

TK 1557.357

KFKI-1982-13

PERNECZKY L.
VIGASSY J.

HIDEGTÉS ÉS SZABÁLYOZÓ KÖTEG KILÖKÖDÉS
I. RÉSZ

Hungarian Academy of Sciences

CENTRAL
RESEARCH
INSTITUTE FOR
PHYSICS

BUDAPEST

2017

HIDEGÖTÉS ÉS SZABÁLYOZÓ KÖTEG KILÖKÖDÉS
I. RÉSZ

PERNECZKY LÁSZLÓ és VIGASSY JÓZSEF
Központi Fizikai Kutató Intézet
1525 Budapest 114, Pf. 49

KIVONAT

A munka összefoglalja a hidegútés és szabályozóköteg kilökődés számítá-
sának előkészületi munkáit a KFKI-ban. Számba veszi a számítási lehetőségeket
és a rendelkezésre álló számítógépi programokat. Kritika tárgyává teszi a
nyerhető eredmények hibáit, és javaslatot tesz a hibák ellenőrzésére. Ismer-
teti az analízis céljaira kifejlesztett LINCUP programot. Bemutatja azt az
adatmezőt, amelyet a szerzők a számítások elvégzése céljával a LINCUP program
INPUT-ja számára elkészítettek. Illusztrálja néhány eredmény bemutatásával a
már elvégzett munkát, és ezeket az eredményeket diszkutálja. Méltatja azt a
segítséget, amely az [1] munkán keresztül a KFKI-AEKI Reaktorfizikai Osztálya
részéről megnyilvánult.

1./ Bevezetés

A szabályozó köteg kilöködési üzemzavar és a hidegütéses üzemzavar azok közé a legjellemzőbb reaktivitás-felszabadulással járó - más terminológia szerint reaktivitás hozzávezetésével kiváltott - atomerőművi üzemzavarok közé tartozik, amelyek analizálása elengedhetetlen az atomerőmű biztonságosságának vizsgálata során. A szabályozóköteg kilöködési üzemzavar tényleges kiváltó oka az lehet, hogy az egyik szabályozókötegnek a reaktortartály tetején keresztül való működtetését szolgáló meghajtó szerkezetben tömitetlenség, szivárgás vagy törés lép fel, ami alkalmat ad arra, hogy a reaktortartályban uralkodó nagy nyomás belökje a zónába a szabályozóköteg helyére kerülő aktiv kazettát. Tekintettel arra, hogy jelentős számú szabályozóköteg kerül egy reaktoron alkalmazásra, ezért fontos feladat annak biztosítása, hogy ez az üzemzavar az atomerőmű élettartama során ne lépjen fel. Már a tervezés során speciális intézkedéseket tesznek ennek az üzemzavarnak az elkerülésére és annak is ez az egyik oka, hogy a szabályozókazetta értékességét biztonsággal 1 § alá választják.

Amíg a szabályozó kazetta belökődéses üzemzavar oka tipikusan valamilyen meghibásodás, addig ez nem állitható ugyanilyen határozottsággal az u.n. hidegütéses üzemzavarról. Sőt talán az ellenkezője az igaz: a baleset legjellemzőbb - igaz, nem kizárólagos - okának a helytelen vagy szabályellenes üzemeltetést kell tartanunk. Hidegütéses üzemzavar fordulhat elő akkor, ha valamilyen okból alulról az atomerőmű reaktor zónájába hirtelen jelentősen alacsonyabb hőmérsékletű víz áramlik be, mint amilyen víz előzőleg beáramlott.

Mivel az atomreaktor moderátor-hőfoktényezője erőteljesen negatív érték, ilyenkor olyan nagy reaktivitás felszabadulása is elképzelhető, amelynek kompenzálása a szabályozószervekkel nem sikerülhet teljesértékűen. Ilyen hidegütésre vezethet például az, ha egy előzőleg nem üzemelő, így lehűlt primerkörü

hurkot szabályellenes módon kapcsolunk párhuzamosan az atomreaktort már hűtő primerköri hurkokkal. A VVER-440 -es reaktor hidegütéses üzemzavarának egyes vonatkozásairól érdekes megállapításokat találhatunk Prof. G. Ackermann és H. Melchior mérnököknek a II. Atomtechnikai Szimpóziumra beküldött dolgozatában [2], de magának az üzemzavarnak időbeli lefolyásáról nem közölnek adatokat.

2./ A hidegütés és szabályozóköteg kilökődés számítási lehetőségei

A vizsgálandó üzemzavarok számítógépes szimulációja különféle kapcsolt neutrónikai-hőtechnikai modellek keretei között képzelhető el. Ezek közül elsőként említendőek azok a modellek, amelyek a reaktor zónáját egyetlen - átlagos vagy tipikus - hűtőcsatornára vonatkozó számításokkal modellezik. Egyik jellemző képviselője ennek a modellcsaládnak a VEIKI -ben Dr. Benedek Sándor tudományos főmunkatárs által kidolgozott modell [3], amely akitűzött célokra kellő részletességgel számítja az atomerőmű egészének viselkedését, viszont az atomreaktor neutrónikájának leírására egy korábbi munkájában [4] kidolgozott módszer szerint, adott axiális fluxusprofillal dolgozik és ennek csupán amplitudója adódik ki a számítások során az idő függvényében. A vizsgálandó üzemzavarok számítására szóba jöhet ugyan ez a modell, de alkalmazását korlátozza, hogy a szigorú értelemben vett üzemzavari gerjesztési folyamat - a hidegebb vizfront átfutása a zónán, vagy a szabályozóköteg végigfutása a zónán, mindkettő axiális irányban - erőteljesen zavarja az axiális fluxusprofilt, különösen a gerjesztési folyamat lefutásának ideje alatt.

A szovjet DINAMIKA [5] program is alkalmazható - legalábbis elvileg - ezen üzemzavari folyamatok számítására. Azon túlmenően, hogy az előbb elhangzott kritika ebben az esetben is gyakorolható, e program számunkra nem hozzáférhető, így nem volt mód közelebbi információk, tapasztalatok szerzéséhez vele.

Valamivel részletesebben számíthatóak az üzemzavari viszonyok a reaktor zónájában, alsó és felső keverőkamrájában a MOST-7 [6] program segítségével. A neutronikai számítások azonban itt is pontkinetikai modell keretében történnek, tehát a már kifejtett pontatlanságok itt is korlátozzák a számítási eredmények alkalmazhatóságát. Előny viszont, hogy az aktív zóna termohidraulikai szimulációja többcsatornás modell keretében történik.

Hazánkban ismeretesek és néhány variánsban hozzáférhetőek a csőtöréses balesetek számítására kifejlesztett kódok. Gondolhatunk itt elsősorban a BRUCH és a RELAP4 programcsaládra. Amennyiben a reaktorteljesítmény számítására alkalmas szubrutinok is be vannak építve a kódba, fennáll az elvi lehetősége annak, hogy a kóddal a kérdéses balesetek számíthatóak legyenek. Ez a helyzet a KFKI -ban rendelkezésre álló RELAP4/MOD3 [7] kód esetén. Az elvi lehetőség kihasználása nem jöhet szóba paraméter-studium céljával, mivel e program gépidőfelhasználása igen nagy, de alkalmas arra, hogy egyszerűbb reaktorszimulátor programok alkalmazásának korlátait vizsgálhassuk vele. Az alábbiakban ilyen típusu alkalmazásról és az így nyert eredményekről, tapasztalatokról be fogunk számolni. Megemlítjük azonban, hogy jelen esetben is a neutronikának pontkinetikai modell keretében való tárgyalásával találjuk magunkat szemben.

Helyes eredmények nyerésére ideális megoldás a gyors térbeli változások hatásának digitális szimulációjához a reaktor termohidraulikájának néhánycsatorna közelítésben való tárgyalása, valamint háromdimenziós neutronikai számítások párhuzamos végzése lenne. Ilyen számításokra alkalmas reaktorszimulátor kód nem hozzáférhető számunkra, kifejlesztése pedig túl hosszadalmas lenne. Ennek oka az, hogy egy megfelelő, egy csatorna számítására alkalmas program is eléggé hosszú, néhány csatorna közelítés tárgyalására való átalakítása pedig jelentős programfejlesztő munkát igényel [8]. Ezért hőtechnikai oldalról kiindulva nagyon távoli cél a kívánt kapcsolt kód elérése.

Ami pedig a másik oldalról, tehát a neutronika oldaláról való közelítést illeti, meg kell említeni, hogy a 2 vagy 3 -dimenziós időfüggő diffúziós kódok az irodalomból ismertek [9],[10], sőt alkalmasak egyszerűbb hőtechnikai visszacsatolások modellezésére szolgáló szubrutinok befogadására, olykor ilyeneket tartalmaznak is. Viszont ezek a hőtechnikai visszacsatolások erősen reaktortípus specifikusak, és mint láttuk, megfelelő közelítésben még egycsatorna közelítésben is maguk is hosszú programok. Ezek beépítése túl bonyolult feladat, figyelembevve azt a tényt, hogy a többdimenziós időfüggő diffúziós egyenletek numerikus megoldása önmagában is nehezebb algoritmikus problémákat vetett fel, és csak gépidőigényes algoritmusok alkalmazására van itt mód.

Mindezek alapján leszűrhető az a következtetés, hogy a célul kitűzött analízisek lefolytatását egyszerűbb modellek keretén belül célszerű elvégezni, és ezzel párhuzamosan az analízisek alkalmazhatóságáról és az elkövetett hibákról közvetlen vagy közvetett úton kell becslésekhez jutni.

3./ Az egydimenziós axiális kapcsolt számítások és hibái

Mint az előző okfejtésekből világos, az egydimenziós neutronikai analízistől várható, hogy nem túlzott időigénnyel lefuttathatók és egycsatorna közelítésben megfogalmazott termohidraulikai visszacsatolás modellel párosíthatóak. Szóba jöhet még pontkinetika alkalmazása, avagy néhánycsatorna közelítésben végzett termohidraulikai visszacsatolás alkalmazása is.

A modellválasztás kérdésében úgy kellett döntést hoznunk, hogy lehetőleg hamar juthassunk alkalmazható számítási eredményekhez. Tehát a modellválasztás annak az eldöntésére korlátozódott, hogy az elérhető egyszerűbb kapcsolt neutronikai-hőfizikai programok közül melyik használható a nyomottvizes reaktorok és ezen belül a célul kitűzött üzemzavari állapotok számítására.

A választás három kapcsolt kód tanulmányozása alapján történt. A SHOYAV [11] axiális egydimenziós kapcsolt kódról kiderült, hogy reaktorfizikai szempontból minden igényt kielégítő 4-csoportos diffúziós neutronikai modellt alkalmaz, viszont az alkalmazott hőfizikai és hidraulikai modell messze áll a nyomottvizes reaktoroktól és elsősorban gyorsreaktorok szimulációs számítására van kihegyezve. A CYLFUX kód [12] kétdimenziós R-Z geometriában számítja a neutronikát. Olyan tranziensek számítására készült, melyek során fűtőelem megolvadás is bekövetkezhet, valamint a fűtőanyag Doppler koefficiense a meghatározó. Tehát szuperprompt-kritikus megszaladások számíthatók vele. A hűtő csatorna modell szegényes. Nagyobb gépidőfelhasználása miatt ellenőrző, ill. hitelesítő számítások végzésére jön szóba. A COSTAX-BOIL kód [13] olyan axiális egydimenziós kétcsoportos neutronikai modellt tartalmaz, melynek megbízhatóságáról és alkalmazhatóságáról már vannak korábbi tapasztalataink, a termohidraulikai visszacsatolások számítására pedig a FRANCESCA [14] programot tartalmazza, mely a reaktor forralócsatornák számítására ISPRA -ban kifejlesztett eljárás; forralóvízes, valamint nyomottvizes reaktorok forralócsatornáinak számítására nem túl nagy aláhütések esetén kézenfekvő eszköz.

Mindezek alapján döntöttünk úgy, hogy a hazai kapcsolt reaktordinamikai számításokat a COSTAX-BOIL kód bázisán indítjuk el. Így került kidolgozásra, és alkalmazásra a LINCUP kód, mely a COSTAX-BOIL kód honosított változatának tekintendő.

A LINCUP kód [15] használatához a következő adatok megadására van szükség:

- a./ a reaktort leíró anyagállandókra és függvényekre;
- b./ a vizsgálandó tranziens kiindulási állapotát jellemző kezdeti feltételekre;
- c./ a tranziens állapotot kiváltó peremfeltételek megadására. E peremfeltételek vonatkozhatnak a reaktor hidraulikai csatlakozási pontjaira, vagy pedig a szabályozás működésére.

A számítási eredményekben mutatkozó hibák vagy az adatokból, vagy a modellezésből származnak. Az adatok hibáiról kell beszélnünk akkor, amikor a primerkörnek a tranziens kialakítására való visszahatása nem kellő figyelembevételéről, vagy pedig nem kellően pontos anyagállandók választásáról van szó. A modellezés hibái főképpen két szempontból érdemelnek figyelmet: először is meg kell majd bizonyosodni arról, hogy a radiális fluxuselozlás és változásai mennyire hatnak a kapott eredményekre és alkalmazhatóságukra, másodsor meg kell becsülni, hogy az aláhűtésnek, illetve bizonyos anyagi állandókra való hatásának elhanyagolása elfogadható mérvű hibákra vezet-e. A radiális fluxuselozlással kapcsolatos probléma előreláthatólag tanulmányozható a már említett CYLFUX kóddal, az aláhűtéssel kapcsolatos problémák vizsgálata a HOTRAN-3 kóddal [8] való összevetés alapján történhet.

4./ A LINCUP program

A LINCUP program axiális egydimenziós kapcsolt neutronikai-hőtechnikai kód, amely időfüggő és stacioner számítások végzésére alkalmas. A modellalkotás kiterjed a mértékadó fűtőelemrúdban a radiális irányban fellépő hőmérsékletmező és hővezetés leírására is. A program főbb jellemzői:

Memóriaigénye: R40 gépen 170 kbyte

Jellemző fűtésidő: R40 gépen 5-10 perc

Neutronika: kétsoport időfüggő neutronfluxus tetszőleges ≤ 10 számú késő neutroncsoporttal, axiális eloszlásban.

Axiális rácspontfelosztás: egyenközü, max. 100 rácsponttal valamennyi alkalmazott modellben egyenértékűen.

Radiális rácspontfelosztás: a fűtőelem sugara mentén tetszőleges ≤ 10 rácspont, a hővezetési modellben.

Programozási nyelv: FORTRAN-IV.

4.1./ A LINCUP program munkájának szervezése

A program főcélja időfüggő, azaz tranziens folyamatok szimulációja. Erre csak úgy van lehetőség, ha az alkalmazott tranziens modellekkel konzisztens kiinduló állapotból indítható a szimuláció. Ilyen konzisztens állapotot leíró adatmező /állapotvektor/ csak magával a LINCUP kóddal állítható elő üzembiztosan. Ezért a LINCUP kód munkájának a szervezése az alábbiak szerint történik:

a./ adatmező beolvasása, modifikálása az aktuális futtatás céljára.

b./ kritikussági számítás végzése abból a célból, hogy a beállítandó kritikus állapot konzisztens kezdőállapotként szolgáljon a további dinamikai számításokhoz.

A kritikussági számítás kétszeresen egymásba skatulyázott iterációkat tételez fel, melynek során a többféleképpen megválasztható kritikussági paraméter meghatározásán túlmenően az egyensúlyi fluxusprofil, valamint a hozzá tartozó termohidraulikai állapotvektor is meghatározásra kerül a belső, ill. a külső iterációk során. Az iterációkhoz kezdőérték megadására is van szükség, mivel a kritikussági paraméter meghatározása módosított hurmódszerrel történik.

c./ az időfüggő folyamat szimulációja a kritikus állapotból indul. A külső perturbációkat és peremfeltételeket minden egyes számítási időpontban az adattáblázatokon végzett lineáris interpolációval állítja elő. A számítás során különféle gyakorisággal számítja ki a program a fluxusmezőt és a hőfizikai mezőket az adatokkal vezérelhető módon. A kétcsoportállandók ujraregenerálása, azaz a hőfizikai visszacsatolás újraszámítása a ritkább hőfizikai számítási lépéseket követi.

A program többféle lehetőséget nyújt az egyes számítási eredmények időfüggésben történő nyomtatására, így különféle felhasználói igények elégíthetők ki.

A program e funkciókat számos szubrutin segítségével látja el, melyeknek hívási sémája az 1. ábrán látható.

4.2./ Az alkalmazott fizikai és matematikai modellek

Az alkalmazott fizikai és matematikai modellek az atomreaktor és reaktorzónájának meghatározott geometriai reprezentációján épülnek fel. A geometriai reprezentáció egy speciális alkalmazási esetben látható a 2. ábrán.

Ábránkon a $/H_1, R_1/$ értékpárral jellemezhető a hengeres aktív zóna, melyet a $/H_2, R_2/$ értékpárral jellemezhető hengeres reflektor foglal magában. A programban a függőleges, axiális dimenzióban vannak felírva a fontosabb egyenletek. Az R_1, R_2 radiális adatok közvetlenül nem szerepelnek a program adatai között, bár néhány adat előzőleg számítására felhasználandóak. Az axiális egyenletek megoldására differenciasémák szolgálnak. Az ábrából leolvasható módon e differenciasémák alappontrendszerre ekvidiatáns pontsor Δz rácsozottsággal úgy, hogy az első és az utolsó rácspont az axiális reflektor külső effektív határára kerül. Ide ugyanis zerus fluxushatárfeltételek kerülnek felírásra. A radiális neutronkiszökés figyelembevételére a program egyetlen transzverzális buckling érték megadását teszi lehetővé.

Az axiális rácspontok közül néhány kiválasztható abból a célból, hogy eltérő anyagi összetételű zónák elválasztására szolgáljanak. Esetünkben 5 különféle zónát tüntettünk fel, amelyek közül az I, IV és V sorszámú éppenséggel reflektor, a II és III sorszámú pedig hasadóanyagot tartalmazó aktív reaktorzóna esetleges hőfejlődéssel. Ábránkon egyetlen reprezentáns hűtőcsatornát tüntettünk fel a benne található hengeres fűtőelemmel. Jelöltük, hogy esetünkben a hűtőközeg felülről lefelé áramlik, jóllehet a kód ellenkező irányú áramlás kezelésére is alkalmas. Hasonlóképpen az ábrázolt szabályozórúd is két irányból mozoghat be a zónába. A kód a szabályozórúd hatását radiá-

lisan kiátlagolva veszi figyelembe equivalens abszorpciós hatáskeresztmetszet segítségével.

A reaktorfizikai vagy neutronikai modell a kétcsoport időfüggő diffúziós egyenletekkel /1/, /2/ és a hozzájuk kapcsolt, a késő neutron anyagokra felírható egyenletekkel /3/ kerül megfogalmazásra a szokásos jelölésekkel az alábbiak szerint:

$$\begin{aligned} \frac{1}{w(z)} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \phi_1(z,t) = & \nabla(D_1(z,t) \cdot \nabla \phi_1(z,t)) - \left[\sum_{a_1}(z,t) + \sum_{s_1}(z,t) + \sum_{g_1}(z,t) + \right. \\ & \left. + \sum_{k_1}(z,t) + D_1(z,t) \cdot B^2 \right] \phi_1(z,t) + (1-\beta) \left[\sum_{p_1}(z,t) \cdot \phi_1(z,t) + \right. \\ & \left. + \sum_{p_2}(z,t) \cdot \phi_2(z,t) \right] + \int_j \lambda_j \cdot C_j(z,t) \end{aligned} \quad /1/$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{v(z)} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \phi_2(z,t) = & \nabla(D_2(z,t) \cdot \nabla \phi_2(z,t)) - \left[\sum_{a_2}(z,t) + \sum_{g_2}(z,t) + \right. \\ & \left. + \sum_{k_2}(z,t) + D_2(z,t) \cdot B^2 \right] \cdot \phi_2(z,t) + \sum_{s_1}(z,t) \cdot \phi_1(z,t) \end{aligned} \quad /2/$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C_j(z,t) = \beta_j \left\{ \sum_{p_1}(z,t) \cdot \phi_1(z,t) + \sum_{p_2}(z,t) \cdot \phi_2(z,t) \right\} - \lambda_j \cdot C_j(z,t) \quad /3/$$

A jelölésekre nézve lásd pl. [15]. Egyes lényegesebb definitív összefüggések:

$$\sum_{g_j}(z,t) = \sum_{g_{j0}} f_1(I) + \sum_{g_{j2}}(I) \cdot f_2(t) \quad j=1,2 \quad /4/$$

ahol

$$f_1/I/ = \begin{cases} 0 & \text{megadott I zónaindexekre} \\ 1 & \text{különben} \end{cases}$$

$$f_2/t/ = \text{törtvonallal adott időfüggvény.}$$

Ezek az összefüggések homogén vagy ahhoz hasonló lemérgezések számítására alkalmasak. A szabályozórudak figyelembevétele a $\Sigma_{k1}/z,t/$ és a $\Sigma_{k2}/z,t/$ hatáskeresztmetszetekkel történik.

$$\beta = \sum_j \beta_j \quad \text{az összes késő neutron hányad.}$$

A neutronprodukciónak hatáskeresztmetszetek értelmezése:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma_{p1}(z,t) &= (1+\delta k) \nu \Sigma_{f1}(z,t) \cdot (1+\delta k_c) \\ \Sigma_{p2}(z,t) &= (1+\delta k) \nu \Sigma_{f2}(z,t) \cdot (1+\delta k_c) \end{aligned} \right\} /5/$$

ahol

$$\delta k = \delta k_{\text{DOPPLER}} + \delta k_{\text{void}} + \delta k_{\text{TMOD}} \quad /6/$$

A /6/ formulában szereplő mennyiségek veszik számításba pontosan a hőfizikai visszacsatolást a fűtőelem keresztmetszetre átlagolt u.n. urán-hőmérséklet, a moderátorhőmérséklet és gőzvoid függvényében. A program változatos lehetőséget biztosít a formulák alakjára is.

A hőfizikai modellválasztáson belül a mértékadó fűtőelemrud keresztmetszetének megadása a 3. ábra szerint történik. A hasadóanyagban hővezetési egyenlet megoldására kerül sor, mely-

ben a fajhő és hővezetési tényező a hőmérséklet másodfoku függvényeként adható meg. A részben a hőellenállást meg kell adni. A burkolatban a metodika azonos a fűtőanyagban való hővezetés számításának metodikájával, de definit módon 2 drb. rácspont van felvéve a burkolat külső és belső felületén, míg a fűtőanyagban a rácspontok száma 10-ig szabadon választható.

A hőfizikai modell részletesebb leírása megtalálható G. Forti egy korábbi munkájában [16]. A hőátadás és a kétfázisú áramlás, gőzfejlődés és rekondenzáció egyenletét itt most csak vázlatosan ismertetem.

A hőforrás a hőátadás és a direkt belső hőfejlesztés /neutron termalizáció miatt/ összegeként írható fel:

$$Q = \frac{p \cdot}{A} \cdot \varnothing + Q_{\text{dir}} \quad /7/$$

ahol p a hőátadó kerület, A a fűtőcsatorna keresztmetszete, \varnothing a felületi hőfluxus.

Az energiamegmaradás egyenlete a hűtőcsatornában:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = Q - \frac{\partial L}{\partial z} \quad /8/$$

ahol E a hűtőközeg energiasűrűsége, L pedig a hűtőáramlás energiaárama a következő formulákkal értelmezve:

$$E = \varrho_{\text{liq.}} \cdot H \cdot /1 - \alpha/ + \varrho_{\text{vap}} \cdot R \cdot \alpha \quad /9/$$

$$L = \varrho_{\text{liq}} H \cdot /1 - \alpha/ \cdot v_{\text{liq}} + \varrho_{\text{vap}} \cdot R \cdot \alpha \cdot v_{\text{vap}} \quad /10/$$

Az áramlás incompressibilitását feltételezve a continuitás egyenlete a keverékre:

$$\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\rho_{\text{liq}} - \rho_{\text{vap}}}{\rho_{\text{liq}}} \cdot \psi \quad /11/$$

ahol

$$W = \alpha \cdot V_{\text{vap}} + (1 - \alpha) \cdot V_{\text{liq}} \quad /12/$$

és ψ a keveréktérfogat forrástagja, melyet a fázisváltás okoz. Az aláhűtött forrás tartományában ennek számítására korrelációk szolgálnak.

A continuitás egyenlete a gőzfázisra:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \psi - \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \cdot V_{\text{vap}}) \quad /13/$$

Az alkalmazott korrelációk:

A slip korreláció Bankoff és Jones szerint ([17], [18]):

$$\alpha \cdot V_{\text{vap}} = \frac{\alpha}{K} \cdot W - \frac{Z_e}{K} \cdot \psi_s \quad /14/$$

ahol

$$K = 0.71 + 0.29 \frac{p}{p_{\text{cr}}} \quad /15/$$

a Bankoff koefficiens a nyomás lineáris függvényeként megadva, Z_e tapasztalati állandó, ψ_s pedig a felületi gőzfejlődésből származó térfogat forrástag.

Korrelációk a keveréktérfogat forrástagjára:

$$\psi = \psi_{\text{surf.}} + \psi_{\text{balk}} \quad /16/$$

ahol

$$\psi_s = \gamma \cdot \frac{p}{A} \cdot \frac{\sigma_b}{\rho_{\text{vap}} \cdot R} \quad /17/$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \varepsilon}, \quad \varepsilon > 0 \quad \text{Bowring [19] szerint, /18/}$$

$$\Psi_b = \begin{cases} R_0 \cdot \alpha \cdot /T_{liq} - T_{sat}/ & \text{ha } T_{liq} < T_{sat} \\ R_1 \cdot \alpha \cdot /T_{liq} - T_{sat}/ & \text{egyébként} \end{cases} \quad /19/$$

ahol R_0 és R_1 tapasztalati állandók.

A felületi hőátadás korrelációi:

$$\begin{aligned} \varnothing &= h /T_{surf} - T_{liqv}/ \\ \text{ha } /T_{surf} - T_{sat}/^2 &\leq \varnothing /T_{surf} - T_{liqv}/ \end{aligned} \quad /20/$$

ahol \varnothing tapasztalati érték, a felület szükséges túlhevítése a buborékos forrás elindulásához, telített hűtőközeg esetén.

Ha $/T_{surf} - T_{sat}/^2 > \varnothing /T_{surf} - T_{liqv}/$, akkor

$$\varnothing = \varnothing_{boil} + \varnothing_{conv} \quad /21/$$

ahol

$$\varnothing_{boil} = h' \cdot /T_{surf} - T_{sat}/^n \quad /22/$$

$$\varnothing_{conv} = \left\{ h /T_c - T_{liqv}/ - h' \cdot /T_c - T_{sat}/^n \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{T_{surf} - T_c}{\varnothing_f - \varnothing} \right\} /23/$$

$$T_c = \frac{\varnothing}{2} \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{4/T_{liqv} - T_{set}/}{\varnothing}} \right\} \quad /24/$$

$$\varnothing_f = 1.4^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{h}{h'} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad /25/$$

A fenti formulákban h a konvektív hőátadás tényezője, mely praktikusán számítható a

$$\frac{h \cdot D}{K} = Nu = c \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad /26/$$

összefüggésből.

A falsurlódás tényezőjére a Lokhart-Martinelli összefüggés [20] nyer alkalmazást.

5./ Adatmező kidolgozása a balesetek analiziséhez

A LINCUP kód futtatásához olyan adatmező kidolgozására van szükség, melynek csekély módosítása útján valamennyi vizsgálandó esethez a program inputja elkészíthető. Ezt az adatmezőt mutatja be az 1. Táblázat. A táblázat a [15] programleírás alapján értelmezhető pontosan. Most az adatok összeállításakor felhasznált főbb forrásokat és alkalmazott megfontolásainkat fogjuk ismertetni főbb vonásokban. A zárójelbe tett számok az adatnak az adatmezőben való helyét jelentik.

5.1./ Geometria és rácspontkiosztás

Az axiális egyenközű rács rácspontjainak száma 45 /3/. Az aktív zóna az 5. rácsponttól /62/ a 41.-ig /63/ tart alulról fölfelé, így kb. 28 cm -es reflektort vettünk figyelembe axiális irányban. A fűtőanyagban a radiális rácspontok száma 5 /452/

5.2./ Reaktorfizikai adatok

Az aktív zóna és a reflektorok rácspont diffúziós állandóinak /81 - 116/ értékét [1] alapján vettük fel, az ott közölt névleges állapotnak megfelelően, ami 964 °C uránhőmérséklet /16/ és 270 °C hűtővízhőmérséklet /15/, valamint 0 % void. A sugárirányú kiszökést 0.00025 /10/ cm⁻² radiális bucklinggel vettük figyelembe.

A Doppler visszacsatolást lineáris tényezővel /15,301/ vettük figyelembe, melynek értékét [21] alapján vettük fel 0.5 g/kg bórkoncentráció feltételezésével. Valamennyi visszacsatolási együtthatót e módszerrel konzisztensen vettünk fel.

A szabályozóköteget egyenértékű abszorpció hatás keresztmetszettel vettük figyelembe /1620/. Ennek értékét ellenőrző futtatások sorozatával vettük fel úgy, hogy hőtechnikai visszacsatolás nélkül az asszimptotikus felfutási periódus a kb 0.7 β reaktivitáshoz tartozó periódusnak feleljen meg. Erre a "kísérleti numerikus" módszerre voltunk utalva, mivel a lineáris modellben exaktul nincs értelmezve a reaktivitás.

Az adatmező összeállítása olyan, hogy értelmében a szabályozóköteg a 0.9 -től 1.1 sec /1621 - 1622/ reálidő alatt, tehát 0.2 sec alatt egyenletes sebességgel fut végig az aktiv hosszon. Tehát az adatmező alapértelmezésben a szabályozóköteg kilökődés vizsgálatára szolgál.

5.3./ Hőtechnikai adatok

Az 1375 MW kezdeti összhűtőteljesítmény /12/ 43974 /13/ átlagos csatornára oszlik el. A forralócsatorna keresztmetszete 0.69 cm² /501/, a fűtőelem méretei névlegesek. A gap hőellenállása $5 \frac{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{watt}}$. A pellet hővezetési tényezőjének és fajhőjének számítására másodfokú közelítő formulákat használtunk.

A hűtőviz anyagi állandóiként a következő adatokat adtuk meg:

/525/ T_{sat}	/526/ ρ_{viz}	/527/ $\rho_{\text{gőz}}$	/528/ C_p	/529/ R
326.28 °C	0.7804 gr/cm ³	0.07205 gr/cm ³	5.115 J/gr °C	1181.3 J/gr

A zónába belépő víz hőmérséklete állandó és 267 °C /519/. A belépőviz sebessége stacioner állapotban 390 cm/sec /520/, amely a $t = 2.0$ sec időponttól kezdve 30 sec periódusidőnek megfelelően megszerkesztett törtvonal szerint csökken. Ez a megadás hivatott arra, hogy a primerköri főkeringtető szivattyúk közel egyidejű kiesésének befolyását megadják. Az alap-

értelmezésben nincs figyelembevéve az, hogy néhány másodperccel a tranziens kezdete után a beáramló víz hőmérséklete is meg fog változni. Ez a megváltozott hőmérséklet felvehető más program, esetünkben például a RELAP4/MOD3 futtatási eredményeiből, mivel e kód a teljes primer kör hőmérsékletviszonyainak alakulását is szimulálja.

6./ Számítási eredmények és értékelésük

Az összeállított adatmező alapértelmezésben arra szolgál, hogy segítségével számítható lehessen a reaktor válasza egy szabályozóköteg belökődésére. Az adatmező alapján a számításokat elvégeztük. A nagymennyiségű számítási eredmény illusztrációjaként bemutatjuk a 4. ábrán a reaktor teljesítmény válaszát, a RELAP4/MOD3 programmal nyerhető eredményekkel összevetve. Az eredmények egyezése jónak mondható. Az eltérések kicsinyek: a LINCUP program szerint a teljesítmény valamivel meredekebben fut fel, a csucsteljesítmény értéke és időpontja már jobban egyezik, a teljesítmény csökkenése kezdetben mindkét számítás szerint azonos módon történik, de nagyobb időkre a RELAP4/MOD3 számítások kisebb teljesítményt adnak. Ennek valószínű oka, hogy a LINCUP számításokban nincs figyelembevéve a reaktorba belépő víznek a tranziens folyamán való hőfoknövekedése.

Mindkét számítás szerint a teljesítménycsúcs a normális teljesítmény mintegy 2.7 -szerese, a csúcs pedig közvetlenül a zavarási tranziens, azaz a szabályozóköteg kilökődés befejezte után lép fel. Ezek a tények arra utalnak, hogy az 1 % reaktivitásnál kisebb perturbációk esetén a kitörést, azaz a neutronvillámot alapvetően a visszacsatolások nem abban az értelemben fogják meg, ahogyan ez kézenfekvőnek látszik egy reaktorfizikus számára, hanem jelentős szerepe van a teljesítményfelfutás megszűnésében annak, hogy a perturbáció során a késő neutron anyag populációk nem értek rá felépülni.

A számítások azt mutatják, hogy néhány másodpercen belül a

nukleáris teljesítmény a névleges teljesítmény alá csökken. Az első másodpercekben a hasadóanyag hőmérsékleti visszacsatolásának a szerepe dominál, a nukleáris teljesítmény lecsengésével azonban egyre inkább az alámoderált reaktorzóna moderátor hőmérsékleti visszacsatolása jut szerephez. A hőmérsékletek emelkedése a számítások szerint nem veszélyes, összhangban az irodalmi forrásokban találhatóakkal /lásd pl. [22] /.

Egy számítási sorozatban megvizsgáltuk azt, hogy a szabályozóköteg kilökődés következményei hogyan függenek a kilökődés sebességétől. Tekintettel arra, hogy 0.7 % -os kötegreaktivitás esetén a következmények mindig "szelidek", feltételeztük azt, hogy két köteg egyszerre lökődik ki. A fellépő csucsteljesítményt a kötegeknek a zónán való áthaladási ideje függvényében az 5. ábrán mutatjuk be.

Látható, hogy a tizedmásodpercek tartományában a csucsteljesítmény értéke - nominális teljesítmény egységekben mérve - kb. az 5 - 35 tartományban mozog. A századmásodpercek tartományában már nincs lényeges változás. Tehát a teljesítménycsucs szempontjából lényeges ismerni azt, hogy a kötegek kilökődés hány tized másodperc alatt megy végbe.

Vizsgálataink szerint a zóna többi paramétere - hőmérsékletek, gőztartalom - már nem ilyen érzékeny erre a zavarásra.

7./ Záradék, köszönetnyilvánítás

Mint e jelentés bemutatja, a hidegütés és szabályozóköteg kilökődés téma művelése a tervek szerint eljutott odáig, hogy adatmező áll rendelkezésre e tranziensek axiális egydimenziós szimulációjához, működőképessé e célra a LINCUP neutronikai-hőtechnikai kapcsolt kód is, és a számítások a szabályozóköteg kilökődés vizsgálatára megkezdődtek alapján helyes eredményekkel. A hidegütés számításának jelenleg már nem látjuk

akadályát. Ugyancsak megtörténtek az első lépések az eredmények kritikai értékelésére is. A következő évben kerül sor a téma részletes kidolgozására.

A szerzők köszönetüket fejezik ki dr. Szabados László főosztályvezetőnek a téma iránti állandó érdeklődéséért, dr. Maróti László és dr. Gadó János osztályvezető helyetteseknek az értékes diszkusszióért, megjegyzésekért, valamint azon kollegáinknak, akik a munkában segítségünkre voltak.

Tartalomjegyzék

	<u>Oldal</u>
1./ Bevezetés	1
2./ A hidegütés és a szabályozóköteg kilökődés számítási lezetőségei	2
3./ Az egydimenziós axiális kapcsolt számítá- sok és hibái	4
4./ A LINCUP program.	6
4.1. A LINCUP program munkájának szervezése.	7
4.2. Az alkalmazott fizikai és matematikai modellek	8
5./ Adatmező kidolgozása a balesetek anali- ziséhez	14
5.1. Geometria és rácspont kiosztás	14
5.2. Reaktorfizikai adatok	14
5.3. Hőtechnikai adatok	15
6./ Számítási eredmények és értékelésük	16
7./ Záradék, köszönetnyilvánítás	17
Tartalomjegyzék	19
Irodalomjegyzék	20
Táblázat, ábrák	23

Irodalomjegyzék

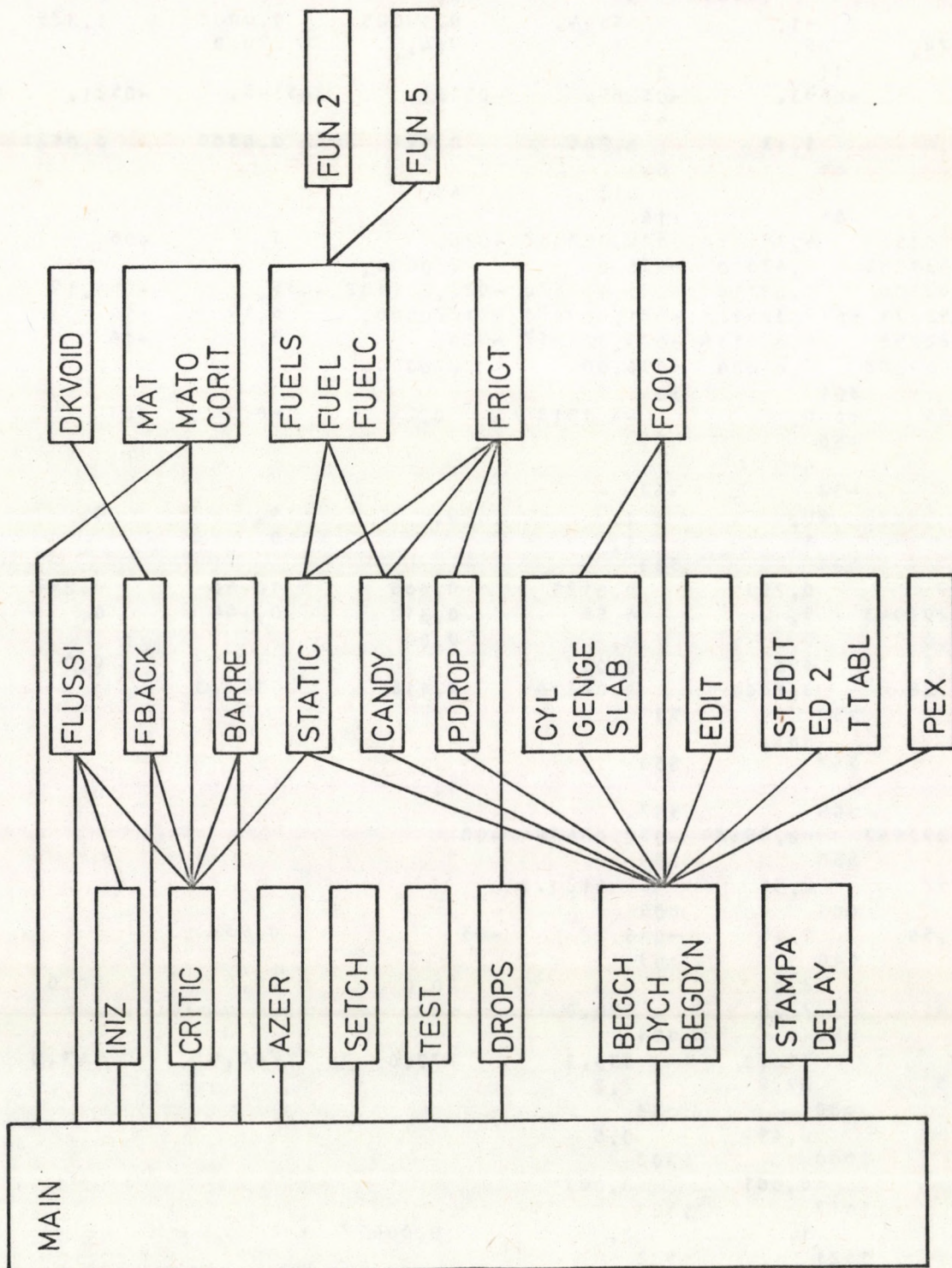
- [1.] L. Perneczky, I. Tóth, J. Vigassy: Formulae for Thermal Feedback of Group Constants in Digital Reactor Simulation.
Report: KFKI - 76 - 3
- [2.] Prof.Dr.sc.techn. G. Ackermann, H. Melchior: Termo-hidraulikus vizsgálatok VVER típusu nyomottvizes reaktorokon üzembehelyezés közben.
C.II. Atomtechnikai Szimpózium anyaga, Paks, 1981.09.10-12. I-II. témacsoport, 393-408 oldal.
- [3.] Dr.Benedek Sándor: Einige Fragen der wärmetechnischen Berechnung des Primärkreislaufs eines Kernkraftwerksblockes.
Kernenergie, 23 /1980/ 129-131.
- [4.] Dr.Benedek Sándor: A Computer Code for Nuclear Reactor Core Thermal Transients.
Kernenergie, 21 /1978/ 29-34.
- [5.] DINAMIKA - BESZM - 6 számítógépre irt program a VVER reaktorokkal épített atomerőművek tranzienseinek számítására.
GKAE /Szovjetunió/ B-004, 1977. Orosz nyelven.
- [6.] A.I. Müszenkov: MOST-7 - programma dla raszcsota nyesztacionarnük rezsirnov APPY sz VVER.
Moszkva, 1979. /Orosz nyelven./
- [7.] K.V. Moore - W.H. Retting: RELAP4 - A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis.
ANCR - 1127, UC - 32, December, 1973.

- [8.] Pernecky L.: HOTRAN-3, Program a reaktorzóna termohidraulikai vizsgálatára háromsatorna közeli-tésben.
KFKI - 1979 - 26.
- [9.] Nuclear Program Abstracts of the NEA DATA BANK, SERIE-NEA/IAEA. FULL REVISION - JULY - 1981.
NEA/OECD, Gif sur Yvette CEDEX
- [10.] OECD NEA DATA BANK ABSTRACTS, NESC FULL REVISION - NOVEMBER - 1980.
NEA/OECD, Gif sur Yvette CEDEX
- [11.] D. Shapier - S. Yiftah: A Program to Solve the Few Group Space Time Dependent Diffusion Equation with Temperature Feedback.
Israel Atomic Energy Commission. IA-1217-1971.
- [12.] A. Schmidt: PIMFUX - Ein 3-Dimensionales Rechenmodell zur Simulation von Reaktivitätsstörfällen nach der Zweigruppen-Diffusionstheorie.
MRR 88, August 1971.
- [13.] G. Forti: COSTAX-BOIL - A Computer Programme of the Costanza Series for the Axial Dynamics of the BWR and PWR Nuclear Reactors.
EUR - 4497.e - 1970.
- [14.] G. Forti: FRANCESCA - A Dynamics Program for Boiling Cooling Channels.
EUR - 4241.e - 1969.
- [15.] Vigassy József: LINCUP - Számítógépi program vizzel moderált atomreaktorok axiális dinamikájának számítására.
KFKI - 1982- /Megjelenés alatt/

- [16.] G. Forti: A Dynamic Model for the Cooling Channels of a Boiling Nuclear Reactor with Forced Circulation and High Pressure Level.
EUR - 4052.e - 1968.
- [17.] Bankoff: A variable density single-fluid model for two-phase flow with particular reference to steam water flow.
Trans. of the ASME Series C 82, 4 /1960/
- [18.] Jones: Hydrodynamic stability of a boiling channel.
KAPL 2170 /1961/
- [19.] Bowring: Physical model, based on bubble detachment, and calculation of steam voidage in the sub-cooled region of a heated channel.
HPR-29, Inst.of Atomenergi, Kjeller /1962/
- [20.] Lokhart and Martinelli: Proposed correlation of data for isothermal two phase component flow in pipes.
Chem.Engn.Progr. 45, pag. 39 /1949/
- [21.] Paksi Atomerőmű - II. Műszaki Terv IX. rész.
Atomerőmű biztonságának műszaki értékelése
IX/1 kötet, Műszaki leírás. /1976/
- [22.] J.H. Bowen: Thermal Reactor Safety./Reactivity faults/
In monograph for Nuclear Reactor Safety
Edited by F.R. FARMER
Academic Press N.Y. San Francisco, London 1977
pp. 174.

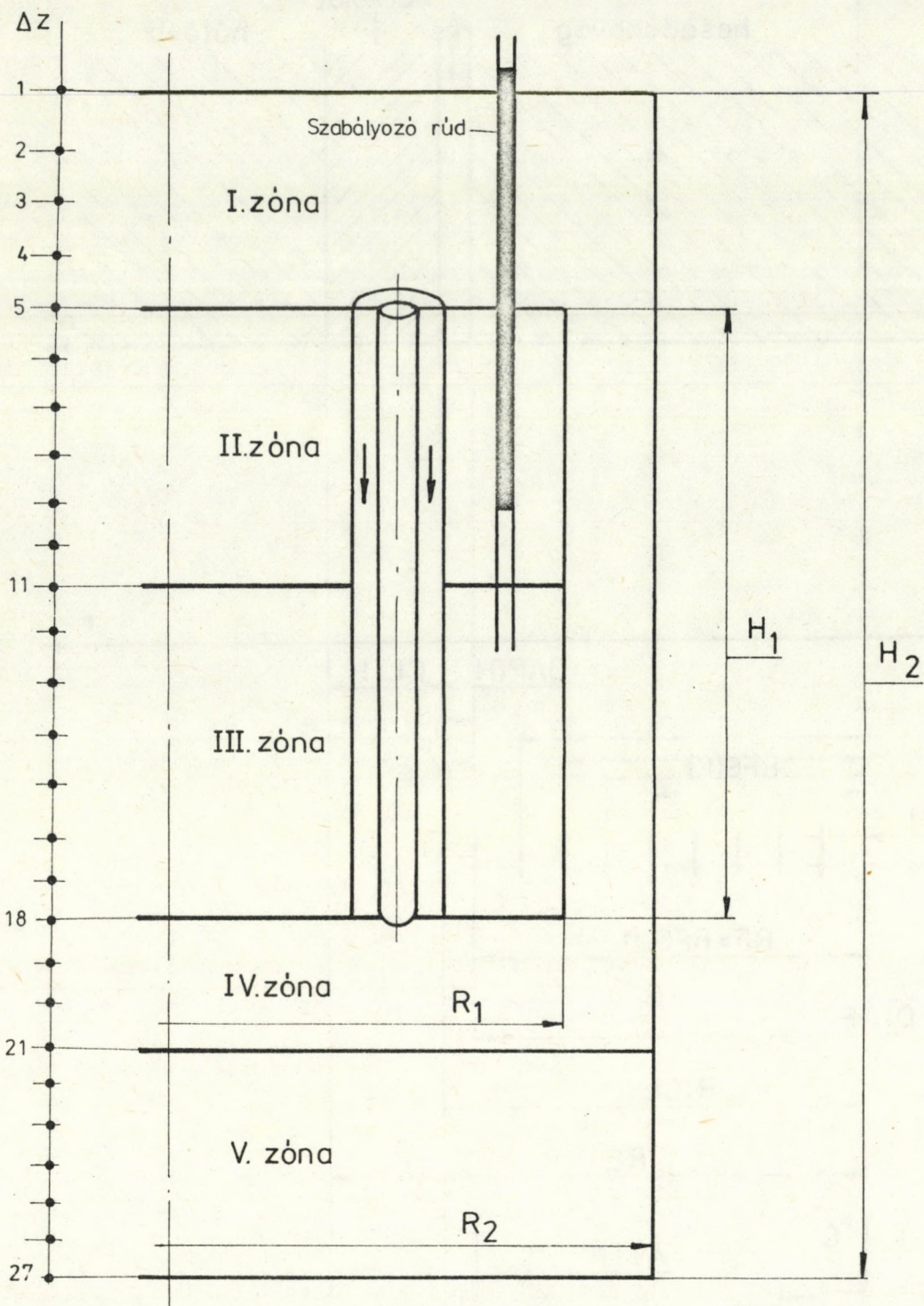
KAZETTA BELOKODESI PROBLEMA, ALAPFUTAS,

1	1	17	3	6	30	
0,01	6,9444444	45,	3,	6,	30,	
1,	-1,	65144,	0,00025	0,0001	1,375	+09
43974,	5,	-1,	964,	270,0		
	31	36				
30,	-0583,	-05269,	-05131,	-05145,	-0521,	-05
	41	45				
5,	1,13	0,301	0,111	0,0305	0,0124	
	61	64				
1,	5,	41,	45,			
	81	116				
1,620250	4,371116	-024,327057	-020,	5,	+06	
0,2439288	9,63000	-030,00	270000,			
1,362600	2,221168	-021,160470	-027,201182	-035,	+066,19	-14
4,192071	-019,324782	-021,607273	-01270000,	6,19	-14	
1,620250	4,371116	-024,327057	-020,	5,	+06	
0,2439288	9,63000	-030,00	270000,			
	301	306				
-0,34	-040,	-0,1318	0,	-0,54	-03	
	450	451				
5,	41,					
	452	462				
5,	20,	1,	0,	1,	0,	
0,	1,	1,		0,		
	501	530				
0,69	0,755	0,0125	0,065	10,40	0,297	
0,0292943	5,	6,55	0,312	0,164	0,	
300,0	0,	0,	0,05			
267,5	390,	0,0171			0,0	
326,28	0,7804	0,07200	5,115	1181,3		
	538	539				
50,	-65,					
	547	550				
30,			1,			
	555	557				
0,0292943	-2,85566	-052,08674	-08			
	558	560				
0,297	2,51	-6 6120,0				
	601	605				
122,56	1,15	-035,22	-03	0,937		
	640	643				
0,0	2,0	5,0	10,0	20,0	30,0	
50,0	70,0	120,0				
	650	653				
0,0	390,0	330,0	279,0	200,0	143,0	
73,5	37,9	7,2				
	680	682				
0,	0,499	0,5				
	1600	1602				
50,	0,001	0,001				
	1617	1620				
-1,	1,	0,	0,00477			
	1621	1622				
0,9	1,1					
	1700	1702				
27,7777777777	27,7777777777	27,7777777777				
-1	1851	1855				
2300,	5,	3,	100,	2,		



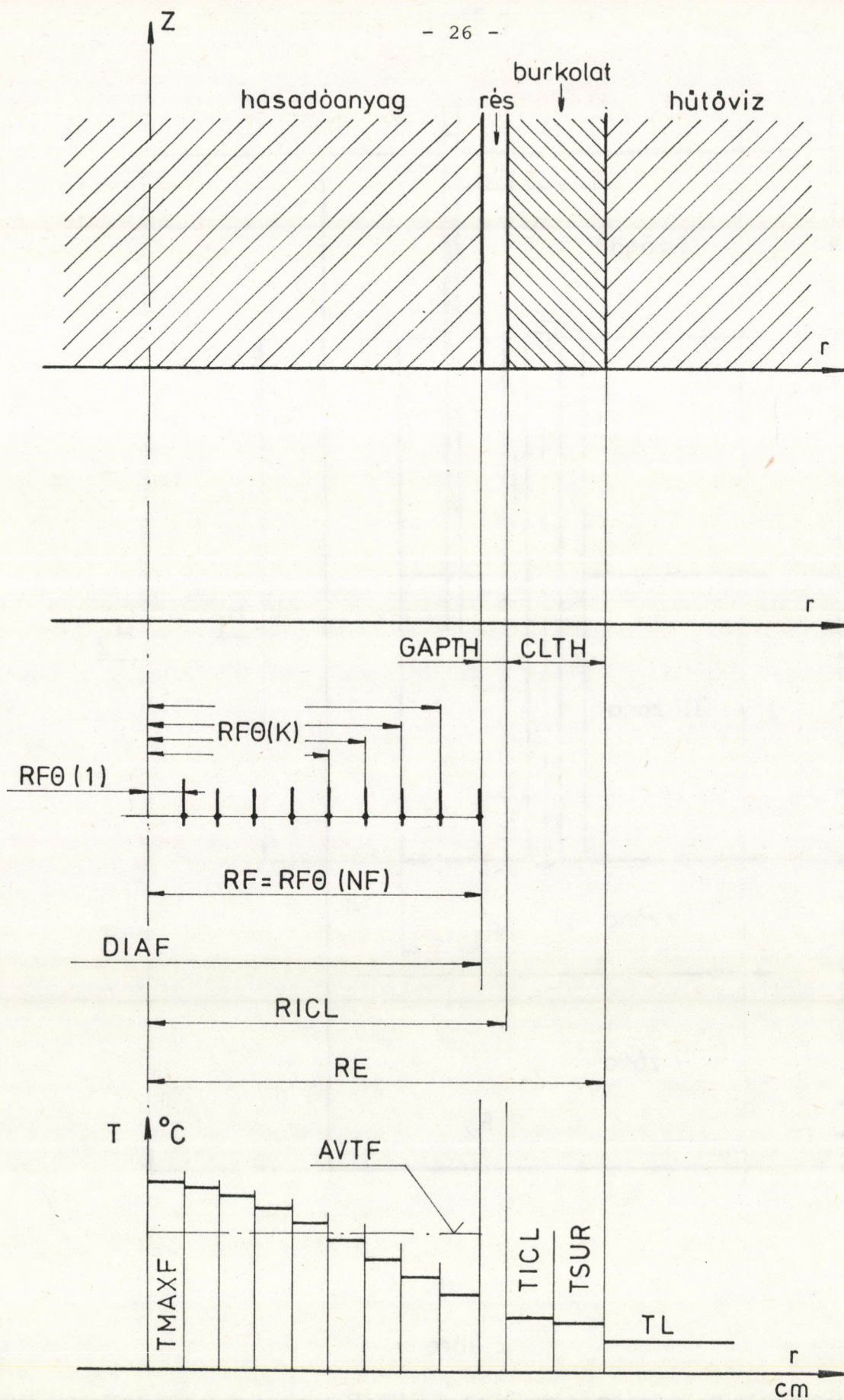
1. ábra

A LINCUP program blokkdiagramja



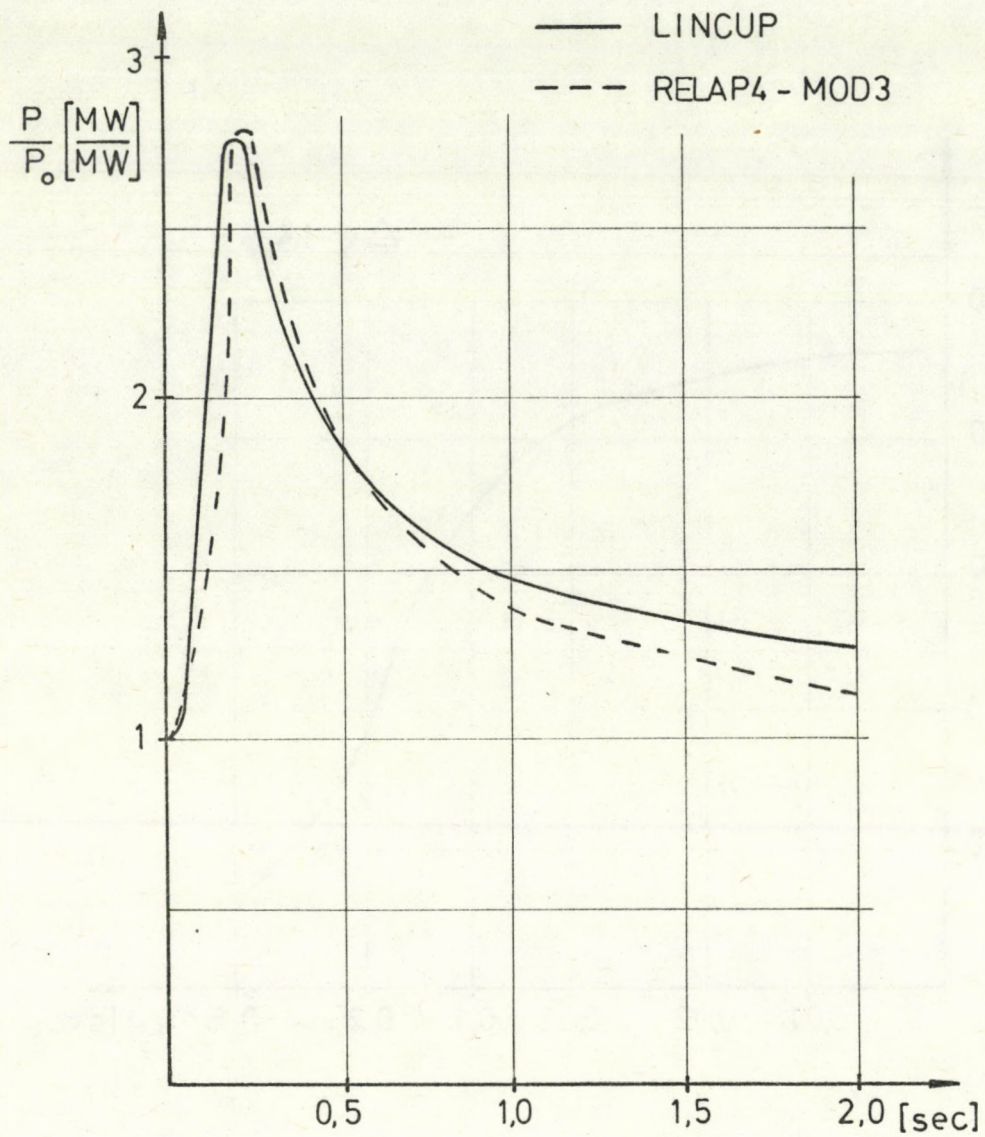
2. ábra

Geometriai reprezentáció a LINCUP program modellalkotásában



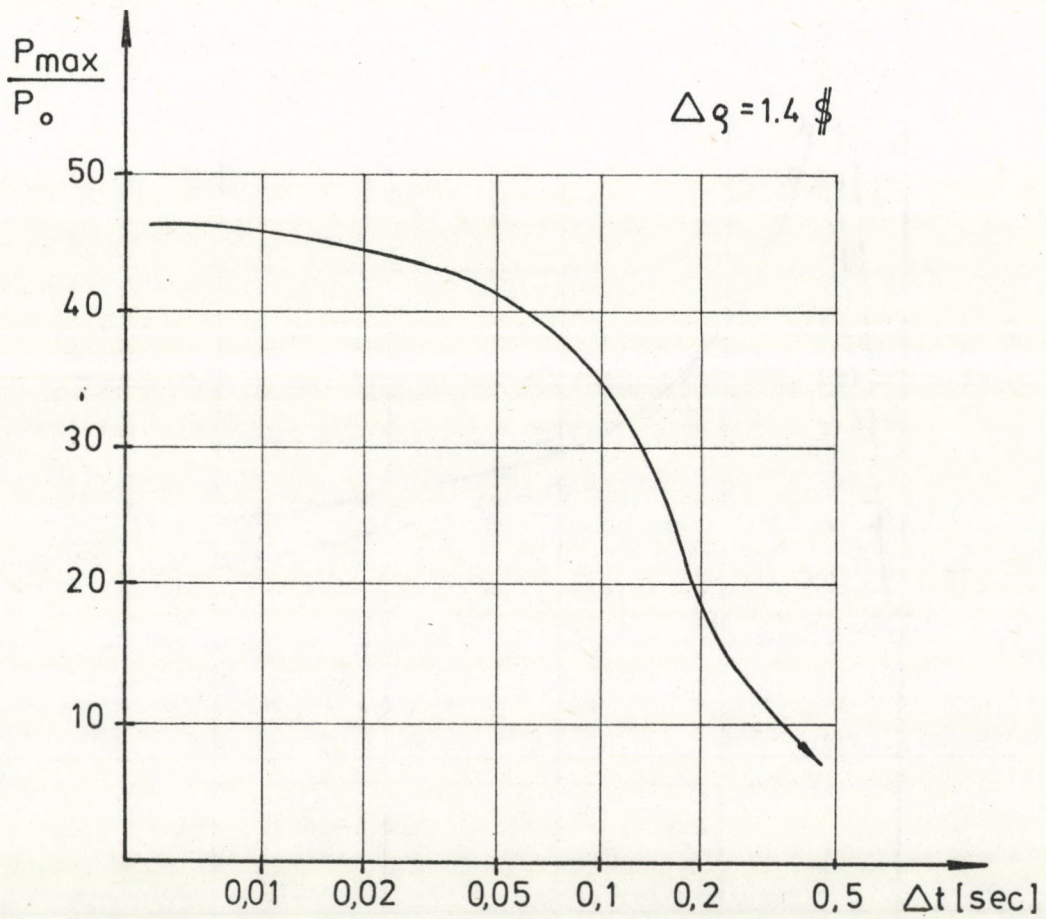
3. ábra

Fűtőelem modell a LINCUP programban



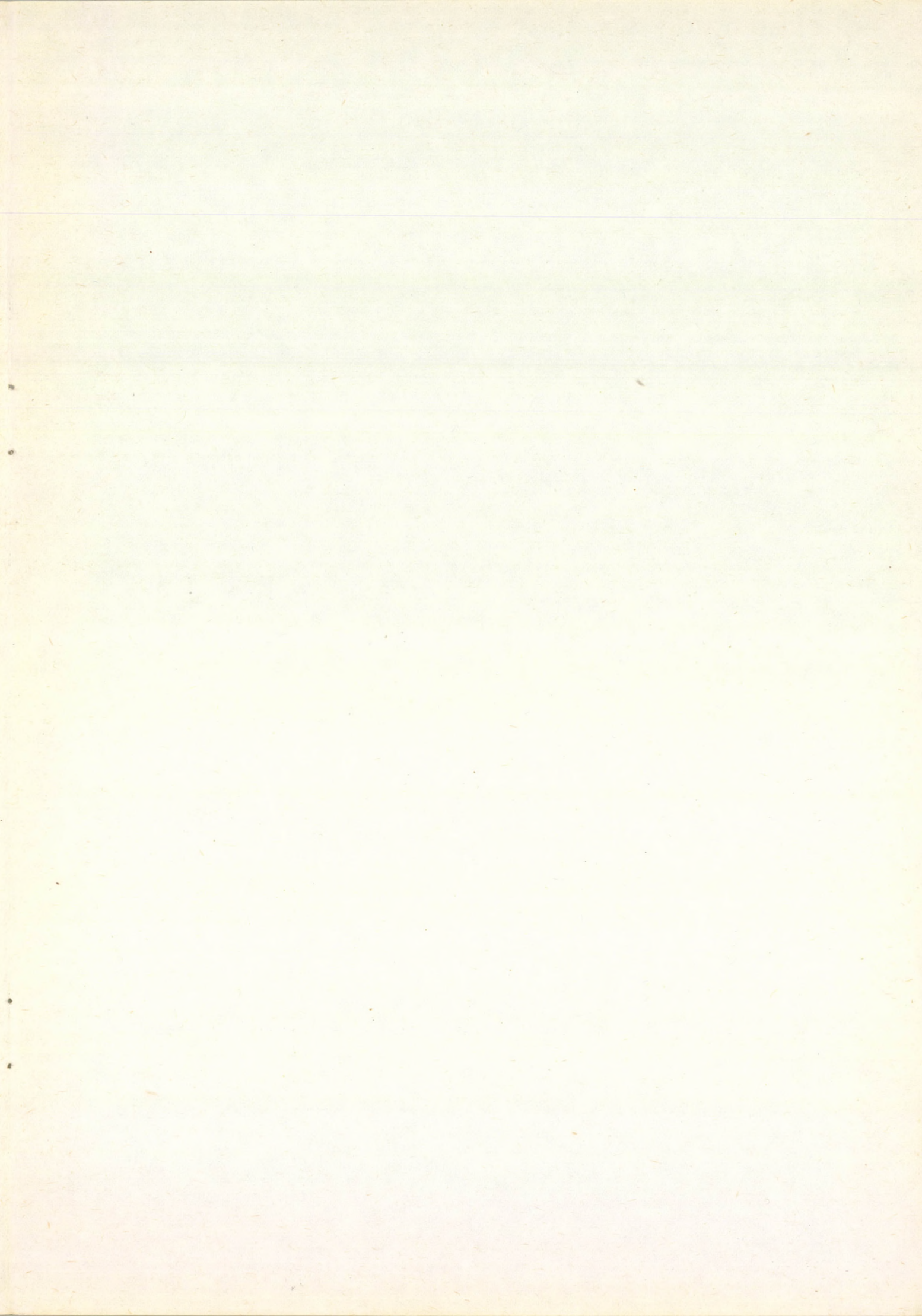
4. ábra

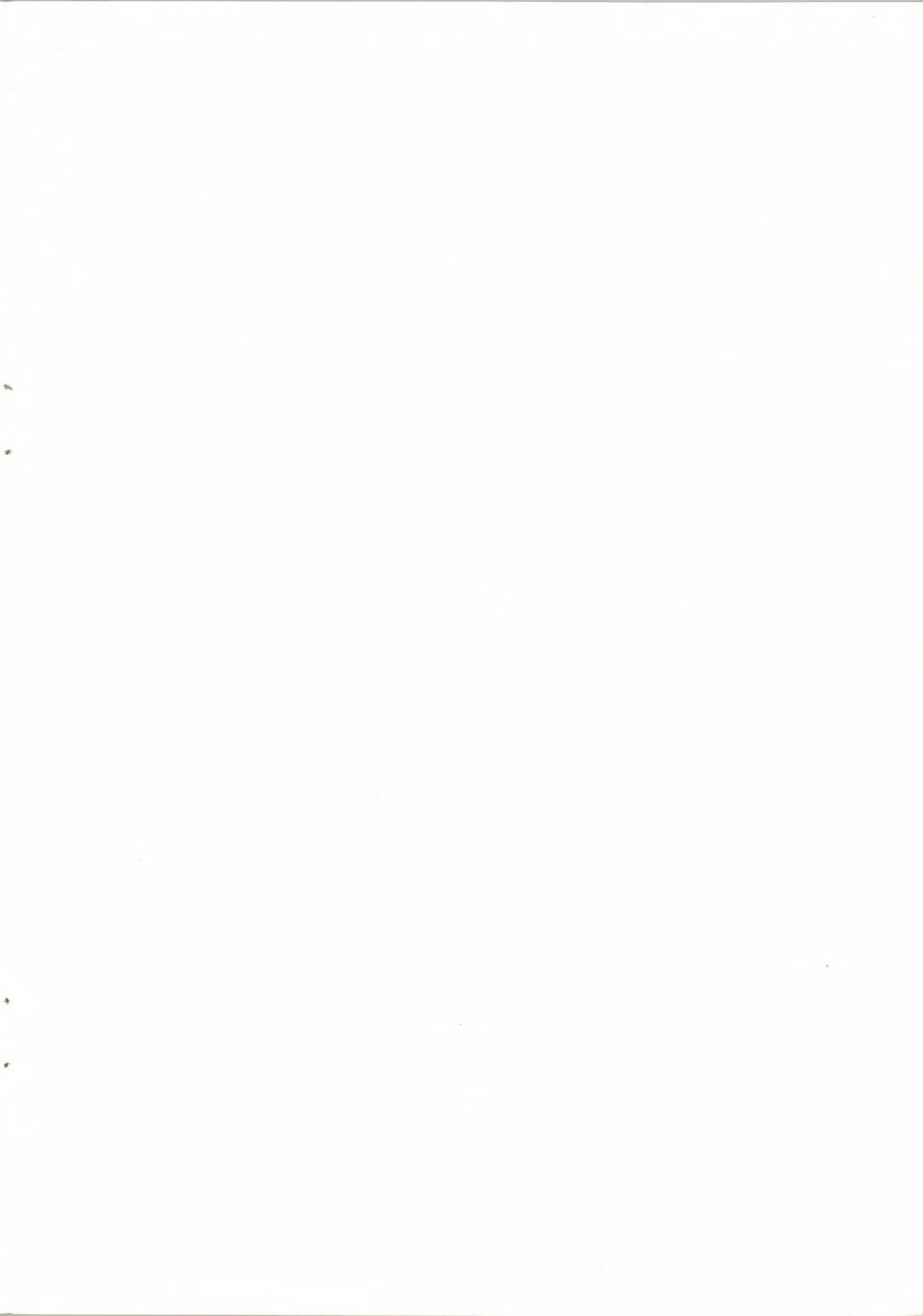
Relatív teljesítménylefutás szabályozóköteg kilökődés után a RELAP4 és a LINCUP programok szerint



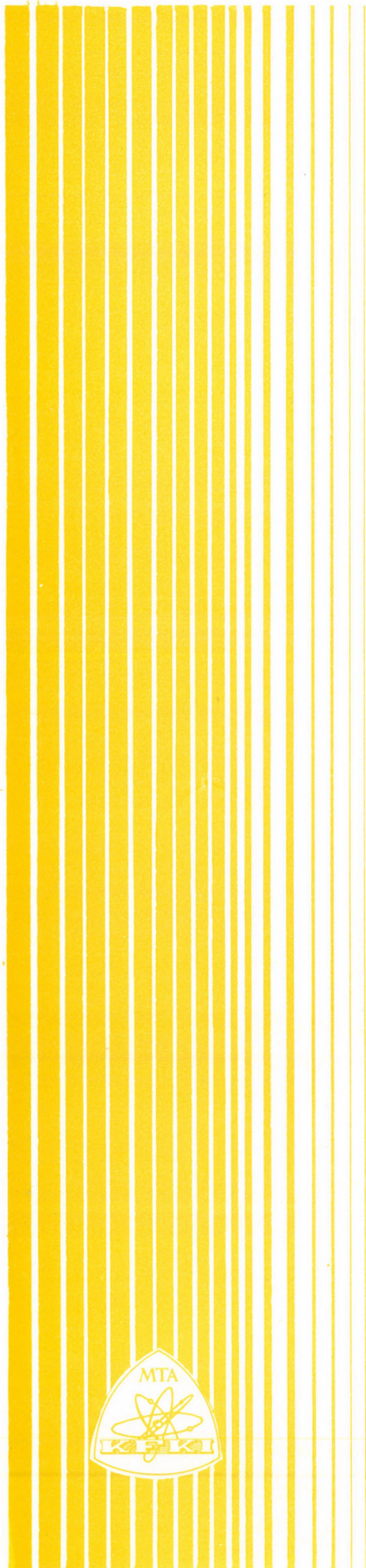
5. ábra

A neutronvillám amplitudója a belöködési idő függvényében





67.221



Kiadja a Központi Fizikai Kutató Intézet
Felelős kiadó: Gyimesi Zoltán
Szakmai lektor: Szabados László
Példányszám: 50 Törzsszám: 82-75
Készült a KFKI sokszorosító üzemében
Felelős vezető: Nagy Károly
Budapest, 1982. február hó