

Kritikus hőfluxus vizsgálata körgyűrű keresztmetszetű hengerben alacsony nyomás és forgalom mellett

Mayer Gusztáv, Nagy Richárd, Nagy Imre

MTA Energiatudományi Kutatóközpont

1525 Budapest 114, Pf. 49, tel.: +36 1 392 2222

A kritikus hőfluxus (Critical Heat Flux - CHF) jelensége a forráskrizisek csoportjába tartozó, összetett termohidraulikai folyamat. Olyan esetekben léphet fel, ahol forrásos hőátadás valósul meg és a felületi hőfluxus értéke túllépi az adott geometriához és áramláshoz tartozó kritikus határértéket. A CHF fellépése esetén a hőátadási tényező jelentősen lecsökken és a fűtött felület hőmérséklete hirtelen megemelkedik, ami legtöbbször a berendezés tönkremeneteléhez vezet. Atomerőművek esetében az üzemanyagot a hűtőközegetől az üzemanyag burkolata választja el. Amennyiben ez a burkolat megsérül, sugárzó anyagok jutnak a primerköri hűtőközegbe és elszennyezik a primerkört. Emiatt a kritikus hőfluxus jelensége fontos szerepet játszik atomerőművek tervezésénél és üzemeltetésénél. Az MTA EK-nál demonstrációs és vizualizációs célból megépítettük az ACRIL mérőhurkot a CHF vizsgálatára. A berendezésen jól tanulmányozható a kritikus hőfluxus jelensége alacsony nyomás és tömegáramok mellett. A tesztszakasz egy belül tömör, 6 mm átmérőjű, 454 mm hosszúságú rozsdamentes acélrúd. A külső fűtetlen cső hőálló üvegből készült, belső átmérője 16,3 mm. A berendezésen méréseket végeztünk a CHF értékének meghatározására különböző üzemállapotokban. A kísérletekben a nyomást 110-225 kPa értékek között változtattuk, a tömegfluxus értéke 49,88-108,53 kg/(m²s), a belépő víz aláhűtési entalpiája 12,5 kJ/kg volt. A mérési eredményeinket öt korrelációval hasonlítottuk össze.

Bevezetés

Buborékos forrás esetében nagyon jó a hőátadás a fűtött felület és az azt hűtő közeg között. Ez a jó hőátadási tényező azonban forráskrizis hatására hirtelen lecsökkenhet, miközben a hőátadás mechanizmusa és intenzitása jelentősen megváltozik. A folyamat többféleképpen is bekövetkezhet, ennek megfelelően beszélhetünk első- és másodfajú forráskrizisekről [1]. Az elsőfajú, első típusú forráskrizis kis gőztömeghányad esetén következik be, míg a másodfajú forráskrizis nagy gőztömeghányad esetében fordul elő. A nemzetközi szakirodalomban többfajta definíció is létezik a fenti folyamatokra. Azt a hőfluxust, amit elérve bekövetkezik a hőátadás leromlása, kritikus hőfluxusnak definiálják (Critical Heat Flux - CHF), de általános értelemben magát a jelenséget is így hívják. A túlhevülés a berendezés megoldását, „kiégését” is eredményezheti (Burnout - BO). Szokásos még a buborékos forrástülpés (Departure from Nucleate Boiling - DNB) elnevezés használata. A kiszáradás (Dryout - DO) jelensége a felületen lévő vékony folyadékfilm kiszáradására utal és tipikusan a nagy gőztömeghányadok mellett következik be, vagyis a másodfajú forráskrizis esetén. A fenti definíciók közül ebben a munkában egységesen a CHF elnevezést használjuk a jelenség definiálására, függetlenül a gőztömeghányadtól.

A nukleáris iparban kiemelt fontosságú, hogy az üzemanyagot körülvevő burkolat ne sérüljön meg, ugyanis ez szigeteli el a hasadási termékeket a hűtőközegetől, ez az egyik legfontosabb mérnöki gát. A CHF folyamatának elkerülésére atomerőművekben egy felső korlátot állapítanak meg a maximális üzemi hőfluxus értékére.

A kritikus hőfluxus jelensége egy nagyon komplex termohidraulikai folyamat, így emiatt még napjainkban is intenzíven kutatják. A CHF értéke nagyon sok paraméter függvénye. Jellemzője, hogy kismintán végzett mérésekből csak korlátozottan használhatók fel az eredmények a nagyobb méretű berendezésekben fellépő CHF értékének meghatározására [2]. A fontos esetekben tehát a valós méretű berendezésen célszerű elvégezni a mérést, a valóssal megegyező geometrián.

Számos kutatást végeztek már a CHF meghatározására csövekben, csökötegekben, négyszögletes és egyéb csatornában és csak a csövekre végzett mérések száma meghaladja az ezret [3]. A körgyűrű geometriájú berendezéseken végzett kísérletekre is számos példa található, azonban a legtöbb ilyen kutatást a nagy nyomástartományú és magas tömegáramú esetekre végezték.

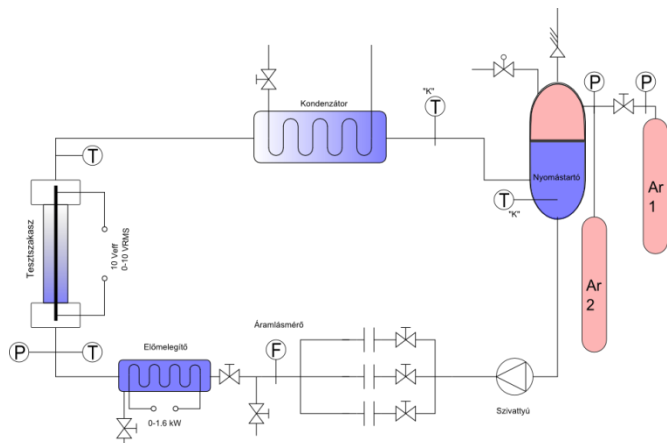
A szerzők szinte kivétel nélkül azt hangsúlyozzák, hogy több mérési eredményre lenne szükség az alacsony nyomású és alacsony tömegfluxusú tartományban [3,4,5]. Elsősorban ez a tény motiválta berendezésünk megépítését. A berendezés tervezésénél azonban fontosnak tartottuk, hogy az áramlás vizuálisan megfigyelhető legyen, és gyorskamerát használva felhasználhassuk a vizuális adatokat CFD kódok validálásánál, vagy esetleg egyéb jelenségek tanulmányozásánál.

A CHF mérése

A tesztberendezés

A tesztberendezés sematikus képe látható az 1. ábrán. Főbb alkotóelemei a tesztszakasz, a kondenzátor, a nyomástartó edény, a szivattyú, a fojtószelepek és az előmelegítő.

A hurkot ioncserélt vízzel töltöttük fel és a felmelegítési szakaszban gáztalanítottuk. A vizet a hurokban egy HALM (230 V~/100 W) típusú fűtési keringető szivattyú hajtja. Az előmelegítő egy vastag cső, amely a tesztberendezés legalján helyezkedik el. A csőbe hermetikusan benyúlik az 1,6 kW teljesítményű (230 V) fűtőszál. A kondenzátor egy ZILMET típusú, 15 kW nominális teljesítményű lemezes hőcserélő, melynek szekunder oldalát csapvízzel hűtöttük. Az adatgyűjtő rendszert ADAM típusú modulokkal valósítottuk meg. A nyomás mérése SITRANS Z SIEMENS típusú nyomástávadókkal történt. A teszt szakasz ki- és belépő hőmérsékletét PT100 ellenállás hőmérőkkel mértük, míg a többi hőmérsékletméréshez saját gyártású, K típusú termoelemeket használtunk. A forgalom mérésére McMillan 102 Flo-Sen 8T járókerekes áramlásmérőt használtunk. A nyomástartón egy 5 bar nyitási nyomású biztonsági szelep található. A mérőkörhöz egy nagy nyomású argon palack csatlakozik egy reduktoron keresztül, annak érdekében, hogy állandó kis térfogatáramú argont fecskendezzünk be a nyomástartó gázrészébe. A hurokhoz tartozik egy 40 liter térfogatú argon palack, aminek a funkciója az, hogy megnövelje a térfogatkompenzátor térfogatát. Ez a palack közvetlenül csatlakozik a hurokra.

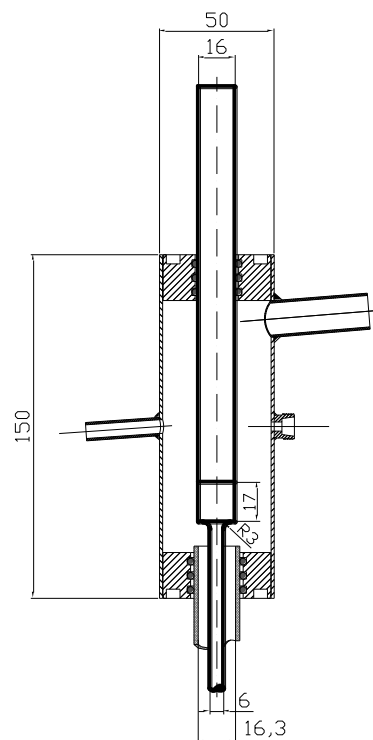


1. ábra: A teszthurok sémája

A teszt szakasz

A teszt szakasz egy belülről hevített körgyűrű. Az elektromosan fűtött belső tömör rúd anyaga rozsdamentes acél, aktív hossza 454 mm, átmérője 6 mm. A rozsdamentes pálcá a végein kiszélesedik, átmérője 16 mm. A rozsdamentes rúdnak mindkét végén ugyanolyan átmérőjű (16 mm) vörösréz meghosszabbítása van az elektromos csatlakozások miatt. A külső cső 16,3 mm belső, és 20 mm külső átmérőjű hőálló üveg. A fűtött pálcá koncentrikusan helyezkedik el az üvegcsőben, az alsó és felső fele egy-egy hasonló fejben végződik. Az elrendezést a 2. ábra mutatja. A fűtött rúd két vörösréz vége a fej végein túl vörösréz elektródákhoz csatlakozik. A fűtőáramot egy nagy teljesítményű váltóáramú tápegység biztosítja (0 - 10 VRMS/800 A max).

A fűtött pálcá falhőmérsékletének mérése nagyon fontos, hiszen a CHF fellépésekor a pálcá túlhevül, így tanácsos még annak megolvadása előtt lekapcsolni a fűtőt teljesítményt. Az általunk végzett kísérletekben a falhőmérsékletet a pálcára egy vékony bilincsel hozzáerősített termoelemmel mértük három axiális pozícióban. A termoelemek köpenyátmérője 0,5 mm a két alsó pozícióban és 0,25 mm a felső pozícióban. A termoelemek pozíciója felülről mérve 3 mm, 54 mm és 182 mm.

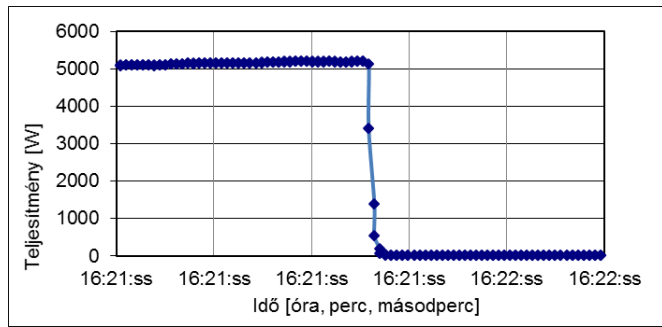


2. ábra: A felső fej műszaki rajza

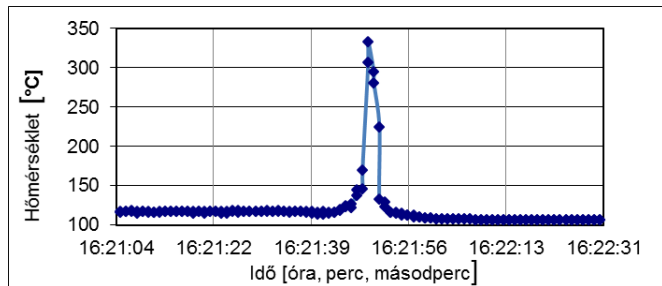
A kísérlet menete

A kísérletek megkezdéséhez a berendezést fel kellett melegíteni, amihez az előmelegítő berendezést használtuk. Ebben a fázisban az inert gázok elhagyják a folyadékot. Annak érdekében, hogy minél előbb egyensúlyi állapotot érjünk el a nyomástartóban, relatíve nagy forgalmat állítottunk be a szivattyúval és a fojtó szelepekkel. A következő lépésben bekapcsoltuk a pálcá fűtését is és ezzel egy időben beindítottuk a szekunder oldali csapvízhűtést annak szabályozójával együtt. A nyomástartó belépő vízhőmérsékletét szabályoztuk a szekunder oldali csapvíz tömegáramával. Ezután beállítottuk a méréshez kívánt tömegáramot és nyomást. A tömegáramot a fojtó szelepek megfelelő beállításával értük el. A nyomást argon gáz kismértékű befecskendezésével és egy szelepen történő elengedésével állítottuk be a kísérlet elején. A térfogatkompenzátor és a kiegészítő argon palack jól biztosította az egyenletes nyomást a kísérletek során, így annak további szabályozására nem volt szükség. Az utolsó fázisban 100 W/perc teljesítményemelkedéssel növeltük a pálcá teljesítményét. A kísérlet akkor ért véget, amikor a pálcá falhőmérséklete bármely termoelemmel meghaladta a 170 °C-ot. A 3. ábra egy tipikus hőmérsékleti csúcsot mutat be. A felső ábra a pálcá aktuális teljesítményét mutatja, ahogyan percenként 100 W-tal növekszik egészen addig, amíg a pálcá hőmérséklete meg nem haladja a 170 °C-ot. Az alsó ábrán látszik, hogy a felső termoelemmel mért pontban a hőmérséklet körülbelül 330 °C-ig nő, majd a fűtőt teljesítmény megszűnése után lecsökken.

111 CHF pontot mértünk ki a kísérletsorozatban. A tömegfluxus értéke 50-től 110 kg/(m²s)-ig változott, a nyomás 1,1 bartól 2,25 barig. Az aláhűtés mértékét $3 \pm 0,3$ °C-on tartottuk a telítési nyomás alatt, amely 12,5 kJ/kg aláhűtési entalpiának felel meg.



A.)



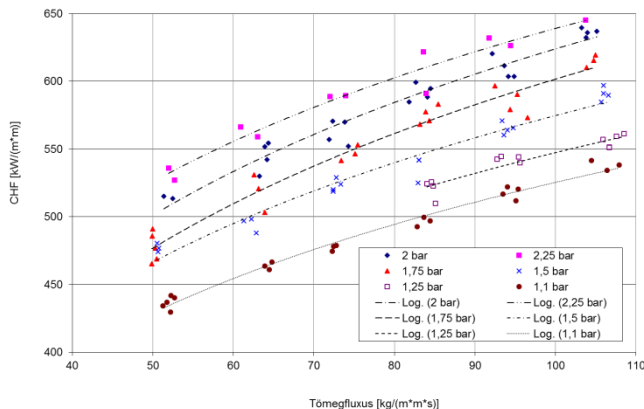
B.)

3. ábra: Egy tipikus CHF detektálás eredménye
A.) A pálcza fűtési teljesítménye időben
B.) A felső termoelem által mért falhőmérséklet

Eredmények

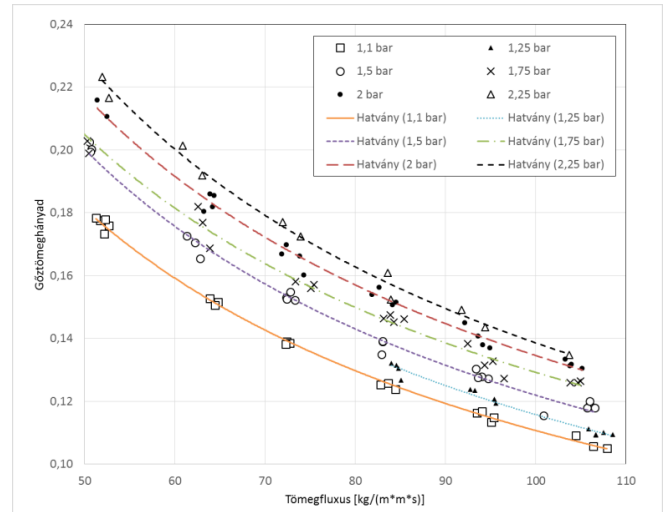
A kísérletek folyamán azt tapasztaltuk, hogy a CHF legtöbbször a pálcza tetején jelent meg. A 111 mérési pontból csupán négyet detektáltunk a középső termoelemmel és egyet sem az alsó termoelemmel. Az, hogy a hosszirányban egyenletes fűtés mellett nem minden esetben a felső termoelemen tapasztaltunk CHF-et, ellentmondásosnak tűnik ugyan, de a jelenséget Haas [6] is megfigyelte hasonló körülmények között.

A mért kritikus hőfluxus értékeket a következő 4. ábra mutatja a tömegfluxus függvényében. Látható, hogy a CHF értéke növekszik a tömegáram növekedésével az 50-től 110 kg/(m²s)-ig tartó tartományban. Szintén megfigyelhető, hogy a nyomás növekedésével nő a kritikus hőfluxus értéke. Ez a tendencia minden egyes mért nyomástartományra igaz, egészen az 1,1 bartól a 2,25 bar értékig, amely egybevág az irodalomban fellelhető korábbi megfigyelésekkel [7, 8].



4. ábra: A mért CHF pontok a tömegfluxus függvényében

A kritikus gőztömeghányad értékeit a hőmérlegből számoltuk ki. A 5. ábrán a számított kritikus gőztömeghányad látható a tömegfluxus függvényében. Látható, hogy a kritikus gőztömeghányad értéke csökken a növekvő tömegfluxus függvényében. Ahogy a nyomás értéke növekszik, úgy növekszik a gőztömeghányad értéke, amelyet alátámasztanak az irodalomban található adatok is [5].



5. ábra: A hőmérlegből számított kritikus gőztömeghányad értékek a tömegfluxus függvényében

A CHF adatok összehasonlítása korrelációkkal

A CHF terminológiájában a korreláció alatt a mérési eredményekre illesztett empirikus, félempirikus formulákat értik és mi is ezt használjuk. Jelen tanulmány öt korrelációt vizsgál meg különböző szerzőktől, és a közvetlen behelyettesítéses módszer segítségével összehasonlítja azokat a mérési eredményekkel. A választott korrelációk a következők: Doerffer és kollégái [9], Kumamaru és kollégái [10], El-Genk és társai [4], Schoesse és társai [11], Shah [12]. A kilépő gőztömeghányadot a hőmérleg alapján számítottuk, ahol a tesztszakasz hővesztését elhanyagoltuk. A kritikus hőfluxus meghatározásánál közvetlenül a mért tömegfluxust, nyomást és a hőmérlegből számolt kilépő gőztömeghányadot helyettesítettük be a korrelációkba, majd az így kapott CHF értéket, valamint a mért CHF értéket felhasználva összehasonlítottuk őket egymással. Az 1. táblázat egy összefoglaló táblázat az egyes korrelációk és a jelen mérések átlagos hibájáról (Avg.), átlagos szórásáról (S.D.) és RMS hibáiról, melyeket a következő módon számoltunk:

$$Avg = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{q_{c,pred} - q_{c,exp}}{q_{c,exp}} \right),$$

$$S.D. = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left(\frac{q_{c,pred} - q_{c,exp}}{q_{c,exp}} \right) - Avg \right)^2},$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{q_{c,pred} - q_{c,exp}}{q_{c,exp}} \right)^2},$$

ahol:

N – a mérési pontok száma,

q_c – a kritikus hőfluxus,

$q_{c,pred}$ – a korreláció által adott érték,

$q_{c,exp}$ – a mérés alapján kapott érték.

Látható, hogy az El-Genk-féle korrelációnak van a legkisebb RMS hibája, tehát az adott paraméter tartományban ez közelíti legjobban a mérési eredményeket.

1. táblázat Az egyes korrelációk összehasonlítása a mérési eredményekkel

	Avg.	S.D.	RMS
Doerffer (2006-os CHF táblázattal)	0,124991	0,265646	0,293582
Doerffer (1995-ös CHF táblázattal)	0,105917	0,204251	0,23008
Kumamaru	-0,55458	0,056068	0,557412
El_Genk	0,015035	0,080865	0,082251
Schoesse	0,247074	0,035187	0,249567
Shah	-0,41999	0,10859	0,433805

Összefoglalás

Kritikus hőfluxus vizsgálatokat végeztünk az MTA EK ACRIIL mérőhurkán alacsony nyomásokon és alacsony tömegfluxusok mellett. A tesztszakasz egy belső felületén egyenletesen fűtött, körgyűrű keresztmetszetű függőleges henger volt. Összesen 111 CHF pontot mértünk le a berendezésen, és ezután a kapott eredményeket összehasonlítottuk a szakirodalomban megtalálható korrelációkkal. Azt tapasztaltuk, hogy a méréseket legjobban El-Genk korrelációja adja vissza 0,0822 RMS hibával. Az eredmények alátámasztják a Haas [6] által megfigyelteket, azaz a CHF nem minden esetben a felső termoelemnél jelentkezik annak ellenére, hogy a hossz mentén egyenletesen hevítettük a fűtőszálat. Ennek egyik magyarázata lehet a gyorskamerás vizuális vizsgálataink során is megfigyelt áramlási pulzáció jelensége, amely kifejezetten az alacsony térfogatáramok mellett jelentkezik [11]. További tapasztalat, hogy a kísérleteink során szabad szemmel megfigyelhettük a száraz foltok megjelenését a fűtött felületen a kritikus hőfluxushoz közeli üzemi tartományokban.

Köszönetnyilvánítás

A munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által támogatott VKSZ_14-1-2015-0021 azonosító számú projekt keretében zajlott.

Irodalomjegyzék

- [1] Gy. Csom, *Atomerművek üzemtana, I. kötet, A reaktorfizika és –technika alapjai*, Műegyetemi kiadó, (1997)
- [2] Ahmad, S. Y. and Groeneveld, D.C., *Fluid modeling of critical heat flux in uniformly heated annuli. International Symposium on Two-phase Systems, Technion City, Haifa, Israel, August 29 – September 2, (1971)*
- [3] Groeneveld, D. C., et al. *The 2006 CHF look-up table. Nuclear Engineering and Design, 237, 1909-1922, (2007)*
- [4] El-Genk, M. S., et al. *Experimental studies of critical heat flux for low flow of water in vertical annuli at near atmospheric pressure. International J. Heat Mass Transfer, 31, 11, 2291-2304, (1988)*
- [5] Park, J. W. et al. *Critical heat flux and flow pattern for water flow in annular geometry. Nuclear Engineering and Design, 172, 137-155, (1997)*
- [6] Haas, C. *Critical heat flux for flow boiling of water at low pressure on smooth and micro-structured zirconium tube surfaces, KIT Scientific Reports 7627, dissertation, (2012)*
- [7] Chun, S. Y. et al. *Effect of pressure on critical heat flux in uniformly heated vertical annulus under low flow conditions. Nuclear Engineering and Design, 203, 159-174 (2001)*
- [8] Wu, Y. W., et al. *Experimental study on critical heat flux in bilaterally heated narrow annuli, International J. Multiphase Flow, 35, 997-986, (2009)*
- [9] Doerffer, S., et al. *A comparison of critical heat flux in tubes annuli. Nuclear Engineering and Design, 149, 167-175, (1997)*
- [10] Kumamaru, H. et al., *Critical heat flux for annulus under high pressure, low-flow and mixed inlet conditions. Journal of Nuclear Science and Technology, 27, 1, 68-80, (1990)*
- [11] Schoesse, T. et al., *Critical heat flux in a vertical annulus under low upward flow and near atmospheric pressure. Journal of Nuclear Science and Technology, 34, 6, 559-570, (1997)*
- [12] Shah M. M. *A general correlation for critical heat flux in annuli, Int. J. Heat Mass Transfer. 23, 225-234 (1980)*