

# Obsah

Předmluva . . . . .	5
Seznam základních symbolů, označení a zkratek . . . . .	15
1 Úvod. Základní pojmy radioaktivity, radiochemie a jaderné chemie . . . . .	23
1.1 Radioaktivní a stabilní prvky . . . . .	23
1.1.1 Radioaktivita a stabilita jader atomů. Jaderné reakce . . . . .	23
1.1.2 Kinetika radioaktivní přeměny a jaderných reakcí. Vyjádření aktivity . . . . .	27
1.2 Izotopie . . . . .	30
1.3 Jaderná chemie a radiochemie . . . . .	32
1.3.1 Radioaktivita a radiochemie . . . . .	32
1.3.2 Jaderná chemie . . . . .	33
Přílohy . . . . .	580
Literatura ke kapitole 1 . . . . .	34
2 Využití jaderných jevů . . . . .	36
2.1 Jaderné metody výzkumu a aplikací . . . . .	36
2.1.1 Stopovací metody (metody značení, indikátorové metody) . . . . .	36
2.1.2 Metody založené na existenci izotopového jevu . . . . .	37
2.1.3 Metody založené na stanovení poměrů přírodních radioaktivních a stabilních nuklidů . . . . .	37
2.1.4 Metody založené na interakci jaderného záření a jader atomů (produktů jaderných reakcí) a souvislosti jejich charakteristik s prostředím . . . . .	37
2.1.4.1 Změna hustoty toku jaderného záření procházejícího hmotným prostředím . . . . .	38
2.1.4.2 Speciální metody využívající jaderné účinky záření . . . . .	38
2.1.4.3 Jevy a metody založené na souvislosti jaderných charakteristik nuklidů se strukturou elektronových obalů jader . . . . .	38
2.1.4.4 Interakce jader atomů – produktů jaderných reakcí – v hmotném prostředí a interakce při izomerním přechodu . . . . .	40
2.1.4.5 Chemické, biologické a fyzikální účinky jaderného (ionizujícího) záření v hmotném prostředí . . . . .	41
2.1.5 Metody založené na využití energie uvolňované při jaderných reakcích . . . . .	41
2.2 Stopovací metody . . . . .	42
2.2.1 Příklady indikace předmětů, plynů, kapalných a heterogenních soustav . . . . .	43
2.2.1.1 Indikace předmětů . . . . .	43
2.2.1.2 Indikace plynů . . . . .	43
2.2.1.3 Izotopová a neizotopová indikace homogenních kapalných a heterogenních soustav . . . . .	43
2.2.2 Příklady indikace v biochemii, tuhých látkách a taveninách . . . . .	45
2.2.2.1 Neizotopová indikace molekul látky v dynamické biochemii . . . . .	45
2.2.2.2 Neizotopová radioaktivní indikace kovů jadernými reakcemi . . . . .	46

2.2.2.3	Neizotopová indikace tuhých látek radioaktivními inertními plyny (emanační metoda) . . . . .	47
2.2.2.4	Izotopová a neizotopová radioaktivní indikace tavenin . . . . .	47
2.3	Interakce jaderného záření s hmotou . . . . .	47
2.3.1	Interakce těžkých nabitých částic . . . . .	49
2.3.2	Interakce elektronů . . . . .	56
2.3.3	Interakce fotonů . . . . .	60
2.3.4	Interakce neutronů . . . . .	63
2.3.5	Interakce záření v uspořádaném prostředí . . . . .	64
2.3.6	Speciální interakce se vznikem sekundárního záření . . . . .	67
	Literatura ke kapitole 2 . . . . .	68
3	Detekce a měření radioaktivních a stabilních nuklidů. . . . .	70
	Technika práce s radioaktivními látkami . . . . .	70
3.1	Měření jaderného záření a detekce radionuklidů . . . . .	70
3.1.1	Detektory plněné plynem . . . . .	71
3.1.2	Scintilační detektory . . . . .	72
3.1.3	Polovodičové detektory . . . . .	76
3.1.4	Spektrometrie jaderného záření . . . . .	81
3.1.5	Vyhodnocení pulsů z detektorů záření . . . . .	83
3.2	Detekce stabilních nuklidů . . . . .	86
3.2.1	Stanovení izotopového složení hmotnostní analýzou . . . . .	86
3.2.2	Stanovení izotopového složení jinými fyzikálními měřeními . . . . .	89
3.3	Měření aktivity a zpracování výsledků měření . . . . .	90
3.3.1	Měření aktivity . . . . .	90
3.3.1.1	Absolutní aktivita a její stanovení . . . . .	90
3.3.1.2	Příprava preparátů, měření relativní aktivity a speciální měřicí technika . . . . .	97
3.3.2	Zpracování výsledků měření . . . . .	103
3.3.2.1	Chyby měření a stanovení veličin. Základní pojmy . . . . .	103
3.3.2.2	Gaussovo a Poissonovo rozdělení. Příklady z radiometrické analýzy . . . . .	105
3.3.2.3	Přesnost (reprodukovatelnost) měření a stanovení veličin. Interval spolehlivosti a chyba konečného výsledku . . . . .	112
3.3.2.4	Optimální poměr mezi dobou měření pozadí a dobou měření preparátu . . . . .	120
3.3.2.5	Postup při zpracování dat měřené aktivity . . . . .	123
3.4	Radiačně hygienické požadavky a vybavení pracovišť . . . . .	127
3.4.1	Základní pojmy a veličiny používané při hodnocení rizika ionizujícího záření . . . . .	127
3.4.2	Výpočty dávkového příkonu pro záření $\beta$ a $\gamma$ . . . . .	128
3.4.3	Stanovení absorbované dávky a expozice. Ochrana před ionizujícím zářením . . . . .	131
3.4.4	Provoz a vybavení pracovišť se zdroji ionizujícího záření . . . . .	138
3.5	Technika práce s radioaktivními látkami. Problematika velmi nízkých koncentrací látek . . . . .	140
3.5.1	Zvláštnosti práce s radionuklidy . . . . .	140
3.5.2	Velmi nízké koncentrace látek. Základní pojmy a význam problematiky . . . . .	142
	Přílohy . . . . .	586
	Literatura ke kapitole 3 . . . . .	145
4	Metoda izotopních indikátorů . . . . .	148
4.1	Vlastnosti izotopních indikátorů . . . . .	148
4.1.1	Základní pojmy . . . . .	148

4.1.2	Význam a použití nosiče . . . . .	151
4.1.3	Zajištění podmínek pro stanovení daného indikátoru ve vzorku . . . . .	153
4.2	Izotopové jevy . . . . .	155
4.2.1	Základní pojmy . . . . .	155
4.2.2	Termodynamický izotopový jev . . . . .	166
4.2.2.1	Základy teorie jevu . . . . .	166
4.2.2.2	Příklady a využití jevu . . . . .	173
4.2.3	Kinetický izotopový jev . . . . .	184
4.2.3.1	Základy teorie jevu . . . . .	184
4.2.3.2	Příklady a využití jevu . . . . .	188
4.3	Základy metody izotopních indikátorů . . . . .	195
4.3.1	Princip, předpoklady a výsledky metody . . . . .	195
4.3.1.1	Princip a účel metody izotopních indikátorů . . . . .	195
4.3.1.2	Předpoklad aplikace metody . . . . .	196
4.3.1.3	Výsledek metody . . . . .	196
4.3.1.4	Schéma metody izotopních indikátorů . . . . .	196
4.3.2	Vedlejší (rušivé) vlivy při aplikaci metody . . . . .	198
4.3.2.1	Vliv izotopových jevů . . . . .	198
4.3.2.2	Vliv záření radioindikátoru . . . . .	198
4.3.2.3	Problematika koncentrace indikátoru . . . . .	200
4.3.2.4	Izotopová výměna . . . . .	201
4.3.2.5	Chemické důsledky radioaktivní přeměny . . . . .	201
4.3.2.6	Koncentrace značené sloučeniny . . . . .	202
4.3.3	Použití metody izotopních indikátorů a její výhody . . . . .	202
4.3.3.1	Úkoly řešené pouze izotopovou indikací . . . . .	203
4.3.3.2	Úkoly, jejichž řešení izotopovou indikací je výhodné . . . . .	203
4.3.3.3	Přesnost radiostopovacích experimentů. Hodnocení pojmů metody izotopních indikátorů . . . . .	205
4.4	Výběr radioaktivních a stabilních indikátorů . . . . .	209
4.5	Indikace prvků a sloučenin . . . . .	211
4.5.1	Základní metody přípravy radionuklidů . . . . .	212
4.5.1.1	Příprava radionuklidů ozařováním terčových materiálů (prvků o přirozeném izotopovém složení nebo prvků obohacených na některý z izotopů) v reaktorech . . . . .	212
4.5.1.2	Příprava radionuklidů pomocí jednoduchých (laboratorních) radionuklidových zdrojů neutronů . . . . .	213
4.5.1.3	Příprava radionuklidů pomocí urychlovačů částic . . . . .	213
4.5.1.4	Příprava radionuklidů z produktů štěpení uranu a z přírodních radioaktivních látek . . . . .	214
4.5.2	Příprava značených sloučenin . . . . .	214
4.5.2.1	Syntéza značených sloučenin . . . . .	215
4.5.2.2	Reakce izotopové výměny . . . . .	220
4.5.2.3	Metody založené na využití chemických důsledků jaderných procesů ve sloučeninách . . . . .	222
4.5.2.4	Ostatní metody (ozařování urychlenými ionty, biochemické a radiační syntézy) . . . . .	228
4.6	Příprava, provedení a hodnocení experimentů s izotopními indikátory . . . . .	230
4.6.1	Analýza úkolu . . . . .	230
4.6.2	Volba indikátoru . . . . .	231
4.6.3	Rušivé nebo vedlejší jevy při aplikaci indikátoru . . . . .	231

4.6.4	Vlastní plán, realizace a vyhodnocení experimentu . . . . .	232
	Literatura ke kapitole 4 . . . . .	235
5	Izotopní indikátory a izotopové jevy ve výzkumu difúzních dějů . . . . .	237
5.1	Úvod. Základní pojmy difúze . . . . .	237
5.2	Terminologie a veličiny difúzních a samodifúzních dějů . . . . .	240
5.3	Izotopové jevy v difúzi a samodifúzi . . . . .	247
5.4	Základní typy řešení rovnic difúze . . . . .	257
5.4.1	Stacionární stav při $D = \text{konst}$ a $D \neq \text{konst}$ . . . . .	258
5.4.2	Nestacionární stavy při $D = \text{konst}$ a $D \neq \text{konst}$ . . . . .	260
5.4.2.1	$D = \text{konst}$ . Difúze z velmi tenké – “nekonečné” tenké – vrstvy do nekonečného prostoru . . . . .	261
5.4.2.2	$D = \text{konst}$ . Difúze z nekonečné vrstvy (válece) do nekonečné vrstvy (válece) . . . . .	262
5.4.2.3	$D = \text{konst}$ . Difúze z vrstvy konečné tloušťky do nekonečné vrstvy (difúze z desky konečné tloušťky) . . . . .	263
5.4.2.4	$D = \text{konst}$ . Difúze z vrstvy (desky) konečné tloušťky s konstantní výchozí koncentrací v oblasti $0 < x < l$ a koncentracemi na čelních rovinách udržovanými na nulové hodnotě pro $t > 0$ a opačný případ . . . . .	263
5.4.2.5	$D = \text{konst}$ . Difúze z desky konečné tloušťky s konstantní výchozí koncentrací v oblasti $-l < x < l$ a koncentracemi na čelních rovinách udržovanými na nulové hodnotě pro $t > 0$ . . . . .	265
5.4.2.6	Řešení 2. Fickova zákona při $D \neq \text{konst}$ . . . . .	266
5.5	Experimentální metody studia difúze a samodifúze. Použití izotopních indikátorů . . . . .	269
5.5.1	Tuhá fáze . . . . .	269
5.5.1.1	Měření rozdělení koncentrace nebo izotopového složení v závislosti na vzdálenosti podél difúzní souřadnice pro daný čas difúzního ohřevu ( $t = \text{konst}$ , $c = f(x)$ ) . . . . .	271
5.5.1.2	Měření závislosti koncentrace nebo izotopového složení na čase difúzního ohřevu v daném místě difúzní souřadnice ( $x = \text{konst}$ , $c = f(t)$ ) . . . . .	275
5.5.1.3	Absorpční metody založené na měření radioaktivního záření vyslaného z různé vzdálenosti podél difúzní souřadnice v závislosti na různé době difúzního ohřevu . . . . .	277
5.5.1.4	Speciální metody založené na izotopové výměně mezi dvěma tuhými látkami stejného chemického složení (kovy) . . . . .	279
5.5.2	Kapalná fáze . . . . .	283
5.5.2.1	Trubicová metoda . . . . .	283
5.5.2.2	Diafragmové metody . . . . .	284
5.5.2.3	Kapilárové metody . . . . .	297
5.5.3	Plynná fáze . . . . .	311
5.6	Příklady použití indikátorových a dalších jaderných metod v difúzi . . . . .	312
5.6.1	Difúze, samodifúze a jaderné metody v problematice polovodičů . . . . .	312
5.6.2	Difúze a samodifúze v polymerech . . . . .	314
5.6.3	Difúze a samodifúze v měničích iontů . . . . .	315
5.6.4	Difúze a samodifúze v materiálech jaderné techniky . . . . .	319
5.6.5	Difúze a samodifúze v problematice životního prostředí a v geologických oborech . . . . .	322
	Přílohy . . . . .	601
	Literatura ke kapitole 5 . . . . .	326

6	Reakce izotopové výměny . . . . .	329
6.1	Úvod. Základní pojmy a příklady reakcí izotopové výměny . . . . .	329
6.1.1	Jednoduchá izotopová výměna . . . . .	332
6.1.2	Složité izotopová výměna . . . . .	334
6.1.3	Definice izotopové výměny . . . . .	336
6.2	Kinetika reakcí izotopové výměny . . . . .	337
6.2.1	Homogenní reakce izotopové výměny . . . . .	337
6.2.1.1	Jednoduché reakce . . . . .	337
6.2.1.2	Složité reakce . . . . .	346
6.2.2	Heterogenní reakce izotopové výměny . . . . .	351
6.2.2.1	Kapalná fáze – tuhá fáze . . . . .	352
6.2.2.2	Plynná fáze – tuhá fáze . . . . .	359
6.3	Izotopový jev v reakcích izotopové výměny . . . . .	368
6.4	Metody studia izotopové výměny . . . . .	370
6.4.1	Separční metody . . . . .	371
6.4.1.1	Základní separační postupy . . . . .	372
6.4.1.2	Další (speciální) separační metody . . . . .	376
6.4.2	Metody bez analytické separace složek . . . . .	380
6.4.2.1	Samodifuze metody . . . . .	380
6.4.2.2	Elektrolytické metody . . . . .	382
6.5	Přehled některých výsledků studia izotopové výměny . . . . .	383
6.5.1	Výměnné reakce v organických a anorganických soustavách . . . . .	383
6.5.2	Termodynamická klasifikace reakcí izotopové výměny . . . . .	384
6.6	Mechanismus a využití reakcí izotopové výměny . . . . .	387
6.6.1	Mechanismus reakcí výměny . . . . .	387
6.6.1.1	Přenos atomů nebo skupin atomů . . . . .	387
6.6.1.2	Přenos elektronů . . . . .	390
6.6.2	Využití reakcí výměny . . . . .	392
	Přílohy . . . . .	605
	Literatura ke kapitole 6 . . . . .	393
7	Izotopní indikátory a izotopové jevy ve výzkumu kinetiky, mechanismu chemických reakcí a katalýzy . . . . .	396
7.1	Úvod . . . . .	396
7.2	Studium chemických reakcí . . . . .	397
7.2.1	Rychlost reakce při rovnováze . . . . .	397
7.2.2	Nejmanova kinetická izotopová metoda . . . . .	400
7.2.3	Kinetické izotopové jevy . . . . .	408
7.2.4	Příklady reakčních mechanismů studovaných nuklidovými metodami . . . . .	410
7.2.4.1	Anorganické soustavy . . . . .	410
7.2.4.2	Organické soustavy . . . . .	412
7.3	Studium katalytických dějů . . . . .	414
7.3.1	Úvod . . . . .	414
7.3.2	Stanovení povrchu tuhých látek . . . . .	415
7.3.2.1	Povrch iontové sraženiny ve styku s roztokem . . . . .	415
7.3.2.2	Povrch tuhé fáze ve styku s plynem . . . . .	416
7.3.2.3	Metoda emanační . . . . .	416
7.3.3	Heterogenní katalýza . . . . .	416
7.3.3.1	Vlastnosti heterogenních katalyzátorů . . . . .	417
7.3.3.2	Průběh a mechanismus katalyzovaných procesů . . . . .	418
	Literatura ke kapitole 7 . . . . .	419

8	Izotopní indikátory v elektrochemickém výzkumu . . . . .	421
8.1	Roztoky elektrolytů . . . . .	421
8.2	Elektroodové procesy . . . . .	423
8.3	Elektrochemické zdroje proudu . . . . .	427
8.4	Koroze a pasivita . . . . .	428
8.5	Migrace nabitých částic v elektrickém poli . . . . .	428
8.5.1	Úvod . . . . .	428
8.5.2	Základní elektroforetické metody . . . . .	430
8.5.2.1	Metoda pohyblivého rozhraní (volná, klasická elektroforéza) . . . . .	430
8.5.2.2	Elektroforéza na nosiči . . . . .	431
8.5.2.3	Využití elektroforetických metod . . . . .	433
	Literatura ke kapitole 8 . . . . .	433
9	Jaderné metody při stanovení fyzikálně chemických konstant a v chemické analýze . . . . .	435
9.1	Úvod . . . . .	435
9.2	Studium homogenity a heterogenity povrchů, tenze par, separačních fakto- rů, rozpustnosti a charakteristických konstant rozpuštěných látek . . . . .	435
9.2.1	Diferenciální izotopová metoda Roginského . . . . .	435
9.2.2	Stanovení tenze par málo těkavých látek . . . . .	437
9.2.3	Separační faktor v soustavě kapalina-pára . . . . .	438
9.2.4	Rozpustnost a rozpouštění . . . . .	439
9.2.4.1	Metody stanovení rozpustnosti . . . . .	439
9.2.4.2	Studium a ovlivňování kinetiky rozpouštění . . . . .	441
9.2.5	Aktivitní koeficienty iontů a stabilita komplexů . . . . .	443
9.3	Analytické využití jaderných rezonančních jevů . . . . .	445
9.3.1	Jaderná rezonance . . . . .	445
9.3.2	Rezonančně probíhající jaderné reakce . . . . .	446
9.3.3	Rezonanční rozptyl záření $\gamma$ . . . . .	447
9.3.4	Rezonanční absorpce záření $\gamma$ (Mössbauerova spektroskopie) . . . . .	448
9.4	Využití EPR a NMR . . . . .	453
9.4.1	Metoda EPR . . . . .	453
9.4.2	Metoda NMR . . . . .	456
9.5	Separační procesy . . . . .	459
9.5.1	Základní pojmy a vztahy . . . . .	459
9.5.2	Metody separace používané při přípravě radionuklidů . . . . .	462
9.5.2.1	Elektrochemické metody separace . . . . .	462
9.5.2.2	Využití odražených atomů – metoda Szilardova-Chalmersova . . . . .	462
9.5.2.3	Destilační metoda . . . . .	463
9.5.3	Využití radioizotopních indikátorů v separačních procesech . . . . .	463
9.6	Metoda izotopového zředování . . . . .	466
9.7	Radiometrická titrace . . . . .	469
9.8	Analytické využití jaderných reakcí . . . . .	472
9.8.1	Základní charakteristika metod . . . . .	472
9.8.2	Analýza s okamžitým měřením produktů reakce . . . . .	474
9.8.2.1	Emise fotonů $\gamma$ při radiačním záchytu neutronů . . . . .	475
9.8.2.2	Emise fotonů $\gamma$ při reakcích nabitých částic . . . . .	477
9.8.2.3	Emise lehké nabitě částice . . . . .	480
9.8.2.4	Emise neutronů . . . . .	483

9.8.3	Analýza se zpozděným měřením (aktivační analýza)	484
9.8.3.1	Neutronová aktivační analýza	489
9.8.3.2	Aktivační analýza nabitými částicemi	493
9.8.3.3	Aktivační analýza pomocí fotonů (fotoaktivace)	493
9.9	Analytické využití rozptylu a absorpce jaderného záření	494
9.9.1	Rozptyl jaderného záření	494
9.9.1.1	Rutherfordův zpětný rozptyl urychlených iontů	495
9.9.1.2	Rozptyl záření $\beta$	501
9.9.1.3	Rozptyl záření $\gamma$	502
9.9.1.4	Rozptyl neutronů	504
9.9.2	Využití absorpce jaderného záření	505
9.10	Analýza buzením rentgenového záření	508
9.10.1	Princip metod	508
9.10.2	Excitace rentgenové emise pomocí radionuklidových zdrojů	510
9.10.3	Excitace rentgenové emise těžkými částicemi	512
9.11	Využití měření ionizace k analýze plynů	516
	Literatura ke kapitole 9	518
10	Jaderné metody v analýze struktury molekul a krystalů	521
10.1	Úvod	521
10.2	Metody izotopové indikace	521
10.2.1	Metoda izotopové výměny	521
10.2.2	Metoda syntézy a rozkladu značené sloučeniny	523
10.2.3	Metoda postupné substituce	524
10.2.4	Metoda difúze (samodifúze)	525
10.3	Difúze radioaktivních plynů v tuhých látkách	525
10.4	Využití jaderného záření při studiu krystalické struktury	531
	Literatura ke kapitole 10	536
11	Využití radiačních jevů v chemických, technických a dalších oborech	538
11.1	Vliv záření na katalytické reakce	538
11.2	Vliv záření na makromolekulární látky (polymery)	541
11.3	Radiační syntéza a modifikace látek, použití ve vědních, technických a průmyslových oblastech	544
11.3.1	Některé z průmyslového hlediska významné radiačně chemické syntézy	545
11.3.2	Modifikace látek, použití v dalších oborech	546
	Literatura ke kapitole 11	549
12	Přehled použití jaderných metod v příbuzných chemických a dalších oborech	551
12.1	Radioekologie, biochemie, biologie a lékařství	551
12.1.1	Radioekologie	551
12.1.2	Výzkum biochemických procesů	553
12.1.3	Aplikace nuklidových metod v biologii a lékařství	557
12.2	Radiochronometrie	563
	Literatura ke kapitole 12	567
	Vlastnosti některých významných radionuklidů	569
	Přílohy	579
	Věcný rejstřík	613