

dc_143_10

MTA Doktori Értekezés tézisei

Nukleáris reaktorok termohidraulikai
problémáinak numerikus modellezése
különböző mérettartományokban

Házi Gábor

Budapest, 2010. december

I. Kitűzött kutatási feladatok rövid összefoglalása

Könnyűvízzel hűtött reaktorok üzemeltetéséhez elengedhetetlen, hogy az erőmű különféle szerkezeti elemeiben, különböző üzemállapotokban, üzemzavari és baleseti helyzetekben kialakuló termohidraulikai folyamatokat kellő részletességgel ismerjük. Ezek az ismeretek teszik lehetővé olyan modellek megalkotását, melyek az erőművek biztonságosságának megítélésében és az erőművet üzemeltető személyzet oktatásában kulcsfontosságú szerepet játszanak.

A 80-as években minden jelentősebb nukleáris potenciállal rendelkező országban intenzív fejlesztések indultak meg olyan kétfázisú (víz és annak gőze) termohidraulikai modellrendszerek létrehozására, melyek lehetővé teszik termohidraulikai folyamatok rendszerszintű modellezését. Ezek a kódrendszerek egy-térdimenziós megmaradási egyenleteket oldanak meg, és alkalmasak egy nyomottvizes erőmű akár teljes primerkörében zajló – normál üzemi, üzemzavari vagy baleseti – folyamatok modellezésére. Napjainkban ezeknek a modellrendszereknek a felhasználásával végzik a nukleáris erőművek biztonsági értékelését, és ezek a rendszerek alkotják az erőművek operátorainak képzésében kulcsszerepet játszó szimulátorok egyik legfontosabb elemét.

A 90-es évek végén a KFKI Atomenergia Kutatóintézetben felmerült annak az igénye, hogy intézetünk rendelkezzen egy saját fejlesztésű rendszerrel, amely kétfázisú termohidraulikai folyamatokat rendszerszinten képes modellezni. Nyilvánvalóvá vált ugyanis, hogy a paksi teljesléptékű szimulátorban akkor már csak egyetlen külföldi fejlesztés eredményeként működő kétfázisú modellrendszer – újabb és újabb igények szerinti – hazai továbbfejlesztése ellehetetlenedik. Kutatásaim egyik alapvető célja tehát egy, a kétfázisú áramlási problémákat rendszerszinten modellezni képes eszköz megtervezése és létrehozása volt.

Mivel egy nukleáris erőműben – a gyakorlat szempontjából is fontos – termohidraulikai folyamatok igen széles paramétertartományban mozoghatnak, nincs könnyű dolguk a rendszerek fejlesztőinek és felhasználóinak. Míg normál üzemi állapotban a reaktorzónában elhelyezkedő üzemanyagkazetták fűtőelempálcái között néhány milliméteres szubcsatornákon keresztül nagy sebességgel áramlik a hűtőközeg, addig a térfogatkompenzátor több köbméteres tartályában nincs jelentős áramlás, viszont intenzív kondenzáció vagy éppen párolgás zajlik. A folyamatokat leíró paramétertartomány tehát igen tág, és napjainkban még lehetetlen olyan egyenszilárdságú modellrendszert alkotni, amely ilyen széles intervallumban képes azonosan nagy pontosságot biztosítani. Ezért a modellezés bizonytalanságait konzervatív számításokkal, vagyis egy adott probléma számításánál olyan peremfeltételek, paraméterek megválasztásával igyekszünk kompenzálni, hogy a kapott eredmények – a biztonság szempontjából – semmiképpen se tükrözlessenek a valóságban bekövetkezőnél kedvezőbb esetet. A konzervatív számításoknak azonban sokszor – szó szerint – ára van, gátolják a gazdaságosabb üzemeltetést. Ennek köszönhető, hogy az elmúlt évtizedben egyre intenzívebb kutatások indultak meg, hogyan lehetne a modelleket pontosabbá tenni.

A kutatások – a kísérletek egyre növekvő költsége és a számítástechnikai eszközök csökkenő ára miatt – egyértelműen a folyamatok finomskálás modellezésére irányultak. Kísérletekkel ellenőrzött finomskálás numerikus modellek ugyanis lehetővé tehetik a folyamatok mélyebb megértését és pontosabb modellek kidolgozását. Továbbá a

numerikus modellek által szolgáltatott eredmények sok esetben olyan részletekbe nyújtanak betekintést, melyet még a legjobban kontrollált kísérlet, a legmodernebb mérés technika alkalmazásával se biztosít napjainkban. Kutatásaim másik alapvető célja tehát az volt, hogy keressek – szükség esetén fejlesszek – egy olyan numerikus módszert, amely alkalmas kétfázisú áramlási problémák finomskálás modellezésére. Alkalmaztam azt az alapvető fizikai folyamatok megismerésére, illetve a megfigyelésekkel támogatott a rendszerszintű modellezést.

II. Elvégzett vizsgálatok

Dolgozatomban két, alapjaiban különböző módszertani megközelítést mutatok be termohidraulikai folyamatok modellezésére. Míg az egyik alkalmas rendszerszintű - pl. nyomottvízes erőművek teljes primerkörében zajló - folyamatok modellezésére, addig a másik megközelítés akár molekuláris szintű modellezést is lehetővé tesz.

Vezetésemmel, egy hároméves projekt keretén belül, megkezdődött egy új, magyar, kétfázisú modellrendszer (RETINA) tervezése, fejlesztése és tesztelése. Bár korábban számos hasonló modellrendszert hoztak már létre a világban, igyekeztem olyan rendszert tervezni és megalkotni, amely sok szempontból szakított elődeivel és lehetőséget biztosított a jövőbeli továbbfejlesztésekre is.

E kutatás egyik legfontosabb eredménye volt, hogy megismerkedhettem azokkal a problémákkal, melyek egy ilyen rendszer fejlesztése során óhatatlanul előjönnek és melyek a rendszereket csak használó szakemberek előtt általában rejtve maradnak. Nyilvánvalóvá vált, hogy a kétfázisú rendszerek modellezésének pontosságát néhány alapvető fizikai jelenség alapos ismerete korlátozza.

A felismert problémák új irányba terelték kutatásaimat. Olyan numerikus módszert kerestem, amely ha hosszabb távon is, de előbb vagy utóbb lehetőséggel kecsegtet arra, hogy segítségével néhány alapvető termohidraulikai folyamatot (turbulens áramlások bizonyos formái, párolgás, kondenzáció stb.) részletesen megismerjünk. A jól ismert tradicionális megközelítések helyett (véges térfogat, végeselem-módszer, szingulárisinterfész-megközelítés stb.) egy akkoriban még csak néhány fizikus által fejlesztett és a gyakorlatban alig alkalmazott módszer keltette fel az érdeklődésemet, ez volt a rács-Boltzmann módszer. Ismerve az akkor előszeretettel használt megközelítések hátrányait, e módszerrel kezdtem foglalkozni, mivel úgy gondoltam, hogy részecskeszemlélete miatt a kétfázisú áramlások területén ez a módszer nagyobb lehetőségeket kínál, mint elődei. Kutatásaim alapvetően kettéágaztak, részben a módszer fejlesztésével, korlátainak felismerésével, részben pedig a módszer alkalmazásával foglalkoztam. Bár elsődleges célom kétfázisú áramlások alaposabb megismerése volt, nyilvánvaló, hogy ehhez olyan módszerre volt szükség, amely egyfázisú problémák megoldása esetén is megállja a helyét. A nukleáris gyakorlatban előforduló termohidraulikai problémák vizsgálatánál ugyanis nemcsak a két fázis jelenlétével kell megküzdeni, hanem azzal a ténnyel is, hogy az áramlás turbulens, amely tény már önmagában igencsak megnehezíti a modellezést.

Vizsgálataim fókuszában így sok esetben nem kétfázisú áramlási probléma állt, hanem olyan egyfázisú probléma, amelynek megoldása más numerikus módszerekkel is lehetséges. Ugyanakkor ez esetekben is sikerült néhányszor kimutatni, hogy a módszer részecsketermészete olyan részletekbe enged betekintést, melyek makroszkopikus megközelítések esetén rejtve maradnak.

A kutatás időtartama alatt megindult a negyedik generációs nukleáris erőművek tervezése, ami további lehetőségeket kínált a módszer alkalmazására. Így kutatásaimban kitértem annak vizsgálatára, vajon a rács-Boltzmann módszer alkalmassá tehető-e szuperkritikus nyomású közegek hőátadási problémáinak modellezésére.

Összefoglalva tehát, hat területet emelnék ki az elvégzett vizsgálatokból:

1. Kétfázisú áramlások rendszerszintű modellezésére alkalmas rendszer tervezése, fejlesztése és tesztelése.
2. A rács-Boltzmann módszer elméleti alapjainak vizsgálata és a módszer fejlesztése egyfázisú áramlások pontos modellezésére.
3. A rács-Boltzmann módszer alkalmazása különböző egyfázisú áramlási problémák vizsgálatára.
4. A rács-Boltzmann módszer kiterjesztése kétfázisú áramlási problémák megoldására.
5. A kiterjesztett rács-Boltzmann módszer alkalmazása különböző kétfázisú áramlási problémák vizsgálatára.
6. A rács-Boltzmann módszer kiterjesztése szuperkritikus nyomású közegek hőátadási problémáinak vizsgálatára.

III. A tudományos eredmények rövid összefoglalása

1. Tézis Kétfázisú áramlások rendszerszintű modellezésére alkalmas rendszer tervezése és megépítése

Egy új, kétfázisú áramlások modellezésére alkalmas rendszert terveztem és fejlesztettem. Numerikus és szeparált effektus tesztek segítségével bizonyítottam a rendszer alkalmazhatóságát. Irányítottam azokat a munkákat, melyek révén az általam tervezett és fejlesztett rendszer a paksi teljesléptékű szimulátorba került beépítésre. Vezetéssel sor került a modellrendszer teljes körű tesztelésére, a modellek paramétereinek beállítására és a modellrendszer kiterjesztésére különleges üzemállapotokra.

A tervezett modellrendszer több szempontból is előrelépést jelent más hasonló rendszerekhez viszonyítva [1-4]:

- a. A diszkretizált megmaradásegyenletek megoldására teljesen implicit megoldó módszert alkalmaztam Newton-Raphson iterációval, felhasználva a particionált inverz formulát a probléma Jacobi mátrixának invertálására. Így a particionált rendszermátrix egyes ún. hurokmátrixainak invertálásához ki tudtam használni e mátrixok speciális struktúráját, és ritka mátrix megoldó módszert alkalmazhattam invertálásukra. Ennek a módszernek az alkalmazása teszi lehetővé a rendszer valós idejű alkalmazását, továbbá mivel a hurokmátrixok párhuzamosan invertálhatók, a rendszer párhuzamos számítógép-architektúrán is működik.
- b. Az egyenletrendszer Jacobi mátrixának meghatározásához automatikus deriválási algoritmusokat dolgoztam ki és alkalmaztam. Így az egyes modellek átláthatóak, könnyedén módosíthatók, nincs szükség a Jacobi mátrix numerikus vagy *a priori* analitikus meghatározására.
- c. Paraméterek és modellek egy teljes halmazát állítottam össze a paksi erőmű primer körének és a szekunderkör egy részének a modellezéséhez. Ezekkel a paraméterekkel és modellekkel elértem, hogy névleges üzemi állapotban a fő rendszerparaméterek mindegyike (pl. primer hűtőkörök forgalma, melegági hőmérséklete, nyomásesés a reaktorzónán, térfogatkompenzátor nyomása, szintje, gőzfejlesztőkben gőznyomás, forgalom, gőzkollektorok nyomása stb.) 2%-on (legtöbbje 1%-on) belüli pontossággal adja vissza a mért értékeket. Az operátorok oktatása szempontjából fontos üzemzavari tranziensek esetén sikerült elérni, hogy a számítások – ismert esetekben (pl. turbinák le- és felterhelése, teherledobás, főkeringtető szivattyú kiesés, turbinakiesés stb.) – a paksi instruktorok tapasztalatainak megfelelő módon alakuljanak. Sikerült a tapasztalatoknak megfelelő reaktorindítási, lehűtési és felfűtési dinamikát reprodukálni. Baleseti szituációk (pl. csőtöréses balesetek stb.) esetén sikerült megmutatni, hogy az általam fejlesztett modellrendszer a korábbi független számítások eredményeivel összhangban van. Összességében több mint ötven rendszerszintű teszt bizonyítja a modellrendszer alkalmazhatóságát [5,6].

2. Tézis A rács-Boltzmann módszer elméleti háttérének megalapozása műszaki feladatok megoldásához

Lamináris és turbulens áramlási problémákat analitikusan vizsgálva alátámasztottam, hogy a rács-Boltzmann módszer alkalmas a Navier-Stokes egyenletek numerikus megoldására. A fellépő numerikus hibákat azonosítottam és megmutattam, hogy melyek azok a kompenzációs módszerek, melyek segítségével a hibák kontrollálhatók, megalapozva így a módszer műszaki alkalmazását.

- a. Elméleti eredmények alapján a rács-Boltzmann módszer térszerinti diszkretizációja másodrendű pontosságot mutat. Peremfeltételek pl. csúszásmentes fallal határolt probléma esetén a falperemek modellezése azonban ronthatja a módszer konvergenciáját. Amennyiben például a fal modellje csak elsőrendű pontosságot ad, úgy az elsőrendűre degradálhatja a teljes probléma megoldását. A Jeffery-Hamel problémát (divergáló falak közötti lamináris áramlás) vizsgálva rámutattam, hogy a módszer másodrendű térszerinti pontossága nem mérhető, aminek oka a falak és a rácsvektorok kedvezőtlen orientációja vagy a falperemekenél alkalmazott modell lehet. Analitikus számításokkal kimutattam, hogy a rács-Boltzmann módszer számábrázolási pontosságig képes meghatározni Poiseuille és Couette áramlás esetén a sebességprofil, amennyiben a rácsvektorok és a falak orientációja kedvező, és a peremfeltételeket megfelelő módon valósítják meg. Ugyanakkor azt találtam, hogy kedvezőtlen rácsorientáció esetén is másodrendű pontosságú a módszer, tehát a korábban a Jeffery-Hamel probléma esetén mért elsőrendű pontosság egyértelműen a peremfeltételek modellezésének a következménye. Megmutattam, hogy az általam javasolt analitikus módszert hogyan lehet felhasználni peremfeltételek megvalósítására alkalmas modellek pontosságának *a priori* tesztelésére [7-9].
- b. Analitikus és numerikus számításokkal kimutattam, hogy azok közül a módszerek közül, amelyeket korábban a módszer kompresszibilitási hibájának kiküszöbölésére dolgoztak ki, valójában nem mindegyik alkalmas a kompresszibilitási hiba megszüntetésére [10-11].
- c. Analitikus számításokkal kimutattam, hogy homogén, izotróp turbulencia modellezése esetén milyen jellegű torzítás várható a kétpontos sebesség korrelációs függvényekben. Így bizonyítottam, hogy még direkt numerikus szimulációk esetén is fontos a rácsfinomítás és a rácsfüggetlen eredmény demonstrálása, amennyiben turbulens áramlások magasabbrendű statisztikáit vizsgáljuk [12].

3. Tézis Turbulens áramlások vizsgálata a rács-Boltzmann módszerrel

A rács-Boltzmann módszeren alapuló, turbulens áramlások modellezésére alkalmas modelleket építettem. Ezek segítségével örvények kölcsönhatását, kétdimenziós lecsengő turbulenciát és szubcsatornák közötti keveredési folyamatokat vizsgáltam.

Eredményeim összevetése mérésekkel és más numerikus számításokkal igazolták a modellek alkalmazhatóságát, és lehetőséget adtak számos újabb következtetés levonására.

- a. Kétdimenziós lecsengő turbulenciát vizsgálva végtelen kiterjedésű (periodikus) tartományban, megállapítottam, hogy a kinetikus energia spektruma hatványfüggvénnyel jól leírható a bomlás hosszabb szakaszában és a spektrum meredeksége az elméleti értéknél meredekebb más numerikus számításokhoz hasonlóan [13]. Először közöltem eredményeket a kétdimenziós energiaspektrumról fallal határolt esetben [14]. Megmutattam, hogy a spektrum itt is hatványfüggvényt követ, valamint, hogy annak értéke nagyobb, mint az elméleti érték. Sikerült továbbá kimutatni, hogy a bomlás hosszú átmeneti időintervallumában az általam bevezetett regionális enstrópia univerzális - a háromdimenziós áramlásoknál jól ismert - jelleget mutat. Vizsgálataimban ún. árnyékolt Gauss örvényeket használtam, és megfigyeltem ezek összeolvadását. Korábban ezekről az örvényekről azt gondolták, hogy összeolvadásukat a külső örvénygyűrű megakadályozza. Paraméterterképét készítettem, megmutatva, mely tartományban várható ezeknek az örvényeknek az összeolvadása, dipólus-, illetve tripóluskialakulás [15]. Árnyékolt Gauss örvények speciális perturbációival megmutattam, hogy a viszkózus tartományban is lehetséges – kísérletekben is megfigyelt – összetett örvénystruktúrákat létrehozni [16].
- b. Az egyszerű turbulens áramlásokat megalapozó számítások mellett, irányításommal elsőként végezték el csökötegek szubcsatornáiban zajló áramlás direkt numerikus és nagy örvény szimulációját [17,18]. Ezeket a számításokat elsősorban az motiválta, hogy a paksi erőműben fűtőelemmodernizálási program indult, melynek kapcsán minél többet szerettünk volna megtudni, VVER-400 atomreaktorok üzemanyagkötegeiben zajló keveredésről. Felhívtam a figyelmet arra, hogy CFD (Computational Fluid Dynamics) számításokban a turbulencia modell választását meg kell alapozni, és a konkrét esetben, csökötegekben, a Reynolds-feszültség transzport modellt célszerű alkalmazni [19].

4. Tézis A rács-Boltzmann módszer kétfázisú kiterjesztésének megalapozása műszaki alkalmazásokhoz

Létrehoztam egy, a rács-Boltzmann módszer pszeudopotenciál kiterjesztésén alapuló, kétfázisú áramlások vizsgálatára alkalmas modellt. Igazoltam annak termodinamikai konzisztenciáját és numerikus kísérletekkel bizonyítottam annak alkalmazhatóságát fázisátalakulással járó problémák vizsgálatára.

- a. Ismertettem a rács-Boltzmann módszer lehetséges kiterjesztéseit kétfázisú áramlások modellezésére, továbbá felhívtam a figyelmet az egyes kiterjesztések problémáira [20]. Rámutattam, hogy e módszer alkalmazása esetén a korábbi számítások egy ponton szükségtelenül szűkítették a termodinamikailag konzisztens potenciálfüggvények körét, és megadtam azt a függvényalakot, mellyel a kiterjesztés termodinamikailag konzisztenssé válik

- [21]. A potenciál-gradiens meghatározására egy olyan módszert javasoltunk, amely a korábban alkalmazott módszerekhez képest numerikusan stabilabb [22].
- b. Az alapmodellt továbbfejlesztettem, lehetővé téve, hogy azt heterogén forrás vizsgálatára használhassam. Annak érdekében, hogy a falak nedvesítésének hatását is vizsgálni tudjam, a modellt kiterjesztettem a falak és a folyadék közötti molekuláris erők számításával. Numerikus számítások sorozatával meghatároztam a falnedvesítés és molekuláris erők közötti kapcsolatot [21].

5. Tézis A rács-Boltzmann módszer alkalmazása kétfázisú áramlási problémák vizsgálatára

Először határoztam meg numerikus buborékdinamikai vizsgálatokkal a buborékokra ható súrlódási és virtuális tömeg erőt szubcsatornában. Megállapítottam, hogy az általam vizsgált paramétertartományban a súrlódási erőt nem befolyásolja jelentősen a szubcsatorna falainak jelenléte, ugyanakkor a buborékok virtuális tömege jelentősen megnő. Továbbá kimutattam, hogy a buborékok kölcsönhatása egy Richardson-Zaki típusú korrelációval írható le [24]. A korábbi numerikus vizsgálatoknál összetettebb modellt készítettem heterogén forrás modellezésére. E modell segítségével a forrás hatására falról leváló buborékok átmérőjét és leválási frekvenciáját vizsgáltam. Megállapítottam, hogy sík fal esetén e két paraméter, a Zuber által felírt erőegyensúly alapján korrelál a gravitációval, ugyanakkor a falak nedvesítése nem hat a leváló buborékok átmérőjére, de befolyásolja a leválási frekvenciát [25].

6. Tézis Rács-Boltzmann módszer alapú modell fejlesztése és alkalmazása szuperkritikus nyomású közegek vizsgálatára

Érzékenységvizsgálattal kimutattam, hogy a pszeudokritikus hőmérséklet környékén a termofizikai paraméterek hőmérséklet- és nyomásfüggése azonos nagyságrendű lehet, így nem indokolt a korábbi gyakorlat, mely csak a hőmérsékletfüggést veszi figyelembe [26].

A rács-Boltzmann egyenleten alapuló módszert fejlesztettem szuperkritikus nyomású közegekben zajló hőtranszfer modellezésére. Felvettem, hogy szuperkritikus nyomású közegek esetén a hőátadást befolyásolhatja a pszeudokritikus hőmérséklet környékén jelentőssé váló és – az ipari gyakorlatban – az energiaegyenletben e problémák vizsgálata során mindig elhanyagolt, kompresszibilitásból származó munka. Modellemben figyelembe vettem e munka hatását, és megmutattam, hogy a piston effektusból származó munka milyen hatással lehet a hőátadásra. Rámutattam, hogy a kompresszibilitásból származó munka okozhatja a szuperkritikus nyomású ipari rendszerekben gyakran megfigyelt nyomáslengéseket, az ún. termoakusztikus oszcillációt [27].

IV. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSULÁSA

A kétfázisú áramlások rendszerszintű modellezésével kapcsolatban fejlesztésem közvetlenül hasznosult, hiszen az általam fejlesztett modellrendszer alkotja ma a paksi erőmű teljesléptékű szimulátorának – melyen két műszakban zajlik az operátorok oktatása – az egyik legfontosabb modulját. Továbbá megkezdődött a rendszer a beépítése a paksi zónamonitorozó rendszer szakértői változatába, így az a fűtőelem-modernizációs tervek megvalósításának egyik kulcs eleme lesz.

A rács-Boltzmann módszer elméletével kapcsolatos vizsgálataim közvetve hasznosultak. E munkák minket és másokat is arra motiváltak, hogy a felismert problémák kiküszöbölésére alkalmas módszereket dolgozzanak ki. Az így továbbfejlesztett módszer gyakorlati alkalmazási köre jelentősen bővült, és lehetővé vált, hogy a későbbiek során a módszert különböző turbulens áramlások vizsgálatára használhassam.

A turbulens áramlásokkal kapcsolatos eredmények szintén közvetve hasznosultak, mivel a paksi fűtőelemmodernizálási program egyik sarkalatos pontja volt, hogy a fűtőelemkazettákban zajló keveredést jobban megismerjük. Vizsgálataim hatására nemcsak hazánkban, de a világ számos országában kezdték el alkalmazni a Reynolds-feszültség transzport modellt a fűtőelemkeveredési számításokban, és a nagy örvény szimulációs technikát a csőkötegekben zajló keveredés vizsgálatára. A NURESIM Európai Unió projekt keretein belül fejlesztett NEPTUNE CFD kódba, elsősorban eredményeim hatására és javaslatomra került beépítésre a Reynolds-feszültség transzport modell. Egy nemrégiben megjelent nemzetközi áttekintő cikkben, többek között az általunk végzett munkára hivatkozva állapítja meg a szerző, hogy csőkötegek áramlási problémáinak megismerése csak direkt numerikus vagy nagy örvény szimulációs technikák segítségével, illetve nem-állandósult állapotbeli Reynolds átlagolt egyenletek megoldásával és anizotróp turbulencia modell alkalmazásával lehetséges. Szintén munkám közvetlen hasznosulásának tartom, hogy a nukleáris ipar területén hazánkban is megindult a CFD számítások kísérleti megalapozása. Intézetünkben, az országban először, bevezetésre került a PIV (Particle Image Velocimetry) mérés technika alkalmazása, melyet azóta számos validációs számítás megalapozására használtak fel.

A kétfázisú rács-Boltzmann modellek fejlesztése kapcsán elért eredményeim több szempontból hasznosultak. A téma kapcsán megjelent áttekintő dolgozatomban felsorolt problémák többségére például sikerült nekünk vagy másoknak – sok esetben e munkára hivatkozva – megoldást találni. Ezek a fejlesztések részben megalapozták későbbi munkánkat, részben lökést adtak a módszer szélesebb körű alkalmazásának és fejlesztésének.

A kétfázisú áramlási problémák vizsgálatára irányuló munkáim szintén közvetve hasznosultak, mivel az itt felsorolt vizsgálatok egy nemzetközi együttműködés részei, a NURESIM és (később NURISP) – Európai Unió által támogatott - projekt részfeladatai. A projekt alapvető célja olyan szimulációs eszközök létrehozása, melyek lehetővé teszik nukleáris erőművekben zajló folyamatok korábbinál sokkal részletesebb modellezését. A termohidraulikai kutatások oldalán ez egy kifejezetten kétfázisú áramlásokat pontosan modellező CFD kód létrehozását jelenti. A kódban felhasználandó modellek megalapozására szolgálnak az általam vezetett finomskálás vizsgálatok [28], melyek elvégzésére a projekt folytatásában (NURENEXT) külön munkacsoport alakult.

A dolgozat témaköréből készített publikációk

- [1] Házi G., Mayer G., Farkas I., Makovi P., El-Kafas A. A., Simulation of a Small Loss of Coolant Accident by Using RETINA V1.0D Code, Annals of Nuclear Energy, ANNALS OF NUCLEAR ENERGY, (IF=0,358), **28**(16) 1583-1594 (2001)
- [2] Farkas I., Házi G., Mayer G., Keresztúri A., Hegyi Gy., Panka I., First experience with a six-loop nodalization of a VVER-440 using a new coupled neutronic-thermohydraulics system KIKO3D-RETINA V1.1D, ANNALS OF NUCLEAR ENERGY, (IF=0,475), **29**(18) 2235-2242 (2002)
- [3] Házi G., Mayer G., Farkas I., A RETINA V1.0D kétfázisú áramlásokat modellező programrendszer, MAGYAR ENERGETIKA, **1**, 37-40 (2001)
- [4] Farkas I., Házi G., Mayer G., Seregi L., Keresztúri A., Hegyi Gy., Panka I., Első tapasztalatok a KIKO3D-RETINA neutronkinetikai-temohidraulikai rendszerrel, MAGYAR ENERGETIKA, **10**, 32 (2002)
- [5] Házi G., Páles J., Végh E., Jánosy J.S., Upgrading the two-phase thermohydraulic model for the full scope simulator of Paks nuclear power plant, (ed.) In: 9th European Conference on Modeling and Simulation., Spanyolország, Madrid, 2009.06, (2009)
- [6] Házi G., Páles J., Jánosy J.S., Végh E. A paksi teljesléptékű szimulátor kétfázisú modelljének lecserélése, NUKLEON, Május, (2010)
- [7] Házi G., Steady-state analytical solutions for the lattice Boltzmann equation, CENTRAL EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS, (IF2004=0,375), **2**, 453-462, (2003)
- [8] Házi G., Accuracy of the lattice Boltzmann method based on analytical solutions, PHYSICAL REVIEW E, (IF=2,202), **67**, 056705 (2003)
- [9] Házi G., Farkas I., The Jeffery-Hamel problem: A numerical lattice Boltzmann study, INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS B, (IF=0,75) **17**, 139, (2003)
- [10] Házi G., Kávrán P., On the cubic velocity deviations in lattice Boltzmann methods JOURNAL OF PHYSICS A-MATH GEN, (IF=1,504), **39**, 3127-3136, (2006)
- [11] Házi G., Jiménez C., Simulation of two-dimensional decaying turbulence using the "incompressible" extensions of the lattice Boltzmann method, COMPUTERS AND FLUIDS, (IF=1,468), **35**(3), 280, (2006)
- [12] Házi G., Bias in the numerical simulation of isotropic turbulence using the lattice Boltzmann method, PHYSICAL REVIEW E, (IF=2,418), **71**, 036705, (2005)
- [13] Házi G., Mesoscopic spectra in two-dimensional decaying turbulence, INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS C, (IF=0,92), **17**(4), 531-543, (2006)
- [14] Házi G., Tóth G., Lattice Boltzmann simulation of two-dimensional wall bounded turbulent flow, INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS C, (IF2009=1,022), **21**(5), 669-680, (2010)
- [15] Tóth G., Házi G., Merging of shielded Gaussian vortices and formation of a tripole at low Reynolds numbers, PHYSICS OF FLUIDS, (IF2009=1,638), **22**, 053101, (2010)
- [16] Házi G., Tóth G., Lattice BGK simulation of multipolar vortex formation, ADVANCES IN APPLIED MATHEMATICS AND MECHANICS, **2**(5), 533-544, (2010)
- [17] Mayer G., Házi G., Direct numerical and large-eddy simulation of longitudinal flow along triangular array of rods using the lattice Boltzmann method, MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION, (IF=0,534), **72**, 173, (2006)
- [18] Mayer G., Páles J., Házi G., Large eddy simulation of subchannels using the lattice Boltzmann method, ANNALS OF NUCLEAR ENERGY **34**, 140 (2007)
- [19] Házi G., On the turbulence models for rod bundle flow computations, ANNALS OF NUCLEAR ENERGY, (IF=0,62), **32**, 755, (2005)
- [20] Házi G., Imre A., Mayer G., Farkas I., Lattice-Boltzmann Methods for Two-Phase Flow Modeling, ANNALS OF NUCLEAR ENERGY, (IF=0,475), **29**(12), 1421-1453, (2002)
- [21] Házi G., Márkus A., Lattice Boltzmann simulation of boiling in subchannels, In: 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. Egyesült Államok 2007.09.30.-2007.10.04.: (2007).
- [22] Márkus A., Házi G., Determination of the pseudopotential gradient in multiphase lattice Boltzmann model, PHYSICS OF FLUIDS, (IF=1,738), **20**, 022101, (2008)

- [23] Házi G., Mayer G., Márkus A., Drag force acting on bubbles in a subchannel of triangular array of rods, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER, (IF=1,947), **52**, 1481-1487, (2009)
- [24] Házi G., Márkus A., On the Bubble Departure Diameter and Release Frequency Based on Numerical Simulation Results, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER, (IF=1,947), **52**, 1472-1480, (2009)
- [25] Házi G., Márkus A., Modeling heat transfer in supercritical fluid using the lattice Boltzmann method, PHYSICAL REVIEW E, (IF=2,508), **77**, 026305 (2008)
- [26] Házi G., Farkas I., On the Pressure Dependency of Physical Parameters in Case of Heat Transfer Problems of Supercritical Water, JOURNAL OF ENGINEERING FOR GAS TURBINES AND POWER, (IF=0,635), **131**, 012904 (2009)
- [27] Bestion D., Anglart H., Caraghiaur D., Peturaud P., Smith B. Andreani M. Niceno B., Krepper E., Lucas D., Moretti F., Galassi M. C., Macek J., Vyskocil L., Koncar B., Hazi G., Review of Available Data for Validation of NURESIM Two-Phase CFD Software Applied to CHF Investigations, SCIENCE AND TECHNOLOGY OF NUCLEAR INSTALLATIONS, Article ID=214512, (2009)