

Výpočet hustoty tepelných toků z metalické části coria

Jan Hrbek

Jaderný palivový cyklus

Centrum výzkumu Řež

jan.hrbek@cvrez.cz

Computation of heat fluxes from metallic part of corium

Abstract – The article deals with numerical calculations of a heat flux from molten stainless steel (representing a metallic part of a corium) through a calorimeter wall. The problem is solved using the heat transfer equation with defined boundary conditions. The calculation results are discussed considering the preparation of experiments focused on studying severe nuclear accidents in the Cold Crucible Laboratory at CV Řež.

Keywords – Induction melting, thermal field, heat flux, induction furnace.

I. ÚVOD

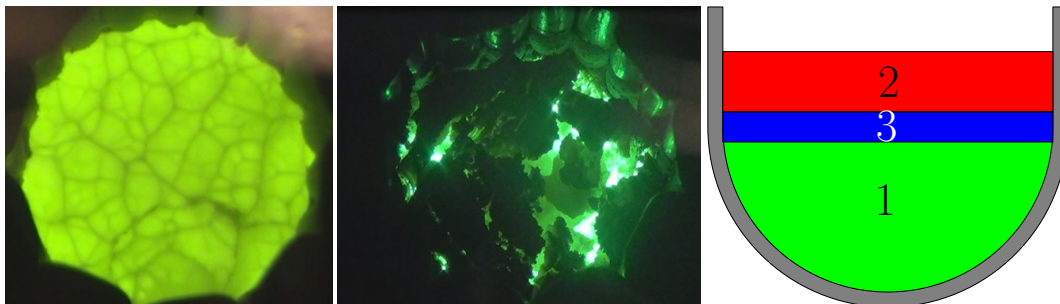
Tento příspěvek se zabývá numerickými výpočty hustoty tepelných toků z metalické části coria v průběhu těžké jaderné havárie s tavením aktivní zóny. Problematika těžkých jaderných havárií je nesmírně komplexní a v dnešní době aktuální, proto je nutné věnovat jednotlivým úlohám značné úsilí pro popsání fyzikálních jevů doprovázejících takové havárie. Popsáním a pochopením těchto jevů je možné v praxi zavádět opatření zvyšující bezpečnost jaderných elektráren. Na začátek je vhodné uvést, že naše výzkumná skupina se zabývá studiem těžkých havárií tlakovodních jaderných reaktorů generací III a III+.

II. PROBLEMATIKA TĚŽKÝCH JADERNÝCH HAVÁRIÍ

Problematika těžkých jaderných havárií s tavením aktivní zóny je velice aktuální téma, nejen s ohledem na havárii v jaderné elektrárně Fukushima Daiichi. Existuje velké množství různých scénářů jaderné havárie, i proto je do projektů zabývajících se touto tematikou zapojeno značné množství výzkumných institucí. Obecně ve výzkumu naší laboratoře je předpokládán scénář obsahující roztavení pokrytí palivových proutků, které je obvykle tvořeno zirkonem, který brání pronikání těkavých štěpných produktů mimo proutek. Po natavení pokrytí proutku dochází následně i k tavení samotných palivových tablet, přičemž vzniká corium, při jehož tvorbě vzniká tzv. melting pool, který sestupuje ke spodní části reaktorové nádoby, označované jako lower head. Při tomto ději corium taví konstrukční prvky, které stojí v cestě jeho postupu směrem dolů. Na Obr. I jsou zobrazeny fotografie z experimentu simulujícího těžkou jadernou havárii.

Složení vzniklého coria záleží na poměru UO_2 , ZrO_2 , Zr, nerezové oceli a B_4C . Zde nelze corium nikterak zobecnit už jen z důvodu oxidace Zr, kterou vzniká ZrO_2 . Z rozsáhlých studií této problematiky vyplývá, že metalická a oxidická část coria jsou oddělené[1]. Úkolem naší skupiny je experimentálně zkoumat tepelné toky mezi oběma částmi coria a mezi každou vrstvou coria a nádobou reaktoru. Znalost tepelných toků je

důležitá pro návržení havarijního chlazení reaktorové nádoby, které by zajistilo, že nedojde k jejímu protavení. Schématické rozložení coria ve spodní části reaktorové nádoby je vyobrazeno na Obr. I.



Obrázek I. Fotografie roztaveného coria při experimentu simulujícím těžkou jadernou havárii. Čistý výhled na hladinu coria (vlevo) a výhled zakrytý usazenými nečistotami ze vzniklých aerosolů (uprostřed). Klasická reprezentace rozložení coria ve spodní části reaktorové nádoby (vpravo). 1 - oxidická část, 2 - metalická část, 3 - krusta mezi oběma částmi.

III. NAVRHOVANÝ EXPERIMENT

V první fázi je uvažován experiment pouze s metalickou částí coria, v dalších krocích výzkumu bude uvažována i část oxidická. Tento článek pojednává pouze o experimentálním vyšetření tepelných toků z metalické části coria, resp. návrhem tohoto experimentu. Cílem experimentu je dosáhnout stacionárního teplotního pole v roztavené vsázce a při tomto stavu zkoumat tepelný tok procházející stěnou kalorimetru.

Experiment bude proveden s využitím tavení materiálu elektromagnetickou indukcí v kelímku, kde v ose bude vložen kalorimetr pro kalorimetrická měření (Obr. II) a následné zjištění tepelného toku ze vsázky do kalorimetru. Uvažovaným materiálem pro výrobu kalorimetru je zirkonová ocel, konkrétně zirkonová ocel použitá pro výrobu tlakové nádoby reaktoru VVER 1000. Kelímek je připravován z SiO_2 .

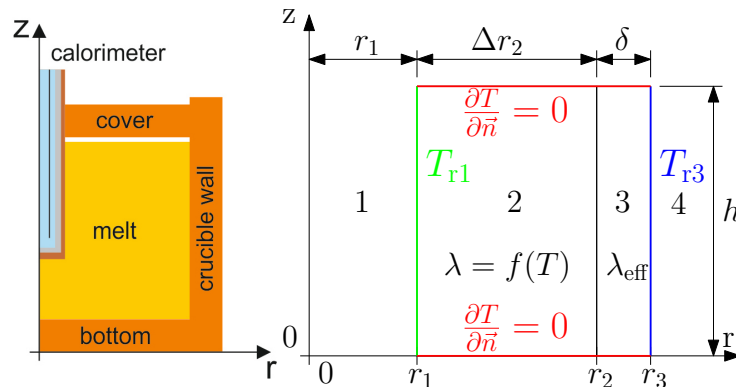
IV. NUMERICKÉ ŘEŠENÍ HUSTOTY TEPELNÝCH TOKŮ

Cílem výpočtů bylo určit potřebnou velikost Jouleových ztrát ve vsázce pro udržení stacionárního stavu tepelného pole v roztavené fázi. Znalost těchto ztrát je důležitá pro správné navržení experimentu, volbu výkonu generátoru a dalších parametrů. Geometrické rozvržení je možné vidět na Obr. II.

Zde byla úloha rozdělena na dva úkoly, prvním bylo určení hustoty tepelného toku z taveniny přes stěnu kalorimetru, kde byla zjišťována optimální tloušťka stěny kalorimetru, aby nedošlo k jeho protavení. Ve výpočtu byla uvažována nerezová ocel jako vsázka i jako materiál kalorimetru, to z důvodu neznámých materiálových vlastností reaktorové zirkonové oceli. Nicméně nerezová ocel by měla mít parametry podobné oceli zirkonové, podmínky experimentu a výpočtu by tedy neměly být příliš odlišné.

Ve výpočtu bylo využito dvou teplot. Při první teplotě dochází ke změně stavu hmoty z pevného skupenství na kapalné a existují pevná i kapalná fáze v rovnováze, tzv. melting point T_{mp} . Při dosažení druhé uvažované teploty je materiál zcela v kapalném stavu a pevná fáze již nemůže koexistovat s taveninou v termodynamické rovnováze, tzv. liquidus temperature T_{lt} . Pro výpočet byly použity přibližné hodnoty teplot $T_{mp} = 1500^\circ\text{C}$ a $T_{lt} = 1550^\circ\text{C}$. Řešená geometrie je vyobrazená na Obr. II. Oblast 1 označuje vnitřní část

kalorimetru, kterou proudí médium. Další část, označená 2, je stěna kalorimetru v pevném stavu, oblast 3 je tenká vrstva, kde jsou teploty v rozmezí T_{mp} a T_{lt} a materiál kalorimetru se nachází v pevném i kapalném skupenství. Poslední část, označená 4, je čistě kapalná fáze vsázky.



Obrázek II. Geometrické rozložení experimentu (vlevo) a geometrické uspořádání pro řešení hustoty tepelných toků stěnou kalorimetru včetně okrajových podmínek (vpravo). 1 - oblast uvnitř kalorimetru, 2 - stěna kalorimetru, 3 - natavená tenká vrstva, 4 - tavenina.

Dílním cílem experimentu je dosáhnout stacionárního teplotního pole, je tedy nutné matematický model uvažovat též stacionární. Dále je ve výpočtu uvažováno šíření tepla pouze vedením, tento druh přestupu tepla popisuje Fourier-Kirchhoffova rovnice, která je v případě stacionárního teplotního pole ve tvaru

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = 0. \quad (1)$$

Jako materiálový parametr zde vystupuje pouze tepelná vodivost λ , jejíž závislost na teplotě je ve výpočtu uvažována nelineární. Průběh této závislosti je vyobrazen na Obr. III, tento průběh ovšem platí pouze do $398,85^\circ\text{C}$. Hodnoty pro vyšší teploty byly extrapolovány, čímž byl výpočet zatížen chybou, která bude v oblasti změny fáze nezanedbatelná. Nicméně výpočet má pouze orientační charakter, proto byl použit tento přístup. Nelineární průběh λ byl použit pro oblast 2, pro tenkou vrstvu 3 byla použita konstantní velikost tepelné vodivosti. Úvaha výpočtu vycházela z faktu, že v této oblasti se nebude vyskytovat λ , ale λ_{eff} [2], přičemž platí $\lambda_{\text{eff}} \gg \lambda$, protože λ_{eff} respektuje i přenos tepla difúzí hmoty. Výpočet byl proveden s několika velikostmi λ_{eff} , konkrétně 100, 200 a $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Výpočty ukázaly, že v tomto rozsahu je vliv velikosti λ_{eff} na rozložení teploty zanedbatelný, proto byla pro finální výpočet použita hodnota $\lambda_{\text{eff}} = 100$.

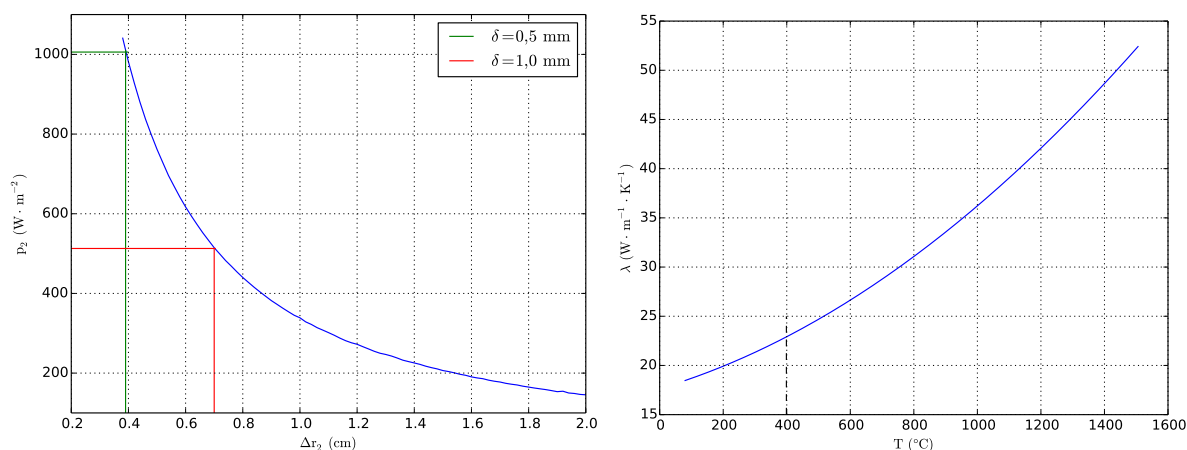
Dirichletovy krajové podmínky byly zvoleny na hranici r_1 : $T_{r1} = 80^\circ\text{C}$ a na vnější hranici kalorimetru r_3 : $T_{r3} = 1550^\circ\text{C}$. Dále byly použity nulové Neumannovy okrajové podmínky na spodní a horní hranici oblasti.

Jedním z cílů výpočtu bylo zjistit hloubku natavení materiálu kalorimetru. Pro tento účel byl zvolen iterační přístup. Byl zvolen počáteční poloměr $r_3 = r_1 + \Delta r_2 + \delta = 5 \text{ cm}$, výška $h = 1 \text{ cm}$ a $r_1 = 1 \text{ cm}$. Následně bylo spočteno rozložení teploty, hranice ležící na poloměru r_2 byla přesunuta na pozici, kde v rozložení teploty platilo $T_{mp} = 1500 \pm 0,5^\circ\text{C}$ přičemž poloměr r_3 byl posunut na pozici nového $r_2 + \delta$. Takto výpočet pokračoval, dokud byla splněna ukončovací podmínka a to, že rozdíl mezi dvěma kroky $\varepsilon = 0,01 \text{ mm}$. Při dosažení tohoto stavu byla spočtena hustota tepelného toku stěnou. V dalším kroku byla zvolena jiná hodnota δ a výpočet proběhl znovu. Velikost δ byla volena od $0,1 \text{ mm}$ po 5 mm s krokem $0,1 \text{ mm}$.

V. VÝSLEDKY A ZÁVĚR

Průběh hustoty tepelného toku stěnou kalorimetru v závislosti na Δr_2 s parametrem δ je vyobrazen na Obr.III. Hustota tepelného toku reaktorovou nádobou během těžké jaderné havárie při kontaktu s coriem je kolem 300 W/cm^2 , pro určení natavení kalorimetru byl zvolen konzervativní odhad 500 W/cm^2 stěnou kalorimetru. Z Obr.III je vidět, že této velikosti hustoty tepelného toku odpovídá $\Delta r_2 = 0,72 \text{ cm}$ a $\delta = 1,05 \text{ mm}$.

Z obdržných výsledků plyne, že by nemělo dojít k protavení kalorimetru a tedy kontaktu mezi mediem kalorimetru a taveninou. Nicméně tu vyvstávají poměrně vysoké požadavky na provedení kalorimetru, rychlost proudění media, jeho tlak atd.



Obrázek III. Závislost hustoty tepelného toku skrz stěnu kalorimetru na Δr_2 s parametrem δ (vlevo), použitá závislost $\lambda = f(T)$ (vpravo) (nerezová ocel W (Fe, (15-17.5) Cr, (6-7.5) Ni, (0.4-1.2) Ti, 0.08 C max, 0.4 Al max, 1 Si max, 0.04 P max, 0.03 S max (wt%); annealed; UNS S17600)[3]

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2016-006. Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.

LITERATURA

- [1] Research and development with regard to severe accidents in pressurised water reactors: Summary and outlook. Rapport IRSN-2007/83, Rapport CEA-2007/351, 2007.
- [2] BERGMAN, T. L., INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. 7. vyd. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. ISBN 978-0470-50197-9.
- [3] M.F. Rothman, High-Temperature Property Data: Ferrous Alloys, ASM International, 1988; and W.F. Brown, Aerospace Structural Materials Handbook, Mechanical Properties Data Center, Battelle Columbus Laboratories, 1981