Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Természettudományi Kar

Szatmáry Zoltán

Reaktorfizikai feladatok

Egyetemi jegyzet

Budapest, 2007

Tartalomjegyzék

Általános tudnivalók 4
Köszönetnyilvánítás 4
1. Általános, témakörhöz nem vagy nehezen köthető feladatok 5
2. Feladatok az „alapfogalmak” témaköréhez 7
3. Feladatok a „reaktorkinetika” témaköréhez 8
4. Feladatok a „diffúzióegyenlet” témaköréhez 12
5. Feladatok a „diffúzióelmélet” témaköréhez 13
6. Feladatok a „lassuláselmélet” témaköréhez 18
7. Feladatok a „többcsoport módszerek” témaköréhez 20
8. Feladatok a „termikus reaktorok” témaköréhez 22
9. Feladatok a „kiégés” témaköréhez 24
10. Feladatok az „adjungált függvény” témaköréhez 26

Általános tudnivalók

Az alábbi feladatokban található hivatkozások a *Reaktorfizika mérnököknek* című jegyzetre vonatkoznak. A hivatkozott összefüggések többsége megtalálható a *Bevezetés a reaktorfizikába* című könyvben is. A hivatkozások megfelelését fejezetenként külön táblázatokban adjuk meg.

Az egyes feladatokat pontszámokkal láttuk el, amelyek a nehézségi fokot jelzik. A pontszámok az alábbi táblázat szerint értelmezendők:

Pontszám	Nehézségi fok
1–2	A jegyzetből hiányzó számítások pótlása; a megoldások gyakorlatra és zárthelyire valók
3–5	A tanultak egyszerű alkalmazása
6-10	A megoldáshoz elég egy ötlet, illetve ötlet nem kell, de programot kell írni
11–15	A megoldáshoz mind ötlet, mind program írása szükséges
16–20	A megoldáshoz a tanultakon túlmenő ismeret szükséges, illetve a megoldás sok munkát igényel

A feladatok száma 140, az összes megszerezhető pontszám 1100 (kerekített számok).

Köszönetnyilvánítás

A feladatok közül a következőket Dr. Makai Mihály javasolta: 1.1. – 1.11.; 2.10.; 3.14.; 4.6. – 4.8.; 5.27. – 5.33.; 6.16. – 6.22.; 7.13 – 7.14.; 8.12.; 9.10. – 9.11.; 10.1. – 10.8.

1. Általános, témakörhöz nem vagy nehezen köthető feladatok

1.1. Legyen p_k annak a valószínűsége, hogy a neutron egy ütközés után k utódot hoz létre. Induláskor legyen egy végtelen reaktorban N neutron. Képzeljük el, hogy a neutronok egyszerre ütköznek. Az első-, második-, n-edik ütközés után megmaradó neutronok alkotják az első-, második-, n-edik generációt. Mi a valószínűsége, hogy az n-edik generáció után a láncreakció leáll? (16 pont)

1.2. Véletlen fát készítünk az alábbi módon. A fa gyökere egy neutron. Ha ütközése után k neutron keletkezik, a fa k ágra bomlik. Legyen az egy ütközésben keletkező neutronok számának várhatóértéke n. Mi annak valószínűsége, hogy a fa kihal? Mi a feltétele, hogy a fa örök életű legyen? (16 pont)

1.3. A biztonsági elemzés során egy kóddal kiszámítanak egy kimenő-változót, amelynek értéke adott korlát alatt kell, hogy maradjon. Figyelembe véve a bemenő adatok bizonytalanságát, a kimenő-változó értéke is véletlenszerű. Hány számítás kell annak megállapításához, hogy 95% bizonyossággal állíthassuk, a kimenő-változó a korlát alatt marad? (18 pont)

1.4. Megismételjük az előző pontban elmondott számításokat. Mi a valószínűsége, hogy az új felső korlát nagyobb lesz, mint az első? (18 pont)

1.5. Legyen $t = 0$-kor N neutron egy homogén reaktorban. Ütközéskor p_k valószínűséggel keletkezik k neutron ($0 \le k \le M$). Feltesszük, hogy a neutronok egyszerre ütköznek. Az I-edik ütközés után az I-edik generációról beszélünk. Mi annak a valószínűsége, hogy L generáció után a neutronok száma 0 lesz? (20 pont)

1.6. Neutronnyalábbal besugárzunk N darab egyforma tömegű követ. A besugárzott kövek γ-aktivitását NaJ detektorral mérjük. Hány mérésből található meg a legnagyobb aktivitású kő? (20 pont)

1.7. Keressük meg a ^{239}Pu abszorpciós, teljes és hasadási hatáskeresztmetszetének energiafüggését a http://www-nds.iaea.org/ weboldalon és rajzoljuk/nyomtassuk ki az ábrát a (0–100 eV) tartományban! Keressünk olyan anyagot, amelyik alkalmas 1 MeV-nél nagyobb energiájú neutronok detektálására! Hogyan történne a mérés? (16 pont)

1.8. Készítsünk olyan kétszer folytonosan deriválható függvényt, amely eltűnik egy négyzet peremén! (4 pont)

1.9. Készítsünk olyan kétszer folytonosan deriválható függvényt, amely eltűnik egy szabályos hatszög peremén! (18 pont)

1.10. Egy VER-440 kazettában 126 cella van. A cellák kevéscsoport-állandóit (csoportállandóit) numerikus módszerrel állítjuk elő. Annak vizsgálatára, hogyan változik a kazettán belül az egyes cellák teljesítménye a csoportállandók bizonytalanságainak (hibáinak) függvényében, Monte-Carlo számítást végzünk az alábbi módon. A cellákat típusokba soroljuk, a típusok száma K, minden típushoz meghatározzuk a csoportállandók valószínűségi eloszlásfüggvényét, és minden cellában ebből az eloszlásból sorsoljuk annak csoportállandóit. A kisorsolt csoportállandók mellett meghatározzuk a cellák teljesítménysűrűségét. Becsüljük meg K függvényében egy adott pontosságú válasz eléréséhez szükséges számítás számát! (18 pont)

1.11. A reaktorból beérkező (neutron) nyaláb mérete 10 cm × 20 cm, a céltárgy mérete viszont csak 1 cm × 1 cm. Készítsünk egy vázlatot, hogyan kellene a nyaláb

méretét megváltoztatni! Útmutatás: Létezik neutrontükör, amivel a neutronok úgy terelhetőek, mint a fotonok tükörrel. (18 pont)

2. Feladatok az „alapfogalmak” témaköréhez

2.1. Az alumínium sűrűsége 2,7 g/cm^3. Mennyi az alumínium magsűrűsége? (2 pont)

2.2. A víz sűrűsége 0,99799 g/cm^3. Mennyi a hidrogén és oxigén magsűrűsége? (3 pont)

2.3. 1 liter vízben feloldunk 7 g bórsavat (H_3BO_3). Számítsuk ki az egyes atommagok sűrűségét! Amikor 1000 cm^3 vízben C_B gramm bórsavat feloldunk, az oldat térfogata $V = 1000 + C_B/1{,}9$ cm^3-re nő. A víz sűrűségét vegyük a 2.2. feladatból. (5 pont)

2.4. Az UO_2 sűrűsége 10,4 g/cm^3. Számítsuk ki az ^{235}U, ^{238}U és az oxigén magsűrűségét, ha az urán dúsítása 3,6 atomszázalék! (3 pont)

2.5. Az UO_2 sűrűsége 10,4 g/cm^3. Számítsuk ki az ^{235}U, ^{238}U és az oxigén magsűrűségét, ha az urán dúsítása 3,6 súlyszázalék! Útmutatás: a súlyszázalékot számítsuk át atomszázalékra. (5 pont)

2.6. Mutassuk meg, hogy a hőmozgáshoz képest nagy neutronenergiákra az effektív hatáskeresztmetszet megegyezik a magfizikaival, ha az utóbbi az energia lassan változó függvénye! Útmutatás: a (2.9) képletben alkalmazzunk sorfejtést az atommag sebessége szerint. (7 pont)

2.7. Bizonyítsuk be a (2.12) egyenleteket! Útmutatás: használjuk ki az $\vec{\mathbf{\Omega}}$ vektor komponenseinek integráljaira vonatkozó képleteket. (5 pont)

2.8. Bizonyítsuk be a (2.6) egyenletet! (5 pont)

2.9. A paksi atomerőműben a termikus neutronok fluxusa $3 \cdot 10^{13}$ n/(cm^2·s). Hasonlítsuk össze a hidrogénen való neutronszórások és az (n,n) szórások gyakoriságát. A termikus neutronok sebességét vegyük 3 km/s-nek. Az (n,n) reakció hatáskeresztmetszete 35,5 barn. (7 pont)

2.10. Egy reaktor termikus teljesítménye 3000 MW. Mennyi hidrogén keletkezik naponta a neutronok

$$n \to p + e + \bar{\nu}$$

reakció szerinti bomlása révén? (A bomlás felezési ideje 11 perc, egy neutron átlagos élettartama a reaktorban 25 μs, egy hasadásból átlagosan 2,43 neutron keletkezik. $3{,}1 \cdot 10^{10}$ hasadásból szabadul föl 1 J energia.) (8 pont)

2.11. A polietilént gyakran használják moderátornak. Számoljuk ki, hogyan hat a polimerizáció foka a magsűrűségekre! Hasonlítsuk össze a (CH_2–CH_2–CH_2–CH_2) molekula és a (CH_2)_40 molekula magsűrűségeit! A polietilén sűrűségét vegyük 0,92 g/cm^3-nek. (5 pont)

Reaktorfizika mérnököknek	Bevezetés a reaktorfizikába
(2.6)	–
(2.9)	(21.7)
(2.12)	(21.10)

3. Feladatok a „reaktorkinetika” témaköréhez

Az alábbi feladatok számszerű adatai a *3.1. táblázat*ban található időállandók segítségével megoldhatók. Ugyanakkor a hallgatóknak azt ajánljuk, hogy írjanak programot a (3.12) alakú algebrai egyenletrendszerek megoldására és a megoldás grafikus ábrázolására.

3.1. Vezessük le (3.7) és (3.8) képleteket! (1 pont)

3.2. Vezessük le a (3.14) képletet! (1 pont)

3.3. Egy külső forrás nélküli szubkritikus reaktorba a $t = 0$ időpillanatban beviszünk egy neutronforrást, amelynek az erőssége S. Határozzuk meg a pontkinetikai egyenlet megoldását! (2 pont)

3.4. A 3.3. feladatban szereplő reaktorban $S = 10^6\ \mathrm{s}^{-1}$; a reaktivitás –1 \$. Rajzoljuk fel a fluxus időtől való függését az első 3 percben! Útmutatás: használjuk fel a 3.2. és 3.3. alfejezetekben található időállandókat és együtthatókat. A Λ generációs időt vegyük 25 μs-nak, $\beta = 0{,}0065$. (4 pont)

3.5. A reaktort a $t = 0$ időpontban szuperkritikussá tesszük $\rho/\beta = 0{,}2$ \$ reaktivitással, és egyidejűleg bejuttatunk egy $S = 32000\ \mathrm{s}^{-1}$ erősségű külső neutronforrást. Számítsuk ki a *3.2. ábra* megfelelőjét ebben az esetben! Útmutatás: használjuk fel a 3.2. és 3.3. alfejezetekben található időállandókat és együtthatókat. A Λ generációs időt vegyük 25 μs-nak, $\beta = 0{,}0065$. (8 pont)

3.6. Hogyan változik a fluxus egy kritikus reaktorban, amelyben egy időben állandó külső forrás van?

a) Vezessük le a megfelelő képleteket arra az esetre, amikor a reaktor $t = 0$-ig szubkritikus volt, majd a $t = 0$-ban pillanatszerűen kritikussá tesszük! Az adatokat vegyük a 3.4. feladatból. (4 pont)

b) Rajzoljuk fel a fluxus időfüggését! (4 pont)

3.7. Egy pulzált reaktivitásmérésben a ciklusidő $T = 12$ ms, az időanalizátor csatornaszélessége $\mathrm{d}t = 100$ μs. A mért bomlásgörbe a következő:

223	1482	2298	2849	3210	3295	3329	3326	3163	3018
3015	2731	2598	2494	2294	2147	1982	1930	1768	1623
1544	1379	1365	1198	1090	970	1040	922	810	852
761	706	666	614	568	616	519	477	473	451
436	403	408	329	360	340	352	334	305	333
281	300	320	289	277	289	292	280	282	274
264	254	237	264	230	271	254	230	248	278
222	233	261	249	252	238	225	213	242	262
205	240	258	237	254	218	225	212	219	227
237	237	236	246	244	228	255	222	236	199

a) Sjöstrand módszerével határozzuk a reaktivitást!

b) Számítsuk ki β/Λ értékét!

c) A kiértékelést végezzük el mind függvényillesztéssel, mind grafikusan! Figyelmeztetés: a görbe elején a térfüggő effektusok miatt a görbe eltér a tiszta exponenciálistól. Ezt a részt az illesztéskor el kell hagyni!

(10 pont)

3.8. Egy pulzált reaktivitásmérésben a ciklusidő $T = 12$ ms, az időanalizátor csatornaszélessége $\mathrm{d}t = 50$ μs. A mért bomlásgörbe a következő:

371	914	1377	1807	2202	2443	2684	2917	3010	3117
3366	3306	3392	3497	3469	3484	3457	3561	3497	3436
3454	3323	3412	3241	3148	3017	3207	3057	2898	3021
2883	2803	2744	2654	2569	2680	2472	2378	2363	2306
2258	2169	2163	1960	2011	1940	1945	1878	1783	1823
1673	1689	1708	1606	1551	1550	1527	1472	1448	1401
1352	1303	1237	1271	1171	1235	1175	1098	1114	1154
1015	1015	1051	1007	992	945	900	858	898	919
792	843	862	806	823	744	742	706	707	709
714	703	689	695	682	645	679	615	629	560
556	636	587	562	609	557	611	565	528	562
528	540	540	564	559	496	452	527	527	522

a) Sjöstrand módszerével határozzuk a reaktivitást!

b) Számítsuk ki β/Λ értékét!

c) A kiértékelést végezzük el mind függvényillesztéssel, mind grafikusan! Figyelmeztetés: a görbe elején a térfüggő effektusok miatt a görbe eltér a tiszta exponenciálistól. Ezt a részt az illesztéskor el kell hagyni!

d) A kísérletező két beállítási hibát is elkövetett, amelyek a 3.7. feladathoz képest elbonyolítják a kiértékelést. Mi ez a két hiba?

(10 pont)

3.9. Egy szubkritikus reaktorban van egy $S = 10^6\ \mathrm{s}^{-1}$ erősségű külső neutronforrás. Miután a fluxus állandó értékre beállt, a $t = 0$ időpillanatban pillanatszerűen kirántjuk a neutronforrást.

a) Vezessük le az ezt követő t időkre a $\varphi(t)$ fluxust megadó képleteket!

b) Számítsuk ki numerikusan és rajzoljuk fel $\varphi(t)$ görbéjét! ($\rho = -1$ \$, $\Lambda = 25$ μs)

c) A kapott eredmények alapján javasoljunk egy reaktivitásmérési módszert! (A módszer legyen a rúdejtéses módszerhez hasonló.)

(10 pont)

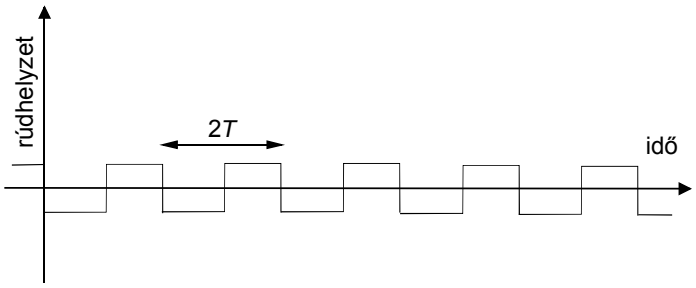
3.10. Egy szuperkritikus reaktorban hagyjuk, hogy kialakuljon egy tiszta exponenciális felfutás ($\rho = 0{,}2$ \$). A $t = 0$ időpontban a reaktort hirtelen visszavisszük a kritikus állapotba. Határozzuk meg, hogyan változik ezt követően a fluxus és a későneutron-anyamagok koncentrációja:

a) Vezessük le a képleteket, és végezzünk numerikus vizsgálatot! (7 pont)

b) Mi a lényeges különbség a fluxus és a C_i koncentrációk időfüggése között? Magyarázzuk meg ezt az eltérést! (7 pont)

3.11. Egy kritikus reaktorban az egyik szabályozó rúd helyzetét a kritikus állapot körül kis amplitúdóval időben szinuszos függvény szerint változtatjuk. Ennek hatására a reaktivitás is hasonló időfüggvény szerint változik. A változás ω körfrekvenciájának függvényében számítsuk ki, milyen amplitúdóval ingadozik a fluxus! Rajzoljuk fel az átviteli függvényt, és vizsgáljuk meg az $\omega >> \lambda_i$ határesetet! Útmutatás: a fluxust írjuk fel $\varphi = \varphi_0 + \mathrm{d}\varphi$ alakban, és a pontkinetikai egyenletben hanyagoljuk el a változások magasabb rendű hatványait, illetve szorzatait. Alkalmazzunk hasonló közelítés az anyamagok koncentrációira is. (10 pont)

3.12. Egy kritikus reaktorban az egyik szabályozórúd helyzetét négyszöghullám szerint változtatjuk (lásd a mellékelt ábrán). Változik-e közben a fluxus időátlaga? Ábrázoljuk a reaktor válaszát a következő paraméterek mellett: $T = 1$ s, a reaktivitás –0,1 \$ és +0,1 \$ között változik, $\Lambda = 25$ μs. (15 pont)



3.13. Egy szabályozórúd kalibrálásakor 1/N módszerrel az alábbi táblázatban közölt beütésszámokat kaptuk. A rúd $z_1 = 500$ mm és $z_2 = 600$ mm helyzeténél szuperkritikus állapotban megmértük a kétszerezési időt: a következő értékeket kaptuk eredményül $T_1 = 132{,}2 \pm 4{,}3$ s, illetve $T_2 = 17{,}0 \pm 1{,}1$ s.

a) Rajzoljuk fel a rúd kalibrációs görbéjét! Útmutatás: használjuk az 1. függelék táblázatait.

b) Végezzünk hibaszámítást is! Útmutatás: Az N beütésszámokat tekintsük Poisson-eloszlásúnak.

(10 pont)

z (mm)	N
0	4129
100	4130
200	4270
300	4727
400	5652
500	7123
600	9852
700	14397
800	19997
900	24034
1000	25219

3.14. Egy szubkritikus reaktort neutronforrással hajtunk meg. A forrás azonban a gyorsító tulajdonságai miatt nem stabil. Ezt egy periodikus lépcsőfüggvénnyel modellezzük, amelynek T hosszúságú periódusa alatt

$$S(t) = \begin{cases} S_0 & 0 \le t \le T - \tau, \\ 0 & T - \tau \le t \le T. \end{cases}$$

Oldjuk meg a pontkinetikai egyenletet ebben az esetben! (10 pont)

3.15. Tegyük fel, hogy a 3.14. feladatban a működés T időtartama valószínűségi változó, de a kimaradás τ időtartama állandó. Oldjuk meg a feladatot az alábbi két esetben!

a) T egyenletes eloszlású a [0, 30 s] intervallumban. (8 pont)

b) T exponenciális eloszlású 30 s várható értékkel. (8 pont)

c) Hogyan látnánk hozzá ehhez a feladathoz, ha τ is valószínűségi változó lenne? (4 pont)

mérnököknek	reaktorfizikába
(3.7)	(36.5)
(3.8)	(36.4)
(3.12)	–
(3.14)	(37.1)
3.2./3.3. alfejezet	36.3. táblázat
3.2. ábra	–
1. függelék	–

4. Feladatok a „diffúzióegyenlet” témaköréhez

4.1. Bizonyítsuk be a (4.8) egyenleteket! (1 pont)
4.2. Bizonyítsuk be a (4.9) egyenleteket! (1 pont)
4.3. Bizonyítsuk be a (4.13a) egyenleteket! (1 pont)
4.4. Bizonyítsuk be a (4.13b) és (4.13c) egyenleteket! (2 pont)
4.5. Bizonyítsuk be a (4.13d) és (4.13e) egyenleteket! (2 pont)
4.6. A Fick-törvény levezetésénél szokásos feltenni, hogy a szögfüggő fluxus szög szerinti második és magasabb momentumai eltűnnek. Hogyan alakul a Fick-törvény, ha a második momentum nem hagyható el? (5 pont)
4.7. Határozzuk meg az $\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ \sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$ normálisú felület pozitív normálisa irányába eső parciális áramot feltéve, hogy a szögfüggő fluxust

$$\Psi(r, E, \vec{\mathbf{\Omega}}) = \frac{1}{4\pi}\Phi(r, E) + \frac{3}{4\pi}\vec{\mathbf{\Omega}}\mathbf{J}(r, E)$$

adja meg! (8 pont)
4.8. A hasadásokból származó energia a fűtőelem és a moderátor hőmérsékletét is megváltoztatja. Ha ezt összekapcsoljuk a felmelegedés okozta kitágulással, egy nem-lineáris egyenletet kapunk a fluxusra. Vezessük le (implicit formában) a visszacsatolt egyenletrendszert! (10 pont)
4.9. Hogyan viselkedik diffúzióelméletben az áram és a fluxus két anyag határán? (1 pont)
4.10. Hogyan viselkedik transzportelméletben az áram és a fluxus két anyag határán? (1 pont)

5. Feladatok a „diffúzióelmélet” témaköréhez

5.1. Dolgozzuk ki az (5.5) és (5.6) egyenletek levezetésének részleteit! (1 pont)
5.2. Mutassuk meg, hogy ha az időfüggés szeparálható, az csak exponenciális lehet! Útmutatás: vezessük le az (5.1) egyenletet. (1 pont)
5.3. Vezessük le részletesen az (5.15) egyenletet! (1 pont)
5.4. Vezessük le részletesen az (5.18) egyenletet! (1 pont)
5.5. Hogy viszonylik egymáshoz a henger sugara és magassága, amelyben a kritikus tömeg minimális? Útmutatás: induljunk ki a kritikussági feltételből. (4 pont)
5.6. Egy gömb alakú reaktorban állandónak tartjuk a reaktor teljesítményét. Számítsuk ki, hogyan függ a gömb sugarától a reaktorból kiszökő neuronok száma! Útmutatás: induljunk ki az 5.6.3. szakaszban írtakból. (4 pont)
5.7. Számítsuk ki egy csupasz gömb és egy végtelen hosszú csupasz henger kritikus sugarát! Az egycsoport-állandókat vegyük az *5.1. táblázat*ból. (3 pont)
5.8. Számítsuk ki egy reflektált gömb és egy végtelen hosszú reflektált henger kritikus sugarát! A reflektort tekintsük végtelennek. Az egycsoport-állandókat vegyük az *5.1. táblázat*ból. (4 pont)
5.9. Az *5.7. ábrá*n látható reaktorban a reflektor külső határa $x = \pm b$ -nél van ($b > a$). Számítsuk ki a reflektormegtakarítást, amikor $b - a = 10$ cm! Az egycsoport-állandókat vegyük az *5.1. táblázat*ból. (8 pont)
5.10. Számítsuk ki az *5.7. ábrá*n látható rendszerben a reflektormegtakarítást, ha a csupasz reaktor esetében nem hanyagoljuk el az extrapolációs távolságot! Az egycsoport-állandókat vegyük az *5.1. táblázat*ból.
a) Először alkalmazzuk a (4.20b) képlet szerinti extrapolált felületet! (3 pont)
b) Ezt követően alkalmazzuk a (4.19) határfeltételt! (3 pont)
c) Magyarázzuk meg az eltérést! (4 pont)
5.11. Adjunk becslést a neutronáramra!
a) Először adjunk becslést a diffúzióelmélet szerint! (5 pont)
b) Eltérhető-e egy nagyobb becslés a transzportelmélet keretén belül? Ha igen, milyen mértékig és milyen feltételek között? (5 pont)
c) Adjunk meg korlátot a fluxus gradiensére diffúzióelméletben! (5 pont)
5.12. Számítsuk ki egy véges t vastagságú, az x-tengelyre merőleges síkokkal határolt reflektor albédóját! Mutassuk meg, hogy $t \to \infty$ esetén ez (5.59)-hez tart! (8 pont)
5.13. Számítsuk ki egy véges t vastagságú, az x-tengelyre merőleges síkokkal határolt reflektor albédóját, amelyen kívül egy más anyagi minőségű reflektor van! (8 pont)
5.14. Legyen az $x = \pm a$ síkokkal határolt homogén térrészben egy térben egyenletes, izotrop neutronforrás, amely 1 cm^3-ben 1 s alatt 1 neutront emittál. A térrész felületének 1 cm^2-én keresztül 1 s alatt hány neutron lép ki a vákuumba? A feladatot oldjuk meg mind a (4.19) határfeltétellel, mind a (4.20) szerinti extrapolációs távolsággal! (10 pont)
5.15. Számítsuk ki egy véges R sugarú izotrop neutronforrás belsejében és a forráson kívül kialakuló neutronfluxust, ha a forrás 1 s alatt térben egyenletesen 1 neutront termel! Az egyszerűség kedvéért tegyük fel, hogy a csoportállandók ugyanazok a forráson belül, mint kívül. (10 pont)
5.16. Oldjuk meg az 5.15. feladatot egy R sugarú végtelen hengerre! (8 pont)
5.17. Oldjuk meg az 5.15. feladatot az $x = \pm a$ síkokkal határolt homogén térrészre!

(8 pont)

5.18. Ha ismerjük a transzport vagy diffúziós magfüggvényt síkforrásra, akkor ebből kiszámíthatjuk a pontforrásra vonatkozó magfüggvényt. Mi ez az összefüggés? (10 pont)

5.19. Oldjuk meg az 5.14. feladatot egy R sugarú gömbre! (8 pont)

5.20. Az ^{238}U egy grammjában a spontán hasadások percenként 26 neutront termelnek. Egy R extrapolált sugarú reaktorban 3 kg ^{238}U van egyenletes sűrűséggel. Mit kell írni az (5.44a) egyenletben $S_n(t)$ helyére?

a) Adjuk meg a képletet az alapmódusra ($n = 1$) és az első két felharmonikusra ($n = 2$ és 3)! (5 pont)

b) Az *5.1. táblázat* adatai alapján adjunk számszerű értékeket a reaktor kritikus állapotára! (3 pont)

c) Végezzük el ezeket a számításokat a –2 $ reaktivitású állapotra is! (2 pont)

5.21. Mi lesz a relaxációs hossz az *5.6. ábra* szerinti exponenciális kísérletben, ha a hengert nem tiszta moderátor tölti ki, hanem egy sokszorozó közeg, amelyre $k_\infty < 1$? (10 pont)

5.22. Tekintsünk egy sokszorozó közeget, amelyet végtelen reflektor vesz körül. Számítsuk ki az egyenlőtlenségi tényezőt a következő három geometriában!

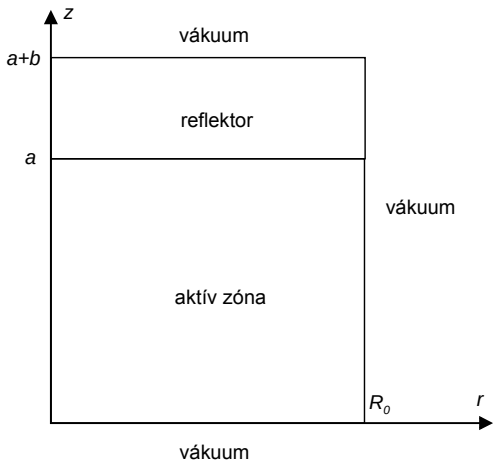
a) Az $x = \pm a$ síkokkal határolt rendszer; (5 pont)

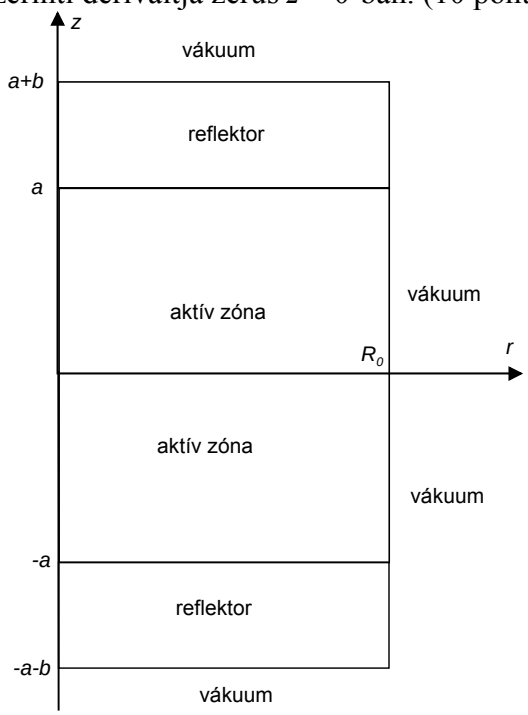
b) R sugarú végtelen hosszú henger; (3 pont)

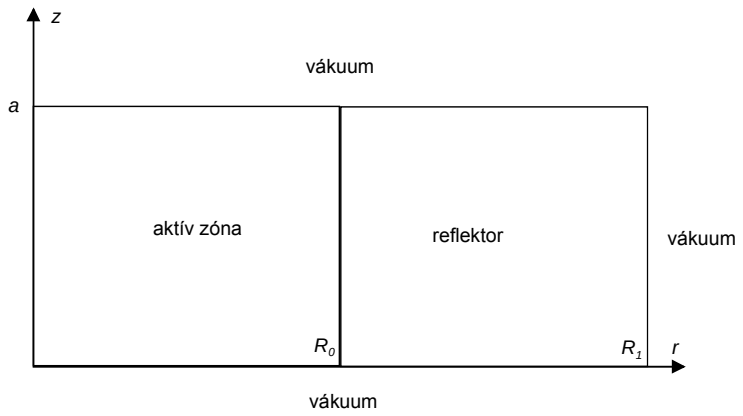
c) R sugarú gömb. (3 pont)

Az eredményeket hasonlítsuk össze a csupasz rendszerhez tartozó megfelelő eredményekkel! Az egyenlőtlenségi tényező a $\Sigma_f \Phi$ teljesítmény maximális értéke osztva az aktív zónára átlagolt értékével.

5.23. Tekintsük az alábbi három hengeres geometriájú reaktort. Írjuk fel explicit formában a rájuk vonatkozó kritikussági feltételt! Mutassuk meg, hogy a fluxus szeparálható az r és z változók szerint! Útmutatás: mindegyik esetben a fluxus r szerinti deriváltja zérus $r = 0$-ban; az első és harmadik esetben a fluxus zérus $z = 0$-ban, de a második esetben a fluxus z szerinti deriváltja zérus $z = 0$-ban. (10 pont)





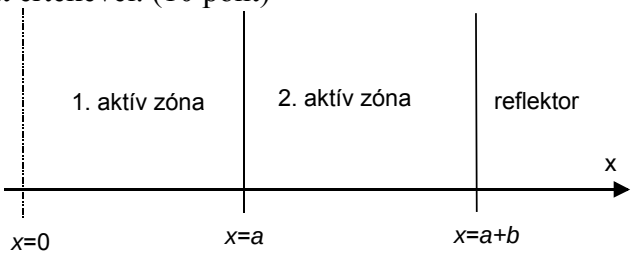


5.24. Tekintsük az alábbi, az $x = 0$ síkra szimmetrikus síkgeometriájú, két hasadó tartományból álló rendszert. A reflektort a d reflektormegtakarítással jellemezzük. Számítsuk ki a 2. számú aktív zóna b vastagságának a kritikus állapothoz tartozó értékét, és számítsuk ki az egyenlőtlenségi tényezőt! Vizsgájuk meg külön a következő két esetet!

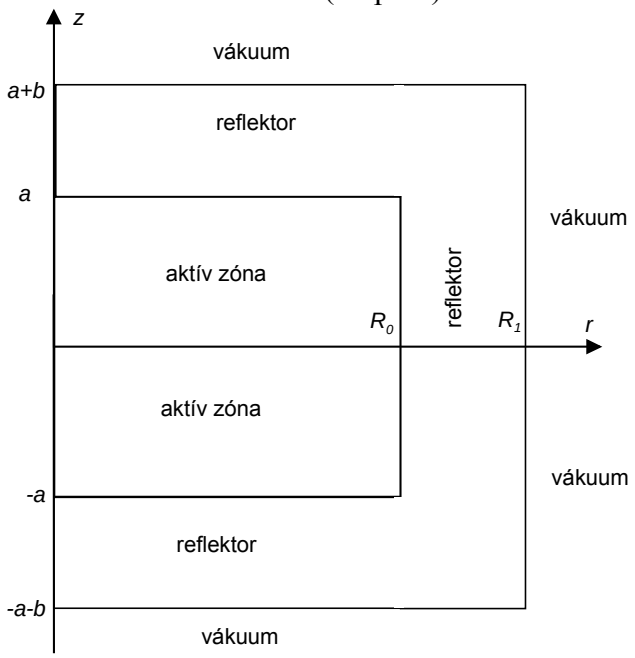
a) Az 1. számú aktív zónában $\nu\Sigma_{\mathrm{f}} \geq \Sigma_{\mathrm{a}}$.

b) Az 1. számú aktív zónában $\nu\Sigma_{\mathrm{f}} < \Sigma_{\mathrm{a}}$.

Az egyenlőtlenségi tényező a $\Sigma_{\mathrm{f}}\Phi$ teljesítmény maximális értéke osztva az aktív zónára átlagolt értékével. (10 pont)



5.25. Tekintsük az alábbi hengeres geometriájú reaktort, amelynek van mind axiális, mind radiális reflektora. Mutassuk meg, hogy ebben a rendszerben a fluxus *nem* szeparálható az r és z változók szerint! (10 pont)



5.26. Egy reaktor homogén aktív zónáját az $x = \pm a$ síkok határolják. Feltesszük, hogy térben állandók a következő mennyiségek: (1) a hasadóanyag $\nu\sigma_\mathrm{f}$ és σ_a mikroszkopikus hatáskeresztmetszetei; (2) az aktív zónát alkotó többi anyag Σ_m makroszkopikus abszorpciós hatáskeresztmetszete; (3) az aktív zóna D diffúzióállandója. Határfeltételként előírjuk, hogy[1]

$$\frac{1}{\Phi(x)}\frac{\mathrm{d}\Phi(x)}{\mathrm{d}x}\bigg|_{x=\pm a} = -\frac{1}{L}.$$

Megengedjük, hogy a hasadóanyag $N(x)$ magsűrűsége helyről helyre változzon.

a) Optimalizálható-e a hasadóanyag eloszlása oly módon, hogy az egyenlőtlenségi tényező 1 legyen? (1 pont)
b) Ha igen, mi ez az eloszlás? (4 pont)
c) Hasonlítsuk össze az eredményt a kritikusságot biztosító N_0 egyenletes uránsűrűséggel! (3 pont)
d) Megoldható ez a feladat csupasz reaktorban? (2 pont)

Az egyenlőtlenségi tényező a $\Sigma_\mathrm{f}(x)\Phi(x)$ teljesítmény maximális értéke osztva az aktív zónára átlagolt értékével. Útmutatás: Az egycsoport diffúzióegyenletet írjuk a következő alakba:

$$D\frac{\mathrm{d}^2\Phi(x)}{\mathrm{d}x^2} + \left[\nu\sigma_\mathrm{f}N(x) - \sigma_\mathrm{a}N(x) - \Sigma_\mathrm{m}\right]\Phi(x) = 0.$$

5.27. Az $x = 0$ sík két végtelen, homogén félteret választ el. Mindkét féltérben szórás és befogás történhet. Az $x > 0$ féltérben $S = 1\ \mathrm{cm}^{-3}$ egyenletes izotrop neutronforrás van. Mi a valószínűsége, hogy egy ebben a féltérben keletkező neutron az $x < 0$ féltérben abszorbeálódik? (8 pont)

5.28. Homogén slab (hasáb) régiókból álló anyagban mi annak a valószínűsége, hogy a j-ik H_j vastag régióban egyenletes eloszlással keletkező neutron első ütközését a k-adik régióban szenvedi el? (10 pont)

5.29. Egy hengeres reaktort úgy teszünk szuperkritikussá, hogy egy rövid τ időre erősen reflektáló (albédó = 2) réteggel vesszük körül. Mekkora lesz a reaktivitás, ha a reaktort teljesen reflektáló réteggel körülvéve $k_\mathrm{eff} = 1{,}23$ adódik, a kritikussághoz pedig 0,96 albédó szükséges? (10 pont)

5.30. Egy hasáb alakúnak tekinthető térfogatot két homogén, ismert anyagi tulajdonságú anyag tölt ki, a közöttük lévő határvonal helyét méréssel kell megállapítani. Készítsünk tervet, hogyan végeznénk el a mérést és hogyan értékelnénk ki! (10 pont)

5.31. Részletezzük az (5.44) egyenletek levezetését! (2 pont)

5.32. Mutassuk meg, hogy ha a reaktornak van önmagában kritikus része fekete peremfeltétel mellett, akkor a reaktor egésze is legalább kritikus, bármilyen legyen is a geometria és az anyagi összetétel! (5 pont)

5.34. Mennyi a kritikus sugara egy tiszta ^{235}U gömbnek, ha a sűrűsége 18,8 g/cm^3? A nem-zérus mikroszkopikus hatáskeresztmetszetek: $\sigma_\mathrm{f} = 1{,}3$ barn, $\sigma_\mathrm{s} = 4$ barn, egy

[1] Ha az aktív zónát mindkét oldalról egy végtelen reflektor veszi körül, L egyszerűen a reflektor diffúziós hossza.

hasadásból átlagosan 2,5 neutron keletkezik. A szórás izotrop, diffúziós közelítés használható, alkalmazzuk fluxus=0 peremfeltételt! (5 pont)

Reaktorfizika mérnököknek	Bevezetés a reaktorfizikába
(4.19)	(31.10)
(4.20)	(33.11)
(4.20b)	(33.11b)
(5.1)	(22.6a)
(5.5)	(32.2)
(5.6)	(32.3)
(5.15)	(33.4)
(5.18)	(33.7)
(5.44)	(36.3)
(5.44a)	(36.3a)
(5.59)	–
5.6.3. szakasz	3.5. alfejezet vége
5.1. táblázat	62.1. táblázat
5.6. ábra	34.4. ábra
5.7. ábra	62.1. ábra

6. Feladatok a „lassuláselmélet” témaköréhez

6.1. Számítsuk ki $\cos\vartheta$ átlagát! (1 pont)
6.2. Sorfejtéssel igazoljuk a (6.10b) képletben látható közelítést! A hiba $1/A$ hányadik hatványával kezdődik? (2 pont)
6.3. Vezessük le a (6.20) egyenletet! (1 pont)
6.4. A 6.3.2. szakaszban vezessük le a $q(u) = c\xi$ összefüggést! (1 pont)
6.5. Igazoljuk a (6.26) egyenletet! (2 pont)
6.6. Igazoljuk a (6.35) összefüggést! (2 pont)
6.7. Mutassuk meg, hogyan jutunk el a (6.42) Maxvell-eloszlástól a (6.44) Maxwell-spektrumig! (2 pont)
6.8. Becsüljük meg a termikus energiákig való lassuláshoz szükséges időt és a termikus diffúzió időtartamát! Mutassuk meg, hogy a lassuláshoz szükséges idő elhanyagolható a diffúzió idejéhez képest! (5 pont)
6.9. A (6.29) közelítő modellnek is megfeleltethető egy lassulás magfüggvény.
a) Írjuk fel ennek analitikus képletét! (5 pont)
b) A szóró mag A tömegszámának különböző értékei mellett grafikusan hasonlítsuk össze a (6.12) magfüggvénnyel! (5 pont)
6.10. Végtelen abszorpciómentes közegre oldjuk meg a lassulási egyenletet Laplace-transzformációval! A spektrumot vegyük monoenergetikusnak: $f(E) = \delta(E)$. (10 pont)
6.11. Termikus energiákon a fluxust egy-egy állandó (átlagos) értékkel közelítjük a fűtőelem belsejében és a moderátorban. Ezzel a közelítéssel fejezzük ki a (6.49b) termikus hasznosítási tényezőt a (6.49a) előnytelenségi tényezővel! (5 pont)
6.12. Termikus energiákon a fluxust egy-egy állandó (átlagos) értékkel közelítjük a fűtőelem belsejében és a moderátorban. Ezzel a közelítéssel
a) (6.50) szerint írjuk fel a termikus csoportállandó képletét az abszorpciós, hasadási, szórási és transzport hatáskeresztmetszetekre! (4 pont)
b) Az *1.2. táblázat* adatait felhasználva számítsuk ki a csoportállandókat egy 3,6% dúsítású paksi elemi cellára, ha az előnytelenségi tényező $\delta = 1{,}15$! Adatok: a fűtőelem sugara 0,76 cm, a hatszöges cella rácsállandója 1,22 cm, az UO_2 sűrűsége 10,4 g/cm^3, a Zr-burkolatot elhanyagoljuk, a víz sűrűsége 0,99799 g/cm^3. Útmutatás: használjuk fel a 2.2. és 2.5. feladatok eredményeit. (4 pont)
6.13. A Hellstrand-képletek segítségével számítsuk ki a paksi atomerőmű 3,6%-os fűtőelemére a rezonanciaintegrált a hőmérséklet függvényében! Adatok: a fűtőelem sugara 0,76 cm, az UO_2 sűrűsége 10,4 g/cm^3. (4 pont)
6.14. A (6.30) képletek alapján u függvényében grafikusan vázoljuk fel a $\psi(u)$ spektrum menetét! (4 pont)
6.15. Az abszorpciós hatáskeresztmetszet epitermikus csoportállandója

$$\Sigma_{\mathrm{a}}^{\mathrm{epi}} = \frac{\int_{E_{\mathrm{m}}}^{\infty} \Sigma_{\mathrm{a}}(E)\psi(E)\,\mathrm{d}E}{\int_{E_{\mathrm{m}}}^{\infty} \psi(E)\,\mathrm{d}E}.$$

Adjunk becslést erre a 6.13. feladat megoldásában kiszámolt rezonanciaintegrálok segítségével! Útmutatás: induljunk ki a (6.21) egyenletből $B^2 = 0$ helyettesítéssel. (10 pont)

6.16. Oldjuk meg a lassulási egyenletet abban az esetben, amikor mind a szórási, mind az abszorpciós hatáskeresztmetszet független a letargiától! Az eredményt hasonlítsuk össze a (6.30) közelítő megoldással! (5 pont)

6.17. Írjuk fel a lassulási egyenletet az energiaváltozót használva! Határozzuk meg a Placzek-tranziens szakadásának nagyságát az αE_0 helyen (itt E_0 a forrás által kibocsátott neutronok energiája). (4 pont)

6.18. Mi a $q(E)$ lassulási sűrűség alakja, ha $E << \alpha E_0$? Hogyan kapható meg $q(E)$-ből a rezonanciakikerülés valószínűsége? (3 pont)

6.19. Hány ütközést szenved átlagosan egy neutron, amíg energiája 100 keV-ról 2 eV-ra csökken

a) ^{238}U magon,
b) deutériumon,
c) grafiton (^{12}C) és
d) oxigénen (^{16}O)?

(5 pont)

6.20. A Greuling-Goertzel lassulási modellben szereplő $a(u) = -\dfrac{G_{10}(u)}{G_{20}(u)}$ paraméter elhagyható, ha $A > 27$. Mutassuk meg, hogy ezzel az elhanyagolással a Greuling-Goertzel-modell átmegy a Fermi-modellbe! (5 pont)

6.21. Mi a valószínűsége annak, hogy grafiton lassuló 100 eV-os neutronok beleesnek egy 1,65 eV-nál lévő $\Gamma = 0{,}1$ eV szélességű rezonanciába? Hogyan változik ez a valószínűség, ha a hőmérséklet növekedése miatt a rezonancia kiszélesedik, és szélessége háromszorosára nő? (6 pont)

6.22. A sokszög alakú cellát gyakran helyettesítjük henger alakú cellával.

a) Hogyan kell meghatározni a henger alakú cella sugarát? (2 pont)
b) Henger alakú cellában mivel kell helyettesíteni a reflektív peremfeltételt? (2 pont)
c) Okoz-e a reflektív peremfeltétel hibát a hengeres cellában? (2 pont)

Reaktorfizika mérnököknek	Bevezetés a reaktorfizikába
(6.10b)	(42.6b)
(6.12)	(42.8)
(6.20)	–
(6.21)	–
(6.26)	(43.14)
(6.29)	(43.18)
(6.30)	(43.20)
(6.35)	(44.7)
(6.42)	(45.8)
(6.44)	(45.10)
(6.49a)	–
(6.49b)	(45.15)
(6.50)	–
6.3.2. szakasz	(43.8) képlet

7. Feladatok a „többcsoport módszerek” témaköréhez

7.1. Igazoljuk a (7.45) és (7.46) összefüggéseket! (2 pont)

7.2. Írjuk fel explicit alakban a (7.43) iterációs képletben szereplő **A** mátrix elemeit! A mátrixot hipermátrixnak tekintve, jellemezzük az egyes blokkokat! Írjuk fel explicit alakban a mátrix i-edik sorának összegét, és mutassuk meg, hogy 1-nél határozottan kisebb! (4 pont)

7.3. Egy csupasz homogén reaktor kétcsoport elméletét dolgozzuk ki

a) egy R sugarú végtelen hosszú hengerre és (2 pont)

b) egy R sugarú gömbre! (2 pont)

Útmutató: kövessük a 7.2.1. szakasz gondolatmenetét.

7.4. Egy végtelen reflektorral körülvett homogén reaktor kétcsoport elméletét dolgozzuk ki

a) egy R sugarú végtelen hosszú hengerre és (3 pont)

b) egy R sugarú gömbre! (3 pont)

Útmutató: kövessük a 7.2.2. szakasz gondolatmenetét.

7.5. Feltesszük a következőket: az epitermikus csoportban (1) nincs abszorpció; (2) a szórási hatáskeresztmetszet állandó; (3) a lassulás csak izotrop rugalmas szórások révén történik; (4) a hasadásban keletkező neutronok energiája $E_0 = 2$ MeV. Mutassuk meg, hogy ekkor $\Sigma_{\mathrm{R}} = \dfrac{\xi\Sigma_{\mathrm{s}}}{\ln\left(E_0/E_{\mathrm{m}}\right)}$. Itt $E_{\mathrm{m}} = 0{,}625$ eV az epitermikus tartomány alsó határa. (7 pont)

7.6. Tekintsük a (7.7) egyenletet két csoportban egy nem-sokszorozó, végtelen homogén közegben, amelyben egy $S_1(x) = \cos Bx$ epitermikus külső forrás van.

a) Oldjuk meg az egyenletet! (4 pont)

b) Az eredményt általánosítsuk több energiacsoportra! (3 pont)

Útmutatás: keressük a megoldást $\Phi_g(x) = \phi_g(x,B)\cos Bx$ alakban. Megjegyzés: a $\phi_g(x,B)$ függvényt karakterisztikus függvénynek nevezzük.

7.7. Tekintsünk egy csupasz homogén reaktort, amelyben nincs epitermikus hasadás. Hasonlítsuk össze az M^2 migrációs területre kapott értékeket egy, két és három energiacsoport esetében! A $\Sigma_{1\to 3}$ mátrixelemet vegyük zérusnak. Útmutatás: a 7.2.1. szakaszt általánosítva számítsuk ki és írjuk $P_{\mathrm{NL}} = 1/\left(1 + M^2B^2\right)$ alakba a bennmaradási valószínűséget. (7 pont)

7.8. A 7.7. feladat mindhárom esetében írjuk fel a kritikussági feltételt! (4 pont)

7.9. Feltesszük, hogy egy homogén közegben a határfelületektől távol megmérjük a fluxus x-től való függését: $\Phi_g(x) \propto \cos Bx$, ami mindegyik energiacsoportra érvényes, majd ebből illesztéssel meghatározzuk B értékét. L^2 és τ értékét számításból ismerjük. Írjuk fel kétcsoport-közelítésben a k_∞-t megadó képletet! Mennyi k_∞ értéke és bizonytalansága, ha $B^2 = 0{,}00534 \pm 0{,}00012$ cm^{-2}, továbbá $L^2 = 20$ cm^2 és $\tau = 30$ cm^2? (6 pont)

7.10. Tekintsünk egy sokszorozó közeget, amelyet végtelen reflektor vesz körül. Számítsuk ki kétcsoport-közelítésben az egyenlőtlenségi tényezőt a következő három geometriában!

d) Az $x = \pm a$ síkokkal határolt rendszer; (3 pont)

e) R sugarú végtelen hosszú henger; (4 pont)

f) R sugarú gömb. (3 pont)

Az eredményeket hasonlítsuk össze a csupasz rendszerhez tartozó megfelelő eredményekkel! Az egyenlőtlenségi tényező a $\Sigma_1^{\mathrm{f}}\Phi_1 + \Sigma_2^{\mathrm{f}}\Phi_2$ teljesítmény maximális értéke osztva az aktív zónára átlagolt értékével.

7.11. Tekintsük az 5.23. feladatban vázolt három hengeres geometriájú reaktort. Írjuk fel explicit formában a rájuk vonatkozó kritikussági feltételt kétcsoport-közelítésben! Mutassuk meg, hogy a fluxus szeparálható az r és z változók szerint! Útmutatás: mindegyik esetben a fluxus r szerinti deriváltja zérus $r = 0$-ban; az első és harmadik esetben a fluxus zérus $z = 0$-ban, de a második esetben a fluxus z szerinti deriváltja zérus $z = 0$-ban. (15 pont)

7.12. Alkalmazzuk a kétcsoport-modellt az 5.26. feladatra (legalább közelítőleg)! (15 pont)

7.13. Az albédó kiterjeszthető több energiacsoportra is. Ekkor a kimenő áram (J_g) és a bemenő áram (I_h) között az alábbi kapcsolat áll fenn:

$$J_g = \sum_{h=1}^{G} \alpha_{gh} I_h ,$$

ahol G az energiacsoportok száma. Tekintsük két, albédókkal jellemzett anyag határát. Az egyik anyag tartalmaz hasadó anyagot, a másik nem. Hogyan határozható meg (diffúzióelméletben) az albédókból a k_{eff} és a spektrum a határon? (10 pont)

7.14. Határozzuk meg egy négyszög alakú cellából álló végtelen rácsban a sokszorozási tényezőt kétcsoport diffúziós közelítésben! A cella három régióból áll:

a) A fűtőelem külső sugara 0,6 cm; csoportállandók: $D_1 = 1{,}2$ cm, $D_2 = 0{,}8$ cm, $\Sigma_{\mathrm{c1}} = 0{,}02$ /cm, $\Sigma_{\mathrm{f1}} = 0{,}03$ /cm, $\nu\Sigma_{\mathrm{f1}} = 0{,}0076$ /cm, $\Sigma_{\mathrm{c2}} = 0{,}03$ /cm, $\Sigma_{\mathrm{f2}} = 0{,}05$ /cm, $\nu\Sigma_{\mathrm{f2}} = 0{,}08$/cm, $\Sigma_{1\to 2} = 0{,}04$ /cm.

b) A burkolat külső sugara 0,7 cm; csoportállandók: $D_1 = 1{,}1$ cm, $D_2 = 0{,}7$ cm, $\Sigma_{\mathrm{c1}} = 0{,}001$ /cm, $\Sigma_{\mathrm{c2}} = 0{,}005$ /cm, $\Sigma_{1\to 2} = 0{,}004$ /cm.

c) A moderátor csoportállandói: $D_1 = 1{,}5$ cm, $D_2 = 0{,}5$ cm, $\Sigma_{\mathrm{c1}} = 0{,}005$ /cm, $\Sigma_{\mathrm{c2}} = 0{,}04$ /cm, $\Sigma_{1\to 2} = 0{,}08$ /cm.

A cella külső mérete 2 × 2 cm. (18 pont)

Reaktorfizika mérnököknek	Bevezetés a reaktorfizikába
(7.45)	–
(7.46)	–
7.2.1. szakasz	6.1. alfejezet
7.2.2. szakasz	6.2. alfejezet

8. Feladatok a „termikus reaktorok” témaköréhez

8.1. Hogyan következik a (8.1) egyenlet a (6.33) képletből? (2 pont)
8.2. Hogyan következik a (8.2) egyenlet a (6.49b) képletből? (2 pont)
8.3. Mutassuk meg, hogy az elemi cella L diffúziós hossza és a moderátor L_m diffúziós hossza között fennáll az $L^2 \approx (1-f)L_\mathrm{m}^2$ közelítő összefüggés! A levezetésben vegyük a fűtőelem és a moderátor diffúzióállandóját azonosnak. Hogyan módosul az összefüggés, ha megkülönböztetjük a cella és a moderátor diffúzióállandóját (D, illetve D_m)? (5 pont)
8.4. Mutassuk meg, hogy az elemi cella τ Fermi-kora és a moderátor τ_m Fermi-kora között fennáll a $\tau \approx V_\mathrm{cella}\tau_\mathrm{m}/V_\mathrm{m}$ közelítő összefüggés! A levezetésben vegyük a fűtőelem és a moderátor diffúzióállandóját azonosnak, továbbá hanyagoljuk el a fűtőelemben bekövetkező lassulást. (5 pont)
8.5. Oldjuk meg a diffúzióegyenletet az elemi cellára! Határfeltételek: (1) a fluxus deriváltja zérus a fűtőelem középvonalában és a cella külső határán; (2) a fluxus folytonos a fűtőelem és a moderátor határán; (3) az áram folytonos a fűtőelem és a moderátor határán. A termikus csoport határán a q lassulási sűrűséget vegyük zérusnak a fűtőelem belsejében, és tekintsük állandónak a moderátorban. (10 pont)
8.6. A 7.10. feladat megoldása alapján határozzuk meg az f termikus hasznosítási tényezőt!
   a) A megoldás alapján írjuk fel az f termikus hasznosítási tényezőt megadó képletet! (4 pont)
   b) Mi f határértéke fekete rúdra, vagyis amikor a fűtőelem abszorpciós hatáskeresztmetszete a végtelenhez tart? (3 pont)
   c) Lehet-e a számítást egyszerűsíteni, ha eleve egy fekete rúdból indulunk ki? (4 pont)
8.7. Mutassuk meg, hogy a hasadóanyag és a moderátor homogén keverékében a hőtágulás nem változtatja meg a négyfaktor-formula η és f tényezőit! (15 pont)
8.8. Feltesszük, hogy egy homogén reaktorban a fluxust a (6.44) képlet adja meg. A hasadóanyag abszorpciós hatáskeresztmetszetét a

$$\sigma(v) = \sigma(v_0)\frac{v_0 + c(v - v_0)}{v}$$

képlet adja meg, ahol v_0 a T_0 referencia-hőmérséklethez tartozó legvalószínűbb sebesség. A moderátor abszorpciós hatáskeresztmetszete $1/v$-vel arányos.
   a) Számítsuk ki és c függvényében ábrázoljuk az abszorpciós csoportállandót! (5 pont)
   b) Számítsuk ki az f termikus hasadási tényezőt! (5 pont)
   c) Mekkora járulékot ad f hőmérsékletfüggése a reaktivitás hőfoktényezőjéhez? (5 pont)
8.9. A (8.9) képlet felhasználásával vizsgáljuk meg és grafikusan ábrázoljuk, hogyan függ a Doppler-együttható az urán hőmérsékletétől! (10 pont)
8.10. A *8.9. ábra* mutatja, hogyan függ a moderátor hőfoktényezője a bórkoncentrációtól. Értelmezzük ezt a függést! (15 pont)

8.11. Számítsuk ki a *8.5. táblázat*ban megadott mennyiségeket 2,5 $, 4,5 $ és 6 $ többletreaktivitásra! Hasonlítsuk össze grafikusan a kapott megszaladási görbéket! (5 pont)

8.12. Hogyan lehet egy kísérleti reaktorban mérni $\partial\rho/\partial T_{\mathrm{m}}$ értékét (itt T_{m} a moderátor hőmérséklete)? Miért működik a javasolt mérési eljárás? Hogyan lehet egy energiatermelő reaktorban mérni $\partial\rho/\partial T_{\mathrm{m}}$ értékét? Hasonlítsuk össze a két mérési módszert! (20 pont)

Reaktorfizika mérnököknek	Bevezetés a reaktorfizikába
(6.44)	(45.10)
(6.49b)	(45.15)
(8.1)	(63.1)
(8.2)	(63.2)
(8.3)	(44.6)
(8.9)	(64.6)
8.5. táblázat	65.1. táblázat
8.9. ábra	64.5. ábra

9. Feladatok a „kiégés” témaköréhez

9.1. Egységek átszámítása:
   a) 1 MWnap energia hány gramm ^{235}U hasadása révén keletkezik? (1 pont)
   b) Hány hasadás szükséges 1 joule és 1 MWnap energia termeléséhez? (1 pont)
   c) Hány MWnap/t egy ^{235}U-ban *e* dúsítású urán kiégetettsége, ha az uránt ért besugárzás 1 n/kbarn? (1 pont)

   Útmutatás: 1 eV = $1{,}602\cdot10^{-19}$ J; a hasadáskor keletkező energia 200 MeV; az 1 g ^{235}U-ban levő magok számát a (2.4) képlet értelmében számíthatjuk ki.

9.2. Feltesszük, hogy a reaktor teljesítménye időben állandó. 0,7% és 3,6% dúsításra számítsuk ki és ábrázoljuk az F fluencia függvényében az ^{235}U, ^{239}Pu, ^{240}Pu és ^{241}Pu izotópok mennyiségét! Hanyagoljuk el az ^{238}U mennyiségének változását. Ábrázoláskor az ^{238}U magok koncentrációját vegyük egységnyinek. (4 pont)

9.3. A C_0 kezdeti konverziós tényező függvényében számítsuk ki, hogyan változik a négyfaktor-formula η tényezője a kampány elején! Van C_0-nak olyan értéke, amikor ez a változás zérus? (5 pont)

9.4. Adjuk meg a (9.1) egyenlet együtthatóinak számszerű értékét az $i = 39$ és 41 izotópokra! A fluxus értékét változtassuk 10^{12} és 10^{15} n/(cm^2·s) között! (7 pont)

9.5. Integráljuk a (9.22) egyenleteket időben változó $\phi(t)$ fluxus esetén! Feltéve, hogy a xenon és a jód mennyisége zérus $t<0$-re, az eredményt alkalmazzuk a következő esetre:

$$\phi(t)=\begin{cases}0 & t<0,\\ \Phi_0 t/T_1 & 0<t<T_1,\\ \Phi_0 & T_1<t<T_2,\\ \Phi_0(T_3-t)/(T_3-T_2) & T_2<t<T_3.\end{cases}$$

   Az urán dúsítása 3,6%, $T_1 = 6$ óra, $T_2 = 18$ óra és $T_3 = 24$ óra. A xenon magsűrűségét az idő függvényében ($0 < t < T_3$) rajzoljuk fel egy közös grafikonon a fluxus $\Phi_0 = 10^{12}$, $\Phi_0 = 10^{13}$ és $\Phi_0 = 10^{14}$ n//(cm^2·s) értékeire! (14 pont)

9.6. A 9.5. feladatban a leállást követően mikor éri el a xenon koncentrációja a maximális értékét? A maximális értéket hasonlítsuk össze az egyes Φ_0 fluxusokhoz tartozó egyensúlyi koncentrációkkal! (11 pont)

9.7. Oldjuk meg a 9.5. feladatot szamáriumra! (11 pont)

9.8. A radioaktív hulladékban a ^{134}Cs és ^{137}Cs mennyiségének aránya függ attól, hogy milyen módon üzemelt az a reaktor, amely a hulladékot termelte (vö. 9.10. feladat). Tehát más az izotóparány az atombomba robbanásakor keletkező hulladékban, mint abban, ami a csernobili robbanás után szétszóródott.
   a) Mi az eltérés magyarázata? (3 pont)
   b) Amikor egy talajmintában megmérjük e két izotóp arányát, hogyan tudjuk szétválasztani, a szennyezés mely hányada származik Csernobiltól és a magas légköri atomfegyver-kísérletekből? (7 pont)
   c) Mindkét esetben adjunk becslést a két izotóp arányára! (10 pont)

9.9. Ábrázoljuk grafikusan, hogyan változik k_∞ a xenonmérgeződés hatására a következő esetekben!
   a) A (9.23) képletek szerinti egyensúlyi koncentráció kialakulása után. (3 pont)
   b) A reaktor leállása után a (9.24) képlet szerinti esetben. (3 pont)
   c) A 9.5. és 9.6. feladatok szerinti esetben. (4 pont)

9.10. A ^{148}Nd izotóp mennyisége a reaktor működése során folyamatosan nő, bomlása elhagyható. Mennyisége γ-vonala alapján pontosan mérhető. Hogyan lehet ebből a termelt energiára következtetni? (8 pont)

9.11. Vannak hasadási termékek, amelyek neutronbefogással eggyel nagyobb tömegszámú izotóppá alakulnak át, miközben radioaktív bomlás révén más elemmé alakulnak át. Jelöljük ugyanannak az elemnek egymást követő izotópjait az A, B, C stb. betűkkel. Hány izotóp mennyiségét kell megmérni ahhoz, hogy a mért izotóparányokból visszakövetkeztethessünk a vizsgált nukleáris üzemanyag által termelt összes energiára? Mi a feltétele annak, hogy ilyen következtetést egyáltalán le lehessen vonni? (15 pont)

Reaktorfizika mérnököknek	Bevezetés a reaktorfizikába
(2.4)	(21.4)
(9.1)	(82.1)
(9.22)	(83.3)
(9.23)	(83.4)
(9.24)	(83.5)

10. Feladatok az „adjungált függvény” témaköréhez

10.1. Írjuk fel az adjungált kétcsoport diffúzióegyenletet, külső-belső peremfeltételekkel együtt! (5 pont)

10.2. Egy V térfogatot kitöltő kritikus sokszorozó rendszerbe belövünk egy neutront az $\mathbf{r}_0 \in V$ pontban. Hogyan változik meg ettől a fluxus? (5 pont)

10.3. Egy V térfogatot kitöltő kritikus sokszorozó rendszerbe belövünk egy neutront a térfogat külső felületének $\mathbf{r}_s$ pontjában. Hogyan változik meg ettől a fluxus? (5 pont)

10.4. Hogyan befolyásolja egy buborék megjelenése a diffúzióegyenlet megoldását? Mennyit változik a reaktivitás? Hogyan változik a fluxus? (7 pont)

10.5. Mi a különbség a reaktivitás megváltozásának az alábbi két módon meghatározott értékei között:

a) meghatározzuk a reaktivitás értékét az alapállapotban és a perturbált állapotban egy-egy kritikussági számítással, és a két reaktivitást kivonjuk;

b) a reaktivitás változását a perturbációs formalizmusból számítjuk?

(8 pont)

10.6. A mérlegegyenletet tetszőleges súlyfüggvénnyel szorozva és az eredményt integrálva reakciógyakoriságokhoz jutunk. A tankönyv alapján fejtsük ki, mi az előnye, ha a súlyfüggvény az adjungált függvény! (7 pont)

10.7. Milyen feltételek mellett egyezik meg transzport közelítésben az adjungált függvény a fluxussal? (5 pont)

10.8. A Monte-Carlo módszer hatékonysága nagyrészt azon múlik, milyen járulékot adnak az indított neutronok a meghatározni kívánt reakciógyakoriságokhoz. Hogyan használható fel az adjungált függvény (ha ismert) a Monte-Carlo számítás gyorsítására? (10 pont)