

TK 155.470

15

KFKI-1983-16

VIGASSY JÓZSEF

A XENON FOLYAMATOK VIZSGÁLATA
A REAKTORBIZTONSÁG SZEMPONTJÁBÓL

Hungarian Academy of Sciences

CENTRAL
RESEARCH
INSTITUTE FOR
PHYSICS

BUDAPEST

287

5) KFKI-1983-16
SPEC: 11-015

6) 29

1x

2) A XENON FOLYAMATOK VIZSGÁLATA A REAKTORBIZTONSÁG SZEMPONTJÁBÓL

1)

VIGASSY JÓZSEF AEKI
Központi Fizikai Kutató Intézet
1525 Budapest 114, Pf. 49

Summary text, mostly illegible due to fading and bleed-through from the reverse side of the page.

KIVONAT

A hazai xenon vizsgálatok helyzetének ismertetése után a dolgozat a xenondinamika alapfolyamatait tekinti át. Bemutatja a VVER-440 reaktorra a pontmodellben értelmezhető fontosabb xenon jelenségeket. A térbeli xenon folyamatok jellemzése után csak modellezési lehetőségeit ismerteti. Megadja a reaktorbiztonsági értékelő szempontokat. Részletes kutatási javaslatot tesz, különösen a VVER-440 xenondinamikájának modális analízis segítségével való vizsgálatára. Áttekinti a hazai xenon vizsgálatok hardware/software és személyi feltételeit.

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi időben a hazai reaktorkutatások egészére nagy hatással volt a Paksi Atomerőmű üzembehelyezése. Így a reaktorbiztonsági kérdések vizsgálata felé is nagy figyelem fordult, sok munkát adva a hazai szakembergárdának. Ehhez társult az üzembehelyezéssel kapcsolatos mérésekben való közvetlen részvétel talán még nagyobb terhe. Ez a nagy terhelés ahhoz vezetett, hogy az elvégzendő munkák között rangsorolni kellett.

A xenon folyamatok vizsgálatának világszerte hagyományai vannak. A kérdés fontosságára a magyar tudományos-technikai közvélemény figyelmét 1980 elején az "Energia és Atomtechnika" hasábjain hívtam fel [1]. Megállapítottam ott azonban azt is, hogy a Pakson akkor még csak épülő 440 MW-os atomreaktort a szovjet fél nem tartja xenon lengésre hajlamosnak [2]. Ezt tükrözi a reaktort szállító fél által átadott biztonsági analízis [3], de a Paksi Atomerőmű előzetes biztonsági analízise [4] is. További tény, hogy a hazai hozzáférhető számítógép bázis sem volt megfelelő a korszerű xenonszimulátor programokkal való munkára. Jóllehet ebben a tekintetben is változást jelent a Paksi Atomerőműben üzembehelyezett számítógép, e változás kedvező hatásáról azonban korai lenne beszélni. Mindez oda hat, hogy az időközben eltelt három év alatt mélyen-szántó kutatások nem folytak hazánkban a VVER-440 reaktor térbeli Xe folyamataira vonatkozóan.

Jelen tanulmányom célja azon eredmények és ismeretek összefoglalása, melyek jóllehet korszerű xenonszimulátor programok nélkül is elérhetőek voltak, mégis hasznos adalékokat jelentenek a Paksi Atomerőmű biztonságának megítéléséhez. Természetesen kihasználom az alkalmat arra, hogy a hazánkban, esetleg nemzetközi együttműködésben lefolytatható mélyebb analízisek lehetőségére, hasznosságára, céljaira is felhívjam a figyelmet.

2. A XENON FOLYAMATOK FIZIKÁJA

Mint közismert, valamennyi atomreaktorban a hasadási termékek között megtalálható a Xe-135 izotóp is. Ez az izotóp nemcsak közvetlenül a hasadás pillanatában keletkezik, hanem főként a Te-135 izotópból, mint hasadási termékből induló radioaktív bomlási lánc során képződik. Mivel jelentős neutronabszorpciós hatáskeresztmetszete van, lebomlása nemcsak bétabomlással történik, hanem a neutronfluxus "kiégető" hatására is folyik. Az 1. ábrán mutatjuk be vázlatosan e folyamatokat a jellemző fizikai paraméterek feltüntetésével.

E fizikai folyamatok az atomreaktor valamennyi pontjában lejátszódnak. Az egyes izotópkoncentrációk a reaktor egy pontjában nem tudnak arról, hogy egy "kicsivel odébb" milyen izotópkoncentrációt lehet találni. Így az izotópkoncentrációkra vonatkozó egyenletek közöséges időfüggő differenciálegyenletek, melyekben a helykoordináta a paraméter szerepét viszi. A szomszédos tartományokban lezajló folyamatokat a neutronfluxus hangolja össze: a neutrodiffúzió igyekezik kiegyenlíteni a szomszédos tartományok között a neutronfluxust, ezáltal a hasadások számát, azaz a teljesítménysűrűséget, és e mellett a Xe-135 izotópok kiégetésének intenzitását is.

Figyeljünk fel arra a tényre, hogy az 1. ábra szerint a Xe-135 izotóp nagy része mintegy 7 órával a megfelelő hasadás után jelenik meg a reaktorban és jelentős abszorpciós hatáskeresztmetszete utján csak ekkor hat vissza a neutronfluxusra. Elhanyagolva a Te-135 izotóp bomlási idejét, jó közelítéssel számolhatunk azzal, mintha helyette a hasadáskor azonnal I-135 izotóp keletkezett volna. Ezért szokásos a folyamatot az alábbi egyenletekkel leírni:

$$\dot{I} = -\lambda_I \cdot I + \gamma_I \cdot \sum_{k=1}^G \Sigma_k^F \cdot \phi_k \quad (1)$$

$$\dot{X} = -\lambda_X \cdot X - \sum_{k=1}^G \sigma_k^X \cdot \phi_k \cdot X + \gamma_X \cdot \sum_{k=1}^G \Sigma_k^F \phi_k + \lambda_I \cdot I \quad (2)$$

ahol a felső pont idő szerinti deriválást jelent. /Egyéb je-
lölésekre vonatkozóan lásd a jelölésmagyarázatot./

A leirt fizikai jelenség különösen akkor szembetűnő, ha elmarad a Xe-135 izotóp kiégetése, pl. a reaktor leállítása után. Ekkor továbbra is keletkezik 6.7 óra időállandóval Xe-135 izotóp, míg a 9.2 órás időállandóju bomlás egymagában egy ideig ezt nem tudja ellensúlyozni. Tehát jelentős abszorbens halmozódik fel, ami megnehezíti a reaktor újraindítását. Így fedezte fel a folyamatot Fermi és Wheeler a 40-es évek elején a Hanford reaktorokon [5]. Azóta a reaktornak ezt a nehezen indítható állapotát, amely néhány órán át tartó tartalékreaktivitás csökkenést jelent, jódgödörnek hívják.

Az időállandók órás nagyságrendjéből következik, hogy a reaktor szabályozó rendszerek csaknem mindenféle xenon zavart, amelyek a pontreaktor modell tárgyalásmód szerint az (1)-(2) egyenletekkel leírható módon felléphetnek, elnyomnak. Kivételes eset, amikor az összes szabályozó rud az üzemi ciklus végén valamilyen okból "felső" véghelyzetbe kerül, és további reaktivitástartalék nem lévén a reaktor belezuhan a jódgödörbe. Külön téma e jelenség elkerülésére a csökkentett paraméterekkel való kiégetési ciklus - avagy kampány - nyújtás, melynek lehetőségét hazai szerzők is vizsgálták (lásd pl. [6]).

Külön kell foglalkozni avval az esettel, amikor a teljesítményreaktor a xenon folyamatok szempontjából nem tekinthető pontmodellben kezelhetőnek. Ez az eset akkor fordul elő, amikor a neutron diffúzió kiegyenlítő-összekapcsoló hatása már nem elegendő a xenon folyamatok összehangolására az egész reaktorban. Ez a nagyméretű teljesítményreaktorok esete. Itt a klasszikus szabályozó rendszerek, melyek a reaktorteljesítménynek csak állandó értéken tartására lettek tervezve, tehetetlenek a fluxusprofil billegő mozgásával szemben. Ilyen jelenség először a Savannah-River erőműreaktorokon fordult elő 1955-ben, majd pár évvel később hasonlót észleltek a Shippingport nyomottvizes erőművi reaktoroknál is [7]. A korábbi esetben axiális, az utóbbinál diametrális lengések léptek fel. E lengések, billegések elméletét először A.G. Ward (1956) [8], majd 1958-ban D. Randall és D.S. St. John [9] adta meg. A len-

gések természetét főképpen a stabilitás szempontjából közelítették. Hamar nyilvánvaló lett, hogy a gazdaságos erőművi teljesítményreaktorok tervezése során kevéssé, vagy nem lehet, de nem is elsőrendűen fontos figyelembe venni a xenon stabilitás szempontjait. A reaktorok belső stabilitása például az egységek növelésével egyre gyengébb lesz. A lengések alacsony szinten tartására ezért új szabályozó rendszereket és ehhez kapcsolódóan szabályozási filozófiát dolgoztak ki. Szükség volt tehát megfelelő detektor rendszerek, alkalmasan kialakított szabályozószervek létrehozására, alkalmazására. E célra megfelelőek a modern in-core detektor rendszerek és a többféle térbeli kiosztásban működtethető abszorpciós szabályozási lehetőségek /pl. speciális szabályozó rudak, vagy szabályozó rudak és a hűtőközegben oldott szabályozó abszorbensek együttes alkalmazása/. Sok munka fekszik a megfelelő alkalmazási stratégia kidolgozásában is, de egyszerűbb esetekben az a stratégia is célhoz vezethet, amely a reaktor egyes térbeli tartományainak külön-külön teljesítmény-, vagy ami ugyanazt jelenti, fluxus-szabályozásán alapszik.

Összefoglalóan megállapítható, hogy a xenon folyamatok a teljesítményreaktor üzemeltetését kísérő olyan jelenségek, melyek az üzemviteltől eltérő időbeli lefolyást követő járulékos abszorbens ($Xe-135$) felhalmozódásban nyilvánulnak meg. Ez a felhalmozódás térbeli szerkezetet, térbeli átrendeződést is felmutathat, tehát az üzemvitel során figyelni kell rá. Amennyiben a reaktor egyes tartományainak teljesítményszabályozása mintegy külön-külön is megoldott, akkor van beavatkozási lehetőség a térbeli folyamatokba is.

3. PONTMODELLBAN TÁRGYALHATÓ XENON FOLYAMATOK

Mivel feltehető, hogy térbeli xenonlengésekre a VVER-440 atomreaktor nem hajlamos, azaz az esetleges "billegések" térbeli kiegyenlítő szabályozással megfoghatóak, a folyamatok leírására célszerű lesz a pontmodell egyenleteiből kiindulni. Az (1)-(2) egyenletek mellett a térbeli leírásra ugyanis csak

valamilyen kritikussági egyenlet szolgálhat, például az alábbi alakban:

$$\begin{aligned} \phi_{\ell, j} \left[\sum_{\ell, j}^{\hat{a}} + \sum_{k=1}^G \sum_{i=1}^I K(\ell, j \rightarrow k, i) \right] = \\ = \sum_{k=1}^G \sum_{i=1}^I \phi_{k, i} K(k, i \rightarrow \ell, j) \end{aligned} \quad (3)$$

$\ell \in G, j \in I$

/Lásd a jelölésmagyarázatot./ Ezen egyenlet felírásakor a neutronok energiatarományát G db csoportra osztottuk fel, a térbeli kiterjedést pedig I db "cellára"; a neutron egyensúly minden cella minden csoportjára fenn kell hogy álljon. A (3) homogén egyenletnek a $\phi_{\ell, j}$ fluxusokra csak akkor van a triviális-tól különböző megoldása, ha például a $\sum_{\ell, j}^{\hat{a}}$ effektív hatáskeresztmetszetek segítségével biztosított, hogy a (3) egyenletrendszer együtthatóinak determinánsa nulla. Ezt a megfelelő termohidraulikai állapotban, például megfelelő szabályozórúd pozicionálással vagy bórkoncentráció beállítással lehet biztosítani.

A pontmodell kritikussági egyenlete egyetlen neutroncsoport feltételezésével most a

$$\sum^{\hat{a}} \equiv 0 \quad (3/a)$$

alakban írható, azaz olyan neutron abszorpció nincs a rendszerben, mely ne pótlódna hasadásból jövő neutron utján.

Az ilyen eset könnyebben kezelhető a

$$\phi(t) = \text{adott} \quad (3/b)$$

egyenletet felírása utján. Ennek teljesülését a szabályozás biztosítja, csupán azt kell ellenőrizni, hogy a szabályozórendszerben megvannak-e mindig a szükséges tartalékok ehhez. Tehát a $\phi(t) = \text{adott}$ összefüggés feltételezéssel megoldandó az (1)-(2) egyenletrendszer, majd ennek megoldásából számítandó a Xe-135 izotóp által lekötött reaktivitás az idő függvényében. A lekötött reaktivitás maximuma és minimuma nem haladhatja meg

egyik irányban sem a szabályozó-rendszer teljesítőképességét, és a teljesítménytényezőből, valamint a hőfoktényezőből adódó tartalékokat ahhoz, hogy a tervezett $\phi(t)$ tranziens megvalósítható legyen. Ilyen elveken nyugszanak azok a számítások, melyek pl. a [6] és [10] munkákban találhatóak.

Ezek a gondolatmenetek analóg módon kifejezhetőek a (3) egyenlet kapcsán is; tehát: ha van a reaktor valamennyi rész-tartományában olyan szabályozó abszorbens beviteli lehetőség, ami a lokális xenon eltérések abszorpció amplitudóját meghaladja, akkor biztosítható egy

$$\phi_{\ell,j}(t) \equiv \text{adott}_{\ell,j} \quad (3/c)$$

menetrend valamennyi "cellára" egymással párhuzamosan. Tehát a Xe-billegések leszabályozása ilyenkor a térbeli fluxusstabilizálás segítségével van megoldva. Inkább az itt a kérdés, hogy mi tekinthető lokális környezetnek, milyen térbeli finomságban dolgozik a fluxusstabilizálás. Ennek megfelelően kell bizonyos számú "cellára" a reaktort felbontani $/I = ?/$, avagy másként fogalmazva, a neutrondiffúzió kiegyenlítő hatása ennek megfelelő távolságon belül tekinthető még elég erősnek. /Ezekre a kérdésekre még visszatérünk./

Az alábbiakban tegyük fel, hogy elegendő egyetlen neutroncsoport figyelembevétele vizsgálatainkban. Akkor az (1) és (2) egyenletek helyett az

$$\dot{I} = -\lambda_I \cdot I + \gamma_I \cdot \Sigma^F \cdot \phi \quad (4)$$

$$\dot{X} = -\lambda_X X - \sigma^X \phi X + \gamma_X \Sigma^F \phi + \lambda_I \cdot I \quad (5)$$

egyenletekkel dolgozhatunk tovább. Ismeretes ezen egyenletek aszimptotikus megoldása a $\phi = \text{const}$ esetre:

$$I_\infty = \gamma_I \cdot \Sigma^F \cdot \phi \cdot \frac{1}{\lambda_I} \quad (6)$$

$$X_\infty = \frac{\gamma_X \Sigma^F \cdot \phi}{\lambda_X + \sigma^X \cdot \phi} \quad (7)$$

avagy

$$X_{\infty} = \frac{\gamma \cdot \Sigma^F \cdot \phi}{\lambda_r} \quad (8/a)$$

ahol

$$\lambda_r = \lambda_x + \sigma^x \cdot \phi \quad (8/b)$$

és

$$\gamma = \gamma_I + \gamma_x \quad (8/c)$$

Látható, hogy amíg az aszimptotikus jódkoncentráció, I_{∞} arányos a neutronfluxussal, ez nem igaz a xenonra. Jóllehet "kis" neutronfluxusok esetén közelítőleg még igaz most is a linearitás, "nagyobb" neutronfluxusoknál a xenont a neutronfluxus leégeti úgy, mintha bomlási állandója a (8/b) formulával megadott érték lenne. Ez pedig azt jelenti, hogy "végtelen" nagy neutronfluxushoz sem tartozhat egy bizonyos Xe-135 koncentrációnál nagyobb érték. Ez a határérték a következő:

$$X_{\infty}^{\infty} = \lim_{\phi \rightarrow \infty} \frac{\gamma \Sigma^F \cdot \phi}{\lambda_x + \sigma^x \cdot \phi} = \gamma \cdot \frac{\Sigma^F}{\sigma^x} \quad (9)$$

Az egyensúlyi xenonkoncentrációk esetén fellépő mérgeződések ezek alapján:

$$\delta \rho_{\infty} \approx \frac{\sigma^x \cdot \gamma}{\gamma} \cdot \frac{\phi}{\lambda_x + \sigma^x \cdot \phi} \quad (7/a)$$

és

$$\delta \rho_{\infty}^{\infty} = \lim_{\phi \rightarrow \infty} \delta \rho_{\infty} = \frac{\gamma}{\nu} \quad (9/a)$$

Amíg a (9/a) formulával megadott érték egyedül a hasadóanyag izotópösszetételétől függ egy kicsit, addig a (7/a) formulára befolyással van a reaktor neutronfluxusának energia sze-

rint vett spektruma is a σ^x értéken keresztül. Feltéve, hogy

$$\sigma^x = 3.0 \cdot 10^6 \text{ baru} = 3.0 \cdot 10^{18} \text{ cm}^2$$

- amely érték a paksi VVER-440 reaktorra véleményünk szerint alkalmazható - a 2. ábrán féllogaritmikus léptékben ábrázoltuk a (7/a)-(9/a) összefüggésekkel számítható reaktivitásokat.

Látható az ábrából, hogy a Xe-135 mérgeződés szempontjából akkor kicsi a neutronfluxus, ha nem haladja meg a $10^{12} \text{ n/cm}^2, \text{sec}$ értéket, nagy pedig akkor, ha a $10^{14} \text{ n/cm}^2, \text{sec}$ értéken felül van. A két esetet jól elválasztja az a fluxusérték, mely mellett a (7/a) kifejezés nevezőjében a két tag egyenlő, azaz

$$\phi_{1/2} = \frac{\lambda_x}{\sigma^x} \approx 7 \cdot 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ sec} . \quad (10)$$

Ezt az értéket is feltüntettük a 2. ábrán.

A Xe kérdéskörben a pontmodellben értelmezhető legkarakterisztikusabb folyamat a teljesítménycsökkentés vagy leállítás után fellépő jódgödör jelensége. Ez időfüggésben tárgyalható a (4) és (5) egyenletek alapján analitikusan is. Vegyük figyelembe, hogy a Xe-135 izotóp által lekötött reaktivitás számítható pl. a

$$\delta \rho_{xe} = \frac{\sigma^x}{\gamma \Sigma F} \cdot X \quad (11)$$

formulával. Akkor [11] és [12] nyomán a leállítás után a lekötött reaktivitás időfüggésére felírható, hogy

$$\delta \rho_{xe}(t) = \frac{\sigma^x \cdot \phi_0}{\nu} \cdot \frac{\gamma}{\lambda_x + \sigma^x \cdot \phi_0} \cdot e^{-\lambda_x t} + \frac{\gamma_I}{\lambda_x - \lambda_I} (e^{-\lambda_I t} - e^{-\lambda_x t}) \quad (12)$$

ahol t a leállítás után eltelt idő, ϕ_0 pedig a fluxus, a leállítás előtt hosszú időn át üzemelő reaktorban. A (12) és (7/a) formulák összevetéséből számítható, hogy a jódgödör által lekötött reaktivitás hányszorosa az egyensulyinak. [12] nyomán

$$\frac{\delta\rho_{xe}(t)}{\delta\rho^\infty} = e^{-\lambda_x t} + D \cdot (e^{-\lambda_x t} - e^{-\lambda_I t}) \quad (13)$$

ahol

$$D = \frac{\sigma^x \cdot \phi_0 + \lambda_x}{(\lambda_I - \lambda_x) \left(1 + \frac{\lambda_x}{\lambda_I}\right)} \quad (13/a)$$

Nyilvánvalóan a $t = 0$ pillanatra e kifejezés értéke egy. Egyszerű számítás szerint adódik a jódgödör legmélyebb pontjának elérésig szükséges várakozási idő:

$$t_{\max} = \frac{\ln \frac{\lambda_I}{\lambda_x} + \ln \frac{D}{1+D}}{\lambda_I - \lambda_x} \quad (14)$$

[12] $\sigma^x = 3.5 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$ érték feltételezésével e várakozási idő értékére a reaktor állandósult neutronfluxusa függvényében a következő értékeket kapta:

$\phi_0 \text{ n/cm}^2, \text{sec}$	10^{12}	10^{13}	$2 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	10^{14}
$t_{\max} \text{ sec}$	1 ^h 0'26"	6 ^h 28'20"	8 ^h 16'22"	9 ^h 53'16"	10 ^h 34'07"

A paksi VVER-440 reaktorra vonatkozóan bizonytalanságok vannak σ^x és ϕ_0 értékének meghatározása körül. Ez befolyásolja a nyerhető eredményeket is. [12] szerint nem követünk el nagy hibát, ha névleges adatokként indulótöltetre a következő értékekkel számolunk:

$$\sigma^x = 3.5 \cdot 10^6 \text{ barn}$$

$$\phi_0 = 2.62 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$$

$$\delta\rho^\infty = 4.84\% = 3.1\%$$

$$\delta\rho_{\max} = 10.05\% = 6.43\%$$

$$t_{\max} = 8^{\text{h}}50'$$

Látható, hogy a Paksi Atomerőműben a Xe-135 izotóp által lekötött reaktivitás jelentős értékű. Az ajánlott egyensúlyi lekötött reaktivitás értéke /3.1%/ meghaladja a 2. ábra és a (9/a) formula kapcsán adódó aszimptotikus értéket /2.64%/. Ezt a fizikai képtelenséget várhatóan a pontmodellel járó nagymértékű fogalmi egyszerűsítés és az egyes fizikai mennyiségek értelmezésének nem kellően összehangolt volta, esetleg a hasadóanyag eltérő összetétele okozhatja. A 2. ábra alapján inkább az valószínűsíthető, hogy a $2.6 \cdot 10^{13}$ -os neutronfluxus miatt a maximális aszimptotikus xenonmérgezés mintegy 75%-a lép fel állandósult üzemmódban. Mindez azt vonja maga után, hogy gondosan meg kell tervezni minden teljesítményváltoztatási manővert, esetleg napi terhelésingadozás felvételt, különösen abban az esetben, ha közel járunk a kampány végéhez, vagy éppen nyújtott kapmpányban üzemelünk. Ugyanis ekkor a Xe folyamatok nemcsak a fluxus kiegyenlített-séget ronthatják el esetleg a teljes terheléshez közeli üzemi állapotban, hanem az üzemeltetést a jódgödörbe való zuhanástól is meg kell védeni, például csökkentett paramétereken való járatás útján.

4. TÉRBELI XENON FOLYAMATOK

Akkor, ha egy reaktorban a neutronfluxus mindenhol a 10^{15} érték körül van, a Xe-135 koncentráció térbeli eloszlása már érzéketlen a fluxuselozzlás tényleges menetére, hiszen a 2. ábra szerint jó közelítéssel mindenhol elértük a telítési értéket. Az méginkább igaz, hogy a Xe-135 eloszlásnak a fluxusalakra való visszahatását a reaktorban ilyenkor már el lehet hanyagolni. Ezért a nagyfluxusu reaktorok érzéketlenebbek a térbeli xenon lengésekre, illetve a térbeli fluxus stabilitás biztosítása könnyebb feladat. A paksi VVER-440 reaktor esetében még nem ilyen nagy a fluxus, és függ a fluxustól az egyensúlyi Xe-135 mérgezettség is. Az indítást követő órákban még csak nem is ezek az egyensúlyi Xe-135 koncentrációk alakulnak ki, tehát az indítást követően a fluxusalak egyáltalában nem te-

kinthető stabilan kifejlődöttnek. Ehhez hasonlóképpen a terheléstől függ az egyensúlyi állapothoz tartozó automatikusan kialakuló fluxusprofil is, amire figyelemmel kell lenni, például a fluxus és teljesítménymérések kalibrációjakor is.

Ezen tendenciák ellensúlyozására szolgálhatnak azok a szabályozó beavatkozások, melyek a fluxusalak stabilizálását vannak hivatva biztosítani. Érdekes módon a fluxusalak stabilizálása éppen a reaktorindítás kapcsán a legnehezebb feladat. Önmagában véve a xenonmérég ott épül fel a legnagyobb mértékben, ahol a fluxus maximális, tehát a xenon felépülésével a rendszer a fluxusalak kisímitására törekszik. Indításkor, kisebb teljesítményen való járáskor és ezt követően tehát a fluxusprofil nem kellően kiegyenlített.

Az a tény, hogy a lassu reaktivitásváltozások ellensúlyozására a VVER-440 reaktorokban oldott bórszorbens szolgál, amely a zónában egyenletesen oszlik el, jelentős tényező a lehetőleg egyenletes fluxusprofil biztosításában. Ebből a szempontból a Xe-135 abszorbens felépülési sebessége lassúnak tekinthető, így bórral globálisan követhető. A bórsav szabályozás alkalmazása mégis passzív eszköznek tekinthető akkor, amikor a fluxusalak stabilizálásról beszélünk. Ezt úgy kell érteni, hogy a bóros szabályozás önmagában nem okoz fluxusalak zavaró hatásokat, de nem is védhető ki ilyen módon más külső vagy egyéb, pl. xenon eredetű fluxusalak perturbáció sem. A VVER-440 reaktorban ilyen célra szabályozó köteg csoportok mozgatása szolgálhat.

A fluxusalak stabilizációnak és a lehetőleg egyenletes fluxusalak biztosításának különösen a teljes terhelés közelében van jelentősége. Az egyik limitáló tényező, amely korlátozza a reaktorról levehető teljesítményt az, hogy a kritikus forrás kellő biztonsággal való elkerülését kell biztosítani. Amennyiben éppen ez a limitáló tényező szabja meg az adott üzemi helyzetben a reaktor maximális teljesítményét, és nem valami másféle rizikófaktor, akkor a térfogati teljesítmény egyenlőtlenségi tényezője - és evvel együtt a fluxusprofil - fontos szerephez jut. Ilyenkor szükséges, hogy szabályozórud mozgatásokkal lehessen biztosítani azt a fluxus-

profilt, ami az adott kiégetési állapotban a lehetőleg egyenletes térfogati teljesítménysűrűséghez tartozik.

Nagyobb teljesítmény változások nagyobb Xe tranzienseket hoznak létre. Ezért a Xe tranziensek lehető elkerülésének szempontja azt sugallja, hogy a teljes terhelés közelében csak lassan legyen szabad változtatni a reaktor teljesítményét. Értelemszerűen a Xe folyamatok több órás időállandóira való tekintettel az itt szereplő "lassan" kifejezésnek speciális jelentése van: az egymást követő néhány órás időintervallumokban az átlagos teljesítmények keveset különbözzenek egymástól.

5. A TÉRBELI XENON FOLYAMATOK MODELLEZÉSE

Az előző pontban kifejtett általános tendenciákon túlmenően az adott atomreaktor megfelelő üzemállapotaiban kialakuló Xe folyamatokról információkhoz alapvetően két úton lehet eljutni:

- a/ a Xe folyamatok modális analizise útján;
- b/ a "cellákra" bontott reaktorra felírt egyenletek megoldása útján.

A b/ úton való megközelítésre jó példa a (3) egyenlet, melyet a dolgozat 3. pontjában írtunk fel. Lényegében hasonló úton járnak a nagy Xe-szimulátor programok is azzal az eltéréssel hogy

- 1/ kicsi cellákkal dolgoznak;
- 2/ az egyes cellákra vonatkozó egyenleteiket a neutron-diffúziós egyenletek diszkrétizálása útján vezetik le;
- 3/ csak "szomszédos" cellák közötti csatolásokat értelmeznek, vesznek figyelembe.

Az a úton való megközelítés megfelel a klasszikus utnak, amelyen az első elméleti cikkek is jártak (l. [8] és [9]). Jól-lehet szigorúan stabilitási kérdésekre keresték egykor a választ, számunkra más vonatkozásban hagytak hátra maradandót. Anélkül, hogy a szükséges matematikai apparátusba belebonyo-

lódnánk, vázlatosan a következőkben lehet összefoglalni az értékes eredményeket:

1/ A reaktor teljesítményét a szabályozórendszer kézben tartja. A kialakuló fluxusprofilnak a névlegestől való eltérése tárgyalható modális sor formájában a Xe folyamatok vizsgálata során is.

2/ Olyan módusok szerint célszerű sorbafejteni a problémát,

a/ amelyek közül a nulladik tag éppen a névleges fluxusprofil,

b/ amelyek egymásra ortogonálisak.

3/ Amennyiben a fluxusprofil az atomreaktorban kellően kiegyenlített, akkor a módusok közötti csatolás kicsi, és elhanyagolható. Az egyes módusok térbeli szerkezetét követő lengések szabályozásával a módusok szerint külön-külön lehet foglalkozni.

A véges hengeres reaktorokra vonatkozó módusok sematikus képét csomófelületeikkel együtt a 3. ábrán mutatjuk be.

4/ Az alaplómódustól eltérő módusok, azaz a felharmonikusok olyan fluxus- és izotópkoncentráció eloszlásokat jelentenek, amelyek a csomófelületek mentén előjelet váltanak. Idealizált szimmetrikus reflektor nélküli esetekben a véges hengeres reaktorokban ezek a csomófelületek hengerek és síkok.

Egy felharmonikushoz egy három-komponensű index-vektor rendelhető, mely a módus "sorszámát" adja meg az axiális, azimutális csomófelületek számával. Egy módust egy másik módushoz viszonyítva akkor tekinthetünk "magasabb"-nak, ha mindegyik indexkomponense legalább ugyanakkora, mint az utóbbi módusé. A magasabb módusokban egyre csökken az a térfogati tartomány, melyben a módushoz tartozó fluxus egy adott időpontban azonos. Ez a tartomány, azaz a reaktor térfogateleme, a xenon lengés folyamán mintegy összedolgozik. Ugyanugy, ahogyan a reaktor egészéhez szokás geometriai buckling értéket rendelni, az egyes módusokat egészükben, ill. a hozzájuk rendelhető és

csomófelületekkel határolható több térfogatelemet is geometriai buckling értékekkel jellemezhetünk. /Természetesen ez a buckling egy módus összes térfogattartományára azonos.

5/ Xenon lengésekre az alacsonyabb módusok hajlamosabbak, mint a magasabb módusok.

Ebből a szempontból általában magasabbnak tekinthető egy módus akkor, ha a hozzá tartozó geometriai buckling nagyobb. Kivételt jelentenek az axiális módusok, mert axiális irányban a hűtőközeg áramlása is összeköti az ellenkező fázisban mozgó módustartományokat, ami a hőfok és teljesítménytényezőknél keresztül másképpen is befolyásolja a lengéseket, mint az azimutális és radiális módusok esetén.

Ha az a/ és b/ vizsgálódási irányokat és az általuk nyert általános eredményeket összevetjük, érdekes megállapításokat tehetünk:

1/ A cellákra bontás finomsága és a vizsgált módusok száma közt megfeleltetést lehet tenni. Ha a reaktort csak két térbeli "cellára" bontjuk fel, olyan analízist lehet lefolytatni, mintha az első axiális, vagy azimutális, esetleg radiális módus viselkedését vizsgálnánk. A cellákat összecsatoló koefficiensek viszont célszerűen a modális fluxusképek analízise útján nyerhetők.

2/ A nagy xenon-szimulátor programok költséges fegyverek a xenon folyamatok analízisére, viszont mentesek azoktól az elhanyagolásoktól, melyeket a modális analízis során kell tenni. Feltétlenül alkalmazni kell őket olyan esetekben, amikor éppen ezen elhanyagolásokat kívánjuk ellenőrizni, pl.: hogy az egyes módusok csatolása mekkora, vagy hogy egy adott módus csomófelülete mennyiben tér el az ideális felülettől stb.

3/ Amennyiben módunk van az egyes módusok csatolási együtthatóira és a módusok térbeli alakjára megfelelő becsléseket tennünk, akkor jól modellezhető a xenonlengés folyamata modális szimulátor programmal. Az ilyen program lényeges ismeretlenei az időfüggő módus amplitudók, melyekre csatolt lineáris differenciálegyenlet rendszer írható fel, - elég jó közelítéssel -

amennyiben a névleges állapottól való eltérések kicsik.

4/ Amennyiben az egyes módusok csatolásaitól el lehet tekinteni, akkor önmagában egy módusra is, illetve annak tér-időben való viselkedésére is van értelme a modális szimuláció elvégzésének. Olyan "egydimenziós" programokkal, melyek a fluxus- és az izotópeloszlás időbeli viselkedését egy helykoordináta függvényében képesek leírni, kísérletet lehet tenni a módus nemlineáris viselkedésének a tanulmányozására, de a kapott eredmények értelmezése problematikus: az adott "egydimenzió" irányában a program effektíve valamennyi magasabb módus viselkedését is bekeveri a megoldásba, ugyanakkor a többi dimenzió irányában súlyos elhanyagolásokat tesz.

5/ Egyetlen módus viselkedésének a leírása modális szimuláció keretében ekvivalens valamilyen "kétcella" számítás végzésével, alkalmas koefficiensok választása esetén.

6/ Csak akkor van helye magasabb módusok vizsgálatának, ha az alacsonyabb módusok viselkedése erre bátorít. Ez azt jelenti, hogy ha egy módusnak van néhány % vagy %o teljesítmény egyenlőtlenségi faktor rontó hatása, akkor a rákövetkező valamelyik módus vizsgálata az adott üzemviteli vagy üzemzavari esetre még szükséges.

6. XENON MODELLEZÉSI FELADATOK A VVER-440 REAKTORRAL ÉS ÜZEMÉVEL KAPCSOLATOSAN

A korábbiakban vázoltuk magukat a Xe jelenségeket és néhány szempontra hívtuk fel a figyelmet arra vonatkozóan, hogy a Xe folyamatok miképpen befolyásolhatják a VVER-440 reaktor biztonságosságát. Az alábbiakban elsősorban módusfüggésben szeretnénk bemutatni az elvégezhető modellezési feladatokat, megadva az eredmények és értelmezésük fogalmi kereteit, és jelentőségét.

A Xe alapmódusra már felhívtuk a figyelmet, különösen a 3. fejezetben. Ráműtöttünk arra, hogy a problémának külö-

nösen a kampány végén van jelentősége. Mint ahogy H. Engelbrecht erre helyesen rámutat /lásd [13]/, a reaktorral kapcsolatos valamennyi dinamikai számítás, amely 5-10 percnél hosszabb időbeli viselkedés leírását tűzi ki célul, csak akkor végezhető el kellő pontossággal, ha a Xe folyamatok legalább a legegyszerűbb pontmodellben figyelembe vannak véve. A pontmodell lényegében az alapmódust adja meg. Célszerű a reaktor- és az erőműszimulátorokba is egyszerű Xe modellt beépíteni, melynek számításigénye nem haladja meg két késleltetett neutron csoport követésének számítás igényét. Ez irányban hazánkban is megtörténtek már az első lépések /l. [12]/.

Ami a térbeli módusokat illeti, kiindulhatunk abból, hogy durva effektusokra nem kell számítani /l. [2] és [14]/. Így - legalábbis egyelőre - célszerűnek látszik, ha az egyes módusok viselkedését egymástól függetlenül, tehát a csatolás elhanyagolásával vizsgáljuk meg a szóbajövő üzemviteli és üzemzavari esetekre. Az esetek végső analizisénél az egyes módusok által létrehozott perturbációk pesszimista összegzéséből vonhatunk le következtetéseket.

Az egyes módusok különféle szempontok szerint értékelhetők. Annak az elméleti szempontból rendkívül érdekes kijelentésnek, hogy egy módus stabil vagy labilis, önmagában közvetlenül értékelhető jelentősége nem sok van, hiszen a-priori sejtjük, hogy valamennyi módus az alapmóduson kívül stabil. Hiszen csupán a VVER-1000 reaktor nagyobb axiális méretei mellett kell az első axiális módus instabilitásával számolni /l. [1] és [14]/. A stabilitás kellő értékelésére önmagában nem sokat mond még a módus bomlási időállandója sem, bár a gyorsabban lebomló módusok elvileg kevésbé veszélyeseknek tekinthetők. A módus tényleges veszélyességét egy adott reaktorban valójában az szabja meg, hogy a reaktor melyik helyén, és mikor mekkora teljesítménynövekedést okoznak, mégpedig a fluxusstabilizációs szabályozási tevékenység valamennyi lehető működési módjait tekintetbe véve. Ezt a teljesítménynövekedést általában a következő tényezők figyelembevételével lehet meghatározni:

1/ Az üzemviteli, vagy üzemzavari tranziens milyen amplitudóju xenon-zavart vált ki.

2/ Szabályozó tevékenységgel a xenon-zavar amplitudója - elvileg és ténylegesen - milyen mértékben redukálható azonnal, vagy a lengés detektálását követően késleltetve.

3/ A xenon-zavar amplitudójából mekkora komponens esik az adott módus "irányába".

4/ Az adott módus bomlási idő állandója mekkora.

5/ Milyen fázisviszonyok között indul a lengés, azaz a jód- és a xenon zavarok milyen arányban lépnek fel.

6/ Mekkora a lengés periódusideje.

7/ Beszélhetünk-e aperiodikus lengésről.

Vizsgáljuk meg, hogy ismereteink szerint mi mondható el ezen szempontok alapján az egyes módusokról.

Az alábbiakban a módusok indexelési vektorának első komponense azimutális, a második radiális, a harmadik pedig axiális módussorszámot fog jelenteni.

Azimutális módusok $\{1,0,0\}$ L. a 3. ábra első sorait./

Azimutális xenon-lengés módust a szabályozórendszer és a hűtőrendszer aszimmetrikus üzemeltetése válthat ki. Amennyiben a szabályozórendszer és a hűtés tökéletesen szimmetrikusan működik, a $\{6,0,0\}$ indexű módusnál alacsonyabb módus fellépésére nem kell számítani. Tehát a xenon-lengés analízis kizárólag üzemzavari, vagy inkább szükségállapotok vizsgálatára szorítkozhat. A $\{6,0,0\}$ módust célszerű abból a szempontból megvizsgálni, hogy

1/ milyen a rutinszerű szabályozó tevékenységek által behozott zavar maximális amplitudója;

2/ a maximális amplitudó a zavar időpontjában lép-e fel.

Ami az üzemzavari állapotokat illeti, helyesebb itt inkább szükségüzemi állapotokról beszélnünk, mivel több óráig tartó állapotok közti lépésről van szó. Ez a lépés lehet aszimmetrikus hűtési vagy szabályozási mód bevezetése vagy megszüntetése.

Az aszimmetria módjától függően szükséges lehet, hogy az $\{1,0,0\}$ módus mellett a $\{2,0,0\}$ és a $\{4,0,0\}$, más esetben pedig a $\{3,0,0\}$ módust is megvizsgáljuk.

Az első radiális módusok $\{i,1,0\}$

A szabályozórendszer felépítése a VVER-440 reaktorok esetén olyan, hogy a radiális módusokat nem tudja kezelni. Ezért a radiális módusok elvileg veszélyesek. A tényleges helyzet azonban az, hogy

1/ a radiális módusok stabilitása magasfoku;

2/ a radiális módusokat a Xe-135 izotóp radiális eloszlásának megváltozása gerjesztheti. A teljesítmény üzemi tartományában a fluxus kellő radiális kisimitása esetén ezek a gerjesztő amplitudók nem túl nagyok.

Javasolható, hogy a $\{0,1,0\}$ módust vizsgáljuk meg ellenőrző számítások során. Az első radiális módus magasabb azimutális felharmonikusainak fellépése általában valószínűtlen. Amennyiben az aszimmetrikus hűtési mód bevezetését vagy megszüntetését teljesítményváltozás is kíséri, akkor lehet gondolni az $\{1,1,0\}$, $\{2,1,0\}$ vagy más esetben a $\{3,1,0\}$ módusok vizsgálatára. Szimmetrikus üzemviszonyok esetén azonban már csak a $\{6,1,0\}$ módus vizsgálata jöhet szóba. Várható, hogy ez már felesleges lesz a $\{6,0,0\}$ és a $\{0,1,0\}$ módusra kapott eredmények birtokában.

Speciális üzemzavar esetén, - mint pl. periferiális vagy centrális szabályozó elemek rendellenes helyzetbe kerülése, - előfordulhat, hogy mesterségesen gerjesztődik valamely radiális xenon módus. Ilyenkor célszerű lehet az $\{1,1,0\}$ módus vizsgálata is.

Természetesen az $\{i,1,0\}$ $I \geq 1$ módusok már kevert módusok.

Axiális módusok $\{0,0,k\}$

A VVER-440 reaktor üzemvitelét illetően az egyik legtöbb figyelmet érdemlő módus az első axiális módus $\{0,0,1\}$.

Az első axiális módust gerjeszti, ha változik a reaktorból kilépő víz hőmérséklete, miközben a belépő víz hőmérséklete állandó marad. Ugyancsak hat erre a módusra a szabályozórudak tartós helyzetének megváltozása is, különösen akkor, ha a rudak 25 vagy 75%-ig vannak besüllyesztve. Csak kismértékben gerjesztődik ez a módus olyan szabályozórud mozgatáskor, ami a rudhelyzetet a 0, 50 vagy 100% besüllyesztettség körül változtatja. A módus jól elnyomható vagy kompenzálható a 25% és 75%-ig besüllyesztett rudak, például alternatív mozgatásával.

Említésre méltó módus még a második axiális módus is. Tipikusan ugyanolyan esemény gerjesztheti, mint az első radiális módusokat, tehát a teljesítményváltoztatás. Elvileg van eszköz arra is, hogy szabályozórud mozgatással elnyomni vagy kompenzálni lehessen. Erre a célra kb. 17,50 vagy 83%-ra besüllyesztett rudak lennének szükségesek. A VVER-440 reaktorról kapcsolatosan mégsem hallottunk olyan üzemviteli stratégiáról, ami ezt a lehetőséget felhasználná.

Az axiális módusok együttes leírásáról egydimenziós xenon-szimulátor kódokkal már említés történt az előző fejezetben. Ott óvtunk attól, hogy a nemlineáris jelenségek és móduscsatolások vizsgálatát ilyen eszközzel kíséreljük meg. Ha viszont kis perturbációra adott kevert lineáris válasz vizsgálata a cél, ajánlani kell ezeket a programokat, hiszen csak így tárgyalhatók korrekt módon azok a csatolások, melyeket az áramló hűtőközeg az axiális xenonlengések vonatkozásában jelent.

7. A XENON MODELLEZÉS SOFTWARE VONATKOZÁSAI

Az utóbbi években szerzett tapasztalatokból le lehet szűrni azt a következtetést, hogy hazánkban egyelőre nem reális több személyt és nagyobb számítógépi apparátust lekötő xenon vizsgálatok indítására gondolni. Ezért most érdemes áttekinteni azokat a lehetőségeket, amelyek egyszerűbb eszközökkel gyorsabb eredményeket ígérnek.

Talán remélhető, hogy ezek a gyorsabb eredmények lesz-

nek annyira megnyugtatóak, hogy feleslegessé teszik a kiterjedtebb vizsgálódásokat.

Az első ut a BIPR programcsaláddal és annak kiváltásával kapcsolatos. Hazánkban a xenon folyamatok vizsgálata elképzelhető a BIPR programcsalád felhasználásával is. [15]. Tekintettel azonban arra, hogy önmagában már a BIPR programcsaládot is alapos kritika érheti, és a VVER-440 üzemviteli számításaira való alkalmazása sem tekinthető korszerűnek, célszerűnek látszik a jövőben a xenonszámításokat is új, moduláris programrendszer keretében megoldani [16] Pakson. Ilyen keretek között tekintve a kérdést ki lehet mondani, hogy a moduláris rendszer kidolgozása során nem túl nagy ráfordítással, csupán kellő odafigyeléssel az egyes reaktorfizikai és termohidraulikai modulok eleve úgy képezhetőek ki, hogy a xenon vizsgálatok céljainak megfeleljenek. Kicsi az olyan modulok száma, ami kifejezetten csak a xenon vizsgálatok célját szolgálná. Még a Xe-135 és a I-135 időbeli viselkedését követő rutin is, amely a hasadóanyag kiégetését számító rutint kell, hogy esetünkben a szimuláció során kiváltsa, más dinamikai vizsgálatok során is korlátozottan alkalmazásra kerülhet.

Elképzelhető, hogy a VVER-440 reaktor számítására nem jön létre új programrendszer hazánkban. Akkor sem okvetlenül azt az utat kell választani, hogy a BIPR programcsalád említett tagját aktivizáljuk. Ez ellen számos érv szól, mely megtalálható korábbi dolgozatunkban [16]. Akkor viszont nem marad más hátra, mint meglévő reaktorfizikai és termohidraulikai elemek segítségével olyan xenonszámító apparátust létrehozni, ami főbb vonásaiban a modális analízist végzi. Ilyen létrehozására van remény, hiszen az azimutális és radiális módusok esetén a térbeli viselkedésért csaknem kizárólag a neutrondiffúzió a felelős és alkalmas kétdimenziós kódok segítségével elő lehet készíteni minden módusjellemzőt a módusamplitudó időbeli viselkedésének számítását végző egyszerűbb program számára. Ami pedig az axiális módusokat illeti, van mód arra, hogy axiális egydimenziós reaktor-szimulátor kód üzembeállítható legyen a KFKI/AEKI-ban nem túl nagy szellemi tökebefektetéssel.

Összefoglalóan szeretném az alábbiakat megállapítani:

- A xenon folyamatok az üzemviteli előírások betartása mellett nem vezetnek baleseti állapothoz. A fluxusalak stabilizálása ebben a vonatkozásban a kulcskérdés;

- az üzemvitelt és az üzemviteli előírásokat - értelmezésükkel együtt - pontosíthatná és gazdaságosabbá tehetné egy a VVER-440 reaktorra vonatkozó xenon-analízis;

- az elvégzendő xenon vizsgálatok körét elsősorban az e célra igénybevehető szellemi kapacitás korlátozza;

- az aktuális hardware-software feltételektől függően kell kiválasztani a vizsgálati módszereket. Ez természetesen kihat a vizsgálatok körére is;

- a vizsgálatok körére és a software eszközökre a dolgozatban konkrét javaslatokat teszünk. Felhívjuk a figyelmet a VVER-440 reaktorzóna számítására szolgáló új programrendszerre [16], mint a vizsgálatok célszerű keretére.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Vigassy József: Teljesítményreaktorok xenon lengései.
Energia és Atomtechnika XXXIII. évf. 1980/1,
17-28 old.
- [2] Szovjet fél közlése
- [3] Paksi Atomerőmű-II. Műszaki Terv, IX. rész:
Az atomerőmű biztonságának műszaki ér-
tékelése. IX.-1. köt. Tyeploenergoprojekt,
1976.
- [4] Paksi Atomerőmű I. blokk.
Üzembehelyezést megelőző biztonsági je-
lentés. XIII. és XIV. kötet
- [5] A.M. Weinberg, E.P. Wigner: The Physical Theory of Neutron
Chain Reactors.
The Univ. of Chicago Press, 1958. pp. 600.
- [6] Szörényi Gábor: Doktori disszertáció.
- [7] A. Lauer: Räumliche Xenon-Schwingungen in Hochtemperatur-
reaktoren. Jül-850-RG, Mai 1972 pp. 5.
- [8] A.G. Ward: The Problem of Flux Instability in Large
Power Reactors. CRRP-657 July, 1956,
AECL-345 Canadian report.
- [9] D. Randall and D.S.St. John: Xenon Spatial Oscillations.
Nucleonics, 16/3, pp. 82. /March 1958/
- [10] Ozorai János: VVER-440 reaktor xenon mérgezettségének
vizsgálata instacioner üzemviszonyok
között.
Energia és Atomtechnika, XXXV. évf. 1982/10,
452-457 old.

- [11] M.A. Schultz: Control of Nuclear Reactors and Power Plants
Mc. Graw-Hill Book Company, INC.
New York, Toronto, London, 1961
- [12] Jánossy János Sebestyén: szóbeli közlés, 1982.
- [13] H. Engelbrecht: Analysen zur Dynamik von Kugelhaufen-
- Hochtemperaturreaktoren. Diss. T.H.
Achen Jül-Spez-123, Aug. 1981. KFA-Jülich,
D-82
- [14] V.A. Szidorenko: Vaproszú bezopasznoj rabotü reaktorov
VVER. Moszkva, Atomizdat, 1977.
- [15] V.N. Szemenov: Privát közlés.
- [16] Gadó János, Vigassy József: Tanulmány a VVER-440 reaktor-
zóna számítására szolgáló új program-
rendszeréről.
MTA/KFKI/AEKI, Budapest, 1982. május.

JELÖLÉSEK

$g(\ell, j \rightarrow k, k)$ szórási magfüggvény: annak a valószínűsége, hogy ha egy ℓ -edik csoportban tartozó neutron a j -edik cellában szóródást szenved, a szórás a k -ik csoportba és az i -edik cellába viszi át

G - a neutronenergia szerinti csoportok száma

I - a reaktor leírására felvett térbeli cellák száma

I [$1/\text{cm}^3$] a jód-135 izotópkoncentráció

I_∞ [$1/\text{cm}^3$] a jód-135 izotópkoncentráció egyensúlyi értéke adott neutronfluxus esetén

$K(\ell, j \rightarrow k, i)$ csatolási mag:

$$K(\ell, j \rightarrow k, i) = \sum_{\ell, j}^S g(\ell, j \rightarrow k, i) + \sum_{\ell, j}^F \sum_{m=1}^G \gamma_m g(m, j \rightarrow k, i)$$

t_{\max} [sec] a reaktorleállítástól a jódgödör legmélyebb pontjáig eltelt idő

X [$1/\text{cm}^3$] xenon-135 izotópkoncentráció

X_0 [$1/\text{cm}^3$] a névleges üzemállapothoz tartozó Xe-135 izotópkoncentráció

X_∞ [$1/\text{cm}^3$] a Xe-135 izotópkoncentráció egyensúlyi értéke adott neutronfluxus esetén

X_∞^∞ [$1/\text{cm}^3$] igen nagy neutronfluxusokhoz tartozó aszimptotikus egyensúlyi Xe-135 izotópkoncentráció

γ_I -	a jód-135, pontosabban a Te-135 izotóp effektív keletkezési hányada /0.061/
γ_X -	A Xe-135 közvetlen keletkezése hasadásonként /0.003/
γ -	$= \gamma_I + \gamma_X$
λ_I [1/sec]	a jód-135 izotóp bomlási állandója / $2.89 \cdot 10^{-5}$ /
λ_X [1/sec]	a Xe-135 izotóp bomlási állandója / $2.09 \cdot 10^{-5}$ /
λ_r [1/sec]	a Xe-135 izotóp effektív bomlási időállandója adott neutronfluxusban
ν -	az egy hasadásból keletkezett neutronok átlagos száma /2.47/
$\delta\rho$ -	reaktivitásváltozás
$\delta\rho_\infty$ -	a Xe-135 izotóp által lekötött reaktivitás egyensúlyi értéke adott neutronfluxus mellett
$\delta\rho_\infty^\infty$ -	igen nagy neutronfluxusokhoz tartozó aszimptotikus egyensúlyi reaktivitáslekötés
σ^x [cm ²]	a Xe-135 izotóp egy magjának abszorpciós hatáskeresztmetszete a reaktor neutronspektrumára átlagolva
σ_k^x [cm ²]	a Xe-135 izotóp egy magjának abszorpciós hatáskeresztmetszete a k-adik neutroncsoportban

$\hat{\Sigma}_{\ell,j}^a$ [1/cm] meddő makroszkópikus abszorpciós hatáskeresztmetszet:

$$\hat{\Sigma}_{\ell,j}^a = \hat{\Sigma}_{\ell,j}^T - \sum_{k=1}^G \sum_{i=1}^I K(\ell,j \rightarrow k,i)$$

$\hat{\Sigma}_{\ell,j}^F$ [1/cm] makroszkópikus fission hatáskeresztmetszet az ℓ -edik csoportban és a j -edik cellában

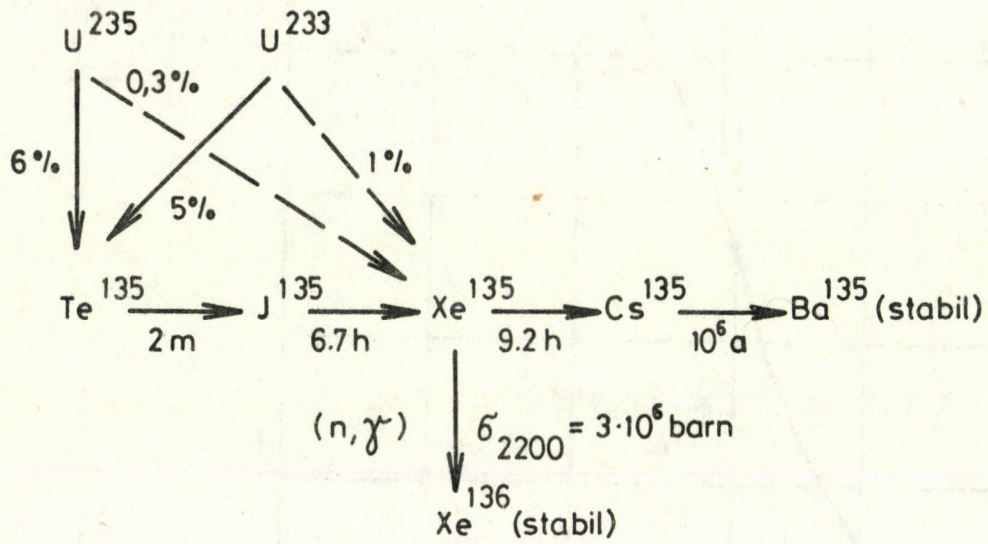
$\hat{\Sigma}_{\ell,j}^S$ [1/cm] makroszkópikus szórás hatáskeresztmetszet az ℓ -edik csoportban és a j -edik cellában

$\phi_{k,j}$ [n/cm²sec] neutronfluxus a k -edik csoportban és a j -edik cellában

ϕ_0 [n/cm²,sec] a névleges üzemállapothoz tartozó neutronfluxus

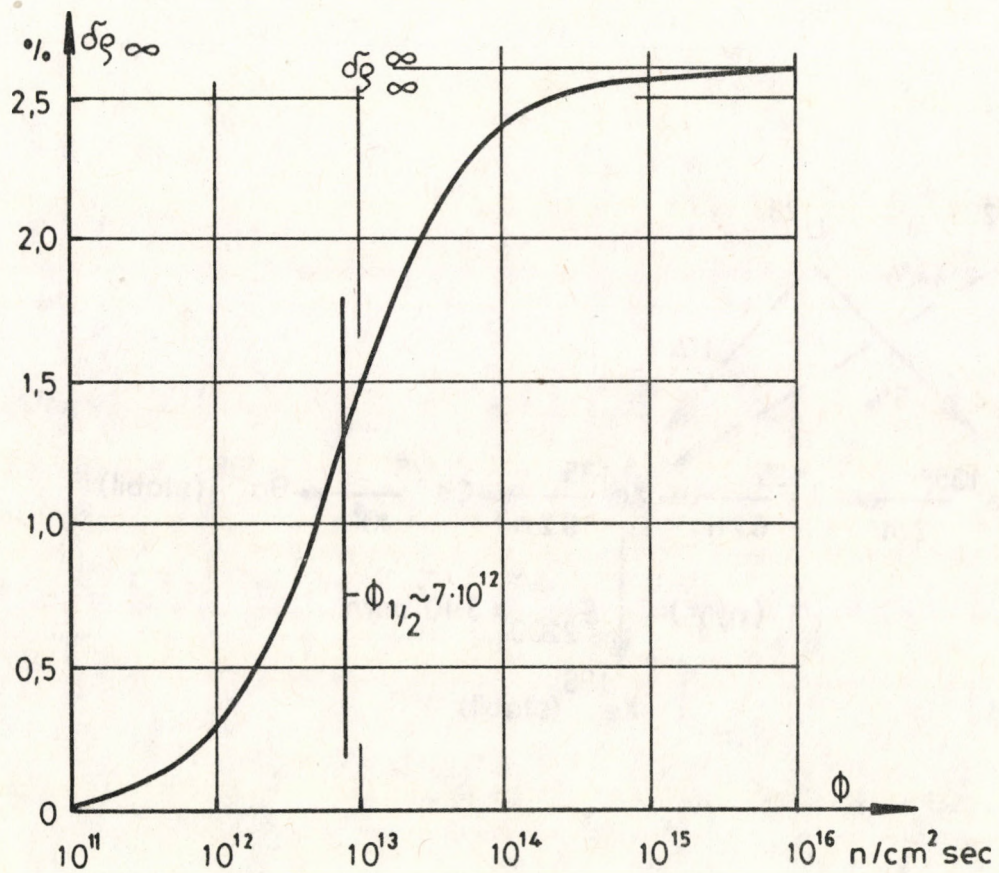
$\phi_{1/2}$ [n/cm²,sec] határfluxus, a /10/ formulával definiálva

γ_m - a hasadási neutronok m -edik csoportban születő hányada



1. ábra.

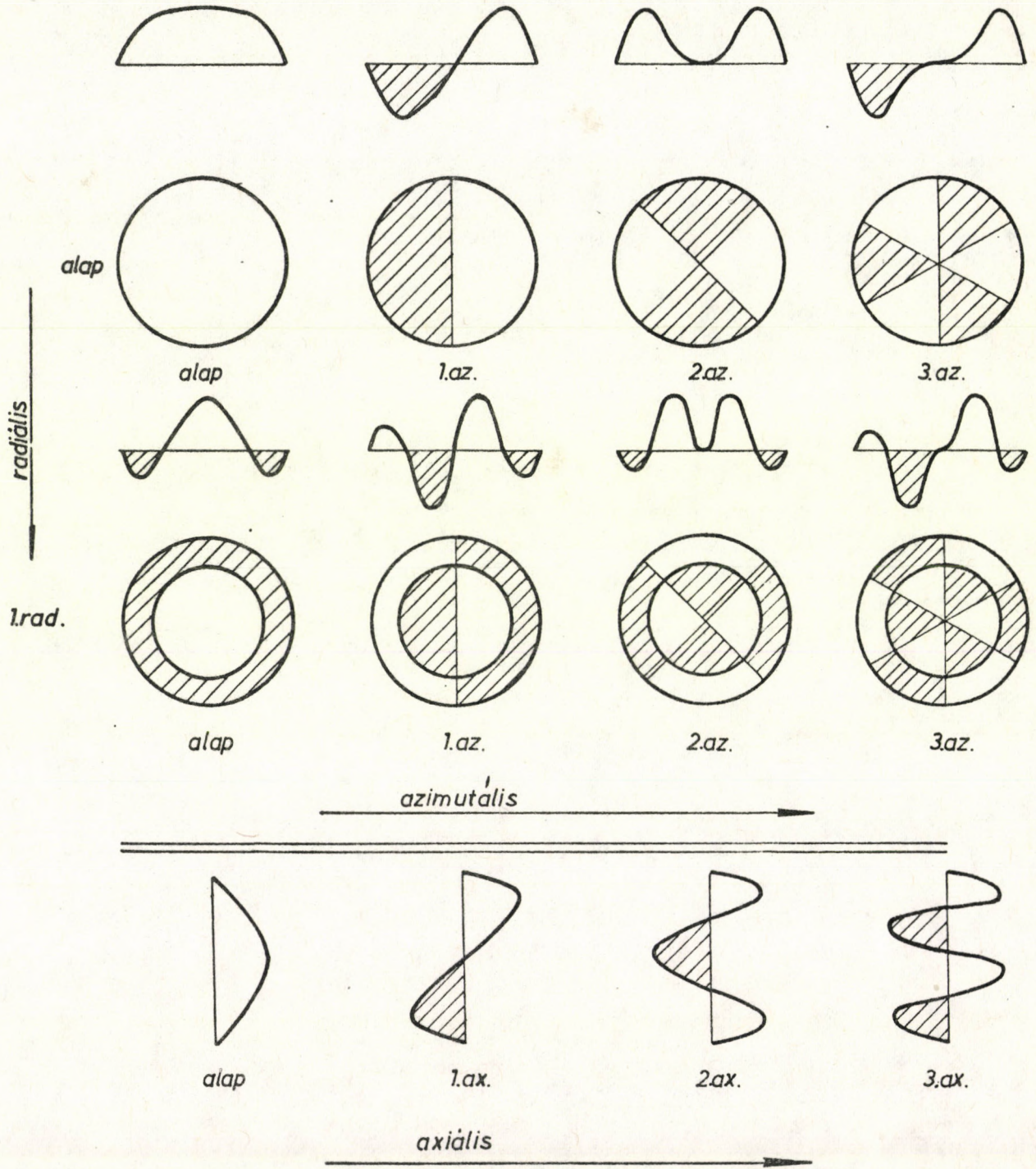
A ^{135}Xe izotóp keletkezésének és bomlásának egyszerűsített vázlata.



2. ábra.

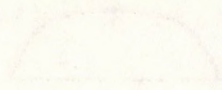
Egyensúlyi xenonmérgezettség a reaktorok fluxusa függvényében. A görbe adatai:

$$\gamma = 247, \quad \beta = 0.064, \quad \sigma^x = 3.0 \cdot 10^6 \text{ barn}, \quad \lambda = 2.09 \cdot 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$$



3. ábra.

A véges hengertérfogatban értelmezhető első néhány módus jellegzetességei és csomófelületei.



3x

4x

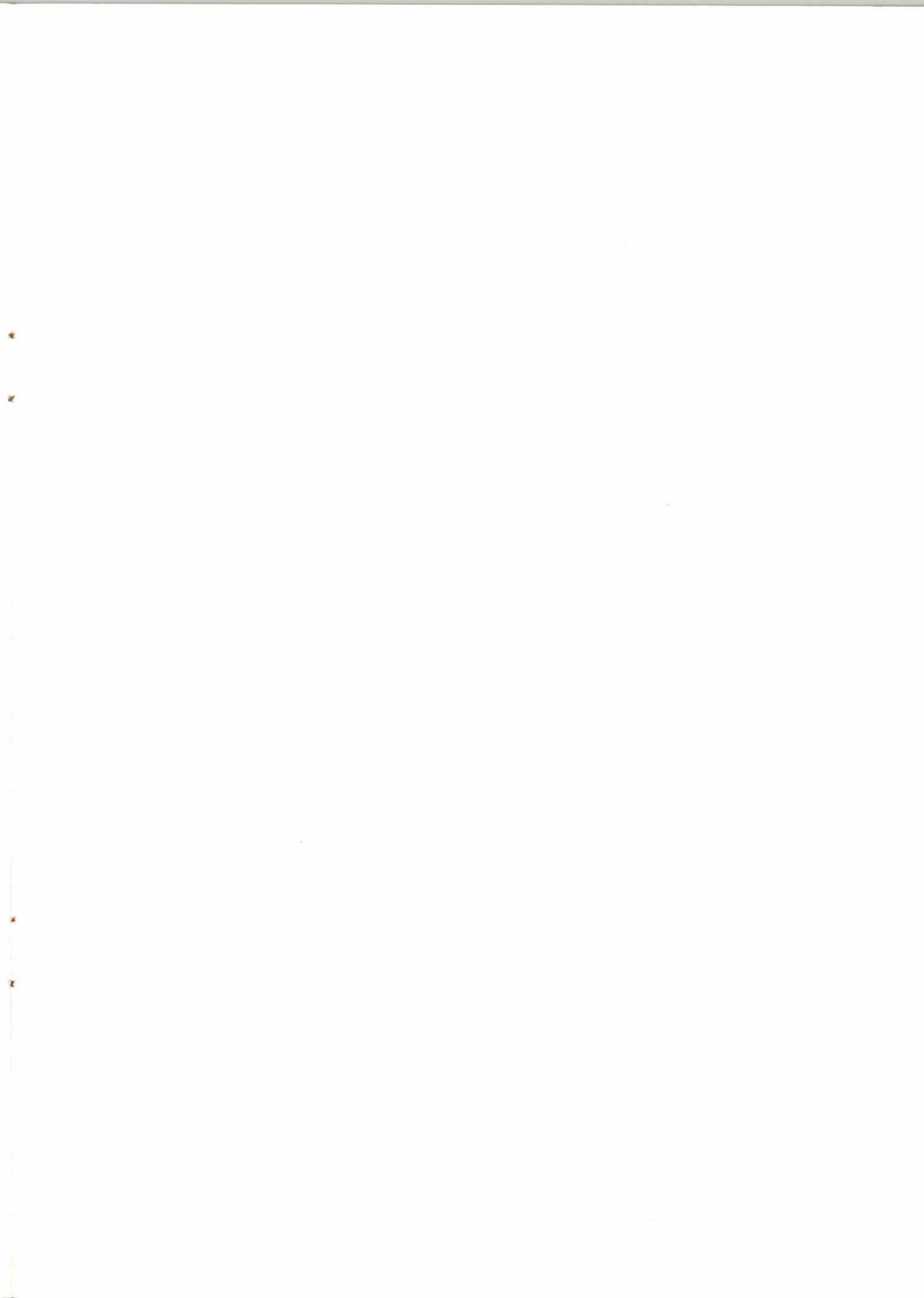
5x

6x

Figure 1

The figure shows the results of the experiment for different values of the parameter x.

The curves are plotted for x = 3, 4, 5, and 6.



63.346



Kiadja a Központi Fizikai Kutató Intézet
Felelős kiadó: Gyimesi Zoltán
Szakmai lektor: Szabados László
Gépelte: Nagy Imréné
Példányszám: 52 Törzsszám: 83-104
Készült a KFKI sokszorosító üzemében
Felelős vezető: Nagy Károly
Budapest, 1983. február hó