

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů

Obor: Jaderné inženýrství



**Vliv deformace palivových tyčí na
průtok chladiva palivovým
souborem**

**Effect of Nuclear Fuel Rods
Deformation on Coolant Flow
through Fuel Assembly**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Bruno Uldrich
Vedoucí práce: Ing. Dušan Kobylka, Ph.D.
Rok: 2023



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Bruno Uldrich**

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Název práce česky: **Vliv deformace palivových tyčí na průtok chladiva palivovým souborem**

Název práce anglicky: Effect of Nuclear Fuel Rods Deformation on Coolant Flow through Fuel Assembly

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s konstrukcí paliva pro lehkovodní jaderné reaktory a podmínkami jejich provozu a namáhání v jaderném reaktoru za nominálních i havarijních stavů. Zaměřte se především na paliva pro reaktory východní koncepce typu VVER.
2. Proveďte popis možných deformací palivových proutků v palivových souborech, ke kterým může dojít za provozu za nominálních i v případných havarijních stavech. Udělejte rešerši dostupných provozních i experimentálních dat.
3. Nastudujte problematiku termohydraulického výpočtu aktivní zóny. Seznamte se s používanými matematicko-fyzikálními modely a přístupy k termohydraulickému výpočtu aktivní zóny. Určete veličiny, které jsou pro termohydraulický popis stavu aktivní zóny zásadní.
4. Na základě bodu 3 zvolte vhodnou metodu a výpočetní kód, vypracujte zjednodušený model proudění a ohřevu chladiva v palivovém souboru a proveďte zjednodušený demonstrační výpočet vlivu změny průtočného průřezu kanálu chladiva na rozložení průtoku v okolních kanálech a jejich teplotní pole. Výpočet vyhodnoťte a analyzujte.

Doporučená literatura:

- [1] Bailly H., Ménessier D., Prunier C.: The Nuclear Fuel of Pressurized Water Reactors and Fast Reactors, Design and Behaviour, Lavoisier Publ. Inc., 1999, ISBN: CEA 2-7272-0198-2
- [2] Todreas N. E., Kazimi M. S.: Nuclear systems, volume I - Thermal Hydraulic Fundamentals, CRC Press, 2012, ISBN 978-1-4398-0887-0
- [3] Todreas N. E., Kazimi M. S.: Nuclear systems, volume II – Elements of Thermal Hydraulic Design, CRC Press, 2001, ISBN 978-1-56032-079-1
- [4] Čížek J.: ALTHAMC12: Dokumentace programu, technická zpráva, 17-20A-004-001, ALVEL, 2018
- [5] IAEA: Structural Behaviour of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, IAEA-TECDOC-1454, Vienna, 2005, ISBN 92-0-105105-0

Jméno a pracoviště vedoucího práce: **Ing. Dušan Kobyłka, Ph.D.**
KJR FJFI ČVUT v Praze

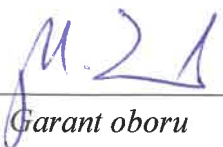
Datum zadání bakalářské práce: 11.10. 2021

Datum odevzdání bakalářské práce: 7.7. 2022

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 11.10. 2021

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.



Garant oboru

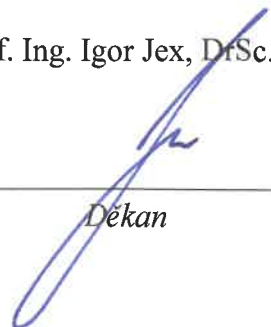
Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.



Děkan

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 01.srpna 2023

.....
Uldrich
Bruno Uldrich

Poděkování

Děkuji Ing. Dušanu Kobylkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily.

Bruno Uldrich

Název práce:

Vliv deformace palivových tyčí na průtok chladiva palivovým souborem

Autor: Bruno Uldrich

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Dušan Kobylka, Ph.D.
KJR FJFI ČVUT

Abstrakt: Tato práce se zabývá vlivem změny geometrie průtočných kanálů chladiva na termohydraulický výpočet aktivních zón lehkovodních reaktorů. Nejprve je podán výklad pojednávající o lehkovodních reaktorech, struktuře jejich aktivních zón a také popis paliva pro tyto reaktory. Zvláštní pozornost je věnována reaktorům VVER. Je diskutován možný vliv deformace paliva na průtok chladiva reaktorem, jak jej popisují jiné práce. V další části je popsána úloha termohydraulických výpočtů s jejími východisky a proveden jednoduchý termohydraulický výpočet metodou subkanálové analýzy na experimentálním svazku.

Klíčová slova: aktivní zóna, VVER, termohydraulika, jaderné palivo, deformace paliva, subkanálová analýza

Title:

Effect of Nuclear Fuel Rods Deformation on Coolant Flow through Fuel Assembly

Author: Bruno Uldrich

Abstract: This thesis deals with the influence of changes in the geometry of coolant flow channels on the thermohydraulic analysis of light water reactor active zones. Firstly, an explanation is provided about light water reactors, the structure of their active zones, and a description of the fuel used in these reactors. Special attention is given to VVER reactors. The possible impact of fuel deformation on the coolant flow through the reactor is discussed based on findings from other studies. In the following section, the task of thermohydraulic calculations is described, along with its fundamentals, and a simple thermohydraulic calculation is performed using the subchannel analysis method on an experimental bundle.

Key words: reactor core, WWER, thermohydraulics, nuclear fuel, fuel deformation, subchannel analysis

Obsah

Seznam obrázků	1
Seznam použitých zkratek	3
Seznam veličin	5
Úvod	7
1 Lehkovodní jaderné reaktory	9
1.1 Reaktory VVER	10
1.2 Palivo pro reaktory PWR	11
1.2.1 VVER	14
1.2.2 Palivo reaktoru VVER-440	15
1.2.3 Palivo reaktoru VVER-1000	17
1.3 Reaktory BWR a jejich palivo	23
1.4 Namáhání paliva	24
1.4.1 Chování paliva	24
1.4.2 Limity a podmínky	25
2 Deformace paliva	27
2.1 Průhyb palivového souboru	28
2.2 Deformace palivových tyčí	28
2.3 JE Ringhals	30
2.4 Soubory HIPER16	32
3 Termohydraulický výpočet AZ	35
3.1 Průtok chladiva AZ	35
3.2 Termohydraulické limity	36
3.3 Horký kanál	37
3.4 Hydraulické charakteristiky	38
3.4.1 Ztráty při jednofázovém proudění	38
3.5 Vliv dvoufázového proudění	40
3.6 Možnosti termohydraulické analýzy AZ	41
3.6.1 Zákon zachování hmoty	41
3.6.2 Zákon zachování hybnosti	42
3.6.3 Zákon zachování energie	42
3.6.4 Metoda porozního média (porous media approach)	43
3.6.5 Zákony zachování	43
3.6.6 Subkanálová analýza	44
3.7 Důležité veličiny pro subkanálovou analýzu	45
3.8 Zákony zachování	47
3.8.1 Zákon zachování hmoty	47
3.8.2 Zákon zachování energie	47

3.8.3	Zákon zachování hybnosti	47
3.8.4	Konstitutivní vztahy	48
4	Ukázka termohydraulického výpočtu	49
4.1	Termohydraulický program	49
4.2	Svazek	50
4.3	Výsledky výpočtu	50
4.4	Tabulky a obrázky	51
	Závěr	59
	Bibliografie	61

Seznam obrázků

1.1	Srovnání geometrií AZ mezi VVER (vlevo) a PWR (vpravo), [29]. . .	10
1.2	Palivový proutek VVER–1000 V-528 z JE Bushehr [27]	12
1.3	Palivový soubor PWR (vlevo) a detail distanční mřížky souboru s mísícími lopatkami (vpravo), [33]	13
1.4	Mísící mřížky palivových souborů, [31].	14
1.5	Varianty profilování palivových souborů VVER–440, [37].	16
1.6	Vyobrazení souborů TVSA [32].	19
1.7	Palivový soubor TVSA [5]	19
1.8	Vertikální řez vodící trubkou souboru TVSA.	20
1.9	Vertikální řez centrální trubkou souboru TVSA.	20
1.10	Obtok AZ	20
1.11	Palivový soubor VVER–1000 typ RWFA [40]	21
1.12	Palivový soubor BWR reaktoru, [25]	23
2.1	Snímek Temelínského palivového souboru, [16]	29
2.2	Snímek souboru při měření pomocí pravítek, [16]	30
2.3	Průhyb palivového souboru typu S a C, [2]	31
2.4	Schema průhybu palivových souborů, [2]	31
2.5	Průhyb souboru HIPER16 s materiálem HANA	32
2.6	Průhyb souboru HIPER16 s materiálem ZIRLO	32
2.7	Srovnání průhyb souboru HIPER16 se souborem PLUS7	33
3.1	Průtok chladiva AZ tlakovodního reaktoru [36]	36
3.2	Moodyho diagram, [8]	40
3.3	Režimy dvoufázového proudění	41
3.4	Zavedení terminologie objemů a povrchů	43
3.5	44
3.6	Rozměrové značky pro subkanály, [36]	45
4.1	Experimentální svazek ŠJS, [1]	50
4.2	Průběh teploty v subkanálu 15 (nominálním i změněným)	51
4.3	Průběh teploty v subkanálu 33 (nominálním i změněným)	52
4.4	Průběh teploty v subkanálu 34 (nominálním i změněným)	52
4.5	Průběh tlakové ztráty v subkanálu 15 (nominálním i změněným)	53
4.6	Průběh tlakové ztráty v subkanálu 33 (nominálním i změněným)	53
4.7	Průběh tlakové ztráty v subkanálu 34 (nominálním i změněným)	54
4.8	Průběh průtoku v subkanálu 15 (nominálním i změněným)	54
4.9	Průběh průtoku v subkanálu 33 (nominálním i změněným)	55
4.10	Průběh průtoku v subkanálu 34 (nominálním i změněným)	55

Seznam použitých zkratek

AZ Aktivní zóna.

BWR Varný reaktor (*Boiling Water Reactor*).

CHF Kritický tepelný tok (*Critical Heat Flux*).

DNBR Rezerva do krize varu (*Departure from Nuclear Boiling Ratio*).

IRI Neúplné zasunutí tyče (*Incomplete Rod Insertion*).

LWR Lehkovodní reaktor (*Light Water Reactor*).

PCI Interakce mezi pokrytím a tabletou (*Pellet-cladding Interaction*).

PWR Tlakovodní reaktor (*Pressurised Water Reactor*).

RCCA Regulační soubor (*Rod Control Cluster Assembly*).

RVHP Rada vzájemné hospodářské pomoci.

VVER Vodo vodní energetický reaktor.

Seznam veličin

A	povrch	$[m^2]$
d_h	ekvivalentní průměr	$[m]$
f_i	dílčí součinitel horkého kanálu	$[-]$
F_{celk}	celkový faktor horkého kanálu	$[-]$
F_{ing}	inženýrský faktor horkého kanálu	$[-]$
$F_{nuclear}$	nukleární faktor horkého kanálu	$[-]$
g	gravitační zrychlení	$[m/s^2]$
h	měrná entalpie	$[J/kg]$
K_r	radiální součinitel nerovnoměrnosti výkonu	$[-]$
l	délka	$[m]$
m	hmotnost	$[kg]$
p	tlak	$[Pa]$
R	odpor pevné látky	$[N]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
t	čas	$[s]$
T	teplota	$[^{\circ}C \text{ nebo } K]$
q_{av}	průměrná hustota tepelného toku	$[W/m^2]$
q_{max}	maximální hustota tepelného toku	$[W/m^2]$
q''	plošný tepelný tok	$[W/m^2]$
q'''	objemová hustota tepelného výkonu	$[W/m^3]$
u	vnitřní energie	$[J/kg]$
V	objem	$[m^3]$
w	rychlost	$[m/s]$
γ_V	objemový podíl kapaliny	$[-]$

$\Lambda_{t\dot{x}}$	součinitel tření	[-]
ϱ	hustota	[kg/m^3]
$\bar{\tau}$	tenzor napětí	[Pa]
ϕ	disipační funkce	[-]
ξ	součinitel odporu	[-]

Úvod

Mezi nejběžnější typy reaktorů na světě patří lehkovodní reaktory. V práci budou popsány paliva dvou druhů lehkovodních reaktorů - tlakovodních a varných. Při popisu palivových souborů či proutků bude dbáno nejen na jejich konstrukci, nýbrž i jejich vliv na termohydrauliku aktivní zóny reaktoru.

Průvodním jevem spojeným s provozem reaktorů je vyhořívání jaderného paliva. To může způsobovat geometrické změny palivových proutků nebo souborů. Jejich průhybem se mění průtočné plochy kanálů chladiva a tedy má průhyb vliv na termohydraulické výpočty. Obsahem práce je i rešeršní část zabývající se pozorováním průhybů na konkrétních svazcích.

Teoretickou část uzavírá obecný popis termohydraulického výpočtu aktivní zóny. Jedná se výpočet dílčí, ale nezbytný při návrhu, výstavbě a provozu jaderného zařízení. Popsány budou metody a základní veličiny, které se používají v tomto výpočtu. Na tuto část naváže ukázka jednoduchého výpočtu svazku subkanálovým kódem ALTHAMC12. Sledována bude změna průběhu tlaků, teplot a průtoků chladiva, pokud bude do svazku vložena nová mříž.

Kapitola 1

Lehkovodní jaderné reaktory

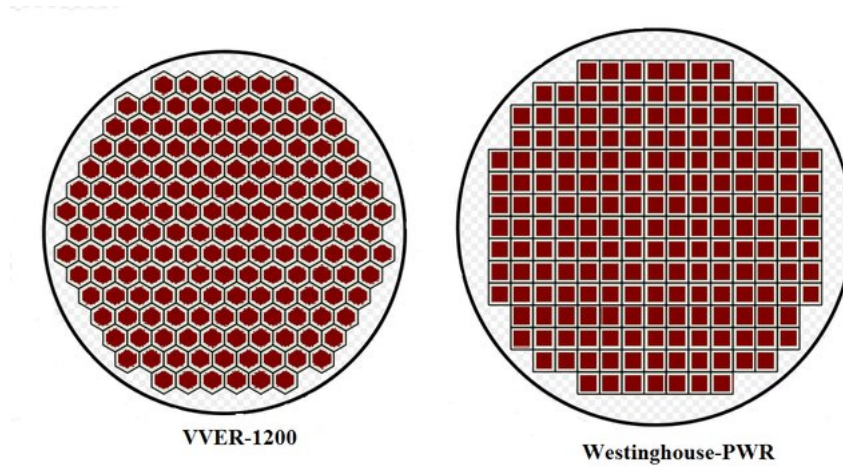
Pokusy s využíváním lehké vody coby moderátoru probíhaly již na grafitovém reaktoru X-10 v amerických Národních laboratořích v Oak Ridge po skončení druhé světové války. Cílem experimentů bylo zjistit, zda-li je možné zkonstruovat reaktor jiný než grafitový. Pozitivní výsledky experimentů daly základ opravdovým LWR reaktorům [18]. První skutečný LWR reaktor byl postaven v National Reactor Testing Station v Idahoské poušti v roce 1953. Argonne National Laboratory v USA ukázala, že lze LWR reaktory využívat pro pohon ponorek. V roce 1955 poprvé vyplula ponorka amerického námořnictva USS Nautilus, osazena tlakovodním reaktorem S2W firmy Westinghouse. Avšak v rámci světového programu pro mírové využívání jaderné energie se pionýrem stala sovětská elektrárna Obninsk, jež byla přifázována k síti 26. června 1954. První reaktor v této elektrárně, AM-1, byl moderovaný grafitem a chlazený lehkou vodou. Elektrický výkon elektrárny činil pouhých 5000 kW e^1 [43]. První jadernou elektrárnou v USA byla elektrárna Shippingport, jež byla spuštěna v prosinci v roce 1957 [42].

Vývojem LWR reaktorů vznikly dvě základní koncepce, označované jako tlakovodní PWR a varné reaktory BWR. Jejich základní rozdíl tkví v tom, že v elektrárnách s BWR reaktory, jak již název napovídá, dochází v AZ reaktoru k varu chladiva, jímž je voda, a tato pára je vedena na turbínu. Statistiky ukazují, že z celkového počtu 423 provozovaných reaktorů je z nich 307 typu PWR a 49 typu BWR. To tedy řadí PWR a BWR reaktory na první dvě místa v počtu provozovaných reaktorů daného typu [13].

PWR reaktory se obvykle dělí na reaktory tzv. západní a východní koncepce. Západní koncepcí se rozumí přístup ražený převážně státy někdejšího západního bloku, zatímco východní koncepce má své kořeny v bývalé SSSR v projektu VVER. Označení PWR se někdy zužuje právě jen na reaktory západní koncepce. Znatelný rozdíl je např. v typu geometrie paliva, kde se v reaktorech VVER používají soubory v příčném řezu šestistěnné, ale v západních čtvercové (viz obr. 1.1). Význačná je i poloha parogenerátorů, které jsou u PWR konstruovány do svislé pozice a u VVER horizontálně. V dnešní době může rozdělení reaktorů na západní a východní typ působit zavádějícím způsobem. Tak například americká firma Westinghouse se zabývá i výzkumem a výrobou paliv pro reaktory VVER. Jedná se tedy spíše o historické označení. Všechny reaktory jaderných elektráren v České republice jsou v době psaní

¹Moderní energetické reaktory dosahují výkonů zhruba o několik řádů vyšších, např. nejmodernější lehkovodní reaktor typu VVER (VVER-1200) s hrubým výkonem 1200 MW e .

této práce typu VVER (Temelín 2x VVER–1000, Dukovany 4x VVER–440).



Obrázek 1.1: Srovnání geometrií AZ mezi VVER (vlevo) a PWR (vpravo), [29].

1.1 Reaktory VVER

Jedná se o heterogenní tlakovodní lehkovodní reaktory. Vývoj VVER reaktorů započal v Sovětském svazu. Demonstrační Novovoronežská jaderná elektrárna (dodnes sloužící pro výstavbu prototypů reaktorů VVER) začala s výrobou energie roku 1964. Tato elektrárna měla za cíl ověřit bezpečný provoz nového typu reaktoru. První blok byl osazen VVER–210. V roce 1969 následoval VVER–365. Tyto dva bloky vedly ke standardizaci projektu a vyprojektování reaktoru VVER–440, jehož pokročilá verze se již řadí k reaktorům druhé generace. Do skupiny reaktorů druhé generace patří i VVER–1000 [8].

Elektrárny s reaktory typu VVER–440 se vyznačují tím, že postrádají plnotlaký kontejnment, protože pro velký půdorys reaktorového sálu nebyla dostupná technologie pro výrobu tak velkého plnotlakého kontejnmentu ² [8]. Např. JE Dukovany disponuje místo plnotlakého kontejnmentu hermetickými boxy [9].

Existuje několik modelů reaktorů VVER–440. Model VVER–440/230 byl vyvíjen v SSSR mezi lety 1956–1970. Od roku 1970 do roku 1980 navázala VVER–440/213. Nový model přinesl vyšší bezpečnost. Reaktor VVER–1000 se poprvé objevil jako pátý blok JE v Novovoroneži. Připojen k síti byl roku 1980. Oproti reaktorům VVER–440 se vyznačuje vyšším výkonem (okolo 1000 MWe) a vyššími požadavky na bezpečnost. Mezi všemi reaktory VVER jde o nejběžnější typ (31 jednotek), z nichž nejvíce je typu V-320 (23 jednotek) [28]. Tab. 1.1 obsahuje historický přehled vývoje VVER reaktorů s jednotlivými typy a příklady elektráren jimi vybavenými. Z tabulky vyplývá, že reaktory VVER se stavějí především v zemích někdejšího východního bloku.

²Výjimku tvoří jen dva bloky finské JE Loviisa s VVER–440/213 a nedokončená kubánská JE Juragua s typem reaktoru VVER–440/318

Tabulka 1.1: Přehled reaktorů VVER, [28]

Generace I. VVER	II. VVER—440	II./III. VVER—1000	III. VVER—1200
V-210 Rusko Novovoronež 1 (odstavená)	V-179 Rusko Novovoronež 3-4	V-187 Rusko Novovoronež 5	V-392M Rusko Novovoronež II 1-2 (ve výstavbě)
V-365 Rusko Novovoronež 2 (odstavená)	V-230 Rusko Kola 1-2 Odstavené: Východní Německo: Greifswald 1-4 Bulharsko Kozloduj 1-4 Slovensko Bohunice 1-2 V-213 Rusko: Kola 3-4 Ukrajina: Rovno 1-2 Maďarsko: Pakš 1-4 Čr: Dukovany 1-4 Finsko: Loviisa 1-2 Slovensko Bohunice II 1-2 Mochovce 1-2 Mochovce 3-4 (ve výstavbě)	V-302 Ukrajina Jihoukrajinská 1 V-338 Ukrajina: Jihoukrajinská 2 Rusko: Kalininská 1-2 V-320 Rusko: Balakovská 1-2 Kalininská 3-4 Rostovská 1-2 Rostovská 3-4 (ve výstavbě) Ukrajina: Rovno 3-4 Zápороžská 1-6 Chmelnická 1-2 Jihoukrajinská 3 Bulharsko: Kozloduj 5-6 Čr: Temelín 1-2 V-428 Čína: Tianwan 1-2 Tianwan 3-4 (ve výstavbě)	V-491 Rusko Baltská 1-2 (ve výstavbě) Leningradská II 1-2 (ve výstavbě) Bělorusko Běloruská 1 (ve výstavbě)
	V-270 Arménie Arménie 1 (odstavená) Arménie 2	V-412 Indie: Kandankulam 1 Kandankulam 2 (ve výstavbě) V-446 Írán: Bushehr 1	

1.2 Palivo pro reaktory PWR

Palivem pro PWR reaktory je výhradně obohacený uran vázaný v oxidu uranu UO_2 ve formě válcových tablet³. Práškový UO_2 je dvouose lisován do podoby tablet válcovitého tvaru, které se po sintrování, dalším mechanickém opracování a závěrečné

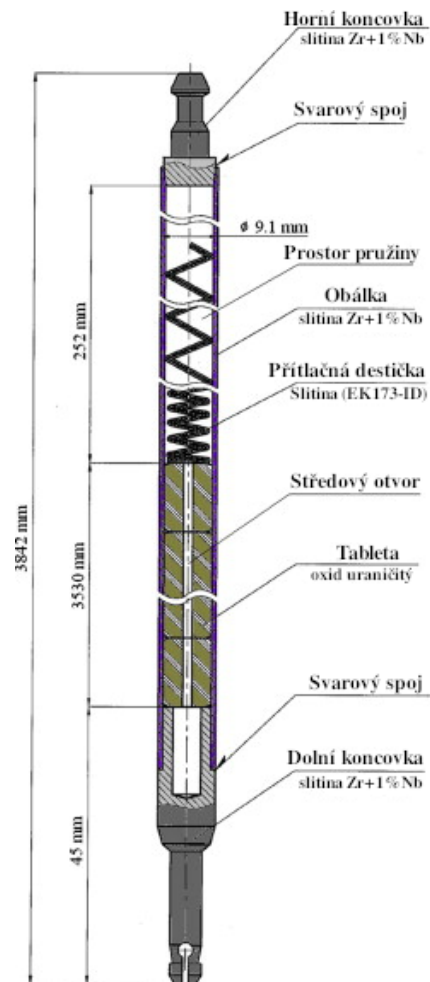
³Od osmdesátých let minulého století se začalo komerčně využívat v malé míře (okolo 5%) i tzv. MOX palivo (U, Pu) O_2 .

kontrole skládají na sebe do palivových proutků a ty jsou základem palivových souborů. Společně s jinými konstrukčními prvky tvoří aktivní zónu reaktoru.

Palivové soubory PWR reaktorů sestávají z kostry a palivových proutků. Ve středu souboru se může nalézat středová trubka, sloužící pro vnitroreaktorová měření. V určitých pozicích palivového souboru se mezi proutky nacházejí vodící tyče. Po výšce jsou k těmto trubkám připojeny distanční mřížky, které drží soubor v radiálním směru. Distanční mřížky mohou přispívat k uniformizaci teplotního pole po axiálním průřezu AZ. Rozlišuje se několik druhů mříží. Mřížky na obou koncích souboru mají funkci pouze držet proutky v radiálním směru. Pružinky zajišťují měkké uložení a dovolují pohyb v axiálním směru. Dále se v souboru nacházejí mříže, které mají navíc i funkci promíchávání chladiva, k čemž jim slouží mísící lopatky. Podle umístění mísících lopatek dochází k různému profilování průtoku chladiva (viz obr. 1.4).

Na obou dvou koncích drží soubor pohromadě horní resp. dolní koncovka palivového souboru. Horní koncovka slouží k manipulaci paliva např. při zavážení nebo vytahování z reaktoru při odstávce mezi kampaněmi. Rovněž jí vytéká chladivo pryč z AZ [36]. Důležitá je i přítomnost dilatační mezery mezi palivovými proutky a koncovkami. Při provozu reaktoru dochází v důsledku najetí na vysoké provozní teploty k axiální teplotní roztažnosti proutků a proutky musí mít možnost se roztahnout do volného prostoru, nebo by došlo k jejich deformaci. Přítomnost a velikost mezery se při odstávkách reaktoru pravidelně kontrolují [15].

Palivový proutek, viz obr. 1.2, v sobě obsahuje sloupec palivových tablet, na které v horní části silově půdობí přitlačná pružina. Jednotlivé proutky mají také své horní a dolní koncovky, podobně jako soubory. Palivové tablety jsou obklopeny pokrytím. Na pokrytí jsou kladeny především následující požadavky. Mělo by mít malý účinný průřez pro absorpci neutronů, odolávat korozi či jiným chemickým reakcím a mít dobré mechanické vlastnosti. Takové vlastnosti prokazují například zirkoniové slitiny, které se prakticky jediné používají u LWR reaktorů [3]. Pro reaktory VVER se používají slitiny E110 (dříve též Zr-1%Nb), do kterých se přidává jako příměs prvek niob, který zlepšuje protikorozi vlastnosti. FRAMATOM vyrábí slitinu M5. Společnost Westinghouse nabízí pokrytí ZIRLO. Poslední dvě slitiny se používají v reaktorech PWR západní koncepce. Pro BWR reaktory se používá slitina Zircaloy-2. Přehled značek materiálů pokrytí a jejich výrobci jsou v tab. 1.2.



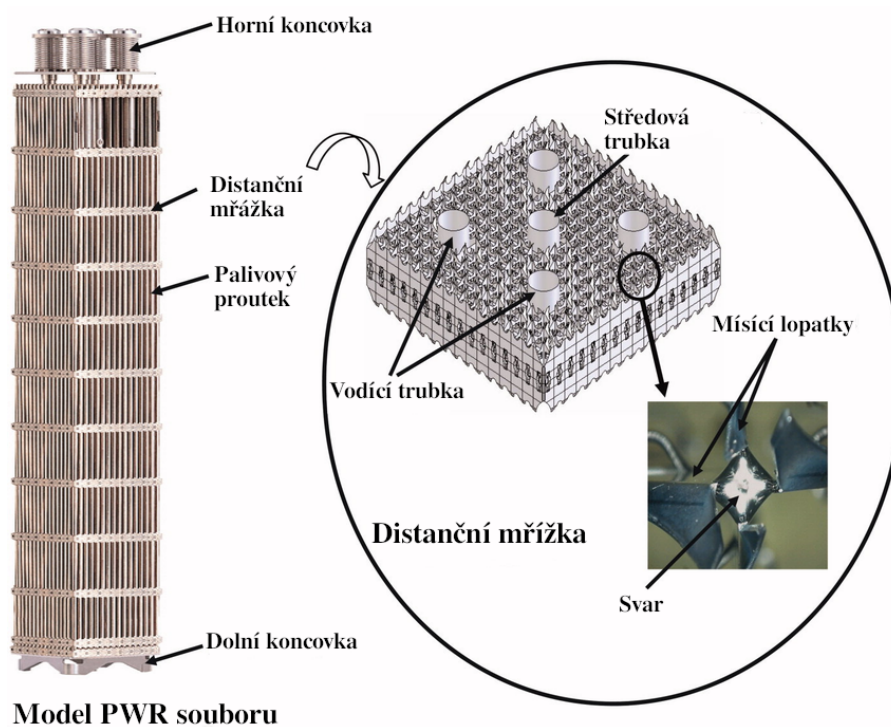
Obrázek 1.2: Palivový proutek VVER-1000 V-528 z JE Bushehr [27]

Pokrytí v sobě obsahuje sloupec palivových tablet. Tablety se dnes vyrábějí s čočkovitým vybráním na čele. Společnost TVEL dříve vyráběla tablety se středovým otvorem v ose proutku. Celý sloupec tablet je seshora přitlačován pružinou [36].

V dolní části souboru se může nacházet anti-debris filtr, sloužící k zachytávání mechanických nečistot v chladivu. Nečistoty se mohou, zvláště pak v úzkých kanálech, zaseknout a tlačeny chladivem mohly by mechanicky narušit povrch pokrytí.

Tabulka 1.2: Přehled materiálů pro pokrytí a jiné komponenty LWR reaktorů, [41]

Slitina	Sn, %	Nb, %	Výrobce (země)	Komponenta	Typ reaktoru
Zircaloy 2	1,2 – 1,7	-	Všichni výrobci	Pokrytí podpůrné struktury	BWR, CANDU
Zircaloy 4	1,2 – 1,7	-	Všichni výrobci	Pokrytí podpůrné struktury	BWR, PWR
ZIRLO	0,7 – 1	1	Westinghouse	Pokrytí	BWR, PWR
ZR Sponge	-	-	Japonsko a Rusko	Pokrytí	BWR
ZrSn	0,25	-	Westinghouse	Pokrytí	BWR
Zr2.5Nb	-	2,4 – 2,8	FAE (Argentina)	Tlakové kanály	CANDU
E110	-	0,9 – 1,1	Rusko	Pokrytí	VVER
E125	-	2,5	Rusko	Tlakové kanály	RBMK
E635	0,8 – 1,3	0,8 – 1	Rusko	Podpůrné struktury	VVER
M5	-	0,8 – 1,2	Areva	Pokrytí podpůrné struktury	PWR



Model PWR souboru

Obrázek 1.3: Palivový soubor PWR (vlevo) a detail distanční mřížky souboru s mísícími lopatkami (vpravo), [33]

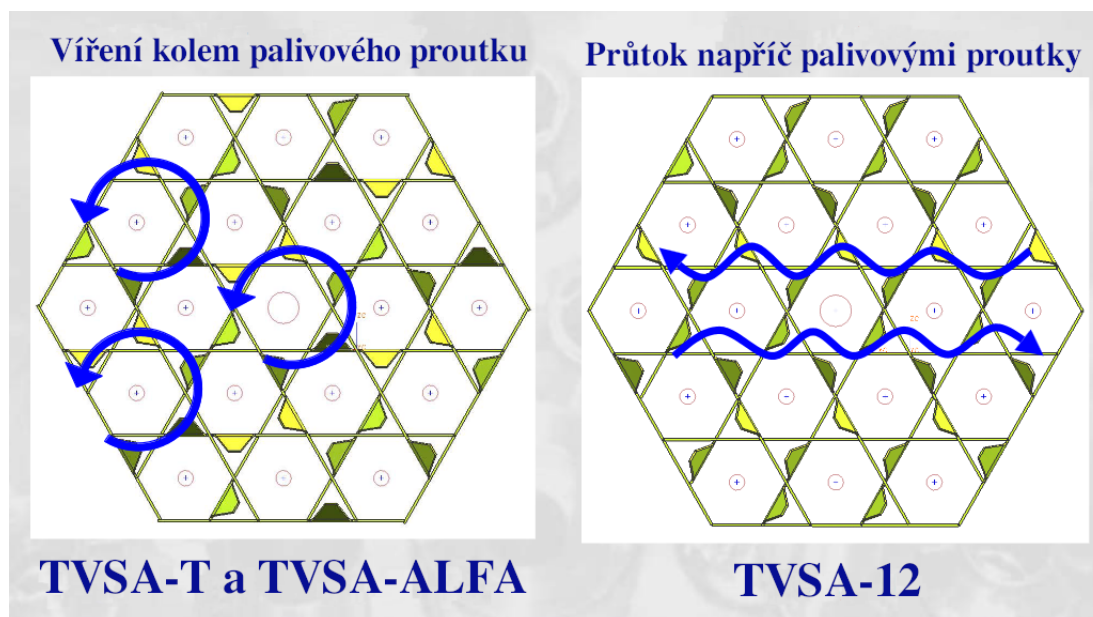
Mezi palivovými tabletami a pokrytím je ponechána štěrbina z důvodu rozdílné tepelné roztažnosti palivových tablet a pokrytí. Zároveň je nutné dobře odvádět teplo z paliva do chladiva. K tomu je potřeba kompenzovat tlak (kolem 15 MPa) chladiva působící na pokrytí zevnějšku. Vhodnou výplní je plyn, který by navíc měl co nejméně reagovat s pokrytím a palivem. Helium tato kritéria splňuje a proto je hojně využíváno jako plnicí plyn [3].

Rozdíl AZ západních PWR od VVER tkví především v tvaru palivových souborů, které jsou čtvercové. Soubory obsahují obvykle 15 x 15, 16 x 16, ale i 17 x 17 a 18 x 18 proutků v souboru [39]. Palivové proutky v souboru jsou uspořádány do čtvercové mřížky a mezi nimi proudí chladivo. Na obr. 1.3 je zobrazen model PWR souboru.

1.2.1 VVER

Jelikož návrh reaktorů VVER pochází ze Sovětského svazu, byl vývoj a výroba komponent, tedy i paliva, situovány tam, případně v zemích RVHP a jejich současných nástupců. V nynější době ale dodává paliva pro VVER vícero světových firem. Pro VVER-1000 jsou to TVEL, Westinghouse, FRAMATOM a jiné. Každá firma vyvíjí své návrhy. Pro reaktory VVER-440 dodává palivo pouze společnost TVEL. V poslední době se ale pracuje i na diverzifikaci trhu s tímto typem paliva. Španělská společnost ENUSA společně se společností Westinghouse v řádu jednotek let plánují zahájit výrobu těchto paliv [7].

Dodavatelem pro obě české jaderné elektrárny je zatím ruská polostátní společnost TVEL. Od roku 2024 má ale pro dodávání palivových souborů elektrárně Temelín uzavřené smlouvy skupina Westinghouse a Framatom [17].



Obrázek 1.4: Mísící mřížky palivových souborů, [31].

1.2.2 Palivo reaktoru VVER–440

AZ reaktoru VVER–440 obsahuje 349 kazet⁴ a v každé kazetě je umístěno 126 palivových proutků. Palivové kazety jsou v aktivní zóně dvojího druhu. Ta sestává z 312 palivových kazet a z 37 kazet HRK (havarijní-regulační kazeta). Kazety HRK (někdy též regulační soubory) sestávají z dvou tandemově spojených částí. Horní část je absorbní a spodní palivová.

Kazety HRK se spojují s palivovými soubory v jeho horní části. Je stejného tvaru jako palivový soubor. Vnitřní povrch je pokryt borovou ocelí, sloužící jako absorbátor neutronů. Při spouštění absorbní HRK kazety do aktivní zóny (neboť tyto dva spojené soubory se nevejdou cele do aktivní zóny) se vysouvá palivová část spojených souborů pod aktivní zónu, což přispívá k omezování výkonu reaktoru [24].

Palivové tablety jsou vysoké 9 mm [38]. Obsahovali středový otvor, který s postupným vyhoříváním paliva měnil svoji podobu. [24]. Výška sloupce z palivových tablet činí 2,42 m. Ovšem v průběhu provozu podléhá palivo deformacím a vlivem tepelné roztažnosti se může sloupec natáhnout až o 6 cm [8].

Pokrytí se zhotovuje ze zirkoniové slitiny E110, obsahující 1 % niobu. Tento typ pokrytí je při nižších teplotách odolnější vůči oxidaci než slitiny Zircaloy, ale při teplotách vyšších (nad 800°C) absorbují více vodíku než slitiny Zircaloy a tedy více křehnou [24]. Ač se v nynější době reaktory nové VVER–440 již skoro nestaví, stále se pracuje na vývoji paliv. Od roku 1998 se používá profilovaný typ palivových tablet tj. v palivovém souboru se nachází nejméně dva druhy palivových tyčí.

Distanční mřížky jsou voštinového typu. Spodní mřížka je pevně spojena s dolní koncovkou. Spojeny jsou vodící trubkou. Vyrábějí se z ocele. Ta má oproti zirkoniovým slitinám větší odolnost vůči creepu [34].

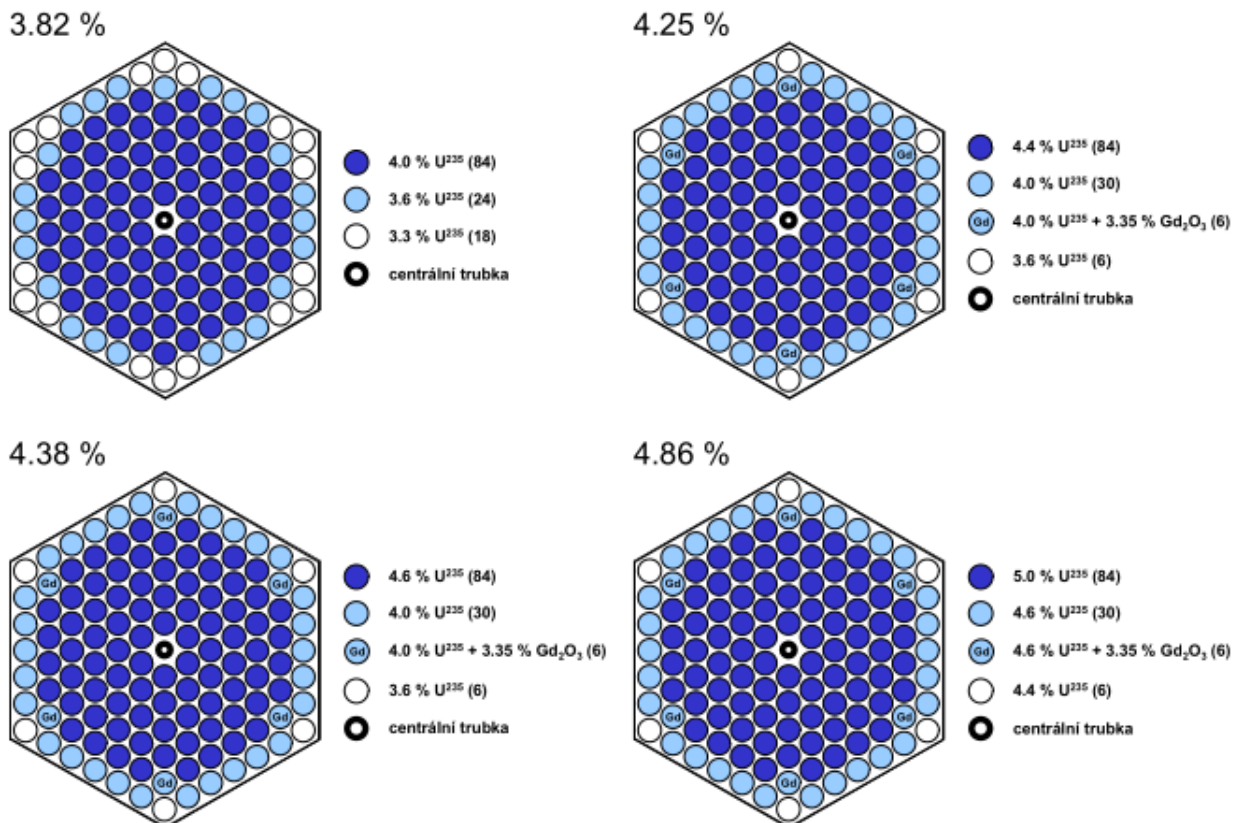
Za dlouhou dobu provozu reaktorů VVER–440 prošlo palivo mnohými úpravami. Tab. 1.3 shrnuje časový vývoj kazet. Na začátku bylo palivo bez jakékoliv profilace. V moderních kazetách se na místě některých palivových proutků nalézají proutky s příměsí vyhořívajícího absorbátoru. Jako vyhořívající absorbátor se používá oxid gadolinia Gd_2O_3 . Také obohacení proutků bývá v různých pozicích v souboru jiné. Ukázka uspořádání je na obr. 1.5.

Pro termohydraulické výpočty je nutné znát rozměry paliva a hustotu tepelné energie, která se z něho uvolňuje. Chladivo protéká jednotlivými palivovými soubory tj. i vzájemné rozestupy mezi sousedními proutky je důležité znát. Podrobně jsou palivový soubor a celá aktivní zóna popsány v tabulkách 1.4 a 1.5.

⁴U VVER–440 se často místo o souborech hovoří o kazetách.

Tabulka 1.3: Vývoj palivového souboru VVER-440, [37]

Rok	před 1998	rokem	po roce 1998	po roce 2003	po roce 2010
typ palivového souboru	pravidelný RK s obálkou		pravidelný RK s obálkou	druhá generace RK s obálkou	druhá a třetí generace RK
Typ svazku obohacení paliva, %	neprofilovaný 3,60		neprofilovaný 3,82	profilovaný, Ugd 4,25/4,38	profilovaný, Ugd do 4,87
vyhoření, MWd / kgU	36		45	57	65
palivový cyklus, roky	3,60		4	5	6



Obrázek 1.5: Varianty profilování palivových souborů VVER-440, [37].

Tabulka 1.4: Aktivní zóna reaktoru VVER–440

Parametr [veličina]	Hodnota
Výška AZ [m]	2.88
Průměr AZ [m]	2.42
Počet kazet [-]	349
Počet proutků v kazetě	126
Tepelný výkon AZ [MW]	1375
Počet smyček [-]	6
Tlak v primárním okruhu [MPa]	12,5
Vstupní teplota [° C]	267
Změna teploty v AZ [° C]	30
Průtok chladiva [kg/s]	8800

Tabulka 1.5: Palivový proutek reaktoru VVER–440

Parametr [veličina]	Hodnota
Průměr proutku [mm]	9,1
Průměr peletky [mm]	7,8
Krok mříže [mm]	12,2
Tvar mříže [-]	trojúhelníková
Průměrný lin. tepelný výkon proutku [kW/m]	83.0
Počet distančních mříží [-]	11

1.2.3 Palivo reaktoru VVER–1000

Návrh reaktoru VVER–1000, v porovnání s předchozím typem, zavádí klastrovou regulaci označovanou zkratkou RCCA. Palivový soubor je větší a obsahuje více palivových tyčí. V každém ze 163 palivových souborů AZ se nachází 312 palivových tyčí. Soubor je bezobálkový.

Design TVSA společnosti TVEL je nejrozšířenější. Používá se na 21 jaderných elektrárnách [30]. V průběhu času se vydělily různé typy návrhů jako např. TVSA-PLUS, TVSA-12PLUS nebo TVSA-T a další. Poslední byl připraven pouze pro JE Temelín z důvodu přechodu od paliva VVANTAGE–6 (palivo firmy Westinghouse) k palivu TVSA, ke kterému mělo původně dojít přes směšnou zónu [6]. Jejich konstrukční odlišnosti jsou uvedeny v tab. 1.6. Z tabulky je vidět, že počet distančních mříží varíruje od osmi do patnácti. Také debris filtr není vždy součástí konstrukce. V tabulce jsou rovněž uvedeny hodnoty průměrů středových otvorů. Ty se ale u palivových tablet již nedělají. Na obr. 1.6 je vidět i různá konstrukce horních koncovek u jednotlivých typů. Hrany souboru u výrobce TVEL vždy tvoří tzv. úhelníky ⁵ kvůli zlepšení mechanických vlastností.

⁵Výjimku tvoří pouze 5. blok Novovoronežské JE [12]

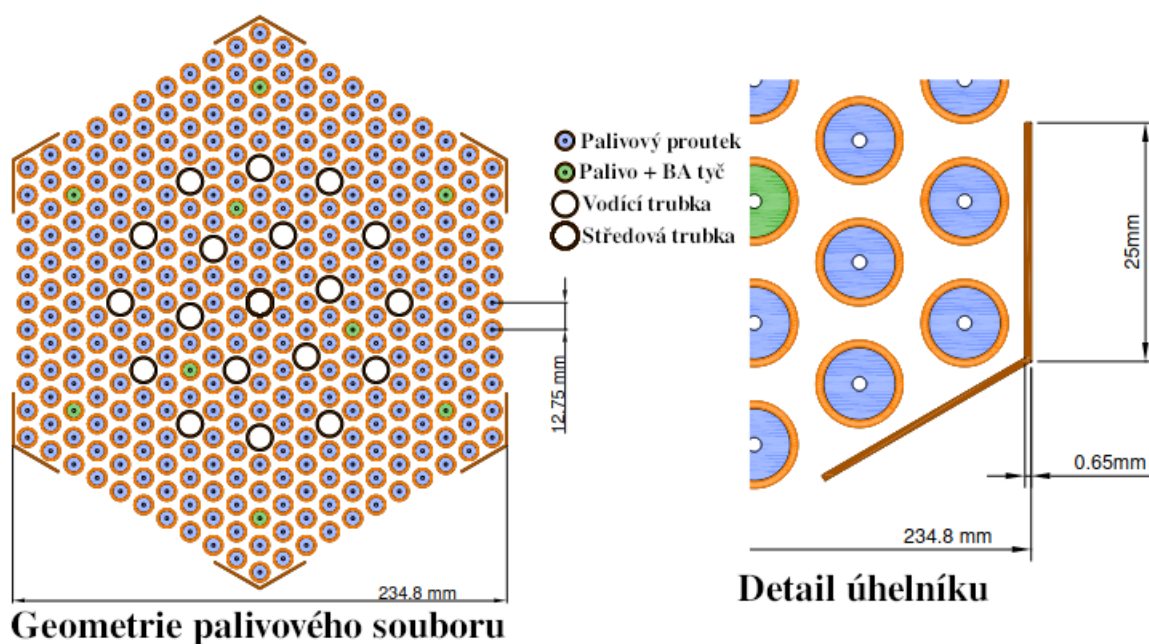
Tabulka 1.6: Technické parametry palivových souborů TVSA, [32]

Verze	Protivibrační mřížka			Počet distančních mřížek		Výška distanční mřížky [mm]		Horní koncovka s měřením teploty	Debris filtr	Výška aktivní části proutku	Průměr pokrytí	Průměr středového otvoru
TVSA				15	20					3535	7,57	1,4
TVSA-N	*	*	*	11	35	*	*			3535	7,57	1,4
TVSA-U	*	*	*	15	20					3680	7,57	1,4
TVSA-5			*	15	20	*				3530	7,6	1,2
TVSA-5M	*	*	*	15	20	*				3530	7,6	1,2
TVSA-PLUS	*	*	*	8	35	*	*			3530	7,6	1,2
TVSA-T	*	*	*	8	35	*	*			3680	7,57	1,4
TVSA-5M	*	*	*	15	20	*	*			3530	7,6	1,2
TVSA-ALPHA	*	*	*	8	35	*	*	*		3530	7,6	1,2
TVSA-ALPHA	*	*	*	8	35	*	*	*		3530	7,8	-
TVSA-ALPHA w/ IFMs	*	*	*	8	35	*	*	*	*	3530	7,8	-
TVSA-PLUS	*	*	*	15	20	*	*	*		3680	7,6	1,2
TVSA-12	*	*	*	12	35	*	*	*		3530	7,8	-
TVSA-12PLUS	*	*	*	12	35	*	*	*	*	3680	7,8	1,2



Obrázek 1.6: Vyobrazení souborů TVSA [32].

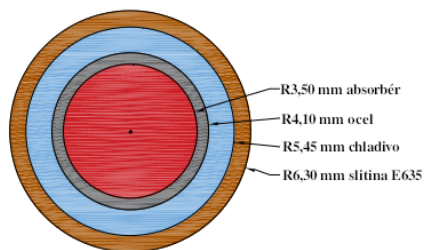
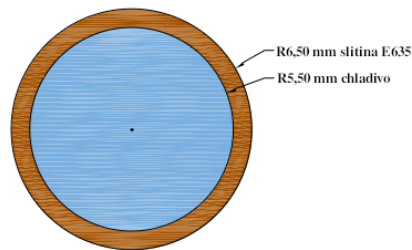
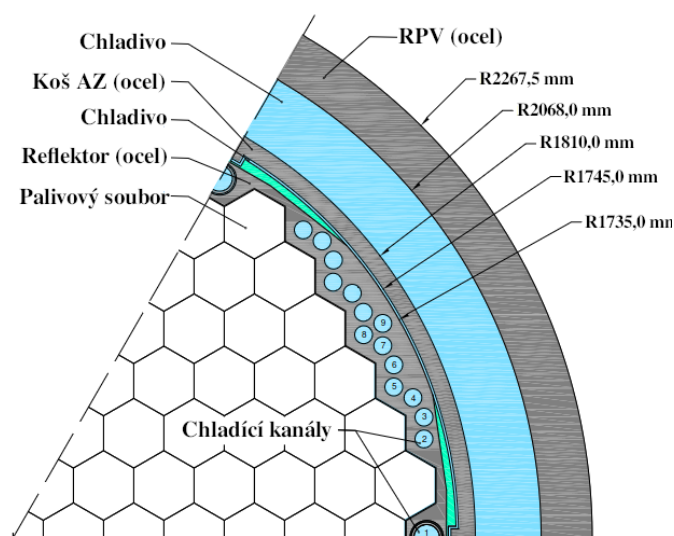
Palivový soubor má ve studeném stavu výšku 355 cm . Jeho povrch ale není cele hladký. Jsou na něm umístěny distanční mříže, které se projeví jako místní rozšíření souboru v kolmém řezu.

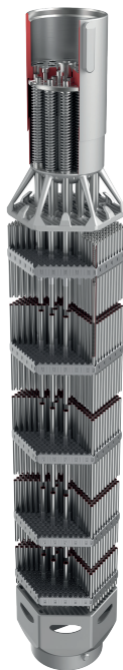


Obrázek 1.7: Palivový soubor TVSA [5]

Tabulka 1.7: Rozměry palivového souboru TVSA

Parametr	Hodnota
Assembly lattice pitch [mm]	236
Flat-to-flat assembly size [mm]	234,8
Rod lattice pitch [mm]	12,75
Aktivní výška [mm]	3530
Počet palivových proutků	312
Počet vodících trubek	18
Počet centrálních trubek (?)	1
Počet úhelníků v souboru	6
Šířka úhelníku [mm]	25
Tloušťka úhelníku [mm]	0.65
Materiál	slitina E635

**Obrázek 1.8:** Vertikální řez vodící trubkou souboru TVSA.**Obrázek 1.9:** Vertikální řez centrální trubkou souboru TVSA.**Obrázek 1.10:** Otok AZ



Obrázek 1.11: Palivový soubor VVER–1000 typ RWFA [40]

Tabulka 1.8: Základní údaje AZ VVER–1000

Parametr	Hodnota
Aktivní výška AZ [m]	3530
Ekvivalentní průměr AZ [m]	3,16
Průměrný lineární výkon proutku [kW/m]	15,73
Průměrná hustota výkonu paliva [kW/kg _U]	108
Materiál pokrytí	Slitina E-110
Vnější průměr proutků [mm]	9,10

Tabulka 1.9: Základní termohydraulické údaje vybraného modelu VVER–1000

Parametr	Hodnota
Nominální výkon [MW _e]	1060
Pracovní tlak [MPa(a)]	15.7
Teplota na výstupu [°C]	321
Teplota na vstupu [°C]	291
Průtok AZ [m ³ /h]	

Pro srovnání s palivy TVSA bude krátce popsán i jiný typ od jiného výrobce. Na obr. 1.11 je pro ilustraci znázorněn typ firmy Westinghouse RWFA - Robust Westinghouse Fuel Assembly společně s typem LTA - Lead Test Assembly, kterých bylo v roce 2019 instalováno šest do AZ Temelínského bloku č.1 . Technické parametry palivového souboru jsou vypsány v tab. 1.10.

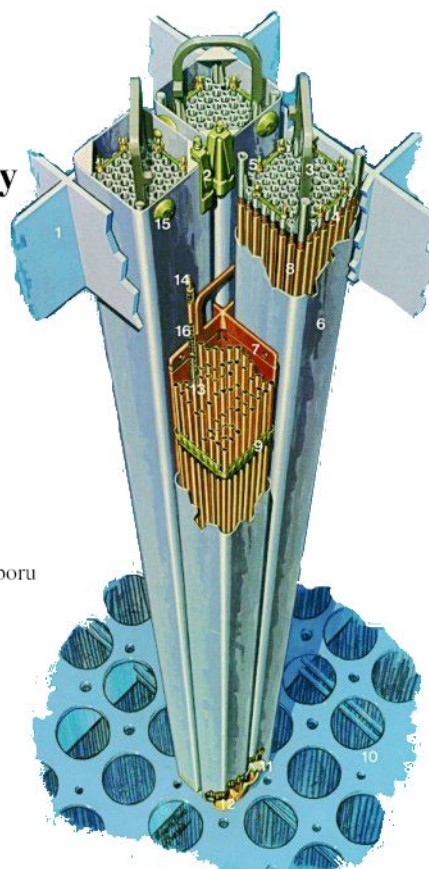
Tabulka 1.10: Parametry RWFA a LTA souborů, [5]

Parametr [jednotka]	RWFA	Temelín LTA
Hmotnost paliva (v proutku / v souboru) [kg UO ₂]	1,77/550,8	1,83/569,6
Aktivní délka [mm]	3530	3650
Délka blanketu (spodní/horní) [mm]	152,4/152,4	120/150
Base of fuel stack in relation to Rb-plane [mm]	228,4	203,5
Šířka/délka palivového souboru (od Rb plochy) [mm]	234/4520	234/4520
Vnitřní/vnější průměr proutku [mm]	8,001/9,144	8,001/9,144
Průměr tablety [mm]	7,844	7,844
Materiál proutku	Opt ZIRLO	Opt ZIRLO
Materiál hlavních částí souboru	Nerezová ocel/ZIRLO	Nerezová ocel/ZIRLO
Počet proutků v souboru	312	312
Počet vodících trubek	1	1
Počet řídicích trubek	18	18
Rozteč proutků [mm]	12,75	12,75
Počet mřížek v souboru (všechny typy)	16	13
Délka proutku [mm]	3898,1	3908
Plnicí tlak proutku [MPa]	2	2
Plnicí plyn	He	He

1.3 Reaktory BWR a jejich palivo

BRW/6 palivové články & modul řídících tyčí

1. Horní vodič paliva
2. Distanční prvek
3. Držák souboru
4. Přítlačná pružina
5. Zajišťovací západka
6. Obal souboru
7. Řídící tyč
8. Palivový proutek
9. Distanční mřížka
10. Dolní nosná deska
11. Dolní spojovací deska
12. Spojovací mřížka souboru
13. Palivové tablety
14. Horní koncovka PP
15. Distanční prvek
16. Pružina v PP



Obrázek 1.12: Palivový soubor BWR reaktoru, [25]

BWR reaktory jsou hned za PWR reaktory druhými nejrozšířenějšími na světě. Podle [13] je k datu psaní této práce v provozu 49 reaktorů BWR.

Konstrukce BWR reaktorů se liší od konstrukce PWR reaktorů v mnoha ohledech. Např. nelze jasně hovořit o primárním a sekundárním okruhu, ale jen o primární a sekundární části jednoho okruhu. Pára se vyvíjí přímo v AZ reaktoru a je to právě tato pára, která je vedena na turbínu. Není tedy potřeba instalovat parogenerátor. Tím, že BWR reaktory nemusí udržovat chladivo v kapalném stavu, není potřeba mít v okruhu tak vysoký tlak jako u reaktorů PWR. Reaktory se vyznačují velkým záporným dutinovým koeficientem reaktivity.

Regulační tyče v AZ jsou tvaru kříže. Jelikož se v horní část aktivní zóny nalézají separátory a vysoušeče páry, zasouvají se regulační tyče do aktivní zóny ze zdola.

Palivový soubor je čtvercového tvaru a má vždy obálku. Obvykle bývají počty proutků v souboru 6x6, 8x8, 10x10 palivových proutků. Skupina čtyř palivových souborů, mezi nimiž se nachází regulační tyč, se nazývá palivový modul. Aktivní zónu tedy tvoří soustavy těchto modulů. Na obr. 1.12 je vyobrazen soubor firmy Global Nuclear Fuel.

Palivový proutek je stejně jako u PWR reaktorů válcového tvaru. Rozmístěny jsou ve čtvercové mříži souboru. Od obalu souboru je oddělují boční pružinky, které se u PWR reaktorů nevyskytují.

Mezi reaktory BWR se řadí i, původně sovětské, reaktory RBMK. Tyto reaktory postrádají tlakovou reaktorovou nádobu. Palivové soubory se umísťují vertikálně do tlakových kanálů (vysoké kolem 7 metrů), kterých může být, podle výkonu, od 1500 do 2000. Reaktor je moderovaný grafitem a chlazený lehkou vodou.

Palivový soubor je tvořen 18 proutky. Výška každého proutku je 3,5 m. Palivový soubor sestává ze dvou nad sebou spojených svazků.

V tabulce 1.11 jsou pro srovnání uvedeny termohydraulické parametry pro vybrané BWR reaktory.

Tabulka 1.11: Porovnání tlaků a teplot u vybraných BWR reaktorů, [20]

Výrobce	General Electric	General Electric	General Electric
Tlak chladiva (<i>MPa</i>)	7.14	7.17	7.17
Vstupní teplota (<i>°C</i>)	278	278	272
Výstupní teplota (<i>°C</i>)	286.1	286.2	286.5
Průměrný průtok (<i>kg/s</i>)	13.67	14.5	10
Průměrná výstupní suchost (%)	14.5	14.5	17

1.4 Namáhání paliva

Palivo při provozu reaktoru postupně vyhořívá. To způsobuje změnu jeho izotopického složení. Vyhoříváním vznikají i plynné produkty štěpení (xenon, krypton, helium a další), které opouští tablety a shromažďují se v tzv. plénu. I pokrytí podléhá změnám. V krajním případě při vysokých teplotách, přesahujících 1000°C, dochází k extenzivní reakci zirkoniového pokrytí s vodou. Následující text shrne, k jakým změnám v palivu v důsledku ozařování neutrony dochází a jaké limity jsou na palivo kladeny.

1.4.1 Chování paliva

Procesy v palivu jsou obecně úměrné hustotě toku neutronů, ozařovacímu času (dohromady tedy úměrné vyhoření) a teplotě. Podléhají jim jak tablety, tak i materiál pokrytí [23].

V pokrytí, zhotovovaném ze zirkoniových slitin, dochází v průběhu provozu reaktoru k postupné oxidaci a tedy ke korozi a hydridaci. V extrémních podmínkách může dojít i k koroznímu nebo napětovému praskání.

Ve vodném prostředí podléhá oxidaci a vytváří se tenká zoxidovaná vrstva. Jak se tato vrstva postupně zvětšuje, dochází k napětí mezi jednotlivými zoxidovanými vrstvami, které vede k jejich praskání. Proto se do zirkoniových slitin přidává niob (např. slitiny ZIRLO), který posouvá hranici praskání v důsledku vnitřního napětí.

Hydridací, která je rovněž zapříčiněna okolo protékající vodou, dochází ke křehnutí pokrytí. Rychlost hydridace a oxidace je proces závislý na teplotě..

K poškozování pokrytí dochází i vzájemnou interakcí mezi pokrytím a tabletou. tzv. PCI interakce. Tableta vlivem teplotní roztažnosti zvětšuje svůj objem a doléhá na pokrytí. Cesium a jod, což jsou produkty štěpení, navozují korozní prostředí [10]. Trhliny se šíří od vnitřní strany pokrytí k vnější straně, jak znázorňuje obr. TODO ([23] str. 312).

Jednou z možností, jak zmírnit průběh PCI, je přidání lubrikační vrstvy na tabletu, nebo pokrýt vnitřní plochu pokrytí, k čemuž se používají např. grafit, měď nebo čistý zirkon [23].

Firma General Electrics vyvinula pokrytí TRICLAD. Na vnitřní i vnější straně se nachází slitina Zircaloy-2 [23]. Framatome používá Zr-0.4Fe a Westinghouse ZrSn [39].

1.4.2 Limity a podmínky

Při návrhu paliva a obecně aktivní zóny PWR reaktoru je potřeba dbát na bezpečnost jaderného zařízení. Limitují se jak podmínky provozní, tak i přechodové podmínky. U těchto je například důležité nepřekročit teplotu pokrytí [35].

Limity pro LWR reaktory můžeme kategorizovat do čtyř skupin [20]:

- teplofyzikální limity
- konstrukční limity
- chemické limity
- limity hydrodynamické stability

Teplofyzikální limity omezují teplotu, výkon a tepelný tok.

Vzhledem ke složitosti vztahů mezi veličinami při provozu reaktoru se limity vztahují ke konkrétním teplotám a tepelným tokům. Veličina DNBR (odstup od krize varu) je závislá na použitých výpočetních korelacích při určování kritického tepelného toku při jádrovém varu chladiva. Na obr. jsou zaznamenány omezované veličiny a limity vztažené k normálnímu provozu a přechodovým podmínkám.

Tabulka 1.12: Typické limity pro reaktory PWR a BWR [35]

Veličina	PWR	BWR
Limit poškození	1% pokrytí nebo MDNBR < 1.0	1% pokrytí nebo MCPR < 1.0
Limity návrhu		
Teplota středové osy tablety		
Provozní stav	-	-
Jiný stav	Žádné tavení	Žádné tavení
Průměrná teplota pokrytí		
Provozní stav	-	-
Jiný stav	< 1204°C (LOCA)	< 1204°C (LOCA)
Tepelný tok na povrchu tablety		
Provozní stav	-	MCPR > 1.2
Jiný stav	MDNBR > 1.3 při výkonu 112%	-

Kapitola 2

Deformace paliva

Za provozu reaktoru dochází vlivem vývinu tepla, neutronového toku a mechanickému namáhání vnitřních částí reaktoru proudícím chladičem ke geometrickým změnám palivových proutků a také celých souborů. Mezi změny patří i deformace. Deformace palivových souborů a proutků jsou dva odlišné jevy, které s sebou ale úzce souvisejí. Průhyb palivového souboru deformuje proutky. V souboru vedou deformace palivových proutků, resp. jeho pokrytí, ke změnám v průřezu průtočného kanálu, a tím ovlivňují proudění chladiča a tím i odvod tepla z palivových elementů, který se může zhoršit, ale i zlepšit. V krajním případě může dojít k úplnému zamezení odvodu tepla. Tyto situace nastávají při přechodových stavech nebo při havarijních podmínkách a je nutné se zabývat modelováním různých situací (např. LOCA havárií), kde se budou vlivy deformací zkoumat.

Ve vodicích trubkách se pohybují řídicí tyče, jež slouží k regulaci hustoty toku neutronů v reaktoru a jsou jedním z klíčových prvků pro zajištění bezpečného provozu reaktoru. V případě nehody je důležité rychlé zasunutí tyčí do reaktoru, čímž se zastaví štěpná řetězová reakce a reaktor se odstaví. Byly již pozorovány případy, kdy se nepodařilo řídicí tyče plně zasunout. Tento jev se označuje zkratkou IRI. Vůbec poprvé byl pozorován roku 1994 na švédské JE Ringhals na jejím 4. bloku. Za příčinu byla označena deformace palivového souboru, který se prohnul a zakřivil tak dráhu pro zasunutí rovné neohebné tyče. Od té doby se sledují i další případy IRI. V Německu byla zvýšená četnost tohoto jevu zaznamenána po roce 2000.

Příčinu v deformaci palivových souborů je třeba hledat v silách působících na kostru souboru. Neutronový tok způsobuje swelling v konstrukčních materiálech souboru, který bývá nerovnoměrný. Dalším jevem je teplotní roztažnost materiálů, nedokonalost výroby souboru a jiné [4].

Hustota neutronového toku je svázána s výkonem. Rozložení výkonu souvisí i se vzdáleností dvou sousedních palivových souborů. Dochází-li k průhybu souboru, mezera mezi soubory se zvětšuje a tím se nerovnoměrnost v rozdělení výkonu zvětšuje [22].

Hlavním problémem při zkoumání průhybů souborů je obtížnost přímého měření v AZ reaktoru. Zkoumat lze soubory pouze vně reaktoru. Simulované podmínky ale mohou dávat jiné výsledky, než jaké jsou uvnitř reaktoru za provozu. Výpočetní kódy, které by stanovili chování souboru v reaktoru založených na vněreaktových

pozorováních jsou ve fázi validace [4].

2.1 Průhyb palivového souboru

V první kapitole byl zmíněn úkol distančních mřížek držet palivové proutky ve své radiální poloze. K tomuto úkolu slouží pružinky distančních mříží. Při provozu reaktoru ale působí proutky na pružinky silou a vzniká napětí, které se přenáší na kostru souboru. Postupem času ale pružinky zrelaxují a dojde ke snížení napětí mezi proutky a souborem. Právě vzájemné napěťové působení je primárním zdrojem ohybu palivových souborů. [14]

Palivové soubory se v AZ mohou prohýbat každý zvlášť, nebo kolektivně. Kolektivní ohyb nastává v důsledku malých vzdáleností mezi soubory a jeden dostatečně deformovaný soubor může působit na sousední. Většinou nastává individuální průhyb. Každý soubor je nutné modelovat zvlášť, což tvoří třídimensionální problém. Soubory se mohou prohýbat do různých tvarů označených písmeny latinské abecedy, jejichž tvar připomínají. Jsou rozlišovány průhyby typu S, V, W, U, C.

Po zjištění problému na JE Ringhals byly započaty práce na zlepšení odolnosti souborů vůči průhybům. Společnost Westinghaus, jež je dodavatelem paliva pro elektrárnu Ringhals, začala s inspekcí průhybů i na jiných elektrárnách, kde byl tento jev též objeven. Podobně je tomu i u reaktorů typu VVER. Pozorování v USA a v SRN od roku 2006 do roku 2015 je shrnuto v tabulce 2.1 [11].

Tabulka 2.1: Průhyb palivových souborů PWR reaktorů v USA a SRN, [11]

stát	typ	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	celkem
USA	A						4			3		7
	B									1		1
	C						15	37	16	16	10	94
	D						0					0
SRN	E	1		1		1						3

Legenda: A - průhyb souboru, B - průhyb souboru s neznámým počtem poručených souborů, C - průhyb souboru zapříčínující poškození distanční mřížky, D - průhyb souboru zapříčínující otěr, E - průhyb v souborech 16 x 16

2.2 Deformace palivových tyčí

Stejně jako soubory, podléhají deformacím i palivové tyče. K deformacím dochází v důsledku dlouhodobého ozáření proutku, creepu, teplotních gradientů a sil od radiálního proudění chladiva. [26]

Bohužel je v současné době množství otevřené literatury zabývající se problematikou deformací palivových proutků a jejich vlivu na termohydraulické výpočty

omezené. Deformace palivových souborů je komplexní problém a mimo vliv na termohydraulické výpočty se projeví i výpočty neutronické či termomechanické.

Deformace mají vliv na rozložení výkonu v AZ a tím vliv na neutronické a termohydraulické výpočty. Rozložení výkonu má velký vliv na CHF a tím na DNBR. V kanále chladiva u deformovaného prouku může dojít k varu chladiva, což, jak bude vysvětleno ve třetí kapitole, vnáší do výpočtu další nepřesnosti. Je-li omezeno standardní chlazení, jako je tomu např. u LOCA havárie, při provozu reaktoru v AZ, dochází k nadměrnému zahřívání palivového pokrytí a zvyšuje se vnitřní tlak. Pokrytí poté napuchá. Tomuto jevu se říká ballooning. Pokrytí může v důsledku napuchání prasknout, nebo vydrží soudržné a jejím roztažením může ucpat kanál chladiva.

Stav palivových tyčí se zjišťuje pravidelně. Velmi často se posuzuje opticky. Soubor se postaví proti kameře a následně se z něj pořídí snímky, které se následně zkoumají. Na obr. 2.1 je vidět palivový soubor z JE Temelín, na němž přítomnou deformaci je vidět již pouhým okem. K měření průhybů se dá použít i měřidel např. pravítek, která se přikládají k souboru a jsou s nimi vyfocena. Příklad je k vidění na obr. 2.2.

Přes svoji jednoduchost je ale vizuální přístup méně přesný, než jiné metody. Mezi její úskalí patří nekontaktnost měření. Dále záleží na správném uložení kamery a správném záběru souboru, např. správně nastavený úhel apod. Dalším problémem je velikost zkoumaného souboru. Přistupuje se k postupnému snímkování souboru. Zde se musí dbát na správný posun kamery vůči souboru, aby snímky dobře navazovaly. Metodou se nemusí pořizovat jen jednotlivé snímky, ale i video.

Vedle vizuální metody se objevují a zdokonalují metody jiné, např. měření pomocí ultrasonického systému.



Obrázek 2.1: Snímek Temelínského palivového souboru, [16]



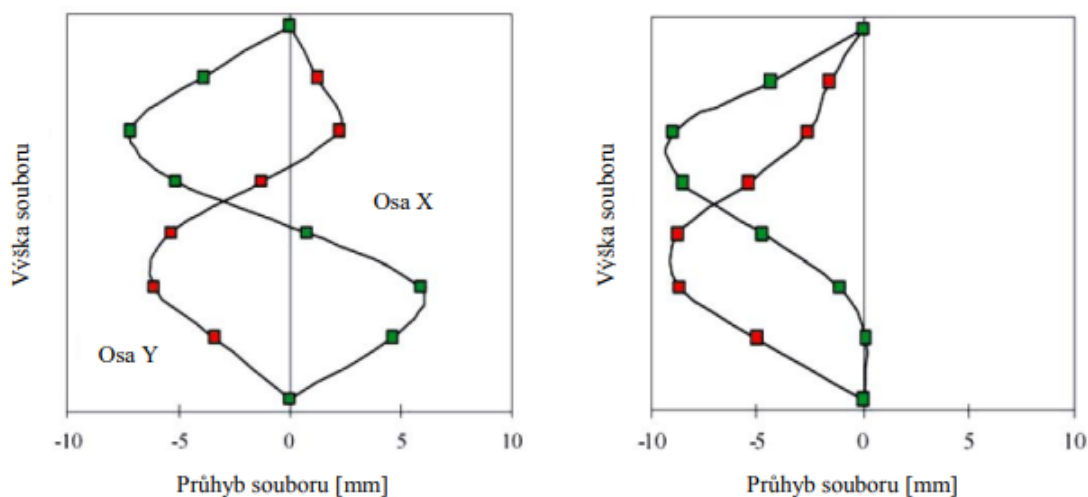
Obrázek 2.2: Snímek souboru při měření pomocí pravítek, [16]

2.3 JE Ringhals

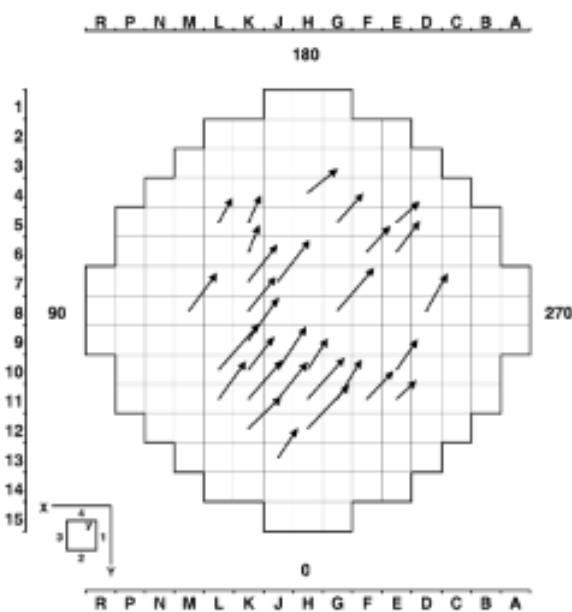
Ve švédské jaderné elektrárně Ringhals došlo na jejím čtvrtém bloku v roce 1994 k události IRI. Důvodem bylo zvýšené tření mezi regulační tyčí a vodící trubky. Ukázalo se, že došlo k ohybu palivového souboru. Tento se prohl do tvaru S s výchylkou 20 mm. V zóně došlo ale k ohybu všech souborů.

V roce 2000 byl znovu pozorován průhyb souborů, nyní na druhém bloku elektrárny. Ukázala se možná spojitost s rozložením výkonu reaktoru. Tyto souvislosti byly zřejmé i z třetího a čtvrtého bloku.

Při výměně paliva se obvykle testuje vzorek dvaceti souborů, jestli nedošlo k jejich deformaci. Bylo zjištěno, že na čtvrtém bloku dominuje tvar průhybu S zatímco na druhém a třetím bloku je to typ C, jak je vidět z obr. 2.3. Schema ohybu souborů v AZ 2. bloku JE Ringhals je zobrazeno na obr. 2.4.



Obrázek 2.3: Průhyb palivového souboru typu S a C, [2]

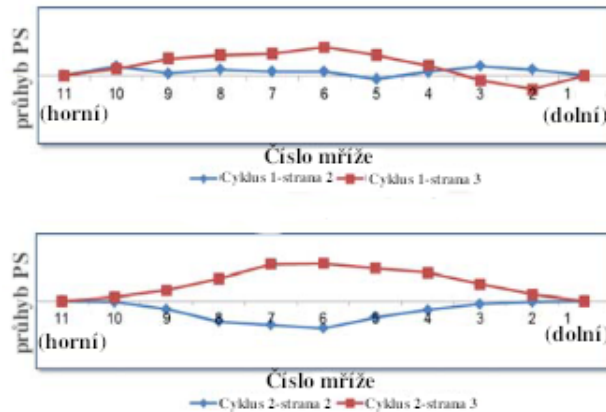


Obrázek 2.4: Schema průhybu palivových souborů, [2]

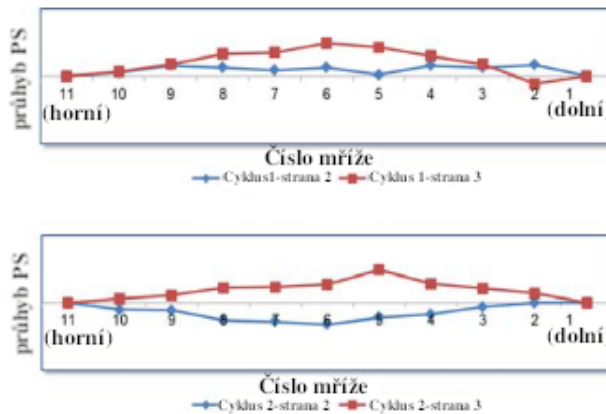
Po těchto zkušenostech došlo ke zvýšenému monitorování AZ reaktorů. Vždy v polovině kampaně se zastavil provoz bloku, aby se překontrolovala funkčnost regulačních tyčí. Došlo ke konstrukčním změnám palivových článků. Např. byly revidovány přítlčné síly souboru. V důsledku konstrukčních změn se maximální průhyb změnil z původních $20/9\text{ mm}$ na $6/4.5\text{ mm}$ na třetím bloku. Podobně tomu bylo i na čtvrtém bloku elektrárny. Bezpečnostní analýzou byl stanoven limit pro maximální průhyb souborů, a to 13 mm na Ringhals 3 a 4. Ostatní bloky už nejsou v provozu. Událostem IRI se již na elektrárně úspěšně předchází.

2.4 Soubory HIPER16

Na korejské jaderné elektrárně Hanul probíhalo zkoušení palivových souborů HIPER16 od společnosti KNF. Sledován byl průhyb palivových souborů. Některé soubory měli distanční mřížky vyrobené z materiálů ZIRLO, jiné HANA. Bylo zjištěno, že typický tvar průhybu pro toto palivo je tvar S. Na výběru materiálu mřížek záleželo jen málo. Výsledky pro srovnání obou typů souborů jsou na obr. 2.5 a 2.6.

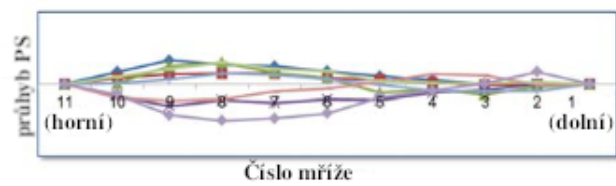


Obrázek 2.5: Průhyb souboru HIPER16 s materiálem HANA

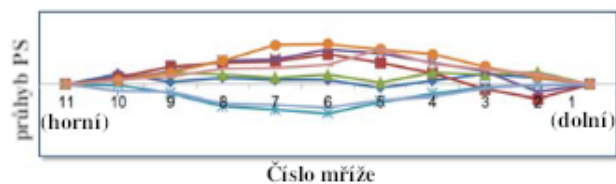


Obrázek 2.6: Průhyb souboru HIPER16 s materiálem ZIRLO

Podobný experiment probíhal i na elektárnách Ulchin a Kori se soubory PLUS7, 17ACE7 a 16ACE7. V práci [26] je uvedeno srovnání průhybů pro soubory HIPER16 a PLUS7. Ukázalo se, že průhyby souborů vykazují jiný tvar. Zatímco k největšímu průhybu docházelo u souborů HIPER16 kolem středu souboru, u souborů PLUS7 k němu docházelo v jeho horní části, viz obr.



(a) PLUS (cyklus 1~2, ZIRLO)



(b) HIPER16 (cyklus 1~2, ZIRLO/HANA)

Obrázek 2.7: Srovnání průhyb souboru HIPER16 se souborem PLUS7

Kapitola 3

Termohydraulický výpočet AZ

Jedná se o jeden z výpočtů nutných k úspěšnému projektování a provozu jaderných zařízení. Řeší jak stacionární stavy, tak i přechodové a havarijní podmínky, důležité pro bezpečnostní rozbor. Výpočty stacionárních stavů si kladou za cíl stanovit limity a podmínky provozu, popsat teplotní pole v AZ a hydraulické charakteristiky. Vedle těchto výpočtů řeší i četné úlohy optimalizační (rozmístění, výměna palivových souborů atp.) [8]. Před zahájením výpočtů a zvolení vhodných matematicko-fyzikálních metod je důležité vědět, jak chladivo prochází aktivní zónou a k jakým jevům dochází.

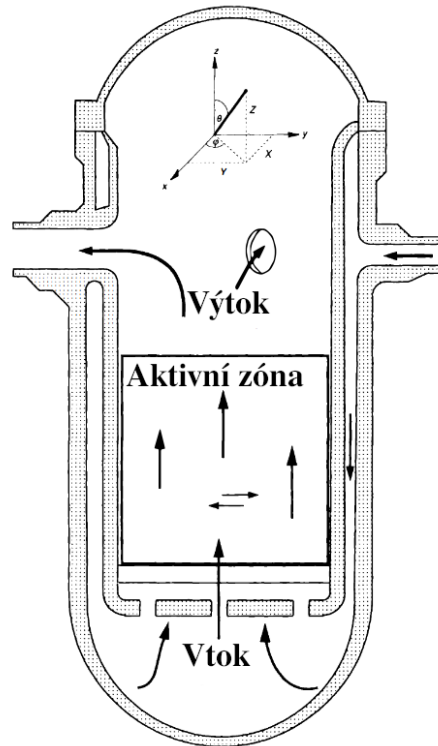
3.1 Průtok chladiva AZ

I přes odlišnost v konstrukci různých typů LWR reaktorů, podobají se alespoň v základních rysech v provedení průtoku chladiva reaktorem, jak názorně ukazuje obr. 3.1.

Chladivo je přiváděno do reaktoru vstupními nátrubky. Zpravidla bývá několik přírodních smyček. V těchto smyčkách může být mírně odlišný tlak, teplota či průtok chladiva. Po vstupu do reaktoru proudí chladivo dále do mezikruhového prostoru mezi stěnou reaktorové nádoby a nosným válcem AZ. Proudění se mísí jen zanedbatelně. Odtud postupuje chladivo směrem ke dnu nádoby do spodní komory. V dolní komoře dochází pak ke spojení proudů. Směšování je ale nedokonalé. Jeho kvalita záleží i na typu reaktoru. V reaktorech VVER-1000 je dolní směšovací komora relativně malá vůči komoře reaktoru VVER-440, protože se do ní zasouvá palivová část kazety HRK. Poté se proud obrací a vstupuje do AZ reaktoru, kde protéká soubory a smáčí pokrytí palivových proutků, z nichž odvádí teplo. V kapitole 1 byl diskutován vliv obálkovosti souboru na příčné mezisouborové proudění. V první kapitole je rovněž rozebrán vliv distančních mřížek na tlakové ztráty.

Aby se zvýšilo využití paliva, přistupuje se k hydraulickému radiálnímu profilování průtoku chladiva podle místního výkonu paliva. Toho se docílí instalováním clon na vstupu do palivových souborů. Instalace clony má jistě vliv na hydraulické charakteristiky.

Část chladiva (kolem 5 %) nevstupuje do aktivní zóny, ale obtéká ji. Tím chladí



Obrázek 3.1: Průtok chladiva AZ tlakovodního reaktoru [36]

vnitroreaktorové povrchy.

V horní komoře se všechno chladivo smísí a je vedeno do výstupních nátrubků, kterými opouští prostor reaktoru. Výstupní nátrubky jsou u PWR reaktorů umístěny do jednoho prstence společně se vstupními nátrubky, kdežto u reaktorů VVER jsou nad sebou umístěny prstence dva. Jeden pro nátrubky napájecí vody a druhý pro odtok vody z AZ.

Aby nedošlo k poškození paliva, je nutné zabezpečit nepřetržité chlazení AZ za provozu a její dochlazování po odstavení reaktoru. Pro zachování bezpečného provozu reaktoru je zapotřebí omezit hodnoty některých veličin.

3.2 Termohydraulické limity

Tepelný výkon reaktoru nelze totiž z pohledu termohydrauliky libovolně měnit. Limitem jsou například následující veličiny

1. maximální přípustná teplota jaderného paliva
2. maximální přípustná teplota pokrytí palivového proutku
3. maximální přípustná teplota chladiva na výstupu z AZ
4. kritický tepelný tok (CHF)

V případě limitů na teplotu jaderného paliva se může jednat o teplotu tavení UO_2 nebo pro kovový uran teplota přechodu od fáze α k fázi β . Dále třeba musí

být tepelný tok v celé aktivní zóně bezpečně menší, než-li kritický tepelný tok, aby nedošlo k narušení paliva. Tuto hodnotu sleduje parametr DNBR, který je vysvětlen v první kapitole.

Je též důležité rozlišit druh proudění. U PWR reaktorů se většinou uvažuje proudění jednofázové, ale lokálně může vzrůst entalpie chladiva natolik, že dojde ke vzniku páry. V takovém případě se uvažuje proudění dvoufázové. Velkou roli hraje dvoufázové proudění zejména v havarijních podmínkách, kdy může dojít k prudkému poklesu tlaku v primárním okruhu a tím ke globálnímu vypařování chladiva.

Termohydraulický výpočet zahrnuje výpočet CHF, vliv rozdělení výkonu, tepelnou odezvu aktivní zóny. Fyzikální podmínky ale nejsou v každém kanále stejné. Vlivy nepravidelností v rozložení výkonu, teplotních odchylkách atd. vedly k vypracování koncepce tzv. *horkého kanálu*.

3.3 Horký kanál

Myšlenka horkého kanálu dává možnost vypořádat se se započítáváním nerovnoměrností veličin v různých kanálech AZ. V jednotlivých kanálech se totiž bude lišit měrný tok chladiva, vývin tepla atd. Horký kanál je myšlený kanál a platí, že v kanálech aktivní zóny nepřekročí skutečné teploty hodnoty teplot v horkém kanále ani vlivem nepřesností v měření, ani náhodnými odchylkami od nominálního stavu [8].

Horký kanál je charakterizován *faktory horkého kanálu*. Dělí se na nukleární, spojené s fyzikou v AZ, a inženýrské, zahrnující v sobě nejen výrobní tolerance, ale i míru rozdělení průtoku, přestup tepla z paliva do chladiva atd. Celkový faktor je součinem obou dvou typů faktorů.

$$F_{celk} = F_{nuklear} \cdot F_{ing}$$

U PWR reaktorů se F_{ing} pohybuje okolo 1,04 [20].

Nukleární faktory $F_{nuclear}$ sledují rozložení neutronového toku v AZ. Nerovnoměrnost v rozložení neutronového toku má za následek nerovnoměrné rozložení výkonu. Jedná se vlastně o jeden faktor, jen se uvažuje buď z hlediska celé aktivní zóny, nebo jako faktor lokální. Celozónově zohledňuje situaci *faktor makroskopického radiálního rozložení toku* f_1 , který je definován [20]

$$f_1 = \frac{q_{max}}{q_{av}},$$

kde q_{max} je maximální hustota tepelného toku a q_{av} průměrná hustota tepelného toku. Takto je rovněž definována veličina *radiální součinitel nevyrovnání výkonu* K_r . Pro lokální hodnocení se zavádí *faktor místních odchylek*, zahrnující v sobě vliv mezer mezi kazetami, reflektor, částečně zasunuté regulační tyče aj. a jejich vliv na rozložení hustoty toku neutronů. Je definován jako podíl maximálního skutečného radiálního toku neutronů v daném místě a makroskopického radiálního toku v témže místě. [8].

Mezi inženýrské faktory F_{ing} patří faktor rozložení chladiva f_m , faktor součinitele přestupu tepla f_α , faktory výrobních tolerancí. V dřívějších dobách byly výpočty

zatíženy větší nepřesnostmi, což dalo vzniknout tzv. *deterministické koncepci* teorie horkého kanálu. Nevýhoda tohoto přístupu tkví v tom, že může udávat příliš velké rezervy. Tendencí je vyvážit přístup bezpečnostní a ekonomický. *Statistické metody* uvažují zkoumané veličiny za vzájemně nezávislé. Toho se například využívá při výpočtů inženýrských faktorů při výrobě palivových článků. Metody lze i kombinovat [8].

Mezi určující součinitele horkého kanálu tlakovodních reaktorů patří *součinitel chladiva* F_C a *součinitel teploty paliva* F_U . U inženýrských faktorů je nutné zohlednit tolerance při výrobě paliva (obohacení, rozměry atp.).

Napočítávání jednotlivých faktorů by bylo velmi obtížné, pokud by se brala v úvahu výroba každé peletky či tyče. Je důležité vycházet z dat výrobce nebo z experimentálního ověření z (třeba geometricky) podobných modelů [8].

3.4 Hydraulické charakteristiky

Hydraulickou charakteristikou se rozumí závislost celkové tlakové ztráty chladiva na jeho hmotnostním průtoku AZ [8]. Tyto charakteristiky mají vliv na přerozdělení proudu do jednotlivých průtočných kanálů. Dobrá charakteristika je monotónně rostoucí funkcí. Jednofázové proudění vody nebo páry tuto podmínku splňuje, jak bude ukázáno. Při dvofázovém proudění může docházet k různým situacím, které jsou blíže popsány v kapitole 3.5.

Bez ohledu na druh proudění, celková tlaková ztráta v libovolném kanálu se získá jako součet dílčích tlakových ztrát, jmenovitě ztráta na vstupu do kanálu (Δp_1), třením ($\Delta p_{tř}$), na urychlení chladiva (Δp_w), místními odpory (Δp_m), na výstupu z kanálu (Δp_2) a hydrostatická (Δp_ρ). Zapsáno matematicky

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_{tř} + \Delta p_w + \Delta p_m + \Delta p_2 + \Delta p_\rho$$

Výpočet jednotlivých ztrát závisí již na druhu proudění.

3.4.1 Ztráty při jednofázovém proudění

Ztráty třením

Ztráty třením jsou způsobeny zejména třením chladiva o povrchy pokrytí palivových proutků a vodicích trubek. Vyhodnocení tlakové ztráty probíhá za pomoci koeficientu tření, charakterizující jak vlastnosti obtékaného povrchu tělesa, tak i chladiva. Je zvykem používat Weisbachův koeficient tření

$$\Lambda_{tř}^W = \frac{2\Delta p_{tř}d_h}{\Delta l \rho w^2} \quad (3.1)$$

Někdy se lze setkat i s Fanningovým koeficientem třením $\Lambda_{tř}^F$, který je ve vztahu s Weisbachovým

$$\Lambda_{tř}^W = 4 \cdot \Lambda_{tř}^F \quad (3.2)$$

Z tvaru Weisbachova koeficientu tření lze vyjádřit tlakovou ztrátu třením

$$\Delta p_{tř} = \Lambda_{tř} \rho \frac{w^2 \Delta l}{2 d_h} \quad (3.3)$$

kde $\Lambda_{tř}$ je součinitel tření, ρ hustota kapaliny, w rychlost proudění, Δl délka, na které je změna sledována, a d_h ekvivalentní průměr kanálu.

Součinitel tření $\Lambda_{tř}$ je obecně funkcí Reynoldsova čísla Re a drsnosti potrubí k , typu a geometrii trubky. Graficky je tato závislost zobrazena na obr. 3.2. Z grafu lze soudit na některá zjednodušení při určování koeficientu tření.

Pro oblast laminárního proudění ($Re < 2300$) lze v kanálech kruhového průřezu pro výpočet $\Lambda_{tř}$ použít známou Poiseuillovu rovnici

$$\Lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.4)$$

Je vidět, že zde odpadá závislost na drsnosti k a koeficient tření je závislý nepřímě úměrně na Reynoldsově čísle.

V reaktorech se ale setkáváme často s kanály, který mají jiný průřez než kruhový. Pro takovéto kanály je doporučovaný vztah mírně odlišný.

Pro oblast turbulentní ($2300 < Re < 2 \cdot 10^5$) uvádí Blasius vztah pro hydraulicky hladké trubky

$$\Lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (3.5)$$

Pro svoji jednoduchost a široký rozsah platnosti se často používá jako první odhad součinitele tření [19].

V oblasti nad čárkovanou čarou již de facto odpadá závislost na Reynoldsově čísle a projevuje se pouze drsnost potrubí.

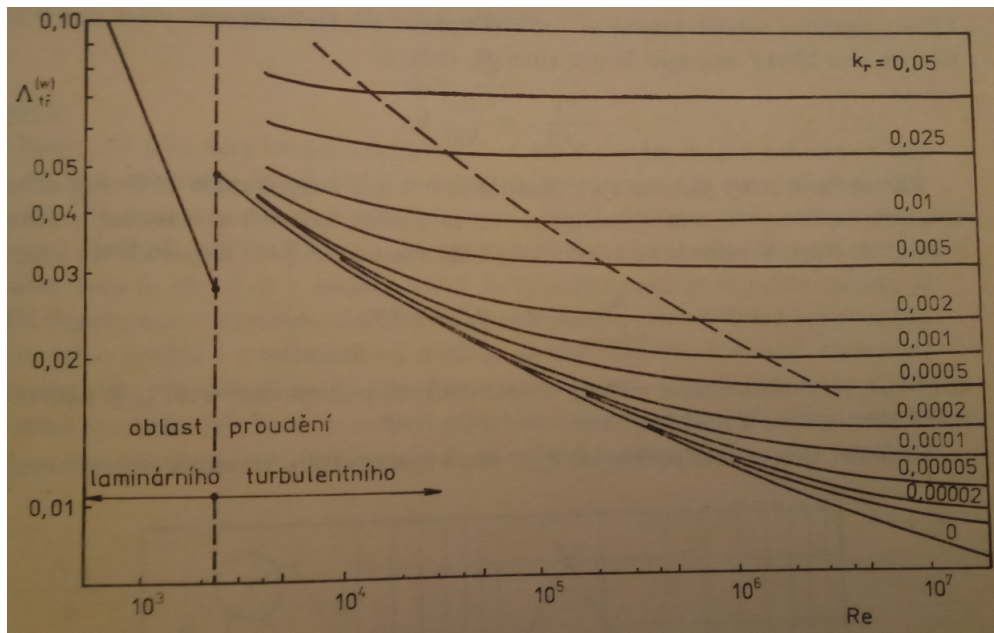
Pokud je obtékáný povrch ohříváný, s čímž se lze setkat při obtékání palivových proutků, dochází ke změnám ve viskozitě chladiva v mezní vrstvě, což také ovlivňuje koeficient tření.

Ztráty na místních odporech

Tlakové ztráty na místních odporech jsou způsobeny např. změnou průtočného průřezu, vytvořením kolene v potrubí, průtokem skrz mřížku atd. Dají se obtížně vyjádřit teoreticky a přesné hodnoty se zjišťují pouze experimentem. Záleží i na vzájemné vzdálenosti mezi místy s místními odpory, protože se mohou vzájemně ovlivňovat. Jako výpočetní odhad tlakové ztráty na místním odporu se používá vzorec

$$\Delta p_i = \xi_i \rho \frac{w_i^2}{2} \quad (3.6)$$

kde ξ_i je součinitel místního odporu v místě i , ρ hustota tekutiny a w její rychlost.



Obrázek 3.2: Moodyho diagram, [8]

Ztráta na urychlení chladiva

Tlaková ztráta na urychlení chladiva je důležitá především u plynem chlazených reaktorů (10 – 15 % celkové ztráty), protože souvisí se změnou měrného objemu látky způsobenou změnou její teploty v AZ. U PWR se ale bere do úvahy při přechodových stavech nebo havarijních podmínkách, kdy v AZ dochází ke vzniku páry [8].

Tuto tlakovou ztrátu lze přibližně vyjádřit vztahem

$$\Delta p_w = \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\dot{m}}{S} \right)^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\bar{\rho}}$$

kde $\bar{\rho}$ je střední hustota kapaliny v kanálu.

Ztráta hydrostatická

Jedná se o tlakovou změnu zapříčiněnou změnou výšky v gravitačním poli. V takovém případě je tlaková změna dána integrálem

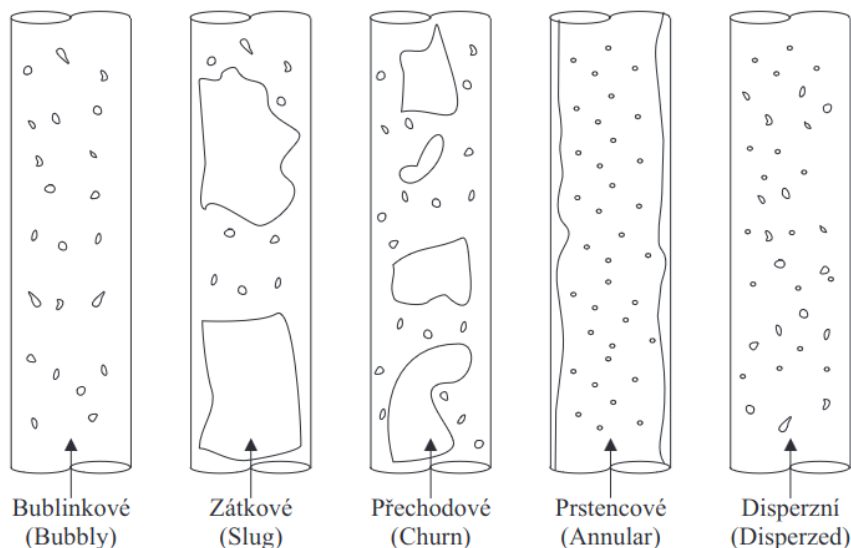
$$\Delta p_g = \pm g \int_0^H \rho(z) dz$$

kde g je gravitační zrychlení.

3.5 Vliv dvoufázového proudění

Termohydraulický výpočet s uvažováním dvoufázového proudění je velmi komplikovaný a přistupuje se k přibližným výpočtům. Jedním z možných zjednodušení je redukce dimenzionality. Při uvažování jednodimenzionálního proudění bylo rozpracováno několik přístupů podle toho, které hodnoty jsou na začátku známy. Existují např. tzv. čtyřrovnice nebo pětirovnice modely.

Generace páry probíhá díky varu vody. V LWR reaktorech se setkáváme především s varem blánovým. Rozeznává se několik režimů dvoufázového proudění podle intenzity varu. Jejich názorný přehled je na obr.



Obrázek 3.3: Režimy dvoufázového proudění

Při dvoufázovém proudění (v LWR reaktorech voda-vodní pára) záleží na podílu obsahu páry ve směsi. Tento obsah se může měnit s časem, ale především je proměnný s výškou. S rostoucím podílem páry klesá hustota chladiva. Při uvažování neměnného hmotnostního průtoku to znamená navýšení ztráty na urychlení chladiva.

3.6 Možnosti termohydraulické analýzy AZ

Nyní po výčtu jevů, se kterými se lze setkat v AZ reaktoru, lze přistoupit k rozboru matematicko-fyzikálních metod k analýze používaných. Mezi základní rovnice modelu patří rovnice kontinuity, zákon zachování energie, rovnice momentu hybnosti. Zákony budou uvedeny jen pro jednofázové proudění.

3.6.1 Zákon zachování hmoty

Zákon vychází z předpokladu, že změna hmotnosti v kontrolním objemu se musí rozdílu hmotnostního toku směřujícího do objemu a ven z objemu. Zákon je možno uvádět v podobě.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \cdot \vec{w}) \quad (3.7)$$

Zákon v této podobě říká, že divergence vektoru hustoty hmotnostního toku (součin $\rho \cdot \vec{v}$) je roven úbytku hmotnosti v jednotce objemu za jednotku času.

3.6.2 Zákon zachování hybnosti

Tento zákon v praxi vyjadřují Navier-Stokesovy rovnice. Jejich odvození vychází z Eulerových rovnic dynamiky tekutin. Ty ale platí pro vazké nestlačitelné tekutiny. Musí se k nim přidat ještě výslednice sil vazkých. Vazké síly charakterizuje tenor napětí $\bar{\tau}$.

$$\rho \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + \rho \vec{w} \cdot \nabla \vec{w} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{f} \quad (3.8)$$

Jedná se o přeformulování Newtonova zákona síly, kdy na levé straně vystupují hmotnost násobená zrychlením a na pravé síly působící na hmotu. Jmenovitě se jedná o síly tlakové, síly viskozní a vnější síly obsažené ve vektoru \vec{f} .

3.6.3 Zákon zachování energie

Tento zákon lze zavést pomocí vícero veličin např. vnitřní energie nebo entalpie. Vyjádření pomocí vnitřní energie může být psáno ve formě

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \vec{w} \cdot \nabla u = -\nabla \cdot \vec{q}'' + q''' - \nabla \cdot p \vec{w} + \nabla \cdot (\bar{\tau} \cdot \vec{w}) + \vec{w} \cdot \rho \vec{f} \quad (3.9)$$

Zákon vyjadřuje, že změna vnitřní energie v jednotce objemu (levá strana) se musí rovnat rozdílu energie odvedené a přivedené. První člen pravé strany znamená změnu vnitřní energie způsobenou konvekcí, druhý je kondukční člen. Třetí člen je člen udávající generování tepla v objemu. Další členy odpovídají vykonané práci na tekutině tlakovými, viskozními a vnějšími silami.

K termohydraulickým výpočtům lze přistupovat dvojím způsobem - metodou svázaných parametrů (lumped parameter approach - LPA) a metodou samostatných parametrů (distributed parameter approach - DPA). Oba přístupy pohlížejí na chladivo jako na kontinuum tj. že se v libovolně malém objemu nalézají tolik částic látky, že lze odhlédnout od její nespojitě povahy.

LPA metody vycházejí z předpokladu, že hodnoty skalárních veličin (tlak, teplota, energie atd.) jsou v celém kontrolním objemu stejné. Mezi LPA patří subkanálová analýza (subchannel analyses) a metoda náhradního média (porous media formulation). Zohlednění nestejnorodosti rozdělení veličiny v objemu provádí DPA metody. Tedy u LPA metod je sledovaná závislá proměnná funkcí pouze od času a problém se redukuje na řešení soustavy obyčejných diferenciálních rovnic, zatímco u DPA závislá proměnná je funkcí jak času, tak i některé prostorové proměnné a řeší se soustava parciálních diferenciálních rovnic.

V PWR reaktorech se používají zpravidla s bezobálkové soubory (výjimku tvoří například soubory VVER-440). Analýza těchto reaktorů se rozděluje do dvou kroků. V prvním kroku se zhomogenizují jednotlivé palivové soubory (popř. skupina sousedících palivových souborů) a hledá se nejzatíženější kanál. Ve druhém kroku se analyzuje pouze nejzatíženější kanál.

BWR reaktory mají obálkové soubory. Každý z těchto souborů tedy představuje unikátní kanál. Okrajové podmínky řešení vyplývají z rozdělení a spojení proudu

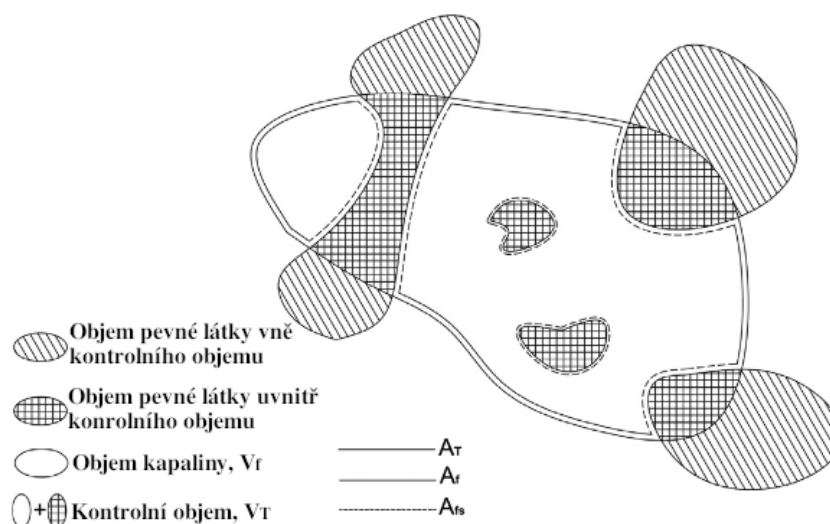
chladiwa na vstupu a výstupu z kanálů. Za okrajové podmínky se často udává hmotnostní tok chladiva na vstupu, tlakový gradient a výstupní tlak.

3.6.4 Metoda porozního média (porous media approach)

Metoda je založena na rozdělení sledovaného objemu na složku kapalnou a pevnou. Porozita tj. objemový podíl kapaliny je pak definována jako

$$\gamma_V = \frac{V_f}{V_T} \quad (3.10)$$

kde V_f a V_T značí po řadě objem kapaliny a celý kontrolní objem. Oba objemy tvoří povrch A_f a A_T . Kapalina smáčí povrch pevných těles na ploše A_{fs} . Názornou představu zprostředkovává obr. 3.4.



Obrázek 3.4: Zavedení terminologie objemů a povrchů

3.6.5 Zákony zachování

V rámci kontrolního objemu platí zákony zachování jak byly uvedeny v kapitole 3.6. Po zavedení objemových poměrů lze novou podobu zákonů odvodit integrací přes kontrolní objem. Členy zůstávají v původním pořádku, v jaké byly zákony definovány dříve.

- Zákon zachování hmoty (rovnice kontinuity)

$$\gamma_V \frac{\partial^i \langle \rho \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_T} \int_{A_f} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (3.11)$$

- Zákon zachování hybnosti

V tomto zákoně se při odvozování pro jednoduchost uvažovala pouze jedna vnější síla (resp. její intenzita) \vec{f} a to gravitační síla g . Nová veličina \vec{R} značí působení pevných látek obsažených v tekutině a dohromady s prvním členem

pravé strany tvoří prvné dva členy pravé strany v rovnici pro zákon zachování hybnosti z původního tvaru.

$$\begin{aligned} \gamma_V \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho \vec{v} \rangle + \frac{1}{V_T} \int_{A_f} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA &= \frac{1}{V_T} \int_{A_f} (-p \vec{n} + \bar{\tau} \cdot \vec{n}) dA + \\ &+ \gamma_V \langle \vec{R} \rangle + \gamma_V \langle \rho \vec{g} \rangle \end{aligned} \quad (3.12)$$

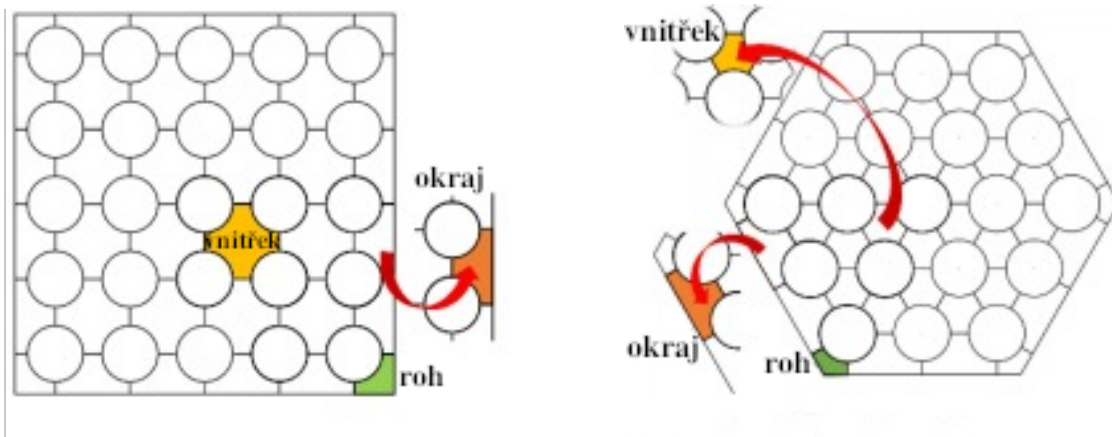
- Zákon zachování energie

$$\begin{aligned} \gamma_V \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho u \rangle + \frac{1}{V_T} \int_{A_f} \rho u \vec{v} \cdot \vec{n} dA &= \gamma_V \langle p \nabla \cdot \vec{v} \rangle + \frac{1}{V_T} \int_{A_f} k_e \vec{n} \cdot \nabla T dA \\ &+ \gamma_V [\langle q_{rb} \rangle + \langle q''' \rangle + \langle \phi \rangle] \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.6.6 Subkanálová analýza

Základním předpokadem subkanálové analýzy je uvažování převahy axiálního proudění nad radiálním. Chladivo proudí tzv. subkanály. Subkanálem se rozumí prostorově ohraničený (fyzicky nebo myšleně) kanál chladiva, obklopený palivovými elementy. Roviny, spojující paralelní palivové elementy, tvoří hranice subkanálu. Jednotlivé subkanály jsou ve vertikálním směru rozděleny na kontrolní objemy (nódy). Nódy nemusejí být nutně stejného objemu. V nódech se vyjadřují zákony zachování hmotnosti, hybnosti v axiálním směru a energie. Příkladem mohou být tři druhy subkanálů - rohový, hranový a vnitřní u reaktorů PWR a VVER, jež jsou zobrazeny na obr. 3.5a a 3.5b.

Pro zákon zachování hybnosti příčného proudění (proudění mezi jednotlivými subkanály) je zapotřebí volit jiný kontrolní objem, zahrnující v sobě rozhraní a části dvou sousedních subkanálů. V PWR reaktorech převládá proudění axiální. Na příčné proudění tekutiny mají vliv turbulence vzniknuvší v proudění a tlakový rozdíl v sousedních kanálech, způsobený tlakovými ztrátami. U příčného toku se uvažuje pouze komunikace mezi dvěma sousedními subkanály.



(a) Subkanály v soborech PWR

(b) Subkanály v soborech VVER

Obrázek 3.5

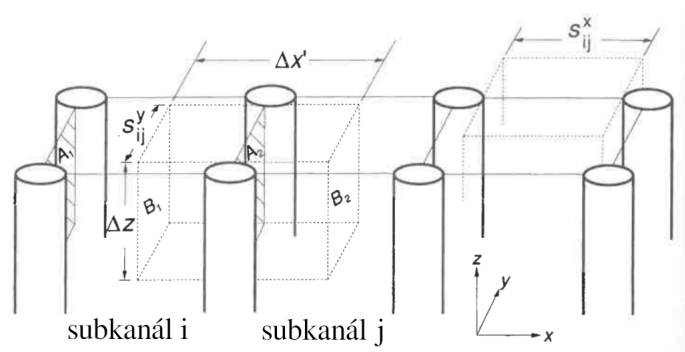
Ve skutečném reaktoru PWR se nalézají tisíce až desetitisíce subkanálů. Vzhledem k tomuto velkému množství se vyvinuly dva přístupy k řešení - kaskádová a jednokroková (one-stage) metoda [21].

Kaskádová metoda v prvním kroku řeší AZ jako soustavu uzlů, kde každý uzel představuje jeden palivový soubor. Nalezne se tzv. horký soubor tj. soubor s největší entalpií a určí se jeho okrajové podmínky. Ve druhém kroku se řeší pouze horký soubor na základě rozdělení do subkanálů. Tedy uzly představují jednotlivé subkanály popř. spojení několika subkanálů. Kaskádová metoda se nemusí zužovat pouze na tyto dva kroky. Jako druhý krok může být rozdělení horkého souboru na čtvrtiny popř. jiné části a krok sestává z nalezení nejzatíženější části souboru a ta se teprve rozdělí na jednotlivé subkanály.

Jednokroková metoda přistupuje k výpočtu tak, že se určí nejzatíženější místa v AZ a řeší se pouze tato místa, přičemž jejich okolí je zjednodušené.

3.7 Důležité veličiny pro subkanálovou analýzu

Před uvedením zákonů zachování, které se používají v subkanálové analýze, budou zavedeny veličiny v nich vystupující. Geometrická značení vycházejí z obr. 3.6. Uvažuje se proudění ve směru osy z .



Obrázek 3.6: Rozměrové značky pro subkanály, [36]

Axiální hmotnostní tok

V i -tém subkanále průtočného průřezu A_{fi} lze axiální hmotnostní tok vyjádřit integrálem

$$\dot{m}_i = \int_{A_{fi}} \rho v_z dA \quad (3.14)$$

a má rozměr $[kg/s]$. Lze vyjádřit i jinou formou přes plošně středované veličiny.

$$\dot{m}_i = \{\rho v_z\} A_{fi} \quad (3.15)$$

Složenými závorkami je zde rozuměno plošné středování veličiny, tj. veličina α má na ploše A střední hodnotu $\{\alpha\} = \frac{1}{A} \int_A \alpha dA$.

Radiální hmotnostní tok

Radiální hmotnostní tok je zapříčiněn dvěma mechanismy - příčným tlakovým gradientem (tok W_{ij}) nebo turbulencemi (tok W'_{ij}). Tlakový gradient je způsoben nerovnoměrnostmi v toku chladiva sousedními kanály, způsobené např. průhybem a jinými deformacemi, růzností v hustotách chladiva atd. Příčné proudění lze zapsat ve směru osy x resp. y jako

$$W_{ij}^x = \frac{1}{\Delta z} \int_{\Delta z} \int_{S_{ij}^y} \rho v_x ds dz \quad (3.16)$$

$$W_{ij}^x = \{\rho v_x\} s_{ij}^y \quad (3.17)$$

$$W_{ij}^y = \frac{1}{\Delta z} \int_{\Delta z} \int_{S_{ij}^x} \rho v_y ds dz \quad (3.18)$$

$$W_{ij}^y = \{\rho v_y\} s_{ij}^x \quad (3.19)$$

U W'_{ij} se zohledňuje turbulentní proudění přes hranice subkanálů. Při uvažování jednofázového proudění se může zanedbat přenos hmotnosti mezi subkanály, protože tyto jsou stejné. U proudění dvoufázového už to ale nemusí platit. Pro jednofázové proudění lze psát (index D označuje přenos hmoty)

$$W'_{ij}{}^D = W_{ji}{}^D \quad (3.20)$$

Radiální hmotnostní tok je definován na jednotku délky, tedy má rozměr $[kg/(m \cdot s)]$ a tedy jiný rozměr, nežli axiální hmotnostní tok.

Radiální tok energie a hybnosti

Přenos energie a hybnosti mezi sousedními kanály se realizuje třemi mechanismy. Jsou to přenos přetokem látky mezi subkanály, přenos turbulencemi a přenos díky vizkozitě.

V prvním případě lze přenos napsat jednoduše pomocí radiálního hmotnostního toku a axiální rychlosti (pro hybnost) nebo entalpie (pro energii). Počítat se musí pro směry x a y zvlášť.

Pro turbulentní proudění lze využít dříve definovaného radiálního hmotnostního toku zapříčeného turbulencemi $W_{ij}^{x,y}$.

$$\overline{(\tau s)'}_{i \leftrightarrow j} \equiv \overline{W_{ij}{}^D v_{zi}} - \overline{W_{ji}{}^D v_{zj}} \quad (3.21)$$

$$\overline{(q'' s)'}_{i \leftrightarrow j} \equiv \overline{W_{ij}{}^D h_i} - \overline{W_{ij}{}^D h_j} \quad (3.22)$$

Kde členy vlevo značí hybnost a energii předanou turbulencemi za jednotku času na jednotku délky.

3.8 Zákony zachování

Pro tvar rovnic zákonů zachování se opět vychází z rovnic z kapitoly 3.6. Po rozdělení průtočných kanálů na subkanály je možné zákony přepsat do podob, které jsou rozebrány v dalších kapitolách.

3.8.1 Zákon zachování hmoty

Zákon zachování hmoty říká, že množství chladiva vstoupivšího do subkanálu se musí rovnat množství chladiva, které kanál opustilo. Lze vyjádřit z rovnice kontinuity, která bývá udávána např. v intergrálním tvaru

$$\langle \text{div}(\rho \vec{v}) \rangle = -\left\langle \frac{\partial \rho}{\partial t} \right\rangle \quad (3.23)$$

čili divergence vektoru hustoty hmotnostního toku z objemu odpovídá úbytku hmotnosti v daném objemu. Hranaté závorky představují objemové středování veličiny tj. střední hodnota veličiny ϕ v objemu V_T je $\langle \phi \rangle \equiv \frac{1}{V_T} \iiint_{V_T} \phi dV$. V subkanálové analýze se uvažuje vstup do kontrolního objemu buď z axiálního toku chladiva zespodu, nebo též přechodem ze sousedního subkanálu radiálním tokem. Výtok se uvažuje horní plochou kontrolního objemu, nebo též do sousedních subkanálů.

V rámci subkanálové analýzy lze psát podobu zákona zachování hmoty

$$A_{fi} \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho_i \rangle + \frac{\Delta \dot{m}_i}{\Delta z} = - \sum_{j=1}^J [W_{ij} + W'_{i \leftrightarrow j}] \quad (3.24)$$

kde J je počet sousedních subkanálů kanálu i . Obecně je třeba uvažovat i hybnost způsobenou turbulencemi $W'_{i \leftrightarrow j}$.

Při uvažování jednofázového proudění platí, že $W'_{ij} = W'_{ji}$ a tedy lze poslední člen pravé strany rovnice (3.24) je roven nule. Zákon je možné psát v jednoduše podobě

$$A_{fi} \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho_i \rangle + \frac{\Delta \dot{m}_i}{\Delta z} = - \sum_{j=1}^J W_{ij} \quad (3.25)$$

3.8.2 Zákon zachování energie

Ovození rovnice vychází z rovnic pro porozní medium. Pro její složitost se zanedbávají vnitřní zdroje tepla v tekutině, axiální vedení tepla, disipační funkce aj.

$$A_{fi} \frac{\partial}{\partial t} [\langle \rho h \rangle_i] + \frac{\Delta}{\Delta z} [\dot{m}_i h_i] = \langle q'_i \rangle_{rb} - \sum_J W_{ij} [h_i - h_j] - \sum_J W_{ij} \{h\} + A_{fi} \left\langle \frac{Dp_i}{Dt} \right\rangle \quad (3.26)$$

3.8.3 Zákon zachování hybnosti

Zákon zachování hybnosti lze psát v axiálním a radiálním směru následovně

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle \dot{m}_i \rangle + \sum_J W_{ij} \{v_z\} + \frac{\Delta (\dot{m}_i v_{zi})}{\Delta z} = -A_{fi} \langle \rho \rangle g_z - A_{fi} \frac{\Delta \{p\}}{\Delta z} - \sum_J W_{ij} (v_{zi} - v_{zj}) - \left\{ \frac{F_{iz}}{\Delta z} \right\} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(W_{ij}) + \frac{\Delta}{\Delta x'}(W_{ij}\{v_x\}) + \frac{\Delta}{\Delta x}(W_{ij}\{v_z\}) = - \left(s_{ij}^y \frac{\Delta}{\Delta x'} \{p\} \right) - \left\{ \frac{F_{ix}}{\Delta x' \Delta z} \right\} \quad (3.28)$$

3.8.4 Konstitutivní vztahy

K úplnému řešení termohydraulického problému je zapotřebí doplnit rovnice zákonů zachování o pomocné, konstitutivní vztahy. Tyto vztahy určují veličiny vystupující ve vztazích pro zákony zachování. Konstitutivní vztahy pro různé veličiny zohledňují režim proudění a přestup tepla. Důležité je stanovit hmotnostní a objemový podíl páry, součinitel třecího odporu.

Kapitola 4

Ukázka termohydraulického výpočtu

Závěry z minulých kapitol budou demonstrovány na příkladu jednoduchého výpočtu svazku subkanálovým termohydraulickým programem ALTHAMC12. Sledován bude vliv změny koeficientu odporu mříže na výstupní teplotu, tlak a průtok chladiva svazkem. Vybrané subkanály budou sledovat změny i v axiálním směru. Svazek i program budou představeny níže.

4.1 Termohydraulický program

K výpočtu byl použit termohydraulický subkanálový kód firmy ALVEL s názvem ALTHAMC12. Kód počítá přerozdělení průtoku do jednotlivých subkanálů, tlakovou ztrátu, rozložení teplot a další parametry chladiva. Rovněž sleduje i bezpečnostní rezervy, např. výpočtem DNBR při stacionárních i přechodových stavech. Okrajové podmínky výpočtu mohou navazovat na předchozí neutronově-fyzikální výpočet.

Vstupem pro kód jsou režimové hodnoty, např. tepelný výkon svazku, dále vstupní parametry chladiva (teplota, hustota hmotnostního toku aj.). Dalším vstupem jsou informace o svazku. Důležité je správně zadefinovat rozměry svazku, zvolit subkanály, dodat proutky, zadat distanční mříže a jejich typ atd.

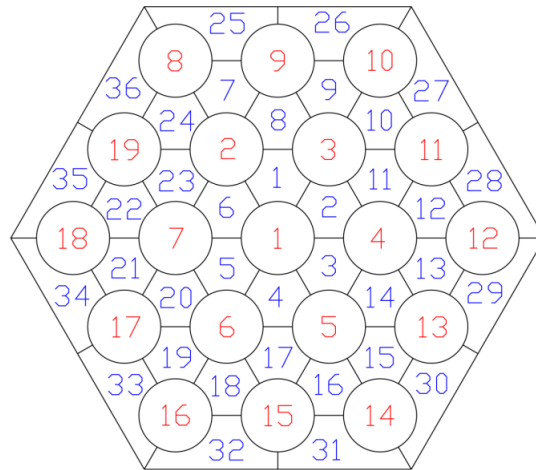
Předmětem výpočtu budou dva svazky - nominální a změněný. V nominálním svazku jsou distanční mříže nastavené podle zadání. Ve změněném svazku byla přidána mříž do vzdálenosti 2,64 m od spodního okraje souboru. Parametry součinitele místního odporu mříže byly stanoveny rozdílně pro jednotlivé typy subkanálu. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Hodnoty koeficientů odporu přidané mříže

Typ kanálu	koeficient odporu
vnitřní	0.30
okrajový	20.00
rohový	0.30

4.2 Svazek

Pro ukázkou termohydraulického výpočtu byl zvolen model experimentálního svazku firmy Škoda - Jaderné strojírenství. Svazek, uzavřený v šestistěnné obálce, obsahuje 19 palivových proutků. Průtočná plocha byla rozdělena do 42 subkanálů tří typů. Geometrie svazku, rovněž i číselné označení proutků a subkanálů je k nahlédnutí na obr. 4.1. Počítačovým modelem svazku bude protékat jako chladivo lehká voda. Parametry chladiva a souboru jsou uvedeny v tab. 4.2. Hodnoty byly voleny v rámci rozsahu tak, jak předepisoval návod od ŠJS.



Obrázek 4.1: Experimentální svazek ŠJS, [1]

Tabulka 4.2: Parametry svazku a chladiva, [1]

veličina [jednotka]	hodnota
Tlak chladiva [MPa]	15,00
Hustota hmotnostního toku chladiva [kg/m^2s]	3000,00
Výkon svazku [kW]	89
Vstupní teplota chladiva [$^{\circ}C$]	230
Vytápěná délka [mm]	3480
Průměr trubek [mm]	9,15
Rozteč trubek [mm]	12,75
Průměr svazku [cm]	57,90
Počet mřížek [—]	13
Vzdálenost středů mřížek [mm]	255
Koeficient odporu mřížky [—]	0,37

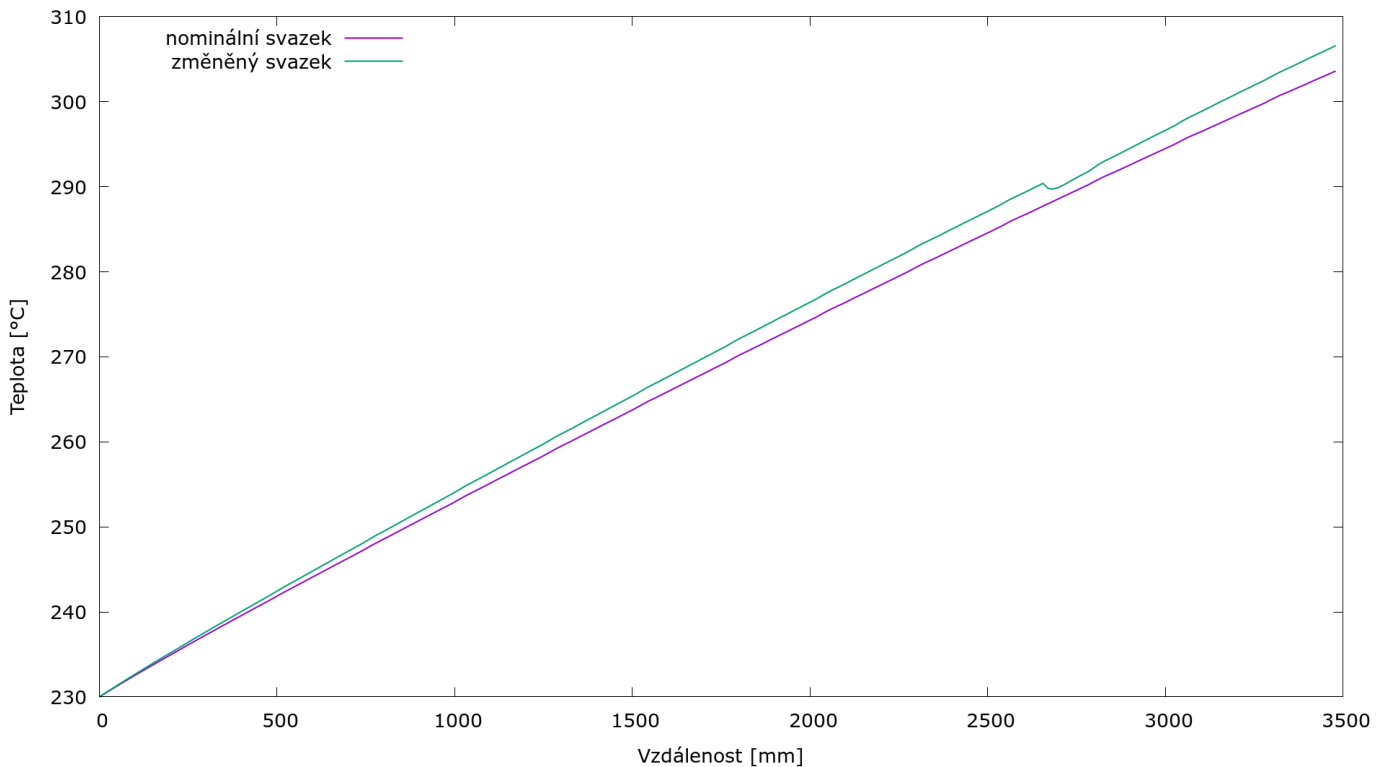
4.3 Výsledky výpočtu

Program počítal s dvěma různými modelovými soubory. Jeden obsahoval nominální, původní svazek. Ve druhém přibyla na pozici 2,64m od spodního okraje souboru, přesně doprostřed mezi dvě mřížky, jiná mřížka. Součinitel odporu nové

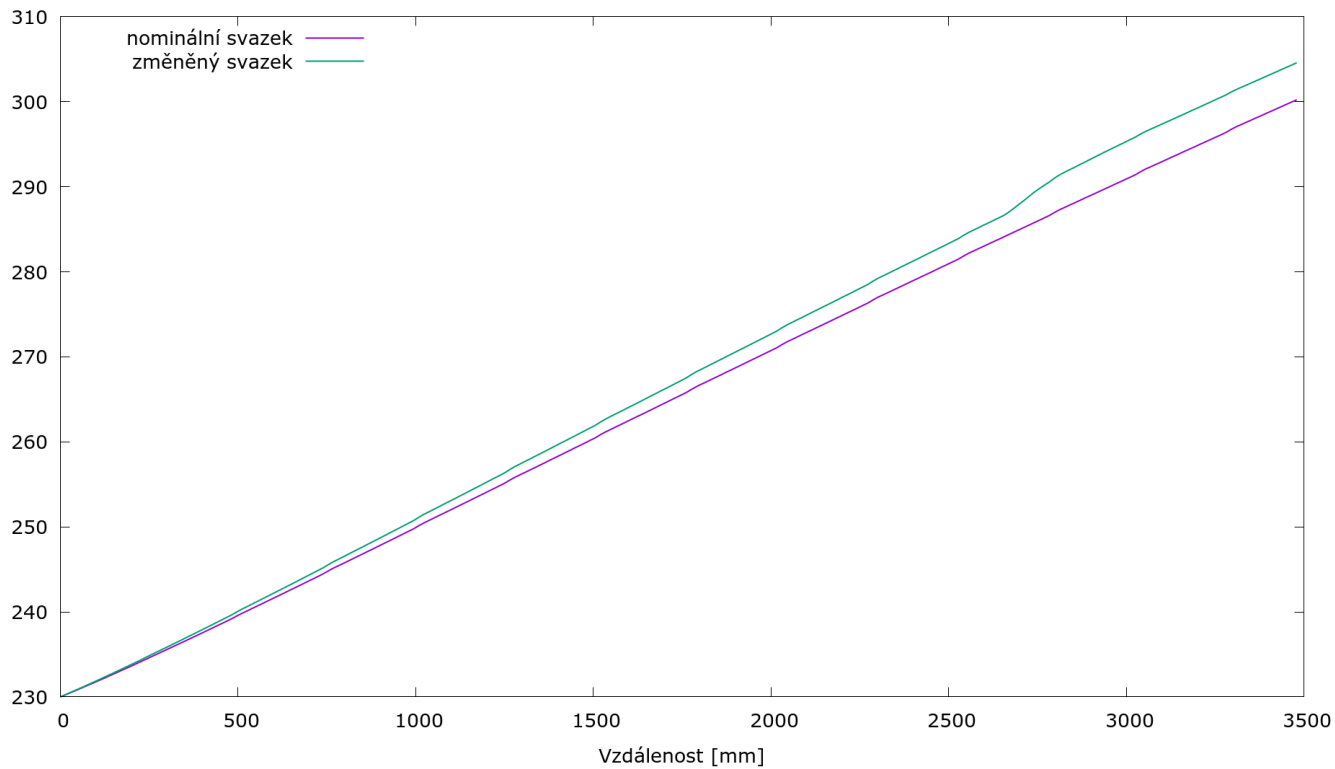
mřížky byl položen rovným 0,30 pro vnitřní subkanály, 20,0 pro okrajové subkanály a 0,30 pro rohové subkanály.

Číselné hodnoty výstupních teplot, tlakových ztrát, průtoku chladiva a režimů proudění jsou k nahlédnutí v tab. 4.3 a 4.4. Obecně lze říci, že se hodnoty výstupních teplot a tlakových ztrát s přidáním mřížky zvětšily. Z obr. 4.5, 4.6 a 4.7 je vidět, že v místě přidání mřížky se skokově mění tlaková ztráta. To vede i k přerozdelení průtoku chladiva jednotlivými subkanály, které je znázorněno na obr. 4.8, 4.9 a 4.10. Z nich je patrné, že v místě přidání mřížky dojde k příčným přetokům mezi subkanálem okrajovým a okolními subkanály, do nichž bude průtok směřovat.

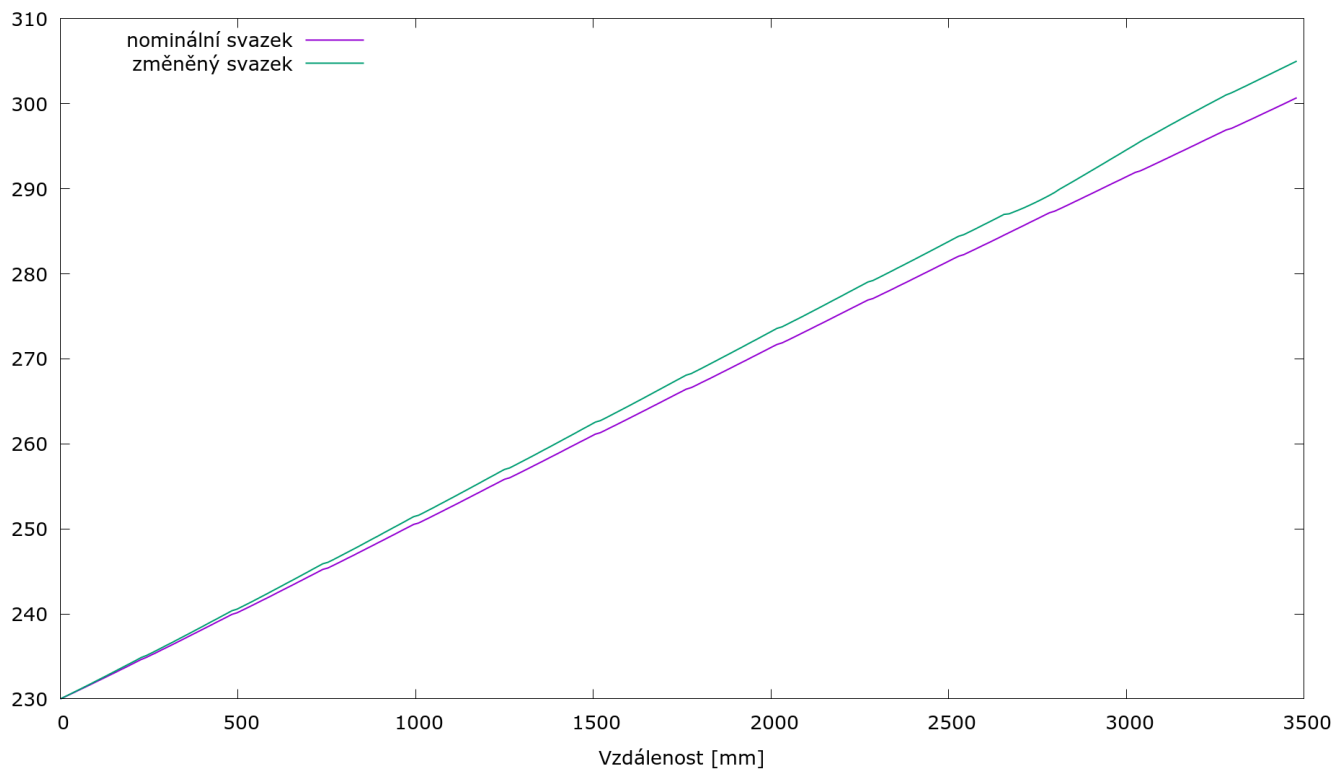
4.4 Tabulky a obrázky



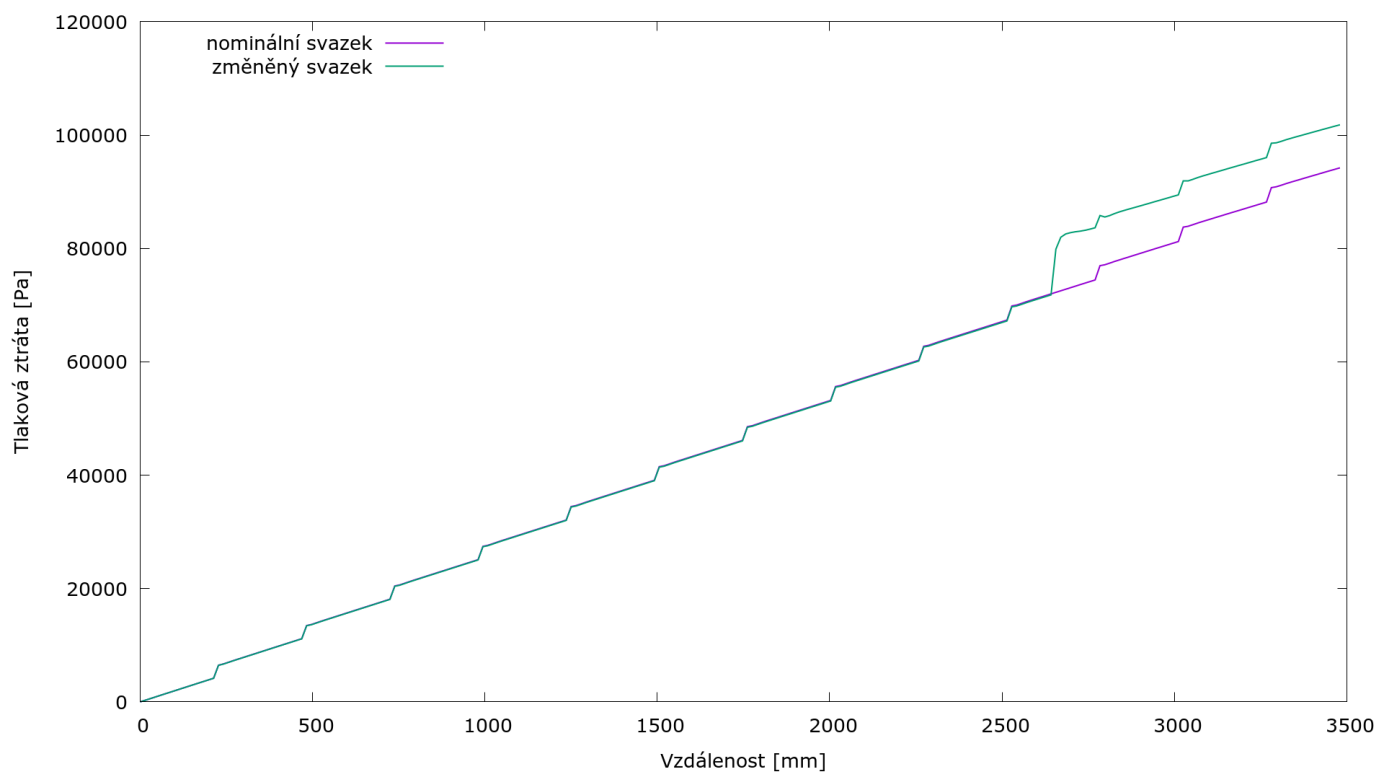
Obrázek 4.2: Průběh teploty v subkanálu 15 (nominálním i změněným)



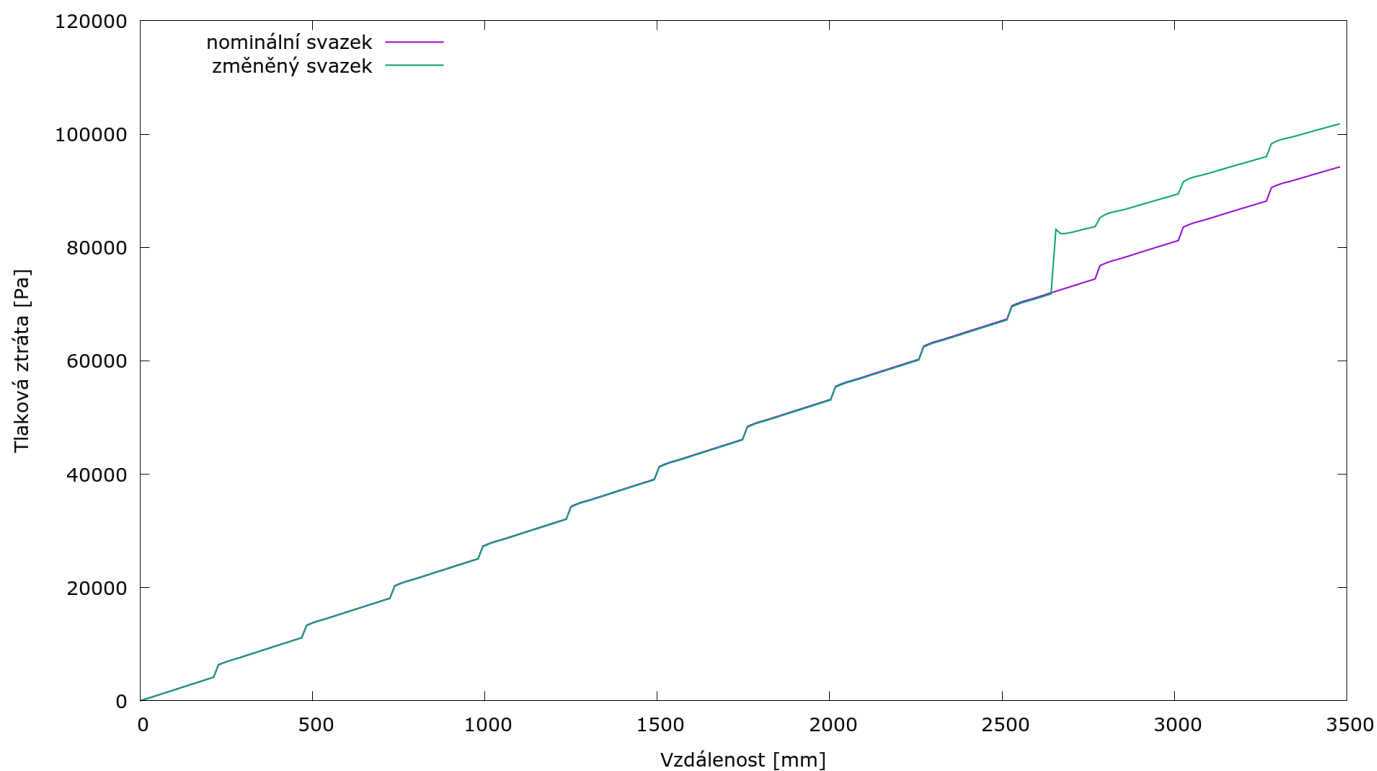
Obrázek 4.3: Průběh teploty v subkanálu 33 (nominálním i změněným)



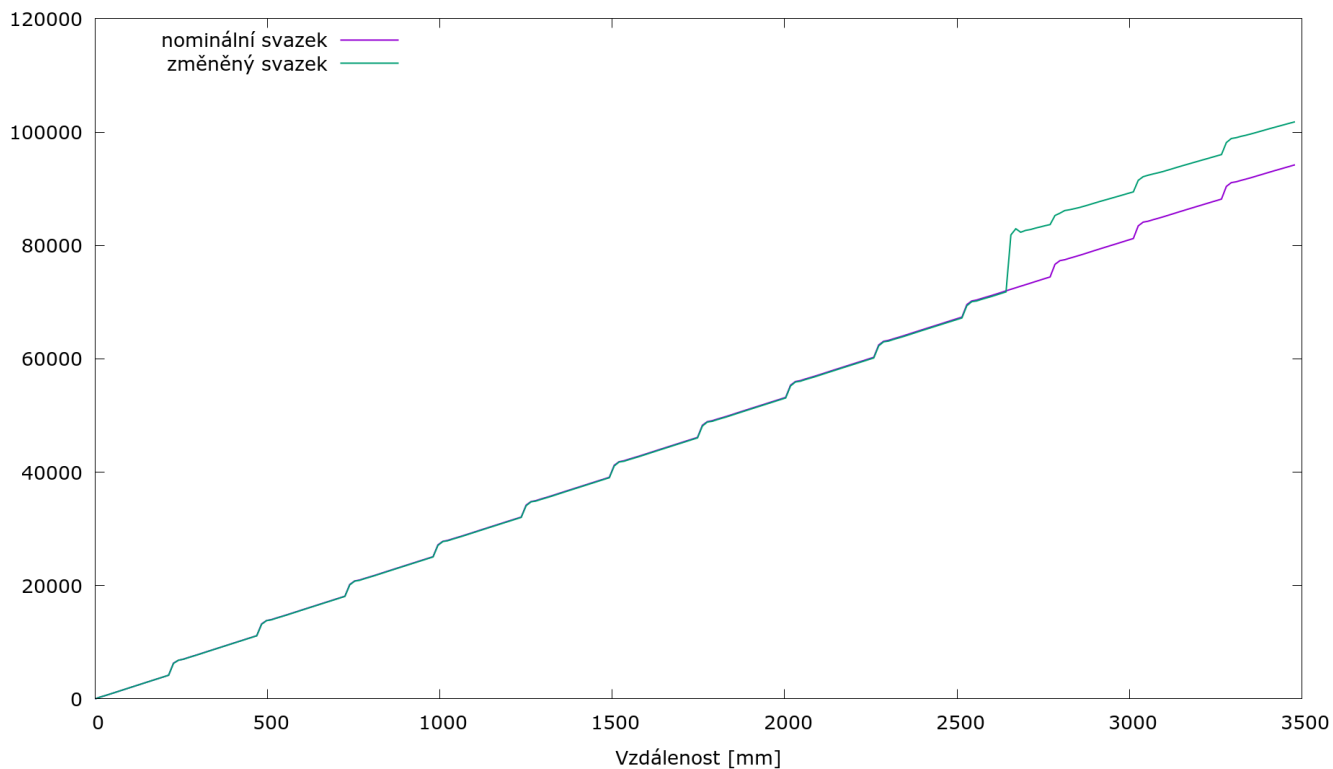
Obrázek 4.4: Průběh teploty v subkanálu 34 (nominálním i změněným)



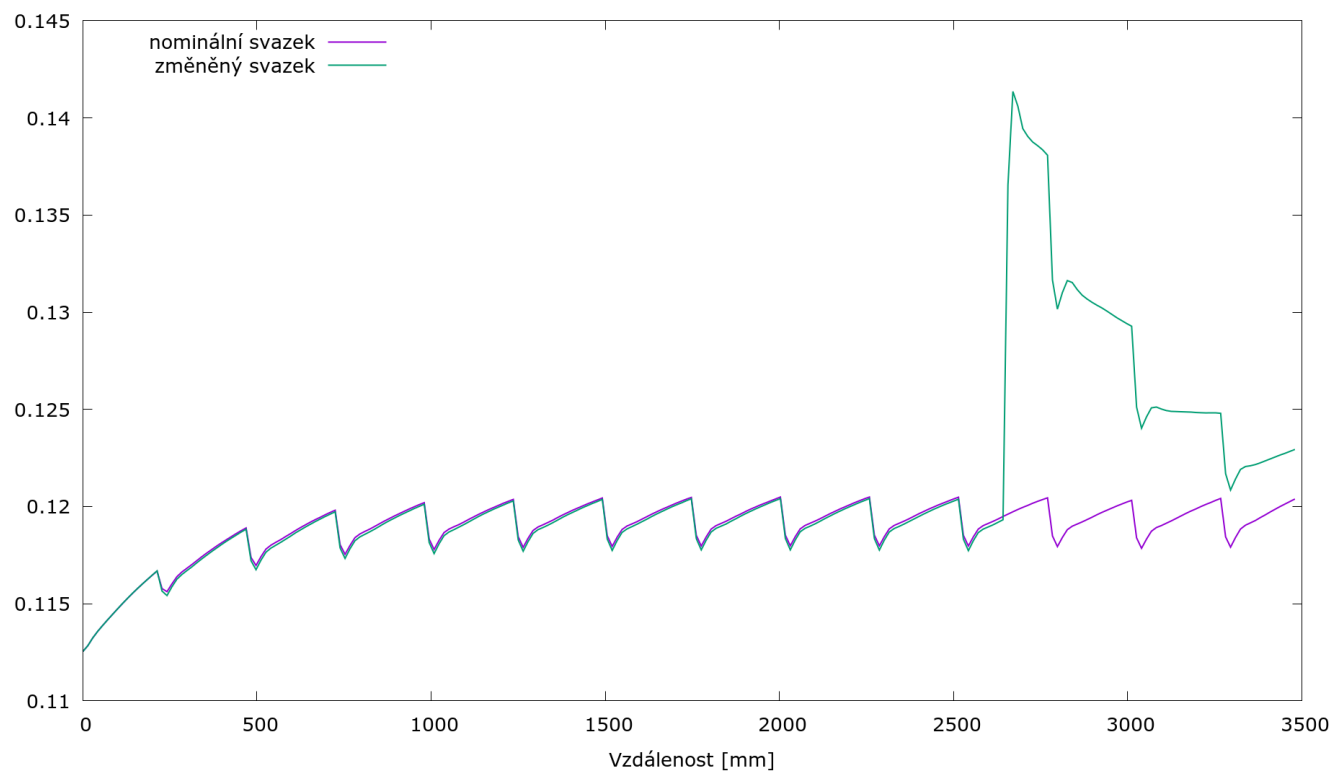
Obrázek 4.5: Průběh tlakové ztráty v subkanálu 15 (nominálním i změněným)



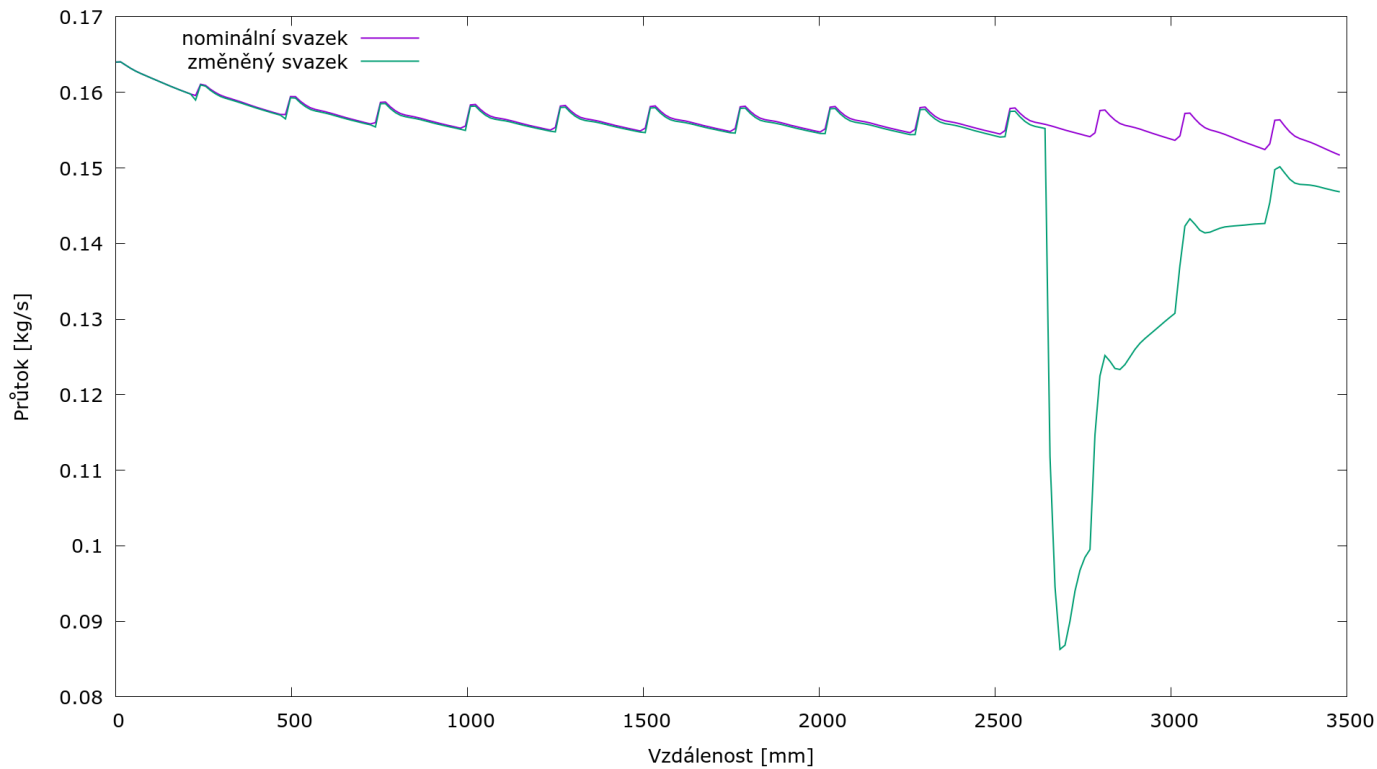
Obrázek 4.6: Průběh tlakové ztráty v subkanálu 33 (nominálním i změněným)



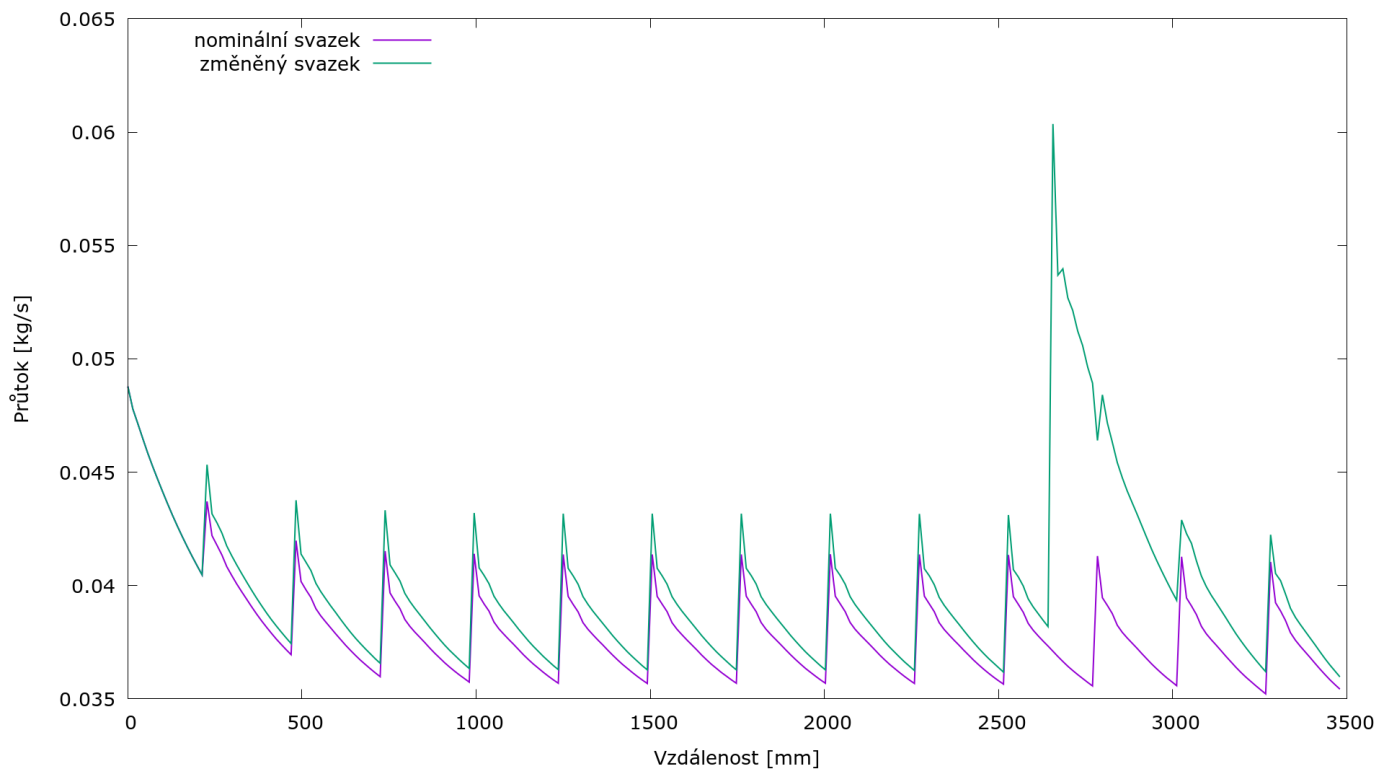
Obrázek 4.7: Průběh tlakové ztráty v subkanálu 34 (nominálním i změněným)



Obrázek 4.8: Průběh průtoku v subkanálu 15 (nominálním i změněným)



Obrázek 4.9: Průběh průtoku v subkanálu 33 (nominálním i změněným)



Obrázek 4.10: Průběh průtoku v subkanálu 34 (nominálním i změněným)

Tabulka 4.3: Výstupní hodnoty nominálního svazku

Číslo subkanálu	Tlaková ztráta [Pa]	Průtok [kg/s]	Teplota [$^{\circ}C$]
1	94229.3	0.12547	307.9
2	94229.3	0.12547	307.9
3	94229.3	0.12547	307.9
4	94229.3	0.12547	307.9
5	94229.3	0.12547	307.9
6	94229.3	0.12547	307.9
7	94230.3	0.12039	303.6
8	94229.8	0.12192	305.5
9	94230.3	0.12039	303.6
10	94230.3	0.12039	303.6
11	94229.8	0.12192	305.5
12	94230.3	0.12039	303.6
13	94230.3	0.12039	303.6
14	94229.8	0.12192	305.5
15	94230.3	0.12039	303.6
16	94230.3	0.12039	303.6
17	94229.8	0.12192	305.5
18	94230.3	0.12039	303.6
19	94230.3	0.12039	303.6
20	94229.8	0.12192	305.5
21	94230.3	0.12039	303.6
22	94230.3	0.12039	303.6
23	94229.8	0.12192	305.5
24	94230.3	0.12039	303.6
25	94232.4	0.03543	300.7
26	94231.5	0.15169	300.2
27	94231.5	0.15169	300.2
28	94232.4	0.03543	300.7
29	94231.5	0.15169	300.2
30	94231.5	0.15169	300.2
31	94232.4	0.03543	300.7
32	94231.5	0.15169	300.2
33	94231.5	0.15169	300.2
34	94232.4	0.03543	300.7
35	94231.5	0.15169	300.2
36	94231.5	0.15169	300.2
37	94232.4	0.03543	300.7
38	94231.5	0.15169	300.2
39	94231.5	0.15169	300.2
40	94232.4	0.03543	300.7
41	94231.5	0.15169	300.2
42	94231.5	0.15169	300.2

Tabulka 4.4: Výstupní hodnoty změněného svazku

Číslo subkanálu	Tlaková ztráta [Pa]	Průtok [kg/s]	Teplota [$^{\circ}C$]
1	101825.0	0.12729	309.6
2	101825.0	0.12729	306.6
3	101825.0	0.12729	306.6
4	101825.0	0.12729	309.6
5	101825.0	0.12729	309.6
6	101825.0	0.12729	309.6
7	101825.1	0.12294	306.6
8	101825.0	0.12418	307.8
9	101825.1	0.12294	306.6
10	101825.1	0.12294	306.6
11	101825.0	0.12418	307.8
12	101825.1	0.12294	306.6
13	101825.1	0.12294	306.6
14	101825.0	0.12418	307.8
15	101825.1	0.12294	306.6
16	101825.1	0.12294	306.6
17	101825.0	0.12418	307.8
18	101825.1	0.12294	306.6
19	101825.1	0.12294	306.6
20	101825.0	0.12418	307.8
21	101825.1	0.12294	306.6
22	101825.1	0.12294	306.6
23	101825.0	0.12418	307.8
24	101825.1	0.12294	306.6
25	101826.9	0.03597	305.0
26	101825.9	0.14683	304.6
27	101825.9	0.14683	304.6
28	101826.9	0.03597	305.0
29	101825.9	0.14683	304.6
30	101825.9	0.14683	304.6
31	101826.9	0.03597	305.0
32	101825.9	0.14683	304.6
33	101825.9	0.14683	304.6
34	101826.9	0.03597	305.0
35	101825.9	0.14683	304.6
36	101825.9	0.14683	304.6
37	101826.9	0.03597	305.0
38	101825.9	0.14683	304.6
39	101825.9	0.14683	304.6
40	101826.9	0.03597	305.0
41	101825.9	0.14683	304.6
42	101825.9	0.14683	304.6

Závěr

Práce se zabývala aktivními zónami tlakovodních a varných reaktorů se zaměřením na popis paliva. Zvláštní pozornost byla věnována reaktorům typu VVER. Z rešerše plyne, že návrhy paliva mohou být velice různorodé a není možné například jednoduše zaměnit paliva od dvou různých výrobců, které ale pracují ve stejném typu reaktoru. Návrhy paliva se neustále vyvíjejí a lze hovořit o generacích paliva. Také v rámci reaktorů VVER se od sebe významně liší paliva pro VVER-440 od paliv pro VVER-1000. Jedním z rozdílů je například absence obálky u paliv pro VVER-1000.

Provozem reaktoru na výkonu palivo nutně vyhořívá. Vyhořívání, ale i jiné vlivy, zapříčiňují změny v palivu. Změnou může být třeba deformace paliva ve formě průhybu palivových proutků či celých souborů. Tyto dva jevy jsou sice odlišné, ale ukazuje se, že spolu často úzce souvisejí. Proutky se mohou prohýbat různými způsoby. Bohužel nenabízí otevřená literatura mnoho záznamů z praktické zkušenosti elektráren. Přitom je potřeba věnovat průhybům proutků nebo souborů pozornost, protože vedou ke změně průtočného průřezu kanálu chladiva. Kanál se může přiškrtit, nebo naopak zvětšit. Dokonce může deformace proutků omezit činnost regulačních orgánů.

V další části byla probrána úloha termohydraulického výpočtu aktivní zóny. K termohydraulickým výpočtům lze přistoupit z různých stran. Detailně byly popsány metody porozního média a subkanálová analýza. Všechny metody jsou založeny na zákonech zachování hmoty, hybnosti a energie. Právě rozdíly v metodách vedou na přepis základních zákonů do odlišných forem. V metodě porozního média se zavádí tzv. kontrolní objem a podíl kapaliny v tomto objemu charakterizuje tzv. porozita. U subkanálové analýzy se zase dělí oblasti s chladivem na subkanály, které mohou mezi sebou komunikovat třeba příčným přetokem. Ve všech metodách jsou zákony doplněny o konstitutivní vztahy, které dávají možnost určit chybějící veličiny do zákonů zachování.

V poslední části proběhla ukázka jednoduchého termohydraulického výpočtu experimentálního svazku firmy Škoda JS. Pro výpočet byl zvolen subkanálový program ALTHAMC12. Byly sledovány změny průběhů teplot, tlakových ztrát a průtoků po výšce svazku vybranými subkanály, pokud se do svazku zavedla nová mříž s různými součiniteli místních odporů pro jednotlivé druhy subkanálů. V subkanále, ve kterém měla mřížka součinitel největší, byl zaznamenán pokles průtoku. Chladivo se rozdělilo do okolních subkanálů s menším součinitelem odporu. Výstupní teploty i tlakové ztráty ze svazku se zvětšili ve všech subkanálech.

Bibliografie

- [1] *ALTHAMC12 - Dokumentace k programu*. ALVEL. 2018.
- [2] T. Anderson, J. Almberger a L. Björnkvist. „A Decade of Assembly Bow Management at Ringhals“. In: *Technical Meeting* (22. - 26. listopad 2004).
- [3] H. Bailly, D. Ménessier a C. Prunier ed. *The Nuclear Fuel of Pressurized Water Reactors and Fast Neutron Reactors - Design and Behavior*. Paříž: Lavoiser Publishing, 1999. ISBN: 2-7272-0198-2.
- [4] J. Berger. „Impact of fuel assembly bowing on the power density distribution and its monitoring in Siemens/KWU-PWR“. Dis. pr. Royal Institute of Technology, 2017.
- [5] Y. Bilodid, E. Fridman a T. Lötsch. „X2 VVER-1000 benchmark revision: fresh HZP core state and the reference Monte Carlo solution“. In: *Annals of Nuclear Energy vol. 144* (2020). ISSN: 0306-4549.
- [6] A. Enin, Y. Bezborodov a D. Pluzhnikov. „Improvement of VVER-1000 FA design and manufacturing techniques. The basic results of operation VVER-1000 FA made by jsc «NCCP»“. In: *8th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulharsko, 26 září - 4. říjen 2009. URL: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2001/12/41086.pdf>.
- [7] „ENUSA will manufacture VVER-440 fuel in collaboration with Westinghouse“. In: *Foro Nuclear* (2023). URL: <https://www.foronuclear.org/en/updates/news/enusa-will-manufacture-vver-%20440-fuel-in-collaboration-with-westinghouse/>.
- [8] B. Heřmanský. *Jaderné reaktory I. - podklady k přednášce „Jaderné reaktory“*. Praha: KJR, 2013.
- [9] D. Hrozek. „Jaderná elektrárna Dukovany je v provozu od roku 1985“. In: *oenergetice.cz* (2018). URL: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-dukovany> [2018].
- [10] R. Hu. *Cladding Performance under Power Oscillations in BWRs*.
- [11] IAEA. „Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors (2006–2015)“. In: (). URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1864_web.pdf.
- [12] IAEA. *Zaključitelnyj otčet programmy po bezopasnosti atomnykh elektrostancij s reaktorami tipa VVER i RBMK*. Vídeň, 1999.
- [13] PRIS IAEA. *In Operation Suspended Operation Reactors*. cit. 22.01.2023. 21.01.2023. URL: <https://pris.iaea.org/pris/worldstatistics/operationalreactors.aspx>.

- [14] S. Jeon, O. Kwon a J. Kim. „Assembly Bow Characteristics of the HIPER16(TM) Fuel Design“. In: Jeju, Korea, čvc. 2015. URL: https://www.kns.org/files/pre_paper/33/15S-534%EC%A0%84%EC%83%81%EC%9C%A4.pdf.
- [15] K. KIM, Y. JANG a J. KIM. „In-Reactor Performance of an Advanced PWR Fuel, PLUS7, for OPR1000s in Korea“. In: *Journal of Nuclear Science and Technology* 45.8 (2008). DOI: 10.1080/18811248.2008.9711485. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.2008.9711485>.
- [16] M. Kopeć a M. Malá. „Fuel assembly deformation measurements“. In: Bulharsko, 2017. URL: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:50006707.
- [17] L. Kříž. *Američané a Francouzi budou nově dodávat jaderné palivo do Temelína*. 2022. URL: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/americane-a-francouzi-budou-nove-dodavat-jaderne-palivo-do-temelina-157446>.
- [18] Oak Ridge National Laboratory. *The Graphite Reactor*. cit. 12.01.2022. 11.12.2012. URL: <https://web.archive.org/web/20121211023309/http://www.ornl.gov/info/news/cco/graphite.shtml>.
- [19] F. Lodi et al. „ANTEO+: A subchannel code for thermal-hydraulic analysis of liquid metal cooled systems.“ In: 2016.
- [20] R. Masterson. *Nuclear Reactor Thermal Hydraulics: An Introduction to Nuclear Heat Transfer and Fluid Flow*. CRC Press, 2019. ISBN: 9781315226231.
- [21] P. Moreno et al. „Steady state thermal analysis of PWRs by a single-pass procedure using a simplified nodal layout“. In: *Nuclear Engineering and Design* 47 (1978). ISSN: 0029-5493. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029549378900031>.
- [22] R. Mukin, I. Clifford a H. Ferroukhi. „THERMAL HYDRAULIC ANALYSIS OF PWR ASSEMBLY BOWING USING SUBCHANNEL CODE COBRA-TF“. In: Xi'an, Čína, Zář 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/319878528_THERMAL_HYDRAULIC_ANALYSIS_OF_PWR_ASSEMBLY_BOWING_USING_SUBCHANNEL_CODE_COBRA-TF.
- [23] K. Murthy a I. Charit. *An Introduction to Nuclear Materials*. Weinheim, 2013.
- [24] CSNI NEA-OECD. *VVER - Specific Features, Regarding Core Degradation, Status Report*. 1998. URL: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/csni-r98-20.pdf>.
- [25] E. Nissan. „An overview of AI methods for in-core fuel management: tools for the automatic design of nuclear reactor core configurations for fuel reload,(re) arranging new and partly spent fuel“. In: *Designs* (2019).
- [26] Y. Peng et al. „Numerical investigation on effects of fuel rod with different bow deformation ratio X on two-phase boiling and flow performances of coolant in fuel assembly“. In: *Progress in Nuclear Energy* (2023).
- [27] Y. Rahmani et al. „Calculation of the fuel composition and the thermo-neutronic parameters of the Bushehr's VVER-1000 reactor during the initial startup and the first cycle using the WIMSD5-B“. In: *Annals of Nuclear Energy vol. 57* (2013). ISSN: 0306-4549.

- [28] Rosatom. *The VVER today: Evolution, Design, Safety*. cit. 12.01.2022. URL: %5Curl%7Bhttps://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1a.pdf%7D.
- [29] S. Sabhasachi et al. „Rooppur Nuclear Power Plant: Current Status Feasibility“. In: *Journal of Mechanical Engeneering* 68 (pros. 2018), s. 167–182. DOI: 10.2478/scjme-2018-0033.
- [30] O. Samoilov et al. „Development of TVSA VVER-1000 Fuel“. In: *10th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulharsko, 7.–14. břez. 2013. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/122/44122449.pdf.
- [31] O. Samoilov et al. „TVSA-T fuel assembly for Temelin NPP. Main results of design and safety analyses. Trends of development“. In: (led. 2010). URL: <https://www.slideshare.net/myatom/tvsat-fuel-assembly-for-temelin-npp-main-results-of-design-and-safety-analyses-trends-of-development>.
- [32] O. Samoylov et al. *Operating Experience with the TVSA Fuel Assembly and with Its Versions — Perspectives on the Development*. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/006/50006668.pdf.
- [33] Kee-nam Song et al. „Effect of mechanical properties in the weld zone on the structural analysis results of a plate-type heat exchanger prototype and pressurized water reactor spacer grid“. In: *Journal of nuclear science and technology* 49.9 (2012), s. 947–960.
- [34] R. Svoboda. *Grid-to-rod fretting. Rodinná choroba paliva PWR*. 2008. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/124/43124127.pdf.
- [35] N. Todreas a M. Kazimi. *Nuclear Systems Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals*. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN: 978-1-4398-0887-0.
- [36] N. Todreas a M. Kazimi. *Nuclear Systems Volume II: Elements of Thermal Hydraulic Design*. Boca Raton: CRC Press, 2001. ISBN: 1-56032-079-6.
- [37] A. Ugryumov. „Nuclear Fuel for NPP: Current Status and Main Fields of the Development“. In: *International Conference VVER*. Praha, pros. 2013. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/122/44122432.pdf?r=1.
- [38] „VVER-440/213 - The reactor core“. In: *atomeromu.mvm.hu* (). URL: https://atomeromu.mvm.hu/-/media/PAZrtSite/Documents/Tudastar/HogyanMukodik/2_Structure_of_Paks_npp.ashx.
- [39] H. Weidinger. „Design and Performance of PWR and BWR Fuel“. In: *Workshop on Modeling and Quality Control for Advanced and Innovative Fuel Technologies* (). URL: <https://indico.ictp.it/event/a04215/session/38/contribution/23/material/0/0.pdf>.
- [40] Westinghouse. *VVER-1000 Fuel Products, Technical Data*. 2018.
- [41] Wikipedia. *Zirconium alloys — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Zirconium_alloys&oldid=1161762572. [Online; citováno 1.srpna 2023]. 2023.

- [42] O. Yoshiaki. *Nuclear Reactor Design*. Tokio: Springer, 2014. ISBN: 978-4-431-54897-3.
- [43] A. Zubrina a A. Ustinova. „Pervaja v mire AES v Obninske stanovitsja pamjatnikom-muzeem“. In: *tass.ru* (2017). URL: <https://tass.ru/v-strane/4594279> [2017].