

# Kapitola 1

## Termohydraulické systémové kódy

### 1.1 Úvod

Systémové termohydraulické kódy (SYS-TH) tvoří nedílnou součást bezpečnostních analýz. Simulace poskytují informace o příslušných parametrech systému, jako jsou tlak, teplota chladiva nebo průtok v kontrolních objemech a teploty materiálů v modelovaných strukturách, to vše v závislosti na čase. SYS TH kódy jsou obvykle založeny na řešení pěti nebo šesti nehomogenních rovnic zachování hmotnosti, energie a hybnosti, obvykle s použitím implicitních nebo poloimplicitních schémat. Prostřednictvím těchto kódů lze simulovat provoz a chování reaktoru, včetně průběhu havárií, a posoudit tak úroveň bezpečnosti jaderné elektrárny [4, 15].

### 1.2 Oblasti aplikace

Systémové kódy jsou považovány za multifyzikální výpočetní programy schopné simuloval jak základní fyzikální jevy (např. var na stěně trubky), tak i celistvé chování systémů (např. primárního okruhu jaderné elektrárny). Díky tomu je možné pomocí těchto kódů počítat i složité přechodové jevy, které mohou představovat například základní projektové události a nehody na jaderném zařízení. Kromě termohydraulického popisu přenosu hmoty, hybnosti a energie je možné aplikovat SYS-TH kódy na:

- popis transportu plynů ( $N_2$ ,  $H_2$ , vzduch, produkty štěpení...),
- transport bórů a těkavých plynů,
- kondukce skrze materiály s konvekcí do tekutin,
- zjednodušený neutronický popis,
- chemický popis reakcí zinku s vodou,
- popis chování paliva,
- popis chování součástek jaderných elektráren jako rotorů či ventilů,
- popis řídících systémů (Instrumentation & Control).

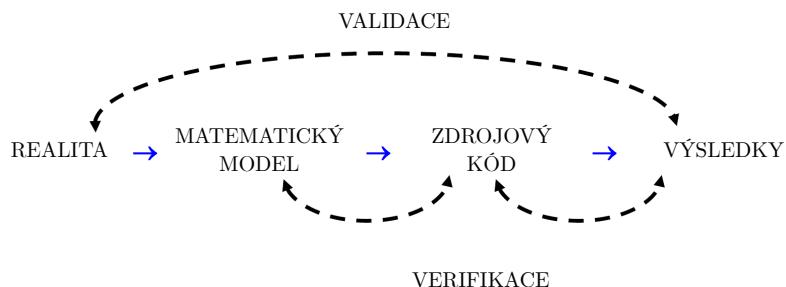
V oblasti jaderného inženýrství se používá řada nejmodernějších termohydraulických kódů. Mezi nejpoužívanější kódy patří RELAP5, TRACE, APROS, POLKA-T, CATHARE, ATHLET a RETRAN. Tyto kódy využívají přístup založený na kontrolních objemech s velkou nodalizací a aplikují nejmodernější termohydraulické modely k popisu fyzikálního chování systému [15].

### 1.3 Hodnocení systémových kódů

Nedílnou součástí vývoje numerických SYS-TH kódů a jejich interního hodnocení je verifikace a validace. Verifikace i validace se týká procesu zvyšování spolehlivosti kódu a snižování rizika nesprávné aplikace. Interní hodnocení kódu obvykle provádí vývojář kódu.

Verifikace kódu se týká zkoumání zdrojového kódu ve vztahu k jeho popisu v dokumentaci. Tento proces zahrnuje postupy související se zajištěním kvality softwaru a úsilí o odhalení a opravu chyb v modelech a numerických algoritmech využívaných k řešení parciálních diferenciálních rovnic [15].

Validace kódu zahrnuje vyhodnocení přesnosti předpovídaných hodnot porovnáním s příslušnými experimentálními údaji. Validace kódu se v podstatě zaměřuje na kvantitativní posouzení přesnosti kódu porovnáním s kvalitními validačními experimenty a benchmarkovými úlohami. Tyto experimenty jsou důkladně zdokumentovány a charakterizovány, včetně pečlivých odhadů statistické chyby měření. Díky validačnímu procesu jsou výsledky kódu konzistentní a prokazují, že celý systém může přinášet smysluplné a očekávané výsledky [15]. Proces interního hodnocení kódu je ilustrován na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Proces interního hodnocení kódu.

Interní hodnocení kódu ovšem nemusí vždy identifikovat nepřesnosti kódu při popisu různých fyzikálních jevů. Součástí neustálého vývoje je také externí hodnocení nezávislými institucemi a uživateli. Nezávislé posouzení kódu je proces, kdy třetí strana kvantifikuje přesnost kódu na základě experimentů provedených v integrálním zkušebním zařízení (ITF). Externí posouzení kódu obvykle vyžaduje kvalifikaci uživatele a vhodně zvolenou nodalizaci kontrolních objemů [15].

### 1.4 Limitace systémových kódů

Většina užívaných systémových kódů má možnost volné nodalizace jednotlivých termohydraulických komponent. K popisu komplexních problémů se využívají definované komponenty, které jsou děleny na jednotlivé kontrolní objemy. Toto dělení je čistě na uživateli, a neexistuje tedy správný postup, jakou nodalizaci komponent a strukturu studované problematiky použít [15].

Problematická se může jevit především výše zmíněná nodalizace. Využitím jemnějšího rozdělení je sice možné docílit podrobnějšího popisu, ovšem při nevhodně zvolené nodalizaci, např. příliš malých kontrolních objemech může docházet k nestabilnímu výpočtu a fyzikálně neodpovídajícím výsledkům. Důvody proč příliš jemná nodalizace může být problematická jsou dva [15]:

- velká část empirických vztahů zahrnutých do programu je získána z výpočtu s pevně danou nodalizací, což již z principu vede k rozdílným podmírkám,

- numerické simulace využívané v systémových kódech využívají uměle vloženou viskozitu za účelem získání stabilních výsledků.

Důležitá je také široká škála parametrů používaných k popisu fyzikálních jevů. Ne zřídka má uživatel možnost volit mezi dvěma a více vstupními parametry, které k popisu dané problematiky slouží. Příkladem může být například volba mezi různými modeley škracení, nucené proudění podchlazené či nasycené kapaliny nebo nastavení ztrátového součinitele v případě trubek či pístů. Při tvorbě komplexního modelu není neobvyklé, že počet vstupních parametrů se pohybuje v řádu tisíců. Z tohoto důvodu je pravděpodobnost lidské chyby vysoce pravděpodobná a je třeba dbát nesmírné pozornosti při konstrukci modelu. Je vhodné také zmínit často diskutované téma volby časového kroku na řešení a způsobu zadávání okrajových podmínek [15].

## 1.5 Aplikace na výzkumné reaktory

Výpočetní kód RELAP5 byl vyvinut jakožto systémový "best-estimate" kód pro popis PIE (postulovalých iniciačních událostí) na konvenčních lehkovodních reaktorech. Množství experimentálně určených vztahů a korelací použitých při vývoji kódu RELAP5 bylo odvozeno a stanoveno právě pro využití na energetických reaktorech, avšak cílem mnohých studií (např. [17, 7, 3]) je aplikace i na výzkumné reaktory [10]. Přestože jsou SYS-TH hojně používány pro bezpečnostní analýzy výzkumných reaktorů, mnohé práce ([1, 14, 6]) upozorňují na nedostatečnou validaci a verifikaci modelů u přechodových jevů a postulovaných iniciačních událostí. Pro většinu výzkumných reaktorů je kromě jiného také důležitý správný popis odvodu tepla dlouhodobou přirozenou konvekcí. Proto je často kladen důraz na zkušenosť uživatele a na „inženýrský odhad“ při konstrukci a volbě vstupních parametrů [4]. Z těchto důvodů jsou tvořeny benchmarkové úlohy prováděné právě na výzkumných reaktorech viz např. [2].

Problém modelování přirozeného proudění se může stát ještě složitějším kvůli přítomnosti dodatečných obtoků a velké redistribuci toku během přechodových jevů. Je na uživateli kódu, aby určil, jak konstruovat takto komplexní proudění v rámci jednorozměrného kódu. K dostatečnému popisu můžou být použity kontrolní objemy, jednoduché a vícenásobné spojovací jednotky či další termohydraulické komponenty. Volba nodalizace a způsobu konstrukce reaktoru by v ideálním případě založena na výsledcích detailních citlivostních analýz. Nicméně v mnoha případech je uživatel nucen učinit ad hoc rozhodnutí kvůli nedostatku času nebo vhodných experimentálních dat [15].