

**Машински факултет Универзитета у Београду**

**ДИФУЗИОНЕ ОПЕРАЦИЈЕ  
И АПАРАТИ**

**Део 2: Дифузионе операције**

**Бранислав М. Јаћимовић  
Србислав Б. Генић**

**Прво издање, 2010.**

**Аутори**

Проф. др Бранислав М. Јаћимовић, дипл. инж. маш.  
Проф. др Србислав Б. Генић, дипл. инж. маш.  
Катедра за процесну технику  
Машински факултет Универзитета у Београду  
Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, Србија

**Назив књиге**

ДИФУЗИОНЕ ОПЕРАЦИЈЕ И АПАРАТИ

Део 2: Дифузионе операције

Прво издање, 2010.

**Рецензенти**

Проф. др Франц Коси, дипл. инж. маш., Машински факултет Универзитета у Београду  
Проф. др Мирослав Станојевић, дипл. инж. маш., Машински факултет Универзитета у Београду

**Издавач**

Машински факултет Универзитета у Београду, 11120 Београд 35, Краљице Марије 16, Србија

Тел: 011-3370350 и 011-33-02-384

Факс: 011-3370364

**За издавача**

Декан проф. др Милорад Милованчевић

**Главни и одговорни уредник**

Проф. др Александар Обрадовић

Одобрено за штампу одлуком Декана Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 155/10 од 25.08.2010.

**Тираж**

300 примерака

**Штампа**

ПЛАНЕТА ПРИНТ, Рузвелтова 10, Београд

Тел/Факс: 011-3088129

ИСБН 978-86-7083-717-1

---

Забрањено прештампавање или фотокопирање.

Сва права задржава издавач и аутори.

## ПРЕДГОВОР

Други део књиге о дифузионим операцијама и апаратима је у потпуности посвећен проучавању дифузионих операција. У данашње време кроз предмет “Дифузионе операције и апарати” ова материја представља један од обавезних предмета на Модулу за процесну технику и заштиту животне средине Машинског факултета Универзитета у Београду, а предавала се и раније кроз низ предмета (Технолошки апарати, Технолошки и дифузиони апарати, Дифузионе операције, Топлотни и дифузиони апарати).

Систематизација материје је извршена према важећим светским критеријумима, при чему смо сматрали да читалац поседује основна знања из фундаменталних дисциплина, као што су пре свих термодинамика, механика флуида и транспорт топлоте и супстанције. Извори који су коришћени при изради ове књиге обухватају класичну и савремену литературу у овој области, а наравно и сопствена искуства стечена кроз дугогодишњи рад. На крају сваког поглавља дат је преглед коришћене литературе која може да користи као путоказ читаоцу за самостално проширивање знања.

Захваљујемо се многима који су помогли стварање ове књиге, а посебно рецензентима, професорима Францу Косију и Мирославу Станојевићу, који су савесним прегледом рукописа и инвентивним сугестијама допринели квалитету књиге.

Октобар 2010.

Аутори

## САДРЖАЈ

<b>1</b>	<b>ДИФУЗИОНЕ ОПЕРАЦИЈЕ</b>	<b>1</b>
1.1	Процесно инжењерство	1
1.2	Основне технолошке операције	3
1.3	Класификација дифузионих операција	5
1.3.1	Дифузионе операције са непосредним контактом фаза које се међусобно не мешају	5
1.3.2	Мембранске дифузионе операције	8
1.4	Избор сепарационог процеса	13
1.5	Могућности техничке реализације дифузионих операција	15
1.6	Пример технолошког процеса	17
<b>2</b>	<b>МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ ДИФУЗИОНИХ ОПЕРАЦИЈА</b>	<b>23</b>
2.1	Стационарне дифузионе операције	33
2.1.1	Операциона линија стационарне дифузионе операције при истосмерном току фаза	34
2.1.2	Операциона линија стационарне дифузионе операције при супротносмерном току фаза	39
2.1.3	Стационарне дифузионе операције при степеном контакту фаза	42
2.1.4	Стационарни унакрсни каскадни контакт	43
2.1.5	Стационарни супротносмерни каскадни контакт	45
2.1.6	Одређивање броја теоријских степени контакта при вишестепеном супротносмерном стационарном контакту у случају када су операциона и равнотежна линија праве	46
2.2	Нестационарне дифузионе операције	50
2.3	Ефикасност степена контакта	54
2.4	Средња погонска сила процеса, број јединица преноса и висина јединице преноса	56
<b>3</b>	<b>ДЕСТИЛАЦИЈА</b>	<b>61</b>
3.1	Равнотежа у двокомпонентном систему течност – пара	62
3.1.1	Идеални раствори	63
3.1.2	Неидеални раствори потпуне растворљивости	71
3.1.3	Мешавине са нерастворљивим компонентама	72
3.1.4	Мешавине са делимично растворљивим компонентама	74
3.1.5	Енталпија течности, паре и топлота мешања	76
3.1.6	Дијаграм енталпија – састав	78
3.2	Једностепена дестилација	80
3.2.1	Континуална једностепена равнотежна дестилација	80
3.2.2	Континуално испаравање	84
3.2.3	Континуална кондензација	92
3.2.4	Дестилација са дефлегмацијом	100
3.2.5	Диференцијална равнотежна дестилација – шаржна дестилација	107
3.2.6	Фракциона шаржна дестилација	114
3.3	Континуална вишестепена дестилација	116

3.3.1	Начини одвођења остатка и прикључења испаривача на колону	124
3.3.2	Начини одвођења дестилата и прикључења кондензатора на колону	126
3.3.3	Одређивање броја теоријских степени контакта методом Понсона и Саварија	126
3.3.4	Одређивање броја теоријских степени контакта методом МекКејба и Тила	136
3.3.5	Ректификација воденом паром	158
3.3.6	Ректификација воденом паром – примена метода Понсона и Саварија	159
3.3.7	Ректификација воденом паром – примена метода МекКејба и Тила	163
3.3.8	Дестилациона колона са већим бројем напојних подова	167
3.3.9	Дестилациона колона са одвођењем фракција	174
3.4	Дестилација при континуалном контакту фаза	179
3.5	Шаржна дестилација са ректификацијом	189
3.5.1	Ригорозни поступак прорачуна шаржне дестилације са ректификацијом	191
3.5.2	Упрощени поступак прорачуна шаржне ректификације при константном саставу дестилата методом МекКејба и Тила	192
3.5.3	Упрощени поступак прорачуна шаржне ректификације при константном рефлуксном односу методом МекКејба и Тила	193
3.6	Дестилација вишекомпонентних мешавина	197
3.6.1	Ригорозни поступак прорачуна дестилације вишекомпонентних мешавина	200
3.6.2	Упрощени поступак прорачуна дестилације вишекомпонентних мешавина	200
3.7	Посебни дестилациони поступци	211
3.7.1	Азеотропна дестилација	211
3.7.2	Екстрактивна дестилација	212
3.7.3	Хетероазеотропна дестилација	213
<b>4</b>	<b>АПСОРПЦИЈА</b>	<b>219</b>
4.1	Равнотежа у систему гас – течност	220
4.1.1	Равнотежа у двокомпонентном систему гас – течност	220
4.1.2	Равнотежа у трокомпонентном систему гас – течност	222
4.2	Изотермска апсорпција и десорпција у трокомпонентном систему гас – течност	224
4.2.1	Изотермска апсорпција при супротносмерном току фаза	225
4.2.2	Одређивање граничног коефицијента нагиба операционе линије при изотермској апсорпцији при супротносмерном току фаза	227
4.2.3	Одређивање броја теоријских степени контакта при супротносмерној изотермској апсорпцији и десорпцији	233
4.2.4	Одређивање висине апарата са континуалним контактом фаза при супротносмерној изотермској апсорпцији и десорпцији	237
4.2.5	Изотермска апсорпција при истосмерном току фаза	250
4.3	Изотермска апсорпција са рецикулацијом апсорбента	254
4.4	Вишекомпонентна апсорпција	256

4.5	Неизотермска апсорпција	258
4.6	Хемосорпција	273
4.6.1	Кинетика хемосорпције	274
4.6.2	Операциона линија и билансне једначине хемосорпције	276
<b>5</b>	<b>ЕКСТРАКЦИЈА</b>	<b>287</b>
5.1	Равнотежа у трокомпонентном систему течност – течност	288
5.1.1	Примарни и секундарни растварач се међусобно не растварају	289
5.1.2	Примарни и секундарни растварач се међусобно растварају	289
5.1.3	Селективност екстрагента	290
5.2	Основна шема операције екстракције	291
5.3	Екстракција при једностепеном равнотежном контакту	294
5.3.1	Примарни и секундарни растварач се међусобно не растварају	294
5.3.2	Примарни и секундарни растварач се међусобно растварају	296
5.4	Екстракција при вишестепеном равнотежном контакту са унакрсним током фаза	300
5.4.1	Примарни и секундарни растварач се међусобно не растварају	300
5.4.2	Примарни и секундарни растварач се међусобно растварају	304
5.5	Екстракција при вишестепеном супротносмерном току	306
5.5.1	Примарни и секундарни растварач су међусобно не растварају	306
5.5.2	Примарни и секундарни растварач се међусобно растварају	310
5.6	Екстракција у апаратима са континуалним контактом фаза	316
<b>6</b>	<b>ИЗЛУЖИВАЊЕ</b>	<b>323</b>
6.1	Равнотежа у трокомпонентном систему течност – чврста фаза	324
6.2	Интензитет транспорта супстанције у случају излуживања	328
6.3	Начини спровођења операције излуживања	331
6.4	Представљање излуживања у правоуглом дијаграму	335
6.5	Испирање	339
<b>7</b>	<b>АДСОРПЦИЈА</b>	<b>343</b>
7.1	Механизам транспорта супстанције при адсорпцији	344
7.2	Равнотежа у трокомпонентном систему флуид – чврста фаза	345
7.3	Основна својства и врсте адсорбената	348
7.3.1	Активни угаљ	349
7.3.2	Силикагел	349
7.3.3	Молекулска сита	350
7.4	Процесни параметри адсорпције	350
7.5	Десорпција	351
7.5.1	Десорпција при повишеној температури	351
7.5.2	Десорпција при сниженом притиску	352
7.6	Адсорпција на непокретном слоју адсорбента	353
7.6.1	Дефинисање степена адсорпције и десорпције	357
7.6.2	Прелаз супстанције у флуиду при струјању кроз слој непокретне испуне	360
7.6.3	Прелаз супстанције у чврстој фази	361

7.6.4	Моделирање транспорта супстанције кроз слој непокретне испуне	363
7.7	Адсорпција при степеном контакту фаза	374
7.7.1	Адсорпција при једностепеном контакту	374
7.7.2	Адсорпција при вишестепеном унакрсном контакту	376
7.7.3	Адсорпција при вишестепеном супротносмерном контакту	379
<b>8</b>	<b>ВЛАЖЕЊЕ И СУШЕЊЕ ГАСА</b>	<b>387</b>
8.1	Равнотежа у двокомпонентном систему гас – течност	387
8.1.1	Специфична енталпија влажног гаса	388
8.1.2	Дијаграми за операције влажења и сушења гаса	390
8.2	Адијабатско засићење гаса	393
8.3	Транспорт топлоте и супстанције код контактних размењивача топлоте	402
8.3.1	Гранични положај операционе линије	405
8.4	Меркелов метод димензионисања контактних размењивача топлоте	407
8.4.1	Одређивање температуре гасне мешавине по висини размењивача	412
8.4.2	Нумеричко одређивање броја јединица преноса	413
<b>9</b>	<b>СУШЕЊЕ ЧВРСТОГ МАТЕРИЈАЛА</b>	<b>425</b>
9.1	Равнотежа у трокомпонентном систему гас – чврста фаза	426
9.2	Ток операције сушења	428
9.3	Транспорт влаге кроз чврсто тело	432
9.3.1	Дифузиона теорија	432
9.3.2	Капиларна теорија	433
9.4	Одређивање времена сушења	436
9.4.1	Први и други период сушења (област константне брзине сушења)	436
9.4.2	Трећи и четврти период сушења (област опадајуће брзине сушења)	437
9.5	Континуално сушење	440
	<b>ПРИЛОЗИ</b>	<b>447</b>