

MELCOR súlyos baleseti elemző kód validálása gázhűtésű gyorsreaktorra

Lovász Líviusz¹, Horváth L. Gábor², Lajtha Gábor², Boros Ildikó¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet

1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9. tel.: +36 1 463 4339

²NUBIKI Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet Kft.

1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33, tel.: +36 1 392 2222

Az ALLEGRO projekt keretein belül a tervek szerint a közeljövőben megépülhet a negyedik generációs atomerőművekhez tartozó gázhűtésű gyorsreaktor demonstrációs reaktora. Természetesen ezen új típusú reaktoroknak is meg kell felelniük a különböző biztonsági előírásoknak, a biztonsági rendszerek megtervezéséhez pedig ismerni kell a lehetséges baleseti, súlyos baleseti folyamatokat. A hagyományos atomerőműveknél használt súlyos baleseti elemző kódok azonban vízűtésre lettek megalkotva, így külön vizsgálat nélkül nem alkalmazhatók gázhűtés esetén. A cikkben a MELCOR súlyos baleseti elemző kód tisztán gáz közegben történő alkalmazhatósága kerül bemutatásra. A kód ellenőrzése a HEFUS, héliummal hűtött és elektromosan fűtött kísérleti berendezésen végzett stacioner és tranziens kísérletek alapján történt.

Bevezetés

A negyedik generációs atomerőművekben rejlő potenciálról már hosszú évek óta lehet hallani. Kifejlesztésükkel és elterjedésükkel javítható lenne számos atomerőművi paraméter (hatásfok, urán üzemanyag kihasználtság), és használatuk ezeken túl egyéb előnyökkel is járna. A magasabb üzemi hőmérséklet lehetővé teszi az elvont hő ipari célra való felhasználását, megnyílna az út a nagymértékű, környezetbarát hidrogéntermelés előtt, így a nukleáris energia békés célú felhasználásának piaca is bővülne. A hagyományos, vízűtésű és moderálású atomerőművektől eltérő reaktorfizikai paraméterek lehetővé teszik újabb hasadóanyagok termelését is, ezzel nagyságrenddel megnövelve a Föld potenciális hasadóanyag-készletét. A radioaktív hulladékkezelés szempontjából fontos a hosszú felezésű izotópok kiégetésének lehetősége.

A negyedik generációs atomerőművek elterjedéséig még számos kutató és fejlesztő munka van hátra. Ezen munkáknak lendületet adva írták alá 2010-ben magyar, cseh és szlovák kutatóintézetek az ALLEGRO projekt együttműködési szándéknyilatkozatát [1], melyben azt tűzték ki célul, hogy létrehoznak egy 75 MW hőteljesítményű, gázhűtésű demonstrációs gyorsreaktort.

Természetesen a kísérleti reaktornak is meg kell felelnie a biztonsági előírásoknak, így a biztonsági elemzéseket erre a reaktorra is el kell végezni. A vízűtésű reaktorokra kifejlesztett, azoknál használt apparátus, modellek, szimulációs kódok azonban nem feltétlen adnak helyes eredményeket nem vízűtésű reaktorok esetén, így első lépésként az alkalmazni kívánt elemzési módok használhatóságát kell megvizsgálni.

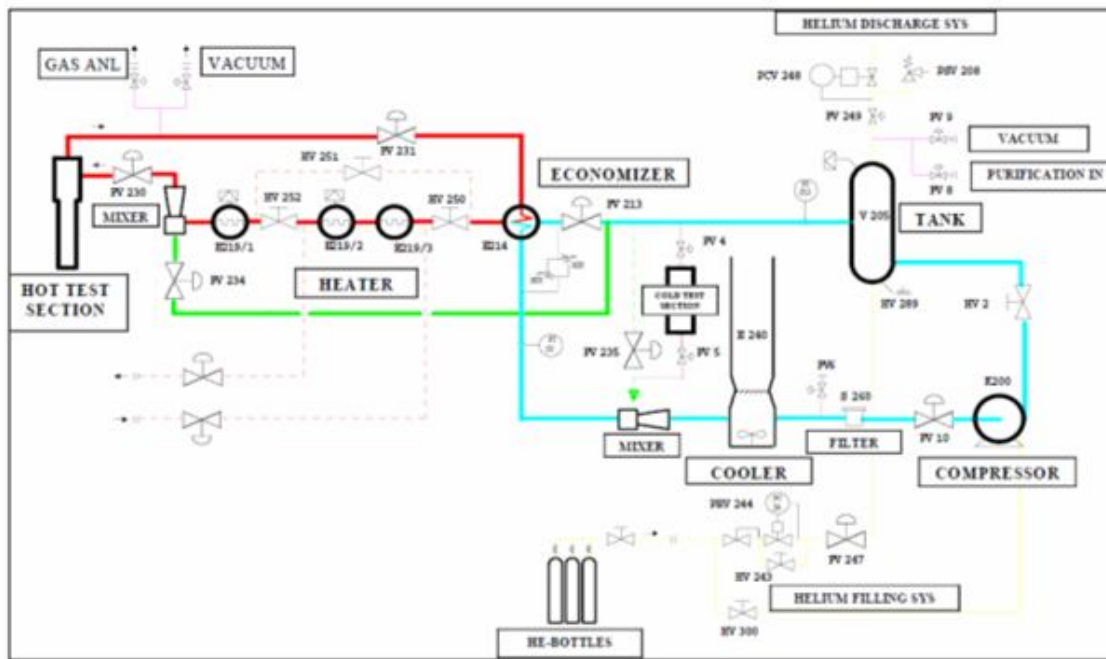
A cikk bemutatja az ALLEGRO projektben használni kívánt MELCOR súlyos baleseti elemző kód alkalmazhatóságát

gázhűtésű gyorsreaktorok esetében. A MELCOR kódot könnyűvízes reaktorok súlyos baleseti folyamatainak elemzésére fejlesztette ki az amerikai Sandia National Laboratories [2]. A kód alkalmazhatóságának vizsgálata az olaszországi HEFUS kísérleti berendezésen elvégzett stacioner és tranziens kísérletek mérési eredményeinek felhasználásával történt.

A HEFUS kísérleti berendezés

A HEFUS kísérleti berendezés [3] az olaszországi Brasimoneban, az ENEA kutatóközpontjában létesült a 90-es évek közepén, a nagyon magas hőmérsékletű negyedik generációs reaktorok paramétereinek és az e reaktorokban használni kívánt berendezések tesztelése céljából. Emellett a kísérletek eredményeit különböző rendszerkódok validálására is használták. A mérési eredmények felhasználásával a cseh UJV Řez és a magyar NUBIKI közösen kezdeményezte az eredetileg vízűtésű reaktorokra kifejlesztett súlyos baleseti kódok validálását. A benchmark keretében 2014. január végéig kellett elvégezni az összehasonlító elemzéseket a MELCOR súlyos baleseti kóddal.

A HEFUS kísérletben állandósult állapotú és tranziens méréseket is végeztek, melyek közül egy állandósult és egy tranziens folyamatot vizsgáltunk a MELCOR kóddal. Ezeket mutatjuk be e cikkben. A berendezés hűtőközege hélium, működését és a fontosabb berendezéseket az 1. ábra mutatja. A hélium hűtőközeg által bejárt út az FV 230-as szelepnél kezdve: a szelep után a hélium bejut a tesztszakaszban (Test Section, TS) nevezett térrészbe, amelyben elektromosan fűtött pálcák felmelegítik a gázt. A felmelegített gáz innen kilépve egy gáz-gáz hőcserélőbe (Economizer) jut, ahol előmelegíti a TS-be áramló héliumot. A lehűlt gáz maradék hőjét a Coolernek nevezett, levegővel hűtött hűtőfelületen leadja, majd a kompresszor megnöveli a nyomását.



1. ábra: A HEFUS sémaképe

A komprimált gáz egy nagy térfogatú tartályba áramlik, hogy az áramlási egyenetlenségek kisimuljanak. Onnan a gáz bejut a gáz-gáz hőcserélő szekunder oldalára, ahol lehűtve a primer oldali gázt, felmelegszik. A felmelegített hélium három darab elektromos előmelegítőn (Electrical Heater) áttutva ismét a TS-be kerül és kezdődik a körfolyamat előlről. A zölddel jelölt vezeték egy by-pass vezeték, amely az elemzett állandósult állapotú kísérlet során zárva volt, a tranziens kísérlet során a by-pass vezeték segítségével tartották állandó hőmérsékleten a TS belépő hőmérsékletét. Az ábrán látható egyéb szerkezetek, szelepek, keverők és segédberendezések a rendszer héliummal történő feltöltéséért, leürítéséért, nyomástartásáért és a mérésekért felelősek. Elkészítettük a fenti kísérleti hurok MELCOR modelljét és alkalmaztuk egy stacioner és tranziens kísérlet szimulációjára.

MELCOR 1.8.6 súlyos baleseti kód

A MELCOR 1.8.6 kódot [4] a Sandia National Laboratories fejlesztette ki vízű atomreaktorok baleseti folyamatainak vizsgálatához. A kód a súlyos baleseti szakaszban figyelembe veszi:

- a termohidraulikai folyamatokat;
- a zóna felmelegedését, degradálódását;
- a keletkező radionuklidokat és azok terjedését;
- a zónaolvadék és beton reakcióját;
- a hidrogén keletkezését, terjedését, égését;
- a biztonságvédelmi rendszerek működését.

A MELCOR kód moduláris felépítésű, azaz a kód több csomagból épül fel, minden egyes csomag a hozzá tartozó folyamatokat számolja. A kód úgynevezett „lumped” paraméter kód, ami azt jelenti, hogy egy definiált térrészben (volume) homogén anyag tulajdonságokkal számol (egy hőmérsékletet, egy nyomást vesz figyelembe) amit a tömeg és energiamérleg alapján határoz meg. A térrészekhez hőszerkezetek és áramlási útvonalak kapcsolódnak.

A HEFUS kísérleti berendezés MELCOR modellje

A modellépítés első lépéseként a kísérletben szereplő rendszer geometriai adatai alapján létrehoztuk a berendezés nodalizációját, majd a vizsgálni kívánt HEFUS kísérlethez igazítva beállítottuk a kezdeti feltételeket.

A HEFUS kísérleti berendezésben a tesztszakasznak, valamint a hélium-hélium hőcserélőnek kitüntetett szerepe van, ezért azok modelljének a felépítése részletesebb ismertetésre szorul.

Hélium-hélium hőcserélő (Economizer)

A HEFUS berendezés geometriailag legösszetettebb része a 2. ábrán látható hélium-hélium hőcserélő volt. Az Economizer modellezése alkalmas arra, hogy a héliummal töltött hőcserélő szimulációját ellenőrizni tudjuk. A hőcserélő bonyolult geometriája lehetővé teszi különböző hőtáadási formák tanulmányozását.

A hőcserélő primer oldalán a forró gáz felül belép a függőleges egyenes hőtáadó csövekbe, majd alul távozik a hőcserélőből. A csöveken keresztül a primer gáz leadja a hőt a köpenytérben áramló héliumnak. A hőcserélő szekunder oldalán alul lép be a hideg hélium és a függőleges csövek körül áramolva felmelegszik, míg a hőcserélő tetején el nem hagyja a berendezést. A hőtáadás javítása érdekében a köpenytérbe terelőlapokat helyeztek el, amelyek folyamatos irányváltásra kényszerítik a szekunder oldalon áramló héliumot.

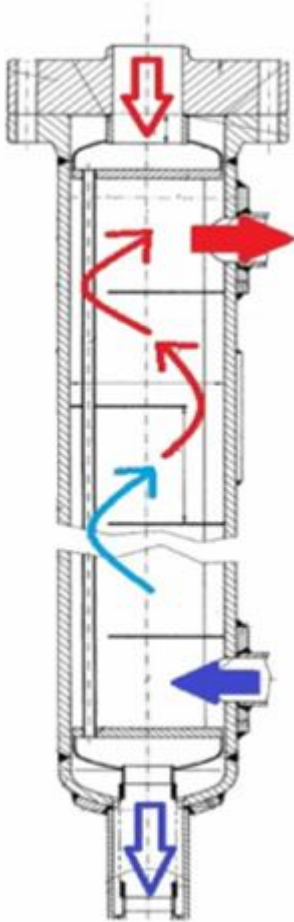
A modell felépítése során a hőtáadó csövek térfogata és a köpenytér lett definiálva, a kettő közötti összeköttetés hőstruktúra biztosítja. Kezdetben a köpenytér és a primer csövek egy-egy térrészből álltak, azonban a szimulációk rendkívül hibás eredményeket adtak, ezért részletesebb felosztásra volt szükség. A végleges felosztást a köpenytérbe elhelyezett terelőlapok száma határozta meg, hiszen azok geometriailag jól elkülönülő részekre osztják a hőcserélőt. A hélium áramlási úthossza és keresztmetszete megegyezik a primer csövezeték hosszával és keresztmetszetével. A

köpenytérben azonban a terelőlapok miatt az áramlás se nem merőleges, se nem párhuzamos a primer csövekkel, így ott ezek meghatározásához más módszert kellett alkalmazni. A hélium térközéptől térközépig nem egy egyenes mentén áramlik, hanem ahogy az a 2. ábra nyilain is látszik, félkörívesen. Az áramlási keresztmetszetet a hasonló geometriájú hőcserélőknél használt összefüggés segítségével lehetett meghatározni:

$$A_{\dot{a}} = \sqrt{A_{sz} \cdot A_k} \quad (1)$$

Ahol:

- $A_{\dot{a}}$ - átlagos áramlási keresztmetszet [m^2],
- A_{sz} - terelőlap síkjában az áramlási keresztmetszet [m^2],
- A_k - csövekre merőleges, átmérő mentén lévő szabad keresztmetszetek összege [m^2].



2. ábra: Hélium-hélium hőcserélő

A fenti módon felépített hőcserélő modell a szimulációk során jó eredményeket adott, melyekről később lesz szó részletesen.

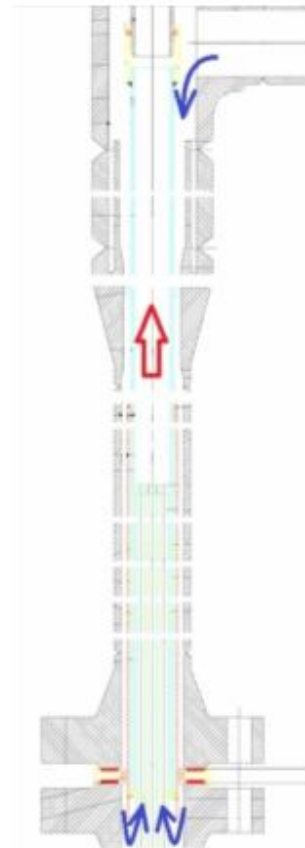
Tesztzakasz

A HEFUS berendezésben a teszszakasz rész tölti be az atomerőművi reaktortartály és a zóna szerepét, itt történik a hőtermelés. Hosszmetszeti rajza a 3. ábrán látható. A 3. ábra tetején, a felső kék nyíllal jelölt helyen áramlik be a teszszakaszba a hőcserélőből kilépő, már előmelegített gáz, majd egy gyűrűs térrészben - úgy ahogy a ma üzemelő reaktorok és az ALLEGRO esetében is - lefelé áramlik a zóna és a tartály fala között, míg el nem éri az alsó keverőteret,

ahol visszafordulva belép a zónába, jelen esetben az elektromosan fűtött pálcák közé. Ebben a térben felmelegszik, majd felfelé továbbáramolva elhagyja a teszszakaszt. A zónában hét darab elektromosan fűtött pálcát találhatók, amik körül áramlik a hélium, mint hűtőközeg. Egy darab fűtőelempálcát találhatók középen, melyet hat másik fűtőelempálcát vesz körkörösén körül. A fűtőelempálcák belsejében elektromos fűtőszál fut, melyet magnézium oxid vesz körül.

Az áramlási keresztmetszet a szabad keresztmetszet, míg az áramlási hossz a teszszakasz hossza. A fűtőelempálcák körüli áramlásnál a keresztirányú keveredés nem lett figyelembe véve, így a modellben a belső és a külső hat pálcát külön térrészbe kerültek. Mivel a központi pálcát körüli csatornát a külső pálcák jól határolják, ezt a feltételezést elfogadhatónak vettük. A pálcák axiálisan a megszokott 10 rész helyett 20 részre lettek felosztva, ugyanis a finomabb felosztásnak köszönhetően komoly javulást lehetett elérni a szimuláció eredményeiben. Az erőművi számításokban a MELCOR kód zóna modelljét szoktuk alkalmazni, ahol a fűtőelem jellemzőit kell megadni. Ebben az esetben az egyszerű zóna geometria lehetővé tette, hogy hőforrással és hővezető szerkezetekkel írjuk le a zónát. Miután ellenőriztük a MELCOR zóna modelljét és az ugyanazt az eredményt produkálta, mint a hővezető szerkezetekkel történő leírás, az érzékenység vizsgálatnál a gyorsabban futó modellt használtuk. Amennyiben a kísérletek során zónadegradáció is előfordult volna, akkor nem tehetjük volna meg ezt a gyorsító lépést, hiszen ennek a jelenségnek a számítására csak a MELCOR zóna modellje alkalmas.

A pálcákban felszabaduló hőt (villamos fűtés) hőforrásként modelleztük.



3. ábra: A teszszakasz hosszsmetszeti ábrája

Egyéb, a modellépítéssel kapcsolatos részletek

A csővezetékek modellezése során azok irányultsága és geodetikus magassága a természetes cirkuláció miatt külön figyelmet kapott. Az egyes kanyarok, szelepek, keverők ellenállás tényezőit figyelembe vettük.

A hélium-hélium hőcserélő után található a HEFUS berendezésben egy léghűtő (1. ábra, Cooler), ami a hélium maradék hőjét elviszi. A modellben a léghűtőt egyszerű energianyelőként modelleztük.

A kísérleti berendezésben a közeg áramlását egy kompresszor biztosítja. A modellben ezt egy előre definiált tömegáram függvényvel lehetett megadni. Ezzel a kompresszor normál üzemi és kifutás során szállított tömegáramát is lehet modellezni, a komprimálás során létrejövő hőfejlődést azonban nem vettük figyelembe.

Szimulációk eredményei és azok vizsgálata

Stacioner eset

A modell felépítése után a szimuláció eredményeinek az ellenőrző számításait végeztük el. A számítások eredményeit először részegységként vizsgáltuk meg. A hőcserélő elemzésénél a vizsgált paraméterek a hőcserélő primer és szekunder oldalán belépő/kilépő közegek hőmérséklete volt. A szimuláció és a mérési eredmények összehasonlítását százalékosan az 1. táblázat tartalmazza. A második és harmadik sorban a mérési eredmények és a szimuláció eredményei láthatóak. A MELCOR által használt Dittus-Boelter összefüggéssel is relatív jó eredményeket kapunk, a bonyolult köpenytéri geometria ellenére. Az eredmények még tovább javulnak (1. táblázat, utolsó sor) és így a legnagyobb eltérés is 7% (6 °C) körül mozog, ha a mérési dokumentáció által ajánlott, a szekunderoldali geometriához jobban illő hőátadási összefüggést használjuk [3]:

$$h_e = 0,36 \cdot \frac{K_e}{D_e} \cdot Re^{0,55} \cdot Pr^{1/3} \quad (2)$$

Ahol:

- h_e - hőátadási tényező (W/m^2K),
- K_e - hélium hővezetési tényezője (W/mK),
- D_e - köpenytéri hidraulikus átmérő (m),
- Re - Reynolds szám,
- Pr - Prandtl szám.

A kísérlet elég egyszerű ahhoz, hogy részfolyamatait kézi számításal is leírhatóak legyenek. Ezzel ellenőrizhetjük a MELCOR számítás, valamint a kód által alkalmazott anyagjellemzőket. A MELCOR által számított sebességek és közeg paraméterek mellett számoltuk a hőátadási tényezőt is. A MELCOR által is használt Dittus-Boelter összefüggést, valamint a mérési dokumentáció által javasolt összefüggést alkalmazva kézi számításal is visszakaptuk a szimulált értékeket. A kézi számítás rávilágított a kód néhány olyan tulajdonságára, amire a jövőben, gázhűtéses reaktor vizsgálata esetén érdemes odafigyelni:

- A Dittus-Boelter összefüggés értelmezési tartománya 0,7-nél nagyobb Prandtl számnál van, a vizsgált esetben a Prandtl szám 0,65 volt. Ez éppen, hogy kívül van az

értelmezési tartományon, azonban elképzelhető olyan eset, amikor jobban kilóg ez az érték, ezáltal hibát okozva a számításban. A 0,65-ös Prandtl szám még nem okozott komoly hibát.

- A turbulens áramlásos hőátadási tényezőt a kód alapértelmezésben csak 10000-nél nagyobb Reynolds számnál számol, 2300 és 10000 között a lamináris és turbulens áramlás interpolációjával számol. Kényszerített áramlásnál ez ritkán fordul elő, de a természetes áramlások vizsgálatánál ezt figyelembe kell venni.

1. táblázat A hőcserélő szimulált eredményei stacioner esetben

	Hőcserélő primer belépő	Hőcserélő primer kilépő	Hőcserélő szekunder belépő	Hőcserélő szekunder kilépő
Mért értékek	100%	100%	100%	100%
Szimulált értékek	98%	111%	116%	97,5%
Szimulált értékek javított a-val	99%	105%	107%	98%

A tesztszakasz vizsgálatánál a tesztszakaszba be- és kilépő gáz hőmérséklete volt a vizsgált paraméter, valamint a fűtőelem pálcák burkolatának különböző magasságokon érvényes hőmérsékletei. A zónán áthaladó gáz felmelegedését a MELCOR nagyon kis hibával szimulálta, az eltérés 2%-on belül van. A pálcák burkolathőmérsékleténél azonban a kód nagyobb hibával számol, az eredmények a 2. táblázatban és a 4. ábrán láthatóak. (A táblázat és az ábra csak a belső pálcák burkolatának hőmérsékletét tartalmazza, de a külső pálcákra is hasonló eltérések adódtak). A mért értékekhez képest a pálcák ~8%-kal (30 °C) túlhűlnek. A jelenséget a Tractebel Engineering is tapasztalta, aki 2008-ban MELCOR kóddal ugyanúgy elvégezte ezt a vizsgálatot [6].

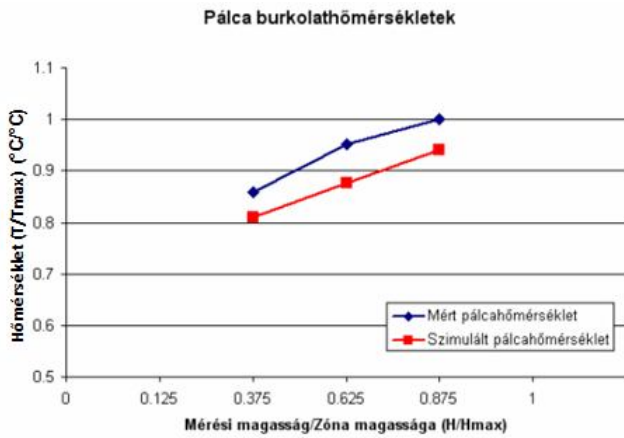
Kézi számításal, a kód által használt Dittus-Boelter összefüggést alkalmazva az eredmények reprodukálhatóak voltak, gáz közeg esetén az összefüggés körülbelül 10%-kal túlbecsüli a hőátadási tényezőt. Ennek oka lehet a már előbb említett alacsony Pr-számú áramlás. Mivel a tévedés nem a biztonság irányába hat, így erre az eltérésre, különösen az ALLEGRO súlyos baleseti elemzéseknél, oda kell figyelni.

2. táblázat Belső pálcák burkolatának szimulált hőmérsékletei a mérésekhez viszonyítva, különböző magasságokon

Belső pálcák	Burkolat hőmérséklete (H1)	Burkolat hőmérséklete (H2)	Burkolat hőmérséklete (H3)
Mért értékek	100%	100%	100%
Szimulált értékek	94%	92%	94%

A stacioner kísérlet szimulációja alapján megállapíthatjuk, hogy a MELCOR kód gázhűtéses környezetben is tud a tömeg és/vagy energiamérlegek felborulása nélkül, teljesen víz nélküli esetet számolni. Erre például az ASTEC súlyos

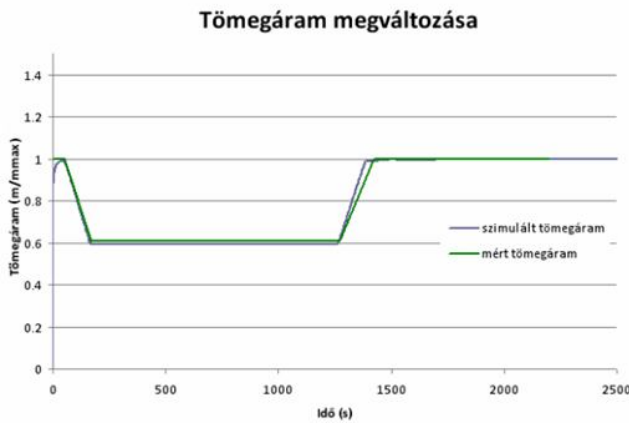
baleseti elemző kód jelen állapotában nem képes. A szimuláció során használt hélium paramétereket (hővezetési tényező, sűrűség, dinamikai viszkozitás, fajhő) kézi számítással ellenőriztük az ALLEGRO várható üzemi tartományában. A MELCOR számításban és a nemzetközi irodalomban talált értékek nagyon jól egyeznek.



4. ábra: Belső pálca mért és szimulált hőmérsékletének alakulása a pálca hossza mentén

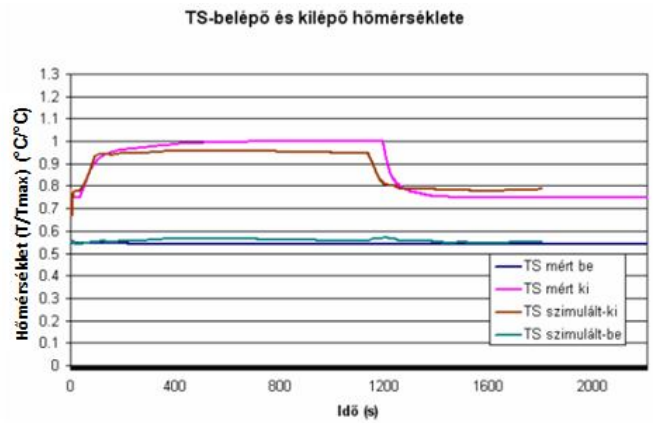
Tranziens eset

A tranziens kísérlet során a kompresszor által szállított tömegáram egy időre lecsökken, majd újra a névleges értékre tér vissza (5. ábra). Eltérés még a stacioner esethez képest, hogy a tranziens kísérlet során a by-pass vezetéken (1. ábra, zöld vezeték) áramoltatott hélium tömegáramával állandó hőmérsékleten tartják a tesztszakaszba belépő közeget.

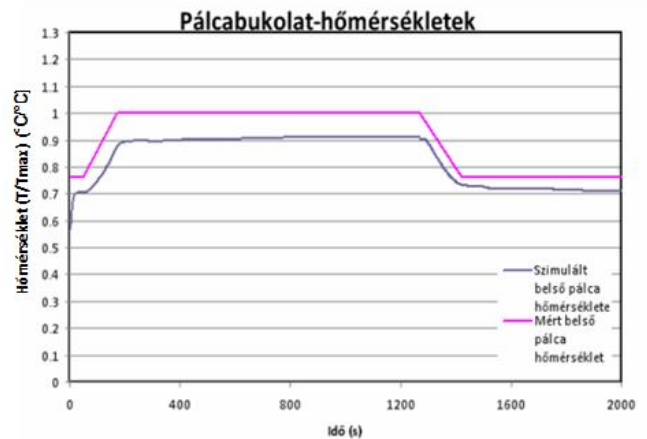


5. ábra: Tömegáram megváltozása tranziens során

A szimuláció során a mérési dokumentációnak megfelelően csökkentettük a tömegáramot. A lecsökkent tömegáram indukálta a létrejövő tranzienseket. A kód a tranziens során is jól szimulálja a zónán áthaladó hélium felmelegedését (6. ábra), a stacioner esethez hasonlóan. Viszont a belső pálca burkolat hőmérsékletei ebben az esetben sem érik el a mért értékeket (7. ábra). Az eltérés a mérési és a szimulált eredmények között az első esetben 5% alatt van, míg a burkolatok túlhűtése 10% körüli. A többi vizsgált paraméter, mint például a hőcserélő hőmérsékletei, 5%-os hibán belül követik a mérési eredményeket.



6. ábra: Tesztszakaszba be- és kilépő hélium hőmérsékletei



7. ábra: Belső pálca burkolatának hőmérsékletei, adott magasságon

Összegzés

A HEFUS berendezésen végzett kísérletek eredményeit már sikeresen felhasználták több (nem baleseti) termohidraulikai kód validálására [7]. Az elvégzett szimulációk és vizsgálatok segítségével sikerült igazolni a MELCOR 1.8.6 kód alkalmazhatóságát is gázhűtéses környezetre. A kód mind stacioner, mind pedig tranziens állapotban elfogadható pontossággal szimulálta a folyamatokat. A MELCOR által használt paraméterek az irodalmi értékekkel megegyeznek, a számítások során fizikai ellentmondás (energia és tömegmérlegek felborulása) nem volt tapasztalható. A szimulációk során a kód a legnagyobb hibát a függőleges fűtött csövek körüli áramlásnál produkálta, azonban ezen eltérés is csak 10 % körüli. Ez a nagyobb eltérés azonban sajnos nem a biztonság felé hat, ezért a későbbi hasonló esetekben ezt szem előtt kell tartani. A modellből jelenleg hiányzik a megfelelő kompresszor modell, ennek kifejlesztése, ellenőrzése a közeljövő feladata.

Összességében azonban a MELCOR 1.8.6 kód alkalmasnak bizonyult gázhűtéses esetek vizsgálatára, így az ALLEGRO-val kapcsolatos elemzések során, bizonyos megfontolások mellett alkalmazható.

Irodalomjegyzék

- [1] <http://www.kormany.hu/hu/nemzeti-fejlesztesi-miniszterium/hirek/hivatalosan-is-bejelentettek-a-v4g4-kivalosagi-kozpont-letrehozast>
(letöltés: 2014.01.28.)
- [2] Melcor súlyos baleseti elemző kód bemutatása: <http://melcor.sandia.gov/about.html> (letöltés: 2014.01.28.)
- [3] J. Duspiva, T. Janda: UJV_Z-3748-T_Specification_Report_HEFUS3_Benchmark, 2013. május
- [4] Sandia National Laboratories: Melcor Computer Code Manuals, Version 1.8.6. September 2005
- [5] He-FUS3 benchmark specifikations, 2011
- [6] L. Sallus, W. Van Hove, Tractebel Engineering: Benchmark on HE-FUS3: Lessons learned from Melcor calculations, Villigen, Switzerland, december 15-16, 2008.
- [7] Polidori és társai, Proceedings of ICAPP 2013, Jeju Island, Korea, April 14-18, 2013, THERMAL-HYDRAULIC CODES BENCHMARK FOR GAS-COOLED FAST REACTOR SYSTEMS BASED ON HEFUS3 EXPERIMENTAL DATA