (Win*Win/2.0)*ROL;
//ztrata mistnimi odpory na vstupu//

Q= 90000.0;

//vypocet tlakovych ztrat //

h[1]= HSK+(Q*pi*Rdef*Rdef)/m;
x=(h[1]-HSK)/(HSP-HSK);
    if (x > 1.0) {
        x = 1.0;
    }
    if (zstr <1180.0) {
        x2=x;
    }
roo[1]=1.0/(x*(1.0/ROP)+(1.0-x)*(1.0/ROL));
roostr=(roo[0]+roo[1])/2.0;
dH= (4.0*pi*Rdef*1)/(2.0*Rdef*pi+2.0*pi*(Rdef+1)+2.0*1);
arglambda=1.74+2.0*log(dH/(2.0*DRS));
lambda= pow (arglambda, -2.0);
wstr=m/(2.0*pi*rstr*1*roostr);
    if (zstr <1180.0) {
        w2=wstr;
    }
vstr=1.0/roostr;
xk=1.0-0.86*e;
dPtr= lambda* (Rdef/dH)*(wstr*wstr/2.0)*roostr;
w[1]=m/(2.0*pi*Rdef*1*roo[1]);
dPek=0.5*(roo[1]*w[1]*w[1]-roo[0]*w[0]*w[0]);
dPdef=(z[1]-z[0])*roostr*G;
sumdPdef=sumdPdef+dPdef;

//cout <<i<<"\t" <<sumdPtr<<"\t" <<dPtr<<"\t" <<dPek<< endl;

sumdPtr=sumdPtr+dPtr+dPek;

```

```
z[0]=z[1];
r[0]=r[1];
h[0]=h[1];
w[0]=w[1];
roo[0]=roo[1];

//geometrie elipticka cast //

    while (z[0]<=C) {
        i++;

        double sqrtZArgument = (2.0*z[0]*C*C-
2.0*B*B*C)*(2.0*z[0]*C*C-2.0*B*B*C)-4.0*(B*B-C*C)*C*C*(r[0]*r[0]+A*A-
z[0]*z[0]);

        if (sqrtZArgument < 0.0) {
            sqrtZArgument = 0;
        }

        z[1] =(-(2.0*z[0]*C*C-2.0*B*B*C)- sqrt(sqrtZArgument)
)/(2.0*(B*B-C*C));
        if (z[1] >=1.1360) {

            z[1] = 1.18000001;
        }

        double sqrtRArgument = 8.0*z[0]*z[1]-4.0*z[1]*z[1]-
4.0*z[0]*z[0]+4.0*A*A;

        if (sqrtRArgument < 0.0) {
            sqrtRArgument = 0;
        }

        double temporaryR =(2.0*r[0]+ sqrt(sqrtRArgument) )/2.0;
        r[1] = (temporaryR > B)      ? B : temporaryR;

        if (temporaryR > B) {
            r[1] = B;
        }
        else {
            r[1] = temporaryR;
        }
        zstr= (z[0]+z[1])/2;
        rstr= (r[0]+r[1])/2;

        q;

            if (zstr >= 0.0 && zstr < 0.390) {
```

```

q = ((zstr -(0.0-(86600.0*0.39)/73400.0) ) /
(0.39/73400.0));
}
else if (zstr >= 0.3900 && zstr < 0.7140) {
q = ((zstr -(0.39-(160000.0*0.324)/440000.0) )
/ (0.324/440000.0));
}
else if (zstr >= 0.7140 && zstr < 1.0000) {
q = ((zstr -(0.714-(600000.0*0.286)/80000.0) )
/ (0.286/80000.0));
}
else if (zstr >= 1.0000 && zstr < 1.3230) {
q = ((zstr -(1.0+(680000.0*0.323)/80000.0) ) /
(-0.323/80000.0));
}
else if (zstr >= 1.3230 && zstr < 1.4110) {
q = ((zstr -(1.323-(600000.0*0.088)/730000.0)
) / (0.088/730000.0));
}
else if (zstr >= 1.4110 && zstr < 1.7500) {
q = 1.33*1000000.0;
}
else if (zstr >= 1.7500 && zstr < 1.8500) {
q = (zstr -(1.75-(1330000.0*(-0.1)/330000.0)
)) / (-0.1/330000.0);
}
else if (zstr >= 1.8500 && zstr < 2.0000) {
q = 1.0*1000000.0;
}
else if (zstr >= 2.0000 && zstr < 2.2500) {
q = (zstr- (2.0-1000000.0*(-
0.25/880000.0)))/(-0.25/880000.0);
}
else if (zstr >= 2.2500 && zstr < 2.3900) {
q = ((zstr -(2.25+(120000.0*0.14)/94000.0) ) /
(-0.14/94000.0));
}
else if (zstr >= 2.3900 && zstr < 6.0) {
q = 0.026*1000000.0;
}
}

```

h[1]= h[0]+(q*2.0*pi*rstr*A)/m;

// vypocet tlakovych ztrat elipticka cast //

x=(h[1]-HSK)/(HSP-HSK);

if (x > 1.0) {

x = 1.0;

}

roo[1]=1.0/(x*(1.0/ROP)+(1.0-x)*(1.0/ROL));

MOŽNOSTI VNĚJŠÍHO CHLAZENÍ TNR PŘI HAVÁRII S TAVENÍM AKTIVNÍ ZÓNY

```

roostr=(roo[0]+roo[1])/2.0;
    dH= (8.0*pi*rstr*1)/(2.0*rstr*pi+2.0*pi*(rstr+1)+2.0*1);
    arglambda=1.74+2.0*log(dH/(2.0*DRS));
lambda= pow (arglambda, -2.0);
    wstr=m/(2.0*pi*rstr*1*roostr);
    if (zstr <1180.0) {
        w2=wstr;
    }

vstr=1.0/roostr;

    dPtr= lambda* (A/dH)*(wstr*wstr/2.0)*roostr;
w[1]=m/(2.0*pi*rstr*1*roo[1]);
dPek=0.5*(roo[1]*w[1]*w[1]-roo[0]*w[0]*w[0]);
sumdPtr=sumdPtr+dPtr+dPek;
dPdef=(z[1]-z[0])*roostr*G;
sumdPdef=sumdPdef+dPdef;
    //cout <<i<<"\t" <<sumdPtr<<"\t" <<dPtr<<"\t" <<dPek<< endl;

    z[0] = z[1];
    r[0] = r[1];
    h[0] = h[1];
    roo[0]=roo[1];
    w[0]=w[1];
}

    while (z[0]<(C+V)) {
//geometrie valcova cast //

    i++;
    r[1]=2.2675;
    z[1]=z[0]+0.05;
    zstr= (z[0]+z[1])/2;
    rstr= (r[0]+r[1])/2;

q;
        if (zstr >= 0.0 && zstr < 0.390) {
            q = ((zstr -(0.0-(86600.0*0.39)/73400.0) ) /
(0.39/73400.0));
        }
        else if (zstr >= 0.3900 && zstr < 0.7140) {
            q = ((zstr -(0.39-(160000.0*0.324)/440000.0) )
/ (0.324/440000.0));
        }
        else if (zstr >= 0.7140 && zstr < 1.0000) {

```

```

q = ((zstr -(0.714-(600000.0*0.286)/80000.0) )
/ (0.286/80000.0));
}
else if (zstr >= 1.0000 && zstr < 1.3230) {
q = ((zstr -(1.0+(680000.0*0.323)/80000.0) ) /
(-0.323/80000.0));
}
else if (zstr >= 1.3230 && zstr < 1.4110) {
q = ((zstr -(1.323-(600000.0*0.088)/730000.0)
) / (0.088/730000.0));
}
else if (zstr >= 1.4110 && zstr < 1.7500) {
q = 1.33*1000000.0;
}
else if (zstr >= 1.7500 && zstr < 1.8500) {
q = (zstr -(1.75-(1330000.0*(-0.1)/330000.0)
)) / (-0.1/330000.0);
}
else if (zstr >= 1.8500 && zstr < 2.0000) {
q = 1.0*1000000.0;
}
else if (zstr >= 2.0000 && zstr < 2.2500) {
q = (zstr- (2.0-1000000.0*(-
0.25/880000.0)))/(-0.25/880000.0);
}
else if (zstr >= 2.2500 && zstr < 2.3900) {
q = ((zstr -(2.25+(120000.0*0.14)/94000.0) ) /
(-0.14/94000.0));
}
else if (zstr >= 2.3900 && zstr < 6.0) {
q = 0.026*1000000.0;
}
}

h[1]= h[0]+(q*2.0*3.14*rstr*A)/m;
//vypocet tlakovych ztrat valcova cast //
x=(h[1]-HSK)/(HSP-HSK);
if (x > 1.0) {
x = 1.0;
}
roo[1]=1.0/(x*(1.0/ROP)+(1.0-x)*(1.0/ROL));
roostr=(roo[0]+roo[1])/2.0;
dH= (8.0*pi*rstr*1)/(2.0*rstr*pi+2.0*pi*(rstr+1)+2.0*1);
arglambda=1.74+2.0*log(dH/(2.0*DRS));
lambda= pow (arglambda, -2.0);
wstr=m/(2.0*pi*rstr*1*roostr);
if (zstr <1.6000) {
w3=wstr;
}
if (zstr <1.6000) {

```

```

        q3=q;
    }
        if (zstr <2.1800) {
            w4=wstr;
        }
        if (zstr <2.1800) {
            q4=q;
        }
        if (zstr <3.1800) {
            w5=wstr;
        }
        if (zstr <3.1800) {
            q5=q;
        }
    }
    vstr=1.0/roostr;
    dPtr= lambda* (A/dH)*(wstr*wstr/2.0)*roostr;

    w[1]=m/(2.0*pi*rstr*1*roo[1]);

    dPek=0.5*(roo[1]*w[1]*w[1]-roo[0]*w[0]*w[0]);
    sumdPtr=sumdPtr+dPtr+dPek;
    dPdef=(z[1]-z[0])*roostr*G;
    sumdPdef=sumdPdef+dPdef;
        //cout <<i<<"\t" <<sumdPtr<<"\t" <<dPtr<<"\t" <<dPek<< endl;

        z[0] = z[1];
        r[0] = r[1];
        h[0] = h[1];
        roo[0]=roo[1];
        w[0]=w[1];
    }

    dPout= xi*(w[0]*w[0]/2.0)*roo[0];
    sumdPtr=sumdPtr+dPin+dPout;
    dPh=dPhydro-sumdPdef;

    //pulení intervalu//
    if (sumdPtr > dPh) {
        Gp=G0;
    }
    else {
        Gl=G0;
    }
    paramG=0;
    if (Gp<0.0) {
        G0=2.0*G0;
    }
    else {
        G0=(Gp+Gl)/2.0;
    }

```

```

        if ((Gp-Gl)/Gp<=0.00001) {
            paramG=1;}}

        //cout << "\t [ G0 , dP ] = [" << G0 <<";" << dPtr << "]"<<x<<"]\t
p ["<<i_p<< "]" << endl;
        }while (paramG<1);
        //soubor1 << G0 <<"\t" << dPh << "\t"<<dPtr<<"\t"<<dPek<<
"\t"<<sumdPtr<< "\t"<<l<< "\t"<<p<< endl;
        //soubor1 << "\t [ G0 , dPh ] = [" << G0 <<";" << dPh << "]"<<Treni
["<<dPtr<<"]<<Kin.en. ["<<dPek<< "]"<<celkem ["<<sumdPtr<< "]"<<l<< "]"<<p
["<<p<< "]" << endl;

//puleni intervalu//

double mfinal=G0 * ROL;
double Qv;
        if (p <= 100000.0) {
            Qv =2257500.0;
        }
        else if (p <= 200000.0) {
            Qv =2201600.0;
        }
        else if (p <= 300000.0) {
            Qv =2163400.0;
        }
        else if (p <= 400000.0) {
            Qv =2133300.0;
        }
        else if (p <= 500000.0) {
            Qv =2107900.0;
        }
        double sumE= x*mfinal*Qv;
double Wfinal=mfinal/(pi*Rdef*Rdef*ROL);
double sumE1180= x2*mfinal*Qv;

double hf= HSK+(Q*pi*Rdef*Rdef)/mfinal;

double xf=(hf-HSK)/(HSP-HSK);
if (x > 1.0) {
    x = 1.0;
}
double roof=1.0/(xf*(1.0/ROP)+(1.0-xf)*(1.0/ROL));
double wf=m/(2.0*pi*Rdef*1*roof);

```



```
    //      soubor2 << "\t " <<i_p<<"\t" <<l<<
"\t"<<G0<<"\t"<<dPin<<"\t"<<dPout<<"\t"<<dPh<<"\t"<<sumdPtr<< endl;
        soubor1 << "\t " <<i_p<<"\t"
<<l<<"\t"<<w2<<"\t"<<w3<<"\t"<<w4<<"\t"<<w5<< endl;
    }
    }
    soubor1.close();

}
```

4.4. Výpočet

4.4.1. Geometrie

Prvním krokem výpočtu bylo rozdělení deflektoru na úseky o délce 5 cm. Souřadnice jednotlivých úseků byly vypočteny z rovnice pro elipsu a z rovnice pro vzdálenost dvou bodů v rovině. Po dosažení souřadnice poloměru 2,2675 m bylo pokračováno v dopočítávání dalších souřadnic pouze změnou souřadnice výšky, přičemž poloměr zůstal konstantní. To je způsobeno přechodem eliptické části ve válcovou.

$$\frac{r_i^2}{2267,5^2} + \frac{(z_i - 1180)^2}{1180^2} = 1 \quad (4.1)$$

$$a = \sqrt{(r_i - r_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad (4.2)$$

- a - délka jednoho úseku
- r - souřadnice poloměru
- z - souřadnice výšky

Výpočet souřadnic jednotlivých úseků byl brán až od vzdálenosti 681 mm. Tato vzdálenost je velikost poloměru vstupního hrdla do deflektoru. Další souřadnice byly už dopočítávány po zmiňovaných 50 mm.

Po získání souřadnic byly dopočítány střední poloměry a střední výšky pro další výpočty. Střední poloměr a střední výška pro první úsek byly dopočítány takto:

Výpočet středního poloměru:

$$r_{stř} = \frac{r_i + r_{i-1}}{2} [m] \quad (4.3)$$

Výpočet střední výšky:

$$z_{stř} = \frac{z_i + z_{i-1}}{2} [m] \quad (4.4)$$

- r_i, r_{i-1} -souřadnice poloměru
- z_i, z_{i-1} -souřadnice výšky
- $r_{stř}, z_{stř}$ -střední poloměr a střední výška

Následně byly dopočteny výhřevné a průtočné plochy jednotlivými úseky.

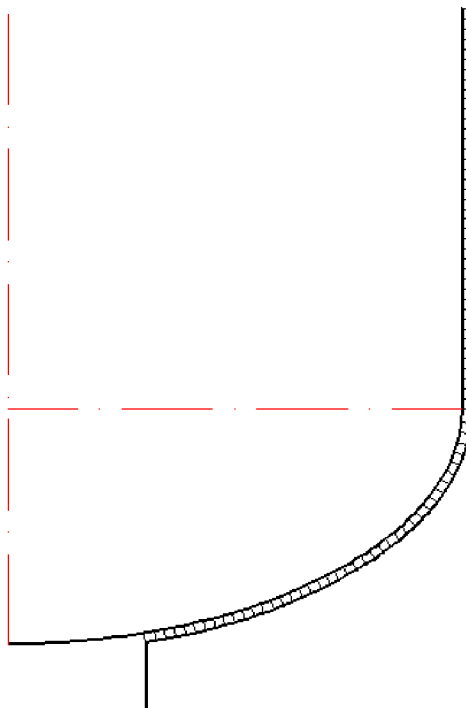
$$S = 2\pi \cdot r_{stř} \cdot a [m^2] \quad (4.5)$$

$$A = 2\pi \cdot r_{stř} \cdot l [m^2] \quad (4.6)$$

- S -výhřevná plocha úseku

- A - průtočná plocha úseku
 a - délka jednoho úseku
 l - šířka kanálu mezi deflektorem a TNR

Na následujícím obrázku je zobrazeno rozdělení jednotlivých úseků v deflektoru.



Obrázek 17: Rozdělení úseků pro výpočet

4.4.2. Výpočet tlakových ztrát v deflektoru

Důležitou veličinou pro dopočítání vhodného průtoku byl výpočet tlakových ztrát v deflektoru, který byl dopočítán z níže uvedených vzorců.

Důležitou hodnotou v jednotlivých úsecích byl výpočet entalpie chladicího média. K tomu bylo nejprve třeba dopočítat hmotnostní průtok deflektorem z objemového průtoku voleného na začátku výpočtu.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho' \text{ [kg/s]} \quad (4.7)$$

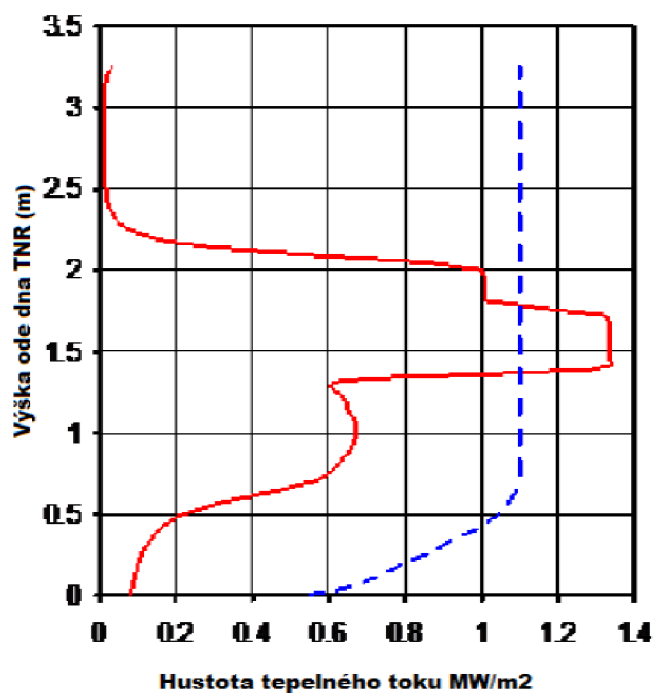
- \dot{m} - hmotnostní průtok hrdlem deflektoru
 \dot{V} - objemový průtok hrdlem deflektoru
 ρ' - hustota syté kapaliny

Výpočet entalpie:

$$i_i = i_{i-1} + \frac{q(z_{stř}) \cdot S}{\dot{m}} \text{ [kJ/kg]} \quad (4.8)$$

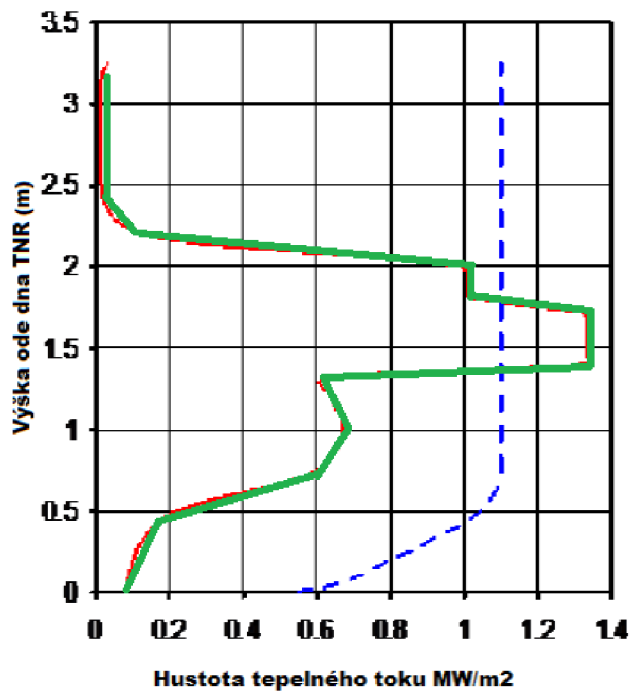
- i_i - entalpie úseku
 i_{i-1} - entalpie předchozího úseku
 $q(z_{stř})$ - tepelný tok ze stěny TNR v závislosti na výšce

Tepelný tok potřebný pro výpočty jednotlivých entalpií je dle obrázku 18 funkcí výšky a není po výšce konstantní. Pomocí střední výšky úseku jsou při výpočtu přiřazovány tepelné toky jednotlivým bodům v kanálu.



Obrázek 18: Rozložení tepelného toku po výšce TNR^[8]

Dané křivky tepelného toku ze strany TNR byly lineárně aproximovány na následující charakter.



Obrázek 19: Rozložení tepelného toku po linearizaci křivek

MOŽNOSTI VNĚJŠÍHO CHLAZENÍ TNR PŘI HAVÁRII S TAVENÍM AKTIVNÍ ZÓNY

Díky lineární aproximaci křivek bylo přiřazování tepelných toků výrazně zjednodušeno. Spočítaná hodnota i_i je střední entalpie v úseku.

Suchost v jednotlivých úsecích:

$$x_i = \frac{i_i - i'}{i'' - i'} \quad [-] \quad (4.9)$$

- x_i - suchost media na výstupu z úseku
- i' - entalpie syté kapaliny
- i'' - entalpie syté páry

Hodnoty entalpií syté kapaliny a syté páry pro tlaky 1-5 barů byly převzaty z programu XSteam v2.6.

Tabulka 1: Entalpie syté páry a syté kapaliny za konstantního tlaku

Tlak [bar]	Entalpie syté kapaliny i' [kJ/kg]	Entalpie syté páry i'' [kJ/kg]
1	417,4	2674,9
2	504,7	2706,2
3	561,5	2724,9
4	604,7	2738,1
5	640,2	2748,1

Po výpočtu x_i jsme byli dále schopni dopočítat hustotu parovodní směsi chladiwa proudícího kanálem.

Hustota parovodní směsi v úseku:

$$\rho_i = \frac{1}{x_i \cdot \frac{1}{\rho''} + (1 - x_i) \cdot \frac{1}{\rho'}} \quad [kg/m^3] \quad (4.10)$$

- ρ_i - hustota parovodní směsi
- ρ'' - hustota syté páry
- ρ' - hustota syté kapaliny

Hodnoty hustot syté kapaliny a syté páry pro tlaky 1-5 barů byly převzaty z programu XSteam v2.6.

Tabulka 2: Hustota syté kapaliny a syté páry za konstantního tlaku

Tlak [bar]	Hustota syté kapaliny ρ' [kg/m ³]	Hustota syté páry ρ'' [kg/m ³]
1	958,64	0,59
2	942,94	1,13
3	931,81	1,65
4	922,88	2,16
5	915,28	2,67

Pro konečný výpočet tlakových ztrát v kanálu bylo ještě zapotřebí dopočítat následující veličiny.

Hydraulický průměr:

$$d_H = \frac{4 \cdot S_s}{O_s} [m] \quad (4.11)$$

S_s -smáčený obsah
 O_s -smáčený obvod

Drsnost nádoby:

$$\Delta_N = 0,032 [mm] \quad (4.12)$$

Drsnost deflektoru:

$$\Delta_D = 0,004 [mm] \quad (4.13)$$

Střední drsnost deflektoru:

$$\Delta = \frac{\Delta_N + \Delta_D}{2} [mm] \quad (4.14)$$

Součinitel tření:

$$\lambda = \left[1,74 + 2 \cdot \ln \left(\frac{d_H}{2 \cdot \Delta} \right) \right]^{-2} [-] \quad (4.15)$$

Rychlost proudění:

$$w = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_i} [m/s] \quad (4.16)$$

Tlaková ztráta třením:

$$\Delta p_{tř} = \lambda \cdot \frac{a}{d_H} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_i [Pa] \quad (4.17)$$

a -délka úseku
 ρ_i -hustota parovodní směsi v úseku

Celková tlaková ztráta třením je dána součtem všech třecích ztrát v jednotlivých úsecích.

Tlaková ztráta místními odpory:

$$\Delta p_m = \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_i \text{ [Pa]} \quad (4.18)$$

ξ -součinitel odporu - v našem případě 1,36

Tlaková ztráta místními odpory byla ve výpočtu počítána na vstupu do deflektoru a ne výstupu z něj.

Tlaková ztráta změnou kinetické energie:

$$\Delta p_{ek} = \frac{1}{2} \cdot (\rho_{out} w_{out}^2 - \rho_{in} w_{in}^2) \text{ [Pa]} \quad (4.19)$$

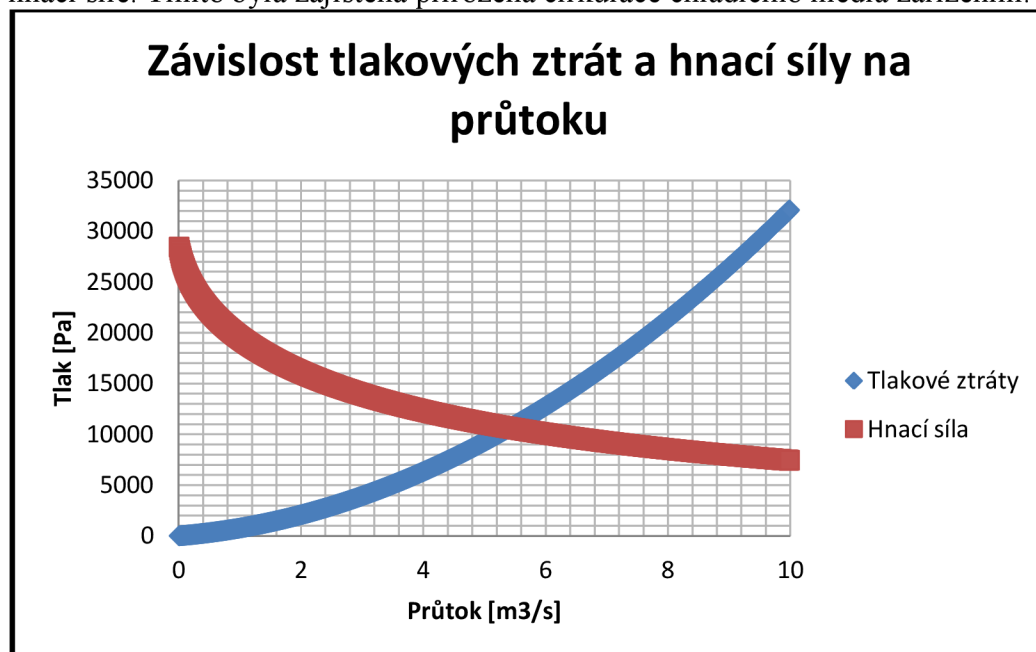
Součet všech těchto ztrát nám udal celkové tlakové ztráty v úseku. Následný součet ztrát v jednotlivých úsecích pak ztráty v celém deflektoru.

$$\Delta p_{celk.} = \sum \Delta p_{ek} + \sum \Delta p_m + \sum \Delta p_{tř} \text{ [Pa]} \quad (4.20)$$

Všechny vzorce použité pro výpočet tlakových ztrát byly konzultovány s pracovníky ÚJV Řež a. s. a jsou odvozeny z hodnověrných zdrojů. ^{[14][15][16]}

4.4.3. Výpočet hnací síly

Aby systém IVR byl pasivní, tedy s přirozenou cirkulací chladicího media, je zapotřebí rozdílných hydrostatických tlaků vodního sloupce mimo deflektor a parovodní směsi mezi deflektorem a TNR. Rozdíl mezi těmito tlaky je tzv. hnací síla. Další podmínkou bylo, aby tlakové ztráty v deflektoru se rovnaly právě této hnací síle. Tímto byla zajištěna přirozená cirkulace chladicího media zařízením.



Graf 3: Závislost tlakových ztrát a hnací síly na průtoku

Hydrostatický tlak vodního sloupce byl vypočítán ze známého vztahu:

$$p_{vs} = h \cdot \rho' \cdot g \text{ [Pa]} \quad (4.21)$$

p_{vs}	-hydrostatický tlak vodního sloupce
h	-výška vodního sloupce
ρ'	-hustota syté kapaliny
g	-gravitační zrychlení

Hydrostatický tlak směsi mezi deflektorem a TNR byl roven součtu hydrostatických tlaků v jednotlivých úsecích deflektoru.

$$p_{ps} = \sum_{i=0}^n (z_i - z_{i-1}) \cdot \rho_i \cdot g \text{ [Pa]} \quad (4.22)$$

p_{ps}	-hydrostatický tlak parovodní směsi
z	-výšková souřadnice úseku deflektoru
ρ_i	-střední hustota parovodní směsi v úseku
g	-gravitační zrychlení

Výpočet hnací síly:

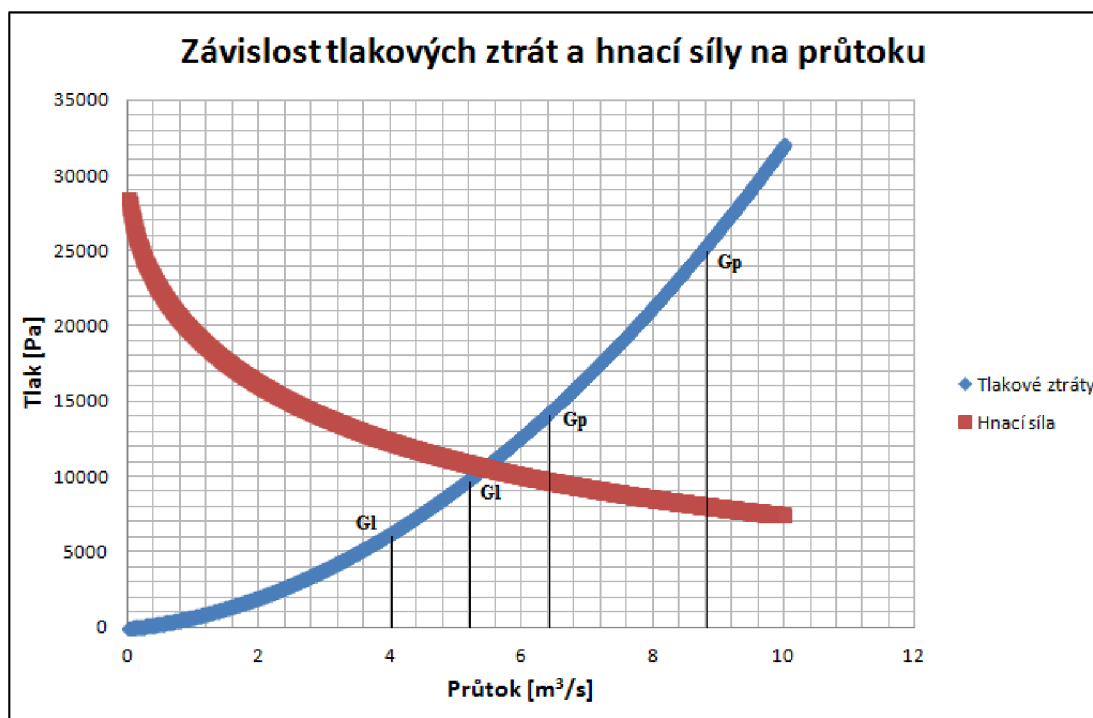
$$p_{HS} = p_{vs} - p_{ps} \text{ [Pa]} \quad (4.23)$$

Jak již bylo zmíněno, aby byla zajištěna přirozená cirkulace mezi deflektorem a TNR bylo potřeba, aby hnací síla byla rovna tlakovým ztrátám v kanále. Velikost hnací síly a tlakových ztrát je úměrná průtoku chladiva v deflektoru. Při vyšším průtoku je podíl páry v kanále nižší a rozdíl hydrostatických tlaků nám nedává dostatečnou hnací sílu. Při vysoké rychlosti proudění zase rostou tlakové ztráty. Bylo tedy potřeba najít optimální průtok, který nám dává stejnou hnací sílu a tlakovou ztrátu. Tohoto průtoku bylo pro každou tloušťkou deflektoru dopočítáno pomocí metody půlení intervalů.

Na začátku výpočtu byl zadán jeden průtok, v našem případě $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Pro tento průtok byla dopočtena tlaková ztráta v kanále a hnací síla. Pokud po odečtení tlakových ztrát od hnací síly jsme dostali kladné hodnoty, získali jsme levou stranu intervalu a bylo potřeba zvýšit průtok. Pokud ale tyto hodnoty byly záporné, získali jsme pravou stranu intervalu a bylo potřeba snížit průtok. Metodou půlení intervalů jsme měnili průtok a dostávali jsme vždy novou levou nebo pravou stranu intervalu, který jsme vždy o polovinu zmenšili, dokud jsme nedostali hodnoty rozdílu hnací síly a tlakových ztrát s určitou přesností nulové. Grafická podoba této metody je vidět na grafu 2 na následující straně.

Přesnost rozdílu hnací síly a tlakových ztrát:

$$p_{HS} - \Delta p_{celk.} \leq 10^{-3} \quad (4.24)$$



Graf 4: Metoda půlení intervalů

Touto metodou byl dopočítán charakter proudění pro všechny předpokládané šířky a tlaky. Všechny vzorce použité pro výpočet hnací síly byly konzultovány s pracovníky ÚJV Řež a. s. a jsou odvozeny z hodnověrných zdrojů. ^{[14][15]}

4.5. Vzorový výpočet jednoho úseku

Vzorový výpočet je pro šířku kanálu mezi deflektorem a TNR 250 mm. Tlak v reaktorové šachtě 3 bary. A objemový průtok hrdlem deflektoru je v počátku výpočtu 1 m³/s. Výpočet je uskutečněn pro 33. úsek deflektoru. Souřadnice úseku jsou:

$$\begin{aligned} [r_{i-1}; z_{i-1}] &= [2,10546; 0,702369] \\ [r_i; z_i] &= [2,13565; 0,742224] \end{aligned}$$

4.5.1. Geometrie

Výpočet středního poloměru:

$$r_{stř} = \frac{r_i + r_{i-1}}{2} = \frac{2,10546 + 2,13565}{2} = 2,12056 \text{ m}$$

Výpočet střední výšky:

$$z_{stř} = \frac{z_i + z_{i-1}}{2} = \frac{0,702369 + 0,742224}{2} = 0,722296 \text{ m}$$

Následně byly dopočteny výhřevné a průtočné plochy jednotlivými úseky:

$$S = 2\pi \cdot r_{stř} \cdot a = 2\pi \cdot 2,12056 \cdot 0,05 = 0,666194 \text{ m}^2$$

$$A = 2\pi \cdot r_{stř} \cdot l = 2\pi \cdot 2,12056 \cdot 0,25 = 3,330968 \text{ m}^2$$

- S - výhřevná plocha úseku
A - průtočná plocha úseku

4.5.2. Výpočet tlakových ztrát a hnací síly

Hmotnostní průtok deflektorem je vypočítán z hustoty na vstupu do deflektoru a objemového průtoku hrdlem.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho' = 1 \cdot 931,81 = 931,81 \text{ kg/s}$$

Tepelný tok ze strany TNR, který je funkcí střední výšky úseku, je 602321 W/m².

$$i_i = i_{i-1} + \frac{q(z_{stř}) \cdot S}{\dot{m}} = 564722 + \frac{602321 \cdot 0,666194}{931,81} = 565116 \text{ kJ/kg}$$

MOŽNOSTI VNĚJŠÍHO CHLAZENÍ TNR PŘI HAVÁRII S TAVENÍM AKTIVNÍ ZÓNY

Když známe hodnotu entalpie v úseku, jsme schopni dopočítat suchost parovodní směsi proudící tímto úsekem.

$$x_i = \frac{i_i - i'}{i'' - i'} = \frac{565116 - 561500}{2724900 - 561500} = 0,00167122 \text{ [-]}$$

Ze známé suchosti parovodní směsi můžeme dopočítat její hustotu ze vztahu:

$$\begin{aligned} \rho_i &= \frac{1}{x_i \cdot \frac{1}{\rho''} + (1 - x_i) \cdot \frac{1}{\rho'}} = \frac{1}{0,00167122 \cdot \frac{1}{1,65} + (1 - 0,00167122) \cdot \frac{1}{931,81}} \\ &= 479,79 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Dalšími veličinami pro výpočet tlakových ztrát třecích jsou:

Hydraulický průměr:

$$d_H = \frac{4 \cdot S_s}{O_s} = \frac{4\pi \cdot r_{str} \cdot l}{2\pi \cdot r_{str} + 2\pi \cdot (r_{str} + l) + 2 \cdot l} = 0,463447 \text{ m}$$

S_s -smáčený obsah
 O_s -smáčený obvod

Drsnost nádoby:

$$\Delta_N = 0,032 \text{ [mm]}$$

Drsnost deflektoru:

$$\Delta_D = 0,004 \text{ [mm]}$$

Střední drsnost deflektoru:

$$\Delta = \frac{\Delta_N + \Delta_D}{2} = \frac{0,032 + 0,004}{2} = 0,018 \text{ [mm]}$$

Součinitel tření:

$$\lambda = \left[1,74 + 2 \cdot \ln \left(\frac{d_H}{2 \cdot \Delta} \right) \right]^{-2} = \left[1,74 + 2 \cdot \ln \left(\frac{0,463447}{2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} \right) \right]^{-2} = 0,021309 \text{ [-]}$$

Rychlost proudění:

$$w = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_i} = \frac{931,81}{3,330968 \cdot 479,79} = 0,575732 \text{ m/s}$$

Tlaková ztráta třením:

$$\Delta p_{tř} = \lambda \cdot \frac{a}{d_H} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_i = 0,0213096 \cdot \frac{0,05}{0,463447} \cdot \frac{0,575732^2}{2} \cdot 479,79 =$$

$$= 0,187904 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta změnou kinetické energie:

$$\Delta p_{ek} = \frac{1}{2} \cdot (\rho_{out} w_{out}^2 - \rho_{in} w_{in}^2) =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (479,79 \cdot 0,575732^2 - 506,515 \cdot 0,555035^2) =$$

$$= 1,37491 \text{ Pa}$$

Po dopočítání tlakových ztrát všech úseků a jejich následnému přičtení k tlakovým ztrátám místními odpory na vstupu a výstupu z deflektoru dostaneme celkové tlakové ztráty v kanálu mezi TNR a deflektorem.

Pro tento případ byly celkové tlakové ztráty v deflektoru:

$$\Delta p_{celk.} = \sum \Delta p_{ek} + \sum \Delta p_m + \sum \Delta p_{tř} = 966,978 \text{ Pa}$$

Hnací síla je dopočítána z rozdílu hydrostatických tlaků vodního sloupce a parovodní směsi v kanálu deflektoru.

$$p_{vs} = h \cdot \rho' \cdot g = 3,18 \cdot 931,81 \cdot 9,81 = 29058,6 \text{ Pa}$$

$$p_{ps} = \sum_{i=0}^n (z_i - z_{i-1}) \cdot \rho_i \cdot g = 9726,64 \text{ Pa}$$

$$p_{HS} = p_{vs} - p_{ps} = 19332 \text{ Pa}$$

Podmínkou přirozené cirkulace chladiva je, aby se celkové tlakové ztráty a hnací síla rovnala. Zadaná podmínka v našem případě je:

$$p_{HS} - \Delta p_{celk.} \leq 10^{-3}$$

Pro zadaný průtok 1 m³/s je rozdíl hnací síly a celkových tlakových ztrát roven:

$$p_{HS} - \Delta p_{celk.} = 18365,022 \text{ Pa}$$

Z výsledku je patrné, že zadaná podmínka není splněna. Je zapotřebí celý výpočet provést znovu s upraveným průtokem vstupujícím do deflektoru dokud

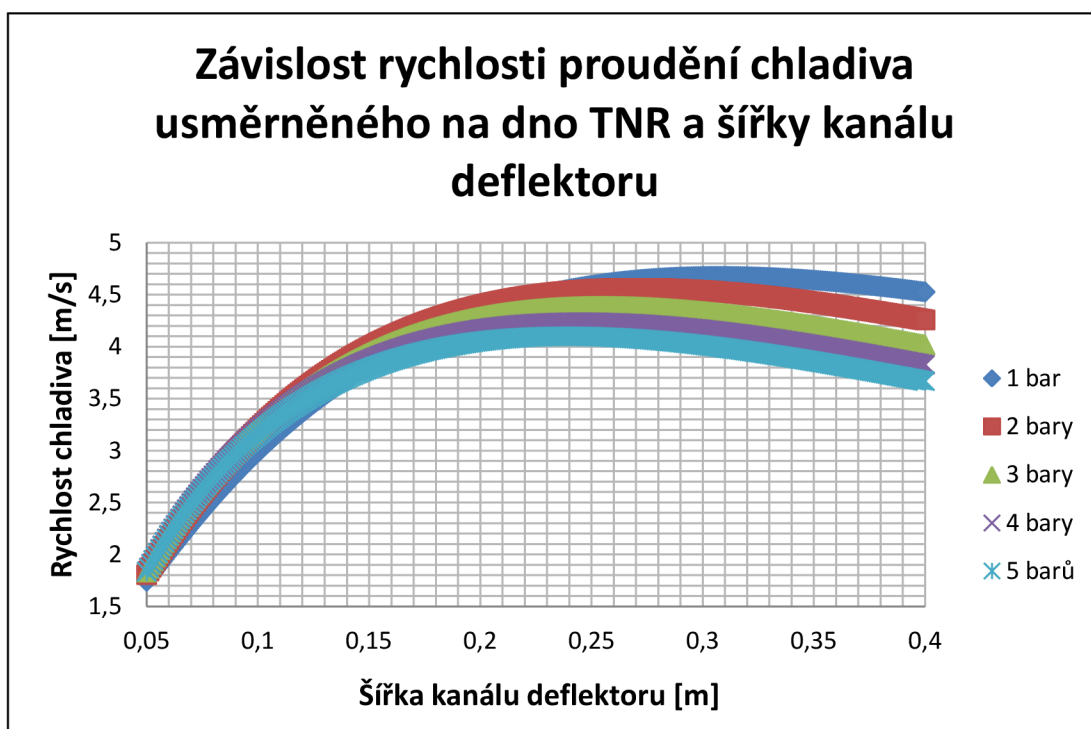
nebude podmínka splněna. Toho je dosaženo metodou půlení intervalů, kdy je průtok hrdlem deflektoru upravován následně.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= 2 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 8 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 6 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 5 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,5 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,75 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,625 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,6875 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,65625 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,67188 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,66406 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,66016 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,6582 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,65918 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,65869 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,65845 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,65857 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,65851 \text{ m}^3/\text{s} \\ \dot{V} &= 4,65854 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

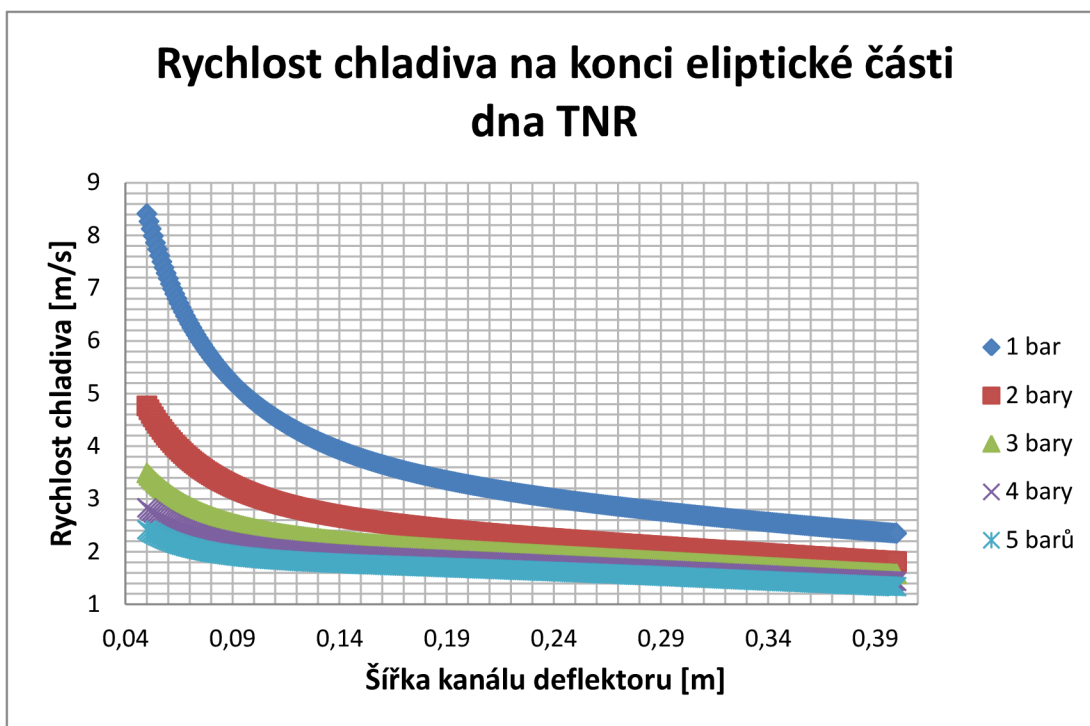
Jak je vidět, než je splněna podmínka a nalezen optimální průtok vstupním hrdlem deflektoru, je potřeba změnit průtok hned dvacetkrát. Díky výpočtovému programu v C++, jehož zdrojový kód je zobrazen v kapitole 4.3, je tento postup velmi zjednodušen.

5. Výsledky výpočtů

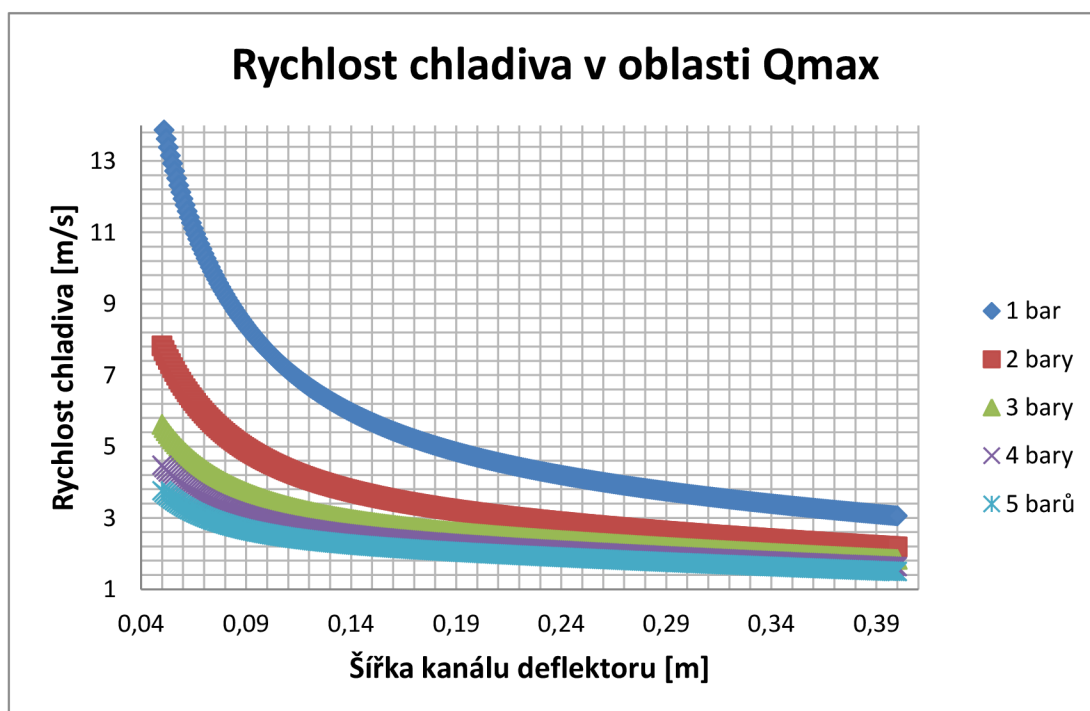
Podmínkou bylo získat co nejvyšší rychlost proudu chladiva na dno TNR. Na následujících grafech jsou znázorněny průběhy rychlostí chladiva v určitých místech deflektoru. Jedná se o dno TNR, začátek válcové části, oblast s maximálním tepelným tokem ze strany TNR, v polovině válcové části deflektoru a na konci deflektoru. Snažili jsme se hledat takový výsledek, kde by byla rychlost proudění na dno TNR pokud možno co nejrychlejší, ale aby zároveň nedocházelo k enormně vysokým rychlostem v námi vytipovaných místech, jako je např. oblast s maximální tepelným tokem ze strany TNR.



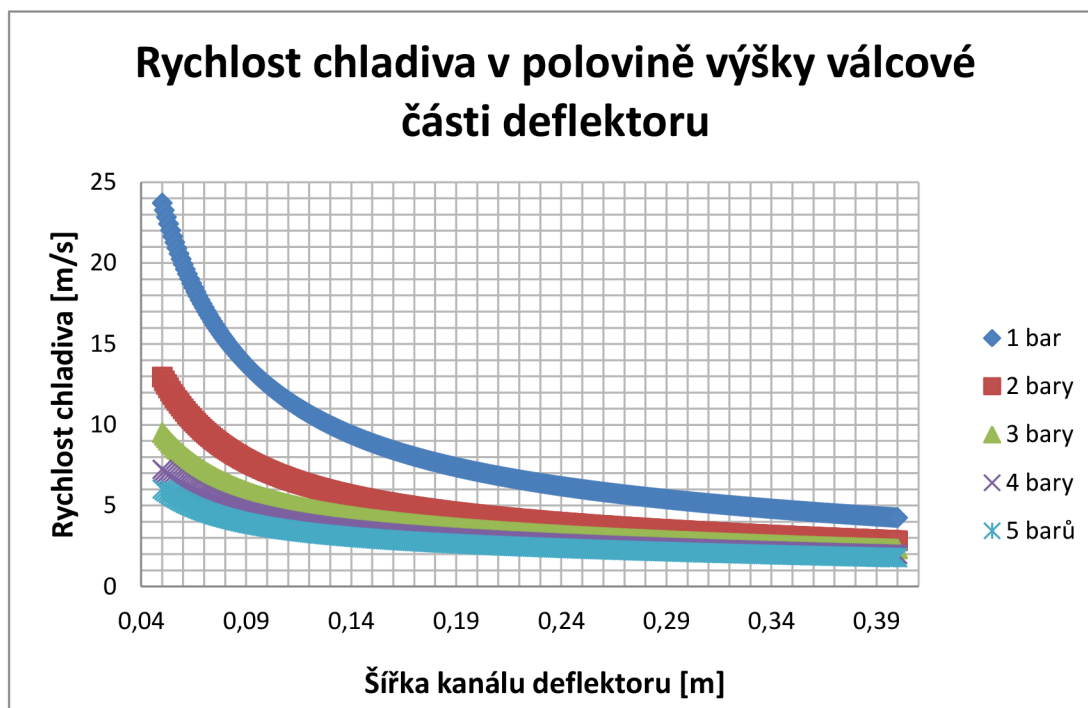
Graf 5: Závislost rychlosti chladiva na dno TNR a šířky kanálu deflektoru



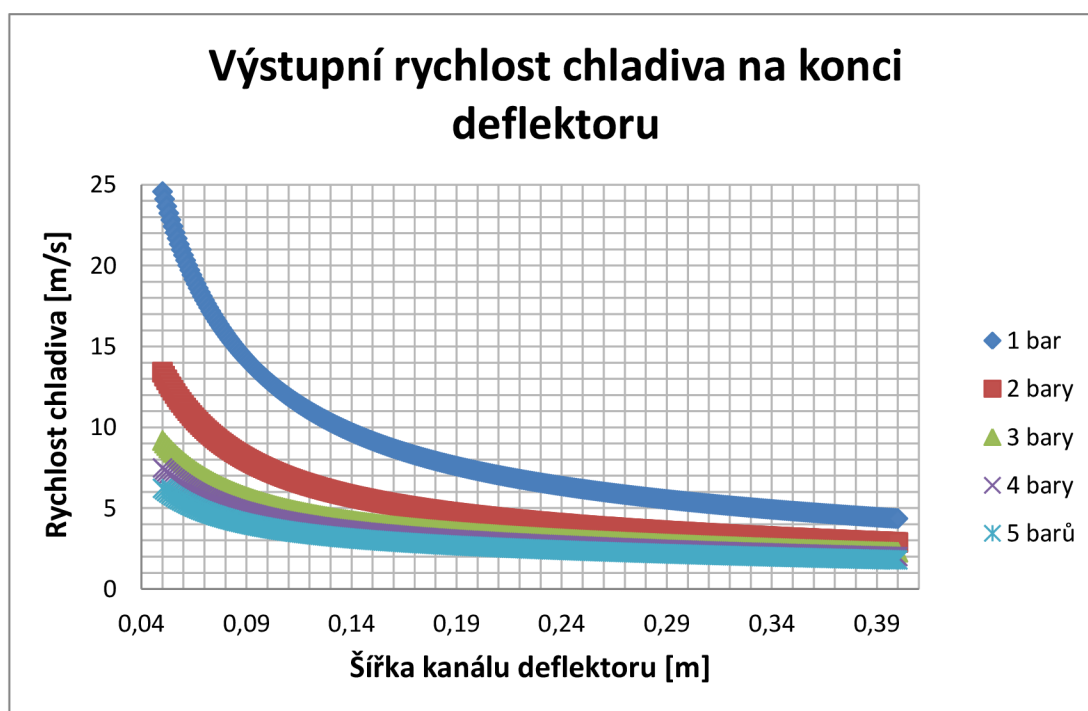
Graf 6: Rychlost chladiva na konci eliptické části v závislosti na šířce



Graf 7: Rychlost chladiva v oblasti Q_{max} v závislosti na šířce (oblast s Q_{max} je zobrazena na obr. 19)



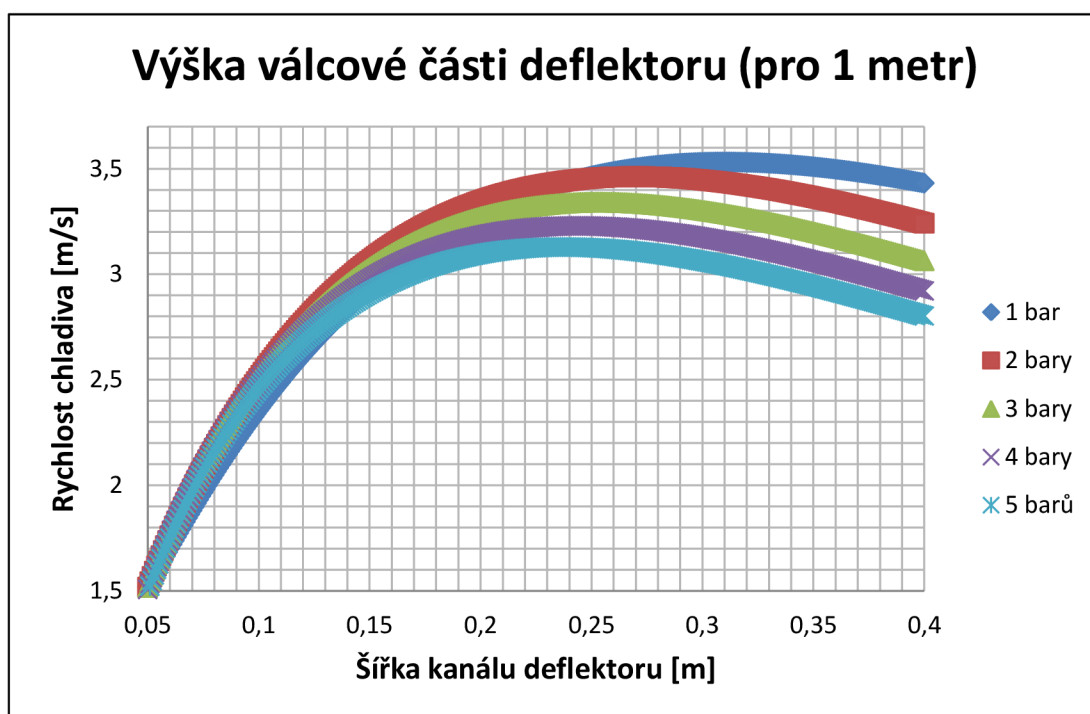
Graf 8: Rychlost chladiva v polovině výšky deflektoru v závislosti na šířce



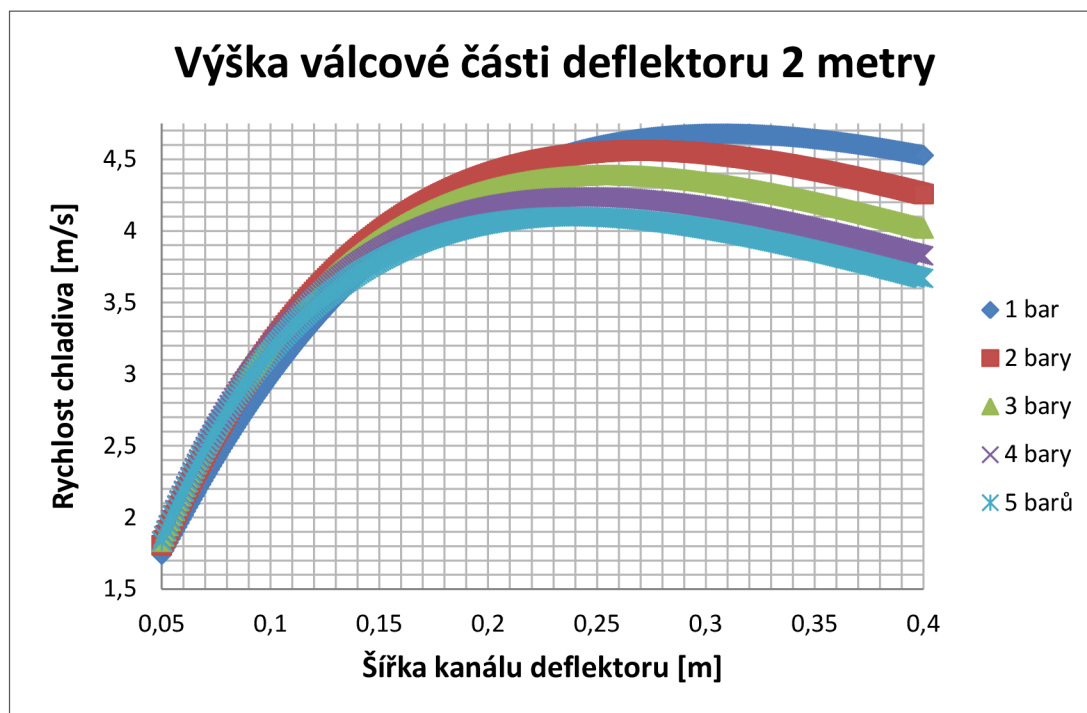
Graf 9: Rychlost chladiva na konci deflektoru v závislosti na šířce

Původní návrh deflektoru, který byl navržen pro IVR na reaktor VVER 1000, a který je zobrazen na obrázku 14, měl navrženou šířku kanálu 100 mm a výška válcové části tohoto deflektoru byla 2 metry. Na základě výpočtů, které jsme získali z navrženého programu v C++ a z dále dodělaných grafů rychlostí proudění chladiva ve vybraných částech kanálu lze konstatovat, že šířka tohoto kanálu musí být vyšší. Optimálních rychlostí proudění chladiva dostáváme pro šířku kanálu 250 mm, což je podstatně více než u předchozího návrhu 100 mm.

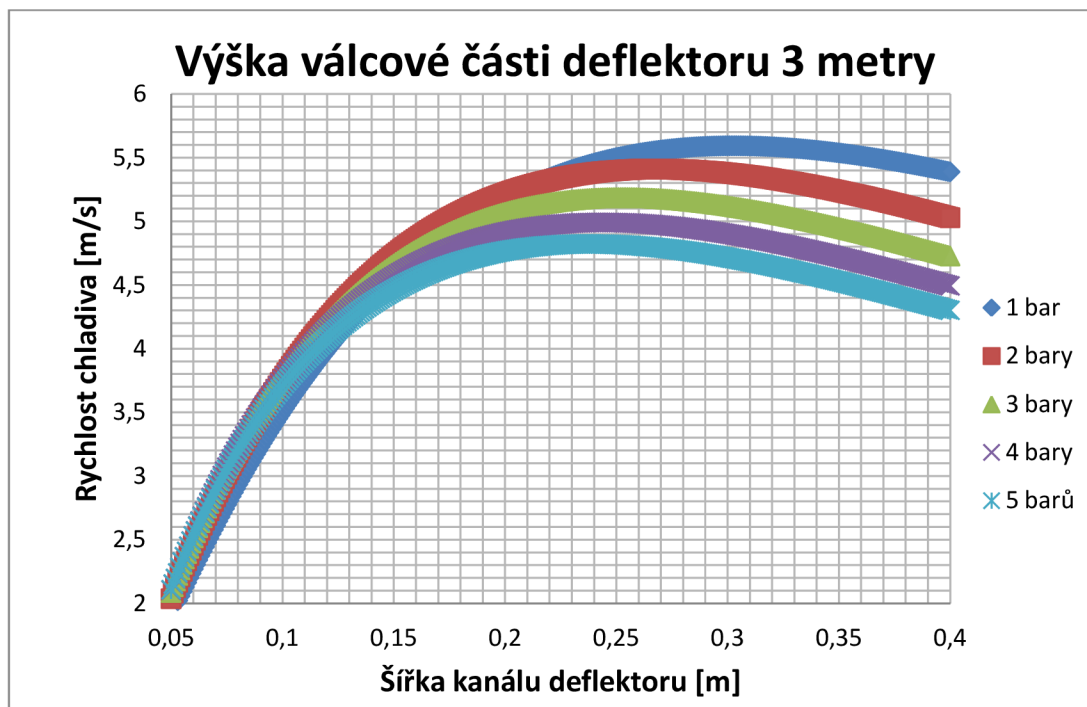
Dalším bodem posouzení předchozího návrhu deflektoru je zhodnocení výšky válcové části deflektoru. Původní návrh počítá s výškou této části 2 metry. Provedená optimalizace této výšky byla provedena od 1 do 4 metrů, přičemž 4 metry je maximální možná výška válcové části z hlediska možnosti uložení v reaktorové šachtě. Na následujících grafech jsou znázorněny průběhy rychlostí na dno TNR v závislosti na změně výšky válcové části deflektoru. Výpočty byly provedeny pro šířky od 50 do 400 mm kvůli porovnání vlivu změny výšky deflektoru na změnu rychlosti na dno TNR pro jednotlivé šířky kanálu.



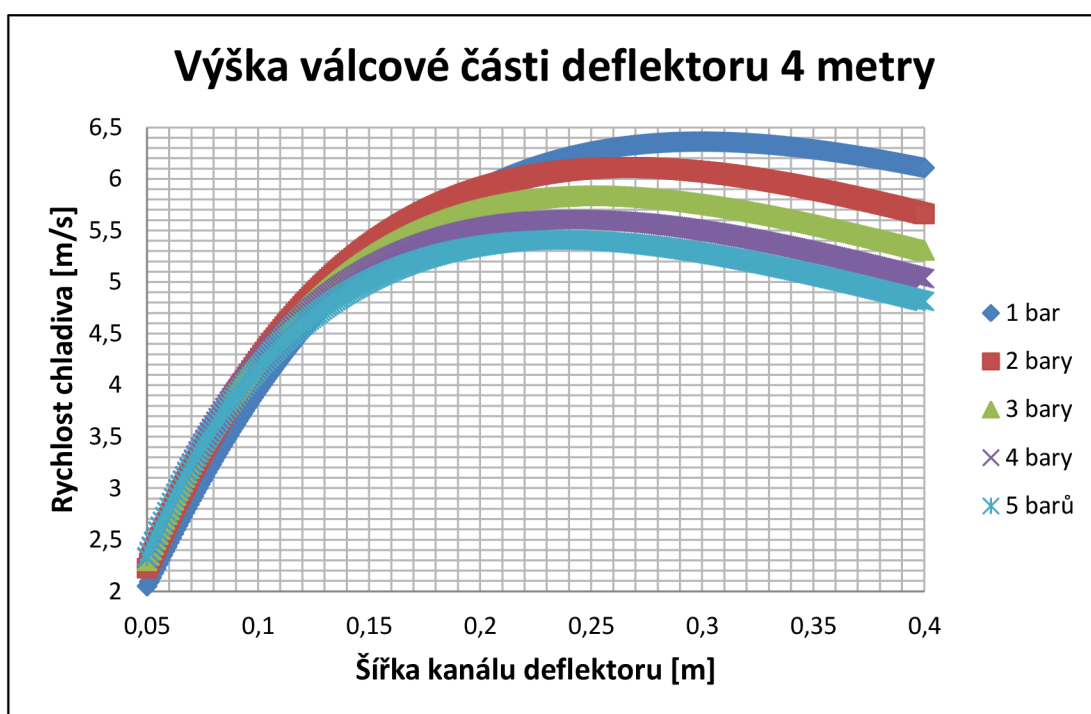
Graf 10: Rychlosti proudu chladiva na dno TNR pro výšku deflektoru válcové části deflektoru 1 metr



Graf 11: Rychlosti proudu chladiva na dno TNR pro výšku deflektoru válcové části deflektoru 2 metry

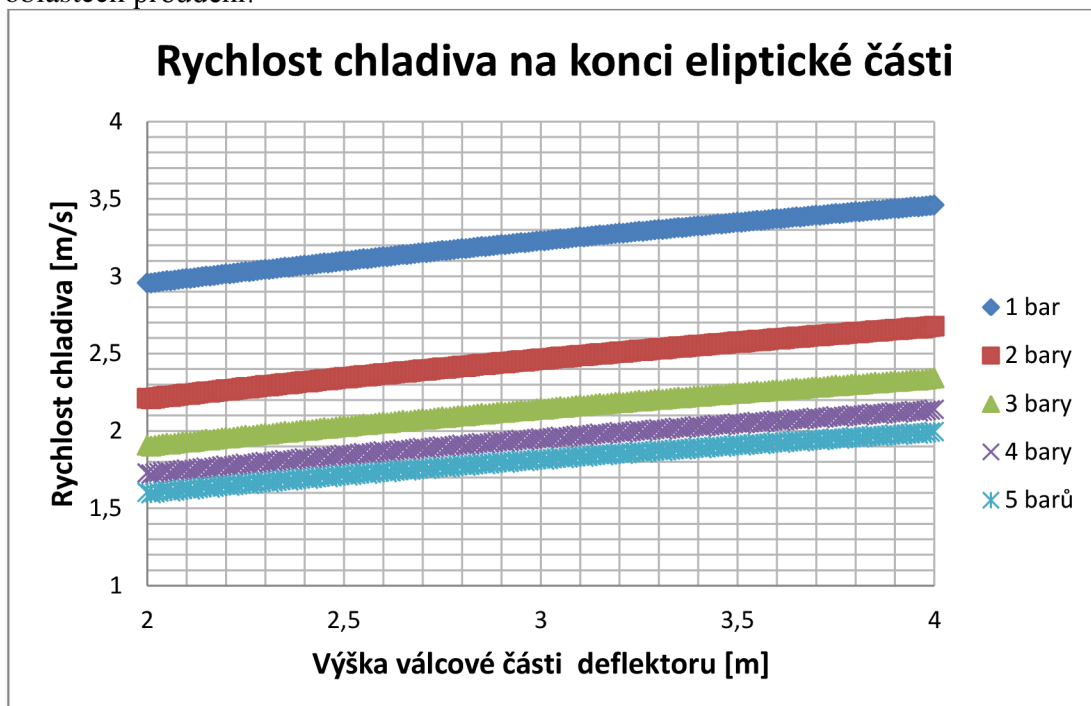


Graf 12: Rychlosti proudu chladiva na dno TNR pro výšku deflektoru válcové části deflektoru 3 metry

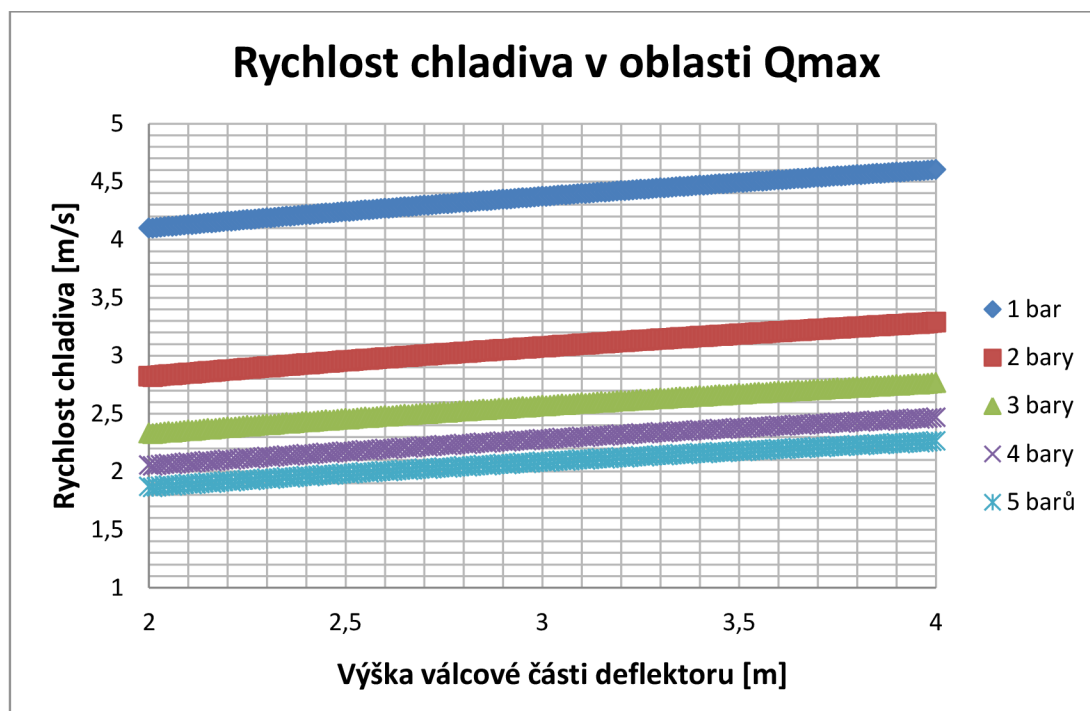


Graf 13: Rychlosti proudu chladiva na dno TNR pro výšku deflektoru válcové části deflektoru 4 metry

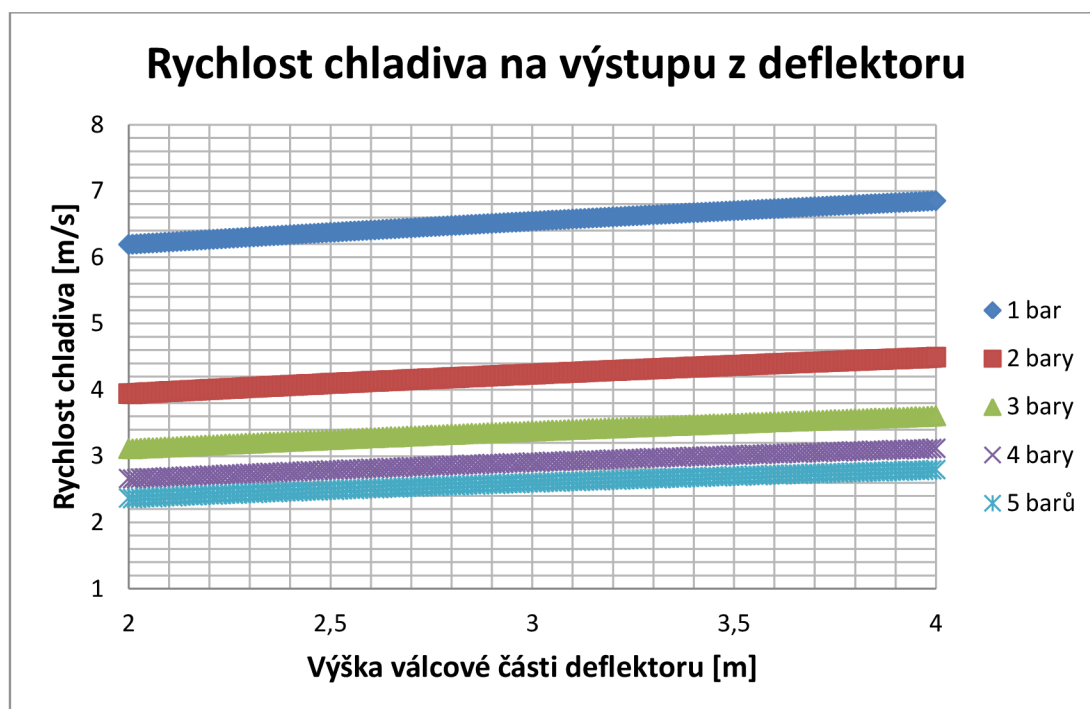
Z výše znázorněných grafů je patrné, že optimalizovaná šířka kanálu mezi TNR a deflektorem, 250 mm, může být aplikována z hlediska rychlosti proudění chladiva na dno TNR v celém rozsahu možné výšky válcové části deflektoru. Na následujících grafech je pak znázornění změny rychlostí proudění pro šířku kanálu 250 mm a výšku válcové části deflektoru od 1 do 4 metrů v závislosti na kritických oblastech proudění.



Graf 14: Rychlost chladiva na konci eliptické části v závislosti na změně výšky válcové části deflektoru



Graf 15: Rychlost chladiva v oblasti Q_{max} v závislosti na změně výšky válcové části deflektoru



Graf 16: Rychlost chladiva na výstupu z deflektoru v závislosti na změně výšky válcové části deflektoru

Jak můžeme vidět z předchozích grafů, výška válcové části deflektoru nemá nijak extrémně zásadní vliv na rychlosti proudění. Z hlediska volby vhodné výšky deflektoru by se dalo konstatovat, že navržená výška válcové části deflektoru dva

MOŽNOSTI VNĚJŠÍHO CHLAZENÍ TNR PŘI HAVÁRII S TAVENÍM AKTIVNÍ ZÓNY

metry může zůstat ponechána. Maximální výška válcové části dle dispozičních možností šachty reaktoru je 4 m.

Závěr

Problematika popisovaná v této diplomové práci se zabývá zvládním těžkých havárií v jaderných elektrárnách, kdy vlivem neschopnosti odvádět zbytkový výkon kumulovaný v aktivní zóně reaktoru dochází k jejímu tavení a přesunu taveniny na dno tlakové nádoby reaktoru.

V první kapitole se autor práce zabývá okolnostmi, které mohou vést k havárii výše definovaného rozsahu a možnými způsoby, kterými jde tato havárie zmírnit. Prvním způsobem je zachycení roztavené aktivní zóny v lapači aktivní zóny mimo tlakovou nádobu reaktoru, kde dojde k jejímu následnému vychlazení (ExVC). Druhou možností může být strategie udržení roztavené aktivní zóny uvnitř tlakové nádoby pomocí jejího vnějšího chlazení (IVR). Tato druhá metoda se jeví aplikovatelnější pro již stávající jaderné elektrárny, kde nelze provádět rozsáhlé úpravy v kontejnmentu elektrárny. Historií vzniku této metody, možnostmi jejího použití pro vysokoenergetické reaktory, ale také chováním roztavené aktivní zóny se autor věnuje v druhé kapitole této diplomové práce.

Třetí kapitola této práce se zabývá rešerší stávajících experimentů, které byly provedeny v rámci výzkumu aplikovatelnosti konceptu IVR. Část této kapitoly je věnována popisu experimentálního stendu ÚJV Řež, který se touto problematikou bude zabývat. Na závěr jsou zpracovány vybrané experimentální údaje naměřené na tomto zařízení (BESTH).

V praktické části této diplomové práce se autor věnuje návrhu vhodných rozměrů deflektoru, díky němuž bude odvod tepla z vnější stěny TNR efektivnější. V rámci práce autor navrhl vlastní termo-hydraulický model proudění v deflektoru v programovacím jazyku C++, s modelováním chování parovodní směsi jako homogenní látky, díky jehož výstupům byl schopen vybrat vhodnou šířku kanálu mezi deflektorem a TNR a vhodnou výšku válcové části deflektoru. Prakticky jde o porovnávání rychlosti proudění v kanále mezi TNR a deflektorem pro různé šířky tohoto kanálu a pro různé tlaky, které by mohly v reálných podmínkách kontejnmentu JE VVER 1000 nastat. Profily rychlostí v kritických místech kanálu jsou graficky zpracovány a na základě výsledků byla vybrána vhodná šířka kanálu - 250 mm. Počáteční výpočet byl proveden pro výšku válcové části deflektoru 2 metry. Dalším krokem výpočtu bylo zachování vybrané šířky kanálu a zhodnocení změn rychlosti chladiva vlivem změny výšky válcové části deflektoru. Zde autor měnil výšku této části od jednoho do čtyř metrů. Výpočty potvrdily, že s vyšší výškou válcové části bude probíhat i rychlejší proudění kanálem.

Původní návrh deflektoru, který byl projektován v ÚJV Řež, a který sloužil jako zdroj vstupních dat pro výpočet, měl rozměry kanálu 100 mm a výšku válcové části deflektoru 2 metry. Dle výsledků výpočtu této práce autor doporučuje pro optimalizaci rychlosti proudění chladiva v kanálu:

- 1) Změna šířky kanálu mezi TNR a deflektorem ze 100 mm na 250 mm.
- 2) Změna výšky válcové části deflektoru na maximální možnou výšku. Ta by v případě instalace konceptu IVR v JE Temelín měla být max. 4 metry.

První doporučení může být považováno za zásadní pro správnou funkci konceptu IVR při použití deflektoru jako usměřovače proudu chladiva. Druhé doporučení je dodatkové. Přirozené cirkulace a dostatečného odvodu zbytkového tepla bude dosaženo i pro návrh s výškou válcové části 2 metry.

Použitá literatura a zdroje.

Literatura:

- [1] HANUŠ, J. Jaderná energetika před a po katastrofě ve Fukušimě Daiči. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D..
- [2] Národní zpráva: Zátěžové zkoušky. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Prosinec 2011 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Narodni_zprava_ceska_final_1.pdf.
- [3] PANTYUSHIN S.I., FRIZEN E.A., SEMISHKIN V.P., BUKIN N.V., BYKOV M.A., MOKHOV V.A. Consideration of a Possibility for Corium Retention (Reactor Internals and Core Melt) in the Vessel of WWER Reactor with Power from 600 to 1300 MW, Podolsk, 2012
- [4] FISHER, M. The severe accident mitigation concept and the design measures for core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR), Erlangen
- [5] BAUER M., KNEBEL K., FREIS D., In-vessel retention as retrofitting measure for existing nuclear power plants, Cologne, 2012. 16 s.
- [6] KYMALAINEN, O., TUOMISTO, H., THEOFANOUS, T. G., In-vessel retention of corium at the Loviisa plant, Santa Barbara: University of California, 1996. 22s.
- [7] DUSPIVA, JIŘÍ., Co je potřeba pro prokázání úspěšnosti IVR pro české JE, ÚJV Řež, 2013.
- [8] ŽDÁREK, J., KRHOUNEK, V., BÁŤEK, D., ZVONAREV, Y., KOBZAR, V., BUDAEV, M., Posouzení možnosti strategie In-Vessel Retention pro reaktory typu VVER 1000/320. Řež: ÚJV Řež, 2013. 12s.
- [9] SANG W. NOH, KUNE Y. SUH, Critical heat flux for APR1400 lower head vessel during a severe accident. Seoul: Seoul National University, 2012. 17 s.
- [10] YANG, J., M. B. DIZON, F. B. CHEUNG, J. L. REMPE, K. Y. SUH a S. B. KIM. Critical Heat Flux for Downward Facing Boiling on a Coated Hemispherical Surface. *Experimental Heat Transfer*. 2005, vol. 18, issue 4. DOI: 10.1080/08916150500201537. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08916150500201537>
- [11] YANG, J., M. B. DIZON, F. B. CHEUNG, J. L. REMPE, K. Y. SUH a S. B. KIM., CHF enhancement by vessel coating for external reactor vessel cooling. 2005, 10s.

- [12] PARK R. J., HA K. S., KIM S. B., KIM H. D. Two-phase natural circulation flow of air and water in a reactor cavity model under an external vessel cooling during a severe accident. Korea Atomic Energy Research Institute, 2006, 7s.
- [13] ŽDÁREK, J., KRHOUNEK, V., BÁŤEK, D., In Vessel Retention (IVR)- BESTH 1. Řež: ÚJV Řež, 2013, 20s.
- [14] ŽDÁREK, J., KRHOUNEK, V., BÁŤEK, D., Příprava a ověření základní strategie In Vessel Retention-IVR pro JE VVER 100/320. Řež: ÚJV Řež, 2013, 18s.
- [15] KATZER, M. Návrh zařízení pro havarijní chlazení tlakové nádoby reaktoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D..
- [16] MEDEK, Jaroslav. Hydraulické pochody. Vyd. 4., V Akademickém nakladatelství CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 339 s. ISBN 80-214-2640-3.
- [17] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Vyd. 3., přeprac. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2409-5.

Seznam zkratk a symbolů:

Seznam zkratk

AZ	Aktivní zóna
AP	Advanced Pressurized Water Reactor
APR	Advanced Power Reactor
CHF	Critical Heat Flux
EPR	Evolution Pressurized Reactor
ExVC	Ex Vessel Cooling
IVR	In Vessel Retention
JE	Jaderná elektrárna
SAMS	Severe Accident Managment Strategy
TMI	Three Mile Island
TNR	Tlaková nádoba reaktoru
VVER	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor

Seznam symbolů

a	[m]	délka jednoho úseku v deflektoru
A	[m ²]	průtočná plocha kanálem mezi TNR a deflektorem
B	[m]	délka hlavní poloosy elipsy
C	[m]	délka vedlejší poloosy elipsy
d _H	[m]	hydraulický průměr
g	[m/s ²]	tíhové zrychlení
h	[m]	výška vodního sloupce
i	[kJ/kg]	entalpie
l	[m]	šířka kanálu mezi TNR a deflektorem
\dot{m}	[kg/s]	hmotnostní průtok
O _s	[m]	smáčený obvod
p _{VS}	[Pa]	tlak vodního sloupce
p _{PS}	[Pa]	tlak slouce parovodní směsi deflektoru
p _{HS}	[Pa]	hnací síla
q	[W/m ²]	tepelný tok
r	[m]	souřadnice poloměru
S	[m ²]	výhřevná plocha
S _s	[m ²]	smáčená plocha
V	[m]	výška válcové části deflektoru
\dot{V}	[m ³ /s]	objemový průtok
w	[m/s]	rychlost proudění
x	[-]	suchost
z	[m]	souřadnice výšky
ρ	[kg/m ³]	hustota
Δ_N	[mm]	drsnost nádoby
Δ_D	[mm]	drsnost deflektoru
Δ	[mm]	střední drsnost
λ	[-]	součinitel tření
$\Delta p_{tř}$	[Pa]	tlaková ztráta třením
Δp_m	[Pa]	tlaková ztráta místními odpory
Δp_{ek}	[Pa]	tlaková ztráta změnou kinetické energie
$\Delta p_{celk.}$	[Pa]	celkové tlakové ztráty
ξ	[-]	součinitel odporu

Seznam příloh

Příloha 1:

Výkresová dokumentace:
Deflektor VVER 1000 zástavba