

# STAV PROJEKTU IVMR HORIZON 2020 – EXPERIMENT PRO POTVRZENÍ IVMR PRO VVER 1000

## PRESENT STATUS IVMR HORIZON 2020 PROJECT – TESTS FOR THE IVMR CONFIRMATION FOR VVER 1000

Jiří Žďárek, Jan Wandrol, Vladislav Krhounek, David Bátěk a Marek Benčík

ÚJV Řež a.s.

### Abstrakt

V rámci EU Projektu HORIZON 2020 IVMR, ÚJV Řež a.s. odpovídá za řešení TASK 4 s cílem vybudovat experimentální zařízení (THS-15) umožňující simulovat tepelné toky z roz-taveného Coria v průběhu těžké havárie do stěny tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 se sou-časným chlazením vnějšího povrchu. Pro maximální přiblížení k reálným podmínkám jsou do-drženy výškové charakteristiky šachty reaktoru a je modelována úhlová výseč TNR  $3.8^\circ$ . Šířka kanálu je 150 mm. V prezentaci uvedeme současný stav dosažených výsledků.

### Abstract

Within the EU Project HORIZON 2020 IVMR, the ÚJV Řež a.s. is responsible for TASK 4 with goal to build the experimental facility (THS-15) with capabilities to simulate the heat fluxes from the melted Corium during the severe accident to the reactor pressure vessel wall of VVER 1000 with cooling of the outer surface. For maximum simulation of the real design con-ditions the height of the RPV cavity and angular RPV segment of  $3.8$  degrees is performed. The width of the cooling channel is 150 mm. In our presentation status of results will be presented.

### Charakteristiky konstrukce THS-15

Experimentální zařízení je smyčka modelující přestup tepla z reaktorové nádoby (TNR) do šachty reaktoru při těžké havárii. Pro větší přiblížení k reálným podmínkám jsou u THS-15 dodrženy výškové charakteristiky konstrukce po výšce (ode dna šachty reaktoru do místa opory TNR). Modelována je úhlová výseč  $3,8^\circ$  reprezentující prostor mezi stěnou šachty reaktoru a TNR. Šířka kanálu v místě stěny představující reaktorovou nádobu je 150 mm. Vývin tepla uvnitř reaktorové nádoby je simulován elektrickými topnými patronami, jejichž modulové uspořádání umožňuje modelovat prakticky libovolný profil tepelného toku do stěny TNR. Na rozdíl od reálné VVER-1000 není stěna dna modelována jako úhlová výseč, ale z konstrukčních důvodů je zvolena konstantní šířka kanálu 150 mm. Průtočná plocha kanálu se předpokládá konstantní po výšce kanálu. Předpokládá se, že v průběhu experimentu bude v THS-15 udržo-vána hladina vody prakticky v plné výšce chladicího kanálu.

Zařízení THS-15 je navrženo jako uzavřená smyčka, ve které je generována pára při ohřevu chladiva na vnějším povrchu oceli, která je explozivně přivařena na měděné topné segmenty. Vznikající pára je odváděna z horní plochy kanálu potrubím do kondenzátoru. Z kondenzátoru je kondenzát odváděn do chladiče, zde je dochlazen na teplotu kolem  $20^\circ\text{C}$  a následně je chla-dící medium pumpováno do spodní části šachty ve stejné poloze jako je vyústění vzduchového chladicího kanálu ve středu podlahy šachty pod reaktorem. Čerpadlo, které chladící medium pumpuje neovlivňuje proudění v kanálu THS-15, pouze doplňuje chladící medium a kompen-zuje odvedenou páru do kondenzátoru. Celkové schéma chladicího kanálu s kondenzátorem a dalšími chladíci okruhy je uvedeno na obr. 1.

### Nejdůležitější informace o provozu THS-15

Pro řízení, regulaci a sběr dat v průběhu provozu THS-15 byl vyvinut speciální software instalovaný na počítači řídicího velínu. Software umožňuje graficky zobrazit měřené parametry jako jsou teploty, tlaky, hmotnostní průtoky chladicího media, hladinu v kondenzátoru a další

veličiny. Software rovněž umožňuje elektronicky řídit celé zařízení a dodržet nastavené bezpečnostní limity celého zařízení.

Před vlastním zahájením ohřevu celého kanálu je celý kanál zaplněn chladícím médiem až do úrovně, kde přechází kanál do potrubí pro odvod páry. V počáteční fázi operátor nastaví celkový příkon do topných těles na hodnotu cca 10 % celkového příkonu (cca 70 kW), tak aby byl zajištěn postupný ohřev celého kanálu s rychlostí max. 30 °C/h. V průběhu ohřevu, doplňující čerpadlo je používáno, ohřátá voda přetéká do kondenzátoru. Voda v chladícím kanále a v kondenzátoru bude ohřívána až do úrovně saturace. Do tohoto stavu sekundární okruh je uzavřen. V okamžiku, kdy teplota v primárním okruhu dosáhne cca 100 °C, operátor otevře sekundární okruh.

Následující vznik varu znamená lehký nárůst tlaku v experimentálním kanálu ve srovnání s atmosférickým tlakem, napájecí čerpadlo je proto odpojeno. S varem dochází k poklesu hladiny vody v kanále. Operátor začíná periodické odvzdušnění. Po dosažení předepsané hladiny vody v kanále, je zapnuta regulace vodní hladiny. Zařízení je připraveno k zahájení experimentálního programu. Odvod vzduchu je nyní uzavřen. Tlak primárního okruhu je nastaven v souladu s plánovaným experimentem a udržován pomocí sekundárního okruhu.

Zvyšování elektrického příkonu nesmí převýšit 45 kW až do dosažení celkového příkonu 140 kW. Zvyšování příkonu je provedeno cca v 5 postupných navýšeních v každém topném segmentu podle předem definovaného simulovaného rozložení.

### **Základní analytická podpora**

Nejdůležitější analytická podpora je nejenom z Divize 2200 v ÚJV s využitím kódů MELCOR, FLUENT a RELAP, ale i z Kurchatov Institute v Moskvě kódy SOCRAT/HEFEST a ASTEC. Rovněž IVS Trnava provedl výpočty kódem ASTEC. V období 2012 – 2014 ÚJV iniciovalo projekt EU pod vedením JRC Petten, jehož cílem byl Benchmark analytický projekt s účastí 13 expertních organizací EU včetně KI Moskva a IPP Ukrajina. Výsledky tohoto mezinárodního Benchmark projektu jednoznačně potvrdily nutnost dalších analytických prací, ale zejména nutnost provést kvalifikované experimenty na malých vzorcích, ale zejména na termo-hydraulické smyčce, která bude maximálně simulovat skutečnou konfiguraci šachty reaktoru s tlakovou nádobou, přívod chladícího media a odvod páry. Pro experimentální verifikaci na zařízení THS-15 na základě všech provedených analytických výpočtů bylo zvoleno 5 reprezentativních profilů teplotního toku, z toho 3 profily s dvou vrstvou konfigurací a dva profily s tří vrstvou. Pro dvou vrstvou konfiguraci se jedná o výsledky FLUENT+RELAP-3D, SOCRAT Early and Late Phase, pro tří vrstvou konfiguraci jsou využity výsledky kódu SOCRAT. Pro základní názor na průběh tepelných toků od dna tlakové nádoby do kritické výšky bazénu Coria ve válcové části tlakové nádoby uvedeme výsledky získané kódem FLUENT (ÚJV Řež) na obr. 2 pro dvou vrstvou konfiguraci v čase 2 h 30 min a na obr. 3 pro tří vrstvou konfiguraci v čase 2 h 51 min.

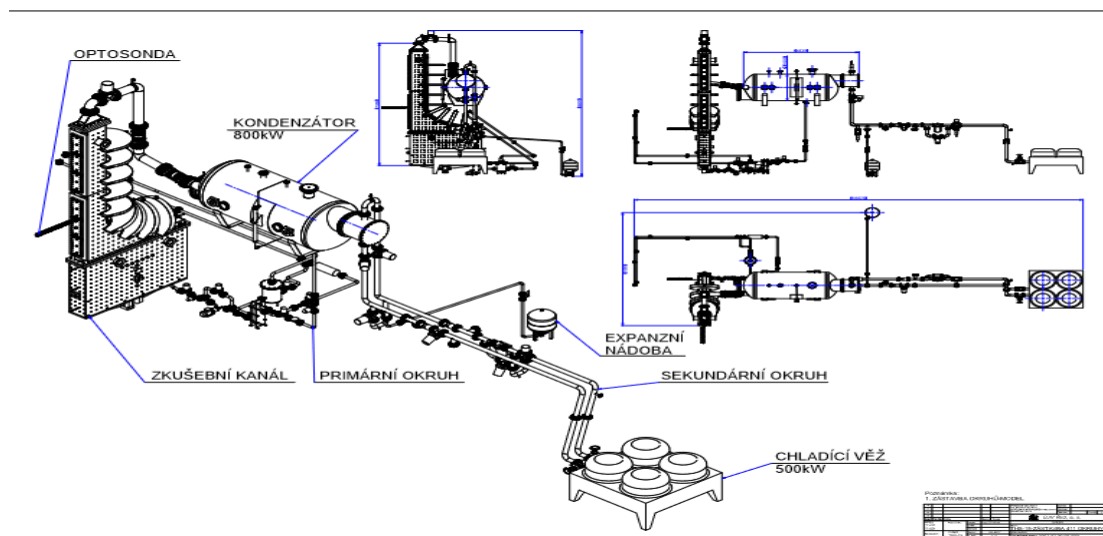
### **Souhrn nejdůležitějších získaných výsledků**

Do srpna 2018 bylo provedeno 20 experimentů, které jsou detailně popsány v tabulce 1, včetně popisu využitých výpočtových kódů a základních parametrů provozu THS-15. Nejvyšší dosažený tepelný tok pro tří vrstvou konfiguraci bazénu Coria v čase 10 310 s („late phase“) má hodnotu 1,56 MW/m<sup>2</sup> ve výšce 2 m od dna tlakové nádoby. U žádného ze zkoušených teplotních profilů nedošlo ke krizi varu. Po každé sérii experimentů jsou provedeny další hardware i software úpravy celého zařízení s cílem zlepšit celkovou konfiguraci provozu a řízení THS-15. Zařízení funguje spolehlivě a je připraveno k další sérii testů začátkem září 2018. V připravovaných dalších experimentech se chceme postupně přibližovat k hodnotám kritických tepelných toků pro různé konfigurace teplotních profilů. EU projekt HORIZON 2020 IVMR kde ÚJV Řež je hlavním řešitelem WP 4 s cílem vybudovat THS-15 a provést relevantní experi-

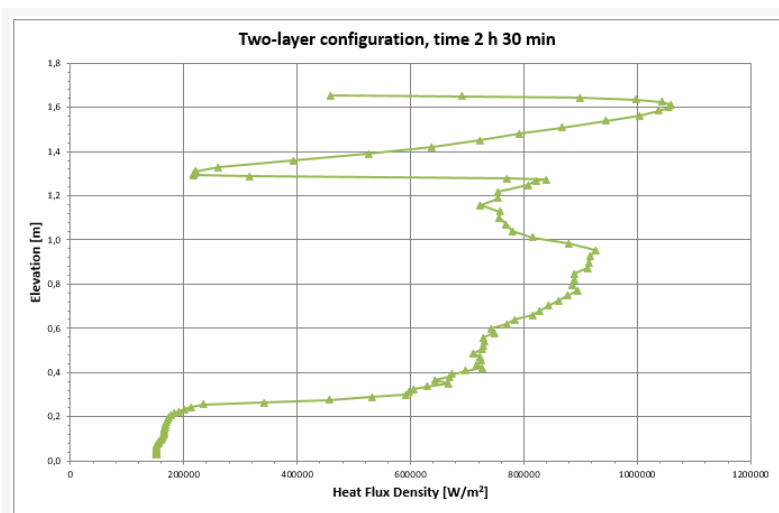
menty s vnějším chlazením kanálu byl prodloužen do konce roku 2019. Nad rámec tohoto projektu chceme v závěrečných experimentech odzkoušet i funkci deflektoru uvnitř chladičího kanálu a provést případnou úpravu chlazeného vnějšího povrchu s cílem zvýšit rezervu do kritického tepelného toku. Na závěr je možné konstatovat rostoucí zájem o výsledky THS-15 experimentů zejména proto, že naše zařízení nejpravděpodobněji simuluje chlazení vnějšího povrchu TNR při těžké havárii a má největší šanci prokázat udržení Coria uvnitř tlakové nádoby.

## Literatura

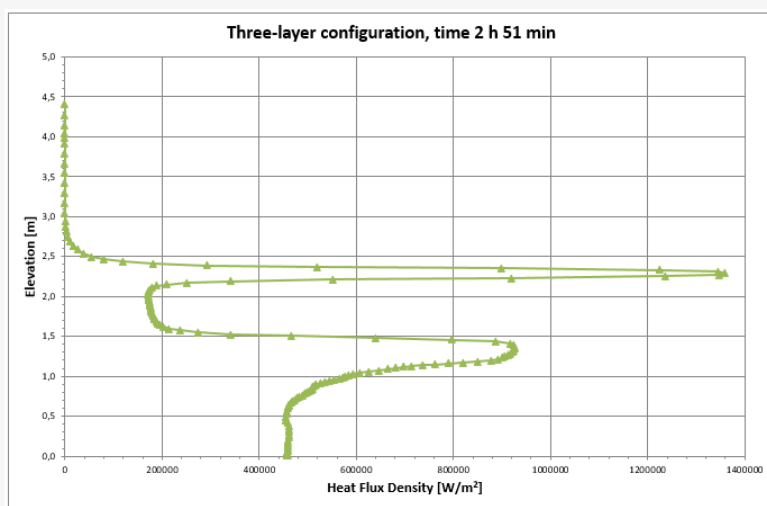
- [1] Benčík, M. (2015): *Analýzy experimentálního zařízení THS-15 a VVER 1000 programem RELAP5-3D*. ÚJV Z 4520.
- [2] Šafaříková, V. (2015): *CFD simulace proudění v experimentálním kanále THS-15*. ÚJV Z 4383 T.
- [3] JRC Technical Reports (2015): *In-Vessel Melt retention (IVMR) Analysis of a VVER-1000 NPP*.
- [4] Second Periodic Activity Report IVMR-Grant Agreement 662157(2017): *In-Vessel Melt retention Severe Accident Management Strategy for Existing and Future NPPs*.
- [5] IVMR ÚJV Řež Team (2018): *THS-15 Measurement Reports and data analysis*.



Obr. 1: Celkové schéma chladičího kanálu THS-15



Obr. 2: Tepelný tok pro dvouvrstvou konfiguraci, kód FLUENT v čase 2 h 30 min



Obr. 3: Tepelný tok pro třívrstvou konfiguraci, kód FLUENT v čase 2 h 51 min

Tabulka 1: Souhrn experimentálních výsledků na THS-15, srpen 2018

Číslo protokolu	Název zkoušeného profilu	Výpočetní kód	Kdo výpočet provedl	Hodnota el. Příkonu (kW)	Požadované maximum tepelného toku (MW/m <sup>2</sup> )	Dosažené maximum tepelného toku (MW/m <sup>2</sup> )	Topný segment Cu s max.HF	Výška maxima HF od dna TNR	Byla krize varu Ano/Ne	Tlak v kondenzátoru (Mpa)	Tlak v chladicím kanále vstup-výstup (Mpa)	Teplota chladicího média na vstupu do kanálu (st C)	Plocha pro odvod páry (cm <sup>2</sup> )	Chladicí medium
1	Early Phase	SOCRAT	KI	193	1,11	1,21	16 1	2	Ne	0,11-0,14	0,21-0,27	30	31,4	demi
2	Early Phase	SOCRAT	KI	193	1,11	1,22	16 1	2	Ne	0,13-0,15	0,16-0,22	30	31,4	demi
3	Fluent 1.1	Fluent	UJV	232	1,02	1,02	14	1,5	Ne	0,11-0,14	0,23-0,3	30	31,4	demi
4	Fluent 1.2	Fluent	UJV	233	1,05	1,05	14	1,5	Ne	0,1-0,11	0,23-0,29	30	31,4	demi
5	Fluent 1.5	Fluent	UJV	299	1,02	1,02	14	1,5	Ne	0,08-0,11	0,15-0,25	30	31,4	demi
6	Late Phase 1.1	SOCRAT	KI	312	0,72	0,72	9,10,11	1-1,3	Ne	0,11-0,13	0,29-0,39	30	31,4	demi
7	Early Phase 1.2	SOCRAT	KI	135	0,79	0,86	16 1	2	Ne	0,9-0,1	0,12-0,2	30	31,4	demi
8	Late Phase 1.2	SOCRAT	KI	316	0,72	0,72	9,10,11	1-1,3	Ne	0,1	0,3-0,36	30	31,4	demi
9	Late Phase 1.5	SOCRAT	KI	402	0,72	0,72	9,10,11	1-1,3	Ne	0,9-0,12	0,38-0,45	30	31,4	demi
10	10310s 1.1	SOCRAT	KI	258	0,94	0,94	12	1,4	Ne	0,08-0,1	0,23-0,32	30	31,4	demi
11	10310s 1.3	SOCRAT	KI	284	1,36	1,36	15	1,7	Ne	0,08-0,09	0,24-0,31	30	31,4	demi
12	10310s 1.2	SOCRAT	KI	353	1,43	1,56	16 1	2	Ne	0,10-0,11	0,28-0,39	30	31,4	demi
13	10310s 1.5	SOCRAT	KI	356	0,94	0,94	12	1,4	Ne	0,09-0,1	0,28-0,36	30	31,4	demi
14	12510 1.5	SOCRAT	KI	398	0,74	0,81	16 1	2	Ne	0,10-0,11	0,37-0,42	30	31,4	demi
15	12510 1.1	SOCRAT	KI	284	0,84	0,81	16 1	2	Ne	0,09-0,1	0,28-0,34	30	31,4	demi
16	12510 1.4	SOCRAT	KI	320	1,97	1,41	16 2	2,4	Ne	0,09-0,1	0,28-0,35	30	31,4	demi
17	12510 1.3	SOCRAT	KI	337	1,97	1,55	15	1,7	Ne	0,10-0,11	0,28-0,35	30	31,4	demi
18	IVS	ASTEC	IVS	236	1,4	1,4	12	1,4	Ne	0,05-0,07	0,15-0,25	30	31,4	demi
19	10310s 2.4	SOCRAT	KI	387	1,48	1,48	16 2	2,4	Ne	0,10-0,25	0,29-0,4	30	31,4	demi
20	10310s 2.5	SOCRAT	KI	387	1,02	1,02	12	1,3	Ne	0,10-0,12	0,31-0,4	30	31,4	demi