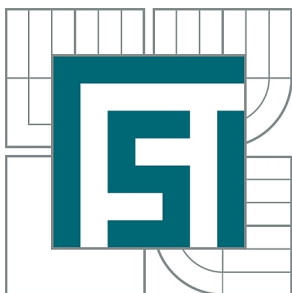




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ANALÝZA TEPLOTNÍCH POLÍ PALIVOVÝCH ELEMENTŮ

FUEL ELEMENTS THERMAL FIELD ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ VACEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. HUGO ŠEN

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Vacek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

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

Analýza teplotních polí palivových elementů

v anglickém jazyce:

Fuel elements thermal field analysis

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Z dostupných pramenů shrnout problematiku přenosu tepla v palivových elementech jaderného reaktoru a přestupu tepla do chladiva. Seznámit se s řešením přenosu tepla podle doporučených vztahů v literatuře. Řešit teplotní pole pro vybraný typ palivového článku a zvolené provozní stavy. Vytvořit odpovídající modely v systému ANSYS a zhodnotit všechny získané výsledky s přihlédnutím k zavedeným předpokladům.

Cíle bakalářské práce:

1. Shromáždit dostupné publikované údaje o konstrukci vybraných palivových elementů jaderných reaktorů
2. Popsat výpočtové postupy pro určení teplot paliva a pokrytí a přenosu tepla z pokrytí do chladiva
3. Provést řešení teplotního pole pro konkrétní typ palivového článku a vybrané provozní stavy
4. Sestavit a řešit odpovídající modely numericky v systému ANSYS
5. Shrnout a zhodnotit získané výsledky

Seznam odborné literatury:

- 1) Heřmanský, B. Termomechanika jaderných reaktorů, Academia, Praha 1986
- 2) Ochrana, L. Provoz, zkoušení a dozimetrie jaderně energetických zařízení (s reaktory VVER). VUT Brno, 1988
- 3) Bečvář, J. Jaderné elektrárny, SNTL, Praha 1981
- 4) Jicha, M. Přenos tepla a látky, CERM, Brno 2001
- 5) ANSYS 14 Online Help

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Hugo Šen

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 6.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

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

Anotace

Cílem této bakalářské práce je popsat výpočtové postupy při řešení teplotního pole v jednotlivých částech palivového elementu. Dále provést řešení pro palivový element VVER-440 při vybraných provozních stavech. Tato řešení jsou též provedena numericky v programu ANSYS. V práci jsou posouzeny významy jednotlivých vlivů na řešení. Dále jsou posouzeny možnosti některých zjednodušení.

Annotation

The purpose of this thesis is to describe calculation procedures of fuel element thermal field analysis. The next is VVER-440 fuel element solution for selected operating conditions. These solutions are also made numerically with ANSYS. The importance of each effect on solution is assessed in thesis. The possibilities of some simplifications are also assessed.

Klíčová slova

Přenos tepla, palivový článek, palivová tableta, integrální tepelná vodivost, mezera mezi palivem a pokrytím

Key words

Heat transfer, fuel element, fuel pellet, thermal conductivity integral, gap between fuel and cladding

Bibliografická citace

VACEK, J. *Analýza teplotních polí palivových elementů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Hugo Šen.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně na základě uvedené odborné literatury pod vedením Ing. Hugo Šena.

V Brně dne 19. května 2013

.....

Jiří Vacek

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce p. Ing. Hugovi Šenovi za trpělivé vedení práce, za hodnotné rady a cenné informace.

Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	KONSTRUKCE VYBRANÝCH PALIVOVÝCH ELEMENTŮ JADERNÝCH REAKTORŮ	10
2.1	Palivový element reaktoru VVER-440	10
2.2	Palivový element reaktoru VVER-1000	11
3	ANALÝZA TEPLITNÍCH POLÍ V PALIVOVÝCH ELEMENTECH.....	12
3.1	Přenos tepla z pokrytí do chladiva	13
3.2	Rozložení teplot uvnitř pokrytí	14
3.3	Vedení tepla v mezeře mezi palivem a povlakem	16
3.4	Palivová tableta, λ je konstantní	17
3.5	Palivová tableta, λ závisí na teplotě	18
3.6	Integrovaná tepelná vodivost	20
3.7	Shrnutí rovnic pro určení teplot na rozhraních	21
3.8	Shrnutí rovnic pro určení teplotního průběhu uvnitř pokrytí a uvnitř palivové tablety ..	22
4	VÝPOČET TEPLITNÍCH POLÍ PRO VYBRANÉ PROVOZNÍ STAVY PALIVA VVER-440	23
4.1	Provozní stav 1	23
4.2	Provozní stav 2	29
4.3	Provozní stav 3	34
4.4	Provozní stav 4	39
4.5	Provozní stav 5	44
4.6	Provozní stav 6	49
4.7	Porovnání jednotlivých provozních stavů.....	55
5	ANALÝZA TEPLITNÍHO POLE VVER-440 POMOCÍ PROGRAMU ANSYS	57

5.1	Provozní stav 1	58
5.2	Provozní stav 2	59
5.3	Provozní stav 3	60
5.4	Provozní stav 4	61
5.5	Provozní stav 5	62
5.6	Provozní stav 6	63
5.7	Shrnutí	64
6	VLIV CENTRÁLNÍHO OTVORU NA MAXIMÁLNÍ TEPLITU V PALIVOVÉ TABLETĚ	65
6.1	Provozní stav 1 – bez centrálního otvoru	66
6.2	Provozní stav 2 – bez centrálního otvoru	67
6.3	Provozní stav 5 – bez centrálního otvoru	68
6.4	Shrnutí	69
7	ZÁVĚR	70
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	72
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	73

1 Úvod

Jaderná energie doprovází lidstvo již dlouhá desetiletí. Za tu dobu se stala nepostradatelnou součástí mnoha států. Tento zdroj je již dnes spolehlivou alternativou fosilních paliv a tento význam do budoucna jistě poroste.

Jaderné palivo se vyznačuje vysokým objemovým tepelným výkonem. Uvnitř aktivní zóny jaderného reaktoru tedy dochází k vysokým hustotám tepelných toků. Využívání tohoto zdroje vyžaduje zvládnutí efektivního způsobu chlazení. Dále je třeba určit teplotní zatížení jednotlivých součástí reaktoru, především samotných palivových článků.

V této práci je zprvu pojednáno o vlastnostech palivových článků VVER-440 a VVER-1000. Dále se práce zabývá analýzou teplotních polí uvnitř palivového článku. Postupně jsou rozebrány jednotlivé oblasti uvnitř článku a vhodné způsoby výpočtu i problematika přenosu tepla. Vytvořený matematický model je poté aplikován na vybrané provozní stavy paliva VVER-440. Tyto provozní stavy jsou voleny tak, aby řešení co nejlépe poukázala na nejvýznamnější vlivy.

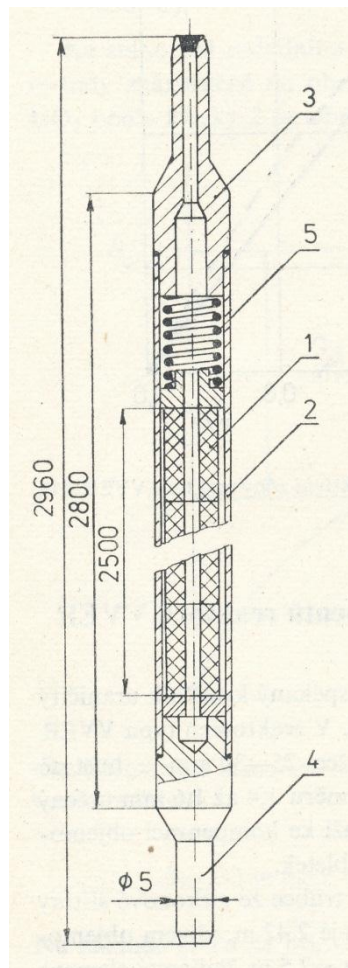
U jednotlivých řešení jsou průběhy teplot uvnitř samotného paliva určeny pomocí integrální tepelné vodivosti. Poté jsou porovnány se zjednodušenými průběhy. Též jsou posouzeny významy některých vlivů na teplotní pole.

Tyto provozní stavy jsou poté řešeny numericky v programu ANSYS. V závěru práce je nakonec posouzen vliv centrálního otvoru na snížení maximální teploty v palivu.

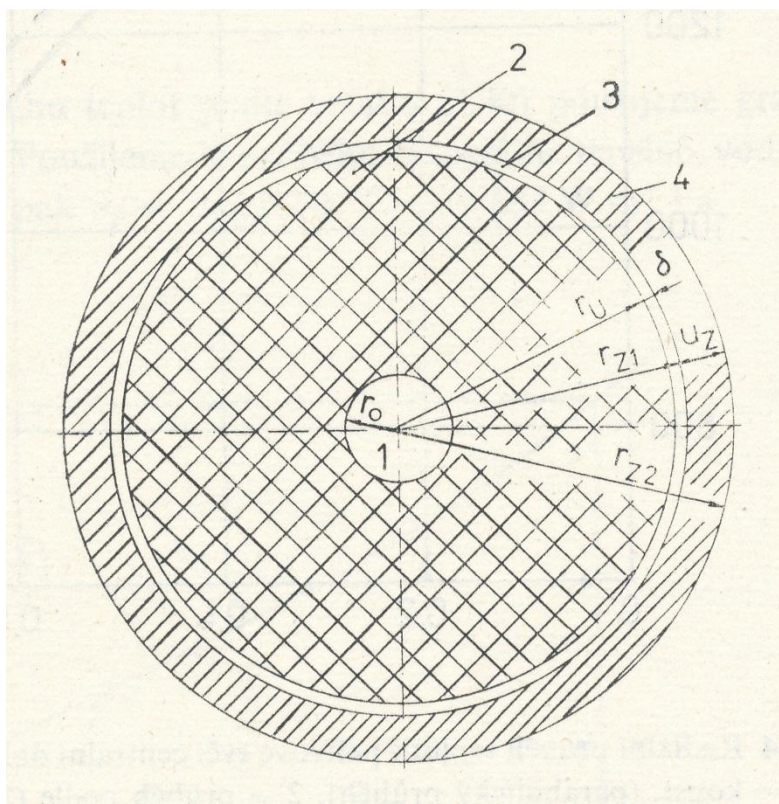
2 Konstrukce vybraných palivových elementů jaderných reaktorů

2.1 Palivový element reaktoru VVER-440

V aktivní zóně jaderného reaktoru VVER-440 se nachází 349 palivových kazet. Každá kazeta se skládá ze 126 palivových proutků.



Obr. 2 Podélný řez palivovou tyčí reaktoru VVER-440. 1 – palivová tableta, 2 – povlak, 3 – horní koncovka, 4 – dolní koncovka, 5 – pružina [1]



Obr. 1 Příčný řez palivovou tyčí reaktoru VVER-440. 1 – centrální dutina, 2 – palivová tableta, 3 – mezera palivo-povlak, 4 – povlaková trubka [1]

Palivový proutek je složen z palivových tablet UO_2 , které jsou poskládány nad sebou a hermeticky uzavřeny do válcového pokrytí ze slitiny Zirkon-Niob(1%). Pokrytí má vnější průměr 9,1 mm a vnitřní průměr 7,73 mm. [1]

Tableta samotná má výšku 9 až 12 mm a průměr 7,54 až 7,60 mm. Uprostřed tablety je centrální otvor o průměru 1,2 nebo 1,4 mm, který snižuje maximální teplotu v ose tablety. Dále se zde také hromadí plynné štěpné produkty.

Mezi palivovým sloupcem a pokrytím se nachází mezera vyplněná heliem o výrobním přetlaku 0,3 až 0,7 MPa. Tento tlak se postupně během provozu zvyšuje a složení plynu se mění s přibýváním plynných štěpných produktů. Mezera čerstvého palivového proutku je široká asi 0,1 mm a během provozu dochází k jejímu postupnému zmenšování vlivem objemového růstu paliva. [1]

2.2 Palivový element reaktoru VVER-1000

V aktivní zóně jaderného reaktoru VVER-1000 se nachází 151 palivových kazet. Každá kazeta se skládá z 317 palivových proutků. Palivový proutek je podobný jako u reaktoru VVER-440. Tablety UO_2 jsou uzavřeny v pokrytí ze zirkonové slitiny.

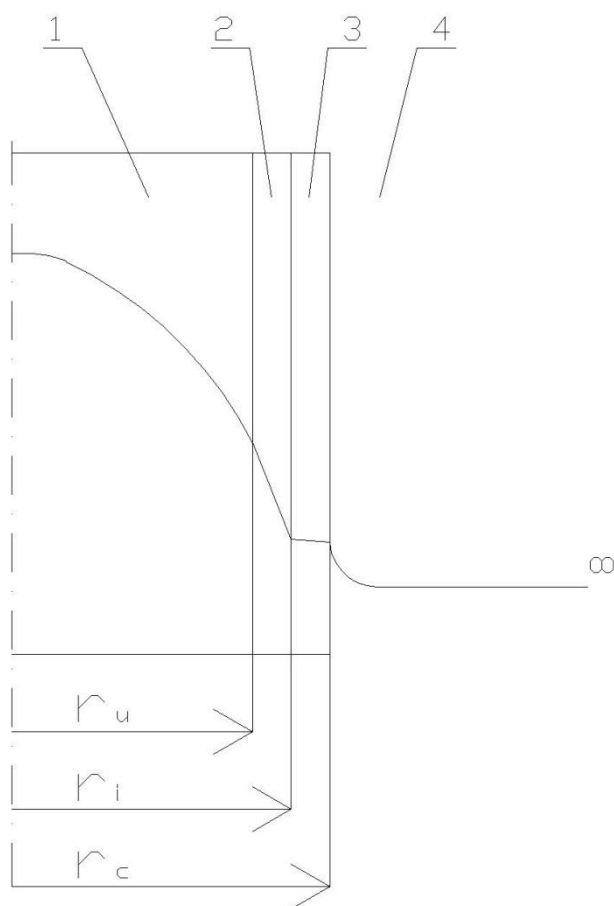
Pokrytí má vnější průměr 9,1 mm a vnitřní průměr 7,72 mm. Tableta má průměr 7,57 mm a centrální otvor v tabletě má průměr 1,4 mm. Výška tablety je 9 až 11 mm. Mezera mezi palivem a povlakem je u čerstvého paliva široká 0,85 mm. [6]



Obr. 3 Palivová kazeta reaktoru VVER-1000 [5]

3 Analýza teplotních polí v palivových elementech

Matematický model pro analýzu teplotních polí v palivovém elementu si můžeme představit jako vedení tepla složenou válcovou stěnou. Tato složená válcová stěna obsahuje celkem čtyři oblasti popsané na Obr. 4



Obr. 4 Vedení tepla jednotlivými oblastmi. 1 – palivová tableta, 2 – mezera palivo-pokrytí, 3 – pokrytí, 4 – chladivo.

Oblast 1 představuje palivovou tabletu, oblast 2 mezeru mezi palivem a pokrytím, oblast 3 je samotné pokrytí a oblast 4 představuje konvektivní přenos tepla do okolního chladiva.

Při matematickém popisu teplotního pole těchto oblastí lze vycházet z Fourierova zákona vedení tepla

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

a Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla

$$\frac{\partial(\rho \cdot c \cdot T)}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + q_V \quad (2)$$

Pokud je pro danou oblast součinitel tepelné vodivosti λ konstantní a součin $\rho \cdot c$ též konstantní, přejde rovnice do tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{q_V}{\rho \cdot c} \quad (3)$$

kde a představuje tzv. teplotní vodivost

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4)$$

Výraz na levé straně rovnice (3) bude pro stacionární vedení tepla roven nule

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \quad (5)$$

Pokud se v dané oblasti nebude vyskytovat objemový zdroj tepla, výraz q_V bude roven také nule.

Následnou rovnici

$$0 = a \cdot \nabla^2 T \quad (6)$$

Podělíme konstantou a

$$0 = \nabla^2 T \quad (7)$$

Výraz na pravé straně rovnice (7) je Laplaceův diferenciální operátor. Budeme uvažovat pouze vedení tepla v radiálním směru a ostatní směry zanedbáme. Pro válcový souřadný systém a předpoklad, že $T = f(r)$, se tvar rovnice (7) změní na

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT}{dr} = 0 \quad (8)$$

3.1 Přenos tepla z pokrytí do chladiwa

V této oblasti je pokrytí o teplotě T_C obtékáno chladivem o teplotě T_∞

Vyjdeme z Newtonova zákona

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha \cdot (T_C - T_\infty) \quad (9)$$

Vztáhneme na lineární tepelný výkon q_H

$$q_H = 2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha \cdot (T_C - T_\infty) \quad (10)$$

a pro teplotu povrchu pokrytí T_C platí:

$$T_C = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha} + T_\infty \quad (11)$$

3.2 Rozložení teplot uvnitř pokrytí

Pro určení teplot uvnitř pokrytí lze vyjít z rovnice (8)

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT}{dr} = 0$$

Integrováním této rovnice je závislost teploty T na poloměru r

$$T(r) = C_1 \cdot \ln(r) + C_2 \quad (12)$$

Konstanty C_1 a C_2 lze vyloučit pomocí okrajových podmínek.

Okrajová podmínka I. druhu – Dirichletova

Udává známou teplotu T_C na povrchu tělesa.

$$T(C) = T_C \quad (13)$$

Okrajová podmínka III. druhu – Fourierova

Tepelný tok na povrchu tělesa o poloměru

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_C} = \alpha \cdot (T_C - T_\infty) \quad (14)$$

Rovnici (12)

$$T(r) = C_1 \cdot \ln(r) + C_2$$

lze upravit derivací

$$\frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r} \quad (15)$$

a pro získání hodnoty konstanty C_1 lze dosadit Fourierovu podmínku, rovnici (14)

Vzniklá rovnice bude vypadat:

$$-\lambda \cdot \frac{C_1}{r_C} = \alpha \cdot (T_C - T_\infty) \quad (16)$$

$$C_1 = -\frac{r_C}{\lambda} \alpha \cdot (T_C - T_\infty) \quad (17)$$

Konstanta C_1 se dosadí do rovnice (12)

$$T(r) = C_2 - \frac{r_c}{\lambda} \alpha \cdot (T_c - T_\infty) \cdot \ln(r) \quad (18)$$

Konstantu C_2 lze vyloučit dosazením podmínky konstantní teploty T_{Ci} na vnitřním povrchu pokrytí o poloměru r_{Ci}

$$T_{Ci} = C_2 - \frac{r_c}{\lambda} \alpha \cdot (T_c - T_\infty) \cdot \ln(r_{Ci}) \quad (19)$$

$$C_2 = T_{Ci} + \frac{r_c}{\lambda} \alpha \cdot (T_c - T_\infty) \cdot \ln(r_{Ci}) \quad (20)$$

Dosazením konstanty C_2 zpět do rovnice (18) vznikne

$$T(r) = T_{Ci} + \frac{r_c}{\lambda} \alpha \cdot (T_c - T_\infty) \cdot \ln(r_{Ci}) - \frac{r_c}{\lambda} \alpha \cdot (T_c - T_\infty) \cdot \ln(r) \quad (21)$$

Kde λ je součinitel tepelné vodivosti pokrytí $\lambda_z = \text{konst.}$, úpravou vznikne

$$T(r) = T_{Ci} + \frac{r_c}{\lambda_z} \alpha \cdot (T_c - T_\infty) \cdot \ln\left(\frac{r_{Ci}}{r}\right) \quad (22)$$

Tato rovnice platí pro $r_{Ci} \leq r \leq r_c$ a popisuje oblast pokrytí. Teplota T_{Ci} je teplotou na vnitřním povrchu pokrytí.

Jiná možnost, jak určit průběh teplot v pokrytí je vyjít z Fourierovy rovnice vztažené na jednotku délky

$$q_H = -2 \cdot \pi \cdot \lambda_z \cdot \frac{dT}{dr} \quad (23)$$

kde λ_z je konstantní. Po separaci proměnných a integraci lze obdržet vztah:

$$T(r) = \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} + T_c \quad (24)$$

Teplota T_{Ci} je pak určena dosazením $T(r_{Ci}) = T_{Ci}$

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_{Ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} + T_c \quad (25)$$

kde pro daný interval teplot (zpravidla desítky °C) lze považovat λ_z za konstantní.

Součinitel tepelné vodivosti λ_z pro různé střední teploty pokrytí je vyjádřen v Tab. 1. [1]

Teplota (°C)	200	300	400	500
Součinitel tepelné vodivosti λ_z (W m ⁻¹ K ⁻¹)	19,3	20,1	20,5	20,9

Tab. 1 Součinitel tepelné vodivosti λ_z uvnitř pokrytí v závislosti na teplotě. [1]

Jak je vidět v Tab. 1, změna součinitele tepelné vodivosti λ_z se změnou teploty je velmi malá. Navíc tloušťka pokrytí je jen asi 0,7 mm. Rozdíl teplot mezi vnější a vnitřní stranou je v řádu

desítek °C. Vzhledem k tomu postačí odhadnout přibližnou hodnotu λ_z podle teploty T_c . Případná chyba při výpočtu teploty T_{Ci} je zanedbatelná. Po vypočtení teploty T_{Ci} a určení střední teploty uvnitř pokrytí je navíc možno hodnotu λ_z ještě poupravit a výsledek tak upřesnit.

3.3 Vedení tepla v mezeře mezi palivem a povlakem

Mezera mezi palivem a povlakem se z hlediska přenosu tepla jeví jako izolant. Je však nutno dodat, že mezera představuje potřebnou rezervu pro objemový růst tablety. Tímto růstem se rozumí jednak provozní zvětšení objemu vlivem tepelné roztažnosti, jednak postupné a trvalé zvětšení objemu, tzv. napuchání. Tento růst vede až k dotyku tablety a pokrytí. Tento stav samozřejmě zvyšuje mechanické namáhání pokrytí. [1]

Další podstatnou změnou může být vznik vrstvičky oxidu zirkonu z vnitřní strany pokrytí. Tato vrstvička podstatně snižuje přenos tepla v mezeře a je tedy nežádoucím jevem.

Podmínky pro přenos tepla v mezeře jsou tedy velice ovlivněny mírou vyhoření daného palivového článku.

Celkový součinitel sdílení tepla v mezeře lze vyjádřit jako

$$\alpha_U = \alpha_g + \alpha_k + \alpha_r$$

Člen α_g představuje vliv vedení tepla plynem, α_k vyjadřuje vedení tepla v místech dotyku tablety a pokrytí a α_r charakterizuje přenos tepla zářením. Pro čerstvé palivo budou α_k , α_r zanedbatelné. Při zaplnění mezery a dotyku obou povrchů se přenos tepla podstatně zlepší. [1]

Formálně vyjdeme z Newtonova zákona

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (26)$$

Vztáhneme na lineární tepelný výkon

$$q_H = 2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U \cdot (T_P - T_{Ci}) \quad (27)$$

a určíme teplotu povrchu palivové tablety T_P

$$T_P = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + T_{Ci} \quad (28)$$

Výraz α_U představuje součinitel sdílení tepla v mezeře palivo-povlak. Doporučené hodnoty α_U [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] v závislosti na lineárním tepelném výkonu q_H jsou vyjádřeny v Tab. 2. [1]

q_H (kW m^{-1})	10	20	30	40	50
Čerstvé palivo	1,90	2,75	3,35	4,15	5,10
Vyhořelé palivo	0,30	0,85	1,28	1,84	3,10

Tab. 2 Doporučené hodnoty α_U ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) v závislosti na lineárním tepelném výkonu q_H [1]

Pokud dojde k dotyku tablety a pokrytí bude hodnota α_U přibližně rovna [1]

$$\alpha_U = 43 [kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

3.4 Palivová tableta, λ je konstantní

Pokud budeme považovat součinitel tepelné vodivosti λ za konstantní, lze vyjít z rovnice (3)

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \Delta T + \frac{q_V}{\rho \cdot c}$$

Budeme-li uvažovat stacionární stav a budeme-li předpokládat pouze radiální vedení tepla, vznikne rovnice ve tvaru

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT}{dr} + \frac{q_V}{\lambda} = 0 \quad (29)$$

nebo

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{q_V}{\lambda} \quad (30)$$

Řešení této rovnice je známé:

$$r \cdot \frac{dT}{dr} = -\frac{q_V \cdot r^2}{2 \cdot \lambda} + C_1 \quad (31)$$

$$T = -\frac{q_V \cdot r^2}{4 \cdot \lambda} + C_1 \cdot \ln(r) + C_2 \quad (32)$$

Dosazením podmínky maximální teploty v ose palivové tyče

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (33)$$

do rovnice (31) určíme konstantu $C_1 = 0$

Konstantu C_1 dosadíme do rovnice (32)

$$T = -\frac{q_V \cdot r^2}{4 \cdot \lambda} + C_2 \quad (34)$$

Konstantu C_2 určíme dosazením okrajové podmínky

$$T(r_U) = T_P \quad (35)$$

do rovnice (34)

$$T_P = -\frac{q_V \cdot r_U^2}{4 \cdot \lambda} + C_2 \quad (36)$$

Konstanta C_2 tedy bude:

$$C_2 = T_P + \frac{q_V \cdot r_U^2}{4 \cdot \lambda} \quad (37)$$

Dosazením konstanty C_2 zpět do rovnice (34) vznikne

$$T = \frac{q_V}{4 \cdot \lambda} \cdot (r_U^2 - r^2) + T_P \quad (38)$$

Dále lze za q_V dosadit

$$q_V = \frac{q_H}{\pi \cdot r_U^2} \quad (39)$$

a vznikne vztah

$$T(r) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + T_P \quad (40)$$

Teplota T_0 v ose tyče ($r = 0$) bude

$$T_0 = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + T_P \quad (41)$$

3.5 Palivová tableta, λ závisí na teplotě

V této oblasti se bude vyskytovat objemový zdroj tepla. Dále součinitel tepelné vodivosti λ nebudeme považovat za konstantní, je tedy $\lambda(T)$.

Vyjdeme z Fourierova zákona vedení tepla, rovnice (1)

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dr}$$

Pro obecný poloměr r dosadíme válcovou plochu S

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad (42)$$

Dále určíme tepelný výkon vznikající v objemu ohraničeném touto plochou

$$\dot{Q} = q_V \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L \quad (43)$$

Tepelný tok, který prochází válcovou plochou o obecném poloměru r bude při ustáleném stavu roven tepelnému výkonu uvnitř této plochy. Z rovnic (1) a (43) tedy vyplývá:

$$q_V \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dT}{dr}$$

$$q_V \cdot r = -\lambda \cdot 2 \cdot \frac{dT}{dr} \quad (44)$$

Separací proměnných

$$\frac{1}{2} \cdot q_V \cdot r \cdot dr = -\lambda \cdot dT$$

vznikne rovnice

$$\int_r^{r_U} \frac{1}{2} \cdot q_V \cdot r \cdot dr = - \int_T^{T_P} \lambda(T') \cdot dT' \quad (45)$$

Integrací rovnice (45) vznikne

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \cdot q_V (r_U^2 - r^2) &= - \int_T^{T_P} \lambda(T') \cdot dT' \\ \frac{1}{4} \cdot q_V (r_U^2 - r^2) &= \int_{T_P}^T \lambda(T') \cdot dT' \end{aligned} \quad (46)$$

Jelikož je výraz $\lambda(T')$ složitou funkcí teploty, pravou stranu rovnice

$$\int_{T_P}^T \lambda(T') \cdot dT'$$

je výhodné vyjádřit ve tvaru

$$\int_{T_P}^T \lambda(T') \cdot dT' = \int_0^T \lambda(T') \cdot dT' - \int_0^{T_P} \lambda(T') \cdot dT' = \vartheta(T) - \vartheta_P \quad (47)$$

Výraz $\vartheta(T)$ zde představuje tzv. Integrální tepelnou vodivost. Ta je definována jako

$$\vartheta(T) = \int_0^T \lambda(T') \cdot dT' \quad (48)$$

Z rovnic (46) a (47) lze tedy obdržet rovnici ve tvaru

$$\frac{1}{4} \cdot q_V (r_U^2 - r^2) = \vartheta(T) - \vartheta_P \quad (49)$$

Zavedením lineárního tepelného výkonu q_H dosazením rovnice (39)

$$q_V = \frac{q_H}{\pi \cdot r_U^2}$$

přejde rovnice (49) do tvaru

$$\frac{q_H}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) = \vartheta(T) - \vartheta_P \quad (50)$$

nebo též

$$\vartheta(T) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \vartheta_P \quad (51)$$

3.6 Integrální tepelná vodivost

Pokud je součinitel přestupu tepla λ složitou funkcí teploty, je výhodné určit rozložení teplot pomocí integrální tepelné vodivosti $\vartheta(T)$, jak je to popsáno v předchozí kapitole.

V palivu UO_2 je součinitel tepelné vodivosti λ podle [1] vyjádřen jako

$$\lambda(T) = \frac{3824}{129,4 + T} + 4,788 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 \quad (52)$$

kde teplota T je v kelvinech.

Integrální tepelná vodivost $\vartheta(T)$ je pak vyjádřena rovnicí (48) jako

$$\vartheta(T) = \int_0^T \lambda(T') \cdot dT'$$

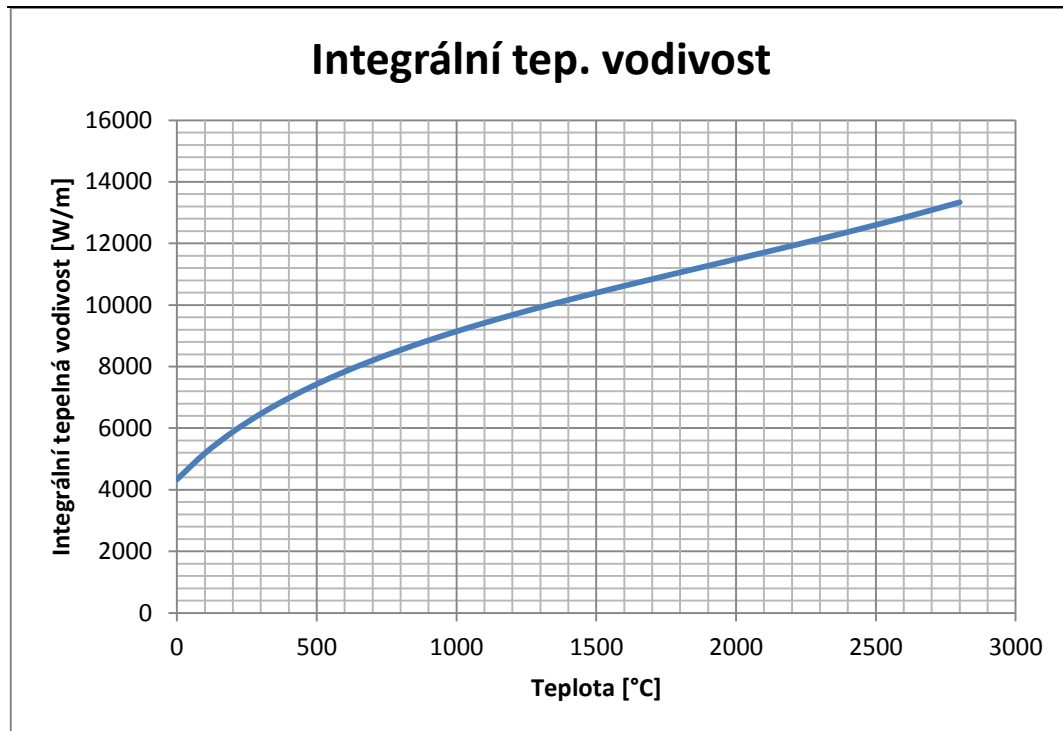
Dosazením z rovnice (52) do rovnice (48) a integrací vznikne rovnice ve tvaru

$$\vartheta(T) = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(129,4 + T) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot T^4$$

kde teplota T je opět v kelvinech. Přepsáním teploty do stupnice celsia vznikne:

$$\vartheta(T) = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T + 273,15)^4 \quad (53)$$

Průběh $\vartheta(T)$ v závislosti na teplotě T ($^{\circ}\text{C}$) je vyjádřen na Obr. 5.



Obr. 5 Integrální tepelná vodivost v závislosti na teplotě

3.7 Shrnutí rovnic pro určení teplot na rozhraních

Rovnice, které určují teploty na rozhraních jednotlivých oblastí palivového proutku jsou tedy následující:

teplota T_C na vnější straně pokrytí je určena rovnicí (11)

$$T_C = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha} + T_\infty$$

teplota na vnitřní straně pokrytí je určena rovnicí (25)

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{r_C}{r_{Ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_Z} + T_C$$

teplota na povrchu palivové tablety je určena rovnicí (28)

$$T_P = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + T_{Ci}$$

Po dosazení bude teplota T_P určena jako

$$T_P = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + \frac{\ln\left(\frac{r_C}{r_{Ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_Z} + \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha} + T_\infty \quad (54)$$

3.8 Shrnutí rovnic pro určení teplotního průběhu uvnitř pokrytí a uvnitř palivové tablety

Pro analýzu teplotních polí nebude třeba určovat přesné rozložení teplot v oblasti plynové mezery a v oblasti proudění tepla z povrchu do chladiva. Postačí pouze určení hraničních teplot. Je však třeba určit průběh teplot uvnitř pokrytí a uvnitř paliva.

Rovnice (24) určuje průběh teplot v oblasti pokrytí:

$$T(r) = \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} + T_c$$

Po dosazení teploty T_c z rovnice (11) přejde rovnice (24) do tvaru:

$$T(r) = \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} + \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_c \cdot \alpha} + T_\infty \quad (55)$$

Rovnice (40) určuje rozložení teplot v oblasti palivové tablety pro součinitel tepelné vodivosti λ konstantní:

$$T(r) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + T_P$$

a po dosazení teploty T_P z rovnice (54) do rovnice (55) vznikne:

$$T(r) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_{ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} + \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_c \cdot \alpha} + T_\infty \quad (56)$$

Pokud je součinitel tepelné vodivosti λ proměnný s teplotou, lze průběh teplot určovat pomocí integrální tepelné vodivosti určené v rovnici (51):

$$\vartheta(T) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \vartheta_P$$

Kde ϑ_P se určí z teploty T_P . Teplota $T(r)$ se pak určí z hodnoty výrazu $\vartheta(T)$

4 Výpočet teplotních polí pro vybrané provozní stavy paliva VVER-440

V modelových příkladech budou používány tyto rozměry palivového proutku:

r_U	3,78 mm
r_{Ci}	3,87 mm
r_C	4,55 mm

Tab. 3 Poloměry na rozhraní mezi jednotlivými oblastmi palivového proutku.

Teplotní pole budou počítána při provozních stavech čerstvého paliva, vyhořelého paliva bez dotyku tablety s pokrytím a vyhořelého paliva, kde se tableta pokrytí dotýká.

Tyto stavy budou počítány pro lineární tepelný výkon $30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ a $10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$.

	Provozní stav 1	Provozní stav 2	Provozní stav 3	Provozní stav 4	Provozní stav 5	Provozní stav 6
Lineární tepelný výkon q_H [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$]	30	30	30	10	10	10
Stupeň vyhoření palivového proutku	Čerstvý	Vyhořelý	Vyhořelý	Čerstvý	Vyhořelý	Vyhořelý
Stav mezery mezi tabletou a pokrytím	Bez dotyku	Bez dotyku	Dotýká se	Bez dotyku	Bez dotyku	Dotýká se

Tab. 4 Lineární tepelný výkon q_H , stupeň vyhoření a stav mezery pro jednotlivé provozní stavy.

4.1 Provozní stav 1

Předpoklady:

Ustálené vedení tepla

Čerstvý palivový článek

Lineární tepelný výkon $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$

Součinitel sdílení tepla z pokrytí do chladiva $\alpha = 27 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Střední teplota chladiva $T_\infty = 285 \text{ }^\circ\text{C}$

Zadání:

Dle uvedených předpokladů určit:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími T_C , T_{Ci} , T_P

Teplotu v ose palivové tablety T_0

Teplotní průběhy pro λ závislé na teplotě i λ konstantní a tyto průběhy porovnat.

λ konstantní bude zvolen zvlášť tak, aby bylo dosaženo stejné teploty T_0 a zvlášť podle střední teploty palivové tablety

Řešení:

Výpočet teploty T_C na vnějším povrchu pokrytí z rovnice (11):

$$T_C = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha} + T_\infty$$

$$T_C = \frac{30000}{2 \cdot \pi \cdot 4,55 \cdot 10^{-3} \cdot 27000} + 285$$

$$T_C = 38,9 + 285$$

$$T_C = 323,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Odhad součinitele přestupu tepla λ_Z podle teploty T_C z Tab. 1:

$$\lambda_Z = 20,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_{Ci} na vnitřním povrchu pokrytí z rovnice (25):

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{r_C}{r_{Ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_Z} + T_C$$

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{4,55 \cdot 10^{-3}}{3,87 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot 30000}{2 \cdot \pi \cdot 20,3} + 323,9$$

$$T_{Ci} = 38,1 + 323,9$$

$$T_{Ci} = 362 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Určení součinitele sdílení tepla α_U z Tab. 2:

Pro čerstvé palivo a zadaný lineární tepelný výkon q_H je

$$\alpha_U = 3,35 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_P na povrchu palivové tablety z rovnice (28):

$$T_P = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + T_{Ci}$$

$$T_P = \frac{30000}{2 \cdot \pi \cdot 3,78 \cdot 10^{-3} \cdot 3350} + 362$$

$$T_P = 377 + 362$$

$$T_P = 739 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = f(T)$:

Výpočet integrální tepelné vodivosti ϑ_P z rovnice (53):

$$\vartheta(T) = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T + 273,15)^4$$

$$\vartheta_P = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T_P) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T_P + 273,15)^4$$

$$\vartheta_P = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + 739) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (739 + 273,15)^4$$

$$\vartheta_P = -18595,8 + 26921,5 + 12.6$$

$$\vartheta_P = 8338 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení integrální tepelné vodivosti $\vartheta(T)$ pro libovolný poloměr r uvnitř tablety z rovnice (51):

$$\vartheta(T) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \vartheta_P$$

$$\vartheta(T) = \frac{30000}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 8338$$

Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 5.

Poloměr $r [m]$	$\vartheta(T) [W \cdot m^{-1}]$	Teplota $T [^{\circ}C]$
0,00000	10725,3	1647
0,00025	10714,9	1642
0,00050	10683,5	1628
0,00075	10631,3	1604
0,00100	10558,2	1572
0,00125	10464,3	1530
0,00150	10349,4	1479
0,00175	10213,7	1421
0,00200	10057,1	1354
0,00225	9879,6	1281
0,00250	9681,2	1201
0,00275	9461,9	1117
0,00300	9221,8	1028
0,00325	8960,7	937
0,00350	8678,8	844
0,00375	8376,0	751
0,00378	8338,3	739

Tab. 5 Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety pro provozní stav 1.

2) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = konst.$:

Volba součinitele přestupu tepla λ_1 tak, aby teplota v ose palivové tablety T_0 byla stejná, jako v předchozím průběhu:

Výpočet pomocí rovnice (41):

$$T_0 = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_1} + T_P$$

$$1647 = \frac{30000}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_1} + 739$$

$$\lambda_1 = 2,629 \, W \cdot m^{-1}$$

Volba součinitele přestupu tepla λ_2 podle střední teploty uvnitř tablety $\bar{T}$:

$$\bar{T} = \frac{T_P + T_0}{2} = 1193 \, ^{\circ}C = 1466 \, K$$

Výpočet pomocí rovnice (52):

$$\lambda_2 = \frac{3824}{129,4 + \bar{T}} + 4,788 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{T}^3$$

$$\lambda_2 = 2,548 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení průběhu teploty $T(r)$ uvnitř tablety podle rovnice (40):

$$T(r) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + T_P$$

$$T(r) = \frac{30000}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 739$$

Po dosazení λ_1 vznikne průběh:

$$T(r) = 908 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 739$$

Po dosazení λ_2 vznikne průběh:

$$T(r) = 937 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 739$$

Oba tyto průběhy teplot uvnitř palivové tablety jsou popsány v Tab. 6.

Poloměr r [m]	Teplota T [°C] (pro λ_1)	Teplota T [°C] (pro λ_2)
0,00000	1647	1676
0,00025	1643	1672
0,00050	1631	1660
0,00075	1611	1639
0,00100	1583	1610
0,00125	1548	1574
0,00150	1504	1528
0,00175	1452	1475
0,00200	1393	1414
0,00225	1325	1344
0,00250	1250	1266
0,00275	1166	1180
0,00300	1075	1086
0,00325	976	983
0,00350	869	873
0,00375	753	754
0,00378	739	739

Tab. 6 Průběhy teplot uvnitř palivové tablety podle volby λ konstantní, λ_1 je zvolena podle teploty T_0 , λ_2 je zvolena podle střední teploty $\bar{T}$, (Provozní stav 1)

Shrnutí:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími jsou

$$T_c = 323,9\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Ci} = 362\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_p = 739\text{ }^{\circ}\text{C}$$

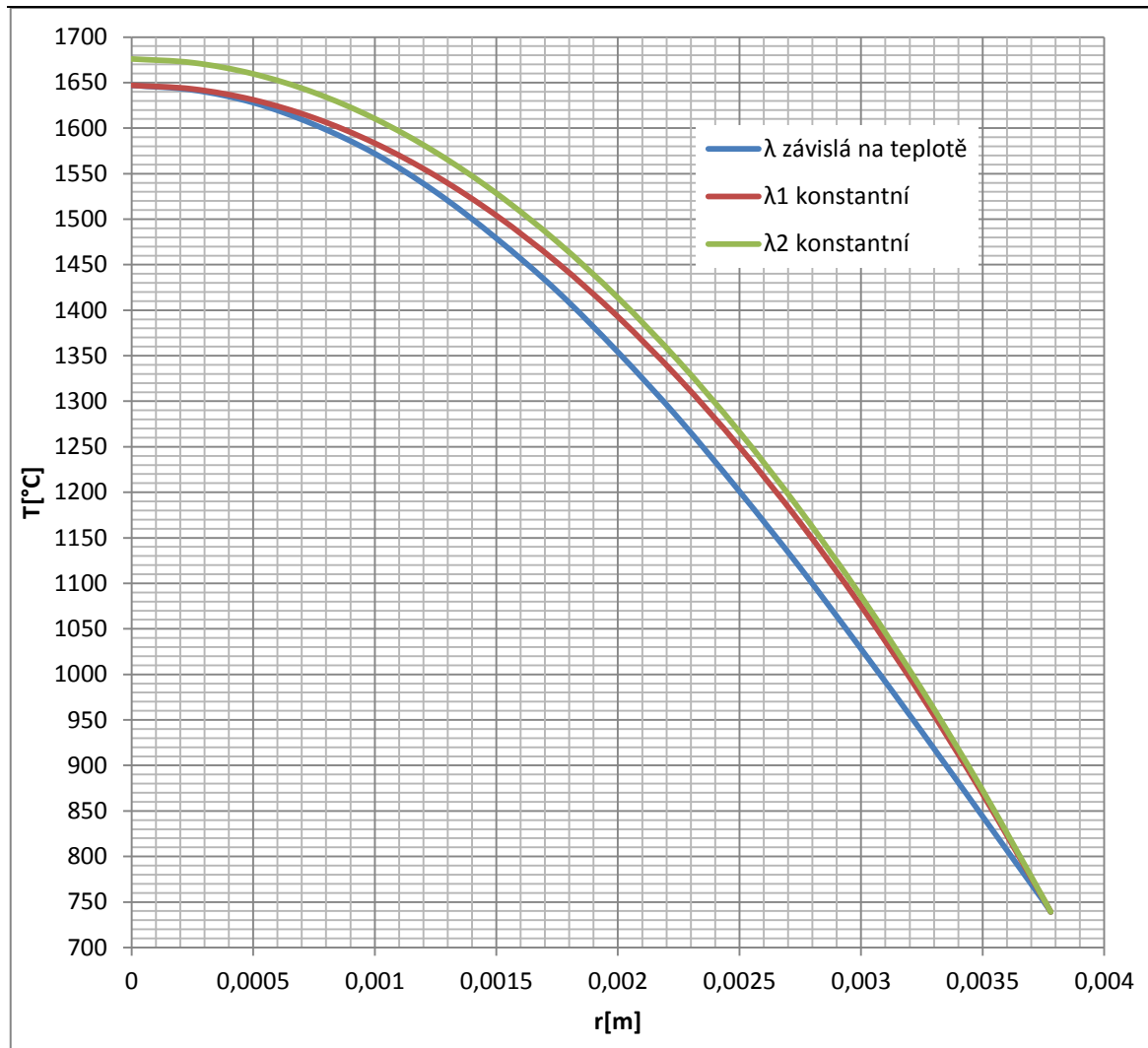
Teplota v ose palivové tablety je podle výpočtu pomocí integrální tepelné vodivosti:

$$T_0 = 1647\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Podle výpočtu s pomocí λ_2 zvolené pro střední teplotu uvnitř tablety je:

$$T_0 = 1676\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Teplotní průběhy uvnitř palivové tablety jsou popsány v Tab. 5 a Tab. 6. Porovnání průběhů je na Obr. 6. Jak je z grafu vidět, teplotní průběh v palivové tabletě u kysličnickového paliva obecně nemá příliš velkou shodu se zjednodušeným průběhem s λ konstantní. Dále se průběh teploty může poměrně výrazně lišit podle volby λ , jehož velikost nebývá během výpočtu dopředu známa.



Obr. 6 Porovnání průběhů teplot pro λ závislé na teplotě – pomocí integrální tep. vodivosti, λ_1 konstantní - zvolena podle maximální teploty tablety T_0 , λ_2 konstantní – zvolena podle střední teploty tablety $\bar{T}$. (Provozní stav 1)

4.2 Provozní stav 2

Předpoklady:

Ustálené vedení tepla

Vyhořelý palivový článek

Tableta se nedotýká pokrytí

Lineární tepelný výkon $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$

Součinitel sdílení tepla z pokrytí do chladiva $\alpha = 27 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Střední teplota chladiva $T_\infty = 285 \text{ °C}$

Zadání:

Dle uvedených předpokladů určit:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími T_C , T_{Ci} , T_P

Teplotu v ose palivové tablety T_0

Teplotní průběhy pro λ závislé na teplotě i λ konstantní a tyto průběhy porovnat.

Řešení:

Výpočet teploty T_C na vnějším povrchu pokrytí z rovnice (11):

$$T_C = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha} + T_\infty$$

$$T_C = \frac{30000}{2 \cdot \pi \cdot 4,55 \cdot 10^{-3} \cdot 27000} + 285$$

$$T_C = 38,9 + 285$$

$$T_C = 323,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Odhad součinitele přestupu tepla λ_Z podle teploty T_C z Tab. 1:

$$\lambda_Z = 20,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_{Ci} na vnitřním povrchu pokrytí z rovnice (25):

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{r_C}{r_{Ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_Z} + T_C$$

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{4,55 \cdot 10^{-3}}{3,87 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot 30000}{2 \cdot \pi \cdot 20,3} + 323,9$$

$$T_{Ci} = 38,1 + 323,9$$

$$T_{Ci} = 362 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Určení součinitele sdílení tepla α_U z Tab. 2:

Pro vyhořelé palivo a zadaný lineární tepelný výkon q_H je

$$\alpha_U = 1,28 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_P na povrchu palivové tablety z rovnice (28):

$$T_P = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + T_{ci}$$

$$T_P = \frac{30000}{2 \cdot \pi \cdot 3,78 \cdot 10^{-3} \cdot 1280} + 362$$

$$T_P = 987 + 362$$

$$T_P = 1349 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = f(T)$:

Výpočet integrální tepelné vodivosti ϑ_P z rovnice (53):

$$\vartheta(T) = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T + 273,15)^4$$

$$\vartheta_P = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T_P) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T_P + 273,15)^4$$

$$\vartheta_P = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + 1349) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (1349 + 273,15)^4$$

$$\vartheta_P = -18595,8 + 28558,6 + 82,9$$

$$\vartheta_P = 10046 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení integrální tepelné vodivosti $\vartheta(T)$ pro libovolný bod uvnitř tablety z rovnice (51):

$$\vartheta(T) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \vartheta_P$$

$$\vartheta(T) = \frac{30000}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 10046$$

Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 7.

Poloměr $r [m]$	$\vartheta(T) [W \cdot m^{-1}]$	Teplota $T [^{\circ}C]$
0,00000	12433,3	2427
0,00025	12422,9	2423
0,00050	12391,5	2409
0,00075	12339,3	2386
0,00100	12266,2	2354
0,00125	12172,3	2312
0,00150	12057,4	2260
0,00175	11921,7	2199
0,00200	11765,1	2127
0,00225	11587,6	2045
0,00250	11389,2	1953
0,00275	11169,9	1851
0,00300	10929,8	1740
0,00325	10668,7	1621
0,00350	10386,8	1496
0,00375	10084,0	1366
0,00378	10046,3	1349

Tab. 7 Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety pro provozní stav 2.

2) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = konst.$:

Volba součinitele přestupu tepla λ tak, aby teplota v ose palivové tablety T_0 byla stejná, jako v předchozím průběhu:

Výpočet pomocí rovnice (41):

$$T_0 = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + T_P$$

$$2427 = \frac{30000}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + 1349$$

$$\lambda = 2,215 \, W \cdot m^{-1}$$

Určení průběhu teploty $T(r)$ uvnitř tablety podle rovnice (40):

$$T(r) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + T_P$$

$$T(r) = \frac{30000}{4 \cdot \pi \cdot 2,215} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 1349$$

$$T(r) = 1078 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 1349$$

Průběh teploty uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 8.

Poloměr r [m]	Teplota T [°C]
0,00000	2427
0,00025	2422
0,00050	2408
0,00075	2384
0,00100	2351
0,00125	2309
0,00150	2257
0,00175	2196
0,00200	2125
0,00225	2045
0,00250	1955
0,00275	1856
0,00300	1748
0,00325	1630
0,00350	1503
0,00375	1366
0,00378	1349

Tab. 8 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 2, λ je zvolena podle teploty T_0 .

Shrnutí:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími jsou

$$T_C = 323,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

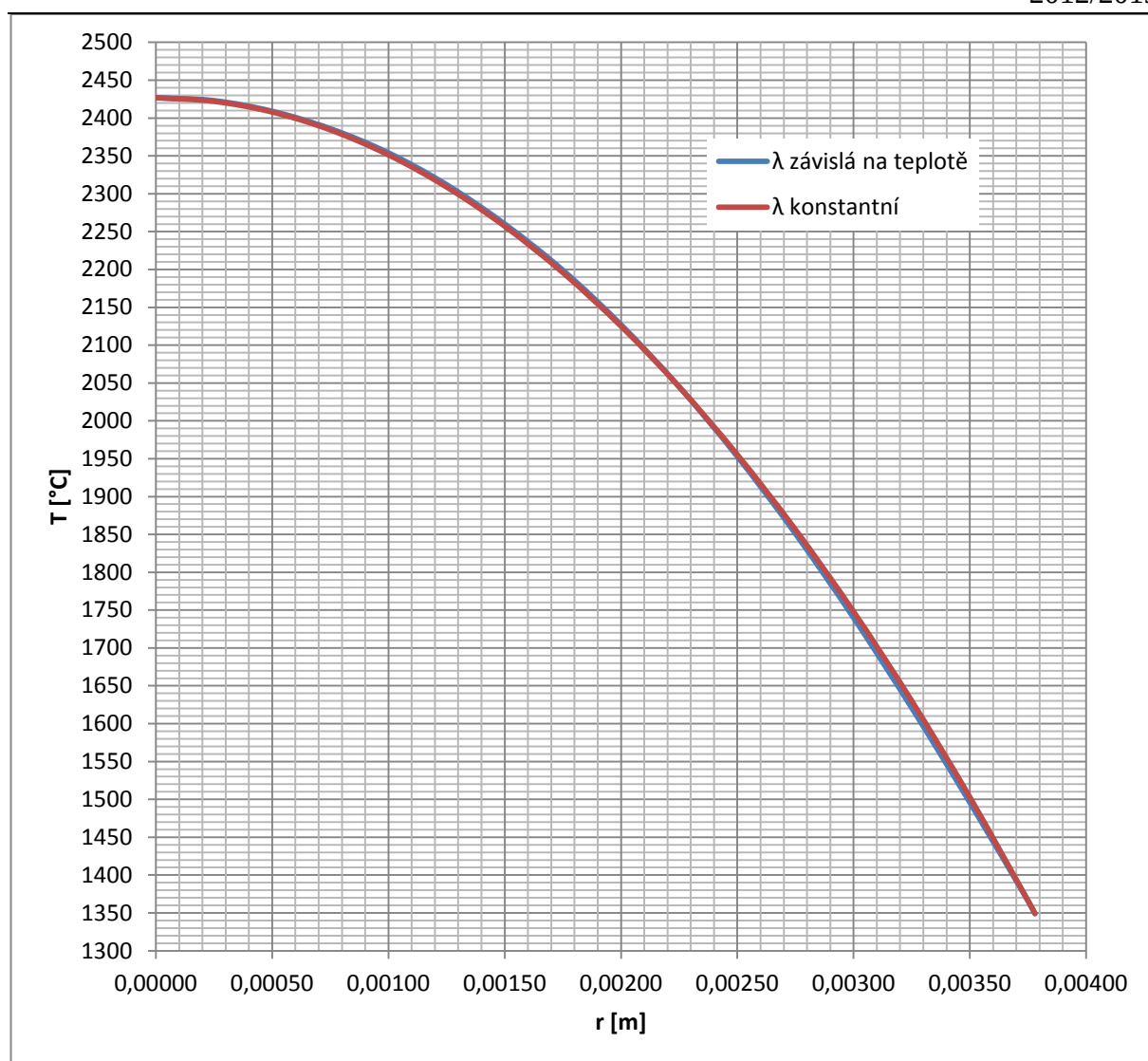
$$T_{Ci} = 362 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_P = 1349 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplota v ose palivové tablety je

$$T_0 = 2427 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplotní průběhy uvnitř palivové tablety jsou popsány v Tab. 7 a Tab. 8. Oba průběhy jsou porovnány na Obr. 7. Oba průběhy jsou téměř shodné, protože λ je při vyšších teplotách víceméně konstantní.



Obr. 7 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 2, λ závislé na teplotě – pomocí integrální tep. vodivosti, λ konstantní - zvolena podle maximální teploty tablety T_0

4.3 Provozní stav 3

Předpoklady:

Ustálené vedení tepla

Vyhořelý palivový článek

Tableta se dotýká pokrytí

Součinitel sdílení tepla v mezeře $\alpha_U = 43 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Lineární tepelný výkon $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$

Součinitel sdílení tepla z pokrytí do chladiva $\alpha = 27 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Střední teplota chladiva $T_{\infty} = 285 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Zadání:

Dle uvedených předpokladů určit:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími T_C , T_{Ci} , T_P

Teplotu v ose palivové tablety T_0

Teplotní průběhy pro λ závislé na teplotě i λ konstantní a tyto průběhy porovnat.

Řešení:

Výpočet teploty T_C na vnějším povrchu pokrytí z rovnice (11):

$$T_C = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha} + T_{\infty}$$

$$T_C = \frac{30000}{2 \cdot \pi \cdot 4,55 \cdot 10^{-3} \cdot 27000} + 285$$

$$T_C = 38,9 + 285$$

$$T_C = 323,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Odhad součinitele přestupu tepla λ_Z podle teploty T_C z Tab. 1:

$$\lambda_Z = 20,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_{Ci} na vnitřním povrchu pokrytí z rovnice (25):

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{r_C}{r_{Ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_Z} + T_C$$

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{4,55 \cdot 10^{-3}}{3,87 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot 30000}{2 \cdot \pi \cdot 20,3} + 323,9$$

$$T_{Ci} = 38,1 + 323,9$$

$$T_{Ci} = 362 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Výpočet teploty T_p na povrchu palivové tablety z rovnice (28):

$$T_p = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + T_{Ci}$$

$$T_p = \frac{30000}{2 \cdot \pi \cdot 3,78 \cdot 10^{-3} \cdot 43000} + 362$$

$$T_p = 29 + 362$$

$$T_p = 391 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = f(T)$:

Výpočet integrální tepelné vodivosti ϑ_p z rovnice (53):

$$\vartheta(T) = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T + 273,15)^4$$

$$\vartheta_p = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T_p) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T_p + 273,15)^4$$

$$\vartheta_p = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + 391) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (391 + 273,15)^4$$

$$\vartheta_p = -18595,8 + 25531 + 2,3$$

$$\vartheta_p = 6937,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení integrální tepelné vodivosti $\vartheta(T)$ pro libovolný bod uvnitř tablety z rovnice (51):

$$\vartheta(T) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \vartheta_p$$

$$\vartheta(T) = \frac{30000}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 6937,5$$

Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 9.

Poloměr r [m]	$\vartheta(T) [W \cdot m^{-1}]$	Teplota T [°C]
0,00000	9324,8	1066
0,00025	9314,4	1061
0,00050	9283,0	1050
0,00075	9230,8	1031
0,00100	9157,7	1005
0,00125	9063,8	972
0,00150	8948,9	933
0,00175	8813,2	887
0,00200	8656,6	837
0,00225	8479,1	782
0,00250	8280,7	723
0,00275	8061,4	661
0,00300	7821,3	597
0,00325	7560,2	531
0,00350	7278,3	465
0,00375	6975,5	399
0,00378	6937,8	391

Tab. 9 Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety pro provozní stav 3.

2) Průběh teplot uvnitř tablety pro λ konstantní:

Volba součinitele přestupu tepla λ tak, aby teplota v ose palivové tablety T_0 byla stejná, jako v předchozím průběhu:

Výpočet pomocí rovnice (41):

$$T_0 = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + T_P$$

$$1066 = \frac{30000}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + 391$$

$$\lambda = 3,537 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení průběhu teploty $T(r)$ uvnitř tablety podle rovnice (40):

$$T(r) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + T_P$$

$$T(r) = \frac{30000}{4 \cdot \pi \cdot 3,537} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 391$$

$$T(r) = 675 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2} \right) + 391$$

Průběh teploty uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 10.

Poloměr r [m]	Teplota T [°C]
0,00000	1066
0,00025	1063
0,00050	1054
0,00075	1039
0,00100	1019
0,00125	992
0,00150	960
0,00175	921
0,00200	877
0,00225	827
0,00250	771
0,00275	709
0,00300	641
0,00325	567
0,00350	487
0,00375	402
0,00378	391

Tab. 10 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 3, λ je zvolena podle teploty T_0 .

Shrnutí:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími jsou

$$T_c = 323,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

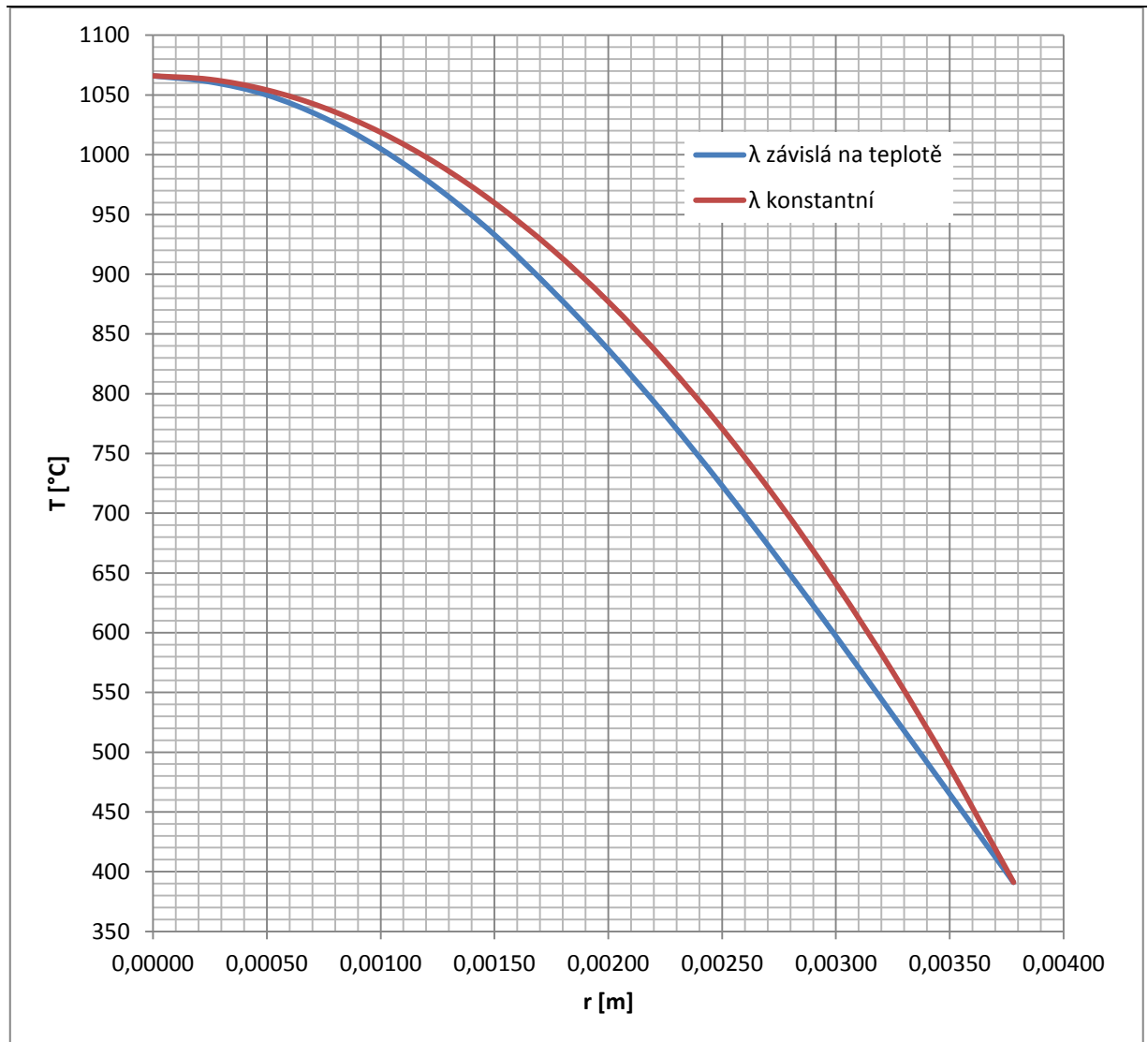
$$T_{ci} = 362 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_p = 391 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplota v ose palivové tablety je

$$T_0 = 1066 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplotní průběhy uvnitř palivové tablety jsou popsány v Tab. 9 a Tab. 10. Oba průběhy jsou porovnány na Obr. 8.



Obr. 8 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 3, λ závislé na teplotě – pomocí integrální tep. vodivosti, λ konstantní - zvolena podle maximální teploty tablety T_0

4.4 Provozní stav 4

Předpoklady:

Ustálené vedení tepla

Čerstvý palivový článek

Lineární tepelný výkon $q_H = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$

Součinitel sdílení tepla z pokrytí do chladiva $\alpha = 27 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Střední teplota chladiva $T_\infty = 285 \text{ °C}$

Zadání:

Dle uvedených předpokladů určit:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími T_C , T_{Ci} , T_P

Teplotu v ose palivové tablety T_0

Teplotní průběhy pro λ závislé na teplotě i λ konstantní a tyto průběhy porovnat.

Řešení:

Výpočet teploty T_C na vnějším povrchu pokrytí z rovnice (11):

$$T_C = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha} + T_\infty$$

$$T_C = \frac{10000}{2 \cdot \pi \cdot 4,55 \cdot 10^{-3} \cdot 27000} + 285$$

$$T_C = 13 + 285$$

$$T_C = 298 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Odhad součinitele přestupu tepla λ_Z podle teploty T_C z Tab. 1:

$$\lambda_Z = 20,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_{Ci} na vnitřním povrchu pokrytí z rovnice (25):

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{r_C}{r_{Ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_Z} + T_C$$

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{4,55 \cdot 10^{-3}}{3,87 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot 10000}{2 \cdot \pi \cdot 20,2} + 298$$

$$T_{Ci} = 12,8 + 298$$

$$T_{Ci} = 311 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Určení součinitele sdílení tepla α_U z Tab. 2:

Pro čerstvé palivo a zadaný lineární tepelný výkon q_H je

$$\alpha_U = 1,90 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_p na povrchu palivové tablety z rovnice (28):

$$T_p = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + T_{ci}$$

$$T_p = \frac{10000}{2 \cdot \pi \cdot 3,78 \cdot 10^{-3} \cdot 1900} + 311$$

$$T_p = 222 + 311$$

$$T_p = 533 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = f(T)$:

Výpočet integrální tepelné vodivosti ϑ_p z rovnice (53):

$$\vartheta(T) = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T + 273,15)^4$$

$$\vartheta_p = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T_p) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T_p + 273,15)^4$$

$$\vartheta_p = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + 533) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (533 + 273,15)^4$$

$$\vartheta_p = -18595,8 + 26160,5 + 5,05$$

$$\vartheta_p = 7570 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení integrální tepelné vodivosti $\vartheta(T)$ pro libovolný poloměr r uvnitř tablety z rovnice (51):

$$\vartheta(T) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \vartheta_p$$

$$\vartheta(T) = \frac{10000}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 7570$$

Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 11.

Poloměr r [m]	$\vartheta(T)$ [$W \cdot m^{-1}$]	Teplota T [°C]
0,00000	8365,8	748
0,00025	8362,3	746
0,00050	8351,9	743
0,00075	8334,5	738
0,00100	8310,1	731
0,00125	8278,8	722
0,00150	8240,5	711
0,00175	8195,3	698
0,00200	8143,0	683
0,00225	8083,9	667
0,00250	8017,7	649
0,00275	7944,6	629
0,00300	7864,6	608
0,00325	7777,6	585
0,00350	7683,6	561
0,00375	7582,7	537
0,00378	7570,1	533

Tab. 11 Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety pro provozní stav 4.

2) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = konst.$:

Volba součinitele přestupu tepla λ tak, aby teplota v ose palivové tablety T_0 byla stejná, jako v předchozím průběhu:

Výpočet pomocí rovnice (41):

$$T_0 = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + T_P$$

$$748 = \frac{10000}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + 533$$

$$\lambda = 3,701 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení průběhu teploty $T(r)$ uvnitř tablety podle rovnice (40):

$$T(r) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + T_P$$

$$T(r) = \frac{10000}{4 \cdot \pi \cdot 3,701} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 533$$

$$T(r) = 215 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2} \right) + 533$$

Průběh teploty uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 12.

Poloměr r [m]	Teplota T [°C]
0,00000	748
0,00025	747
0,00050	744
0,00075	740
0,00100	733
0,00125	724
0,00150	714
0,00175	702
0,00200	688
0,00225	672
0,00250	654
0,00275	634
0,00300	613
0,00325	589
0,00350	564
0,00375	536
0,00378	533

Tab. 12 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 4, λ je zvolena podle teploty T_0 .

Shrnutí:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími jsou

$$T_c = 298 \text{ } ^\circ\text{C}$$

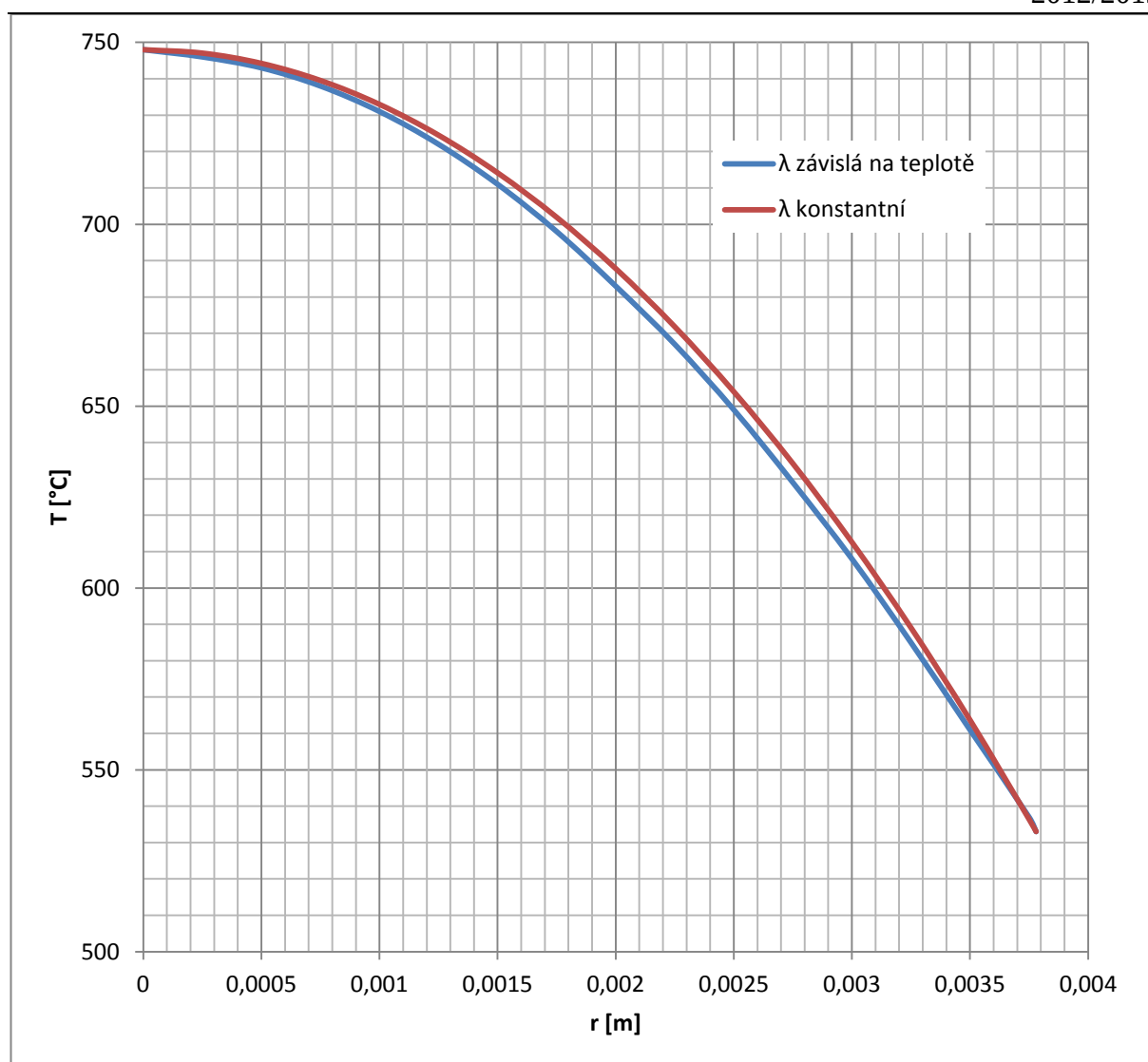
$$T_{ci} = 311 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_p = 533 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplota v ose palivové tablety je

$$T_0 = 748 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplotní průběhy uvnitř palivové tablety jsou popsány v Tab. 11 a Tab. 12. Oba průběhy jsou porovnány na Obr. 9.



Obr. 9 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 4, λ závislé na teplotě – pomocí integrální tep. vodivosti, λ konstantní - zvolena podle maximální teploty tablety T_0

4.5 Provozní stav 5

Předpoklady:

Ustálené vedení tepla

Vyhořelý palivový článek

Tableta se nedotýká pokrytí

Lineární tepelný výkon $q_H = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$

Součinitel sdílení tepla z pokrytí do chladiva $\alpha = 27 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Střední teplota chladiva $T_\infty = 285 \text{ °C}$

Zadání:

Dle uvedených předpokladů určit:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími T_C , T_{Ci} , T_P

Teplotu v ose palivové tablety T_0

Teplotní průběhy pro λ závislé na teplotě i λ konstantní a tyto průběhy porovnat.

Řešení:

Výpočet teploty T_C na vnějším povrchu pokrytí z rovnice (11):

$$T_C = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha} + T_\infty$$

$$T_C = \frac{10000}{2 \cdot \pi \cdot 4,55 \cdot 10^{-3} \cdot 27000} + 285$$

$$T_C = 13 + 285$$

$$T_C = 298 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Odhad součinitele přestupu tepla λ_Z podle teploty T_C z Tab. 1:

$$\lambda_Z = 20,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_{Ci} na vnitřním povrchu pokrytí z rovnice (25):

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{r_C}{r_{Ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_Z} + T_C$$

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{4,55 \cdot 10^{-3}}{3,87 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot 10000}{2 \cdot \pi \cdot 20,2} + 298$$

$$T_{Ci} = 12,8 + 298$$

$$T_{Ci} = 311 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Určení součinitele sdílení tepla α_U z Tab. 2:

Pro vyhořelé palivo a zadaný lineární tepelný výkon q_H je

$$\alpha_U = 0,30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_P na povrchu palivové tablety z rovnice (28):

$$T_P = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + T_{Ci}$$

$$T_P = \frac{10000}{2 \cdot \pi \cdot 3,78 \cdot 10^{-3} \cdot 300} + 311$$

$$T_P = 1403 + 311$$

$$T_P = 1714 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = f(T)$:

Výpočet integrální tepelné vodivosti ϑ_P z rovnice (53):

$$\vartheta(T) = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T + 273,15)^4$$

$$\vartheta_P = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T_P) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T_P + 273,15)^4$$

$$\vartheta_P = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + 1714) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (1714 + 273,15)^4$$

$$\vartheta_P = -18595,8 + 29282,4 + 186,8$$

$$\vartheta_P = 10873 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení integrální tepelné vodivosti $\vartheta(T)$ pro libovolný bod uvnitř tablety z rovnice (51):

$$\vartheta(T) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \vartheta_P$$

$$\vartheta(T) = \frac{10000}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 10873$$

Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 13.

Poloměr r [m]	$\vartheta(T)[W \cdot m^{-1}]$	Teplota T [°C]
0,00000	11668,8	2083
0,00025	11665,3	2081
0,00050	11654,9	2076
0,00075	11637,5	2068
0,00100	11613,1	2057
0,00125	11581,8	2042
0,00150	11543,5	2025
0,00175	11498,3	2004
0,00200	11446,0	1979
0,00225	11386,9	1952
0,00250	11320,7	1921
0,00275	11247,6	1887
0,00300	11167,6	1850
0,00325	11080,6	1810
0,00350	10986,6	1766
0,00375	10885,7	1720
0,00378	10873,1	1714

Tab. 13 Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety pro provozní stav 5.

2) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = konst.$:

Volba součinitele přestupu tepla λ tak, aby teplota v ose palivové tablety T_0 byla stejná, jako v předchozím průběhu:

Výpočet pomocí rovnice (41):

$$T_0 = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + T_P$$

$$2083 = \frac{10000}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + 1714$$

$$\lambda = 2,157 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení průběhu teploty $T(r)$ uvnitř tablety podle rovnice (40):

$$T(r) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + T_P$$

$$T(r) = \frac{10000}{4 \cdot \pi \cdot 2,157} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 1714$$

$$T(r) = 369 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 1714$$

Průběh teploty uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 14.

Poloměr r [m]	Teplota T [°C]
0,00000	2083
0,00025	2081
0,00050	2077
0,00075	2068
0,00100	2057
0,00125	2043
0,00150	2025
0,00175	2004
0,00200	1980
0,00225	1952
0,00250	1922
0,00275	1888
0,00300	1851
0,00325	1810
0,00350	1767
0,00375	1720
0,00378	1714

Tab. 14 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 5, λ je zvolena podle teploty T_0 .

Shrnutí:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími jsou

$$T_C = 298 \text{ } ^\circ\text{C}$$

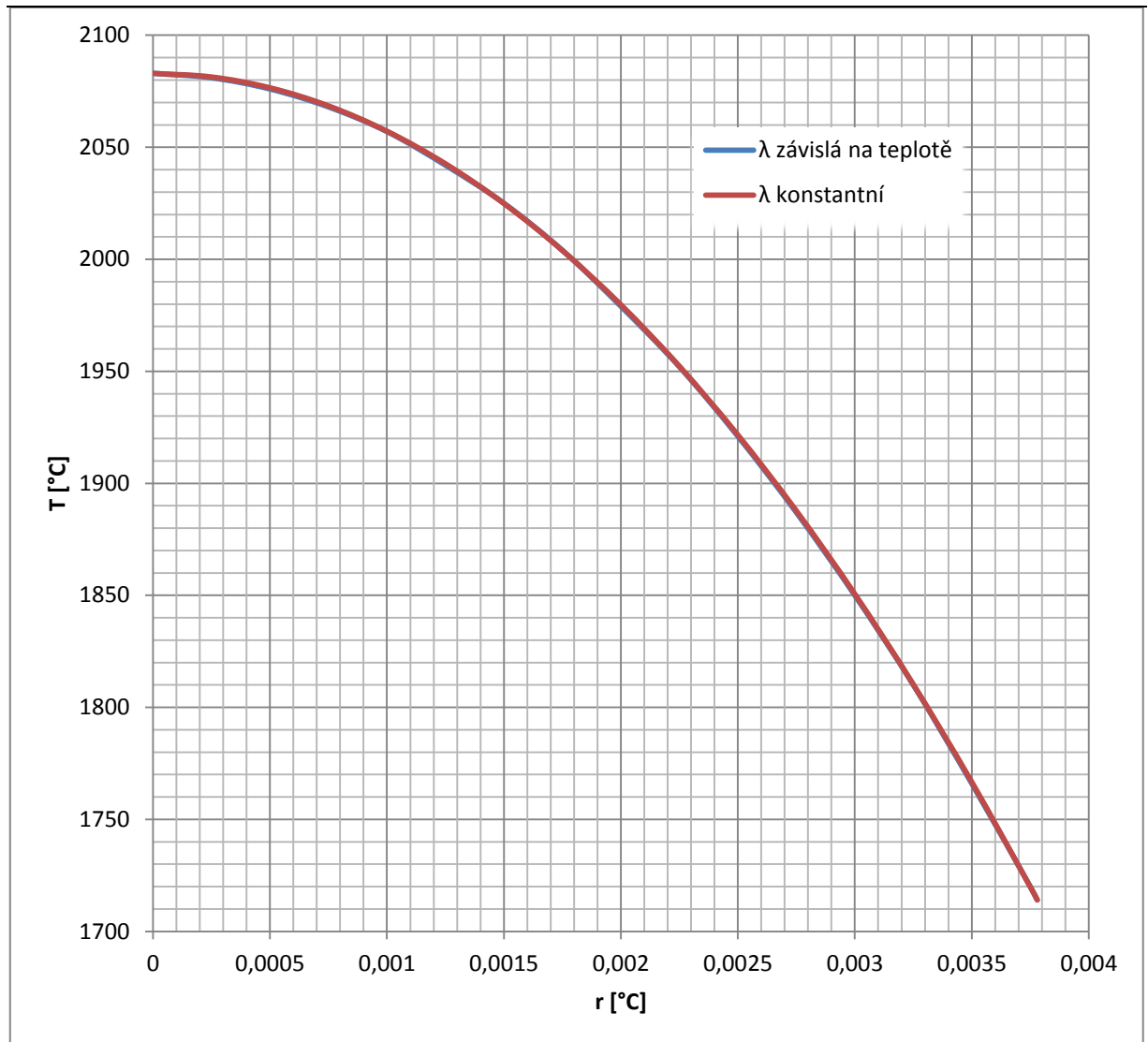
$$T_{Ci} = 311 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_p = 1714 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplota v ose palivové tablety je

$$T_0 = 2083 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplotní průběhy uvnitř palivové tablety jsou popsány v Tab. 13 a Tab. 14. Oba průběhy jsou porovnány na Obr. 10.



Obr. 10 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 5, λ závislé na teplotě – pomocí integrální tep. vodivosti, λ konstantní - zvolena podle maximální teploty tablety T_0

4.6 Provozní stav 6

Předpoklady:

Ustálené vedení tepla

Vyhořelý palivový článek

Tableta se dotýká pokrytí

Součinitel sdílení tepla v mezeře $\alpha_U = 43 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Lineární tepelný výkon $q_H = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$

Součinitel sdílení tepla z pokrytí do chladiva $\alpha = 27 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Střední teplota chladiva $T_{\infty} = 285 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Zadání:

Dle uvedených předpokladů určit:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími T_C , T_{Ci} , T_P

Teplotu v ose palivové tablety T_0

Teplotní průběhy pro λ závislé na teplotě i λ konstantní a tyto průběhy porovnat.

Řešení:

Výpočet teploty T_C na vnějším povrchu pokrytí z rovnice (11):

$$T_C = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_C \cdot \alpha} + T_{\infty}$$

$$T_C = \frac{10000}{2 \cdot \pi \cdot 4,55 \cdot 10^{-3} \cdot 27000} + 285$$

$$T_C = 13 + 285$$

$$T_C = 298 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Odhad součinitele přestupu tepla λ_Z podle teploty T_C z Tab. 1:

$$\lambda_Z = 20,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet teploty T_{Ci} na vnitřním povrchu pokrytí z rovnice (25):

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{r_C}{r_{Ci}}\right) \cdot q_H}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_Z} + T_C$$

$$T_{Ci} = \frac{\ln\left(\frac{4,55 \cdot 10^{-3}}{3,87 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot 10000}{2 \cdot \pi \cdot 20,2} + 298$$

$$T_{Ci} = 12,8 + 298$$

$$T_{Ci} = 311 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Výpočet teploty T_p na povrchu palivové tablety z rovnice (28):

$$T_p = \frac{q_H}{2 \cdot \pi \cdot r_U \cdot \alpha_U} + T_{Ci}$$

$$T_p = \frac{10000}{2 \cdot \pi \cdot 3,78 \cdot 10^{-3} \cdot 43000} + 311$$

$$T_p = 10 + 311$$

$$T_p = 321 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1) Průběh teplot uvnitř tablety pro $\lambda = f(T)$:

Výpočet integrální tepelné vodivosti ϑ_p z rovnice (53):

$$\vartheta(T) = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T + 273,15)^4$$

$$\vartheta_p = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + T_p) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (T_p + 273,15)^4$$

$$\vartheta_p = -18595,8 + 3824 \cdot \ln(402,55 + 321) + 1,197 \cdot 10^{-11} \cdot (321 + 273,15)^4$$

$$\vartheta_p = -18595,8 + 25178 + 1,5$$

$$\vartheta_p = 6583,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení integrální tepelné vodivosti $\vartheta(T)$ pro libovolný bod uvnitř tablety z rovnice (51):

$$\vartheta(T) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + \vartheta_p$$

$$\vartheta(T) = \frac{10000}{4 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 6583,6$$

Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 15.

Poloměr r [m]	$\vartheta(T)$ [$W \cdot m^{-1}$]	Teplota T [°C]
0,00000	7379,4	488
0,00025	7375,9	487
0,00050	7365,5	485
0,00075	7348,1	481
0,00100	7323,7	475
0,00125	7292,4	468
0,00150	7254,1	460
0,00175	7208,9	450
0,00200	7156,6	438
0,00225	7097,5	425
0,00250	7031,3	411
0,00275	6958,2	396
0,00300	6878,2	379
0,00325	6791,2	362
0,00350	6697,2	343
0,00375	6596,3	324
0,00378	6583,7	321

Tab. 15 Průběh teploty a integrální tepelné vodivosti uvnitř palivové tablety pro provozní stav 6.

2) Průběh teplot uvnitř tablety pro λ konstantní:

Volba součinitele přestupu tepla λ tak, aby teplota v ose palivové tablety T_0 byla stejná, jako v předchozím průběhu:

Výpočet pomocí rovnice (41):

$$T_0 = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + T_P$$

$$488 = \frac{10000}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + 321$$

$$\lambda = 4,765 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení průběhu teploty $T(r)$ uvnitř tablety podle rovnice (40):

$$T(r) = \frac{q_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_U^2}\right) + T_P$$

$$T(r) = \frac{10000}{4 \cdot \pi \cdot 4,765} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2}\right) + 321$$

$$T(r) = 167 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{(3,78 \cdot 10^{-3})^2} \right) + 321$$

Průběh teploty uvnitř palivové tablety je popsán v Tab. 16.

Poloměr r [m]	Teplota T [°C]
0,00000	488
0,00025	487
0,00050	485
0,00075	481
0,00100	476
0,00125	470
0,00150	462
0,00175	452
0,00200	441
0,00225	429
0,00250	415
0,00275	400
0,00300	383
0,00325	365
0,00350	345
0,00375	324
0,00378	321

Tab. 16 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 6, λ je zvolena podle teploty T_0 .

Shrnutí:

Teploty na rozhraních mezi jednotlivými prostředími jsou

$$T_c = 298 \text{ } ^\circ\text{C}$$

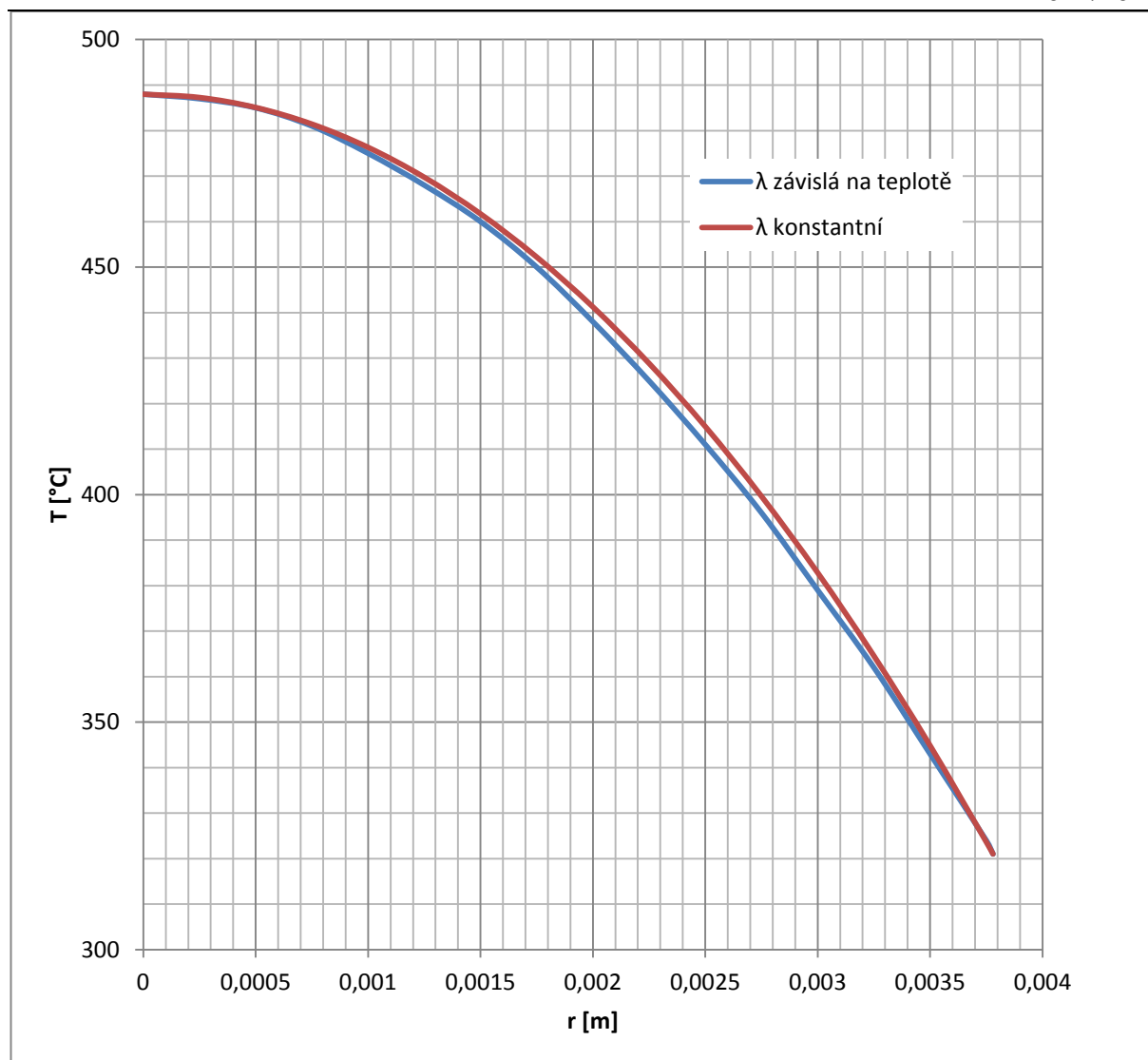
$$T_{ci} = 311 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_p = 321 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplota v ose palivové tablety je

$$T_0 = 488 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplotní průběhy uvnitř palivové tablety jsou popsány v Tab. 15 a Tab. 16. Oba průběhy jsou porovnány na Obr. 11.



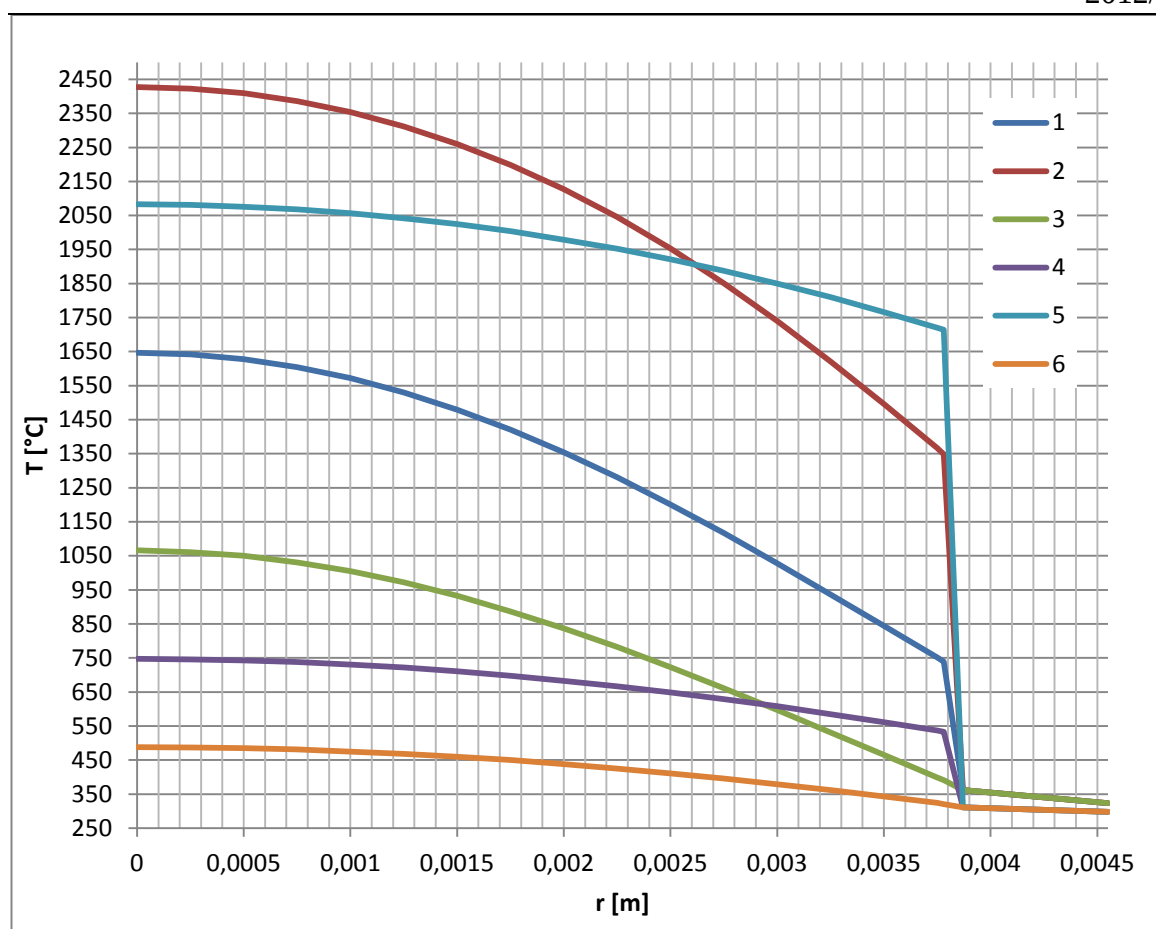
Obr. 11 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 6, λ závislé na teplotě – pomocí integrální tep. vodivosti, λ konstantní - zvolena podle maximální teploty tablety T_0

4.7 Porovnání jednotlivých provozních stavů

Teplotní průběhy uvnitř palivového proutku při různých provozních stavech jsou porovnány v Tab. 17 a na Obr. 12. Jsou zde vyjádřeny oblasti palivové tablety, mezery mezi tabletou a pokrytím a pokrytí.

	Provozní stav 1	Provozní stav 2	Provozní stav 3	Provozní stav 4	Provozní stav 5	Provozní stav 6
Poloměr r [m]	Teplota T [°C]	Teplota T [°C]	Teplota T [°C]	Teplota T [°C]	Teplota T [°C]	Teplota T [°C]
0,00000	1647	2427	1066	748	2083	488
0,00025	1642	2423	1061	746	2081	487
0,00050	1628	2409	1050	743	2076	485
0,00075	1604	2386	1031	738	2068	481
0,00100	1572	2354	1005	731	2057	475
0,00125	1530	2312	972	722	2042	468
0,00150	1479	2260	933	711	2025	460
0,00175	1421	2199	887	698	2004	450
0,00200	1354	2127	837	683	1979	438
0,00225	1281	2045	782	667	1952	425
0,00250	1201	1953	723	649	1921	411
0,00275	1117	1851	661	629	1887	396
0,00300	1028	1740	597	608	1850	379
0,00325	937	1621	531	585	1810	362
0,00350	844	1496	465	561	1766	343
0,00375	751	1366	399	537	1720	324
0,00378	739	1349	391	533	1714	321
0,00387	362	362	362	311	311	311
0,00455	323,9	323,9	323,9	298	298	298

Tab. 17 Porovnání teplotních průběhů v palivovém proutku při jednotlivých provozních stavech.



Obr. 12 Porovnání teplotních průběhů v palivovém proutku pro jednotlivé provozní stavy. 1 – Provozní stav 1, 2 – Provozní stav 2, 3 – Provozní stav 3, 4 – Provozní stav 4, 5 – Provozní stav 5, 6 – Provozní stav 6.

Na Obr. 12 je možno si povšimnout velkého teplotního skoku. K tomu dochází v oblasti mezery mezi tabletou a pokrytím. Stav této mezery má na teplotní pole uvnitř palivového elementu velmi významný vliv. Již u čerstvého paliva (Provozní stav 1 a 4) se ukazuje, že tato mezera podstatně zvyšuje teploty uvnitř palivové tablety. Nejvýrazněji se pak tento skok projevuje u provozních stavů 2 a 5. Při těchto dvou stavech je palivo již částečně vyhořelé, ale mezera ještě není zaplněna a tableta se nedotýká pokrytí. I když je velikost mezery menší než u čerstvého paliva, vlivem plynných štěpných produktů je přenos tepla mezerou celkově zhoršen. Při těchto provozních stavech je uvnitř palivové tablety dosaženo nejvyšších teplot. U provozních stavů 3 a 6 je patrné, že tento skok je naopak nevýrazný. U těchto stavů se tableta již dotýká pokrytí a přenos tepla mezerou je tedy podstatně lepší.

Průběhy teplot v palivové tabletě u jednotlivých provozních stavů jsou v této kapitole porovnávány se zjednodušeným teplotním průběhem s použitím λ konstantní. Pouze u provozních stavů 2 a 5 na Obr. 7 a na Obr. 10 ukazuje toto porovnání výraznou shodu obou průběhů. Je to způsobeno tím, že $\lambda(T)$ je u tohoto materiálu při takto vysokých teplotách již víceméně konstantní.

5 Analýza teplotního pole VVER-440 pomocí programu ANSYS

Pro oblast palivové tablety byl zadán součinitel tepelné vodivosti λ_{UO_2} podle rovnice (52).

Pro oblast pokrytí byl zadán součinitel tepelné vodivosti λ_Z z Tab. 1.

Pro oblast mezery byl zadán součinitel tepelné vodivosti λ_U . Jelikož se šířka mezery složitě mění vlivem tepelné dilatace, bude velikost šířky považována za konstantní a součinitel tepelné vodivosti λ_U bude vyjádřen v závislosti na součiniteli sdílení tepla v mezeře α_U zvoleném pro daný provozní stav podle Tab. 2.

$$-\lambda_U \cdot S \cdot \frac{dT}{dr} = \alpha_U \cdot S \cdot (T_P - T_{Ci}) \quad (57)$$

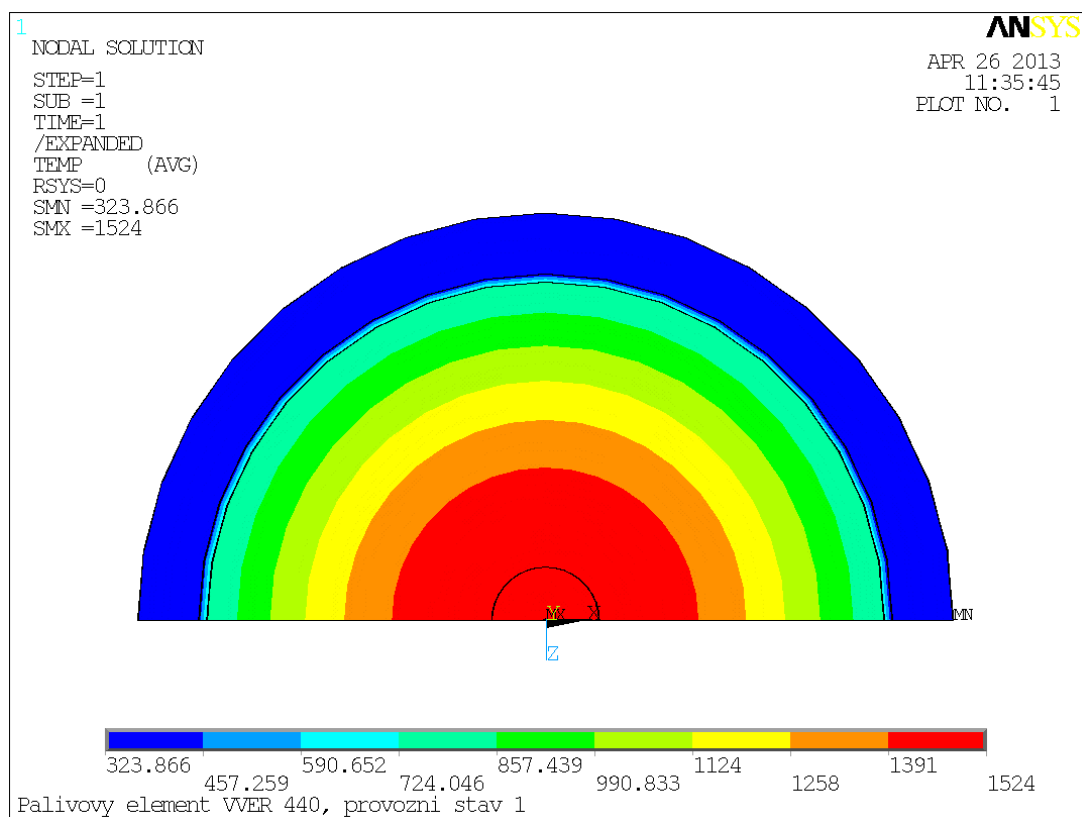
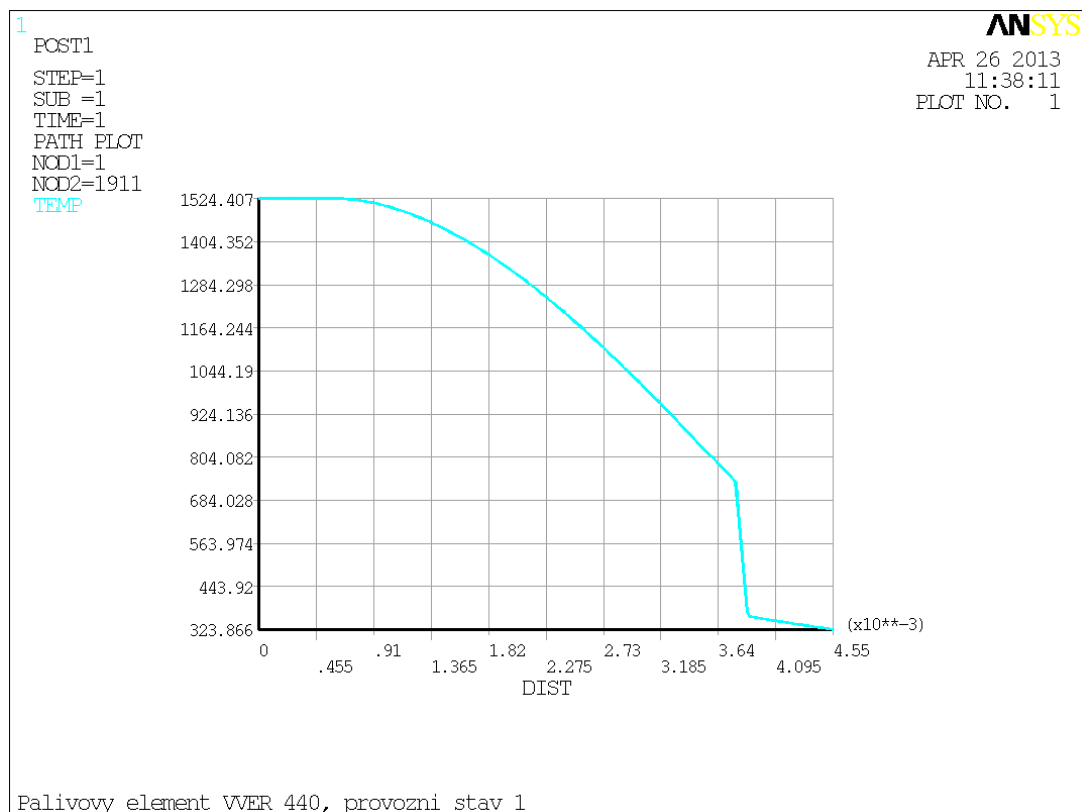
Pokud bude průběh teploty v mezeře považován za lineární, změní se tvar rovnice na:

$$-\lambda_U \cdot \frac{(T_P - T_{Ci})}{(r_U - r_{Ci})} = \alpha_U \cdot (T_P - T_{Ci}) \quad (58)$$

A odtud odpovídající součinitel tepelné vodivosti

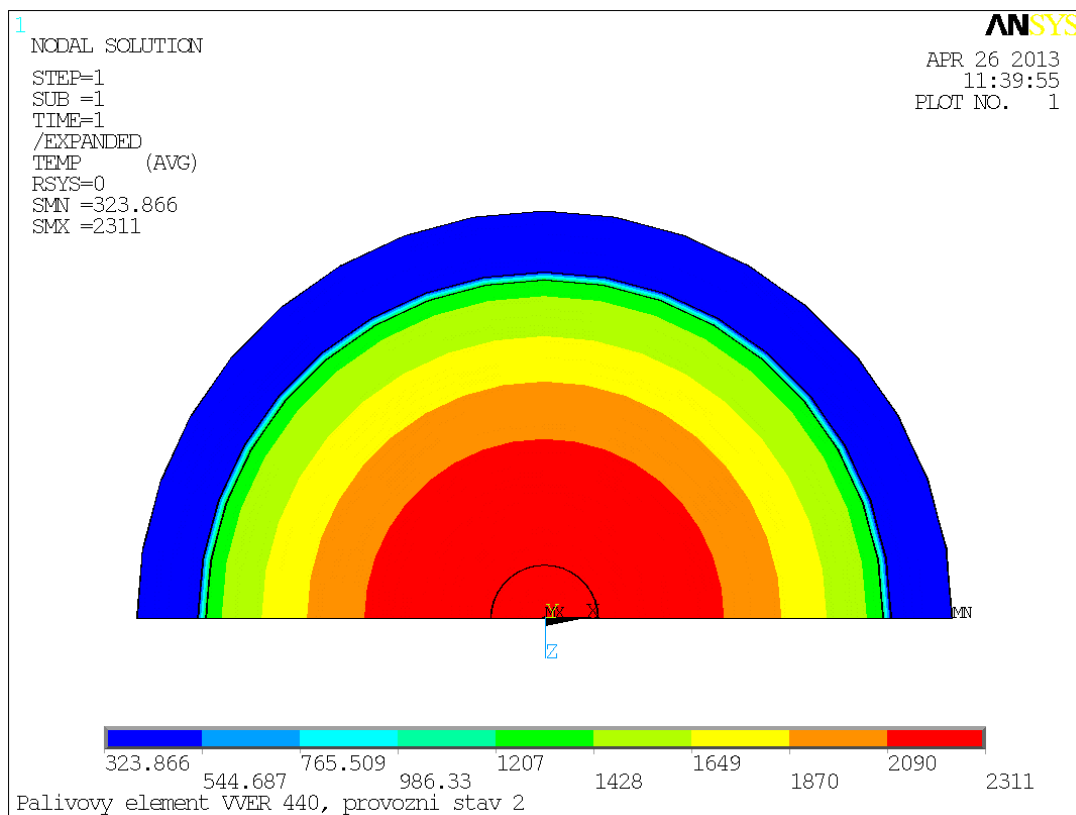
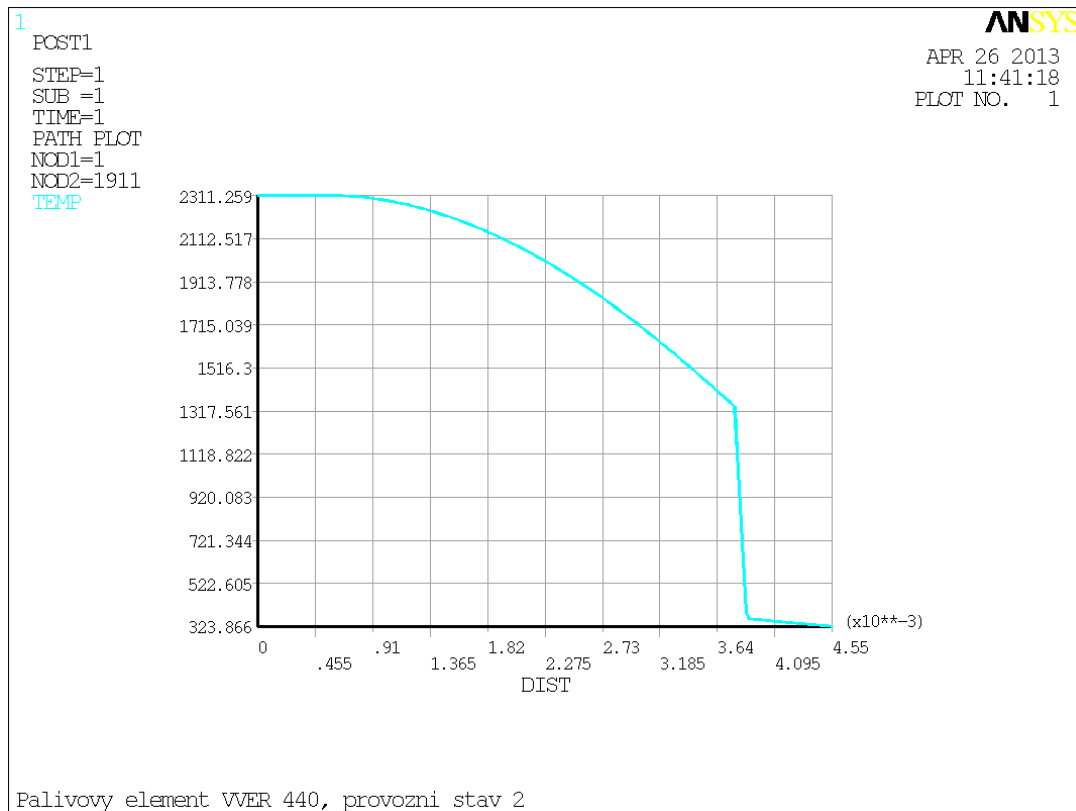
$$\lambda_U = \alpha_U \cdot (r_{Ci} - r_U) \quad (59)$$

5.1 Provozní stav 1



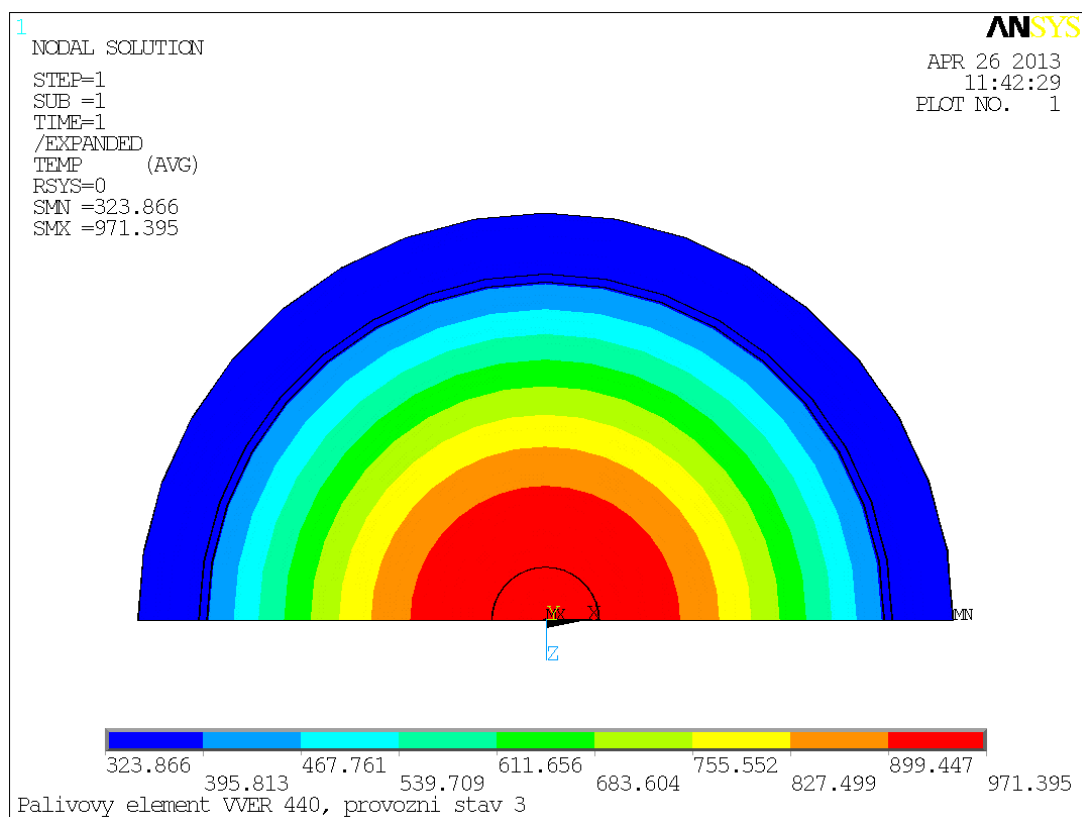
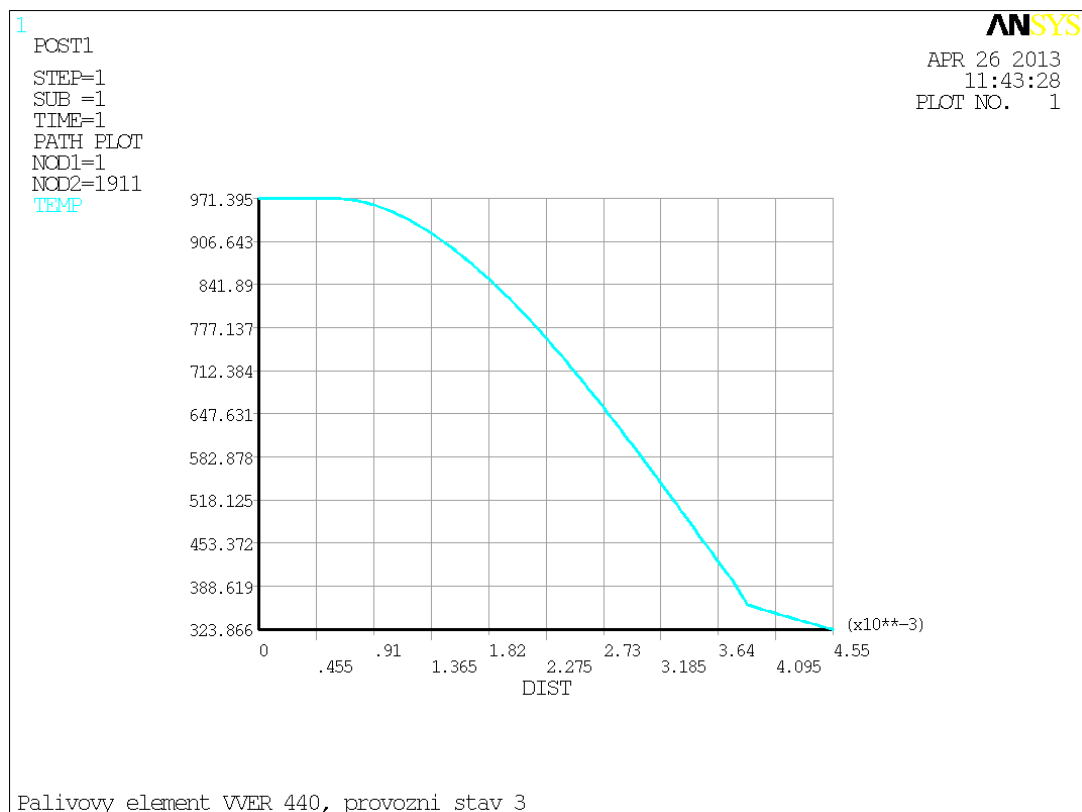
Obr. 13 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku reaktoru VVER-440 pro provozní stav při lineárním tepelném výkonu $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, čerstvém palivu, v mezeře bez dotyku paliva a pokrytí. Vliv centrálního otvoru je zohledněn.

5.2 Provozní stav 2



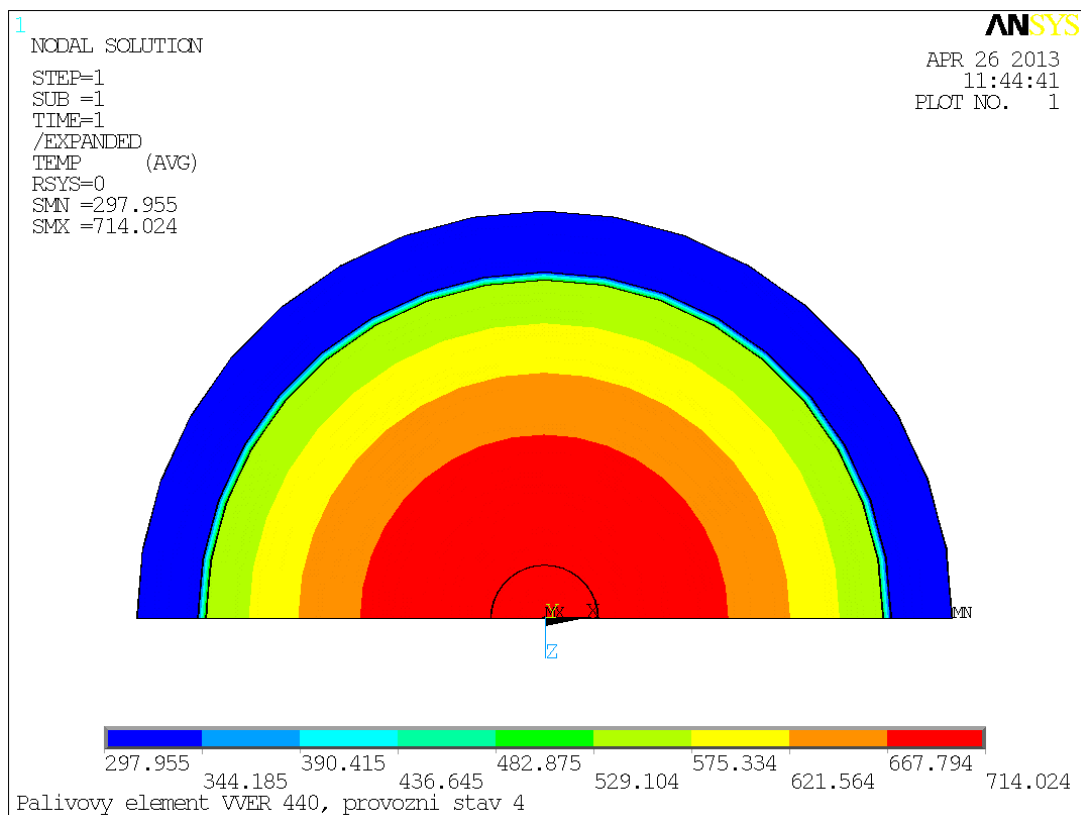
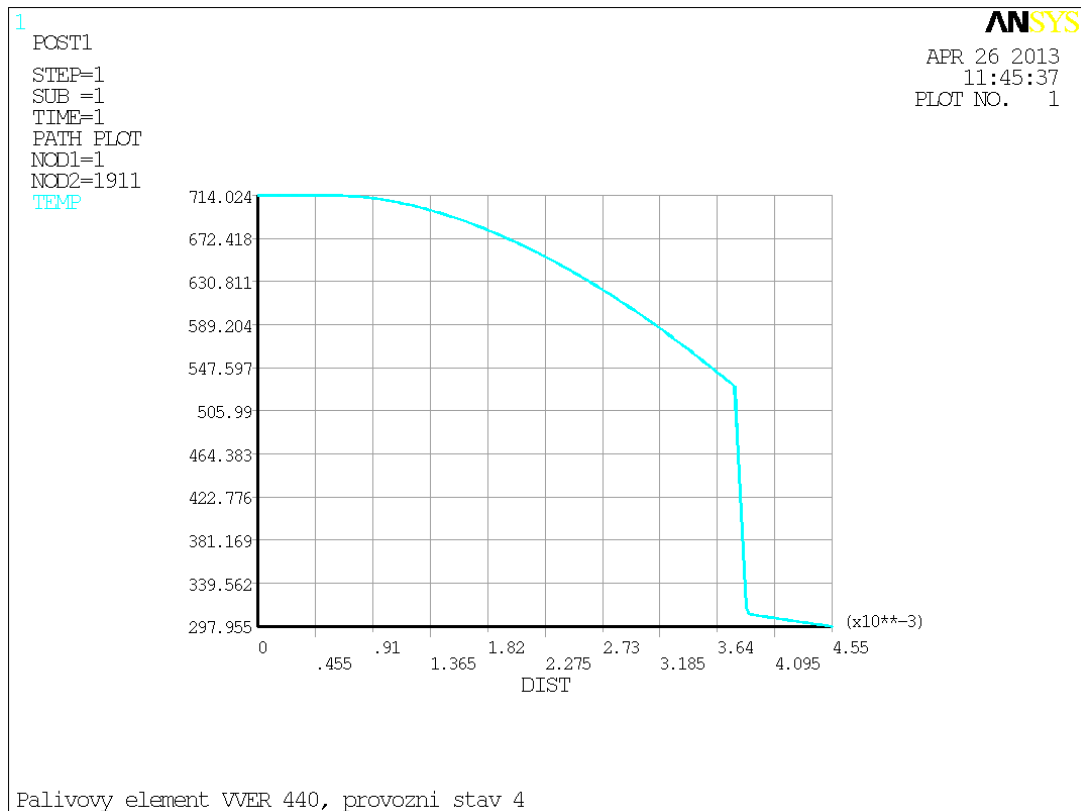
Obr. 14 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku reaktoru VVER-440 pro provozní stav při lineárním tepelném výkonu $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, vyhořelém palivu, v mezeře bez dotyku paliva a pokrytí. Vliv centrálního otvoru je zohledněn.

5.3 Provozní stav 3



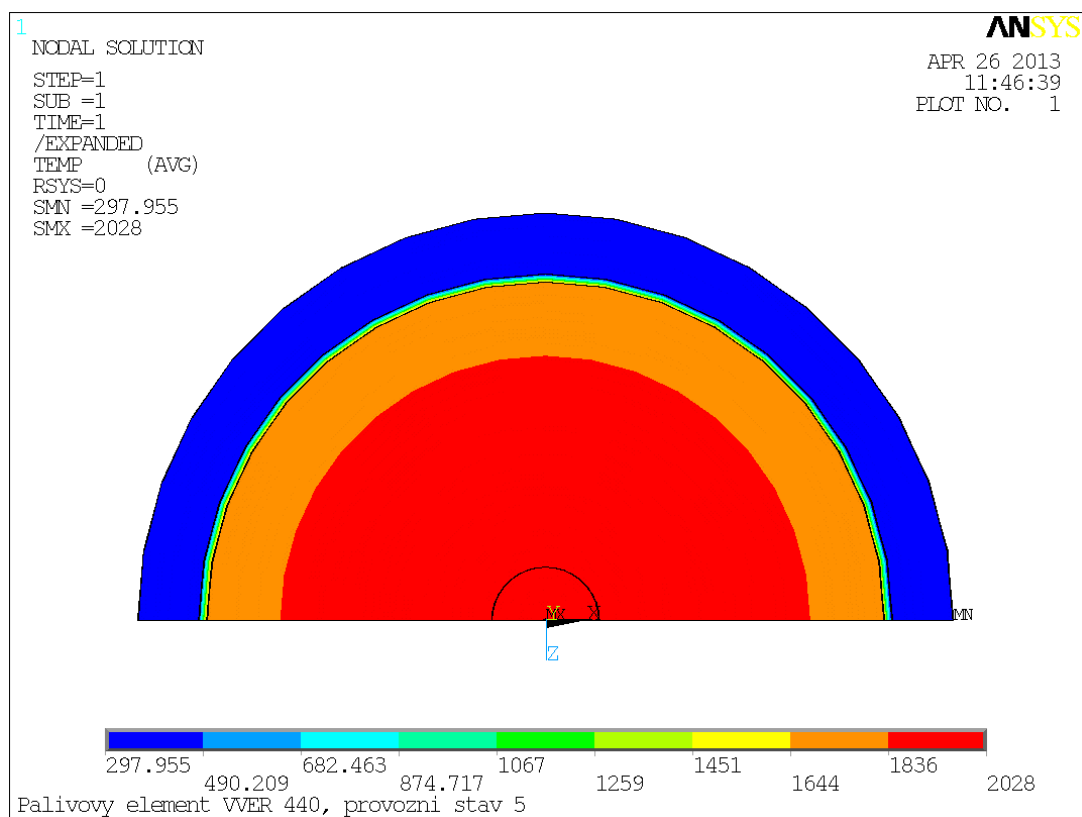
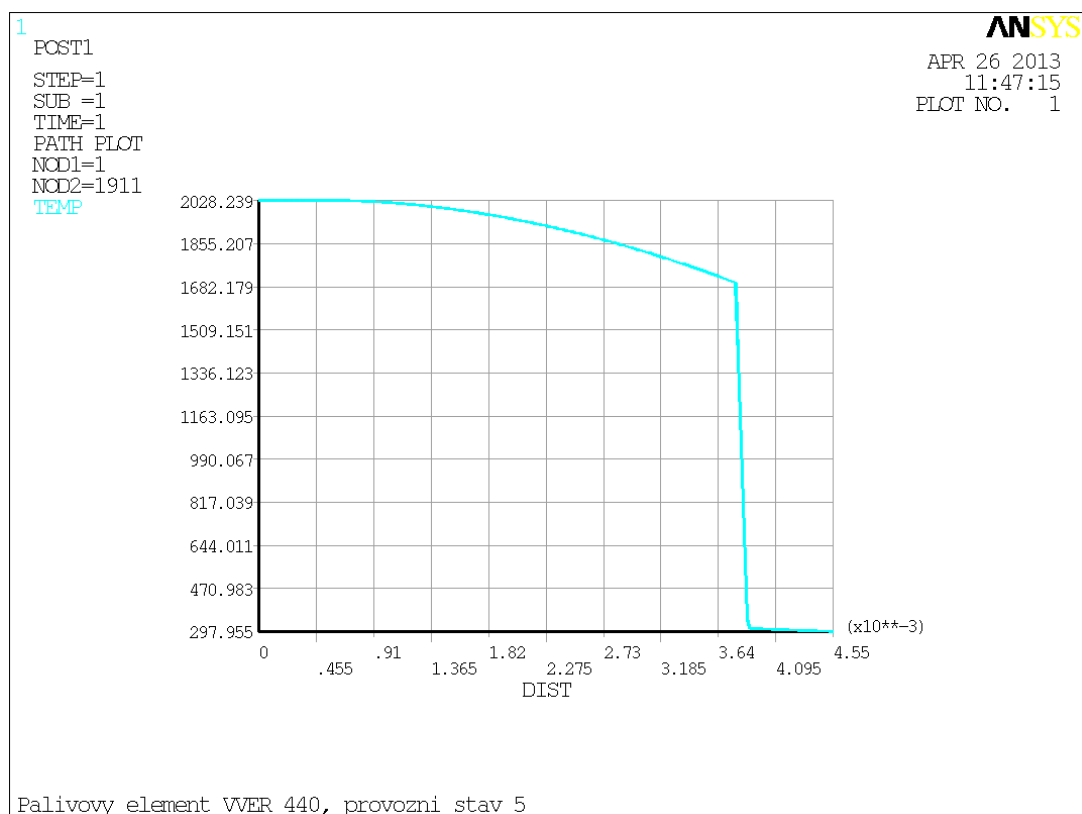
Obr. 15 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku reaktoru VVER-440 pro provozní stav při lineárním tepelném výkonu $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, vyhořelém palivu, v mezeře s dotykem paliva a pokrytí. Vliv centrálního otvoru je zohledněn.

5.4 Provozní stav 4



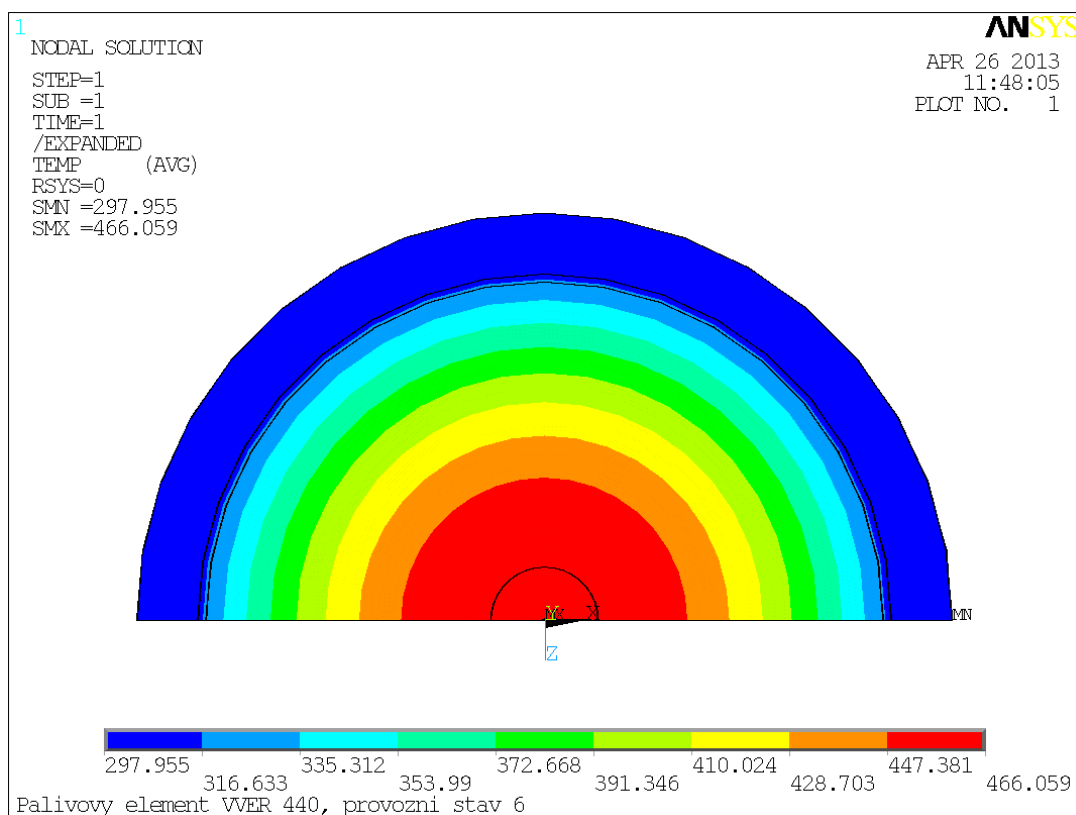
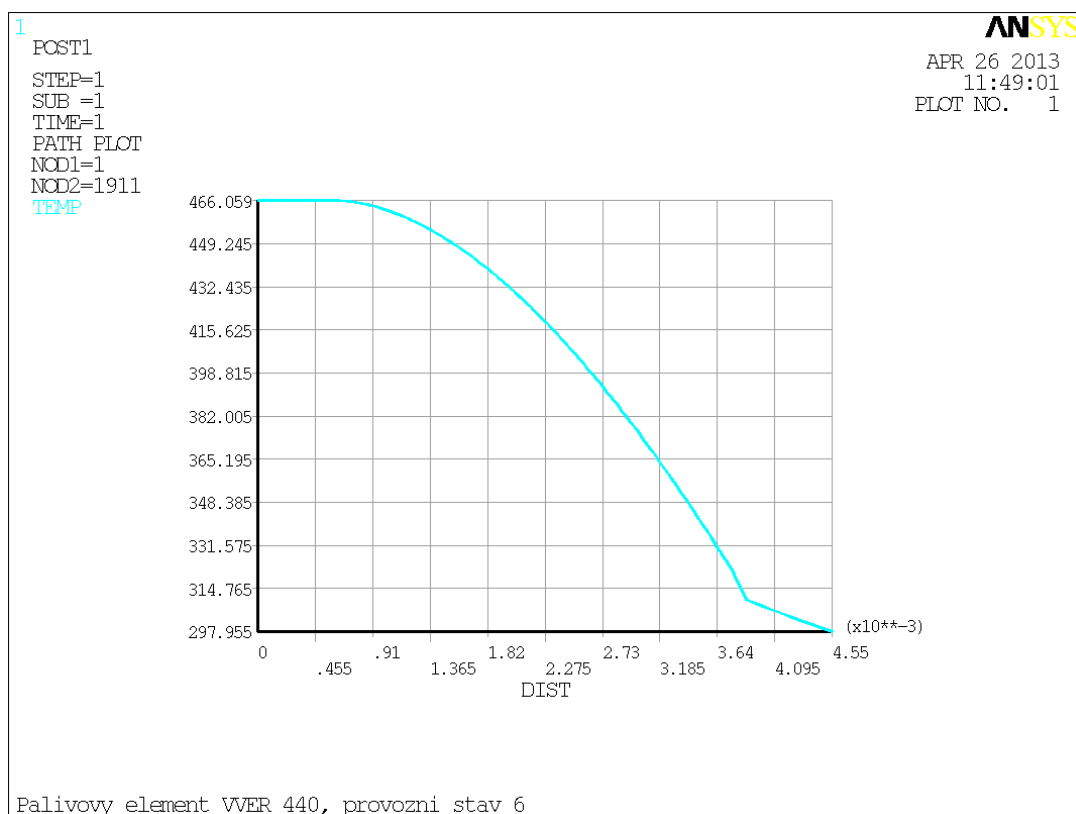
Obr. 16 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku reaktoru VVER-440 pro provozní stav při lineárním tepelném výkonu $q_H = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, čerstvém palivu, v mezeře bez dotyku paliva a pokrytí. Vliv centrálního otvoru je zohledněn.

5.5 Provozní stav 5



Obr. 17 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku reaktoru VVER-440 pro provozní stav při lineárním tepelném výkonu $q_H = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, vyhořelém palivu, v mezeře bez dotyku paliva a pokrytí. Vliv centrálního otvoru je zohledněn.

5.6 Provozní stav 6



Obr. 18 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku reaktoru VVER-440 pro provozní stav při lineárním tepelném výkonu $q_H = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, vyhořelém palivu, v mezeře s dotykem paliva a pokrytí. Vliv centrálního otvoru je zohledněn.

5.7 Shrnutí

U numerického řešení se stejně jako v případě analytického řešení ukazuje, jak u teplotního pole v palivovém proutku hraje významnou roli stav mezery mezi tabletou a pokrytím. Co se týče vlivu mezery, potvrzují se zde závěry z předchozí kapitoly.

Významnější rozdíly se však ukazují pro teplotní průběh v tabletě v blízkosti osy. Při porovnání grafů numerického řešení (Obr. 13 až Obr. 18) v této kapitole s Tab. 17 a Obr. 12 na str. 55 lze poznat, že se maximální teplota v ose proutku pro oba způsoby řešení významně liší. Pro provozní stavy 1,2 a 3, kde je uvažován vyšší tepelný výkon, je rozdíl v této teplotě dokonce okolo 100 °C.

Tento rozdíl by mohl být způsoben tím, že u numerického řešení byl zahrnut vliv centrálního otvoru v ose palivové tablety, kdežto v analytickém řešení byl tento vliv zanedbán. Význam tohoto vlivu je dále posouzen v následující kapitole.

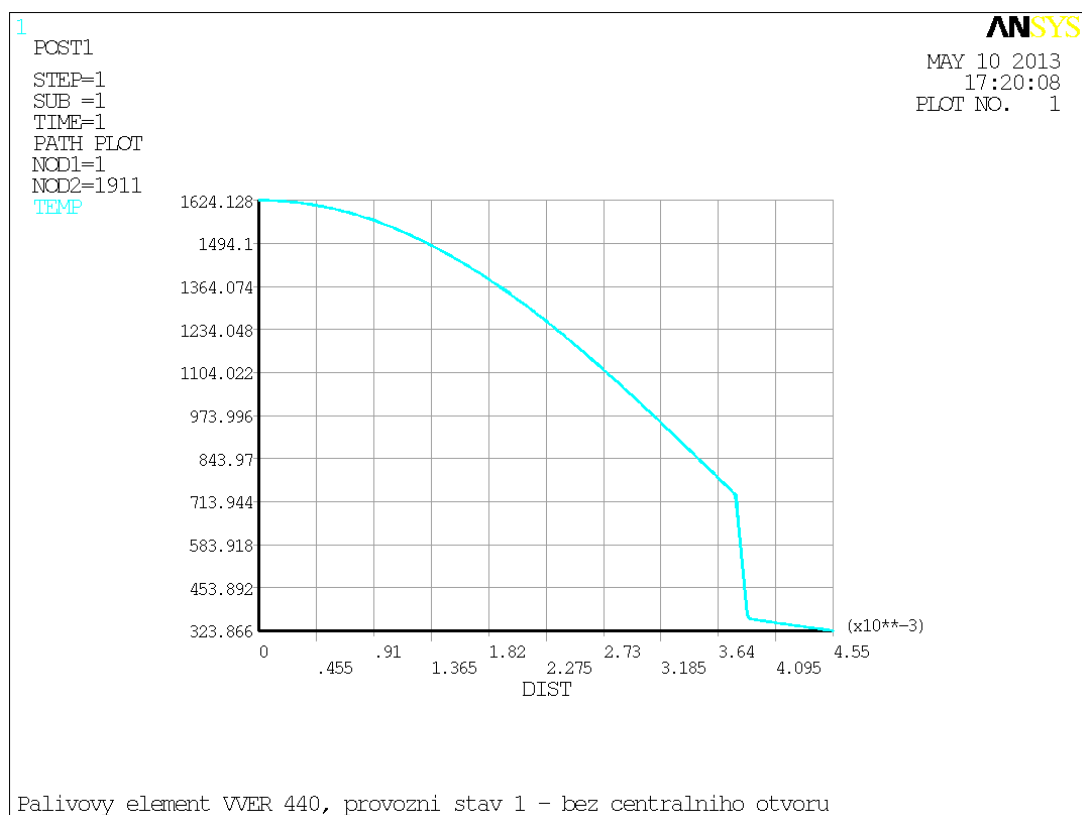
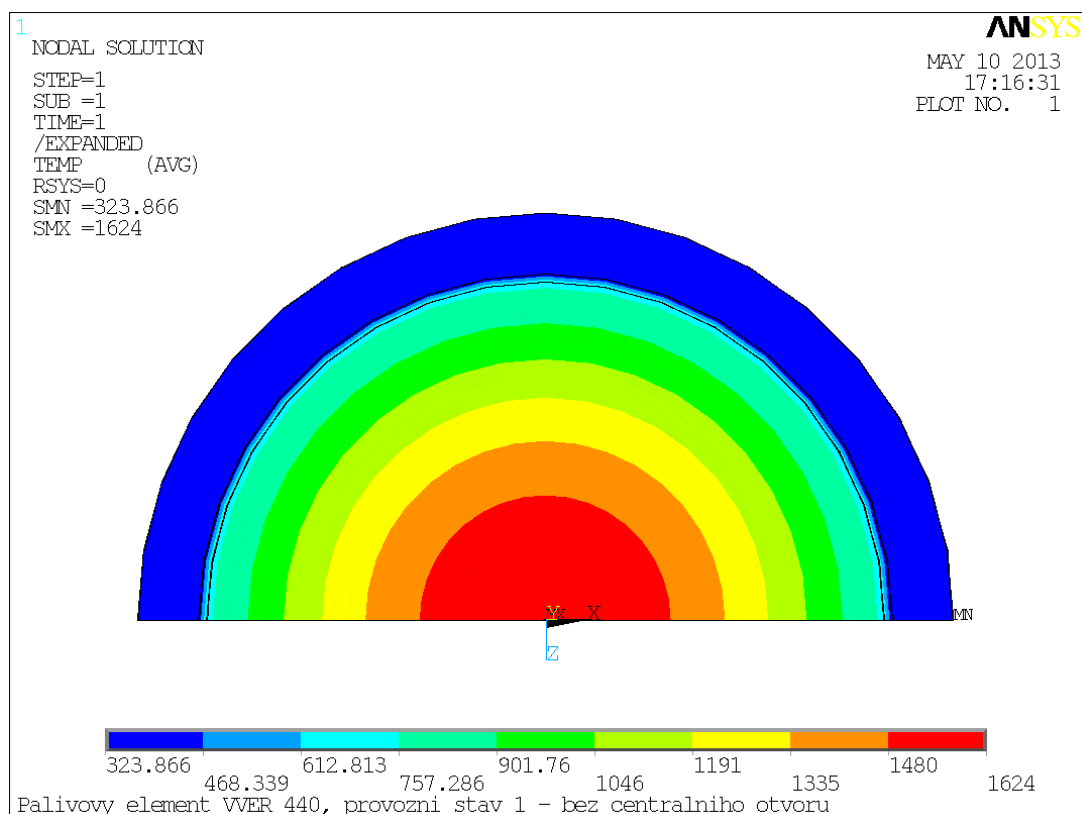
6 Vliv centrálního otvoru na maximální teplotu v palivové tabletě

V analytickém modelu byl centrální otvor v palivové tabletě zanedbán, tableta byla tedy uvažována ve tvaru plného válce. V numerickém řešení pomocí ANSYSU byl však použit model s centrálním otvorem. Oba způsoby řešení vykazují určité rozdíly.

Aby bylo možno lépe porovnat analytické a numerické řešení, je třeba posoudit vliv centrálního otvoru na maximální teplotu v ose palivové tablety.

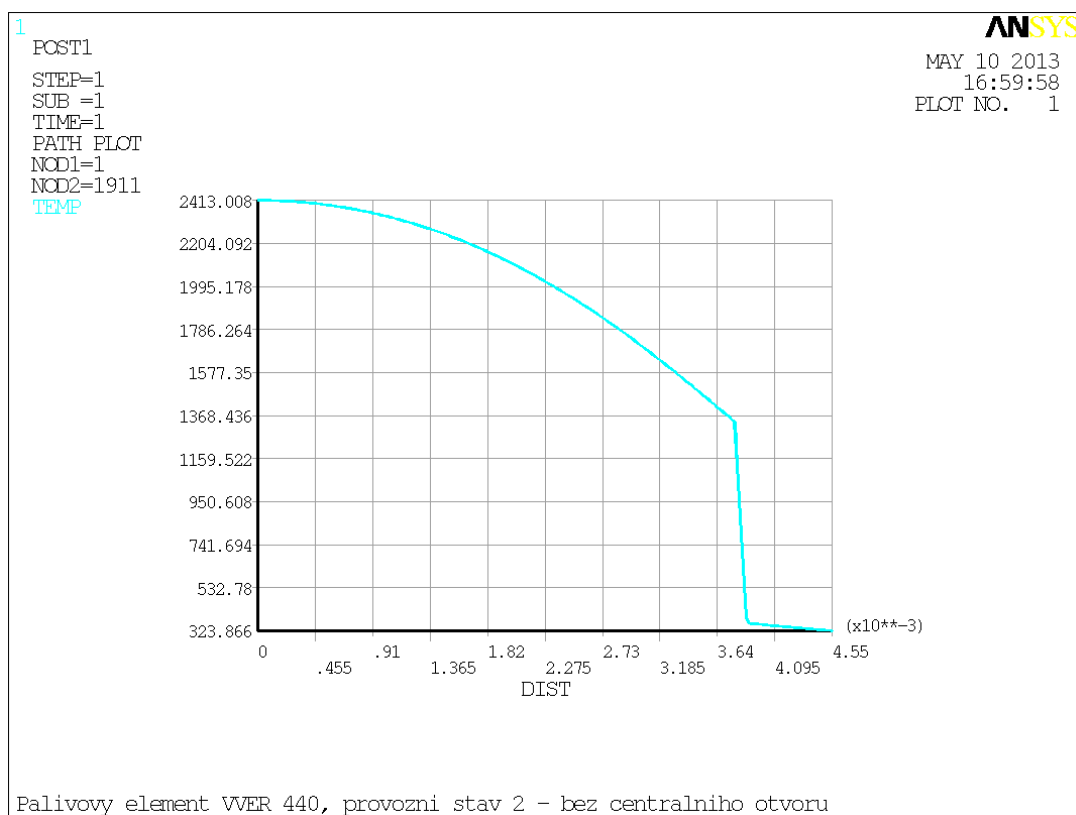
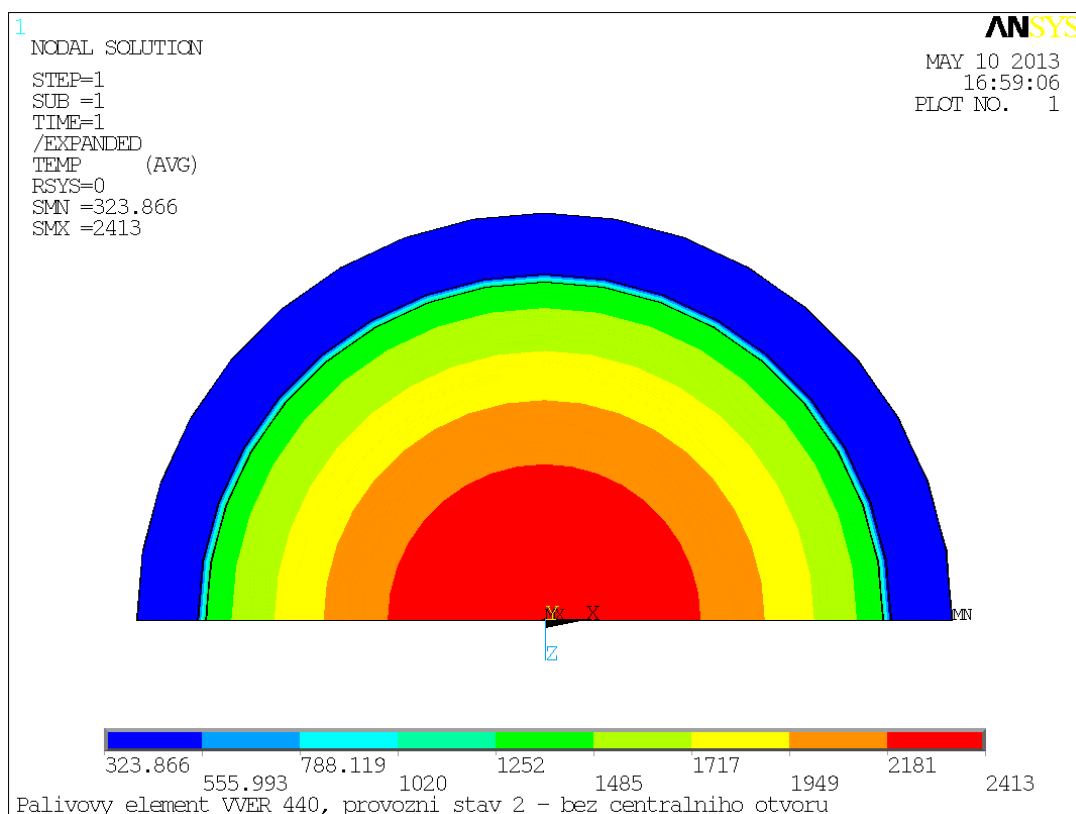
Na následujících grafech jsou zobrazeny průběhy teplot v palivové tabletě při některých provozních stavech se zanedbáním vlivu centrálního otvoru. Řešení jsou provedena numericky.

6.1 Provozní stav 1 – bez centrálního otvoru



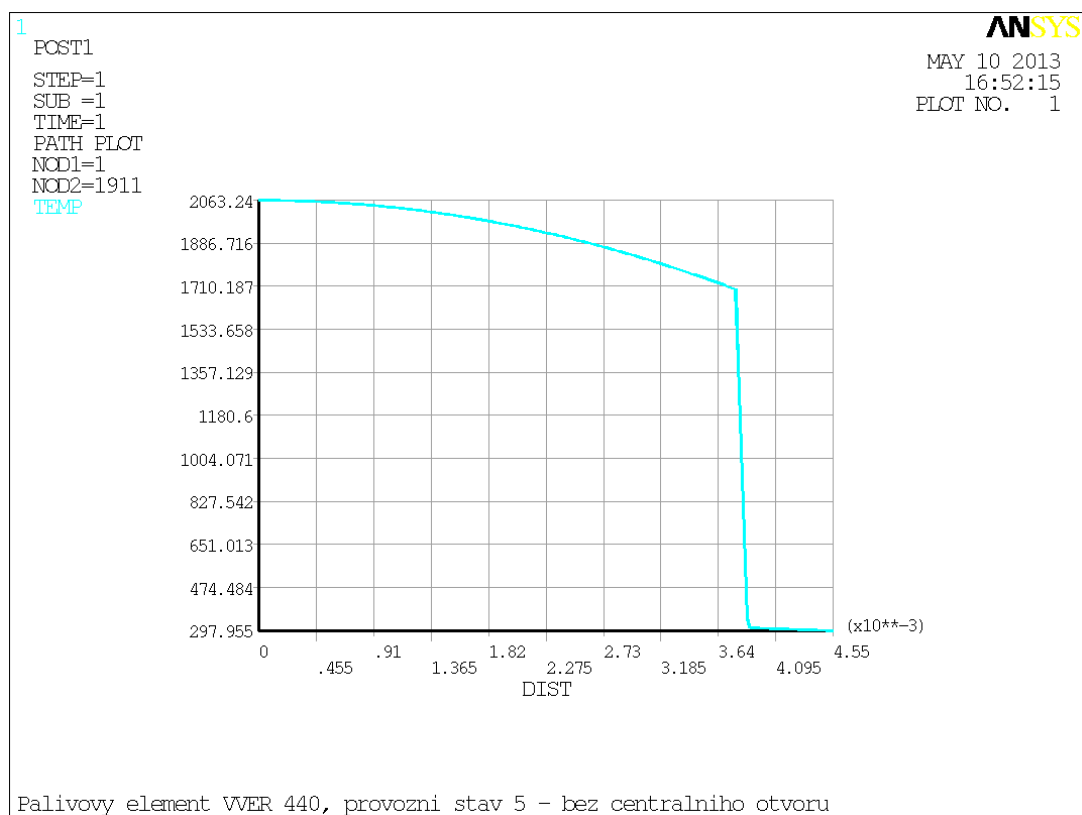
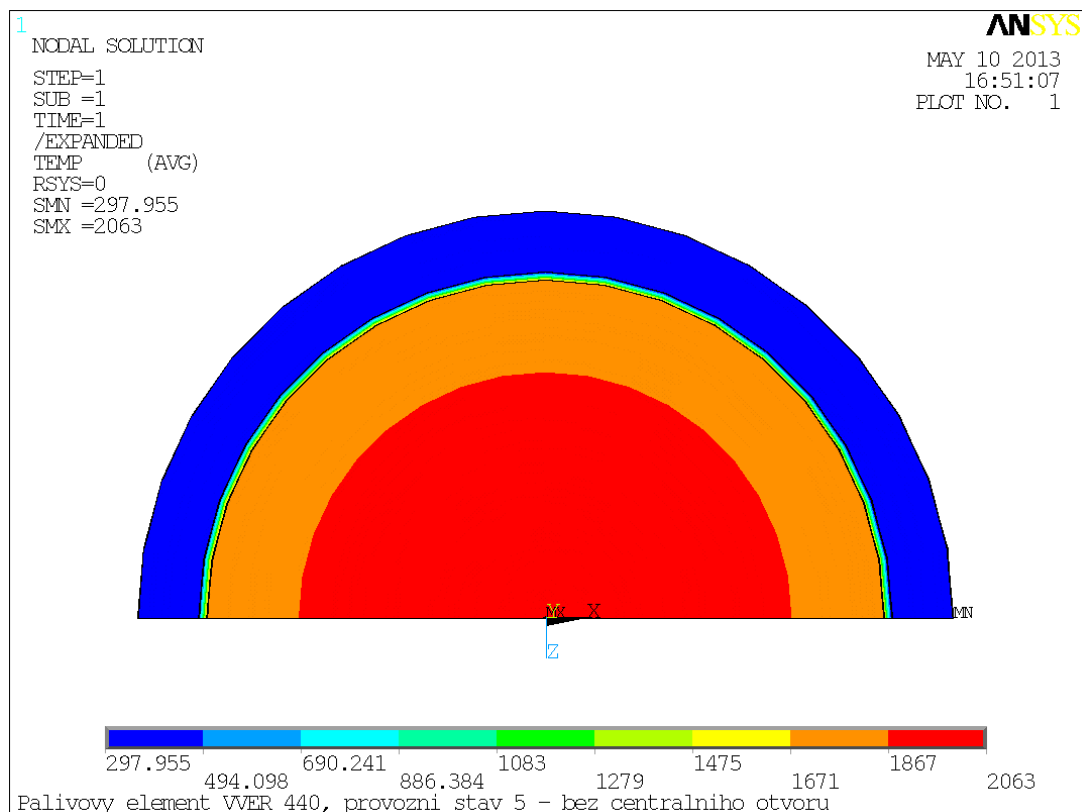
Obr. 19 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku reaktoru VVER-440 pro provozní stav při lineárním tepelném výkonu $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, čerstvém palivu, v mezeře bez dotyku paliva a pokrytí. Vliv centrálního otvoru je zanedbáván.

6.2 Provozní stav 2 – bez centrálního otvoru



Obr. 20 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku reaktoru VVER-440 pro provozní stav při lineárním tepelném výkonu $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, vyhořelém palivu, v mezeře bez dotyku paliva a pokrytí. Vliv centrálního otvoru je zanedbán.

6.3 Provozní stav 5 – bez centrálního otvoru



Obr. 21 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku reaktoru VVER-440 pro provozní stav při lineárním tepelném výkonu $q_H = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, vyhořelém palivu, v mezeře bez dotyku paliva a pokrytí. Vliv centrálního otvoru je zanedbán.

6.4 Shrnutí

Porovnáním grafů (Obr. 19 až Obr. 21) z této kapitoly s Tab. 17 a Obr. 12 na str. 55 lze pro dané provozní stavy najít mnohem lepší shodu v teplotním průběhu, než tomu bylo v případě kapitoly 5. Významné rozdíly v teplotě byly způsobeny především zanedbáním vlivu centrálního otvoru na teplotní průběh.

Samotný vliv centrálního otvoru lze posoudit porovnáním grafů (Obr. 19 až Obr. 21) v této kapitole s grafy (Obr. 13, Obr. 14 a Obr. 17) v kapitole 5. Rozdíl v maximální teplotě je u provozního stavu 1 - 100°C, u provozního stavu 2 – 102 °C, u provozního stavu 5 – 35 °C. U provozních stavů 1 a 2 je vyšší teplotní rozdíl způsoben patrně vyšším tepelným výkonem na rozdíl od provozního stavu 5, při kterém je výkon podstatně nižší.

7 Závěr

V této práci byly popsány výpočetní postupy při analýze teplotních polí v palivových elementech. Byl vytvořen zjednodušený model, který předpokládal osově symetrické rozložení teploty. Vývin tepla byl rovněž pro zjednodušení považován za rovnoměrný ve všech částech objemu paliva.

Dalším zjednodušujícím předpokladem bylo zanedbání změn rozměrů u paliva i pokrytí vlivem tepelných dilatací nebo postupný růst paliva vlivem ozáření. Pokrytí bylo chladivem obtékáno rovnoměrně. Chladivo mělo konstantní teplotu a přestup tepla do chladiva byl po celé ploše povrchu pokrytí rovnoměrný.

Tento model byl aplikován na vybrané provozní stavy palivového elementu VVER-440. Tyto provozní stavy měly zahrnout různé lineární tepelné výkony a dále různé stupně vyhoření, kterým odpovídal příslušný vliv na vedení tepla v mezeře mezi palivem a pokrytím. Lineárními tepelnými výkony byly zvoleny $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ a $q_H = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$. Pro tyto dvě varianty bylo zvoleno palivo čerstvé, palivo vyhořelé bez dotyku paliva a pokrytí a palivo vyhořelé s dotykem paliva a pokrytí. Celkem tedy bylo vytvořeno 6 různých variant. Řešení těchto variant bylo provedeno analyticky a poté numericky v programu ANSYS.

Porovnáním řešení těchto variant se dalo poznat, že patrně nejpodstatnější vliv na teplotní pole má právě stav mezery mezi palivem a pokrytím. Zatímco pro vyhořelé palivo bez dotyku paliva a pokrytí přesahoval rozdíl teplot na obou stranách mezery tisíc °C, při dotyku paliva s pokrytím se přenos tepla výrazně zvýšil a rozdíl teplot klesl na pár desítek °C.

Vedení tepla v pokrytí mělo na teplotní pole malý vliv a součinitel vedení tepla λ_z v závislosti na teplotě v této oblasti stačilo zvolit pouze přibližně.

Teplotní pole v palivové tabletě bylo u analytického řešení kvůli $\lambda(T)$ určeno pomocí integrální tepelné vodivosti. Následně bylo porovnáno se zjednodušeným průběhem při λ konstantním. Výraznou shodu měly pouze průběhy při vyšších teplotách, tedy provozní stavy 2 a 5. Je to z toho důvodu, že při těchto vysokých teplotách je již $\lambda(T)$ přibližně konstantní.

V analytickém řešení byl zanedbán vliv centrálního otvoru v ose palivové tablety. V numerickém řešení, kde byl tento vliv též zanedbán, byly teplotní průběhy podobné jako v analytickém řešení, bez výrazných rozdílů.

Též bylo numericky provedeno řešení, kde byl vliv centrálního otvoru zahrnut. Obě tyto varianty byly porovnány. Při lineárním tepelném výkonu $q_H = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ byl rozdíl maximální teploty obou variant 35 °C. Při $q_H = 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ byl rozdíl dokonce 102 °C. Ukázalo se tedy, že vliv centrálního otvoru na přesnost řešení není zanedbatelný.

Centrální otvor tedy snižuje maximální teplotu, kterou je palivo během provozu zatíženo, což je ostatně jeden z účelů centrálního otvoru.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] HEŘMANSKÝ, B. *Termomechanika jaderných reaktorů*. 1.vyd. Praha: Academia, 1986. 436 s. ISBN 21 – 087 -86.
- [2] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, 2001. 160 s. ISBN 80 – 214 – 2029 – 4.
- [3] OCHRANA, L. *Provoz, zkoušení a dozimetrie jaderně energetických zařízení (s reaktory VVER)*. 1. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1988.
- [4] BEČVÁŘ, J. *Jaderné elektrárny*. 2. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [5] *ELEMASH* [online]. 2004 [cit. 2013-5-19]. Dostupné z:
<<http://www.elemash.ru/en/production/Products/NFCP/VVER1000/>>.
- [6] firemní materiály firmy TVEL
- [7] ANSYS Online help

9 Seznam použitých zkratk a symbolů

značka	význam	jednotka
ρ	Hustota	$[Kg \cdot m^{-3}]$
S	Plocha	$[m^2]$
c	Měrná tepelná kapacita	$[J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
L	Délka	$[m]$
τ	Čas	$[s]$
$\dot{Q}$	Tepelný výkon	$[W]$
q_H	Lineární tepelný výkon	$[W \cdot m^{-1}]$
q_V	Objemový tepelný výkon	$[W \cdot m^{-3}]$
α	Součinitel sdílení tepla z pokrytí do chladiva	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
α_U	Součinitel sdílení tepla v mezeře mezi palivovou tabletou a pokrytím	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
λ	Součinitel tepelné vodivosti v palivové tabletě	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
λ_U	Součinitel tepelné vodivosti v mezeře mezi palivovou tabletou a pokrytím	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
λ_Z	Součinitel tepelné vodivosti v pokrytí	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
ϑ	Integrální tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1}]$
ϑ_P	Integrální tepelná vodivost na povrchu palivové tablety	$[W \cdot m^{-1}]$
T	Teplota	$[^{\circ}C]$
T_0	Teplota v ose palivové tablety	$[^{\circ}C]$
T_P	Teplota na povrchu palivové tablety	$[^{\circ}C]$
T_{Ci}	Teplota na vnitřním povrchu pokrytí	$[^{\circ}C]$
T_C	Teplota na vnějším povrchu pokrytí	$[^{\circ}C]$
T_{∞}	Střední teplota chladiva	$[^{\circ}C]$
r	Poloměr	$[m]$
r_U	Poloměr palivové tablety	$[m]$
r_{Ci}	Vnitřní poloměr stěny pokrytí	$[m]$
r_C	Vnější poloměr stěny pokrytí	$[m]$

10 Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Příčný řez palivovou tyčí reaktoru VVER-440.....	10
Obr. 2 Podélný řez palivovou tyčí reaktoru VVER-440.....	10
Obr. 3 Palivová kazeta reaktoru VVER-1000	11
Obr. 4 Vedení tepla jednotlivými oblastmi.	12
Obr. 5 Integrovaná tepelná vodivost v závislosti na teplotě.....	21
Obr. 6 Porovnání průběhů teplot. (Provozní stav 1).....	29
Obr. 7 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 2.....	34
Obr. 8 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 3.....	39
Obr. 9 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 4.....	44
Obr. 10 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 5.....	49
Obr. 11 Porovnání průběhů teplot uvnitř palivové tablety pro provozní stav 6.....	54
Obr. 12 Porovnání teplotních průběhů v palivovém proutku pro jednotlivé provozní stavy.....	56
Obr. 13 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku (Provozní stav 1)	58
Obr. 14 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku (Provozní stav 2)	59
Obr. 15 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku (Provozní stav 3).	60
Obr. 16 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku (Provozní stav 4).	61
Obr. 17 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku (Provozní stav 5)	62
Obr. 18 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku (Provozní stav 6).	63
Obr. 19 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku (Provozní stav 1).	66
Obr. 20 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku (Provozní stav 2).	67
Obr. 21 Závislost teploty [°C] na poloměru [mm] uvnitř palivového proutku (Provozní stav 5).	68
Tab. 1 Součinitel tepelné vodivosti λZ uvnitř pokrytí v závislosti na teplotě.	15
Tab. 2 Doporučené hodnoty αU v závislosti na lineárním tepelném výkonu qH	16
Tab. 3 Poloměry na rozhraní mezi jednotlivými oblastmi palivového proutku.	23
Tab. 4 Lineární tepelný výkon qH , stupeň vyhoření a stav mezery pro jednotlivé provozní stavy.	23
Tab. 5 Průběh teploty a integrovaná tepelná vodivost uvnitř palivové tablety pro provozní stav 1.....	26
Tab. 6 Průběhy teplot uvnitř palivové tablety podle volby λ (Provozní stav 1).....	27
Tab. 7 Průběh teploty a integrovaná tepelná vodivost uvnitř palivové tablety pro provozní stav 2.....	32
Tab. 8 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 2.....	33
Tab. 9 Průběh teploty a integrovaná tepelná vodivost uvnitř palivové tablety pro provozní stav 3.....	37
Tab. 10 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 3.....	38
Tab. 11 Průběh teploty a integrovaná tepelná vodivost uvnitř palivové tablety pro provozní stav 4.....	42
Tab. 12 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 4.....	43
Tab. 13 Průběh teploty a integrovaná tepelná vodivost uvnitř palivové tablety pro provozní stav 5.....	47
Tab. 14 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 5.....	48
Tab. 15 Průběh teploty a integrovaná tepelná vodivost uvnitř palivové tablety pro provozní stav 6.....	52
Tab. 16 Průběh teploty uvnitř palivové tablety pro λ konstantní při provozním stavu 6.....	53
Tab. 17 Porovnání teplotních průběhů v palivovém proutku při jednotlivých provozních stavech.	55