

TK 155. 468

13

KFKI-1983-14

GADÓ JÁNOS
MARÓTI LÁSZLÓ

A BIPR PROGRAM TERMOHIDRAULIKAI
RÉSZÉNEK BŐVÍTÉSE

Hungarian Academy of Sciences

CENTRAL
RESEARCH
INSTITUTE FOR
PHYSICS

BUDAPEST

2017

5) KFKI-1983-14

SPEC:11-013

6) 14

2x

2) A BIPR PROGRAM TERMOHIDRAULIKAI RÉSZÉNEK BŐVÍTÉSE

AECI

AECI

1)

GADÓ JÁNOS, MARÓTI LÁSZLÓ
Központi Fizikai Kutató Intézet
1525 Budapest 114, Pf. 49

KIVONAT

A dolgozat a BIPR-program termohidraulikai részének fejlesztéséhez szükséges vizsgálatok eredményeit foglalja össze. A jelenlegi állapot rögzítése után javaslatot tesz a továbbfejlesztés lehetséges irányaira, a szükséges algoritmus megadására.

Bevezetés

A BIPR programok által szolgáltatott termohidraulikai információ rendkívül szegényes. A BIPR 5 programban a számítások alapjául a moderátor/hűtőközeg átlaghőmérséklete az aktív zónában és az ehhez tartozó hőfizikai adatok /sűrűség, fajhő/ szolgálnak. Az aktív zónán történő átlagos felmelegedést az átlaghőmérséklet-hez tartozó paraméterekkel kiszámítva a zóna belépő hőmérsékletéhez az átlaghőmérsékletnek az átlagos felmelegedés felével csökkentett értéket rendel, majd innen számítja a felmelegedések és hűtőközeghőmérsékletek térbeli eloszlását. A továbbfejlesztett BIPR 5K esetében továbblépés történt, amennyiben itt az aktív zóna belépő hőmérséklete szerepel bemenő adatként, s ezáltal lehetőség nyílik az abszolút hőmérsékletmező pontosabb számítására.

A fenti programváltozatok egyikénél sem lehetséges a zóna termohidraulikai biztonságával, ill. annak megváltozásával kapcsolatos információt előállítani. Márpedig ezen információ rendelkezésre állása az üzemeltető számára még akkor is jelentőséggel bírhat, ha a reaktornak a megengedett üzemeltetési stratégia szerint történő működtetése esetén nem lehetséges olyan viszonyokat előállítani, ami a biztonsági tényezők értékét a minimum alá vinné.

A hőtechnikai szempontból jelentéktelen felmelegedések ugyanis még akkor sem nyújtanak a biztonságra vonatkozóan jelentős információt, ha az átlagos felmelegedés maximális értéke limitálva van, mivel a felmelegedés és a biztonsági tényező megengedett értékei nem egyértelműen azonos körülményeket definiálnak.

Az abszolút hőmérsékletek már biztosabb támponttal szolgálnak az üzemeltető számára, mert legalább a hűtőközeg telítési állapottól való távolságának formájában valamiféle, a forrással szembeni biztonság illuziójával szolgálnak. Nem lévén ismeretes azonban a fűtőelemek burkolathőmérséklete és a folyadék átlaghőmérséklete közötti különbség ez sem nyújt közvetlen információt a viszonyok veszélyességét illetően.

Fentiek alapján várható, hogy a BIPR program termohidraulikai részének bővítése olyan hasznos információk hozzáférhetőségét biztosítja, amely az üzemeltetés biztonságán keresztül kompenzálja a

programfejlesztés ráfordításait.

Jelen dolgozatban anélkül, hogy a fizikai folyamat tárgyalásával foglalkoznánk összefoglaljuk a jelenlegi programváltozatokban használt és a továbbfejlesztés gyanánt javasolt termohidraulikai vontakozásu algoritmusokat.

Termohidraulika a BIPR-5-ben

A BIPR-5 program termohidraulikai számításai a reaktorfizikából adódó eloszlás adatokra, valamint a következő bemenő adatokra épülnek [1]:

a reaktorzóna teljesítménye	$N [W]$
a zónán átáramló hűtőközeg mennyisége	$G [m^3/sec]$
az n-edik kazetta relativ forgalma az átlagoshoz viszonyítva	g_n
a hűtőközegnek, ill. a moderátornak az átlagos hőmérsékletéhez tartozó sűrűsége	$\bar{\rho} [kg/m^3]$
a moderátor átlagos hőmérséklete	$\bar{T} [^{\circ}C]$
a hűtőközegnek az átlagos hőmérsékletéhez tartozó fajhője	$C_p [J/kg, ^{\circ}C]$

Az átlagos felmelegedést a teljes zónára vonatkozó hőmérsékletből kapjuk.

$$\bar{\Delta T} = \frac{N}{G \cdot \bar{\rho} \cdot C_p} \quad (1)$$

A továbbiakban a program a belépéshez a $\bar{T} - \frac{1}{2} \bar{\Delta T}$ értéket rendel, tehát az aktiv zóna belépő hőmérséklete

$$T_{Be} = \bar{T} - \frac{\bar{\Delta T}}{2} \quad (2)$$

A számítások során egy fűtőelemköteg axiálisan l_{max} számú elemre van osztva, azaz egy elem magassága

$$\Delta z = \frac{H}{l_{max}} \quad (3)$$

ahol H a zóna magassági mérete.

Egy Δz magasságu fűtőelemköteg elemében létrejött hőmérséklet-emelkedésre felírható hőmérleg a következő:

$$\frac{G}{n_{\max}} g_n \bar{c}_p \Delta T_{n,l} = \frac{N}{n_{\max}} \frac{\Delta z}{H} \Psi_{n,l} \quad (4)$$

Itt n_{\max} a fűtőelemkötegek száma a zónában

$\Psi_{n,l}$ az n-edik fűtőelemköteg l-edik elemében a relatív teljesítmény az átlagéhoz viszonyítva

A felmelegedésre adódik, hogy

$$\Delta T_{n,l} = \frac{N \Psi_{n,l}}{G g_n \bar{c}_p l_{\max}} \quad (5)$$

Végül a teljes felmelegedés az n-edik kazettában

$$\Delta T_n = \sum_{l=1}^{l_{\max}} \Delta T_{n,l} \quad (6)$$

Az abszolút hőmérsékletmező számítása a moderátor átlaghőmérséklete segítségével lehetséges. A Δz magasságu kazettaelemek ki-lépésénél a hőmérséklet

$$T_{ki}^{n,l} = T_{Be} + \sum_l \Delta T_{n,l} \quad (7)$$

ahol a T_{Be} az átlaghőmérséklet segítségével, (2) szerint számítható.

Ha a kazettaelemek reprezentatív hőmérsékletének a be-kilépő hőmérsékletük lineáris középértékét tekintjük, úgy ez a következő:

$$T_{n,l} = \frac{T_{ki}^{n,l-1} + T_{ki}^{n,l}}{2} \quad (8)$$

A hőmérsékletmező számításában nyilvánvalóan pontatlanságot okoz az a körülmény, hogy a hőfizikai paraméterek aktuális értéke a programban nem kerül kiszámításra. További probléma forrása lehet, hogy a számítások alapjául szolgáló adatok nem közvetlenül mérhető mennyiségek. Amíg a reaktor hűtőközegforgalma a hurkok forgalmaiból adódik, addig a zónán átáramló hűtőközeg mennyisége üzemközben nem mérhető. Ugyanigy közvetlenül mérhetetlen mennyiség a moderátor átlaghőmérséklete is. Nyilván ezek az üzemvitelhez kapcsolódó problémák vezettek a program továbbfejlesztéséhez.

Termohidraulika a BIPR-5K-ban

A továbbfejlesztett BIPR-5K programnál a termohidraulikai számítások bázisa nem a moderátor átlaghőmérséklete, hanem a reális körülményekkel sokkal inkább összhangban lévő és ráadásul az üzemvitel során állandóan mért belépő hőmérséklet. Ennek következményeképpen a zónában lévő hűtőközeg, ill. moderátor átlaghőmérséklete változhat a mindenkor teljesítmény, hűtőközegforgalom és belépő hőmérséklet függvényében [2]¹

A számítások alapjául a reaktorfizikai eloszlás adatokon túl az alábbi bemenő adatok szolgálnak

a reaktorzóna teljesítménye

$N [W]$

a reaktoron átáramló hűtőközeg mennyisége

$G [m^3/sec]$

1 Meg kell itt jegyezni, hogy valójában nem a zóna belépési hőmérséklete a mért jellemző, hanem a hurokágak kilépő hőmérsékletei. A valós belépő hőmérséklet ezek segítségével állítható elő, ami a zónabelépésnél elhelyezett elliptikus kosár által létrehozott keveredés függvénye.

az n-edik kazetta relativ forgalma az átlagos-
hoz viszonyitva

g_n

a hűtőközeg belépő hőmérséklete

$T_{be} [^{\circ}C]$

a zóna by-pass hűtőközeg áramának az összáramra
vonatkoztatott relativ értéke

$b = \frac{G_b}{G}$

A hűtőközeg hőmérsékleteloszlásának meghatározásához szükség van a sűrűség, ill. a fajhő aktuális értékeire. Ezeket az alábbi másodfoku polinomok állítják elő:

$$\rho = \rho_0 + Q_1(T - \bar{T}) + Q_2(T - \bar{T})^2 \quad (9)$$

és

$$c_p = c_{p0} + c_{p1}(T - \bar{T}) + c_{p2}(T - \bar{T})^2 \quad (10)$$

A (9) és (10) összefüggésekkel kapcsolatosan azonnal szembetűnik a nyilvánvaló ellentmondás, hogy ti. a paraméterek hőmérsékletfüggését leíró összefüggéseknél megtartották a moderátor átlaghőmérsékletét a BIPR-5 programból, holott ennek értékét nem ismerjük. A fejlesztés következetes végigvitele itt is a \bar{T} -ről a T_{be} zóna belépőhőmérsékletre történő áttérést igényelte volna.

A moderátor átlagos hőmérsékletének közelítő számítása ilyen módon a belépő hőmérséklethez tartozó hőfizikai paraméterekkel felírt hőmérlegből lehetséges:

$$N = G \rho_{be} c_p \bar{\Delta T} (1 - b) \quad (11)$$

és

$$\bar{T} = T_{be} + \frac{\bar{\Delta T}}{2} \quad (12)$$

Végül a \bar{T} ismeretében megadhatók a (9) és (10) egyenlet állandóinak pontos értékei.

Észre kell itt vennünk, hogy \bar{T} meghatározásához a $T_{Be} + \Delta\bar{T} \div T_{Be}$ hőmérséklettartomány közepes fajhőjére lenne szükség, tehát vagy közelítő értékkel dolgozunk, vagy pedig az átlaghőmérséklet egy iterációs eljárással kapható meg. További nehézséget okoz, hogy \bar{T} változásával a (9) és (10) egyenletek állandóit mindig változtatni kellene, ami a program felhasználása szempontjából rendkívül kellemetlen.

A (3) összefüggéssel definiált Δz magasságu kazettaelemen a felmelegedést megadó hőmérleg a következő:

$$\frac{G}{n_{max}} g_n (1-b) \rho_{Be} c_{p,n,l-1} \Delta T_{n,l} = \frac{N}{n_{max}} \frac{\Delta z}{H} \Psi_{n,l} \quad (13)$$

és a felmelegedés

$$\Delta T_{n,l} = \frac{N \Psi_{n,l}}{G g_n (1-b) \rho_{Be} c_{p,n,l-1} l_{max}} \quad (14)$$

Az egyes kazettaelemek kilépésénél a hűtőközeg hőmérséklete ismét a (7) egyenlettel számítható, azonban a kazettaelemen belül a reprezentatív hőmérséklet számításánál tetszőleges súlyozó tényező használható

$$T_{n,l} = T_{ki}^{n,l-1} \cdot a + T_{ki}^{n,l} (1-a) \quad (15)$$

ahol "a" bemenő adata a programnak.

A BIPR program termohidraulikai részének bővítése

A továbbiakban összefoglaljuk azokat a javaslatokat, amelyek bevezetése a BIPR program hőfizikai számításait egyrésztől pontosabbá teszi, másrésztől viszonylag kis erőfeszítések árán számtalan hasznos információ elérhetővé teszi lehetővé.

A bővített változat bemenő adatmezeje a következőket kell hogy tartalmazza:

a reaktorteljesítmény	$N [W]$
a reaktor hűtőközegforgalma	$G [m^3/sec]$
a reaktor by-pass relativ hűtőközeg forgalma	$b = \frac{G_b}{G}$
az n-edik kazetta relativ forgalma az átlagoshoz viszonyítva	g_n
az aktiv zóna belépésénél a hűtőközeg hőmérséklete	$T_{be} [^{\circ}C]$

továbbá szükség van a hőfizikai paraméterek közül az alábbiakra:

a rendszer nyomása	$p [Pa]$
a rendszer nyomáshoz tartozó telítési hőmérséklet	$T_s [^{\circ}C]$
a rendszer nyomáshoz tartozó rejtett hő	$L [J/kg]$
a T_s -hez tartozó felületi feszültség értéke	$\sigma [N/m]$

végül

a nyomásnak a hőmérséklet szerinti deriválva a telítési vonalon p-nél	$\left. \frac{\partial p}{\partial T} \right _s [Pa/^{\circ}C]$
---	---

A fűtőelemkazetta geometriai adatai a vízsebesség, ill. hőátadó felületek ismeretéhez szükségesek.

Ezek

a kazetta átáramlási keresztmetszete	$F [m^2]$
a kötegfal kerülete	$K [m]$
a fűtőelemek átmérője	$d [m]$
a fűtőelemek száma egy kazettában	n_k

Végül meg kell adni a hűtőközeg néhány hőfizikai paraméterének változását a VVER-440 üzemviteli tartományában, lehetőleg egy olyan vonatkoztatási hőmérséklettel, ami független a reaktor állapótól. Ezeket a paramétereket a másodfokú polinomokkal adjuk meg:

sűrűség

$$\rho = \rho(T) = \sum_{i=0}^2 \rho_i (T - T_0)^i \quad [kg/m^3] \quad (16)$$

fajhő

$$c_p = c_p(T) = \sum_{i=0}^2 c_{p_i} (T - T_0)^i \quad [J/kg, ^\circ C] \quad (17)$$

viszkozitás

$$\nu = \nu(T) = \sum_{i=0}^2 \nu_i (T - T_0)^i \quad [m^2/s] \quad (18)$$

hővezetési tényező

$$\lambda = \lambda(T) = \sum_{i=0}^2 \lambda_i (T - T_0)^i \quad [J/m, s, ^\circ C] \quad (19)$$

A polinomok ρ_i , c_{p_i} , ν_i , λ_i és T_0 paramétereit input adatként meg kell adni. T_0 értékének célszerű megválasztásával az összefüggések a VVER-440 üzemi tartományában bárhol használhatók.

Fenti adatok birtokában sor kerülhet a számításokra.

A hűtőközeg hőmérsékletének térbeli eloszlását az előzőekkel analóg módon számítjuk, azaz a (14), (7) és (15) összefüggésekkel. Az itt alkalmazott közelítés annyi, hogy a Δz magasságu elemekre vonatkozó közepes fajhő helyett a fajhő értékét mindig az elem

belépésénél vesszük fel.

A fűtőelemkazetta hőcsere viszonyait a kazetta radiális átlagértékeivel számítjuk. A hőátadási tényezőt a Dittus-Boelter formulával [3] határozzuk meg:

$$\alpha_{n,l} = 0,024 \operatorname{Re}_{n,l}^{0,8} \operatorname{Pr}_{n,l}^{0,4} \frac{\lambda_{n,l}}{d_e} \quad (20)$$

ahol a Reynolds szám

$$\operatorname{Re}_{n,l} = \frac{v_n d_e}{\nu_{n,l}} \quad (21)$$

a hűtőközeg sebesség

$$v_n = \frac{G g_n (1-b)}{n_{\max} F} \quad (22)$$

az egyenértékű átmérő

$$d_e = \frac{4F}{n_k d_{\pi} + K} \quad (23)$$

és a Prandtl szám

$$\operatorname{Pr}_{n,l} = \frac{\nu_{n,l} S_{n,l} c_{p,n,l}}{\lambda_{n,l}} \quad (24)$$

A hőfizikai paraméterek értékeit a $T_{n,l}$ reprezentatív hőmérsékletnél kell venni, így $\alpha_{n,l}$ [$\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$] a hőátadási tényező értéke ugyanezen pontban.

A hőátadási tényező ismeretében a Δz kazettaelemet reprezentáló pontban a fűtőelem burkolathőmérséklete az alábbi összefüggésből adódik:

$$\frac{1}{T_b^{n,l}} = \frac{N \psi_{n,l}}{n_{\max} l_{\max}} \frac{1}{\alpha_{n,l} n_k d_{\pi} \Delta z} + T_{n,l} \quad (25)$$

A hőátadási tényező ismertetében lehetőség nyílik az adott lokális viszonyoknál a forráskezdetet jelentő burkolathőmérséklet meghatározására.

A forráskezdet burkolathőmérsékletét $T_{b,o}$ -al jelölve írhatjuk /lásd [4]/, hogy

$$T_{b,o}^{n,l} = T_s + \frac{H_{n,l}}{2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + 4 \frac{T_s T_{n,l}}{H_{n,l}}} \right\} \quad (26)$$

ahol

$$H_{n,l} = \frac{8 \sigma_{n,l}}{\left. \frac{\partial p}{\partial T} \right|_s} \alpha_{n,l}$$

A falhőmérsékletben a forrás megindulásáig rendelkezésre álló tartalék ezzel

$$\Delta T_b = T_{b,o}^{n,l} - T_b^{n,l} \quad (27)$$

ΔT_b nézetünk szerint már igen fontos információt nyújt az üzemeltető számára, ugyanis érzékelteti vele, hogy a reaktorzóna tetszőleges helyén vagy éppen a forrás szempontjából legveszélyesebb helyen mekkora hőmérséklettartaléka van, amennyiben a forrás az aktív zónában nem kívánatos.

Valójában ez a tartalék a BIPR programokban alkalmazott kötegszintű kezelésmóddal összhangban lévő adat, amikor ugyanis az aktív zóna axiális és radiális egyenőtlenségei ill. eloszlásai figyelembe vannak véve, a kötegen belüli radiális eloszlás azonban nem.

Másik fontos termohidraulikai információ a kritikus hőfluxus és a tényleges hőfluxus hányadosaként definiált "DNBR" jelű biztonsági tényező. Ennek megengedett minimumát a gyártó cégek a számítási, gyártási és egyéb bizonytalanságok alapján meg szokták adni. Amennyiben a "DNBR" értékek a zónában kiszámításra kerülnek, ellenőriz-

hetővé válik

$$DNBR_{n,l} \geq DNBR_{\text{megengedett minimum}}$$

követelmény teljesülése.

Természetesen a kutatások eredményeképpen létrejött pontosabb kritikus hőfluxus predikció vagy a gyártási folyamat tökéletese-
dése a DNBR megengedett minimum csökkenéséhez vezethet, így ennek értéke az üzem során változhat.

A kritikus hőfluxus számítására célszerű Bezrukov összefüggést [5] alkalmazni, ez ugyanis speciálisan a VVER reaktorokra kifejlesztett korreláció.

Bezrukov szerint:

$$q_{kr}^{n,l} = 0,795 (1 - x_{n,l})^{-0,5 + 0,105 p^*} \times (g v)_{n,l}^{-0,127 + 0,311 (1 - x_{n,l})} \times (1 - 0,0185 p^*) \times 10^6 \quad [w/m^2] \quad (28)$$

ahol

p^* a rendszer nyomás MPa-ban

azaz

$$p^* = \frac{p}{10^6}$$

$x_{n,l}$ a lokális gőztartalom, ami

$$x_{n,l} = \frac{c_p(T_{Be}) \cdot \bar{T}_{Be} + \sum \frac{N \psi_{n,l}}{n_{max} l_{max}}}{L} - \frac{c_p(T_s) \cdot \bar{T}_s}{L} \quad (29)$$

Végül írhatjuk, hogy

$$\text{DNBR}_{n_{1e}} = \frac{c_{kr}^{n_{1e}} n_{\kappa} d_{\Pi} \Delta z}{\frac{N \Psi_{n_{1e}}}{n_{\max} l_{\max}}} \quad (30)$$

Összefoglalás

A BIPR program termohidraulikai számításainak jelen dolgozatban javasolt bővítése lehetővé teszi:

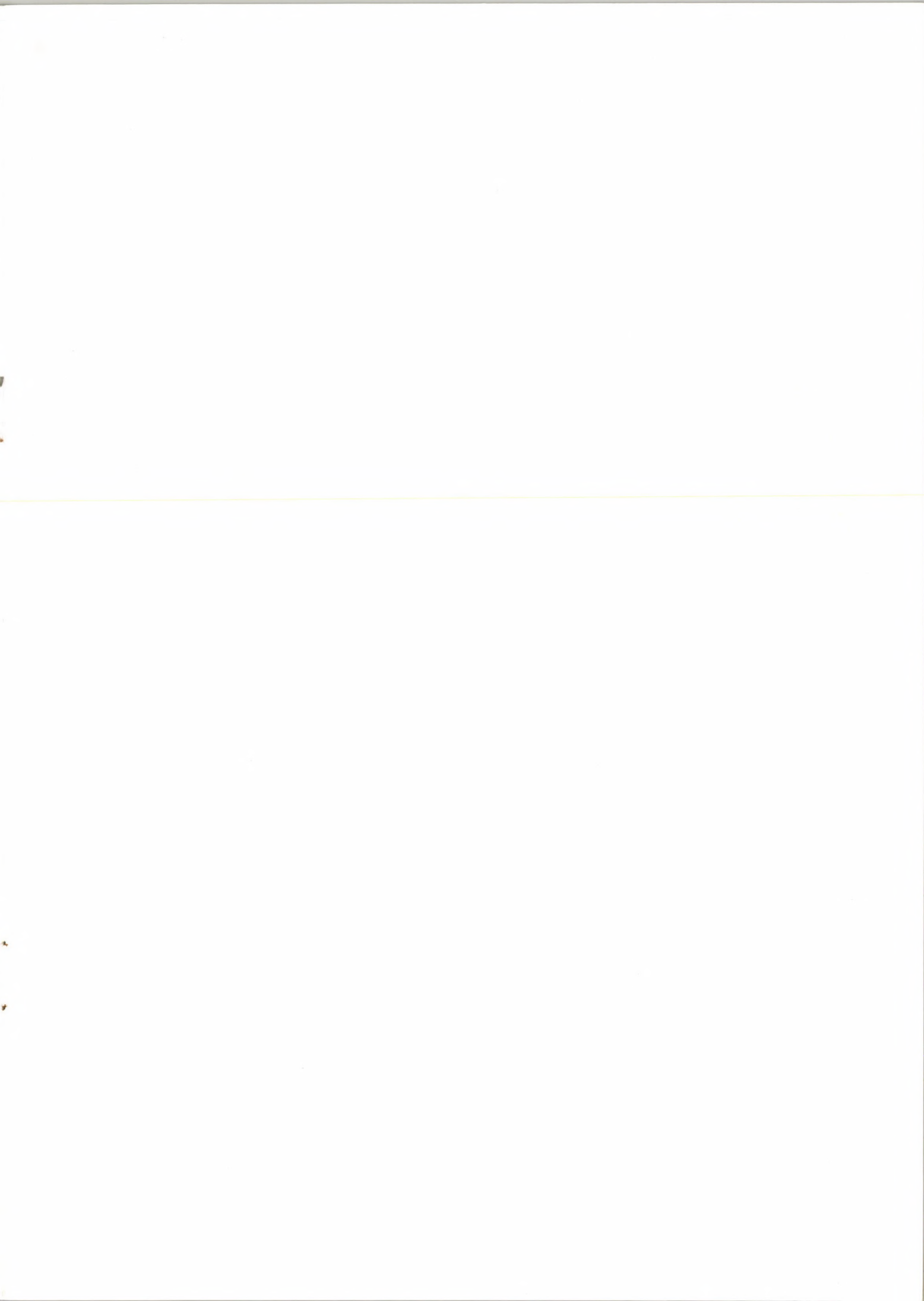
- 1./ Az erőműben közvetlenül mért jellemzők inputként történő felhasználását.
- 2./ A hőfizikai jellemzők pontosabb számítását.
- 3./ A forráskezdetig rendelkezésre álló tartalék meghatározását.
- 4./ A kritikus hőfluxus elérésével szembeni biztonság értékelését.

Ezeket a bővítéseket egy fejlesztési folyamat első lépésének tekintjük. A továbbiakban kellene rátérni a kazettán belüli radiális egyenlőtlenségi tényező figyelembevételére.

Fel kell hívnunk a figyelmet arra, hogy jelen programbővítés el-
lentmondásban van azzal, hogy a BIPR programban a reaktorfizikai algoritmus nem tartalmazza a gőz megjelenésének figyelembevételét szolgáló összfüggéseket. A számított adatok tehát a biztonság mértékének érzékeltetésére szolgálnak csupán, ha ugyanis valóságos gőztartalom megjelenését jeleznék, ebben az esetben a reaktorfizikai-termohidraulikai visszacsatolás helytelensége következtében a további eredmények használhatatlanok lennének. A program ilyen irányú továbbfejlesztése mérlegelés tárgyát kell, hogy képezze.

IRODALOM

- [1] Gadó J.: A VVER-440 típusu atomerőművi reaktorok számítására készült BIPR program ismertetése.
KFKI-1978-72.
- [2] Zágoni M.: A VVER-440 típusu atomerőművi reaktorok számítására készült BIPR-5K program ismertetése.
KFKI-1982-07.
- [3] Rohsenow, W.M.: "Handbook of Heat Transfer" Mc Graw Hill,
New-York, /1971/.
- [4] Maróti L.: "Heat Transfer in Partial Boiling" to be published.
- [5] Сабадош Л. и др.: "Анализ экспериментальных данных о кризисе теплоотдачи, полученных на модели ПЕРФ-6-2
Отчёт № I4-1979



63.344



Kiadja a Központi Fizikai Kutató Intézet
Felelős kiadó: Gyimesi Zoltán
Szakmai lektor: Vigassy József
Példányszám: 52 Törzsszám: 83-102
Készült a KFKI sokszorosító üzemében
Felelős vezető: Nagy Károly
Budapest, 1983. február hó