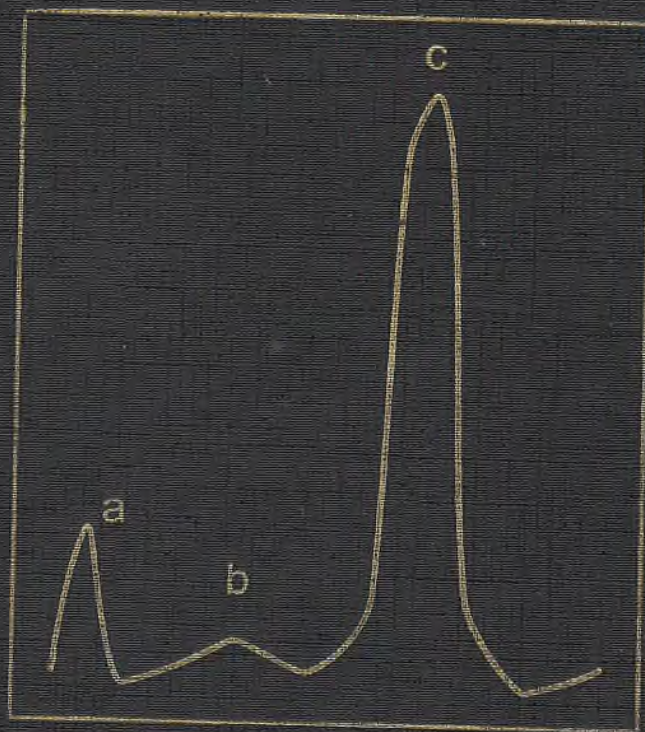


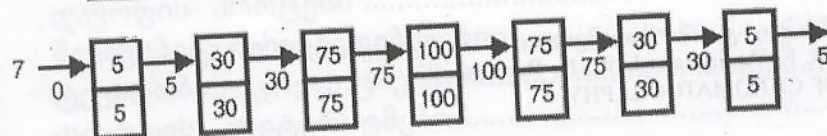
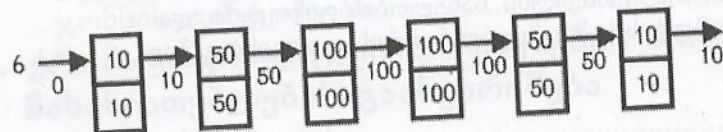
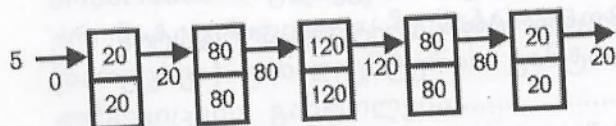
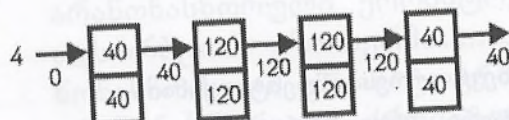
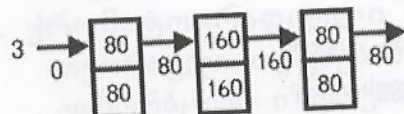
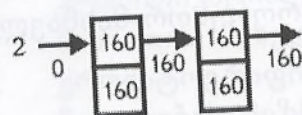
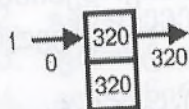
თეიმურაზ ანდრონიკაშვილი
კობა ამირხანაშვილი
ნინო ბურკიაშვილი

ქრომატოგრაფიის საწყისები



თეიმურაზ ანდრონიკაშვილი, კობა ამირხანაშვილი
ნიკო ბურკიაშვილი

ქრომატოგრაფიის საწყისები



თბილისი
2006

მონოგრაფიაში განხილულია ქრომატოგრაფიული პროცესების ძირითადი თეორია, მისი განხორციელებისთვის აუცილებელი ინსტრუმენტული უზრუნველყოფის სისტემები, გამოყენებული მოძრავი და უძრავი ფაზების ზოგადი დახასიათება და სხვა პრობლემები, რაც დაკავშირებულია ქრომატოგრაფიული კვლევის ოპტიმალური წარმართვისთვის.

მონოგრაფია განკუთვნილია ფართო პროფილის მქონე მკვლევარებისთვის. კერძოდ, ფიზიკო-ქიმიკოსების, ქიმიკოსების და ბიოქიმიკოსებისთვის, რომლებიც მუშაობენ როგორც სამეცნიერო-კვლევით, ასევე სამრეწველო და გამოყენებით ლაბორატორიებში.

მონოგრაფია დიდ დახმარებას გაუწევს უმაღლესი საგანმანათლებლო დაწესებულების სტუდენტებს, დოქტორებსა და პროფესორ-მასწავლებლებს.

რედაქტორი

გ. ცინცაძე — საქ. მეც. აკადემიის აკადემიკოსი, ქიმიის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

რეცენზენტები:

ვ. ციციშვილი — საქ. მეც. აკადემიის წევრ-კორესპონდენტი, ქიმიის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

ი. შათირიშვილი — ქიმიის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

მონოგრაფია იბეჭდება პ. მელიქიშვილის სახელობის ფიზიკური და ორგანული ქიმიის ინსტიტუტის სამეცნიერო საბჭოს დადგენილებით

© თ. ანდრონიკაშვილი, კ. ამირხანაშვილი, ნ. ბურკიაშვილი, 2006 წელი
© T. Andronikashvili, K. Amirkhanashvili, N. Burkiashvili
BASES OF CHROMATOGRAPHY

ს/ს „ბეჭდვითი სიტყვის კომბინატი“
შპს „პოლიგრაფ თბილისი“
თბილისი, მარჯანიშვილის 5

ს ა რ ჩ ე ვ ი

შესავალი.....	9
ნაწილი 1. ქრომატოგრაფიის თეორია	
თავი 1.1. ქრომატოგრაფიული პროცესები	
1.1.1. ქრომატოგრაფიული პროცესების ძირითადი ცნებები და განმარტებები.....	11
1.1.2. ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია.....	13
1.1.2.1. ქრომატოგრაფიული პროცესის კლასიფიკაცია აპარატული გაფორმების მიხედვით.....	13
1.1.2.2. კლასიფიკაცია ფაზების აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით.....	14
1.1.2.3. კლასიფიკაცია ფაზების გადაადგილების მიხედვით.....	15
1.1.2.3.1. სამჟღავნი ანუ ელუენტური ქრომატოგრაფია.....	15
1.1.2.3.2. გამოძევებითი ქრომატოგრაფია.....	16
1.1.2.3.3. ფრონტალური ქრომატოგრაფია.....	16
1.1.2.3.4. კომბინირებული მეთოდი.....	17
1.1.2.4. კლასიფიკაცია მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედების ხასიათის მიხედვით.....	18
1.1.2.5. ქრომატოგრაფიული პროცესის კლასიფიკაცია ჩატარების მიზნის მიხედვით.....	19
თავი 1.2. ქრომატოგრაფიული პროცესის არსი	
1.2.1. თეორიული თეფშების თეორია.....	20
1.2.2. ადსორბციის იზოთერმა, ნონასწორული და არანონასწორული ქრომატოგრაფია.....	21
1.2.2.1. ადსორბციის იზოთერმა.....	21
1.2.2.2. ნონასწორული ქრომატოგრაფია.....	22
1.2.2.3. არანონასწორული ქრომატოგრაფია.....	24
1.2.3. ქრომატოგრაფიული ზონების გაფართოება (წარეცხვა) ვან-დეემტერის განტოლება.....	25
1.2.3.1. ჟუხოვიცკის განტოლება.....	29
1.2.3.2. ჯონსის განტოლება.....	29
თავი 1.3. ქრომატოგრაფიული პროცესების ძირითადი მახასიათებლების გაანგარიშება	
1.3.1. დაყოფის პროცესი.....	31
1.3.2. შეკავების მახასიათებლები.....	31
1.3.3. ტევადობის კოეფიციენტი.....	35
1.3.4. დაყოფის კრიტერიუმები.....	36
1.3.5. თეორიული თეფშების რიცხვი და ეკვივალენტური სიმაღლე.....	38
1.3.6. ასიმეტრიის კოეფიციენტი.....	39
გამოყენებული ლიტერატურა.....	40

ნაწილი 2. აირქრომატოგრაფია

თავი 2.1. აირქრომატოგრაფიის ძირითადი თეორია

2.1.1.	ზოგადი მიმოხილვა	42
2.1.2.	აირ-ადსორბციული ქრომატოგრაფია	42
2.1.2.1.	ადსორბენტები აირ-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიაში	44
2.1.2.2.	სილიკაგელი	46
2.1.2.3.	ალუმინის ოქსიდი	47
2.1.2.4.	ნახშირბადის სორბენტები	47
2.1.2.5.	ცეოლიტები ანუ მოლეკულური საცრები	49
2.1.2.6.	ფოროვანი მინა	51
2.1.2.7.	პოლიმერული სორბენტები	51
2.1.3.	აირ-თხევადი ქრომატოგრაფია	53
2.1.3.1.	მყარი სარჩულეები აირ-თხევად ქრომატოგრაფიაში	54
2.1.3.2.	უძრავი სითხეები (თხევადი ფაზები) აირ-თხევად ქრომატოგრაფიაში	59
2.1.3.3.	„სუპერსელექტიური“ თხევადი ფაზები	62
2.1.3.4.	თხევადი ფაზის მყარ სარჩულზე დაფენის მეთოდები	63
2.1.4.	მოძრავი ფაზა აირქრომატოგრაფიაში	64

თავი 2.2. აირქრომატოგრაფი

2.2.1	ზოგადი სქემა	67
2.2.2.	აირმატარებლის ბალონი (I კვანძი)	67
2.2.3.	დოზატორი (II კვანძი)	68
2.2.4.	სინჯის შეყვანის მეთოდიკა	69
2.2.5.	ქრომატოგრაფიული სვეტი (III კვანძი)	71
2.2.6.	თერმოსტატი	72
2.2.7.	აირქრომატოგრაფიაში გამოყენებული დეტექტორები (IV კვანძი)	73
2.2.7.1.	ზოგადი მიმოხილვა და კლასიფიკაცია	73
2.2.7.2.	დეტექტორების ძირითადი მახასიათებლები	75
2.2.7.3.	თბოგამტარობის დეტექტორი (კატარომეტრი)	76
2.2.7.4.	ალურ-იონიზაციური დეტექტორი	78
2.2.7.5.	ფოსფორის დეტექტორი	80
2.2.7.6.	სიმკვრივის დეტექტორი	81
2.2.7.7.	ელექტრონების ნატაცების დეტექტორი	82
2.2.8.	თვითჩამწერი (V კვანძი)	83

თავი 2.3. კაპილარული ქრომატოგრაფია

2.3.1.	ზოგადი მიმოხილვა	84
2.3.2.	კაპილარული სვეტები	85
2.3.3.	უძრავი ფაზის დატანა კაპილარის კედლებზე	86

თავი 2.4. აირქრომატოგრაფიული მეთოდის პრაქტიკული გამოყენება

2.4.1.	ზოგადი მიმოხილვა	88
	გამოყენებული ლიტერატურა	89

ნაწილი 3. თხევადი სვეტური ქრომატოგრაფია

თავი 3.1. თხევადი ქრომატოგრაფიის ძირითადი თეორია

შესავალი	92
3.1.1. თხევადი ქრომატოგრაფიის პროცესი	92
3.1.2. თხევად-ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია	93
3.1.2.1. თხევად-ადსორბციული ქრომატოგრაფია	93
3.1.2.2. განაწილებითი (თხევად-თხევადი) ქრომატოგრაფია	96
3.1.3. უძრავი ფაზები თხევად ქრომატოგრაფიაში	97
3.1.3.1. ზოგადი მიმოხილვა	97
3.1.3.2. სილიკაგელი	98
3.1.3.3. სილიკაგელის საფუძველზე მოდიფიცირებული სორბენტები	100
3.1.3.4. ალუმინის ოქსიდი	102
3.1.4. მოძრავი ფაზები თხევად ქრომატოგრაფიაში	102
3.1.4.1. ზოგადი მიმოხილვა	102
3.1.4.2. გამხსნელის პოლარობა, ელუირების ძალა და სელექტიურობა	103
3.1.4.3. სპეციფიკური მოდიფიკატორები	107
3.1.4.4. მუშაობის გრადიენტული რეჟიმი	110

თავი 3.2. თხევადი ქრომატოგრაფი

3.2.1. ზოგადი მიმოხილვა	114
3.2.2. ქრომატოგრაფიული სვეტი	114
3.2.3. ტუმბოები	115
3.2.4. დეტექტორები თხევად ქრომატოგრაფიაში	116
3.2.4.1. ზოგადი მიმოხილვა	116
3.2.4.2. ოპტიკური დეტექტორები	116
3.2.4.3. რეფრაქტომეტრული დეტექტორები	118
3.2.4.4. თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული სხვა დეტექტორები	119

თავი 3.3. თხევადი ქრომატოგრაფიის გამოყენების სფერო

3.3.1. ფარმაცევტული პრეპარატები	120
3.3.1.1. ალკალოიდები	120
3.3.1.2. ანტიბიოტიკები	120
3.3.1.3. ნარკოტიკული პრეპარატები	120
3.3.1.4. სტეროიდები	121
3.3.2. ბიოქიმიური ნივთიერებები	121
3.3.2.1. ნახშირწყლები	121
3.3.2.2. ლიპიდები	121
3.3.2.3. ვიტამინები	122
3.3.3. კვების პროდუქტები	122
3.3.4. სოფლის მეურნეობა	123
3.3.5. ნავთობგადამუშავება	123
3.3.6. ფეთქებადი ნივთიერებები	123

თავი 3.4. იონმიმოცვლითი ქრომატოგრაფია	124
შესავალი	124
3.4.1. მეთოდის საფუძვლები	124
3.4.2. მოძრავი ფაზის შერჩევა და დაყოფის პირობები	130
3.4.3. იონური ქრომატოგრაფიის აპარატული გაფორმება და მისი პრაქტიკული გამოყენების მაგალითები	131
თავი 3.5. გელ-ქრომატოგრაფია	142
3.5.1. ზოგადი მიმოხილვა	142
3.5.2. ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული გელების ზოგადი მიმოხილვა	144
3.5.3. გამხსნელების შერჩევა გელ-ქრომატოგრაფიაში	146
3.5.4. აპარატურული თავისებურებები	146
3.5.5. გელ-ქრომატოგრაფიის პრაქტიკული გამოყენების მაგალითები	147
თავი 3.6. აფინური ქრომატოგრაფია	149
3.6.1. ზოგადი მიმოხილვა	149
3.6.2. მატრიცის შერჩევა აფინური ქრომატოგრაფიული პროცესისთვის	150
გამოყენებული ლიტერატურა	153
ნაწილი 4. სიბრტყითი ანუ პლანარული ქრომატოგრაფია	
თავი 4.1. თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია	155
შესავალი	155
4.1.1. მეთოდის ზოგადი აღწერა	156
4.1.2. თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიული მეთოდის თეორიული საფუძვლები	158
4.1.3. ექსპერიმენტის ჩატარების ტექნიკა	160
4.1.3.1. სორბენტები თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში და მათი ფირფიტაზე დატანის ტექნიკა	160
4.1.3.2. ფირფიტების მომზადება თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიისთვის	161
4.1.3.3. სორბენტის მომზადება და დატანა ფირფიტაზე	162
4.1.4. თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიული ანალიზის ჩატარების მეთოდები (ქრომატოგრაფირების ტექნიკა)	164
4.1.4.1. აღმავალი ქრომატოგრაფიის მეთოდი	165
4.1.4.2. დამავალი ქრომატოგრაფიის მეთოდი	166
4.1.4.3. ჰორიზონტალური ქრომატოგრაფიის მეთოდი	167
4.1.4.4. ქრომატოგრაფიის სპეციალური მეთოდები	168
4.1.5. ქრომატოგრამის გამომჟღავნება	169
4.1.5.1. ქრომატოგრამის გამომჟღავნების ქიმიური მეთოდი	169
4.1.5.2. გამამჟღავნებელი ქიმიური რეაგენტები	170

4.1.5.2.1.	საერთო დანიშნულების რეაგენტები	170
4.1.5.2.2.	სპეციფიური რეაგენტები	171
4.1.6.	ქრომატოგრაფიული ფირფიტის გამომჟღავნების ფიზიკური მეთოდი	173
4.1.7.	მოძრავი ფაზების შერჩევა თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიული მეთოდისთვის	173
4.1.8.	თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია ელუენტის იძულებითი მოძრაობით	175
4.1.9.	თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიის გამოყენების ზოგიერთი მაგალითი	175
თავი 4.2. ქრომატოგრაფია ქაღალდზე		
4.2.1.	ზოგადი მიმოხილვა	177
4.2.2.	ქრომატოგრაფიული ქაღალდი	179
4.2.3.	ქაღალდზე ქრომატოგრაფიის პრაქტიკული გამოყენება	181
	გამოყენებული ლიტერატურა	182

ნაწილი 5. რაოდენობითი ანალიზი

თავი 5.1. რაოდენობითი ანალიზი სვეტური

ქრომატოგრაფიული მეთოდებისთვის

5.1.1.	ზოგადი მიმოხილვა	183
5.1.2.	პიკის სიმაღლე	184
5.1.3.	პიკის ფართის და მისი პროპორციული სიდიდეების გაზომვა	185
5.1.4.	ქრომატოგრამის გაანგარიშების მეთოდები	187
5.1.4.1.	აბსოლუტური დაგრადუირება	187
5.1.4.2.	შიგა სტანდარტის მეთოდი	188
5.1.4.3.	ორმაგი შიგა სტანდარტის მეთოდი	189
5.1.4.4.	დანამატების მეთოდი	190
5.1.4.5.	შიგა ნორმალიზაციის მეთოდი	190

თავი 5.2. რაოდენობითი ანალიზი თხელფენოვან

ქრომატოგრაფიაში

5.2.1.	რაოდენობითი ანალიზი უშუალოდ ფენაში	191
5.2.1.1.	ნივთიერების რაოდენობის განსაზღვრა ლაქის ფართის მიხედვით	191
5.2.1.2.	დენსიტომეტრიული მეთოდი	192
5.2.1.3.	ფლუორომეტრიული მეთოდი	193
5.2.1.4.	ლაქების სპექტროფოტომეტრია	194
5.2.2.	რაოდენობითი ანალიზი ქრომატოგრაფიული ფირფიტიდან საანალიზო ნივთიერების მოცილებით	194
	გამოყენებული ლიტერატურა	195

ნაწილი 6. ქრომატოგრაფიული პროცესების ავტომატიზაცია	196
შესავალი	
თავი 6.1. მონაცემთა ებმ დამუშავების თეორიული საფუძვლები	197
თავი 6.2. გადაფარული პიკების მათემატიკური დაყოფა	201
თავი 6.3. ქრომატოგრაფიული მონაცემების კომპიუტერული დამუშავება	203
6.3.1. პროგრამა „SUPERCHROM V5“	208
6.3.2. ადსორბციული პროცესების ქრომატოგრაფიული კვლევა	208
6.3.3. ასიმეტრიის კოეფიციენტის სიმაღლისგან დამოკიდებულების ფუნქცია, როგორც ქრომატოგრაფიაში ახალი მაიდენტიფიცირებელი პარამეტრი	212
თავი 6.4. ქრომატოგრაფიული პროცესების მათემატიკური მოდელირება	214
6.4.1. მათემატიკური მოდელირების თეფშური თეორია	214
6.4.2. დეტექტორის მგრძნობიარობის მათემატიკური მოდელირება	217
თავი 6.5. ექსპერიმენტული და მოდელირებული ქრომატოგრამების შედარება	219
გამოყენებული ლიტერატურა	222
ნაწილი 7. ქრომატოგრაფიაში ძირითადად გამოყენებული ტარმინების მოკლე ინგლისურ-ქართულ-რუსული ლექსიკონი	225

შესავალი

რა არის ქრომატოგრაფია? თუმცა ქრომატოგრაფიის არსი დღეისათვის მნიშვნელოვნად გაფართოვდა, ტრადიციულად კვლავ ძალაში რჩება მისი ძველი განმარტება, როგორც ნივთიერების და მათი ნარევების ანალიზის და გამოკვლევის ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდი. იგი დაფუძნებულია საანალიზო კომპონენტების მოძრავი ფაზის ნაკადით უძრავი ფაზის გასწვრივ გადაადგილებასა და მასში სხვადასხვაგვარ განაწილებაზე. არსებობს ქრომატოგრაფიის უფრო მარტივი განსაზღვრებაც: მოლეკულების დაყოფის პროცესი დიფერენციალური მიგრაციის გზით, ე.ი. დაყოფა სხვადასხვაგვარი მოლეკულების სხვადასხვაგვარი გადაადგილების სიჩქარეების გამო.

მ.ცვეტის მიერ გასული საუკუნის დასაწყისში აღმოჩენილი ქრომატოგრაფიის მეთოდის ძირითად თავისებურებას წარმოადგენდა მისი მაღალი მგრძნობიარობა, სელექტიურობა და უნივერსალობა.

ქრომატოგრაფია გამოიყენება პრაქტიკულად ყველა ნივთიერების გამოკვლევისთვის აირად, თხევად თუ მყარ მდგომარეობაში. განსაკუთრებით ფართოა საანალიზო ნივთიერებების სფერო – პოლიმერები, კვების პროდუქტები, მიკროორგანიზმები, ცილები, ნავთობპროდუქტები და სხვა.

ქრომატოგრაფიას მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვს ქიმიური მეცნიერების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მიმართულების – ანალიზური ქიმიის განვითარებაში. ქიმიკოსის ქრომატოგრაფიული კუთხით დანახული სამყარო მრავალი მნიშვნელოვანი აღმოჩენის საშუალებას იძლევა. კერძოდ, ათზე მეტი ნობელის პრემია მიენიჭა შრომებს, რომლებშიც აქტიურად გამოიყენებოდა ქრომატოგრაფიული მეთოდები. მაგალითად 1948 წელს ა. თიზელიუსს მიენიჭა ნობელის პრემია ელექტროფორეზის და ადსორბციული ანალიზის სფეროში ჩატარებული კვლევებისათვის, ხოლო 1952 წელს ა.მარტინს და ი.სინჯს განაწილებითი ქრომატოგრაფიის მეთოდის აღმოჩენისთვის. ბევრი გამოჩენილი მეცნიერი მუშაობდა ქრომატოგრაფიული მეთოდის სრულყოფისთვის, ნაწილი კი მას აქტიურად იყენებდა. მაგალითად, სიბორგმა განახორციელა რამდენიმე ათობითი ტრანსურანული ელემენტის ატომების დაყოფა ქრომატოგრაფიის საშუალებით. განსაკუთრებული მნიშვნელობა გააჩნია მ. გოლეს მიერ 1956 წელს აირქრომატოგრაფიის კაპილარული ვარიანტის შექმნას (უნდა აღინიშნოს, რომ დღეისათვის აირქრომატოგრაფიის სფეროში საზღვარგარეთ დაბეჭდილი ნაშრომების სამი მეოთხედი მის გამოყენებას ეძღვნება, რაც ობიექტურად მოწმობს ამ სფეროში მიმდინარე დიდ რევოლუციურ ცვლილებაზე). 1962 წელს ი.პორტმა და პ.ფლოდინმა შექმნეს საცრისებური ქრომატოგრაფიის ვარიანტი და გამოიყენეს იგი მაღალმოლეკულური ნაერთების დასაყოფად. გასული საუკუნის 70-იან წლებში იწყება თხევადი ქრომატოგრაფიის ინტენსიური განვითარების პერიოდი (ე.წ. მაღალეფექტური თხევადი ქრომატოგრაფია); 80-იან წლებში კი ფლუიდური ქრომატოგრაფიის პრაქტიკული გამოყენება და ქრომატოგრაფიული პროცესების ავტომატიზაცია.

ყოველწლიურად იზრდება პუბლიკაციების რიცხვი ქრომატოგრაფიის სფეროში. მხოლოდ 1967-1986 წლებში მსოფლიოში გამოქვეყნებული იქნა თერთმეტი ათასზე მეტი ნაშრომი, რომელთა შორისაც სჭარბობდა თხევადი და აირქრო-

მატოგრაფიით შესრულებული შრომები. უკანასკნელ ხანებში, სხვადასხვა კლასიკური და ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდებით ორგანული ნაერთების განსაზღვრისას 70-80% ქრომატოგრაფიაზე მოდის. ქრომატოგრაფიის მიმართ სულ უფრო და უფრო დიდ ინტერესს იჩენენ სრულიად სხვადასხვა სპეციალობის მკვლევარები: ქიმიკოსები, ბიოქიმიკოსები, მედიკოსები, ფარმაცევტები, ეკოლოგები და სხვა.

მათთვის, ვისაც საქმე აქვთ ქრომატოგრაფიასთან გასაგებია პროფესორ ბ.ეგერს-დორინგის გამონათქვამი: „ეს ფანტასტიკაა! როდესაც მე ვმუშაობ ქრომატოგრაფიულ აპარატთან, მე მგონია რომ ვიმყოფები ქიმიურ სამოთხეში“.

ქრომატოგრაფია საშუალებას იძლევა შესწავლილი იქნას როგორც ანალიზური, ასევე არაანალიზური (სორბციული წონასწორობის ხასიათი, დიფუზური მახასიათებლები, ქიმიური რეაქციის კინეტიკა, აირების, სითხეების, მყარი სხეულების სხვა ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების განსაზღვრა) ხასიათის პროცესები.

წარმოდგენილი ნაშრომი შეეხება ქრომატოგრაფიის მხოლოდ პრაქტიკული, ანალიზური მიზნით გამოყენებას, ამიტომ თეორიული ნაწილი შეგნებულად შემოკლებულია. წიგნის გამოცემის მიზანია ერთი მხრივ მკითხველს შეუქმნას ზოგადი წარმოდგენა ქრომატოგრაფიული მეთოდის ძირითად ვარიანტებზე, რაც საშუალებას მისცემს დამწყებ ქრომატოგრაფისტებს სწორი ორიენტაცია მოახდინონ შესაბამისი ვარიანტის შერჩევისას ამა თუ იმ კონკრეტული ამოცანის გადასაწყვეტად. მეორე მხრივ, გააცნოს სპეციალისტებს ამ მონოგრაფიის ავტორების მიერ განხორციელებული ზოგიერთი ახალი მიღწევები ქრომატოგრაფიის განვითარების სფეროში.

წარმოდგენილი მონოგრაფია შედგება შვიდი ნაწილისგან: 1. ქრომატოგრაფიის თეორია (ქრომატოგრაფიის არსი, თეორიის ელემენტები, დაყოფის ხარისხის შეფასების კრიტერიუმები); 2. აირქრომატოგრაფია; 3. თხევადი სვეტური ქრომატოგრაფია; 4. სიბრტყითი ანუ პლანარული ქრომატოგრაფია; 5. რაოდენობითი ანალიზი; 6. ქრომატოგრაფიული პროცესების ავტომატიზაცია.

პირველი ექვსი ნაწილი შეიცავს რამდენიმე თავს. ცალკეა გამოყოფილი მონოგრაფიის მე-7 ნაწილი, რომელიც წარმოადგენს ქრომატოგრაფიაში გამოყენებულ ძირითად ტერმინებს ინგლისურ, ქართულ და რუსულ ენებზე. ავტორებმა გარკვეულწილად შეზღუდეს ციტირებული ლიტერატურის ნუსხა და შემოიფარგლნენ ძირითადად ცალკეული მონოგრაფიების სახით გამოქვეყნებული შრომებით, სახელმძღვანელოებით, დამხმარე საშუალებების და ზოგადი ორიგინალური სტატიებით.

მონოგრაფია განკუთვნილია ფართო პროფილის მქონე ქიმიკოსების, ბიოქიმიკოსების, კვლევითი და სამრეწველო ლაბორატორიების, კვების მრეწველობის ანალიზური ლაბორატორიების და სამეცნიერო დაწესებულებების თანამშრომლებისთვის, პედაგოგების, ქიმიური და ბიოლოგიური პროფილის მქონე ასპირანტების და უმაღლესი სასწავლებლის სტუდენტებისთვის.

ავტორები სთხოვენ მკითხველებს ყურადღებით გაეცნონ წარმოდგენილ ნაშრომს და ყველა ის შენიშვნა და მოსაზრება რაც დაკავშირებული იქნება წინამდებარე გამოცემასთან გამოგვიგზავნონ წერილობით, რათა გათვალისწინებული იქნას წიგნის შემდგომი გამოცემის დროს.

ნანილი 1. ქრომატოგრაფიის თეორია

თავი 1.1.

ქრომატოგრაფიული პროცესები

1.1.1. ქრომატოგრაფიული პროცესების ძირითადი ცნებები და განმარტებები

ქრომატოგრაფია არის დინამიკურ პირობებში ნივთიერებათა ნარევების დაყოფისა და ანალიზის ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდი. იგი დაფუძნებულია საკვლევი ნარევის კომპონენტების სხვადასხვაგვარი განაწილების უნარზე ორ, უძრავ და მოძრავ ფაზებს შორის [1].

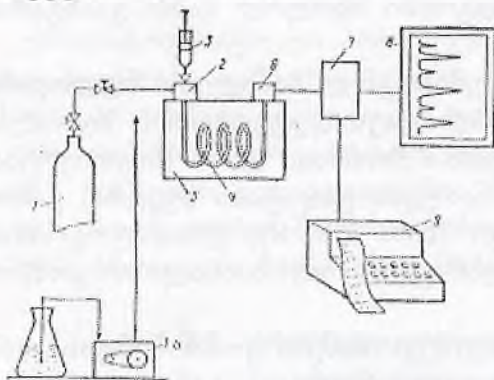
უძრავი და მოძრავი ფაზების ცნება ქრომატოგრაფიული პროცესების დამახასიათებელი ერთ-ერთი ძირითადი ცნებაა.

უძრავი ფაზა წარმოადგენს მყარ ნივთიერებას განვითარებული ზედაპირით, ან სითხეს დაფენილს მყარ სარჩულზე, რომლებიც მოთავსებულია სვეტში ან დაფენილია ჰორიზონტალურ ფირფიტაზე.

მოძრავი ფაზა შეიძლება იყოს აირის ან სითხის ნაკადი, რომელიც გაედინება უძრავი ფაზის ფენაში, ახდენს საანალიზო ნივთიერებების გადატანას მის გასწვრივ და უზრუნველყოფს მათ დაყოფას.

მოძრავი ფაზის უწყვეტად გადაადგილების გამო, ქრომატოგრაფიული პროცესი ემყარება საანალიზო ნივთიერებების ზემოაღნიშნულ ორ ფაზას შორის წონასწორული განაწილების მუდმივ დარღვევასა და მის ხელახალ აღდგენას. ადგილი აქვს უძრავ ფაზაზე კომპონენტების მუდმივ ადსორბციას და დესორბციას.

ადსორბციის და დესორბციის სიჩქარეებს შორის სხვაობა წარმოადგენს ქრომატოგრაფიული დაყოფის საფუძველს და მთელი პროცესი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც ადსორბცია-დესორბციის ელემენტარული სტადიების მრავალჯერადი გამეორება, რაც საბოლოოდ საანალიზო ნარევის დაყოფას იწვევს.



ნახ.1.1. ქრომატოგრაფის ზოგადი სქემა

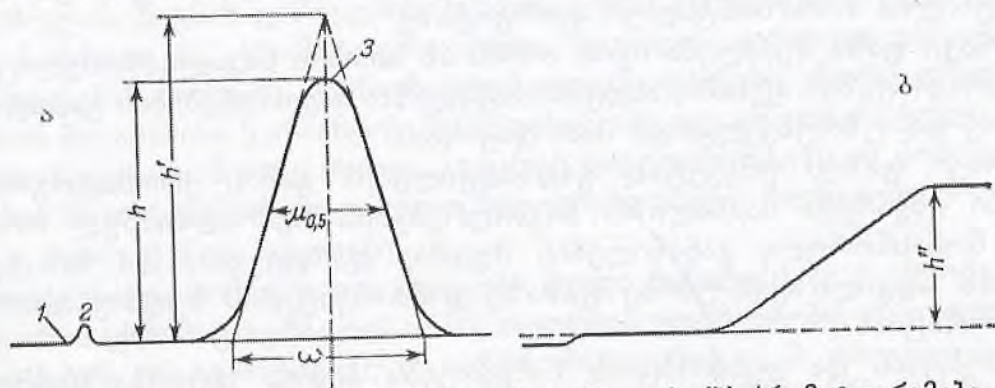
1-ბალონი აირმატარებლისთვის (აირქრომატოგრაფია); 1ა-გამხსნელის (მოძრავი ფაზის) მისაწოდებელი ტუმბო (თხევადი ქრომატოგრაფია); 2-სინჯის შესაყვანი სისტემა; 3-სინჯის შესაყვანი სისტემის შპრიცი; 4-ქრომატოგრაფიული სვეტი; 5-თერმოსტატი; 6-დეტექტორი (ანალიზატორი); 7-სიგნალის გარდამქმნელი მოწყობილობა; 8-რეგისტრატორი ქრომატოგრამის ჩასაწერად; 9-ინფორმაციის დამუშავების სისტემა.

ქრომატოგრაფიული პროცესები ხორციელდება სპეციალური ხელსაწყოთა, **ქრომატოგრაფის** საშუალებით, რომლის ძირითად ნაწილს წარმოადგენს სვეტი და დეტექტორი. ნახ.1.1. მოყვანილია ნებისმიერი, აირ ან თხევადი ქრომა-

ტოგრაფის ზოგადი სქემა. პირველ შემთხვევაში ხდება აირმატარებლის მიწოდება (სისტემა 1), ხოლო მეორე შემთხვევაში ელუენტის (მოძრავი ფაზის) მიწოდება (სისტემა 1ა).

ხშირად ამბობენ რომ, სვეტი ეს არის ქრომატოგრაფის გული, რადგან სწორედ იქ ხდება საანალიზო ნარევის შემადგენელ კომპონენტებად დაყოფა. დაყოფილი კომპონენტები მოძრავი ფაზის საშუალებით შედიან დეტექტორში, რომელიც ხელსაწყოს ე.წ. ტვინს წარმოადგენს. დეტექტორის ფუნქციაა მოახდინოს საანალიზო ნარევის თითოეული კომპონენტის რეგისტრაცია დროში მისი კონცენტრაციის (ან სხვა რომელიმე პარამეტრი) ცვლილების შესაბამისად.

დეტექტორის სიგნალი ჩაიწერება თვითჩამწერზე ქრომატოგრამის სახით. **ქრომატოგრამა** წარმოადგენს ტალღოვან მრუდს, რომელზეც მიღებული პიკების რაოდენობა შეესაბამება დაყოფილი კომპონენტების რაოდენობას. თითოეული პიკი წარმოადგენს მოძრავი ფაზის ნაკადში მოხვედრილი საანალიზო ნივთიერების კონცენტრაციის დროსთან დამოკიდებულების გრაფიკულ გამოსახვას. ნახაზზე 1.2. მოყვანილია დიფერენციალური (ა) და ინტეგრალური (ბ) დეტექტორით მიღებული ქრომატოგრამები[2].

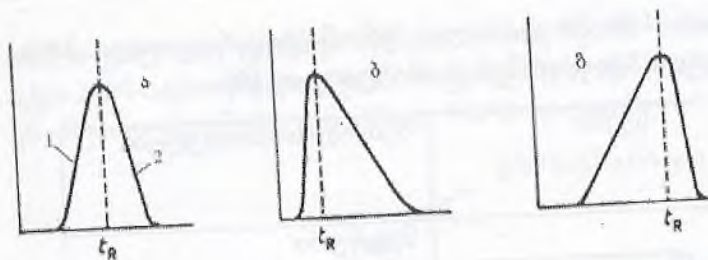


ნახ.1.2. დიფერენციალური (ა) და ინტეგრალური (ბ) ქრომატოგრამები
1-ნულოვანი ხაზი; 2-არასორბირებადი ნივთიერების პიკი;
3-საანალიზო ნივთიერების პიკი

ქრომატოგრაფიული ანალიზის შემთხვევაში ძირითადად იყენებენ დიფერენციალურ ქრომატოგრამებს და ამიტომ შემდგომში მხოლოდ მათი გაანგარიშების მეთოდებს განვიხილავთ.

ქრომატოგრამაზე განასხვავებენ შემდეგ შემადგენელ ნაწილებს: **ნულოვანი ხაზი** (ნახ.1.2, 1); მონაკვეთი, რომელიც გამოხატავს დეტექტორის სიგნალს, როდესაც ქრომატოგრაფიული სვეტიდან სუფთა მოძრავი ფაზა (ნივთიერება, რომლის საშუალებითაც ხდება საანალიზო ნარევის გადატანა სვეტში) გამოდის; **არასორბირებადი კომპონენტის პიკი** (ნახ. 1.2, 2); ქრომატოგრამის მესამე მონაკვეთი, **პიკი** შეესაბამება სვეტიდან ერთ-ერთი საანალიზო კომპონენტის გამოსვლას (ნახ.1.2. 3).

პიკს გააჩნია „ფრონტის“ ხაზი, რომელიც შეესაბამება კომპონენტის კონცენტრაციის ზრდას ნულიდან მაქსიმუმამდე და „ზურგის“ ხაზი, რომელიც მოძრავ ფაზაში მისი კონცენტრაციის მაქსიმუმიდან ნულამდე შემცირების მაჩვენებელია (ნახ.1.3).



ნახ. 1.3. ქრომატოგრაფიული პიკის ძირითადი ფორმები
ა) სიმეტრიული პიკი; ბ, გ) არასიმეტრიული პიკი
1-„ფრონტის“ ხაზი; 2-„ზურგის“ ხაზი

საანალიზო ნარევის სვეტში გავლისას ხდება ქრომატოგრაფიული ზონების გაფართოება ანუ წარეცხვა, რაც თავის მხრივ იწვევს ქრომატოგრამაზე განთხმული პიკის გამოსახვას. პიკი შეიძლება იყოს სიმეტრიული ან არასიმეტრიული. უკანასკნელ შემთხვევაში პიკისთვის დამახასიათებელია განთხმა „ზურგის“ ან „ფრონტის“ მხარეს, რასაც მოსდევს შესაბამისად პიკის ე.წ. „კუდის“ ან „ენის“ წარმოქმნა (ნახ.1.3, ბ,გ).

ქრომატოგრაფიული პიკი ძირითადად ხასიათდება მისი სიმაღლით და სიგანით (ნახ.1.2). პიკის სიმაღლე განისაზღვრება მისი მაქსიმუმის (h) ან მხების გადაკვეთის წერტილიდან (h') ნულოვან ხაზზე დაშვებული მართობით. ხოლო პიკის სიგანე განისაზღვრება კონტურის წერტილებს შორის მისი სიმაღლის ნახევარზე ($\mu_{0.5}$) ან ფუძესთან მხებს შორის მანძილით (w) (ნახ.1.2).

ინტეგრალურ ქრომატოგრამაზე (ნახ.1.2, ბ) ნულოვანი ხაზის მდებარეობის ცვლილებას (რაც კომპონენტის ელუირებით არის გამოწვეული) **საფეხურს** უწოდებენ. ორი თანმიმდევრული ნულოვანი ხაზის სიმაღლეებს შორის სხვაობას (h'') **საფეხურის სიმაღლეს** [2].

ქრომატოგრამის მეშვეობით შეიძლება განესაზღვროთ ქრომატოგრაფიული პროცესის ძირითადი მახასიათებლები: ქრომატოგრაფიული ზონების შეკავების პარამეტრები, დაყოფის კოეფიციენტები, თეორიული თეფშების რიცხვი (MTR), პიკების ასიმეტრიის კოეფიციენტები და სხვა სიდიდეები, რომელთაც შემდგომში თანმიმდევრულად განვიხილავთ.

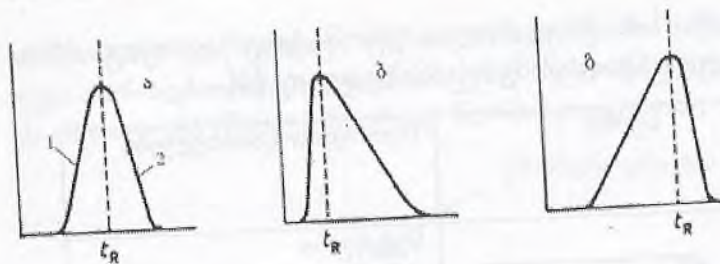
1.1.2. ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია

ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია სხვადასხვა ნიშნის მიხედვით შეიძლება განხორციელდეს [3]:

- პროცესის აპარატული გაფორმებით;
- ფაზების აგრეგატული მდგომარეობით;
- ფაზების გადაადგილების მიხედვით;
- მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედების ხასიათით;
- პროცესის ჩატარების მიზნის გათვალისწინებით;

1.1.2.1. ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია აპარატული გაფორმების მიხედვით

ქრომატოგრაფიული პროცესები შეიძლება განხორციელდეს სვეტში, კაპილარში ან სიბრტყეზე. შესაბამისად განასხვავებენ სვეტურ, კაპილარულ და



ნახ. 1.3. ქრომატოგრაფიული პიკის ძირითადი ფორმები
ა) სიმეტრიული პიკი; ბ, გ) არასიმეტრიული პიკი
1-„ფრონტის“ ხაზი; 2-„ზურგის“ ხაზი

საანალიზო ნარევის სვეტში გავლისას ხდება ქრომატოგრაფიული ზონების გაფართოება ანუ წარეცხვა, რაც თავის მხრივ იწვევს ქრომატოგრამაზე განრთხმული პიკის გამოსახვას. პიკი შეიძლება იყოს სიმეტრიული ან არასიმეტრიული. უკანასკნელ შემთხვევაში პიკისთვის დამახასიათებელია განრთხმა „ზურგის“ ან „ფრონტის“ მხარეს, რასაც მოსდევს შესაბამისად პიკის ე.წ. „კუდის“ ან „ენის“ წარმოქმნა (ნახ.1.3, ბ,გ).

ქრომატოგრაფიული პიკი ძირითადად ხასიათდება მისი სიმაღლით და სიგანით (ნახ.1.2). პიკის სიმაღლე განისაზღვრება მისი მაქსიმუმის (h) ან მხების გადაკვეთის წერტილიდან (h') ნულოვან ხაზზე დაშვებული მართობით. ხოლო პიკის სიგანე განისაზღვრება კონტურის წერტილებს შორის მისი სიმაღლის ნახევარზე ($\mu_{0.5}$) ან ფუძესთან მხებს შორის მანძილით (w) (ნახ.1.2).

ინტეგრალურ ქრომატოგრამაზე (ნახ.1.2, ბ) ნულოვანი ხაზის მდებარეობის ცვლილებას (რაც კომპონენტის ელუირებით არის გამოწვეული) საფეხურს უწოდებენ. ორი თანმიმდევრული ნულოვანი ხაზის სიმაღლეებს შორის სხვაობას (h'') საფეხურის სიმაღლეც [2].

ქრომატოგრამის მეშვეობით შეიძლება განვსაზღვროთ ქრომატოგრაფიული პროცესის ძირითადი მახასიათებლები: ქრომატოგრაფიული ზონების შეკაპების პარამეტრები, დაყოფის კოეფიციენტები, თეორიული თეფშების რიცხვი (N), პიკების ასიმეტრიის კოეფიციენტები და სხვა სიდიდეები, რომელთაც შემდგომში თანმიმდევრულად განვიხილავთ.

1.1.2. ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია

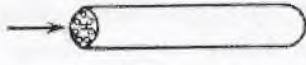
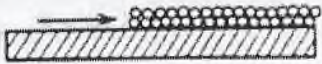
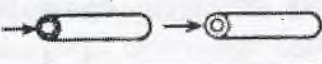
ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია სხვადასხვა ნიშნის მიხედვით შეიძლება განხორციელდეს [3]:

- პროცესის აპარატული გაფორმებით;
- ფაზების აგრეგატული მდგომარეობით;
- ფაზების გადაადგილების მიხედვით;
- მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედების ხასიათით;
- პროცესის ჩატარების მიზნის გათვალისწინებით;

1.1.2.1. ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია აპარატული გაფორმების მიხედვით

ქრომატოგრაფიული პროცესები შეიძლება განხორციელდეს სვეტში, კაპილარში ან სიბრტყეზე. შესაბამისად განასხვავებენ სვეტურ, კაპილარულ და

სიბრტყით ქრომატოგრაფიას. ნახ. 1.4. მოყვანილია ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია აპარატული გაფორმების მიხედვით [4].

პროცესის მიმდინარეობა (ხასიათი)	სქემა	მეთოდის დასახელება
ცილინდრულ ფორმაში ჩატვირთულ სორბენტზე		სვეტური ქრომატოგრაფია
ბრტყელ ზედაპირზე დაფენილ სორბენტის ფენაში		სიბრტყითი ქრომატოგრაფია
კაპილარის შიგა კედელზე დაფენილ სორბენტზე		კაპილარული ქრომატოგრაფია

ნახ. 1.4. ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია აპარატული გაფორმების მიხედვით

სვეტური ქრომატოგრაფია ყველაზე ფართოდ გავრცელებულ მეთოდს წარმოადგენს. ქრომატოგრაფიული სვეტი ეს არის მინის ან უჟანგავი ფოლადის მილი, რომელიც შევსებულია უძრავი ფაზით. მოძრავი ფაზა და საანალიზო ნარევი სვეტში მიეწოდება ზემოდან და მისი მოძრაობა სვეტში განპირობებულია წნევის ცვლილებით სვეტის შესასვლელსა და გამოსასვლელს შორის.

სვეტური ქრომატოგრაფიის სახესხვაობას წარმოადგენს **კაპილარული ქრომატოგრაფია**, სადაც უძრავი ფაზა დაფენილია კაპილარის შიგა კედელზე. აღნიშნული მეთოდი ძირითადად გამოიყენება მრავალკომპონენტიანი ნარევების მიკრორაოდენობების დასაყოფად.

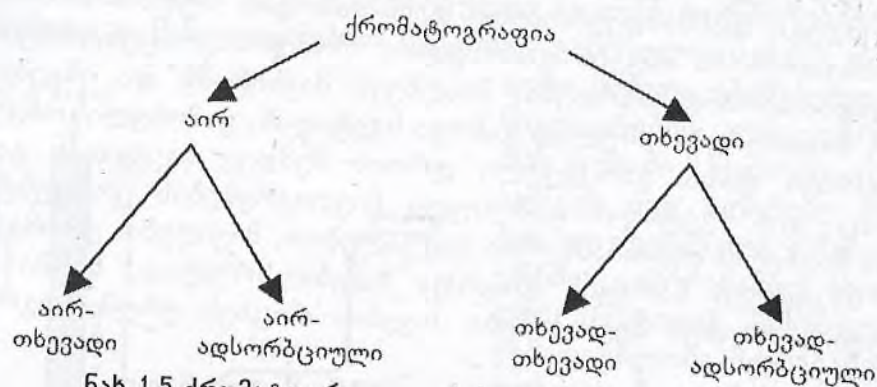
გაფორმების თვალსაზრისით მეტად განსხვავებულია **სიბრტყითი ქრომატოგრაფია**, რომლის დროსაც უძრავი ფაზა დაფენილია სიბრტყეზე (თხელფენოვანი და ქაღალდის ქრომატოგრაფია).

1.1.2.2. კლასიფიკაცია ფაზების აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით

მოძრავი ფაზის აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით კლასიფიკაცია განაპირობებს ქრომატოგრაფიული პროცესის დაყოფას ორი ძირითადი მიმართულებით — თხევად და აირქრომატოგრაფიად. თუ მოძრავი ფაზა არის აირად მდგომარეობაში, საქმე გვაქვს **აირქრომატოგრაფიასთან**, ხოლო თუ მოძრავი ფაზა წარმოადგენს სითხეს, ხორციელდება **თხევად ქრომატოგრაფიული** მეთოდი.

ქრომატოგრაფიის ამ ორ ძირითად მეთოდში გამოყენებული უძრავი ფაზებიც აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით შეიძლება იყოს როგორც სითხე, დაფენილი მყარ სარჩულზე, ასევე მყარი ნივთიერება. შესაბამისად, თუ უძრავი ფაზა არის სითხე, საქმე გვაქვს **აირ-თხევად** ან **თხევად-თხევად** ქრომატოგრაფიასთან, იმის მიხედვით, თუ რა არის გამოყენებული მოძრავი ფაზის სახით, სითხე თუ აირი.

ანალოგიურად, უძრავი ფაზის სახით მყარი ნივთიერების გამოყენებისას ადგილი აქვს აირ-ადსორბციულ ან თხევად-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიას. სქემატურად ეს შეიძლება შემდეგნაირად წარმოვიდგინოთ:

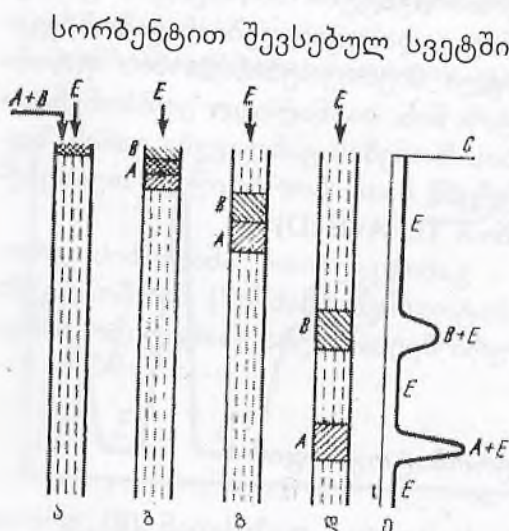


ნახ. 1.5. ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია ფაზების აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით

1.1.2.3. კლასიფიკაცია ფაზების გადაადგილების მიხედვით

ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაციისას ფაზების გადაადგილების ხასიათის მიხედვით განასხვავებენ ოთხ ვარიანტს: სამულავნი ანუ ელუენტური, ფრონტალური, გამოძევებითი და კომბინირებული ქრომატოგრაფიული მეთოდები.

1.1.2.3.1. სამულავნი ანუ ელუენტური ქრომატოგრაფია



ნახ. 1.6. ქრომატოგრაფიული ზონების წარმოქმნის და მათი კონცენტრაციების განაწილების სქემა სამულავნ ქრომატოგრაფიაში

რო სწრაფად, ვიდრე B ნივთიერების ზონა. თუ სვეტის სიგრძე ამის საშუ-

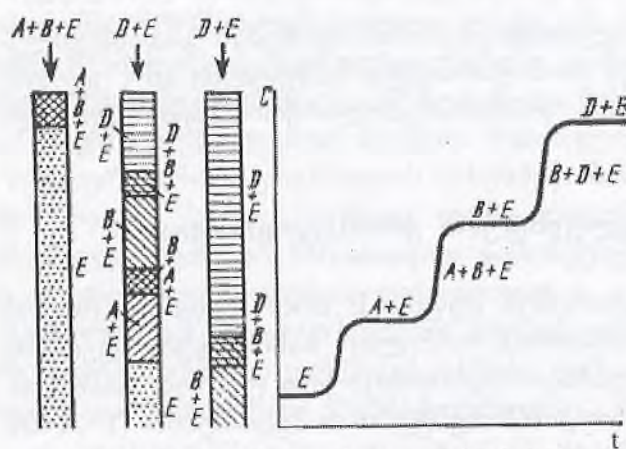
სორბენტით შევსებულ სვეტში გაატარებენ სუფთა E მოძრავ ფაზას (სითხე ან აირი), რომელიც ხასიათდება ყველაზე დაბალი ადსორბციული უნარით საანალიზო კომპონენტებთან შედარებით ($E < A < B$). მოძრავი ფაზის ნაკადის დინების შეუწყვეტლივ სვეტის ზედა ნაწილში შეჰყავთ აირად ან თხევად მდგომარეობაში მყოფი A და B საანალიზო ნივთიერებების ნარევი (ნახ.1.6). მოხვდებიან რა სორბენტის ფენაში, საანალიზო ნივთიერებები მასზე სორბირდებიან და იწყებენ გადაადგილებას სვეტის გასწვრივ მოძრავი ფაზის მიმართულებით. თუ ნივთიერებებს მოცემული სორბენტის მიმართ აქვთ სხვადასხვაგვარი მსგავსება, მათი გადაადგილების სიჩქარეც სვეტის გასწვრივ იქნება სხვადასხვა. შედეგად, ნაკლებსორბირებადი ნივთიერება A გადაადგილდება უფრო სწრაფად, ვიდრე B ნივთიერების ზონა. თუ სვეტის სიგრძე ამის საშუ-

ალებას იძლევა, A ნივთიერების ზონა გამოეყოფა B ნივთიერების ზონას და სვეტიდან გამოვა პირველი [3].

ქრომატოგრაფიული სვეტიდან საანალიზო ნივთიერება და მოძრავი ფაზა გამოდის შემდეგი თანმიმდევრობით: ჯერ გამოდის სუფთა მოძრავი ფაზა, შემდეგ A ნივთიერება იწყებს გამოსვლას, რომლის კონცენტრაცია მოძრავ ფაზაში თანდათანობით იზრდება, მიაღწევს მაქსიმუმს და იწყებს კლებას. როდესაც A ნივთიერება სრულად გამოვა სვეტიდან, გამოსვლას იწყებს კვლავ სუფთა მოძრავი ფაზა. გარკვეული დროის შემდეგ სვეტიდან გამოდის B ნივთიერებაც. თუ სვეტიდან გამოსული ნივთიერებების კონცენტრაციების ცვლილებას ჩავწერთ თვითჩამწერის საშუალებით, მივიღებთ ქრომატოგრამას. როდესაც საკვლევი ნარევის დაყოფა ხდება სრულად, მასში შემავალი კომპონენტების რიცხვი შეესაბამება პიკების რიცხვს ქრომატოგრამაზე.

1.1.2.3.2. გამოძევებითი ქრომატოგრაფია

ქრომატოგრაფიის ამ მეთოდში ნივთიერების დესორბცია ხდება მოძრავი ფაზის ნაკადით, რომელიც შეიცავს ძლიერ სორბირებად კომპონენტს —



ნახ. 1.7. ქრომატოგრაფიული ზონების წარმოქმნის და მათი კონცენტრაციების განაწილების სქემა გამოძევებით ქრომატოგრაფიაში

გამომძევებელს. სორბენტით შევსებულ სვეტში წინასწარ გაატარებენ სუფთა მოძრავ ფაზას და შეიყვანენ საანალიზო ნარევის. შემდეგ სვეტში გაატარებენ გამომძევებელი ნივთიერების შემცველ მოძრავ ფაზას. საანალიზო ნარევის კომპონენტები სორბენტის გასწვრივ გადაადგილდებიან გამომძევებელი ნივთიერების ზონის ფრონტის წინ. საანალიზო კომპონენტების ზონების განლაგება განისაზღვრება მათი სორბირებული თვისებებით ($E < A < B < D$).

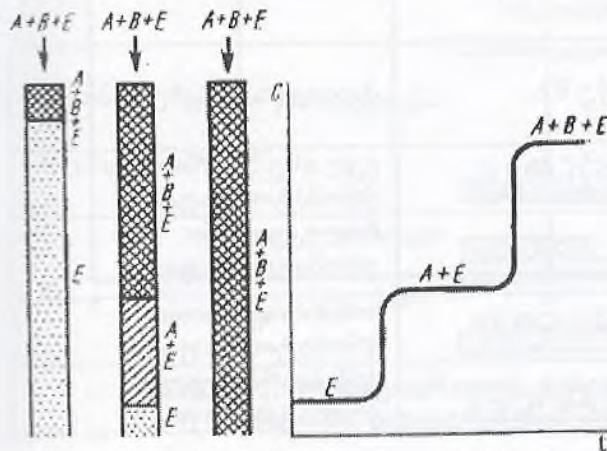
გამომძევებითი ანალიზის ქრომატოგრამა (ნახ.1.7) წარმოადგენს

საფეხურებრივ მრუდს და თითოეული საფეხური შეესაბამება საანალიზო ნარევის თითო კომპონენტს.

1.1.2.3.3. ფრონტალური ქრომატოგრაფია

A და B ნივთიერებების საანალიზო ნარევის მოძრავ ფაზასთან (E) ერთად გაატარებენ სორბენტით შევსებულ სვეტში. ვთქვათ, A ნივთიერებას მოცემული სორბენტის მიმართ აქვს ნაკლები მსგავსება (ე.ი. ნაკლებად სორბირდება მასზე) B ნივთიერებასთან შედარებით. ამის შემდეგ ხდება საანალიზო ნარევის უწყვეტი მიწოდება სვეტში, რის გამოც სორბენტზე წარმოიქმნება კომპონენტების მზარდი რიცხვის შემცველი ზონები. A და B ნივთიერებები გადა-

ადგილდებიან რა სვეტის გასწვრივ, თანდათანობით გამოაძევენ სვეტში მყოფ E გამხსნელს. მოძრავი ნარევის ფრონტი შედგება ნაკლებ სორბირებადი A ნივთიერებისაგან, რომელსაც მოჰყვება საწყისი ნარევი. ამგვარად, სორბენტის მთელი მასა ჯერ გაჯერებულია ნაკლებ სორბირებადი A ნივთიერებით, შემდეგ კი B ნივთიერებით. სვეტიდან გამოსვლის შემდეგ ჯერ ფიქსირდება სუფთა გამხსნელი. შემდეგ A ნივთიერების კონცენტრაცია მოძრავ ფაზაში მკვეთრად იზრდება, მიაღწევს იგი ზღვრულ მნიშვნელობას და უცვლელი რჩება B ნივთიერების გამოჩენამდე. ანალიზის ბოლოს სვეტიდან გამოსული ნარევის შემადგენლობა შეესაბამება საწყისი ნარევის შედგენილობას.



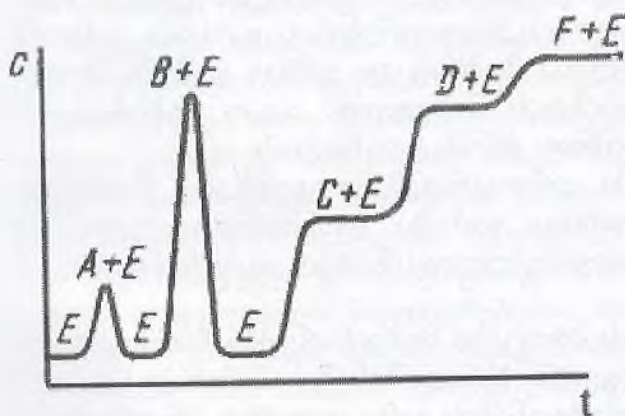
ნახ. 1.8. ქრომატოგრაფიული ზონების წარმოქმნისა და მათი კონცენტრაციების განაწილების სქემა ფრონტალურ ქრომატოგრაფიაში

მიღებული ქრომატოგრამა საფეხურებრივია (ნახ.1.8) და საფეხურების რიცხვი ტოლია საანალიზო ნარევის კომპონენტების რიცხვის. ფრონტალური მეთოდი საშუალებას იძლევა ხსნარიდან გამოვყოთ მხოლოდ ერთი, ყველაზე ნაკლებსორბირებადი კომპონენტი და ამიტომ,

ანალიზური მიზნებისთვის იგი არ გამოიყენება.

1.1.2.3.4. კომბინირებული მეთოდი

კომბინირებული მეთოდის გამოყენებას მიმართავენ ისეთ შემთხვევაში,



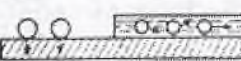
ნახ. 1.9. ქრომატოგრაფიული ზონების კონცენტრაციების განაწილების სქემა კომბინირებული მეთოდის შემთხვევაში

როდესაც გაძნელებულია ძლიერ სორბირებადი კომპონენტის გამოვლენა ქრომატოგრაფიული სვეტიდან. მეთოდის არსი შემდეგში მდგომარეობს: თავდაპირველად ხორციელდება სამუდამო ქრომატოგრაფია, რომლის დროსაც სვეტიდან გამოირეცხება შედარებით ნაკლებ სორბირებადი ნივთიერებები. ამის შემდეგ მოძრავ ფაზაში ამატებენ ისეთ ნივთიერებას, რომელიც საანალიზო ნარევის კომპონენტებთან შედარებით ძლიერ სორბირდება მოცემულ სორბენტზე და პროცესი გრძელდება გამოძევებით.

თი ქრომატოგრაფიის მეთოდით.

1.1.2.4. კლასიფიკაცია მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედების ხასიათის მიხედვით

ამგვარ კლასიფიკაციას საფუძვლად უდევს საანალიზო ნივთიერების მოლეკულების უძრავ ფაზასთან ურთიერთქმედების ბუნება. ეს შეგვიძლია სქემატურად შემდეგნაირად წარმოვიდგინოთ [4]:

დაყოფის პროცესის მიხედვით	ს ქ ე მ ა	მეთოდის დასახელება
მოლეკულების ზომების მიხედვით		გელ ანუ საცრისებური ქრომატოგრაფია
ფიზიკური ადსორბცია და განაწილება		მოლეკულური ქრომატოგრაფია
იონმიმოცვლა		იონმიმოცვლითი ქრომატოგრაფია
წყალბადური ბმები, ქიმიური მსგავსება და სხვა		ქემოსორბციული ქრომატოგრაფია

ნახ. 1.10. ქრომატოგრაფიული მეთოდების კლასიფიკაცია მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედების ხასიათის მიხედვით

საცრისებური ანუ გელ ქრომატოგრაფიის შემთხვევაში საანალიზო ნარევის დაყოფა დაფუძნებულია გელის ფორებში მოლეკულების შეღწევის სხვადასხვა უნარზე, რაც თვით მოლეკულის ზომებზეა დამოკიდებული.

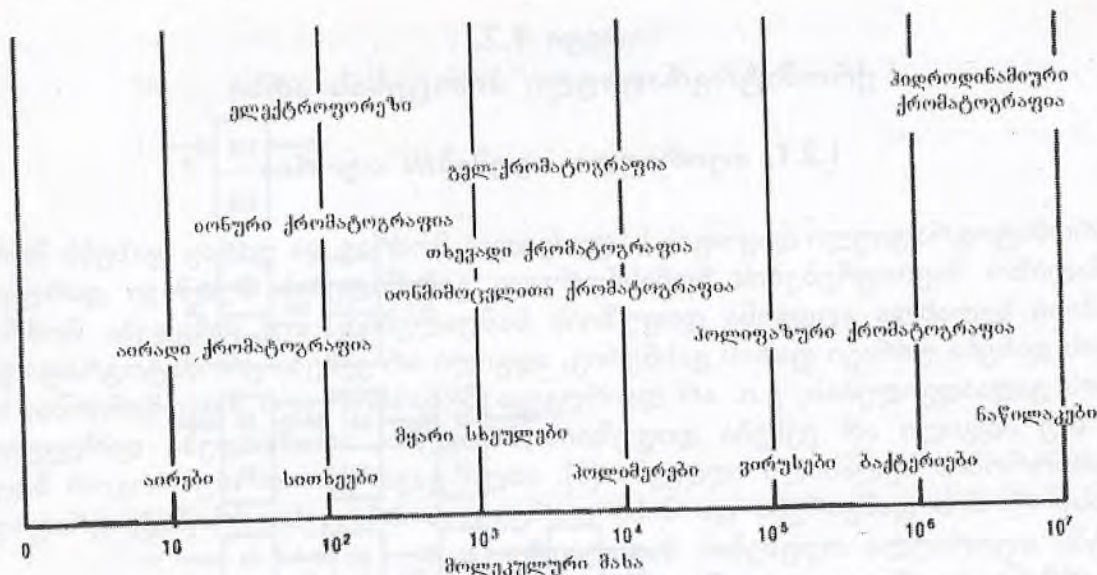
მოლეკულური ქრომატოგრაფიის შემთხვევაში საანალიზო ნარევების დაყოფა ხდება შემადგენელი კომპონენტების სხვადასხვაგვარი ადსორბციული უნარის შესაბამისად მოცემული სორბენტის მიმართ (ადსორბციული ქრომატოგრაფია). თუ უძრავი ფაზის სახით გამოყენებულია სითხე დაფენილი მყარ სარჩულზე, მაშინ ადგილი აქვს საანალიზო ნივთიერებების გახსნას (აბსორბციას) უძრავ ფაზაში და მათი განაწილება მოძრავ და უძრავ ფაზებს შორის ხორციელდება განაწილების კოეფიციენტის მიხედვით. ასეთ შემთხვევაში ვამბობთ რომ ადგილი აქვს **განაწილებით** ქრომატოგრაფიას.

იონმიმოცვლით ქრომატოგრაფიაში ურთიერთქმედ აგენტებს წარმოადგენენ საანალიზო ნივთიერების და უძრავი ფაზის (იონმიმომცვლელი ანუ იონიტი) იონები. დაყოფის პროცესი დაფუძნებულია სწორედ ამ იონების მსგავსების ხარისხზე.

ლექვითი ქრომატოგრაფიის დაყოფის პროცესი მიმდინარეობს წარმოქმნილი ნალექების მოძრავ ფაზაში სხვადასხვაგვარი ხსნადობის შესაბამისად [2].

დაყოფის მექანიზმის ასეთი მრავალფეროვნების გამო თითქმის არ არსებობს საკვლევი ნივთიერებების რომელიმე კლასი, რომელთა დაყოფაც ვერ მოხერხდეს შესაფერი სორბენტის და მოძრავი ფაზის შერჩევით.

ნახ.1.11 წარმოდგენილია ქრომატოგრაფიული პროცესის აღნიშნული ძირითადი ვარიანტების გამოყენების შესაძლებლობა საკვლევი ნივთიერების მოლეკულური მასის შესაბამისად [3,4].



ნახ. 1.11. ქრომატოგრაფიის ძირითადი მეთოდების გამოყენების სფერო საანალიზო ნივთიერებების მოლეკულური მასების შესაბამისად

1.1.2.5. ქრომატოგრაფიული პროცესის კლასიფიკაცია ჩატარების მიზნის მიხედვით

ქრომატოგრაფიული პროცესის დანიშნულების მიხედვით განასხვავებენ ანალიზურ, არაანალიზურ, პრეპარატიულ და სამრეწველო ქრომატოგრაფიას.

ანალიზური ქრომატოგრაფია ითვალისწინებს საანალიზო ნარევის თვისობრივ და რაოდენობრივ განსაზღვრას.

არაანალიზური ქრომატოგრაფია სწავლობს ნაერთთა ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებს ქრომატოგრაფიული აპარატურის გამოყენებით. ამ უკანასკნელი მიზნისთვის ფართოდ გამოიყენება აირქრომატოგრაფია.

საკვლევი სისტემის თვისებების შესასწავლად აუცილებელია რომ ქრომატოგრაფიული პროცესის მახასიათებელი პარამეტრები გარკვეულწილად დავშირებული იყოს შესასწავლი სისტემის ან ნივთიერების რაიმე თვისებებთან. ასეთი კავშირები ნამდვილად არსებობს და ამიტომ, აირქრომატოგრაფია წარმატებით გამოიყენება ზოგიერთი ქიმიური პროცესების კინეტიკის, კატალიზატორების და ადსორბენტების შესასწავლად.

პრეპარატიული ქრომატოგრაფიის მიზანს წარმოადგენს სუფთა, მინარევები-საგან თავისუფალი ნივთიერებების მიღება ლაბორატორიულ პირობებში.

განსაკუთრებით დიდი რაოდენობით სხვადასხვა ნივთიერებების სუფთა სახით მიღების მიზნით წარმატებით გამოიყენება **სამრეწველო** ქრომატოგრაფია, რომლის დროსაც ყურადღება ექცევა ქრომატოგრაფიული დანადგარის მწარმოებლურობას და გამოყოფილი ნივთიერების სისუფთავეს.

ამგვარად, ქრომატოგრაფია წარმოადგენს ნარევების ანალიზის, სუფთა ნივთიერებების მიღების და მთლიანად სისტემის (უძრავი ფაზა-საკვლევი ნივთიერება-მოძრავი ფაზა) თვისებების შესწავლის უნივერსალურ მეთოდს [5].

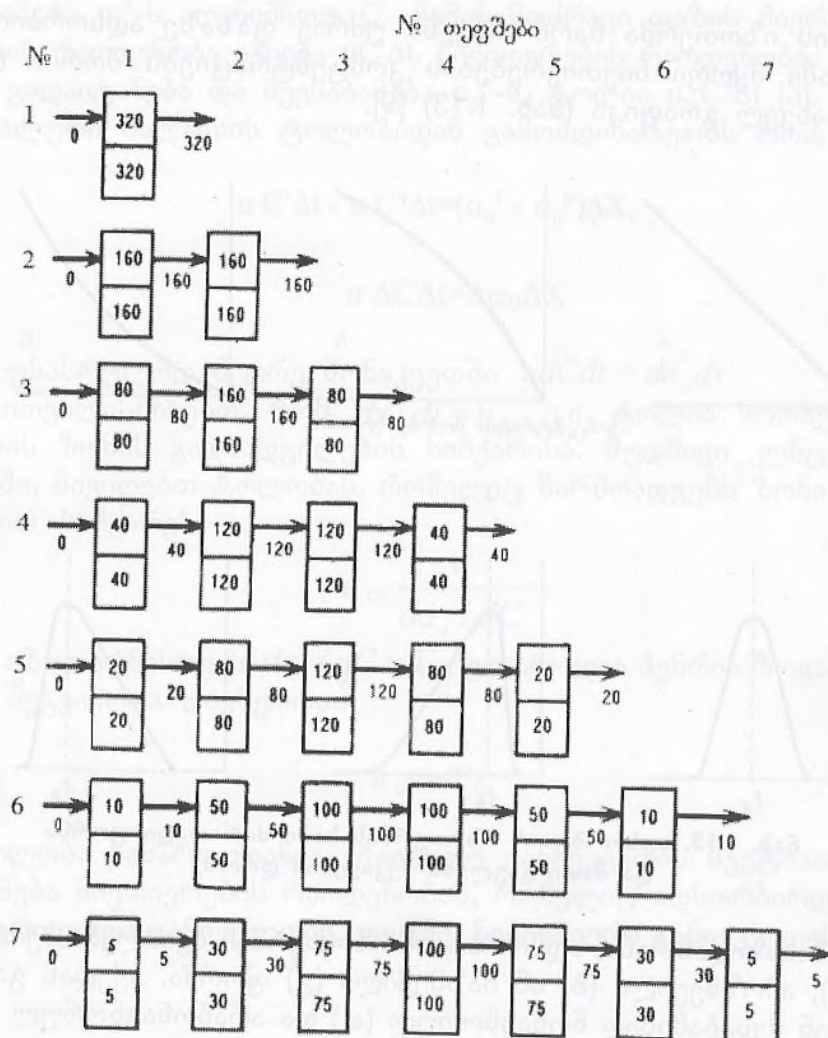
თავი 1.2. ქრომატოგრაფიული პროცესის არსი

1.2.1. თეორიული თეფშების თეორია

ქრომატოგრაფიული დაყოფის საფუძველია მოძრავ და უძრავ ფაზებს შორის საანალიზო ნივთიერებების წონასწორული განაწილების მუდმივი დარღვევა და მისი ხელახლა აღდგენა დიფუზიის საშუალებით. თუ შეწყდება მოძრავი ფაზის დინება უძრავი ფაზის გასწვრივ, ადგილი არ ექნება ქრომატოგრაფიული ზონის გადაადგილებას, ე.ი. არ დაირღვევა წონასწორული მდგომარეობა, ხოლო თუ ადგილი არ ექნება დიფუზიის პროცესს, არ მოხდება დარღვეული წონასწორობის ხელახალი აღდგენა [6]. ახლა გავარკვეოთ თუ როგორ ხდება წონასწორობის დამყარება და მისი დარღვევის პროცესი ქრომატოგრაფიულ სვეტში თეორიული თეფშების მაგალითზე.

ტერმინი **თეორიული თეფში** ქრომატოგრაფიაში ნასესხებია რექტიფიკაციის პროცესების თეორიიდან და იგი შეესაბამება სარექტიფიკაციო სვეტის იმ ნაწილს, სადაც ორთქლი და სითხე იმყოფებიან წონასწორულ მდგომარეობაში. ამ ზონის სიგრძე ან სიმაღლე კი წარმოადგენს **თეორიული თეფშების ექვივალენტურ სიმაღლეს (თთეს)**. მარტინმა და სინჯმა განავითარეს ეს თეორია და მიუსადაგეს იგი ქრომატოგრაფიულ სვეტში მიმდინარე პროცესებს [7]. წარმოვიდგინოთ აპარატი, რომელიც შედგება ცალკეული ჭურჭლების, თეფშების სერიებისაგან, რომლებიც შევსებულია სორბენტის ერთნაირი რაოდენობით და მოძრავი ფაზით. დავუშვათ, რომ სორბციული წონასწორობის დამყარებისას ნივთიერება თანაბრად ნაწილდება სორბენტსა და მოძრავ ფაზას შორის. ვთქვათ, პირველ თეფშზე მიეწოდება საანალიზო ნივთიერების 640 წილი და დავიცადეთ, სანამ მასზე დამყარდება სორბციული წონასწორობა, რომლის დროსაც მოძრავ ფაზაში და სორბენტზე აღმოჩნდება ნივთიერების 320-320 წილი (ნახ.1.12). როგორც უკვე აღვნიშნეთ, მოძრავი ფაზა განუწყვეტილად გაედინება უძრავი ფაზის ფენაში და პირველი თეფშის მოძრავ ფაზაში არსებულ ნივთიერებებს გადაიტანს მეორე თეფშზე, ხოლო მის ადგილს დაიკავებს სუფთა მოძრავი ფაზა, ე.ი. დაირღვევა წონასწორული მდგომარეობა. ამის შემდეგ პირველ თეფშზე მოხდება დარღვეული წონასწორობის აღდგენა სორბენტიდან დესორბციის გზით და მასში მყოფი ნივთიერებების 320 წილი კვლავ განაწილდება 160-160 მოძრავ და უძრავ ფაზებს შორის. მეორე თეფშზე კი, სადაც მოძრავი ფაზის მიერ გადატანილია ნივთიერების 320 წილი, სორბციის გზით კვლავ დამყარდება წონასწორობა და მიიღება ისეთი განაწილება როგორც პირველ თეფშზე, ე.ი. 160-160. მოძრავი ფაზის მთელი მოცულობა მეორე თეფშიდან კვლავ გადაიტანება მესამეზე, პირველიდან მეორეზე, ხოლო პირველზე მიეწოდება სუფთა მოძრავი ფაზა. კვლავ ექნება ადგილი სორბციისა და დესორბციის ელემენტარულ პროცესს და დამყარდება წონასწორობა და ა.შ. პროცესის მრავალჯერადად გამეორებით მივიღებთ ნივთიერებების განაწილებას თეფშებზე [4,8].

ყოველივე ზემოთ ნათქვამიდან გამომდინარე, თეორიული თეფშები შეიძლება განვსაზღვროთ როგორც ქრომატოგრაფიული სვეტის ის მცირე უბანი, რომელზედაც მიმდინარეობს ადსორბციის და დესორბციის ელემენტარული



ნახ.1.12. ნივთიერების განაწილება თეფშებზე

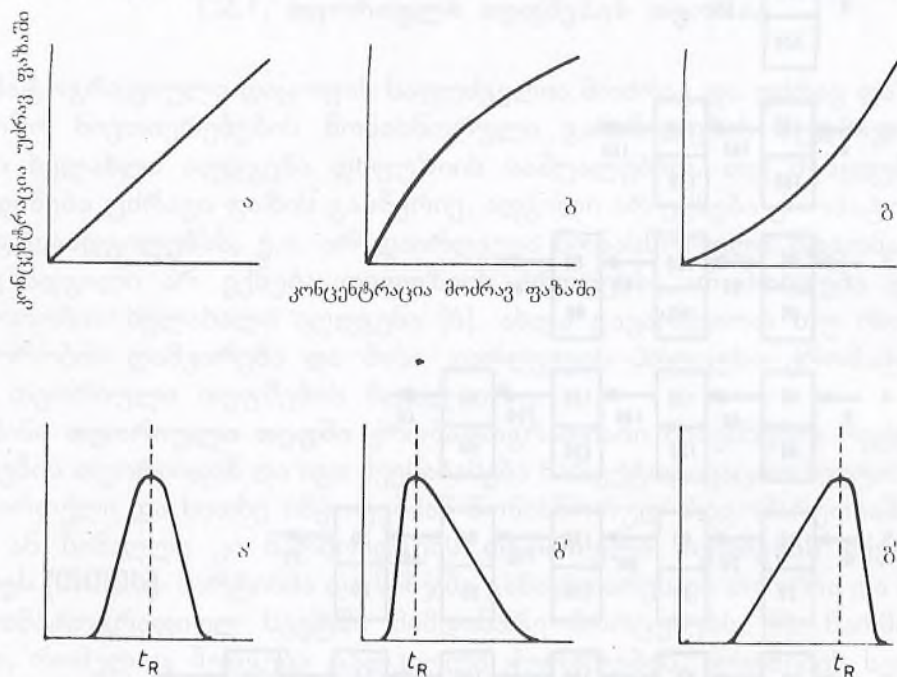
აქტი. მაგრამ, რადგან რეალური თეფშები ქრომატოგრაფიულ სვეტში არ არსებობს, გამოიყენება ტერმინი „თეორიული თეფშები“, რომელთა რაოდენობაც ქრომატოგრაფიული სვეტის ეფექტურობის მაჩვენებელია. თეორიული თეფშების რიცხვის და მისი ეკვივალენტური სიმაღლის გაანგარიშება ხდება უშუალოდ ქრომატოგრამიდან და განხილულია შემდგომში.

1.2.2. ადსორბციის იზოთერმა. წონასწორული და არაწონასწორული ქრომატოგრაფია

1.2.2.1. ადსორბციის იზოთერმა

ქრომატოგრაფიულ სვეტში მიმდინარე პროცესებს სხვადასხვა თვალსაზრისით განიხილავენ, მაგრამ ყველა მათგანი ეფუძნება ადსორბციის იზოთერმის თავისებურებებს, ფაზათა შორის წონასწორობის დამყარების სიჩქარეს და ნივთიერებათა ქრომატოგრაფიული ზონების მოძრაობას [3].

ადსორბციის იზოთერმა წარმოადგენს უძრავ ფაზაზე ადსორბირებულ და მოძრავ ფაზაში მყოფი ნივთიერებების კონცენტრაციებს შორის დამოკიდებულების ამსახველ გრაფიკს (ნახ. 1.13) [9].



ნახ. 1.13. ადსორბციის იზოთერმის სამი ძირითადი ფორმა და მათი გავლენა შეკავების დროზე

როგორც ნახაზიდან ჩანს, ადსორბციის იზოთერმას შეიძლება ჰქონდეს სწორხაზოვანი (ა), ამოზნექილი (ბ) ან ჩაზნექილი (გ) ფორმა. აქედან გამომდინარე განასხვავებენ შესაბამისად წონასწორულ (ა') და არაწონასწორულ ქრომატოგრაფიას (ბ', გ').

1.2.2.2. წონასწორული ქრომატოგრაფია

წონასწორული (იდეალური) ქრომატოგრაფიის თეორია განიხილავს ისეთ შემთხვევას, როდესაც ადსორბციის იზოთერმა სწორხაზოვანია, ე.ი პროცესებს, როდესაც საანალიზო ნივთიერების განაწილება ფაზებს შორის აღინერება სწორხაზოვანი იზოთერმით და ექვემდებარება ჰენრის კანონს. მიჩნეულია, რომ ნივთიერების გადასვლა მოძრავი ფაზიდან სორბენტის ზედაპირზე, მათი შეღწევა სორბენტის ფორებში და ურთიერთქმედება მასთან, ხდება მყისიერად.

დავუშვათ, რომ საანალიზო ნივთიერება გადაადგილდება ერთეული განიკვეთის მქონე სვეტში მოთავსებული სორბენტის გასწვრივ Δt დროში ΔX მანძილზე. ამასთანავე, სვეტის ერთეულ მოცულობაში ნივთიერების რაოდენობა იცვლება α_0' -დან α_0'' -მდე. თუ მოძრავი ფაზის მოცულობითი სიჩქარეა u , მაშინ Δt დროში სვეტის ერთეულ განიკვეთში გასული მოძრავი ფაზის რაოდენობა იქნება $u\Delta t$. ნივთიერების კონცენტრაცია მოძრავი ფაზის იმ წერტილში, რომელ-

იც შეესაბამება α_0' -ს აღვნიშნოთ C' . მაშინ მოძრავი ფაზის მიერ გადატანილი ნივთიერების რაოდენობა იქნება $uC'\Delta t$. ნივთიერების რაოდენობა, რომელიც ΔX მანძილზე გადაიტანება და შეესაბამება α_0'' -ს, ტოლია $u C''\Delta t$ [3].

მატერიალური ბალანსის ტოლობიდან გამომდინარეობს რომ:

$$u C' \Delta t - u C'' \Delta t = (\alpha_0' - \alpha_0'') \Delta X,$$

ან

$$u \Delta C \Delta t = \Delta \alpha_0 \Delta X$$

დროის უსასრულოდ მცირე მონაკვეთში $u dC dt = d\alpha_0 dx$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $dx/dt = u_c$, ე.ი. ტოლია სორბენტის ფენაში ნივთიერების ზონის გადაადგილების სიჩქარისა. მუდმივი კონცენტრაციების შემთხვევაში, მივიღებთ ტოლობას, რომელიც წარმოადგენს ზონის მოძრაობის მოცულობით სიჩქარეს:

$$u_c = \frac{u}{d\alpha_0 / dC} \quad (1.1)$$

წრფივი იზოთერმისთვის $d\alpha_0 / dC = \Gamma_0$ ე.ი. ტოლია ჰენრის ზოგადი კოეფიციენტის და შეგვიძლია დავწეროთ:

$$u_c = u / \Gamma_0 \quad (1.2)$$

(1.2) ტოლობა სამართლიანია ერთეული განივკვეთის სვეტისთვის, რადგან α_0 შეესაბამება ნივთიერების რაოდენობას, რომელიც ადსორბირდება სორბენტის მიერ ერთეული განივკვეთის სვეტში. ნებისმიერი განივკვეთის (S) სვეტისთვის:

$$u_c = u / (\Gamma_0 S) = \bar{u} / \Gamma_0 \quad (1.3)$$

სადაც $\bar{u}$ - მოძრავი ფაზის ხაზოვანი სიჩქარეა რომელიც ტოლია u/S . ტოლობიდან (1.1) გამომდინარეობს რომ:

$$\Gamma_0 = \alpha_0 / C \quad (1.4)$$

სადაც, α_0 - საანალიზო ნივთიერების რაოდენობაა სვეტის 1 სმ³-ში, (გ/სმ³), ხოლო C - საანალიზო ნივთიერების კონცენტრაცია მოძრავ ფაზაში, (გ/სმ³) [3].

თუ დასაყოფი ნივთიერებებისთვის ჰენრის კოეფიციენტის მნიშვნელობები განსხვავებულია, თითოეული კომპონენტის ზონა მოძრაობს მისთვის დამახასიათებელი სიჩქარით და სორბენტის ფენის საკმარისი სიგრძის შემთხვევაში მოხდება ნარევის დაყოფა. თუმცა უნდა აღვნიშნოთ, რომ იდეალური ქრომატოგრაფია (ნახ.1.13, ა) თითქმის არასოდეს არ ხორციელდება. იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც წონასწორობა მყისიერად მყარდება და ადსორბირების იზოთერმა წრფივია. ნივთიერებათა კონცენტრაციების განაწილება ქრომატოგ-

რაფიულ ზონაში არ არის ერთნაირი, სვეტში მყოფი სორბენტის მთელ სიგრძეზე და განივკვეთში. ეს განპირობებულია მოლეკულური დიფუზიის პროცესით, რომლის მოქმედების შედეგადაც საკვლევი ნივთიერებების კონცენტრაციები ნაწილდება არათანაბრად.

ნონასწორული, იდეალური ქრომატოგრაფიის თეორია არ განიხილავს მოლეკულური დიფუზიის გავლენით ნივთიერებათა ზონების წარეცხვის ფაქტს. თუმცა განხილული თეორია სცილდება სვეტში რეალურად მიმდინარე პროცესებს, იგი საშუალებას გვაძლევს გავარკვიოთ ქრომატოგრაფიული ზონების ცენტრების (ზონები ნივთიერების მაქსიმალური კონცენტრაციით) გადაადგილების კანონზომიერება.

1.2.2.3. არანონასწორული ქრომატოგრაფია

არანონასწორული (არაიდეალური) ქრომატოგრაფიის თეორია განიხილავს რეალურ პროცესებს, როდესაც მაგალითად, აირად მდგომარეობაში მყოფი ნივთიერების ადსორბცია მყარი ადსორბენტის ზედაპირზე შედგება ორი სტადიისგან: ნივთიერების მისვლა მოძრავი ფაზიდან სორბენტის ზედაპირთან და მათი შეღწევა ადსორბენტის ზედაპირიდან მის შიგა ფორებში. პირველი სტადია დამოკიდებულია ნივთიერების დიფუზიის სიჩქარეზე მოძრავ ფაზაში და მას გარედო-ფუზიურ მასაგადაცემას უწოდებენ. მეორე სტადია დაკავშირებულია ნივთიერების დიფუზიასთან მყარ ფაზაში და მას შიგადიფუზიურ მასაგადაცემას უწოდებენ. შესაბამისი პირობების მიხედვით, ქრომატოგრაფიული პროცესის განმსაზღვრელი შეიძლება გახდეს ნებისმიერი სტადია, რომელიც ნელა მიმდინარეობს. მათი მოქმედება ერთნაირი შეიძლება იყოს. მასაგადაცემის პროცესის დასრულებას სჭირდება გარკვეული დრო და განისაზღვრება კინეტიკური კოეფიციენტით β ან მისი შებრუნებული სიდიდით $1/\beta$, რომელსაც **რელაქსაციის დროს** უწოდებენ. ნონასწორული ქრომატოგრაფიის პროცესის თანახმად β სიდიდე უსასრულოდ დიდია. უსასრულოდ დიდია აგრეთვე სორბციის პროცესის სიჩქარე, ხოლო რელაქსაციის დრო 0-ის ტოლია.

რეალურ პროცესებში საანალიზო ნივთიერების მოლეკულების ნაწილი დიფუნდირდებიან მოძრავი ფაზის მოცულობიდან სორბენტის ზედაპირზე და მის შიგნით, მათი დანარჩენი ნაწილი კი მოძრავი ფაზის საშუალებით გადაიტანება სორბენტის ახალი უბნებისკენ. ამ გარემოებას მივყავართ ნივთიერებათა ზონების დამატებით წარეცხვასთან სორბენტის გასწვრივ, ე.ი. ქრომატოგრაფიული ზონების გაფართოებასთან და მისი მაქსიმუმის ადგილას კონცენტრაციის შემცირებასთან.

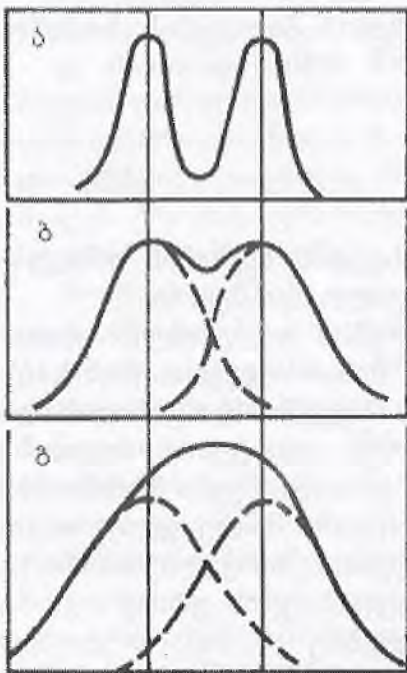
ყოველივე ზემოთქმული სამართლიანია შებრუნებული პროცესებისთვისაც, ანუ როდესაც ხდება ადსორბირებული ნივთიერებების დესორბცია და მათი გადატანა ადსორბენტის შიგა ფორებიდან ზედაპირზე და ზედაპირიდან მოძრავ ფაზაში. ამიტომ, კონცენტრაციის განაწილება ქრომატოგრაფიულ ზონაში მისი ცენტრის მიმართ სიმეტრიულია.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, არანორფივი ქრომატოგრაფიის დროს ადგილი აქვს დამატებით განრთხმას, რაც (1.1) ტოლობაში da_0/dC სიდიდის ცვალებადობით არის გამოწვეული, ეს კი თავის მხრივ კონცენტრაციის ცვლილების შესაბამისად

იცვლება. შესაბამისად იცვლება ნივთიერებათა ცალკეული ზონების გადაადგილების სიჩქარეები. ამ გარემოებას მივყავართ იმ ფაქტთან, რომ ადსორბციის ამოზნექილი იზოთერმის დროს ჰენრის კოეფიციენტის მნიშვნელობა დაბალი კონცენტრაციებისას უფრო დიდია, ვიდრე დიდი კონცენტრაციებისას. ამიტომ, მოძრავი ფაზის გადაადგილების სიჩქარე მცირე კონცენტრაციების შემთხვევაში მცირეა, ვიდრე სიჩქარე დიდი კონცენტრაციების დროს. ამას თან სდევს ქრომატოგრაფიულ ზოლში კონცენტრაციის სიმეტრიული განაწილების დარღვევა. ასეთ დროს პიკის ზურგის ნაწილი ძლიერ გაიჭიმება და წარმოქმნის ე.წ. „კუდს“ (ნახ. 1.10, ბ'). ქრომატოგრაფიული ზონა ფართოვდება და აუარესებს ნარევის დაყოფას. ჩაზნექილი ადსორბციის იზოთერმის შემთხვევაში ადგილი აქვს შეზღუდულ სურათს-ზონის გაფართოება ხდება მისი „ფრონტის“ მხარეს (ნახ. 1.13 გ') და წარმოიქმნება ე.წ. „ენა“ [3].

1.2.3. ქრომატოგრაფიული ზონების გაფართოება (წარეცხვა), ვან-დეემტერის განტოლება

ყოველი ნივთიერება მისთვის დამახასიათებელი სორბციული უნარით ხასიათდება, რაც განაპირობებს მოცემულ სორბენტზე



ნახ. 1.14. ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვის გავლენა დაყოფის ხარისხზე

- ა) წარეცხვა სუსტია და ადგილი აქვს ნარევის სრულ დაყოფას
- ბ) წარეცხვა შედარებით ძლიერია და მიიღება ცუდი დაყოფა
- გ) წარეცხვა მეტად ძლიერია და დაყოფა არ ხდება

მათი გადაადგილების სიჩქარეებს შორის განსხვავებას. თუ ქრომატოგრაფიულ სვეტში შევიყვანთ საანალიზო ნივთიერების ნარევის, თითოეული კომპონენტი გამოვა სვეტიდან სხვადასხვა დროს და მოხდება მათი დაყოფა შემადგენელ კომპონენტებად. ხშირად ქრომატოგრაფიულ სვეტში მოქმედებს უარყოფითი ფაქტორები, ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვა ანუ გაფართოება, რის გამოც ისინი ერთმანეთს მთლიანად ან ნაწილობრივ გადაფარავენ, რასაც მოსდევს დაყოფის გაუარესება. როდესაც ნივთიერებების სორბციულ უნარიანობებს შორის განსხვავება დიდი არ არის, ნივთიერების ზონები ერთმანეთთან ახლოა. მათმა განრთხმევამ შეიძლება გამოიწვიოს ერთმანეთის სრული გადაფარვა და დაყოფას საერთოდ არ ექნება ადგილი.

ნახ. 1.14. წარმოგვიდგენს ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვის სურათს. უწყვეტი კონტური გვიჩვენებს ნივთიერების მთლიან კონცენტრაციას, ხოლო წყვეტილი — ცალკეული კომპონენტების კონცენტრაციებს [4].

როდესაც მოძრავი ფაზის მიერ საანალიზო ნივთიერების მოლეკულები გადაიტანება სვეტის გასწვრივ, მათ თავისუფლად შეუძლიათ დიფუზია ნებისმიერი მიმართულებით. დიფუზიის სიჩქარე დამოკიდებულია ნივთიერების ქიმიურ თვისებებ-

ზე. აირად ქრომატოგრაფიაში იგი დამოკიდებულია თვით აირად ფაზაზე და ტემპერატურაზე. განასხვავებენ დიფუზიურ პროცესებს, რომლებიც გავლენას ახდენენ პიკის წარეცხვაზე ქრომატოგრაფიულ სვეტში. ესენია: ტურბულენტური დიფუზია, მოლეკულური დიფუზია და მასაგადაცემის წინააღმდეგობა.

ტურბულენტური დიფუზია. საანალიზო ნივთიერების მოლეკულები სორბენტის გასწვრივ გადაადგილდებიან უძრავი ფაზის ნაწილაკების მიერ წარმოქმნილ არხებში, რომლებიც ერთმანეთისგან განსხვავდებიან ზომებით: სიგრძით, კლაკნილობითა და სივინროვით (ნახ.1.15). ამიტომ გზა, რომელშიც გაედინება მოძრავი ფაზა საანალიზო ნივთიერებებთან ერთად, სხვადასხვაა. სხვა-



ნახ.1.15 ტურბულენტური დიფუზიის სურათი

დასხვაა აგრეთვე მათი მოძრაობის სიჩქარეც, რის გამოც მოლეკულები ხან გაასწრებენ საშუალო სიჩქარით მოძრავ ნაკადს და ხან ჩამორჩებიან მას.

განხილული მოვლენა დაკავშირებულია სორბენტის ნაწილაკების ზომაზე, მის ფორმაზე და სვეტის შევსების წესზე [9,10].

ტურბულენტური დიფუზია A ტოლია:

$$A=2\lambda d_p \quad (1.5)$$

სადაც λ - მუდმივაა, რომელიც ითვალისწინებს სვეტის შევსების ერთგვაროვნებას, ხოლო d_p - სორბენტის ნაწილაკების საშუალო დიამეტრი.

ბ. მოლეკულური დიფუზია. საანალიზო ნივთიერების მოლეკულები გადაადგილდება მოძრავ ფაზაში ძირითადად ორი B და C მიმართულებით (ნახ.1.16). საანალიზო ნივთიერება და მოძრავი ფაზა შედის სვეტში მარცხნიდან და მოძრაობს მარჯვნივ. ნახაზზე მოლეკულა ორი ისრის გადაკვეთის ადგილზე წერტილით არის აღნიშნული. იგი მოძრავ ფაზასთან ერთად იწყებს მოძრაობას მისი დინების მიმართულებით. გადაადგილების პროცესში მოლეკულას თავისუფლად შეუძლია დიფუზია ნებისმიერი მიმართულებით. პირველი მიმართულება, რომელიც B ასოთი არის აღნიშნული, ემთხვევა სვეტის გრძივ ღერძს, ანუ მოძრავი ფაზის დინებას. მოლეკულები, რომლებიც ამ მიმართულებით გადაადგილდებიან, სცილდებიან ქრომატოგრაფიული ზონის მასის ძირითად



ნახ.1.16. ქრომატოგრაფიული ზოლის დიფუზიური გაფართოება
 B -გრძივი დიფუზია, C -რადიალური დიფუზია

ცენტრს და დიფუნდირდებიან ღერძის გასწვრივ, სანამ გამოირეცხებიან ქრომატოგრაფიული სვეტიდან. რაც უფრო სწრაფ დიფუზიას განიცდის მოლეკულები ამ მიმართულებით, მით უფრო წარეცხილია ქრომატოგრაფიული ზონა.

ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით დიფუზიას ადგილი აქვს როგორც მოძრავ, ასევე უძრავ ფაზაში. ეს უკანასკნელი კი სიმცირის გამო შეგვიძლია უგულებელვყოთ. ქრომატოგრაფიული ზოლის განრთხმა, მოძრავ ფაზაში ნაკადის მიმართულებით დიფუზიის გამო, აღინერება ტოლობით:

$$B = 2\gamma D \quad (1.6)$$

სადაც, B - მოლეკულური დიფუზიის წვლილია, თეორიული თეფშის ექვივალენტურ სიმაღლეში; γ - კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს არხების კლაკნილობას; D_m - მოძრავ ფაზაში საანალიზო ნივთიერების დიფუზიის კოეფიციენტი [10].

B წევრის წილი $MIMC$ -ის სიდიდეში მოძრავი ფაზის გადაადგილების ხაზოვანი სიჩქარის (u) უკუპროპორციულია. რაც უფრო დიდხანს დარჩება ნივთიერება სვეტში, მით მეტია წარეცხვის ხარისხი.

მოლეკულური დიფუზიის პროცესს ადგილი აქვს როგორც შემავსებლიან, ასევე კაპილარულ სვეტებში.

გ. მასაგადაცემის წინააღმდეგობა. მასაგადაცემის სიჩქარე დამოკიდებულია უძრავ და მოძრავ ფაზებში მიმდინარე პროცესებზე. საანალიზო ნივთიერების თითოეული მოლეკულა მოძრავი ფაზიდან გადადის უძრავ ფაზაში და პირიქით. სიჩქარეს, რომლითაც ეს პროცესი მიმდინარეობს, დიდი წვლილი შეაქვს ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვაში და შესაბამისად მოქმედებს სვეტის ეფექტურობაზე.

მოძრავი ფაზის გადაადგილებისას ქრომატოგრაფიულ სვეტში, მოლეკულები, რომლებიც სვეტის კედლებთან ახლოს იმყოფებიან, განიცდიან შემაკავებელ გავლენას. მოძრავი ფაზის სიჩქარე შედარებით მცირეა კედლებთან ახლოს და მეტია სვეტის ცენტრში. ასევეა მისი საშუალო სიჩქარე. ცენტრალურ ნაწილში იგი უფრო სწრაფია და კედლებთან შედარებით ნელია რაც სვეტის დიამეტრის გასწვრივ წარმოქმნის სიჩქარის პროფილს (ნახ.1.16).

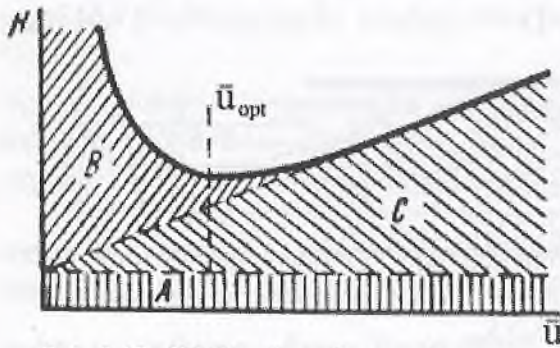
ახლა გავარკვიოთ რა ემართება სინჯის მოლეკულებს, როდესაც ისინი C რადიალური მიმართულებით განიცდიან დიფუზიას. ის მოლეკულები, რომლებიც ახლოს არიან კედლებთან, უფრო მცირე სიჩქარით გადაადგილდებიან ცენტრში მყოფ მოლეკულებთან შედარებით და სხვაობა სიჩქარეებს შორის იწვევს ქრომატოგრაფიული ზონის პროფილის გაფართოებას. დიფუზიის სიჩქარის გაზრდით ზონის გაფართოების ხარისხი მცირდება, რადგან მოლეკულები კედლის მიმართულებით და უკან ცენტრისკენ მოძრაობენ უფრო სწრაფად, რაც ერთმანეთში ურევს ამ სხვადასხვა სიჩქარეებს და ათანაბრებს მათ.

სვეტის კედლებთან უშუალოდ შეხებაში მყოფი საანალიზო ნივთიერებების მოლეკულები, როდესაც შედიან უძრავ ფაზაში, თითქმის მთლიანად ჩერდებიან, ხოლო როდესაც ტოვებენ მას, ერევიან სხვა მოლეკულებს და განაგრძობენ მოძრაობას სვეტის გასწვრივ. რაც მეტ ხანს ჩერდება ნივთიერების მოლე-

კულა უძრავ ფაზაში, მით უფრო განრთხმულია პიკი. ქრომატოგრაფიული ზონის წარეცხვაში მონაწილე ეს წვერი აღინიშნება C ასოთი და ასახავს მყარ სარჩულზე დაფენილი თხევადი ფაზის ფენის სისქის გავლენას სვეტის ეფექტურობაზე.

$$C = \frac{8}{\pi^2} \frac{k'}{(1+k')^2} \frac{d_f^2}{D_L} \quad (1.7)$$

სადაც, d_f - მყარ სარჩულზე დაფენილი თხევადი ფაზის ფენის სისქეა, იგი



ნახ. 1.17. MTCX -ის დამოკიდებულება აირმატარებლის სიჩქარეზე

- A - ტურბულენტური დიფუზიის უბანი
- B - მოლეკულური დიფუზიის უბანი
- C - მასაგადაცემის წინააღმდეგობა

ფორმულაში მეორე ხარისხით არის მოყვანილი და ცხადია მისი დაბალი მნიშვნელობა განაპირობებს C წვერის მნიშვნელობის შემცირებას. D - საანალიზო ნივთიერების დიფუზიის კოეფიციენტი თხევად ფაზაში, ხოლო - ტევადობის კოეფიციენტი.

C წვერის წილი MTCX -ის გამოსათვლელ ფორმულაში (1.8) პირდაპირპროპორციულია მოძრავი ფაზის ხაზოვანი სიჩქარის.

თუ ავაგებთ H და $\bar{u}$ შორის დამოკიდებულების გრაფიკს (ნახ.1.17) დავინახავთ, რომ მას გააჩნია მინიმუმი, რომელიც შეესაბამება აირმატარებ-

ლის ოპტიმალურ სიჩქარეს, რომელზეც ქრომატოგრაფიული სვეტი მუშაობს ყველაზე ეფექტურად. მაგრამ აირმატარებლის კუმშვადობის გამო $\bar{u}$ არ არის მუდმივი სიდიდე მთელი სვეტის გასწვრივ და ამიტომ ეფექტურად მუშაობს სვეტის მხოლოდ მცირე ნაწილი [10].

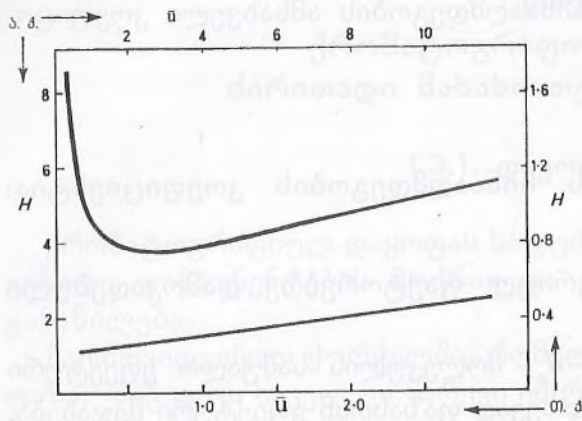
ზემოთ განხილული სამივე ფაქტორი ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვაზე მოქმედებს ერთდროულად და ჯამური ეფექტი განისაზღვრება მათი შეკრებით. მიღებული სიდიდე ახასიათებს ქრომატოგრაფიული სვეტის მუშაობის ეფექტურობას:

$$H = A + B/\bar{u} + C\bar{u} \quad (1.8)$$

სადაც A , B , C ზემოთ განხილული სიდიდეებია; H -თეორიული თეფშების ეკვივალენტური სიმაღლე; $\bar{u}$ -მოძრავი ფაზის ხაზოვანი სიჩქარე. თუ შევიტანთ მასში შესაბამის მნიშვნელობებს, მივიღებთ [10]:

$$H = 2\lambda d_p + \frac{2\gamma D_m}{\bar{u}} + \frac{8}{\pi^2} \frac{k'}{(1+k')^2} \frac{d_f^2}{D_L} \bar{u} \quad (1.9)$$

აირადი ქრომატოგრაფიის მსგავსად, თხევად ქრომატოგრაფიაში ნივთიერების ზონების წარეცხვა იგივე ფაქტორებს ემყარება. მაგრამ იმის გამო რომ დიფუზიის პროცესი სითხეში გაცილებით ნელა მიმდინარეობს (D_m მცირეა) აირებთან შედარებით, B წვერის მნიშვნელობა მეტად მცირეა და ზოგ შემთხვევაში იგი 0-ის ტოლია, ე.ი. თხევად ქრომატოგრაფიაში ეს წვერი პრაქტიკულად არ მონაწილეობს, რის გამოც მინიმუმის მდებარეობა სიჩქარის მეტად დაბალი



ნახ. 1.18. H და u დამოკიდებულების გრაფიკები აირ და თხევადი ქრომატოგრაფიისთვის

მნიშვნელობებისაკენ გადაინაცვლებს, რომლებიც პრაქტიკაში არ გამოიყენება. ნახ. 1.18. ნაჩვენებია H და $\bar{u}$ - დამოკიდებულების გრაფიკების შედარება თხევადი და აირქრომატოგრაფიისთვის.

მოყვანილი გრაფიკი გვიჩვენებს, რომ აირქრომატოგრაფიისგან განსხვავებით თხევად ქრომატოგრაფიაში სიჩქარის ცვლილებით სვეტის ეფექტურობა გაცილებით ნაკლებ იცვლება, ე.ი. მოძრავი ფაზის მაღალი სიჩქარეები შეიძლება გამოვიყენოთ სვეტის ეფექტურობის შემცირების გარეშე.

1.2.3.1. ჟუხოვიცკის განტოლება

ქრომატოგრაფიულ პროცესზე შიგა დიფუზიის გავლენას ითვალისწინებს ჟუხოვიცკის განტოლება:

$$H = A + B/\bar{u} + C_1 \bar{u}^{1/2} + C_L \bar{u} \quad (1.10)$$

სადაც, C_1 - შიგა დიფუზიის ამსახველი კოეფიციენტი, და გამოითვლება ფორმულით:

$$C_1 = k'^2 d_p^{3/2} / (1 + k')^2 D_g^{1/2}$$

სადაც, k' - ტევადობის კოეფიციენტი, D_g - დიფუზიის კოეფიციენტი აირად ფაზაში; d_p - შემავსებლის ნაწილაკების დიამეტრი; დანარჩენი სიდიდეები იგივეა, რაც 1.8. განტოლებაში [11,12,13].

1.2.3.2. ჯონსის განტოლება

$$H = A + B/\bar{u} + C_L \bar{u} + C_1 \bar{u} + C_2 \bar{u} + C_3 \bar{u} \quad (1.11)$$

სადაც, A და B ვან-დეემტერის განტოლებაში შემავალი კოეფიციენტებია;

თავი 1.3. ქრომატოგრაფიული პროცესების ძირითადი მახასიათებლების გაანგარიშება

1.3.1. დაყოფის პროცესი

ქრომატოგრაფიულ დაყოფას საფუძვლად უდევს საანალიზო ნარევის შემადგენელი კომპონენტების მოძრაობა და უძრავ ფაზებს შორის სხვადასხვაგვარი განაწილება.

წარმოვიდგინოთ ჭურჭელში, რომელშიც მოთავსებულია უძრავი და მოძრავი ფაზა, შეგვყავს საკვლევი ნარევი იმ რაოდენობით, რომ მისი საწყისი კონცენტრაცია მოძრავ ფაზაში იყოს C_0 თანდათანობით შეიმჩნევა კონცენტრაციის შემცირება უძრავი ფაზის მიერ შთანთქმის გამო და გარკვეული დროის შემდეგ დამყარდება სორბციული წონასწორობა — თანაფარდობა ნივთიერების კონცენტრაციისა მოძრავ (C_m) და უძრავ (C_s) ფაზებს შორის. საანალიზო ნარევის დაბალი კონცენტრაციის შემთხვევაში (ანალიზური ქრომატოგრაფია) მათ შორის არსებობს წრფივი დამოკიდებულება (ჰენრის კანონი).

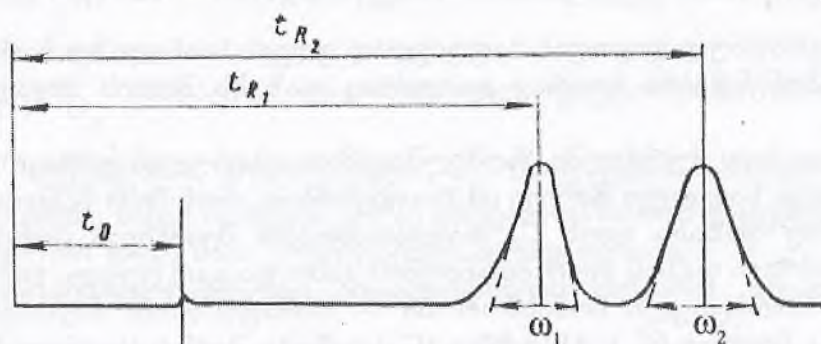
$$C_s = K C_m \quad (1.12)$$

საიდანაც $K = C_s/C_m$
ქრომატოგრაფიული მეთოდების მიხედვით მას უწოდებენ განაწილების კოეფიციენტს (განაწილებითი, იონ-მიმოცვლითი ქრომატოგრაფია); შეღწევა-დობის კოეფიციენტს (გელ ქრომატოგრაფია); ადსორბციის კოეფიციენტს (ადსორბციული ქრომატოგრაფია) [9]. საანალიზო ნივთიერების მოლეკულები მხოლოდ მოძრავ ფაზაში ყოფნისას გადაადგილდებიან და მათი გადაადგილების სიჩქარე განაწილების კოეფიციენტის უკუპროპორციულია. ამ კოეფიციენტის მაღალი მნიშვნელობის მქონე მოლეკულები სვეტში გაცილებით ნელა მოძრაობენ და გამოიყოფიან სხვა მოლეკულებისგან, რომელთა განაწილების კოეფიციენტის სიდიდე დაბალია. განაწილების კოეფიციენტებს შორის სხვაობის გარეშე, მოლეკულები სვეტში ერთნაირი სიჩქარით იმოძრავენ და არ მოხდება ქრომატოგრაფიული დაყოფა. პრაქტიკულად სვეტში მოლეკულების გადაადგილების სიჩქარეების სხვაობა ექსპერიმენტის პირობებზეა დამოკიდებული (მოძრავი და უძრავი ფაზების შედგენილობა და ბუნება, ტემპერატურა).

1.3.2. შეკავების მახასიათებლები

მოცემულ ქრომატოგრაფიულ სისტემაში, თითოეული საკვლევი ნივთიერების ელუირებისთვის საჭირო დრო მუდმივი სიდიდეა. ეს იმას ნიშნავს, რომ ყოველ ნივთიერებას მოცემული უძრავი და მოძრავი ფაზის გამოყენებისას გააჩნია მხოლოდ მისთვის დამახასიათებელი შეკავების მახასიათებლები, რაც მათი იდენტიფიკაციის საშუალებას წარმოადგენს.
ერთ-ერთი ასეთი მახასიათებელია **შეკავების დრო**. ეს არის დრო, სინჯის

შეყვანიდან ქრომატოგრამაზე პიკის მაქსიმუმის მიღებამდე, ე.ი. მაქსიმალური კონცენტრაციის გამოსვლამდე. მისი გაზომვა შეიძლება უშუალოდ წამზომით ან განისაზღვრება ქრომატოგრამიდან, რისთვისაც საჭიროა გაიზომოს მანძილი, სინჯის შეყვანიდან ქრომატოგრამაზე პიკის მაქსიმუმამდე (L , მმ) და გაიყოს იგი თვითჩამწერის ლენტის მოძრაობის სიჩქარეზე (U), $t_R = L / U$.



ნახ.1.19. ბინალური ნარევის დაყოფის ქრომატოგრამა
 t_{R1} და t_{R2} - საანალიზო ნივთიერებების შეკავების დროები;
 t_0 - არასორბირებადი კომპონენტის შეკავების დრო;
 ω_1 და ω_2 - პიკის სიგანე გაზომილი მათ ფუძეებთან

პრაქტიკაში ხშირად მიმართავენ აგრეთვე შეკავებითი მოცულობის გაანგარიშებას. შეკავებითი მოცულობა არის მოძრავი ფაზის ის მოცულობა, რომელიც საჭიროა საკვლევი ნივთიერების ელუირებისთვის ქრომატოგრაფიული სვეტიდან, ე.ი. მოძრავი ფაზისა და საანალიზო ნივთიერების ის რაოდენობა, რომელიც გადის ქრომატოგრაფიულ სვეტში სინჯის შეყვანიდან ქრომატოგრამაზე პიკის მაქსიმუმის მიღებამდე. შეკავებითი მოცულობა დამოკიდებულია საანალიზო ნივთიერებების სორბციულ თვისებებზე და მის მახასიათებელს წარმოადგენს.

$$V_R = ut_R \quad (1.13)$$

სადაც u — მოძრავი ფაზის მოცულობითი სიჩქარეა.

ნახ.1.19 ნაჩვენებია აგრეთვე „არასორბირებადი ნივთიერების“ შეკავების დრო t_0 . არასორბირებადი კომპონენტი ეს ის ნივთიერებაა, რომლის განაწილების კოეფიციენტი კონკრეტული პირობებისთვის არის 0-ის ტოლი, ე.ი. არ სორბირდება მოცემულ სორბენტზე და ქრომატოგრაფიულ სვეტში გადის მოძრავი ფაზის სიჩქარით. t_0 -პარამეტრი გამოითვლება სხვადასხვა გზით: თუ სინჯის სახით ქრომატოგრაფში შევიყვანთ ისეთ ნივთიერებას, რომელსაც გამოყენებულ მოძრავ ფაზასთან შედარებით აქვს უფრო „სუსტი“ სორბციული თვისებები, მისი t_R სიდიდე ტოლი იქნება t_0 . მაგალითად, თხევად ქრომატოგრაფიაში თუ მოძრავ ფაზად გამოვიყენებთ ჰექსანს, პენტანი შეგვიძლია გამოვიყენოთ t_0 -ის განსაზღვრისთვის. მეორე მეთოდი დაფუძნებულია იმ ფაქტზე, რომ წონასწორობის მუდმივა და შესაბამისად შეკავების დროები, იცვლება ტემპერატურის ცვლილებით. ამიტომ, თუ ტემპერატურის ცვლილე-

ბა 20°C არ გამოიწვევს არანაირ ცვლილებებს ნივთიერების t_0 -ის მნიშვნელობებში, შეგვიძლია დავუშვათ, რომ ამ ნივთიერების მოლეკულები არ სორბირდება მოცემულ სორბენტზე [9].

შეკავებითი მოცულობის გაანგარიშებაში ხშირად შეაქვთ შესწორება, რომელიც ითვალისწინებს არასორბირებადი კომპონენტის შეკავებით მოცულობას და მას დაყვანილ შეკავებით მოცულობას უწოდებენ:

$$V'_R = V_R - V_0 \quad (1.14)$$

სადაც V_0 - არასორბირებადი კომპონენტის შეკავებითი მოცულობაა, მას აგრეთვე **მკვდარ მოცულობას** უწოდებენ და იგი წარმოადგენს სვეტის იმ მოცულობას, რომელიც მოძრავ ფაზას უკავია და გამოითვლება ფორმულით:

$$V_0 = u t_0 \quad (1.15)$$

„მკვდარ მოცულობას“ არანაირი წვლილი არ შეაქვს დაყოფის პროცესში და დამოკიდებულია სვეტის გეომეტრიულ ზომებზე და შევსების თავისებურებებზე.

ასევე დაყვანილი შეკავების დრო

$$t'_R = t_R - t_0 \quad (1.16)$$

გარდა განხილული მახასიათებლებისა, ქრომატოგრაფიაში სარგებლობენ ელუირების სხვა სიდიდეებით. კერძოდ, შესწორებული შეკავებითი მოცულობით - V_R^0 , რომელიც ტოლია V_R -ის ზღვრული მნიშვნელობისა, როდესაც $P_i \rightarrow P_0$ (სადაც P_i და P_0 არის წნევები სვეტის შესასვლელში და გამოსასვლელში) [2]:

$$V_R^0 = V_R j, \quad (1.17)$$

სადაც j - წნევის გრადიენტის ფაქტორია და

$$j = \frac{3 (P_i / P_0)^2 - 1}{2 (P_i / P_0)^3 - 1}. \quad (1.18)$$

V_N - ეფექტური შეკავებითი მოცულობა, რომელიც განისაზღვრება როგორც დაყვანილი შეკავებითი მოცულობა V'_R სვეტში წნევის ვარდნის გათვალისწინებით:

$$V_N = V'_R j = (V_R - V_0) j. \quad (1.19)$$

ხშირად უფრო მარტივი და მოხერხებულია გამოვიყენოთ შეკავების კუთრი პარამეტრები, რადგან ყველა ზემოთ განხილული პარამეტრები დამოკიდებულია სვეტში უძრავი ფაზის რაოდენობაზე და საანალიზო ნივთიერების განაწი-

ილების ხასიათზე. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია განაწილებითი ქრომატოგრაფიის შემთხვევაში, როდესაც საჭიროა ვიცოდეთ შეკავების კუთრი მოცულობა გაანგარიშებული 1გ უძრავი ფაზისთვის.

კუთრი შეკავების მოცულობა T ტემპერატურისთვის ტოლია ეფექტური შეკავებითი მოცულობის, რომელიც მოდის 1გ თხევად ფაზაზე (ან ადსორბენტზე):

$$V_g^T = V_N / g \quad (1.20)$$

სადაც g - უძრავი ფაზის მთლიანი მასაა გრამებში.

აბსოლუტური კუთრი შეკავების მოცულობა V_g ტოლია:

$$V_g = (V_N / g)(273,15/T), \quad (1.21)$$

სადაც T - სვეტის აბსოლუტური ტემპერატურაა.

მოლური შეკავებითი მოცულობა T ტემპერატურაზე ტოლია ეფექტური შეკავებითი მოცულობის, რომელიც მოდის 1 მოლ უძრავ ფაზაზე:

$$V_M^T = V_N / N, \quad (1.22)$$

სადაც N - სვეტში უძრავი სითხის მოლების რიცხვია.

V_s^T - ხვედრითი შეკავებითი მოცულობაა ადსორბენტის ერთეულ ზედაპირზე

$$V_s^T = V_N / S_g, \quad (1.23)$$

სადაც S - ადსორბენტის ხვედრითი ზედაპირია, მ²/გ. ანალოგიურად,

$$V_s = [V_N / S_g](273,15/T). \quad (1.24)$$

აბსოლუტური მახასიათებლების გარდა ქრომატოგრაფიაში განიხილავენ ფარდობით და ინტერპოლაციურ მახასიათებლებს.

ფარდობითი შეკავება r (ან ფარდობითი შეკავებითი მოცულობა V_r) წარმოადგენს საანალიზო ნივთიერების (x) დაყვანილი, ეფექტური, ხვედრითი და მოლური შეკავებითი მოცულობების ფარდობას სტანდარტის (st) შესაბამის სიდიდეებთან:

$$r = t'_{Rx} / t'_{Rst} = V'_{Rx} / V'_{Rst} = V_{Nx} / V_{Nst} = V_{gx} / V_{gst} = V_{Mx} / V_{Mst} = \Gamma_x / \Gamma_{st}. \quad (1.25)$$

შეკავების ინტერპოლაციურ მახასიათებელს წარმოადგენს კოვანჩის ლოგარითმული ინდექსი I . იგი გამოიყენება, როდესაც სტანდარტის სახით გვაქვს ორი ან მეტი ნივთიერება, რომელთაგანაც ერთი ელუირდება საანალიზო ნივთიერებამდე და მეორე ნივთიერების ელუირების შემდეგ.

სტანდარტების სახით იყენებს მოლეკულაში n და $n+1$ ნახშირბადის რიცხვის შემცველ n -ალკანებს (ნორმალურ პარაფინულ ნახშირწყალბადებს) და გამოითვლება ფორმულით:

$$I_x = 100 \left(\frac{\lg V_{A.1(x)} - \lg V_{A.1(n)}}{\lg V_{A.1(n+1)} - \lg V_{A.1(n)}} + n \right) \quad (1.26)$$

სადაც, ინდექსი x ახასიათებს საანალიზო კომპონენტს; n - ნახშირბადის ატომების რიცხვია ნორმალურ პარაფინში, რომელიც გამოდის სვეტიდან საანალიზო კომპონენტამდე; $n+1$ - ნახშირბადის ატომების რიცხვი ნორმალურ პარაფინში, რომელიც გამოდის სვეტიდან საანალიზო კომპონენტის შემდეგ; $V_{A.1(n)} < V_{A.1(x)} < V_{A.1(n+1)}$ - შესაბამისი ნივთიერებების შეკავებითი მოცულობები. რადგან განტოლებაში შემავალი სხვაობები $\lg V_{A.1(x)} - \lg V_{A.1(n)}$ და $\lg V_{A.1(n+1)} - \lg V_{A.1(n)}$ ტოლია ფარდობითი შეკავებითი მოცულობების ლოგარითმული სიდიდეების, ინდექსი I შეიძლება დიდი სიზუსტით განისაზღვროს ექსპერიმენტულად, ვიდრე შესაბამისი შეკავებითი მოცულობების აბსოლუტური სიდიდეები, რადგან ნარევების ერთი და იგივე დაყოფისას n -ალკანების დამატებისას მცირდება ან საერთოდ გამოირიცხება დაყოფის ისეთი პარამეტრების ცვალებადობა, როგორიცაა ნაკადის დინების სიჩქარე და წნევითა სხვაობა სვეტში.

რადგან $V_{A.1}$ - სიდიდეები წარმოადგენენ ჰენრის მუდმივებს, კოვჩის ინდექსიც თერმოდინამიკურ მუდმივას წარმოადგენს, რომელიც დამოკიდებულია X ნივთიერების მოლეკულურ სტრუქტურაზე, შესადარებელ ნივთიერებაზე (n -ალკანები n და $n+1$ ნახშირბადების რიცხვით), ადსორბენტის სტრუქტურაზე და სვეტის ტემპერატურაზე.

იმის გამო, რომ შესადარებელ ნივთიერებად ირჩევენ n -პარაფინებს, I სიდიდე პრაქტიკულად დამოკიდებულია მხოლოდ უძრავი ფაზის შედგენილობასა და სამუშაო ტემპერატურაზე და შეგვიძლია გამოვიყენოთ ნებისმიერი ქრომატოგრაფიული სვეტისთვის, რომლებიც შევსებულია ერთი და იმავე უძრავი ფაზით და მუშაობს ერთი და იმავე ტემპერატურაზე.

შესადარებელი ნივთიერების არაპოლარული ბუნების გამო, რომელთა ურთიერთქმედებაც უძრავ ფაზასთან შემოიფარგლება მხოლოდ დისპერსიული ძალებით, შეკავებითი ინდექსების აღწარმოება და მისი საიმედოობა მცირდება უძრავი ფაზის და საანალიზო კომპონენტების პოლარობის ზრდით [2,15,16,17,18].

1.3.3. ტევადობის კოეფიციენტი

ტევადობის კოეფიციენტი ქრომატოგრაფიული პროცესის ერთ-ერთი ფუნდამენტური მახასიათებელია და გამოხატავს სორბირებულ და თავისუფალ მდგომარეობაში მყოფი კომპონენტების მასების ან მოლეკულების რიცხვის ფარდობას ერთეული მოცულობის უძრავ და მოძრავ ფაზებში. იგი ძირითადად უძრავი ფაზის მახასიათებლად შეიძლება ჩაითვალოს.

$$k' = n_s / n_m \quad (1.27)$$

სადაც n_s და n_m არის საკვლევი ნივთიერების მოლეკულის რიცხვი ერთ სმ³ უძრავ და მოძრავ ფაზებში.

ქრომატოგრამის მიხედვით ტევადობის კოეფიციენტის გაანგარიშება ხდება ფორმულით:

$$k' = \frac{V_R - V_0}{V_0} \quad (1.28)$$

ეს ფორმულა შეგვიძლია გამოვსახოთ შეკავების დროების საშუალებით:

$$k' = \frac{t_R - t_0}{t_0} \quad (1.29)$$

როდესაც ტევადობის კოეფიციენტი $k' = 0$, ეს ნიშნავს რომ $t_R = t_0$ და დაყოფას ადგილი არ ექნება. ტევადობის კოეფიციენტის დაბალი მნიშვნელობები გვიჩვენებს, რომ დასაყოფი კომპონენტები შეკავდებიან მეტად სუსტად და ელუირდებიან ქრომატოგრაფიული სვეტიდან არასორბირებადი კომპონენტის პიკთან ახლოს. ამის გამო, ადგილი აქვს საანალიზო ნარევის ცუდ დაყოფას, რადგან უძრავი ფაზა არ გამოიყენება სრულად. მისი მაღალი მნიშვნელობების შემთხვევაში დაყოფა უმჯობესდება, მაგრამ შესაბამისად იზრდება ანალიზის დრო და პიკები მეტად განიერი, რაც ართულებს მათ განსაზღვრას. ტევადობის კოეფიციენტის ოპტიმალური მნიშვნელობები არის ზღვრებში $1.5 \div 4.0$ [13].

1.3.4. დაყოფის კრიტერიუმები

ქრომატოგრამაზე ორი მეზობელი კომპონენტის დაყოფის სისრულის დახასიათების მიზნით გამოიყენება დაყოფის კრიტერიუმი, რომლის გაანგარიშებასაც საფუძვლად უდევს ქრომატოგრამიდან განსაზღვრული სიდიდეები — ორ მეზობელ პიკს შორის მანძილი და პიკის სიგანე. პიკის სიგანე შეიძლება გაიზომოს მისი სიმაღლის ნახევარზე ან ფუძესთან.

ვთქვათ, ნარევის დაყოფის შედეგად მიიღება ქრომატოგრამა, რომელიც მოყვანილია ნახ. 1.20, ბ. ორი მეზობელი პიკის დაყოფის კოეფიციენტი გამოითვლება ფორმულით:

$$R = \frac{2(t_{R2} - t_{R1})}{\omega_1 + \omega_2} = \frac{\Delta t_R}{\mu_1 + \mu_2} \quad (1.30)$$

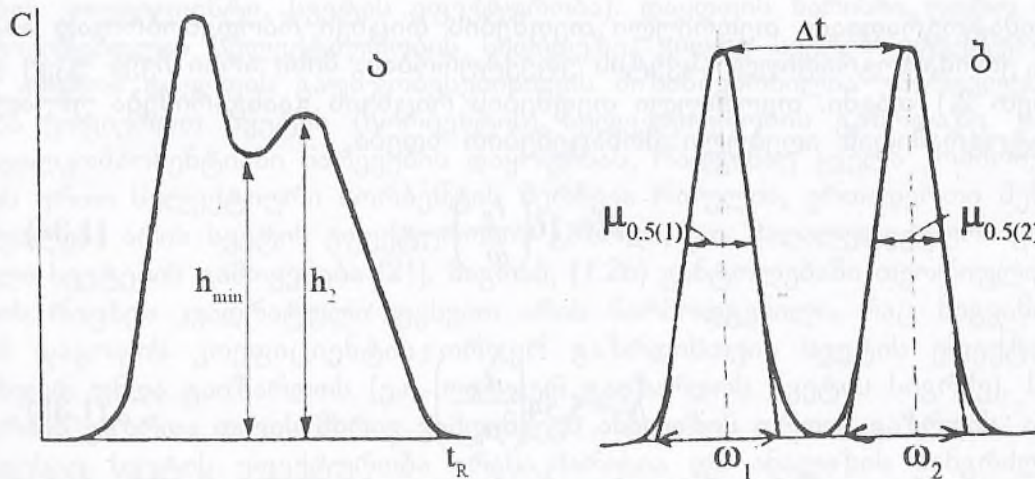
სადაც, t_{R1} და t_{R2} არის მანძილი სინჯის შეყვანიდან ქრომატოგრამაზე შესაბამისი პიკის მაქსიმუმამდე (მმ); ω_1 და ω_2 - პიკის სიგანე, გაზომილი მხების მეთოდით მის ფუძესთან; μ_1 და μ_2 - პიკის სიგანე მისი სიმაღლის ნახევარზე.

თუ $R \geq 1$, ადგილი აქვს სრულ დაყოფას, თუმცა შეიმჩნევა უმნიშვნელო გადაფარვა პიკების დაბოლოებებით, მაგრამ ეს გავლენას არ ახდენს გაანგარიშების სიზუსტეზე. თუ $R < 1$, ადგილი აქვს არასრულ დაყოფას და მუშაობა უნდა

წარმართოს მისი გაუმჯობესების მიმართულებით (ნახ.1.20.ა). ასეთ შემთხვევაში დაყოფის ხარისხი განისაზღვრება ფორმულით:

$$\psi = \frac{h_2 - h_{\min}}{h_2} \quad (1.31)$$

სადაც h_2 - დაბალი პიკის სიმაღლეა, $h_{\min}$ - პიკებს შორის მინიმუმის სიმაღლე. ψ სიდიდე ყოველთვის ნაკლებია ერთზე. თუ 1.31 ფორმულას გავამრავლებთ 100%-ზე მივიღებთ პროცენტებში გამოსახულ დაყოფის ხარისხს. მოცემული ფორმულით განსაზღვრული ψ სიდიდე იცვლება ზღვრებში $0 \div 100\%$ [20].



ნახ. 1.20. ქრომატოგრაფიული პიკების დაყოფა

ა) არასრული დაყოფა; ბ) სრული დაყოფა

მრავალკომპონენტიანი ნარევის დაყოფის თანაბრობის შეფასებისთვის გამოიყენება **თანაბრობის კრიტერიუმი**, რომელიც ქრომატოგრამაზე პიკების განაწილების მახასიათებელია და მრავალკომპონენტიანი ნარევისთვის ითვლება სელექტიურობის კოეფიციენტის ანალოგად:

$$\Delta = \frac{n_k \mu_k R}{t} \quad (1.32)$$

სადაც n_R - ქრომატოგრამაზე პიკების რიცხვია; μ_k - ყველაზე ნაკლებ გაშლილი პიკის სიგანე, გაზომილი სიმაღლეზე, რომელიც შეესაბამება დაყოფის აუცილებელ სიზუსტეს; R - ყველაზე ცუდად დაყოფილი პიკების წყვილის დაყოფის კოეფიციენტი; t - ანალიზის ხანგრძლივობა.

Δ მნიშვნელობა იცვლება ზღვრებში $0 \div 1.0$. როდესაც $\Delta=1$, პიკებს შორის არ არის ნულოვანი ხაზის მონაკვეთები, პიკების სიგანე ერთნაირია და პირველი კომპონენტის ელუირების დაწყების დრო მეტად მცირეა [14, 2].

სვეტის სელექტიურობის კოეფიციენტი α გამოითვლება ფორმულით:

$$\alpha = \frac{t'_{R_2}}{t'_{R_1}} = \frac{t_{R_2} - t_{R_0}}{t_{R_1} - t_{R_0}} = \frac{k_2'}{k_1'} \quad (1.33)$$

მოყვანილი ფორმულების საშუალებით ვახდენთ მხოლოდ უკვე მიღწეული დაყოფის ხარისხის გაანგარიშებას და ის არ პასუხობს კითხვაზე, თუ რაზეა დამოკიდებული და როგორ გავაუმჯობესოთ იგი. ამისათვის საჭიროა გავარკვიოთ რა განსაზღვრავს სვეტის ეფექტურობას, რა არის თეორიული თეფშების რიცხვი და რა კავშირშია იგი დაყოფის ხარისხთან.

1.3.5. თეორიული თეფშების რიცხვი და ეკვივალენტური სიმაღლე

ქრომატოგრაფიაში თეორიული თეფშების რიცხვი რაოდენობრივად ახასიათებს ქრომატოგრაფიული სვეტის ეფექტურობას. მისი არსი ჩვენ უკვე განვიხილეთ 2.1 თავში. თეორიული თეფშების რიცხვის გაანგარიშება უშუალოდ ქრომატოგრამიდან აღებული მონაცემებით ხდება,

$$N = 16 \left(\frac{t_R}{\omega} \right)^2 \quad (1.34)$$

ან

$$N = 5.54 \left(\frac{t_R}{\mu_{0.5}} \right)^2 \quad (1.35)$$

სადაც t_R - ნივთიერების შეკავებითი დრო; $\mu_{0.5}$ - პიკის სიგანე მისი სიმაღლის ნახევარზე.

სვეტის ეფექტური მონაკვეთის სიგრძე (სმ, მმ), რომელზედაც მეტად ხანმოკლე დროით, მაგრამ მაინც მიიღწევა საკვლევი ნივთიერების კონცენტრაციის წონასწორობა მოძრავ და უძრავ ფაზებს შორის, ეწოდება თეორიული თეფშების ეკვივალენტური სიმაღლე და განისაზღვრება ფორმულით:

$$H = L / N \quad (1.36)$$

სადაც H - არის თეორიული თეფშების ეკვივალენტური სიმაღლე (მმ); L - ქრომატოგრაფიული სვეტის სიგრძე (მმ ან სმ); N - თეორიული თეფშების რიცხვი [10].

არსებობს რაოდენობრივი თანაფარდობა თეორიული თეფშების რიცხვს (N), ტევადობის კოეფიციენტს (k'), სვეტის (სორბენტის) სელექტიურობას (α) და დაყოფის ხარისხს (R) შორის, რომელსაც აქვს შემდეგი სახე [9,21]:

$$R = \frac{1}{4} \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right) \left(\frac{k'}{1 + k'} \right) \sqrt{N} \quad (1.37)$$

სადაც α - სვეტის სელექტიურობის კოეფიციენტი.

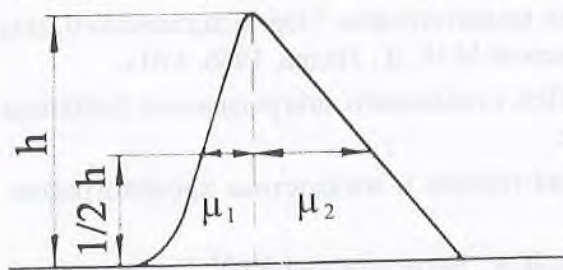
თუ $\alpha = 1$, დაყოფა არ მოხდება, მაგრამ როდესაც $\alpha = 1.01$ უკვე შეიმჩნევა

ნაწილობრივი დაყოფა. ასევე არ მოხდება დაყოფა როდესაც ტევადობის კოეფიციენტი $k'=0$ [14].

როგორც ვხედავთ დაყოფის ხარისხი დამოკიდებულია სვეტის ეფექტურობაზე და გამოყენებული სორბენტის სელექტიურობაზე. დაბალი სელექტიურობა და ეფექტურობა იწვევს ცუდ (არასრულ) დაყოფას. იმისთვის რომ მივაღწიოთ დაყოფის უფრო მაღალ ხარისხს, უნდა გავზარდოთ სორბენტის სელექტიურობა ან სვეტის ეფექტურობა. ორივე ამ პარამეტრის ერთდროულად გაზრდა საუკეთესო პირობაა. ექსპერიმენტის პირობების მიზანდასახული შეცვლა იწვევს დაყოფის განმსაზღვრელი სამივე სიდიდის ცვლილებებს (სელექტიურობა, ტევადობის კოეფიციენტი, სვეტის ეფექტურობა). დაყოფის ხარისხი უფრო მეტად დამოკიდებულია სელექტიურობის სიდიდეზე, ვიდრე სვეტის ეფექტურობაზე (N), ამიტომ დაყოფის გაუმჯობესებისთვის მიზანშეწონილია უპირველეს ყოვლისა ვიფიქროთ სვეტის (სორბენტის) სელექტიურობის გაზრდაზე. მაგრამ, მრავალკომპონენტიანი ნარევების დაყოფისას, რადგანაც ყველა კომპონენტისთვის ერთი სელექტიური სორბენტის შერჩევა რთულია, ერთადერთი შესაძლო საშუალება არის სვეტის ეფექტურობის გაზრდა, ე.ი. მაღალეფექტური კაპილარული სვეტების გამოყენება [21]. მაგრამ, (1.26) განტოლებაში თეორიული თეფშების რიცხვი კვადრატული ფესვით არის წარმოდგენილი, რაც მიგვანიშნებს რომ დაყოფის კოეფიციენტის ორჯერ გაზრდისთვის სვეტის ეფექტურობა ოთხჯერ უნდა გაიზარდოს (ე.ი. ოთხჯერ გაიზარდოს სვეტის სიგრძე). სვეტის სიგრძის გაზრდა თავის მხრივ გამოიწვევს ანალიზის დროის გაზრდას. ამიტომ როდესაც სვეტის ეფექტურობა არასაკმარისია და ანალიზის ხანგრძლივობა მეტად მნიშვნელოვანია, ეფექტურობის გაზრდისთვის სხვა მეთოდებს მიმართავენ: აირად ქრომატოგრაფიაში ეს ხდება ტემპერატურის ცვლილებით (ტემპერატურის პროგრამირება), ხოლო თხევად ქრომატოგრაფიაში მოძრავი ფაზის შედგენილობის ცვლილებით (გრადიენტული ელუირება). მაქსიმალური დაყოფა მიიღწევა, როდესაც N მნიშვნელოვნად დიდია და პრაქტიკაში სწორედ მისი მნიშვნელობის გაზრდას ენიჭება მეტი ყურადღება [22].

1.3.6. ასიმეტრიის კოეფიციენტი

იგი გამოიყენება საანალიზო ნივთიერებების სორბციული უნარის შეფასებისთვის და გამოისახება ფორმულით:



ნახ. 1.21. ასიმეტრიული პიკი

$$K = \mu_1 / \mu_2 \quad (1.38)$$

სადაც μ_1 - მონაკვეთია ქრომატოგრამაზე, რომელიც პიკის ზურგს შეესაბამება; μ_2 - პიკის ფრონტის სიგანე.

ასიმეტრიის კოეფიციენტის გამოსათვლელი სიდიდეები აიღება უშუალოდ ქრომატოგრამიდან (ნახ.1.21). სიმეტრი-

ული პიკების შემთხვევაში ასიმეტრიულობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ტოლია 1.0; რაც ნაკლები ან მეტია ერთზე, მით უფრო ასიმეტრიულია პიკი [20].

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Сакодынский К.И., Орехов Б.И. Хроматография в науке и технике. М.; Химия, 1982/9, 63 с.
2. Гольберт К. А, Вигдергауз М.С. Введение в газовую хроматографию. М.; Химия, 1990, 351 с.
3. Айвазов Б.В. Введение в хроматографию. Высшая школа., 1983, 239 с.
4. Сакодынский К.И и др. Аналитическая хроматография. М.; Химия, 1993, 463 с.
5. კ. ამირხანაშვილი, რ. გახოკიძე, ნ. სიღამონიძე ბიოორგანული ნაერთების კვლევის მეთოდები, თბილისი, უნივერსალი, 2003, გვ. 153
6. Жидкостная колоночная хроматография. Пер. с английского, под редакцией Дейла З., Мацека К., Янака Я. М.; Химия, 1993, 463 с.
7. Перри С., Амос Р., Брюер П., Практическое руководство по жидкостной хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Чмутова К.В. М.; Мир; 1974. 260 с.
8. Шингляр М. Газовая хроматография в практике, Пер. с словацкого, 1964, М.; Химия, 1964, 195 с.
9. Hamilton R.J. & Sewell P.A. Introduction to High Performance liquid Chromatography. London, Chapman & Hall, 1979, 183 p.
10. Мак-Неир Г., Бонелли Э. Введение в газовую хроматографию. Пер. с английского, под редакцией Жуховицкого А.А. М.; Мир, 1970, 277 с.
11. Яшин Я. И. Физико-химические основы хроматографического разделения. М., Химия, 1976, 215 с.
12. Пецев Н., Коцев Н. Справочник по газовой хроматографии. Пер. с болгарского, под редакцией Березкина В.Г. и Сакодынского К.И. 1987, М.; Мир, 260 с.
13. Жуховицкий А.А., Туркельтауб А.М. Газовая Хроматография. М. Гостехиздат, 1962, 440 с.
14. Ногаре С.Д., Джувет Р.С. Газо-жидкостная хроматография. Пер. с английского, под редакцией Александрова А.Н. и Дементьевой М.И. Л.; Недра, 1966, 470 с.
15. Руководство по газовой хроматографии. Пер. с немецкого, под редакцией Лейбница Э. и Штруппе Х.Г., М.; Мир, 1988, 479 с.
16. Киселев А.В., Яшин Я.И. Адсорбционная газовая и жидкостная хроматография. М.; Химия, 1979, 288 с.
17. Вигдергауз М.С., Семенченко Л.В., Езрец В.А., Богословский Ю.Н. Качественный газохроматографический анализ. М.; Наука, 1978. с.17-27

ული პიკების შემთხვევაში ასიმეტრიულობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ტოლია 1.0; რაც ნაკლები ან მეტია ერთზე, მით უფრო ასიმეტრიულია პიკი [20].

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Сакодынский К.И., Орехов Б.И. Хроматография в науке и технике. М.; Химия, 1982/9, 63 с.
2. Гольберт К. А, Вигдергауз М.С. Введение в газовую хроматографию. М.; Химия, 1990, 351 с.
3. Айвазов Б.В. Введение в хроматографию. Высшая школа., 1983, 239 с.
4. Сакодынский К.И и др. Аналитическая хроматография. М.; Химия, 1993, 463 с.
5. კ. ამირხანაშვილი, რ. გაბოკიძე, ნ. სიღამონიძე ბიოორგანული ნაერთების კვლევის მეთოდები, თბილისი, უნივერსალი, 2003, გვ. 153
6. Жидкостная колоночная хроматография. Пер. с английского, под редакцией Дейла З., Мацека К., Янака Я. М.; Химия, 1993, 463 с.
7. Перри С., Амос Р., Брюер П., Практическое руководство по жидкостной хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Чмутова К.В. М.; Мир; 1974. 260 с.
8. Шингляр М. Газовая хроматография в практике, Пер. с словацкого, 1964, М.; Химия, 1964, 195 с.
9. Hamilton R.J. & Sewell P.A. Introduction to High Performance liquid Chromatography. London, Chapman & Hall, 1979, 183 p.
10. Мак-Неир Г., Бонелли Э. Введение в газовую хроматографию. Пер. с английского, под редакцией Жуховицкого А.А. М.; Мир, 1970, 277 с.
11. Яшин Я. И. Физико-химические основы хроматографического разделения. М., Химия, 1976, 215 с.
12. Пецев Н., Коцев Н. Справочник по газовой хроматографии. Пер. с болгарского, под редакцией Березкина В.Г. и Сакодынского К.И. 1987, М.; Мир, 260 с.
13. Жуховицкий А.А., Туркельтауб А.М. Газовая Хроматография. М. Гостехиздат, 1962, 440 с.
14. Ногаре С.Д., Джувет Р.С. Газо-жидкостная хроматография. Пер. с английского, под редакцией Александрова А.Н. и Дементьевой М.И. Л.; Недра, 1966, 470 с.
15. Руководство по газовой хроматографии. Пер. с немецкого, под редакцией Лейбница Э. и Штруппе Х.Г., М.; Мир, 1988, 479 с.
16. Киселев А.В., Яшин Я.И. Адсорбционная газовая и жидкостная хроматография. М.; Химия, 1979, 288 с.
17. Вигдергауз М.С., Семенченко Л.В., Езрец В.А., Богословский Ю.Н. Качественный газохроматографический анализ. М.; Наука, 1978. с.17-27

18. Kovats E., *Helv.Chem.Acta*. 1958, v.41, p. 1915-1932
19. Хадден Н., Бауман Ф., Гере Д. и др. Основы жидкостной хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Жуховицкого А.А. М; Мир, 1973, 264 с.
20. Вигдергауз М.С. Расчёты в газовой хроматографии. М.; Химия, 1978, 248 с.
21. Березкин В.Г. Высокоэффективная газовая хроматография. Знание, 1987, №10, 44 с.
22. Стыскин Е.Л., Ициксон Л.Б., Брауде Е. В. Практическая высокоэффективная жидкостная хроматография. М.; Мир, 1986, 287 с.

ნაწილი 2. აირქრომატოგრაფია

თავი 2.1.

აირქრომატოგრაფიის ძირითადი თეორია

2.1.1. ზოგადი მიმოხილვა

სახელწოდება „აირქრომატოგრაფია“ მეთოდმა მიიღო მოძრავი აირადი ფაზის აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით. იგი გამოიყენება ისეთი ნარევების დასაყოფად, რომლის კომპონენტებიც დაუშლელად გადადიან ორთქლის მდგომარეობაში. აირადი მოძრავი ფაზა, ანუ როგორც მას ხშირად უწოდებენ **აირმატარებელი**, ქრომატოგრაფიული დაყოფის პროცესში საანალიზო ნივთიერების უძრავი ფაზის გასწვრივ გადამტანის როლს ასრულებს და შედარებით ნაკლებად მონაწილეობს თვითდაყოფის პროცესში.

უძრავი ფაზის ბუნებიდან გამომდინარე აირქრომატოგრაფია იყოფა ორ ძირითად ნაწილად: **აირ-ადსორბციული** და **აირ-თხევადი**.

აირ-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიაში უძრავ ფაზად გამოყენებულია ადსორბენტი, ხოლო აირ-თხევად ქრომატოგრაფიაში კი სითხე, დაფენილი მყარ სარჩულზე. ქვემოთ ჩვენ ცალ-ცალკე განვიხილავთ თითოეულ მათგანს.

აირ-ადსორბციული ქრომატოგრაფია, მისთვის დამახასიათებელი არანრფივი ადსორბციის იზოთერმის გამო ნაკლებად გამოიყენება აირ-თხევად ქრომატოგრაფიასთან შედარებით. ადსორბციის არანრფივი იზოთერმა იწვევს ისეთ არასასურველ ეფექტებს, როგორიცაა შეკავებითი მოცულობების ცვლილება, პიკების ასიმეტრიულობა და სხვა. აირ-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიას ძირითადად იყენებენ აირების დასაყოფად დაბალ ტემპერატურაზე და დაბალმოლეკულური ნივთიერებების დასაყოფად მაღალ ტემპერატურაზე. აირქრომატოგრაფიას ფართოდ იყენებენ აირადი და აქროლადი ნივთიერებების რაოდენობითი და თვისებითი ანალიზისათვის, მყარი ნივთიერებების ზედაპირის თვისებების ფიზიკურ-ქიმიური გამოკვლევებისთვის, ადსორბციის იზოთერმების, ადსორბციის ენერგიის და ენტროპიის, თერმოდინამიკური და კინეტიკური პარამეტრების განსაზღვრისთვის, ქრომატოგრაფიული პროცესის მიმდინარეობისას კატალიზური რეაქციების გამოსაკვლევად და სხვა [1].

2.1.2. აირ-ადსორბციული ქრომატოგრაფია

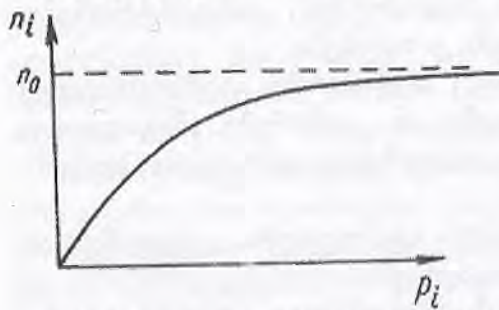
აირ-ადსორბციული ქრომატოგრაფია არის აქროლადი ნივთიერებების ნარევთა დაყოფის მეთოდი, რომელსაც საფუძვლად უდევს საანალიზო ნივთიერებების სელექტიური ადსორბცია მყარ უძრავ ფაზაზე, ადსორბენტზე.

საანალიზო ნივთიერების გადატანა ადსორბენტის გასწვრივ ხდება აირმატარებლის საშუალებით, რომელიც სვეტში უწყვეტად მიედინება და საანალიზო ნივთიერების მოლეკულებიც მუდმივ კონტაქტშია ადსორბენტის თავისუფალ აქტიურ ცენტრებთან, რის გამოც გარკვეული დროით ადსორბირდებიან მათზე.

ამის შედეგად მყარდება დინამიკური წონასწორობა ადსორბენტისა და აირად მოძრავ ფაზაში მყოფ საანალიზო ნივთიერებების რაოდენობებს შორის. აირმატარებლის მუდმივი მოძრაობის გამო უკვე ადსორბირებული ნივთიერებები სუფთა აირმატარებლის გავლის შემდეგ დესორბირდებიან და გადადიან მოძრავ ფაზაში. ირლვევა დამყარებული წონასწორობა და ნივთიერებები კვლავ ადსორბენტის ახალი, თავისუფალი აქტიური უბნებისაკენ გადაინაცვლებენ სუფთა აირმატარებლის საშუალებით. ეს პროცესი გრძელდება მანამ, სანამ ნარევის კომპონენტები საბოლოოდ დატოვებენ ქრომატოგრაფიულ სვეტს და მოხდება მათი დაყოფა.

რადგან ქრომატოგრაფიული დაყოფის აუცილებელი პირობაა სწრაფი და შექცევადი ფაზური წონასწორობა, ამიტომ მთლიანი პროცესი მხოლოდ ფიზიკურ ადსორბციას (და არა ქემოსორბციას) ეფუძნება, რომლის დროსაც ადსორბირებული მოლეკულები ინარჩუნებენ საკუთარ ინდივიდუალურ თვისებებს. აღსანიშნავია, რომ ქემოსორბციის დროს, ადსორბენტთან ურთიერთქმედების დიდი ენერგიის გამო, მოლეკულების დესორბცია შენელებულია.

ადსორბციის პროცესისთვის ჰენრის მუდმივა ადსორბციის თავისუფალი ენერგიის პროპორციულია, რაც თავის მხრივ ახასიათებს ადსორბენტი-ადსორბატს შორის ურთიერთქმედების ხარისხს. ადსორბციის ენერგია შეგვიძლია გამოვთვალოთ ადსორბციის იზოთერმიდან, რომელიც გვიჩვენებს ადსორბირებული ნივთიერების რაოდენობას (n_i) და წონასწორულ წნევას (P_i) შორის დამოკიდებულებას მუდმივი ტემპერატურის დროს. ენერგეტიკულად ერთგვაროვან ზედაპირზე მონომოლეკულური ადსორბციის დასახასიათებლად იყენებენ ლენგმიურის იზოთერმას (ნახ.2.1).



ნახ.2.1 ლენგმიურის იზოთერმის დამახასიათებელი ფორმა

ადსორბციის იზოთერმის სწორხაზოვანი უბანი მეტად მცირეა და კიდევ უფრო მცირდება ადსორბირებული ნივთიერების დუღილის ტემპერატურის გაზრდით. იზოთერმის მოხრილი უბანი ქრომატოგრამაზე აისახება პიკების ასიმეტრიაში, რისი მიზეზიც შეიძლება იყოს სვეტის არათანაბარი შევსება ადსორბენტით, ადსორბენტის ზედაპირის ჰეტეროგენულობა და მათზე აქტიური ცენტრების არსებობა, რასაც საბოლოოდ დესორბციის პროცესის დროის გაზრდასთან

მივყავართ. ადსორბენტის ზედაპირი არაერთგვაროვანი შეიძლება იყოს ენერგეტიკული ან გეომეტრიული თვალსაზრისით. პირველ შემთხვევაში ადსორბციის ენერგია იცვლება ადსორბირებული მოლეკულების ადსორბენტის ზედაპირზე გადაადგილებისას. ეს შეიძლება გამოწვეული იყოს ზედაპირის დაბინძურებით ან მასზე სხვადასხვა ბუნების აქტიური ცენტრების არსებობით.

გეომეტრიული არაერთგვაროვნების მიზეზია სხვადასხვა ზომის და ფორმის ფორები, ან ადსორბენტის ზედაპირის რაიმე სახის მექანიკური დაზიანება [2].

2.1.2.1 ადსორბენტები აირ-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიაში

აირ-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიაში გამოიყენება ადსორბენტები, რომლებსაც გააჩნიათ შემდეგი თვისებები [3]:

- სელექტიურობა;
- საკვლევი კომპონენტების მიმართ ქიმიური ინერტულობა, კატალიზური აქტივობის უქონლობა;
- ადსორბციის სწორხაზოვანი იზოთერმა;
- მექანიკური სიმტკიცე;

ადსორბენტის ზედაპირსა და საკვლევი ნივთიერებების მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძირითადი განმსაზღვრელი ფაქტორებია: დისპერსიული ძალები (მაგ. ნახშირებზე დაყოფისას), წყალბადური ბმები (სილიკაგელზე ან ალუმინის ოქსიდზე) და პოლარული ტიპის ურთიერთქმედებები. სწორედ მოლეკულათაშორის ურთიერთქმედების ხასიათი უდევს საფუძვლად აირ-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული ადსორბენტების ერთ-ერთ კლასიფიკაციას.

კისლიოვის მიერ შემოთავაზებული კლასიფიკაციის მიხედვით [4] აირ-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიაში ძირითადად იყენებენ შემდეგი ტიპის ადსორბენტებს:

1. არასპეციფიკური ადსორბენტები, რომელთა ზედაპირიც არ შეიცავს მიმოცვლის უნარის მქონე ფუნქციონალურ ჯგუფებს. ამ ტიპის სორბენტებს მიეკუთვნება ნახშირები, გრაფიტირებული მური, არაპოლარული ფოროვანი პოლიმერები.

2. სპეციფიკური ადსორბენტები, რომლის ზედაპირზეც კონცენტრირებულია დადებითი მუხტი. მაგალითად, ცეოლიტის კათიონები.

3. სპეციფიკური ადსორბენტები, რომელთაც ზედაპირზე გააჩნიათ ელექტრონული სიმკვრივის მქონე ატომთა ჯგუფები ან კავშირები (მაგალითად, ადსორბენტები ნიტრილის ჯგუფებით). ასეთია პოლარული ფოროვანი პოლიმერები.

იმის გამო, რომ ადსორბენტის გეომეტრიული სტრუქტურა გავლენას ახდენს შეკავებითი მოცულობების სიდიდეზე, დაყოფის სელექტიურობაზე და ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვაზე, მიზანშეწონილია ადსორბენტების კლასიფიკაცია მოხდეს მათი გეომეტრიული სტრუქტურის მიხედვითაც. კისილიოვმა შემოგვთავაზა ამგვარი კლასიფიკაცია და ადსორბენტები ფორების ზომების მიხედვით დაყოფილ ძირითად ტიპად [4]:

1. არაფოროვანი ადსორბენტები (I ტიპი). ამ ტიპის ადსორბენტებს მიეკუთვნებიან არაფოროვანი მონო და პოლიკრისტალური ადსორბენტები. მაგალითად, მარილების არაფოროვანი კრისტალები (ბარიუმის სულფატი, მეტალეების ქლორიდები), გრაფიტირებული თერმული მური და არაფოროვანი ამორფული ადსორბენტები — აეროსილი (დისპერსიული სილიციუმის დიოქსიდი). მათი ხვედრითი ზედაპირი ასობით $\text{მ}^2/\text{გ}$ აღწევს. ამგვარი ადსორბენტები სვეტების შესავსებად სუფთა სახით არ გამოიყენებიან. მათი საშუალებით ახდენენ ნაკლები ადსორბციის უნარის მქონე (მცირე საკუთარი ხვედრითი ზედაპირი)

ადსორბენტ-მატარებლის მაკროფორების გაჯერებას ან ამზადებენ საჭირო ზომის გრანულებს. სვეტის შევსებისას გრანულებს შორის წარმოიქმნება ღრეჩოები (ფორები), რომელთა ზომებიც თვით ნაწილაკის ზომებთან ახლოსაა და საკმაოდ დიდია იმისთვის რომ მოხდეს უკვე ადსორბირებული მოლეკულების სწრაფი მიმოცვლა აირმატარებელთან.

ქრომატოგრაფიული სვეტის შევსებისას არაფოროვანი ადსორბენტით გრანულების გარეშე, ნაწილაკებს შორის არსებში მიმდინარე კაპილარული კონდენსაციის პროცესი თითქმის შეუმჩნეველია.

2. ერთგვაროვნად-მაკროფოროვანი ადსორბენტები (II ტიპი). ამ ტიპის სორბენტებს მიეკუთვნებიან მაკროფოროვანი (ჰიდროთერმულად დამუშავებული) ქსეროგელები, მსხვილფოროვანი მინა და არაფოროვანი ნაწილაკებისგან დამზადებული 10 ნმ-ზე მეტი ზომის გრანულები, რომელთა ხვედრითი ზედაპირიც ნაკლებია 200 მ²/გ. ქსეროგელის მაღალი ტემპერატურის (700-800°C) და წნევის მქონე წყლის ორთქლით დამუშავებისას მისი სტრუქტურა გადადის ღრუბლოვანში. დამუშავების შედეგად მათი ხვედრითი ზედაპირი მცირდება 25-50 მ²/გ-მდე და მიიღება ასობითი ნანომეტრი ზომის ფართო ფორები.

3. ერთგვაროვნად-წვრილფოროვანი ადსორბენტები (III ტიპი). მათ მიეკუთვნება ზოგიერთი ამორფული ნახშირები. მაგალითად, სარანის ტიპის ნახშირები და ფოროვანი კრისტალები (A და X ტიპის ცეოლითები ანუ მოლეკულური საცრები). კრისტალის ფორებში შესასვლელი ერთნაირია და ისინი გამოიყენებიან მოლეკულურ საცრული ეფექტის მისაღწევად. თუ დასაყოფი ნივთიერების მოლეკულები ვერ აღწევენ ფორებში, ფოროვანი კრისტალი ასეთი მოლეკულების მიმართ იქცევა როგორც არაფოროვანი, ანუ როგორც I ტიპის ადსორბენტი. მაგალითად, ცეოლითი CaA, სხვადასხვა სტრუქტურის მქონე ნახშირწყალბადების მიმართ (გარდა ნორმალური ნახშირწყალბადებისა) გამოიყენება როგორც არაფოროვანი ადსორბენტი.

4. არაერთგვაროვნად ფოროვანი ადსორბენტები (IV ტიპი). ესენია არაერთგვაროვანი ფოროვანი ქსეროგელები, რომლებშიც ფართო ფორებთან ერთად ზედაპირზე არსებობენ ძლიერ მაადსორბირებელი წვრილი ფორებიც. ასეთი სორბენტები ქრომატოგრაფიაში წარმატებით ვერ გამოიყენება მათი წინასწარი მოდიფიკაციის გარეშე.

როდესაც ამა თუ იმ კონკრეტული მიზნისთვის შეირჩევა ადსორბენტი, შემდეგ ხდება ქრომატოგრაფიული სვეტის შევსება ამ ადსორბენტით. ვან-დე-ემტერის განტოლებიდან უკვე ცნობილია, რომ სვეტის ეფექტურობა მნიშვნელოვნად განისაზღვრება ორი ფაქტორით: სორბენტის ნაწილაკების დიამეტრით d_p (წვერი A) და მათი შევსების ერთგვაროვნებით (წვერი B). ორივე წვერი მეტად მნიშვნელოვანია და ამიტომ დიდი ყურადღება ექცევა ნაწილაკების ზომის სწორ შერჩევას. პრაქტიკაში ხშირად იყენებენ 0.18-0.25 მმ, 0.12-0.18 მმ და უფრო იშვიათად 0.11-0.12 მმ ზომის ნაწილაკებს; ნაწილაკების ზომის გაზრდა 0.25-0.5 მმ აშკარად იწვევს სვეტის ეფექტურობის დაცემას. ცხრილში 2.1. მოყვანილია აირქრომატოგრაფიაში გამოყენებული ზოგიერთი ადსორბენტის ზოგადი დახასიათება [1]:

ცხრილი 2.1.

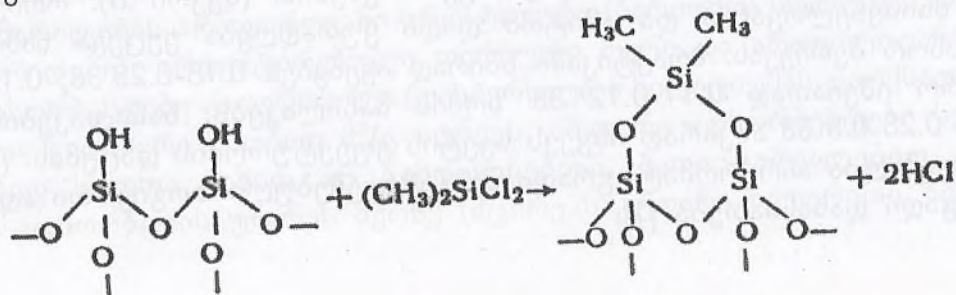
ძირითადი ადსორბენტები აირქრომატოგრაფიაში

ადსორბენტის ტიპი	დასახელება	ხვედრითი ზედაპირი მგ/მ	ფორების დიამეტრი მმ
სილიკაგელი	სფეროსილი	400	300-500
		200	140-230
		075	75-125
		030	37-62
		015	18-31
		005	5-15
	პორასილი	B	125-250
		C	50-100
	სილოქრომი	C - 80	70-90
		C - 120	100-150
გრაფიტირებული თერმული მური	კარბოპაკი	C	12
		B	100
	კარბოსფერი		1200
ნატრიუმის ალუმოსილიკატი	მოლეკულური საცრები	4A	0.4
		13X	1.0
	მოლ. საცრები	5A	0.5

ქვემოთ მოკლედ განვიხილოთ აირ-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული ზოგიერთი ადსორბენტი.

2.1.2.2. სილიკაგელი

სილიკაგელი წარმოადგენს ჰიდროფობულ ადსორბენტს ძლიერ განვითარებული კაპილარული სტრუქტურით. მისი ადსორბციული აქტივობა განისაზღვრება ზედაპირზე არსებული სილანოლის ჯგუფებით (SiOH), რომლებიც წყალბადურ ბმებს წარმოქმნიან სორბატის მოლეკულებთან. სილიკაგელის აქტივობის შემცირების მიზნით ახდენენ მის სილანიზაციას, რომლის დროსაც ხდება ჰიდროქსილის ჯგუფების შეცვლა CH_3 ჯგუფებით, რის შედეგადაც ადგილი აღარ აქვს წყალბადური ბმების წარმოქმნას. პროცესი შემდეგი სქემით მიმდინარეობს:



რადგან სილიკაგელი პოლარული სორბენტების ჯგუფს მიეკუთვნება, უჯერი ნაერთები უფრო ძლიერ ურთიერთქმედებს მის ზედაპირთან (მაგალითად, ეთილენი ელუირდება ეთანის შემდეგ) [3,4].

2.1.2.3. ალუმინის ოქსიდი

ალუმინის ოქსიდი პოლარული სორბენტი, რომლის ხვედრითი ზედაპირი 200-300 მ²/გ ფარგლებში იცვლება. აირ-ადსორბციულ ქრომატოგრაფიაში ძირითადად გამოიყენება 180-350°C-ზე გააქტიურებული მისი γ მოდიფიკაცია. ალუმინის ოქსიდის ზედაპირზე არსებული ჰიდროქსილის ჯგუფების არსებობის გამო, იგი სილიკაგელის მსგავსად ამჟღავნებს წყალბადური ბმების წარმოქმნისადმი მიდრეკილებას და ურთიერთქმედებაში შედის უჯერ ნაერთებთან.

ალუმინის ოქსიდის და სილიკაგელის აქტივობა მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული მათში ტენის შემცველობაზე. ბროკმანის შკალის მიხედვით მათი აქტივობა შემდეგნაირად გამოიხატება [5]:

ბროკმანის აქტივობის შკალა

აქტიურობა	I	II	III	IV	V
წყლის შემცველობა (%)	0	10	12	15	20
სილიკაგელზე	0	3	6	10	15
ალუმინის ოქსიდზე	0	3	6	10	15

2.1.2.4. ნახშირბადის სორბენტები

ნახშირბადის სორბენტები ფართოდ გამოიყენება აირქრომატოგრაფიაში. მისი გამოყენების არეალი ფართოა, დაწყებული აირებიდან დამთავრებული მაღალმოლეკულური ნაერთებით. ჩვენ მოკლედ განვიხილავთ ამ ტიპის ადსორბენტებს გააქტიურებული ნახშირის და გრაფიტირებული თერმული მურის მაგალითზე.

გააქტიურებული ნახშირი. იგი არაპოლარულ სორბენტებს მიეკუთვნება და ხასიათდება ფორების ძლიერ განვითარებული სტრუქტურით. მათი ფორების ზომები სხვადასხვაა: მიკროფორები ($d=1-2$ ნმ); გარდამავალი ზომის ფორები ($d=5-50$ ნმ); მაკროფორები ($d \geq 100$ ნმ). მიკროფორების ხვედრითი ზედაპირი შეადგენს 1000-1800 მ²/გ, ხოლო მაკროფორების 1 მ²/გ. აირქრომატოგრაფიაში ძირითადად გამოიყენება ნახშირები მაქსიმალურად განვითარებული მიკროფორული ზედაპირით.

გააქტიურებული ნახშირი ადსორბირებს ნახშირწყალბადებს და მათ წარმოებულებს, არომატულ ნაერთებს, შედარებით ნაკლებად სპირტებს, კარბონმჟავებს და რთულ ეთერებს. ზოგიერთი ნივთიერების გამოსვლის თანმიმდევრობა მათზე შემდეგია: H₂, O₂, CO, CH₄, CO₂, C₂H₂, C₂H₄, C₃H₈, i-C₄H₁₀ (i-იზო), n-C₄H₁₀ (n-ნორმალური) [4, 6].

გრაფიტირებული თერმული მური (ბთმ). ამ ჯგუფის სორბენტებს იღებენ ჩვეულებრივი მურის ვაკუუმის ან ინერტული აირის გარემოში 3000°C -ზე დამუშავებით. ასეთ პირობებში მას სცილდება აქროლადი მინარევი და იღებს მრავალნახნაგოვან ფორმას. ზედაპირი თავისუფლდება უჯერი ბმების, თავისუფალი რადიკალების და იონებისგან და ენერგეტიკულად ერთგვაროვანი ხდება. გააქტიურებული მური არაპოლარული სორბენტი და ადსორბცია მათზე მიმდინარეობს მიზიდულობის დისპერსიული ძალების გავლენით [1,4]. იგი არ არის მგრძნობიარე პოლარული ნივთიერებების მიმართ, თუმცა წარმატებით გამოიყენება სივრცული იზომერების დასაყოფად. ქვემოთ ჩამოვთვლით ძირითად დადებით მხარეებს, რაც დამახასიათებელია გრაფიტირებული თერმული მურის და მის ბაზაზე დამზადებული სორბენტებისთვის[4]:

- ზედაპირის ძლიერი ერთგვაროვნება, განსაკუთრებით მათი მაღალ ტემპერატურაზე წყალბადით დამუშავების შემდეგ. ბთმ-ს არ გააჩნია შიგა ფორები. მისი გრანულირებით დამზადებულ სორბენტებს აქვთ მეორადი ზედაპირი, მარცვლებს შორის ღარები;
- ბთმ-ის ზედაპირი არაპოლარული, ჰიდროფობურია;
- ბთმ-ის ბაზაზე დამზადებული ადსორბენტები უნივერსალურია და მათზე შეიძლება დაიყოს როგორც პოლარული, ასევე არაპოლარული ნივთიერებები;
- ნივთიერებების შეკავება მათზე ამ ნივთიერებების ელექტრონული პოლარიზების პროპორციულია;
- ბთმ და მის ბაზაზე შექმნილი სორბენტები ხასიათდებიან სუპერსელქტიურობით გეომეტრიული იზომერების მიმართ [4].

ნახშირბადოვან სორბენტებს მიეკუთვნება აგრეთვე **ნახშირბადის მოლეკულური საცრები**, რომლებიც მიიღება ვინილიდენქლორიდის თერმული დამუშავებით შესაბამის პირობებში. დამუშავების შედეგად მიიღება მიკროფოროვანი ნახშირბადი $1000-1200 \text{ მ}^2/\text{კგ}$. ხვედრითი ზედაპირით და მოლეკულური საცრის სტრუქტურით. ამ ადსორბენტის ნაწილაკებს აქვთ სფერული ფორმა და ხასიათდებიან კარგი მექანიკური თვისებებით. სხვადასხვა ფორმები ამზადებენ ნახშირბადის მოლეკულურ საცრებს სხვადასხვა დასახელებით. ცხრილში 2.2. მოყვანილია ამ სორბენტების ზოგიერთი თვისებები და გამოყენების სფერო.

ცხრილი 2.2.

ნახშირბადის მოლეკულური საცრების თვისებები და გამოყენების სფერო

ადსორბენტი	ხვედრითი ზედაპირი $\text{მ}^2/\text{გ}$	ფორების დიამეტრი ნმ	ნაწილაკების ფორმა	გამოყენების სფერო
კარბოსივი B	100	2.0-2.4	არანესიერი	C ₄ -მდე შემცველობის ორგანული და არაორგანული აირადი ნაერთების დაყოფა; უჯერი ნაერთების მინარევების მიკროანალიზი C-ის იგივე რიცხვის მქონე ნაჯერ ნაერთებში; H ₂ O-ს მიკროანალიზი ორგანულ ნაერთებში.
კარბოსივი C	560	2.0-2.4	სფერული	
სორპტოფაზა, CMS	1000	2.0-2.4	სფერული	
სფეროკარბი	1200	3	სფერული	
კარბოსფერი	1000	2.6	სფერული	

ნახშირბადის მოლეკულურ საცრებს გააჩნიათ აირქრომატოგრაფიისთვის საჭირო მთელი რიგი თვისებები: ისინი გამოირჩევიან უმნიშვნელო პოლარობით და მიეკუთვნებიან არასპეციფიკურ ადსორბენტებს, გააჩნიათ განსაკუთრებით სუფთა ზედაპირი.

მაღალი ადსორბციული აქტიურობის გამო ეს მოლეკულური საცრები მოითხოვენ დამუშავების, შენახვის და რეგენერაციის განსაკუთრებულ ზომებს. ამიტომ, სასურველია უშუალოდ ანალიზის წინ მოხდეს მისი კონდიცირება 16 საათის განმავლობაში 200°C -ზე ჰელიუმის ნაკადში. გამოყენებული აირმატარებელი არ უნდა შეიცავდეს არც ჟანგბადს და არც წყალს. 400°C -ზე მაღალ ტემპერატურაზე ნახშირბადის მოლეკულური საცრები რეაგირებენ ჟანგბადთან და წარმოქმნიან CO , ხოლო წყალთან რეაგირებისას H_2 და CO -ს.

ნახშირის მოლეკულური საცრების გამოყენების სფერო განისაზღვრება მათი განსაკუთრებით დიდი ხვედრითი ზედაპირის გათვალისწინებით, რის გამოც ამ სორბენტით შევსებული სვეტები ხასიათდებიან მაღალი ტევადობის კოეფიციენტით და მათზე ხორციელდება მხოლოდ ნახშირბადის ექვს ატომამდე შემცველობის ორგანული ნაერთების დაყოფა. წინააღმდეგ შემთხვევაში მათი ადსორბციის დროს მოხდება ამ ნაერთების პიროლიზური დაშლა [2].

2.1.2.5. ცეოლიტები ანუ მოლეკულური საცრები

ცეოლიტები წარმოადგენენ წყლიან კარკასულ ალუმოსილიკატებს, რომლებიც კათიონების სახით შეიცავენ პერიოდული სისტემის I და II ჯგუფის ელემენტებს; ძირითადად, Na , K , Mg , Ca , Sr , Ba . განასხვავებენ ბუნებრივი და სინთეზური წარმოშობის ცეოლიტებს ქიმიური შედგენილობით $\text{M}_{2m}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, სადაც M — ტუტე ან ტუტე მიწათა მეტალების კათიონებია.

ალუმოსილიკატური მატრიცის სტრუქტურულ ბლოკს წარმოადგენს ჟანგბადის ატომებით ერთმანეთთან შეკავშირებული $[\text{SiO}_4]^{4-}$ და $[\text{AlO}_4]^{4-}$ ანიონები. უარყოფითი მუხტის სიჭარბე კომპენსირებულია ტუტე და ტუტე მიწათა მეტალების იონებით.

ცეოლიტები წვრილფორიანი სორბენტების რიცხვს მიეკუთვნება და ნივთიერების შთანთქმა მათზე ხორციელდება ადსორბციულ ღრუებში, რომლებიც ერთმანეთთან ერთდებიან მკაცრად განსაზღვრული ზომების შესასვლელი ფანჯრებით, რის გამოც ყველა ნივთიერება არ შთაინთქმება ცეოლიტის მიერ. იგი ახდენს ნივთიერებათა შერჩევით შთანთქმას მათი მოლეკულური ზომების მიხედვით, რაც გახდა მიზეზი ცეოლიტების მეორე სახელწოდებისა — **მოლეკულური საცრები**. ცხრილში 2.3. მოყვანილია პრაქტიკაში ფართოდ გავრცელებული ზოგიერთი სინთეზური ცეოლიტების ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლები.

ფორების დიამეტრი მოლეკულურ საცრებში განისაზღვრება კათიონების ატომების ზომების შესაბამისად. [1,7]. ნარევების დაყოფა ცეოლიტებზე შეიძლება განხორციელდეს როგორც კრისტალის ზედაპირზე, ასევე მის მოცულობაში და ძირითადად სწორედ ეს უკანასკნელია გამოყენებული პრაქტიკაში, თუმცა პირველ ვარიანტს გააჩნია დიდი პერსპექტივა მაღალმდუღარე ნარე-

ცხრილი 2.3.

ცეოლიტების ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლები

ცეოლიტი	ფორმულა	კრისტალო- გრაფიული მონაცემები	სიმკვ რივე გ/სმ ³	ფანჯრების დიამეტრი, Å
NaA(4A)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4,5\text{H}_2\text{O}$	კუბური	1.99	4
CaX(5A)	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4,6\text{H}_2\text{O}$	"	1.98	5
NaX(13X)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2,5\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	"	1.93	9.0
CaX(10X)	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2,5\text{SiO}_2 \cdot 6,2\text{H}_2\text{O}$	"	1.92	8.0
NaY	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4,8\text{SiO}_2 \cdot 8,9\text{H}_2\text{O}$	"	1.92	7.4
NaM-მორდენიტი	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	რომბული	2.13	4.0
ერიონიტი	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{N}_2, \text{K}_2) \text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	ჰექსაგონური	2.02	3.6×5.2
L	$(\text{K}_2, \text{Na}_2) \text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	"	2.11	7.1

ვების სწრაფი დაყოფის და ანალიზისათვის [8,9]. ცეოლიტებზე ძირითადად სორბირდებიან ნივთიერებები, რომლის მოლეკულებსაც გააჩნიათ კრისტალური მესრის შიგნით შეღწევის უნარი. ასეთებია ხაზოვანი სტრუქტურის მოლეკულები (ნორმალური ნახშირწყალბადები), ადსორბცია ძნელდება იზონაერთებისთვის. ქრომატოგრაფიაში ძირითადად გამოიყენება A, X და Y ტიპის ცეოლიტები.

ცეოლიტები აირქრომატოგრაფიაში გამოიყენება სამი მიმართულებით:

- როგორც ადსორბენტი ისეთი ნივთიერებების ნარევის დასაყოფად, რომელთა მოლეკულებს აქვთ უნარი შეაღწიონ ცეოლიტის ფორებში.
- როგორც მოლეკულურ-საცრული ეფექტის მქონე მასალა, როდესაც მოლეკულათა ზომების გამო ხდება ზოგიერთი მათგანის შეკავება და სხვა მოლეკულების სწრაფად გამორეცხვა სვეტიდან;
- როგორც მასალა ისეთი ნაერთების დასაყოფად, რომელთა დაყოფაც ხდება ცეოლიტის გარე ზედაპირზე [10];

CaA, NaX და NaA ტიპის ცეოლიტების გამოყენებით შეიძლება დაიყოს წყალბადის იზოტოპები (D_2 , HD_2 , H_2 , HD , HT , DT , T_2). A და X ტიპის ცეოლიტები კარგი სორბენტებია ინერტული აირების დასაყოფად. ნახშირბადოვანი აირების (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_4 , C_4H_{10} , C_3H_6) დასაყოფად ფართოდ გამოიყენება A, X და Y-ის სამრეწველო ნიმუშები. ცეოლიტის საშუალებით ადვილად იყოფა ისეთი რთულად დასაყოფი ბინარული ნარევი, როგორიცაა O_2 და N_2 [7].

სხვადასხვა ტიპის ცეოლიტების ქრომატოგრაფიული თვისებები შესწავლილია საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის პ. მელიქიშვილის სახელობის ფიზიკური და ორგანული ქიმიის ინსტიტუტის ქრომატოგრაფიის ლაბორატორიაში.

დიდი პერსპექტივა გააჩნია ცეოლიტების გამოყენებას ზედაპირულ-ფენოვანი სორბენტების სახით, რადგან ასეთ შემთხვევაში მცირდება დიფუზიის გზა მარცვლების შიგა მოცულობაში და შესაბამისად მცირდება საანალიზო ნივთიერების დიფუზიის დრო. ადსორბციისა და დაყოფის პროცესები ხორციელდება აქტიური სორბენტის სისქის მქონე თხელ ზედაპირულ ფენაში. ნაშრომში [11]

მოყვანილია სტანდარტულ მყარ სარჩულებზე ქრომატონი N, ქრომოსორბი W და ვულკანური წილის საფუძველზე მიღებულ მყარ სარჩულებზე დაფენილი ტუტე და ტუტე მინათა მეტალების შემცველი კათიონმოდულირებული X ტიპის ცეოლითის ადსორბციული თვისებები. ზედაპირულ-ფენოვან სორბენტებზე შეკავება ხორციელდება როგორც აქტიურ სორბენტზე, ასევე მყარ სარჩულზე. ამასთანავე, მყარ სარჩულზე ადსორბციამ შეიძლება მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანოს შეკავებითი მოცულობების სიდიდეში. მეტად საინტერესო მონაცემებია მოყვანილი ნაშრომში [12]. კერძოდ, ნაჩვენებია, რომ საანალიზო ნივთიერებების ადსორბციის წილი აქტიურ სორბენტზე იზრდება მყარ სარჩულზე ცეოლითის დატანის პროცენტის ზრდის შესაბამისად, ხოლო ზედაპირულ-ფენოვანი სორბენტების გამოყენებისას მიიღება უფრო სიმეტრიული პიკები, რადგან სორბციისა და დესორბციის პროცესები ხორციელდება ძირითადად აქტიური სორბენტის მხოლოდ თხელ ფენაში, სადაც ადსორბციული წონასწორობის დამყარების მაჩვენებელი არის სწორედ პიკების სიმეტრიულობა. ადსორბციის სითბოს გამოსათვლელად ზედაპირულ-ფენოვანი სორბენტების გამოყენებისას აუცილებელი არ არის ისეთი ინტერვალის შერჩევა, სადაც პიკები უფრო სიმეტრიულია (როგორც ეს ხდება მოცულობითი სორბენტების გამოყენებისას).

ზედაპირულ-ფენოვანი სორბენტების გამოყენება მნიშვნელოვნად ამცირებს ანალიზის დროს, ქრომატოგრაფიული სვეტის გახურების ტემპერატურას, აფართოებს საანალიზო ნივთიერებების ასორტიმენტს, თავიდან იცილებს ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვას, რაც დამახასიათებელია მოცულობითი სორბენტებისთვის.

2.1.2.6. ფოროვანი მინა

კისილიოვის კლასიფიკაციის მიხედვით ფოროვანი მინა ადსორბენტების II ტიპს მიეკუთვნება.

ფოროვან მინას გააჩნია სილიციუმის დიოქსიდის ღრუბლოვანი კარკასი. 3-10 ნმ ფორების დიამეტრის მქონე ეს ადსორბენტი გამოიყენება დაბალმდულარე აირების, ხოლო დიდი დიამეტრის ფორების მქონე (30-50 ნმ) სორბენტები საშუალო პოლარობის მქონე სითხეების დასაყოფად, რომელთა დუღილის ტემპერატურაა 200°C [2].

2.1.2.7. პოლიმერული სორბენტები

პოლიმერული სორბენტები, რომლებიც დღეისათვის ფართოდ გამოიყენება ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში, მიიღება სხვადასხვა ფუნქციონალური ჯგუფების შემცველი მონომერების პოლიმერიზაციის შედეგად. მზა პოლიმერს ახასიათებს ერთგვაროვანი ფორიანობა, თერმული მდგრადობა 200-300°C-ზე და რეგულირებადი სორბციული თვისებები. ცხრილში 2.4. მოყვანილია ფართოდ გავრცელებული ზოგიერთი პოლიმერული სორბენტის თვისებანი [1]:

ცხრილი 2.4.

ფოროვანი პოლიმერული სორბენტების ფიზიკური თვისებები

სორბენტი	ტიპი	ხვედრითი ზედაპირი, მ ² /გ	ფორების საშუალო რადიუსი, ნმ	ტემპ. ზღვარი °C
პორაპაკი P	სტ—დვბ	225-350		250
პორაპაკი Q	ევბ—დვბ	500-700	4	250
პორაპაკი S	ვპირ	300-450	5	250
პორაპაკი T	ეგდმა	250-300	10	200
ქრომოსორბი 101	სტ—დვბ	50	300-400	275
ქრომოსორბი 102	სტ—დვბ	300-500	8	250
ქრომოსორბი 103	პსტ	15-25	150-200	275
ქრომოსორბი 104	აკნ—დვბ	100-200	30-40	250
ქრომოსორბი 105	აე	600-700	20-30	250
ქრომოსორბი 106	სტ	700-800	250	250
ქრომოსორბი 107	აე	100-200	0.25	250
პოლისორბი 1	სტ—დვბ	100-200	60-70	250
პოლისორბი 2	სტ—დვბ	40-50	160-200	200
პოლისორბონიტრილი	აკნ—დვბ	80-100	60-70	200
ნიტროპოლისორბი 1	პს-1, NO ₂	100-250	40-50	200
ტენაქსი GC	პდფფო	19		380

სტ - სტიროლი; დვბ - დივინილბენზოლი; ევბ - ეთილვინილბენზოლი; ვპირ - ვინილპიროლიდონი; ეგდმა - ეთილენგლიკოლ დიმეთაკრილატი; პსტ - პოლისტიროლი; აკნ - აკრილნიტრილი; აე - აკრილეთერი; პდფფო - *p*-2,6-დიფენილ-ფენილენოქსიდი; პს - პოლისორბი.

პოლარობის ზრდის მიხედვით აღნიშნული სორბენტები განლაგდებიან შემდეგი თანმიმდევრობით: პორაპაკი Q, ქრომოსორბი 102, პოლისორბი 1 < პორაპაკი P < ქრომოსორბი 101, პოლისორბი 2 < პორაპაკი S, ქრომოსორბი 103 და 105, პოლისორბატი < ქრომოსორბი 107 და 108, ქრომოსორბი 104, პოლისორბონიტრილი.

ცხრილში 2.5. მოყვანილია პოლიმერული სორბენტების გამოყენების შესაძლებლობანი.

უნდა აღვნიშნოთ, რომ შეკავების მახასიათებლები პოლიმერულ სორბენტებზე არ გამოირჩევიან მუდმივობით, ხოლო ზოგი ამ სორბენტთაგანი ურთიერთქმედებაში შედის საანალიზო ნივთიერებებთან. მაგალითად, პორაპაკი N რეაგირებს ამინებთან, პორაპაკი Q და ქრომოსორბი 102 აზოტის დიოქსიდთან. ამიტომ სორბენტის შერჩევისას მხედველობაში მიიღება ეს გარემოებანი [1,13,14].

ცხრილი 2.5.

პოლიმერული სორბენტების გამოყენების სფერო

სორბენტი	დასაყოფი ნივთიერებები	გამოსაღებარია ნივთიერებებისთვის
ქრომოსორბი 101 პორაპაკი P პოლისორბი 2	ნახშირწყალბადები, მარტივი და რთული ეთერები, კეტონები, სპირტები, ალდეჰიდები, ცხიმოვანი მჟავები.	ამინები, ანილინი
ქრომოსორბი 102 პორაპაკი Q პოლისორბი 1 პოლისორბი 10	მსუბუქი აირები, დაბალ მოლეკულური მჟავები, სპირტები, კეტონები, ალდეჰიდები, გლიკოლები, ეთერები, ნიტრილები, ნიტროალკანები	იგივე
ქრომოსორბი 103	სპირტები, ალდეჰიდები, კეტონები, ამინები, ამიდები, ჰიდრაზენი	მჟავა თვისებების ნივთიერებები, გლიკოლები
ქრომოსორბი 104 პოლისორბონიტრილი	გოგირდშემცველი აირები, აზოტის ოქსიდები, ნიტრონაერთები, ნიტრილები, ქსილოლები	გლიკოლები, ამინები
ქრომოსორბი 105 პორაპაკი N პოლისორბატი	უმეტესი აირები, ფორმალდეჰიდის წყალხსნარები, მსუბუქი ნახშირწყალბადები	გლიკოლები, მჟავები, ამინები
პორაპაკი P	მარტივი და რთული ეთერები, ნიტრილები, ნიტრონაერთები	გლიკოლები, ამინები

2.1.3. აირ-თხევადი ქრომატოგრაფია

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, აირ-თხევად ქრომატოგრაფიაში უძრავ ფაზას წარმოადგენს სითხე დაფენილი მყარ სარჩულზე. სხვაგვარად რომ ვთქვათ, უძრავ ფაზას უწოდებენ სტაციონალურ ფაზას, რომელიც შედგება ორი კომპონენტისგან: უძრავი სითხე და მყარი სარჩული. დაყოფის პროცესი ხორციელდება სელექტიური ურთიერთქმედებით საანალიზო ნივთიერების მოლეკულებსა და თხევად ფაზას შორის. ყველა საანალიზო ნივთიერება სვეტში ყოფნისას ერთი და იგივე დროის განმავლობაში იმყოფება აირად ფაზაში, მაგრამ განსხვავებულია მათი ყოფნის დრო თხევად ფაზაში. თუ განვიხილავთ მოლეკულურ დონეზე, ხსნარში ადგილი აქვს შემდეგი ტიპის მოლეკულათაშორის ურთიერთ-

ქმედებებს: დისპერსიულ, ინდუქციურ, დონორ-აქცეპტორულ, ორიენტაციულ (წყალბადური ბმების ჩათვლით) და სხვა ურთიერთქმედებებს. ცხრილში 2.6. მოყვანილია ამ ძალების გამოვლენის თავისებურებები:

ცხრილი 2.6.

**ნივთიერებასა და თხევად უძრავ ფაზას შორის არსებული
მოლეკულური ურთიერთქმედებების ძალები**

ძალის ტიპები	ხასიათი	შენიშვნა
დისპერსიული (ლონდონის) ძალები	აღიძვრება ელექტრული ველის ზემოქმედებით, ბირთვებსა და ელექტრონებს შორის წარმოქმნილი სწრაფად ცვალებადი წამიერი დი- პოლების მიერ	არაპოლარულ მოლეკულებს შორის არსებული ურთიერთ- ქმედების ერთადერთი ტიპი, რომელიც არ არის დამოკიდე- ბული ტემპერატურაზე. ეს ძა- ლები მოქმედებენ ნივთიერე- ბა-გამხსნელის ნებისმიერ სი- სტემაში.
ინდუქციური (დებაის) ძალები	წარმოიქმნება ნივთიერების მუდ- მივი დიპოლის ურთიერთქმედე- ბით გამხსნელის პოლარიზებად მოლეკულასთან და პირიქით	სუსტი ძალებია და მცირდება ტემპერატურის მომატებით.
ორიენტაციული (კეეზომის) ძალები	აღიძვრება ორი მუდმივი დიპოლის ურთიერთქმედების შედეგად. წყალბადური ბმები ამ ძალებს მიეკუთვნება.	მცირდება ტემპერატურის მომატებით და ნულის ტოლი ხდება მაღალ ტემპერატურაზე.
დონორულ- აქცეპტორული	ქიმიური ურთიერთქმედება, გან- პირობებული შევსებული ორბიტა- ლიდან ელექტრონის ნაწილობრივ გადასვლით აქცეპტორის თავისუ- ფალ ორბიტალზე	მოიცავს კოორდინაციულ ურთიერთქმედებებს მეტალის იონსა და ოლეფინებს შორის, მუხტის გადატანას წყალბა- დური ბმების ხარჯზე.

2.1.3.1. მყარი სარჩულები აირ-თხევად ქრომატოგრაფიაში

მყარი სარჩულები მცირე ხვედრითი ზედაპირის მქონე ინერტული ადსორ-
ბენტებია, რომლის ზედაპირზეც თანაბარი სისქის თხელი აპკის სახით სორბირ-
დება უძრავი სითხე. ოპტიმალური მყარი სარჩული უნდა ხასიათდებოდეს
შემდეგი თვისებებით [3,5,15,16]:

- ქიმიური ინერტულობა;
- მცირე ხვედრითი ზედაპირი;
- თერმული მდგრადობა;
- მექანიკური სიმტკიცე;
- მცირე წინააღმდეგობა მოძრავი ნაკადის მიმართ.

მყარი სარჩულის ზედაპირზე თხევადი ფაზის თანაბარი ფენის წარმოქმნისთვის მის ზედაპირს განსაკუთრებული სტრუქტურა უნდა ჰქონდეს. მიჩნეულია რომ სარჩულის ზედაპირი 1-3 მ²/გ ტოლი უნდა იყოს. სვეტის დაყოფის უნარიანობის ამაღლებაში მნიშვნელოვან როლს თამაშობს აგრეთვე მყარი სარჩულის ნაწილაკების ზომები. ნაწილაკის ზომების დახარისხება ხდება სედიმენტაციის მეთოდით ან უბრალოდ მათი გაცრით შესაბამისი ზომის საცრებში. ყოველ საცერს აქვს თავისი ნომერი, რომელიც შეესაბამება ხვრელების ზომას ან ხვრელების რიცხვს ერთი დიუმის (2.54სმ) სიგრძეზე (საერთაშორისო სტანდარტების მიხედვით). შერჩეული ფრაქცია სასურველია იყოს ვიწრო დიაპაზონში, რადგან მასზეა დამოკიდებული აირმატარებლის დინების ერთგვაროვნება. მაგალითად, თუ ერთმანეთში ავურევთ 0.25-0.3 მმ და 0.4-0.6 მმ ზომის ნაწილაკებს, სვეტის ეფექტურობა მკვეთრად დაეცემა.

დიდი ზომის ნაწილაკების გამოყენებისას იზრდება სვეტში ცარიელი მოცულობის სიდიდე და შესაბამისად იზრდება აირმატარებლის ნაკადის არაერთგვაროვნება კვეთის გასწვრივ და შესაბამისად შიგა დიფუზიის მანძილი. ნაწილაკის ზომების ძლიერ შემცირება კი იწვევს ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის მნიშვნელოვნად გაზრდას და ნაწილაკების ერთმანეთთან შენეებას მაღალი წნევის გამო. სისტემის ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობაზე გავლენას ახდენს აგრეთვე სვეტის შევსების სიმკვრივე. რადგან სხვადასხვა ტიპის მყარი სარჩულები ძლიერ განსხვავდებიან ერთმანეთისგან, ერთი უნივერსალური რეკომენდაცია ყველა მათგანისთვის არ არსებობს. ამიტომ, სვეტის შევსება ისე უნდა მოხდეს, რომ აირმატარებლის ოპტიმალური სიჩქარის შემთხვევაში წნევა სვეტის შესასვლელში არ იყოს ძლიერ მაღალი.

აირკრომატოგრაფიაში უპირატესად გამოიყენება 0.5×10^{-3} - 1.5×10^{-3} მმ ფორების დიამეტრის მქონე სარჩულები. მათზე უძრავი ფაზის დატანისას მისი უმეტესი ნაწილი ხვდება ფორებში და მხოლოდ თხელი აპკი ფარავს დარჩენილ ზედაპირს, რის შედეგადაც მიიღწევა დაყოფის მაღალი ეფექტურობა. 1.5×10^{-3} მმ-ზე მეტი ფორების დიამეტრის შემთხვევაში დაყოფის ეფექტურობა მცირდება მსხვილი ფორების უძრავი ფაზით მთლიანად შევსების გამო, რაც იწვევს ქრომატოგრაფიული ზოლების დამატებით წარეცხვას.

განასხვავებენ მინერალურ და პოლიმერულ მყარ სარჩულებს. მინერალური სარჩულების უმეტესობა წარმოადგენს გადამუშავებულ დიატომიტს, რომლის საწყისი ზედაპირია 20 მ²/გ. სხვადასხვა ადგილზე მოპოვებული დიატომიტის შედგენილობა დაახლოებით ერთნაირია: SiO₂ -90-92%; Al₂O₃ -4-5%; Fe₂O₃ 0.1-2%; CaO 1-1.5%; MgO 0.4%; აქროლადი მჟავები 0.2-0.4%.

ერთ-ერთი პირველი დიატომიტური მყარი სარჩული, რომელიც გამოიყენეს ქრომატოგრაფიაში იყო ცელიტ 545. მის მისაღებად დიატომიტურ თიხას ურევნენ 2-5% ნატრიუმის კარბონატს და ახდენენ კალცინირებას 1000°C-ზე. ამ პროცედურის შედეგად მიიღება თეთრი ფოროვანი ნივთიერება 1 მ²/გ ხვედრითი ზედაპირით. თვისებებით იგი ქრომოსორბი W მსგავსია.

განსაკუთრებით გავრცელებული მყარი სარჩულებია ამერიკული ფირმა „Johns Manvill“-ის მიერ წარმოებული სხვადასხვა სახის ქრომოსორბები, რომელთა ხუთ სახეობას განასხვავებენ: A, G, P, W, და T. თითოეული მათგანი მზადდება

როგორც დამუშავებული, ასევე დაუმუშავებელი სახით და ნაწილაკების სხვადასხვა ზომით. განვიხილოთ ისინი:

ქრომოსორბი A გამოიყენება პრეპარატულ აირქრომატოგრაფიაში. გააჩნია საკმაოდ დიდი ტევადობა თხევადი ფაზის მიმართ (25 %-მდე), ხასიათდება მექანიკური სიმტკიცით და მცირე ადსორბციული აქტიურობით.

ქრომოსორბი G გამოიყენება პოლარული ნივთიერებების დასაყოფად მაღალი ტემპერატურის პირობებში. მცირე ხვედრითი ზედაპირის და მაღალი სიმკვრივის გამო იგი ცვლის ისეთ მსხვრევად სარჩულებს, როგორიცაა ქრომოსორბი W. ხვედრითი ზედაპირის სიმცირის გამო მასზე დაიტანება თხევადი ფაზის მცირე რაოდენობა (ქრომოსორბ G-ზე სითხის 5%-ს შეესაბამება ქრომოსორბ W-ს 12%).

ქრომოსორბი W კალცინირებული დიატომიტური სარჩულია. იგი თეთრი ფერისაა და უფრო მსხვრევადია. მისი ზედაპირის ინერტულობა მაღალია და გამოიყენება პოლარული ნივთიერებების დასაყოფად.

ქრომოსორბი P წარმოადგენს ვარდისფერ, მეტად მაგარ კალცინირებულ დიატომიტს ძლიერი ადსორბციული აქტიურობით და ძირითადად გამოიყენება ნახშირწყალბადების დასაყოფად.

ქრომოსორბი T ფტორნახშირბადული პოლიმერია, რომელიც მიიღება ტეფლონ ბ-ის გაცრით. რეკომენდებულია მაღალი პოლარობის ან რეაქციისუნარიანი ნარევების დასაყოფად (წყალი და ჰალოგენები). მათ მიმართ აღნიშნული სარჩულის ზედაპირი ინერტულია და მიიღება სიმეტრიული პიკები [17,18].

ცხრილში 2.7. მოყვანილია განხილული მყარი სარჩულების ძირითადი თვისებები.

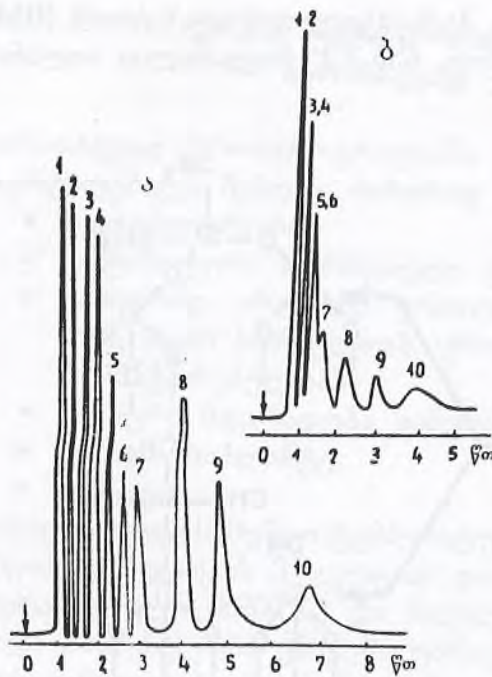
ცხრილი 2.7.

ძირითადი სარჩულების ფიზიკური თვისებები

სორბენტი	სიმკვრივე გ/სმ ³	ხვ. ზედაპირი მ ² /გ	მაქს. დასატანი ფაზა, %	pH
ქრომოსორბი G	0.58	0.5	5	8.5
ქრომოსორბი P	0.47	4.0	30	6.5
ქრომოსორბი W	0.24	1.0	20	8.5
ქრომოსორბი A	0.49	2.7	25	7.1
ცელიტი 545	0.34	1.1	30	8.3

ახალი ტიპის მყარი სარჩულები დამზადდა ვულკანური წილების ტუტე-მჟავური დამუშავებით, რომელთა ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლები (ზედაპირის ფართი, pH, მექანიკური სიმტკიცე, ნაყარი წონა) დიატომიტებისგან მიღებული მყარი სარჩულების თანაბარია, მაგრამ ხასიათდებიან უფრო დაბალი ადსორბციის უნარით და კატალიზური აქტიურობით (ქრომოსორბი W).

აღნიშნული სარჩულების გამოყენებით უკეთესად იყოფიან ნახშირწყალბადები, არომატული სპირტები, კეტონები და სპირტები. ნახაზზე 2.2. მოყვანილია ნაჯერი არომატული ნახშირწყალბადების დაყოფის ქრომატოგრამები წილის მყარი სარჩულის (ა) და ქრომოსორბი W (ბ) გამოყენებით [19,20].



ნახ. 2.2 ნაჯერი და არომატული ნახშირწყალბადების ნარევის ქრომატოგრამები, ვულკანური წილის (ა) მყარ სარჩულზე და ქრომოსორბ W-ზე (ბ);
თხევადი ფაზა: 1,2,3-ტრი(β-ციანეტოქსი)-პროპანი 5%.
პიკები: 1-პენტანი, 2-ჰექსანი, 3-ჰეპტანი, 4-ოქტანი, 5-ბენზოლი, 6-ნონანი, 7-ტოლუოლი, 8-ეთილბენზოლი, 9-კუმოლი, 10-ფსევდოკუმოლი.

ურობა განსაკუთრებით ვლინდება პოლარული ნივთიერებების დაყოფისას, შეიმჩნევა პიკების ასიმეტრია, საანალიზო ნივთიერებების ადსორბცია და მათი დაშლაც კი. ეს უარყოფითი ფაქტორები გამოწვეულია დიატომიტური მატარებლების ზედაპირზე მეტალების (რკინა, ალუმინი) და სილანოლური ჯგუფების არსებობით. აქტივაციის შემცირების სხვადასხვა მეთოდებს შორის უფრო ხშირად გამოიყენება ორი: მყარი სარჩულების გარეცხვა მჟავით ან ტუტით, მეტალების მოსაცილებლად და სილანოლური ჯგუფების მოდიფიკაცია,

დიატომიტების საფუძველზე მომზადებული მყარი სარჩულების გარდა პრაქტიკაში ზოგჯერ გამოიყენება განსაკუთრებით მცირე ხვედრითი ზედაპირის მქონე მინის ბურთულები, რომლებზეც დაიტანება ისეთი უძრავი ფაზები, როგორიცაა გრაფიტირებული ქვარტლი (0.5%), სილიკაგელი და პოლიმერული სარჩულები (30%). ამ ტიპის სორბენტებს მოდიფიცირებულ ადსორბენტებს უწოდებენ.

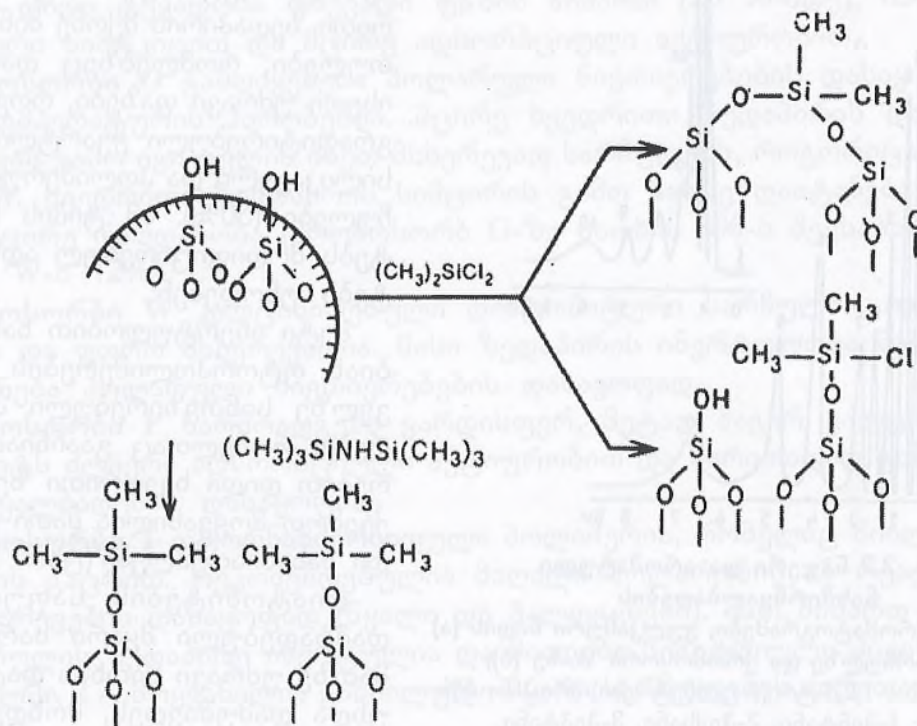
მეტი ინერტულობით ხასიათდებიან ფტორპოლიმერების საფუძველზე სინთეზირებული პოლიმერები, რომელთაც გააჩნიათ შედარებით დიდი ხვედრითი ზედაპირი. ქვემოთ მოყვანილია მათი ძირითადი მახასიათებლები (ცხრ. 2.8) [1].

დიატომიტების საფუძველზე დამზადებული მყარი სარჩულები მათზე უძრავი სითხის დატანამდე უნდა დამუშავდეს, მოხდეს მათი მოდიფიკაცია აქტიური ცენტრების მოცილების მიზნით. მყარი სარჩულის ადსორბციული აქტი-

ცხრილი 2.8.

	ფლუოროპაკი 80	ტეფლონი 6	ქრომოსორბი T	პოლიქრომი 1
ხვედრითი ზედაპირი, მ ² /გ	1:3	10.6	8	12
თხევადი ფაზის მაქსიმალური რაოდენობა, %	2-3	15-20	15-20	15-20
მაქსიმალური ტემპერატურა	275	250	240	240

მათი დიმეთილდიქლორსილანთან (DMDS), ჰექსამეთილდისილაზასთან (HMDS) ან მათ კომბინაციასთან ურთიერთქმედებით. ნახ.2.3. მოყვანილია სილანიზაციის სქემა.



ნახ. 2.3. მყარი სარჩულის დამუშავება სილანიზაციით

სარჩულის დამუშავების შესაბამისად განასხვავებენ სამ გრადაციას: NAW-დამუშავებული (საწყისი); AW-მჟავით გარეცხილი; AW-DMDS ან AW-HDMS-გარეცხილი მჟავით და დამუშავებული დიმეთილ- ან დიქლორსილანით, ჰექსამეთილდისილანაზით ან სხვა რეაგენტებით. ამგვარი დამუშავებების შემდეგაც დიატომიტური სარჩულები მთლიანად არ კარგავენ აქტიურ ცენტრებს, რაც ინვეეს მჟავა და ფუძე თვისებების საანალიზო კომპონენტების ზონის უკანა ფრონტის წარეცხვას. „კუდების“ წარმოქმნის თავიდან ასაცილებლად სარჩულებს ამუშავებენ საანალიზო ნივთიერებაზე უფრო ძლიერი მჟავა და ფუძე თვისებების მქონე ნივთიერებების მცირე რაოდენობით. მაგალითად, ამინების დასაყოფად უმატებენ KOH-ის გარკვეულ პროცენტს, ხოლო მჟავური ნივთიერებების დაყოფისთვის ფოსფორმჟავას.

2.1.3.2. უძრავი სითხეები (თხევადი ფაზები) აირ-თხევად ქრომატოგრაფიაში

აირ-თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული უძრავი სითხეები უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ ძირითად მოთხოვნებს [3,15]:

- სელექტიურობა;
- ოპტიმალური სორბციული ტევადობა;
- ქიმიურად არ უნდა ურთიერთქმედებდეს საანალიზო ნივთიერებებთან, მყარ სარჩულთან, ქრომატოგრაფიული სვეტის კედლებთან და აირმატარებელთან;
- ქიმიური მდგრადობა სამუშაო პირობებში;
- დაბალი სიბლანტე;
- სიიაფე.

გამოყენებული სამუშაო ტემპერატურული ზღვარის მიხედვით, უძრავი სითხეები შეიძლება დაიყოს 3 ჯგუფად: დაბალტემპერატურული ($\geq 100^{\circ}\text{C}$); საშუალო ტემპერატურული ($\geq 200^{\circ}\text{C}$) და მაღალტემპერატურული ($\geq 300^{\circ}\text{C}$).

დიდი მნიშვნელობა ენიჭება უძრავი სითხის პოლარობას, რომელიც გამოხატავს განსხვავებული ფუნქციონალური ჯგუფების არსებობის შედეგად აღძრული სხვადასხვა სახის ძალების ერთდროული მოქმედების ბალანსს. უძრავი სითხის პირობითი პოლარობა გაანგარიშებულია რორშნაიდერის მიერ და გამოისახება P სიდიდით [1]:

$$P=100 - 100(q_1-q_x)/(q_1-q_2) \quad (2.1)$$

რორშნაიდერი ერთ-ერთი უძრავი ფაზის ($\beta_1\beta'$ -ოქსიდიპროპიონიტრილი) პოლარობას თვლიდა 100%, ხოლო მეორე ფაზის (სკვალანი) პოლარობას მიიჩნევდა 0-ის ტოლად. სტანდარტული ნივთიერებების სახით მან შეარჩია ბუტანი (A) და ბუტადიენი (B). ნარმოდგენილ ფორმულაში q_1 არის $\lg(V_B/V_A)$ ($\beta_1\beta'$ -ოქსიდიპროპიონიტრილზე); q_2 - $\lg(V_B/V_A)$ სკვალანით შევსებულ სვეტზე; q_x - $\lg(V_B/V_A)$ საკვლევ თხევად ფაზაზე. ამგვარად გამოთვლილი პოლარობის მიხედვით ყველა უძრავი ფაზა იყოფა ოთხ ჯგუფად: არაპოლარული ($P=0-5\%$); მცირეპოლარული ($P=5-15\%$); ზომიერად პოლარული ($P=15-35\%$) და ძლიერ პოლარული ($P=50-100\%$).

უძრავი სითხის ბუნება განსაზღვრავს სვეტის სელექტიურობას და სვეტიდან კომპონენტების გამოსვლის თანმიმდევრობას. სვეტის სელექტიურობის მართვა არის აირ-თხევადი ქრომატოგრაფიის ერთ-ერთი უპირატესობა. სწორედ უძრავი სითხის სწორი შერჩევა არის საფუძველი ისეთი რთული ნარევების დაყოფისა, როგორიც არის არომატული o -, m -, p - (ორთო-, მეტა-, პარა-) იზომერები, ნაჯერი ნახშირწყალბადების და მათი წარმოებულების ცის-ტრანს იზომერები, დიასტერეოიზომერები და ოპტიკური იზომერები.

ცხრილში 2.9. მოყვანილია ზოგიერთი უძრავი ფაზები, მათი მუშაობის ტემპერატურული ზღვარი და შესაბამისი გამხსნელები. [1]

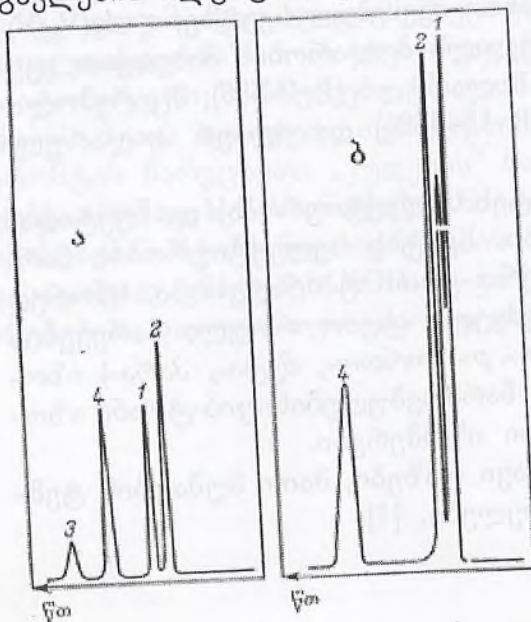
ცხრილი 2.9.

აირ-თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული
ზოგიერთი ფართოდ გავრცელებული უძრავი ფაზები

უძრავი ფაზა	ტემპ. შუალედი, °C	გამხ- სნელი	უძრავი ფაზა	ტემპ. შუალედი, °C	გამხ- სნელი
სკვალანი	20-100	ქ, ტ	სილიკონი OV-11	0-350	ქ, ტ
აპიეზონი M	50-300	ქ, ტ	დინონილფტალატი	20-150	ა
აპიეზონი L	50-300	ქ, ტ	ხალკამიდი M-18	40-150	მ, ქ
სილიკონი SE-30	50-300	ქ	სილიკონი OV-17	0-375	ქ, ტ
სილიკონი OV-1	100-350	ქ, ტ	ბენტონ-34	0-180	ტ
სილიკონი DC-200	0-200	ქ, ტ	ტრიკრეზოლფოსფატი	20-125	ქ, მ
სილიკონი OV-101	0-350	ქ	სილიკონი OV-210	0-275	ა
სილიკონი E-52	50-300	ქ, ტ	სილიკონი OV-210	0-200	ა
სილიკონი E-54	50-300	ქ, ტ	ტრიტონი	0-200	მ
სილიკონი OV-3	0-350	ქ, ტ	იგეპალი CO-990	100-200	მ
სილიკონი OV-7	0-350	ქ, ტ	SP-1000	50-270	ქ
დექსილი 400	50-400	ტ	კარბოვაქსი 20000	60-225	ქ
სილიკონი DC-550	20-250	ა, ტ	კარბოვაქსი 4000	60-200	ქ
სილიკონი XE-60	0-250	ა	კარბოვაქსი 1500	50-175	ქ
სილიკონი OV-225	0-265	ა, ქ	პოლიპროპილენ-		
FFAP	50-250	ქ	გლიკოლი 1025	0-125	მ
კარბივაქსი 1000	40-150	ქ	პოლიპროპილენ-		
რეოპლექსი 400	30-200	ა	გლიკოლი 425	0-200	მ
დიეთილენგლიკოლი	0-200	ა	β, β-ოქსიდიპროპილ	0-9	მ
			ნიტრილი		

გამხსნელები: ა-აცეტონი; მ-მეთანოლი; პ-პირიდინი; ტ-ტოლუოლი;
ეა-ეთილაცეტატი; ქ-ქლოროფორმი

უძრავი სითხის ბუნების კომპონენტების ელუირების თანმიმდევრობაზე
გავლენის ილუსტრირებას ახდენს ნახ.2.4-ზე მოყვანილი ქრომატოგრამა [3].



ნახ. 2.4. C₆ ნახშირწყალბადების ნარევის
ქრომატოგრამა სკვალანზე (ა) და
პოლიეთილენგლიკოლადინატზე (ბ)
1-ი-ჰექსანი; 2-ჰექსენი; 3-ციკლოჰექსანი; 4-ბენზოლი

ქვემოთ მოყვანილია ზოგიერთი ამ უძრავი თხევადი ფაზების გამოყენების მაგალითები სხვადასხვა ნარევების დასაყოფად[21]:

აპიეზონი L (Apiezon L).

გამხსნელი: ტოლუოლი;

$t_{\max}$ -50-350°C;

გამოიყენება: რთული ეთერების, ალდეჰიდების, კეტონების, პარაფინების დასაყოფად.

სკვალანი

($C_{30}H_{62}$),

2, 6, 10, 15, 19, 23 ჰექსამეტილ ტეტრაკოზანი

გამხსნელი: ქლოროფორმი;

T (დუღილის) = 274°C;

d_4^{20} = 0.805;

გამოიყენება: ნახშირწყალბადების და მჟავების დასაყოფად.

აპიეზონი M (Apiezon M)

გამხსნელი: ბენზოლი, ტოლუოლი;

$t_{\max}$ -50-275°C;

T (დნობის) = 44°C;

გამოიყენება: რთული ეთერების, კეტონების, პარაფინების დასაყოფად.

გლიცერინი

($C_3H_8O_3$), მოლეკულური წონა 92.02

გამხსნელი: წყალი, მეთანოლი;

T (დუღილის) = 290°C;

d_4^{20} = 1.2613;

გამოიყენება: დაბალმდულარე სპირტების დასაყოფად.

კარბოვაქსი 1000

(PEG-100)-პოლიეთილენგლიკოლი

$HO(CH_2CH_2O)_nH$, მოლ.წონა ≈ 1000

გამხსნელი: ქლოროფორმი, მეთანოლი;

$t_{\max}$ -125°C;

გამოიყენება: პოლარული ნაერთების, წყლის სპირტების, ამინების, კეტონების დასაყოფად.

კარბოვაქსი 1500

(PEG-1500)-პოლიეთილენგლიკოლი

მოლ.წონა ≈ 1500

გამხსნელი: ქლოროფორმი;

$t_{\max}$ -50-165°C;

გამოიყენება: ტეფლონზე დაფენილი წყლის და ცხიმოვანი მჟავების ეთერების დასაყოფად, ხოლო ქრომოსორბ W-ზე დაფენილი ამინების დასაყოფად.

ხალკამიდი M-18

(Hallcomid M-18) -დიმეთილსტეარამიდი

გამხსნელი ქლოროფორმი, აცეტონი;

$t_{\max}$ -150°C;

გამოიყენება: სპირტების, რთული ეთერების, ალდეჰიდების, გლიკოლების დასაყოფად.

**β, β-ოქსიდიპროპილ
ნიტრილი**

(C₆H₈N₂O), მოლეკულური წონა 124.15

გამხსნელი: ქლოროფორმი;

T (დუღილის) = 270°C;

$d_4^{20} = 1.05$;

გამოიყენება: არომატული ნახშირწყალბადების ნარევებისგან გამოსაყოფად, მარტივი ეთერების დასაყოფად.

2.1.3.3 „სუპერსელექტიური“ თხევადი ფაზები

ზოგიერთი უძრავი თხევადი ფაზის სელექტიურობა გამოწვეულია კომპლექსების წარმოქმნით ცალკეულ საანალიზო ნივთიერებებთან, რაც ეფექტური დაყოფის საწინდარია. ასეთ ფაზებს „სუპერსელექტიურ“ ფაზებს უწოდებენ და მათ რიცხვს მიეკუთვნებიან:

ვერცხლის ნიტრატის კომპლექსები: ვერცხლის ნიტრატის ნაჯერი ხსნარი ეთილენგლიკოლში, გლიცერინში, ტრიეთილენგლიკოლში ან ბენზილციანიდში წარმოადგენს მეტად ეფექტურ ფაზას ოლეფინების დასაყოფად, რადგან ვერცხლის იონები წარმოქმნიან არამდგრად კომპლექსებს ოლეფინებთან. სვეტის ტემპერატურა ასეთ დროს 40°C-ზე ნაკლები უნდა იყოს, წინააღმდეგ შემთხვევაში ვერცხლის იონების შემცველი ხსნარი არასტაბილურია.

ვერცხლის წყლის პერქლორატის კომპლექსი: ვერცხლის წყლის პერქლორატი წარმოქმნის π-კომპლექსებს პარაფინებთან, ოლეფინებთან და არომატულ ნახშირწყალბადებთან, ამიტომ იგი გამოიყენება უჯერი ნაერთების მოსაცილებლად.

ბენტონ-34: იგი წარმოადგენს თიხას, რომელშიც ბუნებრივი მონტმორილონიტის თიხის კათიონები ჩანაცვლებულია დიმეთილდიოქტადეცილ ამონიუმის იონებით. მას ურევენ ფტალმჟავას ეთერში და სილიკონის ზეთში. ამ სახით იგი დაიტანება მყარ სარჩულზე. ბენტონ-34-ის სელექტიურობა გამოწვეულია ფენოვანი სტრუქტურით. მყარი სარჩულის ზედაპირზე დაფენილი გაჯირჯვებული გელის ფენებს შორის საანალიზო ნივთიერებების ადსორბცია დამოკიდებულია თვით მოლეკულების გეომეტრიულ ფორმებზე. იგი ძირითადად გამოიყენება *o*-, *m*-, *p*- იზომერების დასაყოფად რადგან, არ ახდენს *p*- იზომერების შეკავებას და იგი *o*-, *m*-, იზომერებზე ადრე ელუირდება.

თხევადი კრისტალები: მათ შუალედური მდგომარეობა უკავიათ მყარ კრისტალურ ნივთიერებებსა და ნორმალურ იზოტროპულ სითხეებს შორის. თხევადი კრისტალები ორ ფაზაში არსებობენ: სმექტიკურში და ნემატიკურში. ნემატიკურ ფაზაში მოლეკულებს შეუძლიათ თავისუფლად გადაადგილდნენ მხოლოდ პარალელურ სიბრტყეში. ამგვარი მოწესრიგებული სტრუქტურის გამო ნემატიკური თხევადი კრისტალები ამჟღავნებენ სელექტიურ მსგავსებას ხაზოვანი მოლეკულების მიმართ.

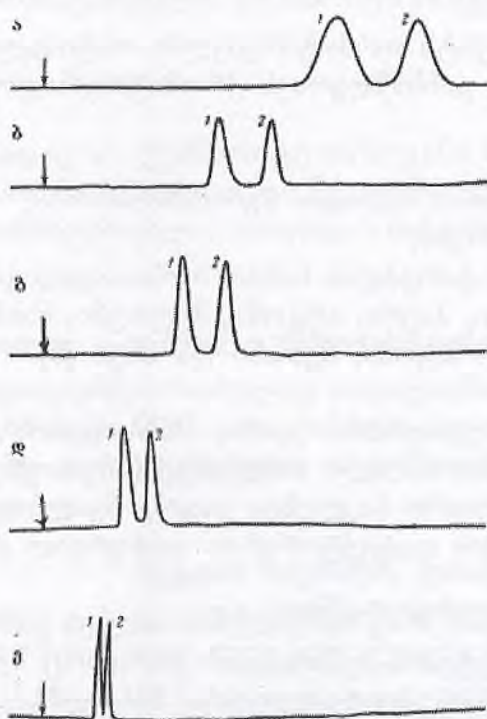
ტეტრაციანეთილპერტაერიტრიტი: ძლიერი სელექტიური ფაზაა არომატული ნახშირწყალბადების მიმართ [15,22].

2.1.3.4. თხევადი ფაზის მყარ სარჩულზე დაფენის მეთოდები

თხევადი ფაზის მყარ სარჩულზე დატანის პროცედურა ერთ-ერთი მეტად მნიშვნელოვანი საფეხურია ქრომატოგრაფიული სვეტის მომზადების პროცესში. აღნიშნული პროცესის ჩასატარებლად არსებობს რამდენიმე ძირითადი მეთოდი, რომელთაგან ჩვენ ყველაზე ფართოდ გამოყენებულს განვიხილავთ. ეს არის **აორთქლების მეთოდი**.

თხევად ფაზას ხსნიან აქროლად გამხსნელში (აცეტონი, დიეთილ ან პეტროლეუმის ეთერი, დიქლორეთანი, ნახშირბადის ტეტრაქლორიდი, მეთანოლი) და ათავსებენ მრგვალძირა კოლბაში, რომელშიც შემდეგ ჩაყრიან მყარ სარჩულს. გამხსნელის რაოდენობა ისე უნდა შეირჩეს, რომ მთელი მყარი სარჩული დაიფაროს სითხით. კოლბას ათავსებენ წყლის აბაზანაზე ან აერთებენ ვაკუუმ-ტუმბოსთან გამხსნელის მოსაცილებლად. მთელი პროცედურის დროს მუდმივად უნდა ხდებოდეს კოლბაში მყოფი მასის არევა. გამხსნელის სრულად მოცილების შემდეგ სორბენტი ითვლება მომზადებულად და შეიძლება მისი გამოყენება.

დიდი მნიშვნელობა აქვს მყარ სარჩულზე დაფენილი თხევადი ფაზის რაოდენობას. მისი სიჭარბის შემთხვევაში ფაზა გროვდება ნაწილაკებს შორის არსებულ სივრცეში და ამცირებს სვეტის ეფექტურობას. დიატომიტების საფუძველზე მომზადებული სარჩულებისთვის მათი წონის 30%-ზე მეტი თხევადი ფაზის დატანისას, სვეტის ეფექტურობა მკვეთრად ეცემა. უპირატესობა



ნახ.2.5. შეკავების დროის დამოკიდებულება თხევადი ფაზის რაოდენობაზე ($t=50^{\circ}\text{C}$).
თხევადი ფაზის შემცველობა %: ა) 30%;
ბ) 20%; გ) 10%; დ) 5%; ე) 1%

ენიჭება სვეტებს, რომლებშიც მყარ სარჩულზე დაფენილი თხევადი ფაზა შეადგენს სარჩულის წონის 2-10%. ასეთი თანაფარდობა ამცირებს ანალიზის დროს, რაც მყარ სარჩულზე დაფენილი თხევადი უძრავი ფაზის რაოდენობის პროპორციულია. ნახ.2.5. ნაჩვენებია შეკავების დროის დამოკიდებულება დაფენილი ფაზის რაოდენობაზე.

მყარი სარჩულის დაფარვისას თხევადი ფაზის მეტად მცირე რაოდენობით, შეიძლება არ მოხდეს აქტიური ცენტრების სრული გადაფარვა, რასაც მოჰყვება საანალიზო ნივთიერებების შეუქცევადი ადსორბცია ან დაშლა. ამასთანავე, ძნელად აქროლადი ნივთიერებები უკეთ იყოფიან, თუ დაფენილი ფაზის რაოდენობა ტოლია ან ნაკლებია 3%. ადვილად აქროლადი ნივთიერებებისთვის საჭიროა თხევადი ფაზის დიდი რაოდენობა (20-30%),

რადგან მცირეა მათი ხსნადობა თხევად ფაზაში. რაც მეტია თხევადი ფაზის რაოდენობა, მით მეტ დროს იმყოფება საანალიზო ნივთიერება მასში და მით უკეთესია დაყოფა [15].

2.1.4. მოძრავი ფაზა აირქრომატოგრაფიაში

საანალიზო სინჯის გადატანას ქრომატოგრაფიული სვეტის გასწვრივ ახდენს აირი, რომელსაც აირმატარებელს უწოდებენ. მას ხშირად განიხილავენ როგორც ინერტულს, რადგან ურთიერთქმედებაში არ შედის არც საანალიზო ნივთიერებებთან და არც უძრავ ფაზასთან. აირმატარებლის ბუნება გავლენას ახდენს ანალიზის ხანგრძლივობაზე, რადგან ნაკადის ოპტიმალური სიჩქარეები სხვადასხვა აირმატარებლებისთვის სხვადასხვაა, და შეკავების დრო მცირდება ნივთიერებების დიფუზიის კოეფიციენტების შემცირებით. ყურადღება ექცევა აგრეთვე აირმატარებლის ღირებულებას, მის სისუფთავეს, უსაფრთხოებას და გამოყენებული დეტექტორისადმი შესაბამისობას [1]. ყოველივე ზემოთ აღნიშნულიდან უნდა გამოვყოთ ის ძირითადი მოთხოვნები, რაც წაყენება აირმატარებელს. ესენია [3]:

- ინერტულობა, რაც გამორიცხავს ურთიერთქმედებას საანალიზო ნივთიერებებთან და უძრავ ფაზასთან;
- კომპონენტის დიფუზიის კოეფიციენტის აირმატარებელში ოპტიმალური მნიშვნელობა უნდა ჰქონდეს, რაც განსაზღვრავს ქრომატოგრაფიული ზომის წარეცხვის მექანიზმს;
- დაბალი სიბლანტე;
- გამოყენებული დეტექტორის მიმართ მაღალი მგრძნობიარობა;
- სისუფთავე, სიიფე და უსაფრთხოება;

აირქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში აირმატარებლის სახით ძირითადად გამოიყენება შემდეგი აირები: აზოტი, წყალბადი, ჰაერი, არგონი, ჰელიუმი, ნახშირორჟანგი, შედარებით იშვიათად ნეონი, კრიპტონი, მეთანი და სხვა [5].

განვიხილოთ ზოგიერთი მათგანი.

აზოტი ხელმისაწვდომი და სამუშაოდ უსაფრთხო აირია. იმის გამო, რომ აზოტს წყალბადთან შედარებით ახასიათებს მაღალი სიბლანტე (ნივთიერების დიფუზიის კოეფიციენტი მასში ოთხჯერ უფრო ნაკლებია ვიდრე წყალბადში), მისი გამოყენება შეიძლება სხვადასხვა ტიპის დეტექტორებით აღჭურვილ ქრომატოგრაფში.

წყალბადი ხასიათდება დაბალი სიბლანტით, რაც საშუალებას იძლევა გამოვიყენოთ იგი გრძელი ქრომატოგრაფიული სვეტების შემთხვევაში (როგორც შემავსებლიანი, ასევე კაპილარული), რადგან მისი ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა ერთნაირ პირობებში მუშაობისას გაცილებით დაბალია სხვა აირებთან შედარებით. მაღალი თბოგამტარობის გამო კატარომეტრზე მუშაობისას წყალბადის გამოყენებით მნიშვნელოვნად იზრდება მისი მგრძნობიარობა, მაგრამ წყალბადი ძლიერ ფეთქებადია, რაც ზღუდავს მისი გამოყენების შესაძლებლობას.

ჰელიუმი სამუშაოდ უსაფრთხოა და ამასთანავე მისი თბოგამტარობა მცი-

რედ ჩამორჩება წყალბადისას. მისი გამოყენება შეზღუდულია შედარებით მაღალი ღირებულების გამო.

არგონს განსაკუთრებული სისუფთავე მოეთხოვება. კერძოდ, თუ მასში ჟანგბადის, აზოტის და წყალბადის მინარევები 0.1%-ზე მეტია, მაშინ იონიზაციური დეტექტორის მგრძნობიარობა მნიშვნელოვნად მცირდება.

შემავესებლიანი სვეტებისთვის დიდი მნიშვნელობა არა აქვს რომელ აირმატარებელს გამოვიყენებთ. ეფექტურობის თვალსაზრისით დაბალი ტემპერატურის და სიჩქარეების შემთხვევაში აზოტს რამდენადმე უპირატესობა ენიჭება, მაშინ როდესაც მაღალი ტემპერატურის და სიჩქარეებისას უმჯობესია წყალბადის გამოყენება.

კაპილარული სვეტების ეფექტურობის თვალსაზრისით შემჩნეულია წყალბადის გამოყენების უპირატესობა. აზოტის გამოყენებით ანალიზის ხანგრძლივობა 2.5-ჯერ იზრდება, ხოლო ნარევის დაყოფა ორივე შემთხვევაში თითქმის ერთნაირია.

ზოგჯერ აირმატარებელს მცირე რაოდენობით უმატებენ ამიაკს, ჭიანჭველმჟავას ან სხვა რაიმე რეაგენტს, რომელიც აუმჯობესებს პიკის ფორმებს, სვეტის სელექტიურობას ან დეტექტორის მგრძნობიარობას [1].

ერთმანეთისგან განასხვავებენ აირმატარებლის ხაზოვან სიჩქარეს და ხარჯის (მოცულობითი სიჩქარე) ცნებას. პრაქტიკულად ხდება მხოლოდ ხარჯის განსაზღვრა, ხაზოვანი სიჩქარე კი თეორიული მსჯელობის საგანია.

აირმატარებლის ჭეშმარიტი ხაზოვანი სიჩქარე განისაზღვრება ფორმულით

$$u' = L/t_0 \quad (2.1)$$

სადაც u' - ჭეშმარიტი ხაზოვანი სიჩქარეა, სმ/წმ; L - სვეტის სიგრძე, სმ; t_0 - არასორბირებადი აირის შეკავების დრო, წმ.

აირმატარებლის საშუალო სიჩქარე განისაზღვრება ფორმულით:

$$\bar{u} = u'j \quad (2.2)$$

სადაც $\bar{u}$ - საშუალო ხაზოვანი სიჩქარეა; u' - ჭეშმარიტი ხაზოვანი სიჩქარე; j - კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს წნევის ცვლილებას.

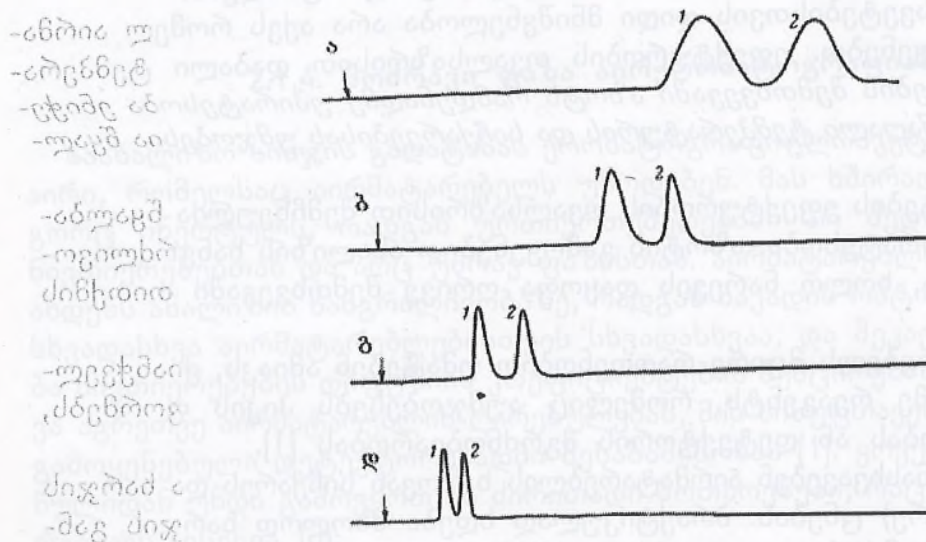
ცხრილში 2.10. მოყვანილია სვეტის პარამეტრების, სორბენტის ნაწილაკების და აირმატარებლის ოპტიმალურ ხარჯს შორის კავშირი [1].

ცხრილი 2.10.

სვეტის სიგრძეს, დიამეტრს სორბენტის ნაწილაკებს და აირმატარებლის ხარჯს შორის კავშირი

სვეტის დიამეტრი	ნაწილაკების ზომები (მმ) სხვადასხვა სიგრძის სვეტში		აირმატარებლის ხარჯი სმ ³ /წთ	
	3მ-მდე	3მ-მეტი	N ₂	He ან H ₂
2 მმ	0.11-0.12	0.12-0.18	8-15	15-30
3 მმ	0.11-0.12	0.12-0.18	15-30	30-60
4 მმ	0.12-0.18	0.18-0.25	30-60	60-100

თისაბნალიზო ნივთიერებების განაწილების კოეფიციენტი და შესაბამისად მათი დაყოფაც ძლიერ არის დამოკიდებული აგრეთვე სამუშაო ტემპერატურაზე (სვეტის ტემპერატურა). ნახ. 2.6. მოყვანილია ტემპერატურისა და შეკავების დროსოშორის კავშირი.



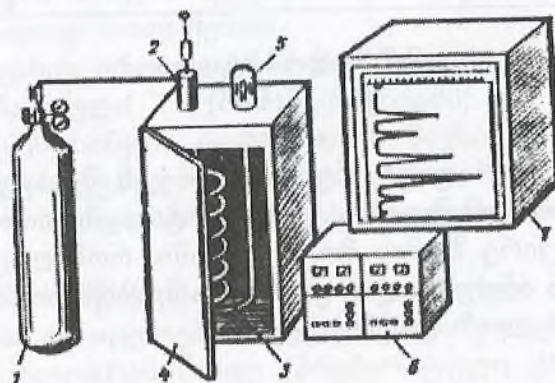
ნახ. 2.6. შეკავების დროის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.
20% თხევადი ფაზა: ა) 30°C; ბ) 40°C; გ) 50°C; დ) 60°C.

ტემპერატურის 30°C მომატებისას, ხდება განაწილების კოეფიციენტის ორჯერ შემცირება და შესაბამისად ორჯერ იზრდება საბნალიზო კომპონენტების გადაადგილების სიჩქარე. ანალიზის ჩატარებისთვის საჭირო დროის შემცირება უშუალო შედეგია ქრომატოგრაფიული სვეტის ტემპერატურის მომატებისა [3,15].

თავი 2.2. აირქრომატოგრაფი

2.2.1. ზოგადი სქემა

აირქრომატოგრაფიული პროცესი ტარდება სპეციალურ ხელსაწყოში, აირქრომატოგრაფში. თანამედროვე აირქრომატოგრაფი წარმოადგენს გარკვეული ფუნქციის მქონე სხვადასხვა კვანძების ერთობლიობას, დაწყებული აირმატარებლის შესანახი ბალონიდან, დამთავრებული საანალიზო ნივთიერების რეგისტრაციამდე. ნახ.2.7-ზე ნაჩვენებია აირქრომატოგრაფის ზოგადი სქემა.



ნახ. 2.7. აირქრომატოგრაფის სქემა

- 1-აირმატარებლის ბალონი; 2-ქრომატოგრაფიულ სვეტში
სინჯის შესაყვანი მოწყობილობა; 3-ქრომატოგრაფიული სვეტი;
4-თერმოსტატი; 5-დეტექტორი;
6-ელექტრული სიგნალის გარდამქმნელი; 7-რეგისტრატორი.

აირმატარებლი რეზერვუარიდან ამოორთქლებლის გავლით უწყვეტად მიწოდება ქრომატოგრაფიულ სვეტს და დეტექტორს, სადაც ხდება ნივთიერებების იდენტიფიკაცია და მისი სიგნალი თვითჩამწერის საშუალებით პიკების სახით ჩაიწერება. წინამდებარე თავში განიხილება აირქრომატოგრაფის ძირითადი კვანძების დახასიათება და მათი ზოგიერთი თავისებურებანი [3,23].

2.2.2. აირმატარებლის ბალონი (I კვანძი)

აირმატარებლის ბალონი 0.4-დან 50 ლიტრამდე ტევადობის ცილინდრული ფორმის ფოლადის ჭურჭელია. მას ზედა ნაწილში აქვს ჩამკეტი ვენტილი. არ შეიძლება აირის მიწოდების რეგულირება პირდაპირ ამ ვენტილით. ამისათვის იყენებენ სპეციალურ სარედუქციო ვენტილს, რომელიც ამცირებს ბალონიდან გამოსული აირის წნევას ან იყენებენ აირის რედუქტორს, რომელიც არეგულირებს მასში გამავალი აირის წნევას და ხარჯს.

სხვადასხვა აირის ბალონი სტანდარტების შესაბამისად სხვადასხვაფერად არის შეფერილი ქვემოთ მოყვანილი ცხრილის შესაბამისად [24].

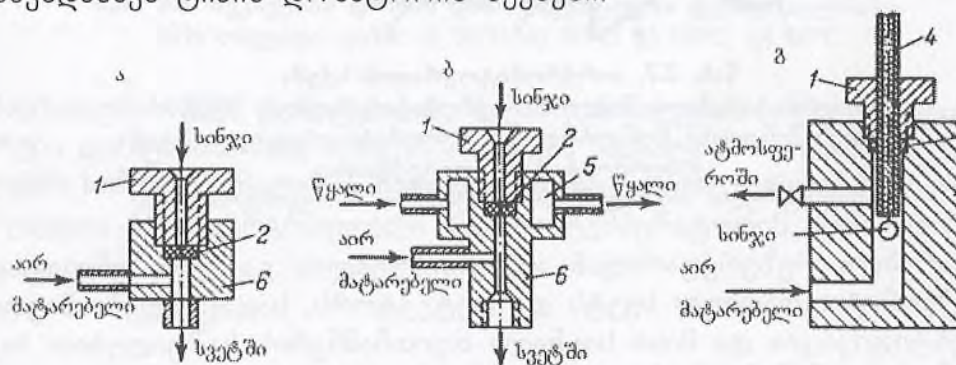
ცხრილი 2.11.

აირის ბალონების სტანდარტული შეფერილობა

აირი	ბალონის ფერი	წარწერის ფერი	ზოლის ფერი
აზოტი	შავი	ყვითელი	ყავისფერი
არგონი	შავი	ცისფერი	თეთრი
წყალბადი	მუქი მწვანე	ნითელი	-
ჰაერი	შავი	თეთრი	-
ჰელიუმი	ყავისფერი	თეთრი	-
ნახშირორჟანგი	შავი	ყვითელი	-
ჟანგბადი	ცისფერი	შავი	-

2.2.3. დოზატორი
(II კვანძი)

დოზატორი ქრომატოგრაფიულ სვეტში სინჯის შესაყვანი მოწყობილობაა. აირადი ან თხევადი სინჯის შეყვანა ქრომატოგრაფში ძირითადად ხდება სპეციალური შპრიცით მცირე ზომის მოცულობაში, რომელიც სვეტის დასაწყისთანაა შეერთებული და აღჭურვილია კაუჩუკის მემბრანით. ნახ. 2.8-ზე მოყვანილია სხვადასხვა ტიპის დოზატორის სქემები.



ნახ. 2.8. დოზატორის ტიპები: უნივერსალური (ა), გამაგრებული მემბრანით (ბ), ნაკადის გამყოფით (გ)

1-სახურავი; 2-მემბრანა; 3-მამკვრივებელი; 4-სვეტი;
5-წყლის რადიატორი; 6-კორპუსი

ნახაზზე (2.8. ა) ნაჩვენებია უნივერსალური დოზატორი (ამაორთქლებელი) სინჯის ხელით შეყვანისთვის. ამაორთქლებლის ტემპერატურა ისე უნდა შეირჩეს, რომ თხევადი სინჯი მთლიანად აორთქლდეს. ამიტომ, დოზატორს ახურებენ ელექტროგამაცხელებლით სვეტის ტემპერატურაზე უფრო მაღალ ტემპერატურამდე. რადგან სვეტის ტემპერატურა საკმაოდ მაღალია, დოზატორის მემბრანა ხშირად ზიანდება და ირღვევა ჰერმეტიულობა, რისი თავიდან აცილებისთვის დოზატორს აღჭურავენ წყლის ნაკადით გასაციებელი სპეციალური მოწყობილობით (ნახ. 2.8. ბ)

კაპილარულ სვეტებთან მუშაობისას საქმე გვაქვს მეტად მცირე ზომის სინჯებთან და დოზატორს ხშირად უერთებენ ნაკადის გამყოფს, რომელიც სინჯის გარკვეულ ნაწილს გამოჰყოფს ატმოსფეროში (ნახ. 2.8. გ). ატმოსფერო-

ში გამოყოფილი და სვეტში შესული სინჯის რაოდენობებს შორის თანაფარდობა რეგულირდება სპეციალური ვენტილით [3].

2.2.4. სინჯის შეყვანის მეთოდика

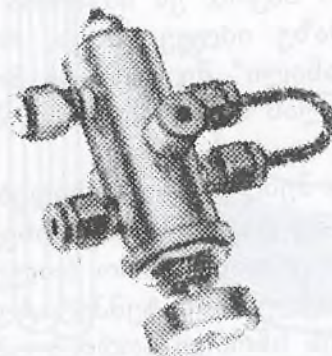
ქრომატოგრაფში სინჯის სწორად შეყვანის პროცედურა დიდად განსაზღვრავს ქრომატოგრაფიული ანალიზის საბოლოო შედეგს. თუ ქრომატოგრაფიულ სვეტს ქრომატოგრაფის „გულს“, ხოლო დეტექტორს მის „ტვინს“ უწოდებენ, სინჯის შეყვანის სისტემას მის „აქილევსის ქუსლთან“ აიგივებენ.

აირკრომატოგრაფში სინჯის შეყვანის ნებისმიერი სისტემა უნდა აკმაყოფილებდეს სამ ძირითად მოთხოვნას:

- სინჯის შეყვანის პროცედურამ მინიმალური წვლილი უნდა შეიტანოს ქრომატოგრაფიული პიკების წარეცხვაში;
- უზრუნველყოს სინჯის რაოდენობის მაქსიმალური სიზუსტე ქრომატოგრაფიულ სვეტში;
- შეინარჩუნოს საანალიზო ნარევის რაოდენობითი და თვისებითი შედგენილობა.

დასახული ამოცანის შესაბამისად ქრომატოგრაფში შეყვანილი სინჯის მოცულობა სხვადასხვაა და იცვლება ნაწილობრივი რაოდენობიდან (კაპილარული ქრომატოგრაფია), კილოგრამებამდე (პრეპარატული ქრომატოგრაფია). ქრომატოგრაფში სინჯის შეყვანის პროცედურის სისწორე მოწმდება ამაორთქლებლის ტემპერატურის ცვლილებით და სინჯის სიდიდის შემცირებით. თუ რომელიმე ამ ორი ფაქტორთაგანი იწვევს თეორიული თეფშების რიცხვის შემცირებას, ეს ნიშნავს რომ სინჯის შეყვანის პროცედურაში ადგილი აქვს შეცდომას [1].

აირადი სინჯის შეყვანა. აირად მდგომარეობაში მყოფი საანალიზო ნივთიერებების შეყვანა ქრომატოგრაფში ხდება სპეციალური ონკანის (ნახ.2.9.) ან შპრიცის (ნახ. 2.10.) საშუალებით.



ნახ. 2.9. აირადი სინჯის შესაყვანი ონკანი



ნახ. 2.10. ქრომატოგრაფიული შპრიცი

სვეტის სიგრძე შეიძლება იცვლებოდეს რამდენიმე ათეული სანტიმეტრიდან რამდენიმე ათობით მეტრამდე. რაც მეტია სვეტის სიგრძე, მით მეტია მათში თეორიული თეფშების რიცხვი და შესაბამისად მაღალია სვეტის ეფექტურობა. მაგრამ მეტად გრძელი სვეტების შემთხვევაში აირმატარებლის სიჩქარე მასში იცვლება და ოპტიმალური მნიშვნელობის სიჩქარეზე მუშაობს სვეტის მხოლოდ გარკვეული ნაწილი. რეალურად მიღწეული თეფშების რიცხვის სიდიდე ნაკლებია თეორიულზე და შესაბამისად უარესია დაყოფა. ამიტომ, ჩვეულებრივი ანალიზური სვეტების სიგრძე 1-4 მეტრის ტოლია, ხოლო დიამეტრი 3-4 მმ. რაც ნაკლებია სვეტის დიამეტრი, მით უფრო ეფექტურია სვეტი. სვეტის დიამეტრის შემდგომი გაზრდა იწვევს ეფექტურობის შემცირებას გრიგალური დიფუზიის გაძლიერების გამო [3,5,15].

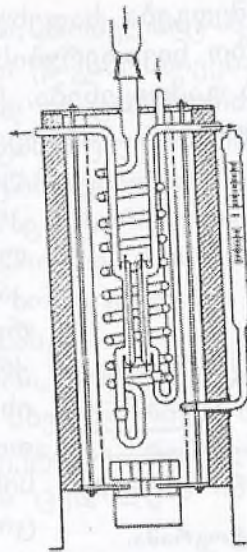
აირქრომატოგრაფიაში გამოიყენება ორი ტიპის სვეტი: შემავსებლიანი (დიამეტრით 3-5 მმ) და კაპილარული (დიამეტრი 0.1-0.8 მმ).

შემავსებლიანი სვეტები ძირითადად დამზადებულია უჟანგავი ფოლადის ან მინისაგან. ფოლადის სვეტებს უმეტეს შემთხვევაში აძლევენ U-სებურ ან სპირალურ ფორმას (ნახ.2.7). სვეტებს ავსებენ 0.1-0.5 მმ დიამეტრის მქონე სორბენტის მარცვლებით. გაცილებით ერთგვაროვანი შევსება ხდება, თუ სვეტის დიამეტრის (d_c) ნაწილაკის დიამეტრთან (d_p) ფარდობა არ არის ნაკლები 8-ზე. ($d_c/d_p \geq 8$). სვეტის შევსებას ახდენენ ვიბრაციის საშუალებით, წყალჭავლის ან ვაკუუმის ტუმბოს გამოყენებით.

თუ შემავსებლიანი სვეტის შიგა დიამეტრის ზომებია ზღვრებში $0.8 < d_c < 2$ მმ, მას მიკროშემავსებლიან სვეტებს უწოდებენ და შუალედური ადგილი უკავიათ ჩვეულებრივ და კაპილარულ სვეტებს შორის. მათ ახასიათებთ მაღალი ეფექტურობა, აირმატარებლის მცირე ხარჯი და ანალიზის შემცირებული დრო. აღნიშნული სვეტები წარმატებით გამოიყენება ექსპრეს-ანალიზების შემთხვევაში. ამავე დროს მათი მომზადების და შევსების ტექნიკა გაცილებით რთულია ჩვეულებრივ სვეტებთან შედარებით და გარკვეულად უახლოვდება კაპილარული სვეტების მომზადების ტექნიკას, თუმცა ეფექტურობით გაცილებით ჩამორჩება მას.

2.2.6. თერმოსტატი

ქრომატოგრაფიული სვეტის ფორმის შერჩევა ხდება თერმოსტატის ზომების მიხედვით. თერმოსტატი ახდენს სვეტის ტემპერატურის რეგულირებას $\pm(0.05 \div 0.5)^{\circ}\text{C}$ -ის სიზუსტით. ქრომატოგრაფიაში ძირითადად გავრცელებულია ჰაერის თერმოსტატები (ნახ. 2.12) [25].



ნახ.2.12. ჰაერის თერმოსტატი

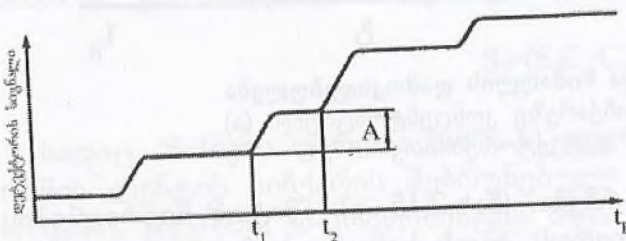
2.2.7. აირქრომატოგრაფიაში გამოყენებული დეტექტორები (IV კვანძი)

2.2.7.1. ზოგადი მიმოხილვა და კლასიფიკაცია

ქრომატოგრაფიული დეტექტორი ეს არის მოწყობილობა, რომელიც ახდენს ქრომატოგრაფიული სვეტიდან გამოსულ აირმატარებელში მყოფი საანალიზო ნივთიერებების რეგისტრაციას და ზომავს თითოეული მათგანის რაოდენობას [15].

აირქრომატოგრაფიაში გამოყენებას პოულობს დაახლოებით 50-ზე მეტი ტიპის დეტექტორი. კონკრეტული სამუშაოს ჩასატარებლად დეტექტორის სწორად შერჩევისთვის ხდება მათი კლასიფიკაცია ორ ჯგუფად: ინტეგრალურ და დიფერენციალურ დეტექტორად.

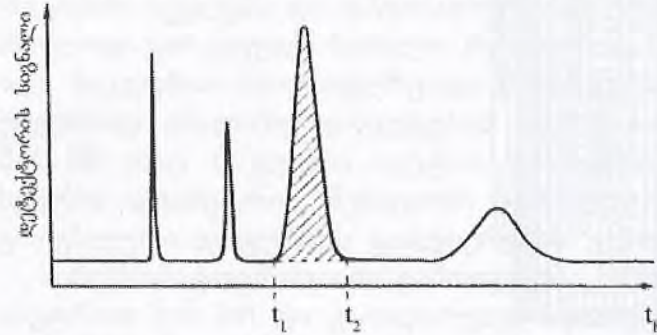
ინტეგრალური დეტექტორები. ამ ტიპის დეტექტორის სიგნალი პროპორციულია საანალიზო ნივთიერების საერთო კონცენტრაციისა. როდესაც დეტექტორში გადის სუფთა აირმატარებელი, ქრომატოგრამაზე ჩაინერება ჰორიზონტალური ხაზი, ხოლო როდესაც მასში მოხვდება საანალიზო ნივთიერება, თვითჩამწერის წვერი გადაადგილდება ლენტის განივად ნივთიერების კონცენტრაციის შესაბამისად. დეტექტორში მომდევნო ნივთიერების მოხვედრისას თვითჩამწერის წვერი კვლავ დიაგრამის ლენტის პერპენდიკულარულად გადაადგილდება და ა.შ. (ნახ.2.13.).



ნახ. 2.13. ინტეგრალური ქრომატოგრამა
A-მანძილი, რომელიც პროპორციულია დროის $t_2 - t_1$ შუალედში ელუირებული კომპონენტების მასებისა

მიღებული ქრომატოგრამა შედგება საფეხურებისაგან, რომელთა სიმაღლეც პროპორციულია საანალიზო ნივთიერების მასისა. ასეთი დეტექტორები ამჟამად პრაქტიკულად ნაკლებ გამოიყენება. [15,26].

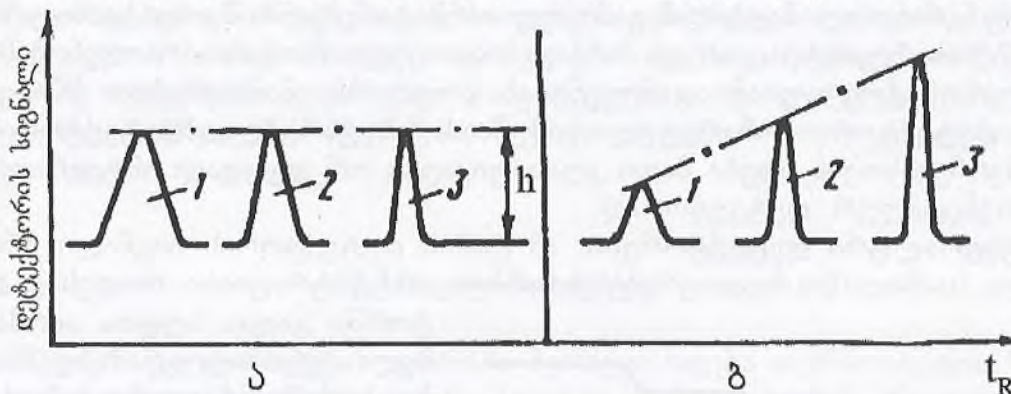
დიფერენციალური დეტექტორები. დეტექტორის სიგნალი პროპორციულია საანალიზო ნივთიერებების კონცენტრაციისა ან ელუირებული კომპონენტის შემცველი ნაკადის მასური სიჩქარისა. ამგვარი დეტექტორით მიღებული ქრომატოგრამა შედგება პიკების სერიისაგან, რომელთა ფართი შესაბამისი ნივთიერების მასის პროპორციულია. დიფერენციალური დეტექტორები ხასიათდებიან მაღალი სიზუსტით და ამიტომ ფართოდ გამოიყენებიან ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში (ნახ. 2.14).



ნახ.2.14. დიფერენციალური ქრომატოგრამა. დაშტრიხული ფართი პროპორციულია დროის $t_2 - t_1$ შუალედში ელუირებული კომპონენტების მასისა

განასხვავებენ აგრეთვე კონცენტრაციულ და ნაკადურ, იონიზაციურ და არაიონიზაციურ, დესტრუქციულ და არადესტრუქციულ, უნივერსალურ და სელექტიურ დეტექტორებს. [15,27].

კონცენტრაციულ დეტექტორში პიკის ფართი უკუპროპორციულია აირმატარებლის სიჩქარისა და პირდაპირპროპორციულია საანალიზო ნივთიერების რაოდენობისა. აქედან გამომდინარე, ნაკადის სიჩქარის ცვლილებით იცვლება პიკის



ნახ. 2.15. პიკის ფართის და სიმაღლის დამოკიდებულება აირმატარებლის ნაკადის სიჩქარეზე კონცენტრაციული (ა) და ნაკადური (ბ) დეტექტორებისთვის.

ფართიც, ხოლო მისი სიმაღლე იგივე რჩება. (ნახ.2.15, ა). ამიტომ ნივთიერების კონცენტრაციები უმჯობესია განისაზღვროს პიკის სიმაღლის მიხედვით.

ნაკადურ დეტექტორებში პიკის ფართი დეტექტორის კამერაში გამავალი ნივთიერების რაოდენობის პირდაპირპროპორციულია და დამოკიდებული არ არის აირმატარებლის ნაკადის სიჩქარეზე. ამიტომ, პიკის სიმაღლე იცვლება (ნახ.2.15. ბ.) და ნივთიერების რაოდენობა განისაზღვრება პიკის ფართის მიხედვით.

იონიზაციურია დეტექტორი, რომელშიც საანალიზო ნივთიერებები სხვადასხვა ფაქტორების გავლენით (β-გამოსხივება, ულტრაიისფერი სინათლე და სხვა) გარდაიქმნება დადებითად და უარყოფითად დამუხტულ იონებად. ასეთი დეტექტორების მუშაობა დაფუძნებულია აირში გამავალი ელექტრული დენის მუდმივ გაზომვაზე ან რომელიმე იმ თვისების განსაზღვრაზე, რომელსაც უშუალო კავშირი აქვს ელექტროდენის გამტარობასთან.

არაიონიზაციურია დეტექტორები, რომელთა მუშაობის პრინციპი ემყარება საანალიზო ნივთიერებების სორბციულ და ზედაპირულ ეფექტების განსაზღვრას, მათ ქიმიურ გარდაქმნას.

დესტრუქციულია დეტექტორი, რომელშიც საანალიზო კომპონენტების 1%-ზე მეტი იშლება ან რეაგირებენ სხვა ნაერთის წარმოქმნით [1].

არადესტრუქციულია დეტექტორი, რომელშიც საანალიზო ნივთიერებების დაშლა, მათი კონცენტრაციის ცვლილება იმდენად მცირეა, რომ შეგვიძლია უგულებელვყოთ.

სელექტიურ დეტექტორებს გააჩნიათ უნარი დააფიქსირონ მხოლოდ რაიმე სპეციფიკური თვისებების მქონე საანალიზო ნივთიერებების ელუირება იმ ნივთიერებების ფონზე, რომელსაც ეს თვისებები არ გააჩნიათ.

უნივერსალურია დეტექტორი, რომელიც რეაგირებს ნებისმიერი ნივთიერების ელუირებაზე, მიუხედავად იმისა, გააჩნია თუ არა მას რაიმე განსაკუთრებული დამახასიათებელი თვისება.

2.2.7.2. დეტექტორების ძირითადი მახასიათებლები

იმის გამო რომ მუშაობის პრინციპის მიხედვით დეტექტორები ძლიერ განსხვავდებიან ერთმანეთისგან, მათი შედარების გაადვილების მიზნით გამოყოფენ შემდეგ ძირითად მახასიათებლებს:

- მგრძნობიარობა;
- ხმაურის დონე;
- ხაზოვანი დიაპაზონი;
- სიგნალის ხასიათი;

დეტექტორის მგრძნობიარობა (S_f). კონცენტრაციულ დეტექტორებში მგრძნობიარობა განისაზღვრება როგორც ადვილად გასაზომი პარამეტრის ფუნქცია:

$$S_f = (S \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3) / \omega \quad (2.3)$$

სადაც, S -პიკის ფართობი (სმ^2); C_1 -თვითჩამწერის მგრძნობიარობა; C_2 -დიაგრამის ლენტის სიჩქარის შებრუნებული სიდიდე (წთ/სმ); C_3 -აირმატარებლის სიჩქარე (მლ/წთ); ω -კომპონენტის წონა (მგ).

ნაკადური ტიპის დეტექტორებისთვის მგრძნობიარობა S_f' გამოისახება შემდეგნაირად:

$$S_f' = (S \cdot C_1 \cdot C_2) / \omega \quad (2.4)$$

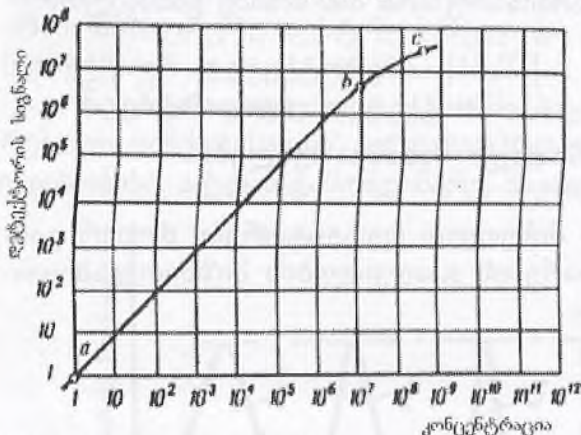
S_f' - დამოკიდებული არ არის აირის ნაკადის სიჩქარეზე, ხოლო S_f ამ სიჩქარის პროპორციულია [15].

ყოველ დეტექტორს გააჩნია მისთვის დამახასიათებელი **ხმაურის დონე**. ხმაურს უწოდებენ ქრომატოგრამაზე ნულოვანი ხაზის კიდეებს შორის მანძილს, რაც სხვადასხვა მუდმივმოქმედი ფაქტორების შედეგად წარმოიქმნება. ნახ. 2.16-ზე მოყვანილია დეტექტორის სიგნალის ჩანერის მაგალითი. N-სიდიდე ნიშნავს ხმაურის



ნახ. 2.16. ნივთიერების მინიმალური დეტექტირებადი რაოდენობა

დონეს. ცხადია რომ დეტექტორის სიგნალი საანალიზო ნივთიერებებისთვის უნდა აღემატებოდეს N, რათა შესაძლებელი გახდეს მისი გარჩევა ხმაურის დონისგან. დეტექტორს შეუძლია ნივთიერების იმ მინიმალური კონცენტრაციის განსაზღვრა, რომლისთვისაც მისი სიგნალი ორჯერ აღემატება ხმაურის დონეს, 2N. მას ხშირად დეტექტორის მგრძნობიარობის ზღვარს უწოდებენ და იგი



ნახ.2.17. დეტექტორის წრფივი დიაპაზონის გამომხატველი გრაფიკი

ტოლია: $\phi_0 = 2N/S_f$ [5,15]:

ხაზოვანი დიაპაზონი. რაოდენობითი ანალიზის სიზუსტე დიდად არის დამოკიდებული დეტექტორის სიგნალსა და გასაზომ სიდიდეს (ნივთიერების კონცენტრაცია, ნაკადი, რაოდენობა) შორის დამოკიდებულების ხასიათზე.

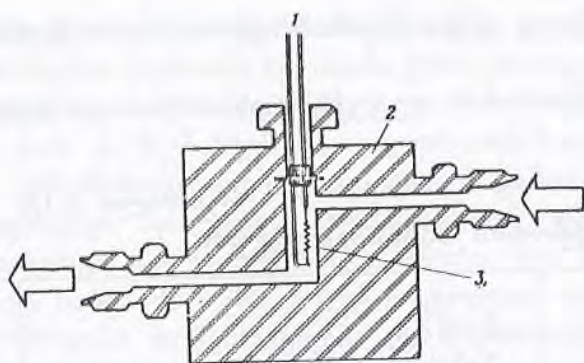
ყოველი დეტექტორისთვის დამახასიათებელია გასაზომი სიდიდის ისეთი დიაპაზონი, რომელშიც აღნიშნული დამოკიდებულება წრფივ ხასიათს ატარებს და დეტექტორის მუშაობაც სწორედ ამ დიაპაზონში უნდა განხორციელდეს.

დეტექტორის სიგნალი განისაზღვრება საანალიზო ნივთიერებების სხვადასხვა ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლებით.

ახლა ზოგადად განვიხილოთ აირქრომატოგრაფიაში გამოყენებული ზოგიერთი დეტექტორი.

2.2.7.3. თბოგამტარობის დეტექტორი (კატარომეტრი)

სხვადასხვაგვარი კონსტრუქციის კატარომეტრი ფართოდ გამოიყენება ანალიზურ და პრეპარატულ ქრომატოგრაფიაში. ისინი უნივერსალურ, დიფერენციალურ-კონცენტრაციულ დეტექტორებს მიეკუთვნებიან, რომელთა მუშაობის



ნახ. 2.18. კატარომეტრის ბლოკის სქემა
1-ძაბვის წყაროსთან და გარე ბოგურ სქემასთან
გამომყვანი; 2-დეტექტორის ბლოკი;
3-კატარომეტრის ძაფი

ისეთი ნივთიერებისაგან არის დამზადებული, რომლის წინააღობაც დამოკიდებულია ტემპერატურაზე (ვოლფრამი, პლატინა) და მისი გავარვარება ხდება მასში გამავალი მუდმივი დენით. კატარომეტრს გააჩნია შესადარებელი კამერა, რომელშიც გადის სუფთა აირმატარებელი და გამზომი მუშა კამერა, რომელშიც შედის სვეტიდან გამოსული აირი. ცხადია, რომ თუ ორივე კამერაში აირი ერთნაირი შედგენილობისაა, დეტექტორი სიგნალს არ იძლევა და თვითჩამწერი გვიჩვენებს ნულოვან ხაზს. როგორც კი კიუვეტაში მოხვდება აირის შედგენილობის შეცვლა, გავარვარებული ძაფის სითბოს გაცემის ხასათი შეიცვლება და დეტექტორი იძლევა შესაბამის სიგნალს, რაც თვითჩამწერის მიერ პიკის სახით ჩაიწერება [15].

თბოგამტარობის დეტექტორის მგრძნობიარობა გამოისახება ტოლობით:

$$S_f = K \cdot I^2 \cdot R \frac{\lambda_c - \lambda_s}{\lambda_c} (T_f - T_b) \quad (2.5)$$

სადაც, S_f -მგრძნობიარობა; I^2 -დენის ძალა; K -დეტექტორის ბლოკის მუდმივაა, რომელიც დამოკიდებულია მის ტემპერატურაზე; R -ძაფის წინააღობა; λ_c -აირმატარებლის თბოგამტარობა; λ_s -საანალიზო ნივთიერების თბოგამტარობა; T_f -ძაფის ტემპერატურა; T_b -დეტექტორის ბლოკის ტემპერატურაა.

მოყვანილი ფორმულიდან ნათლად ჩანს, რომელი წევრი როგორ გავლენას ახდენს დეტექტორის მგრძნობიარობაზე.

დენის ძალა. I^2 წევრი გვიჩვენებს, რომ ძაფში დენის ძალის გაზრდა იწვევს გამოსული სიგნალის მნიშვნელოვნად გაძლიერებას; დენის ძალის 2-ჯერ გაზრდა გამოიწვევს მგრძნობიარობის 4-8-ჯერ გაზრდას. მაგრამ მისმა ძლიერ მომატებამ შეიძლება გამოიწვიოს ნულოვანი ხაზის არასტაბილურობა და ძაფის გადანვა.

აირმატარებელი. $\frac{\lambda_c - \lambda_s}{\lambda_c}$ წევრის მნიშვნელობა იზრდება λ_c -ის გაზრდით.

ამიტომ უნდა შეირჩეს მაქსიმალურად შესაძლო თბოგამტარობის მქონე აირმატარებელი.

ტემპერატურა. დენის ძალის მომატებით გამოწვეული ძაფის ტემპერატურის T_f გაზრდა აძლიერებს დეტექტორის მგრძნობიარობას, მაგრამ ამ დროს დე-

ტექტორის ბლოკის ტემპერატურა დაბალი უნდა შევინარჩუნოთ, რათა მაქსიმალური იყოს $T_f - T_b$ სხვაობა.

ცხრილში 2.12. მოყვანილია თბოგამტარობის დეტექტორის ძირითადი მახასიათებლები:

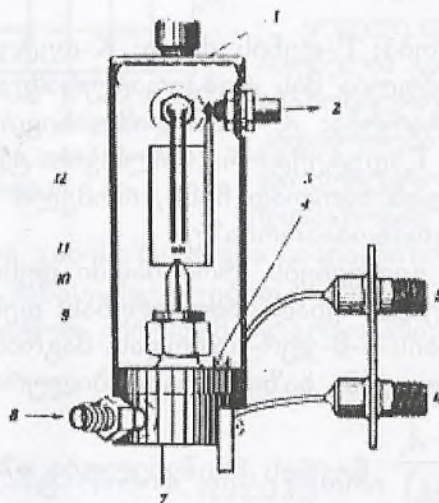
ცხრილი 2.12.
თბოგამტარობის დეტექტორის მახასიათებლები

უნივერსალურია დეტექტირების მინიმალური ზღვარი მგრძნობიარობა	2 – 5 მკგ ნებისმიერი ნივთიერებისათვის აირმატარებლის გარდა 10000
ხაზოვანი დიაპაზონი მონაცემების სტაბილურობა აირმატარებელი მაქსიმალური ტემპერატურა	კარგი ჰელიუმი, წყალბადი, აზოტი 450°C

შენიშვნა: დეტექტორი არ ახდენს სინჯის დაშლას, სტაბილურია, საშუალო მგრძნობიარობის, არ არის ძვირი, საშუაოდ მარტივია, მოითხოვს ტემპერატურის და აირის ნაკადის ზუსტ რეგულირებას. ნაკლებ მგრძნობიარობის გამო იგი მიკრო რაოდენობის მინარევების განსაზღვრისთვის არ გამოიყენება

2.2.7.4. ალურ-იონიზაციური დეტექტორი

აირები ჩვეულებრივ პირობებში ელექტრულ დენს არ ატარებენ, მაგრამ რაიმე ზეგავლენით (რადიაქტიული გამოსხივების ან ალის ზემოქმედებით) მათში წარმოიქმნება იონები, რადიკალები ან თავისუფალი ელექტრონები, რომელთა სულ უმცირესი კონცენტრაციაც კი იწვევს მისთვის ელგამტარობის



ნახ. 2.19. ალურ-იონიზაციური დეტექტორი

- 1-ცილინდრული ხუფი; 2-ელექტრომეტრთან მიმყვანი;
3-დადებითი ელექტროდი; 4-ჰაერის მისაწოდებელი საქმენი; 5-წყალბადი;
6-ჰაერი ან ჟანგბადი; 7-დეტექტორის ფუძე; 8-სვეტთან შესაერთებელი; 9-ქანჩი;
10-კვარცის საცმი; 11-ალის დასაწვავი სპირალი; 12-უარყოფითი ელექტროდი

რეზინის და ჰაერის სიჩქარეების თანაფარდობა იქნება 1:1:10. ამასთანავე, აირმატარებლის სიჩქარემ არ უნდა გადააჭარბოს განსაზღვრულ ზედა ზღვარს. წინააღმდეგ შემთხვევაში ალი არასტაბილურია და შეიძლება ჩაქრეს კიდევ.

ცხრილი 2.14.

ალურ-იონიზაციური დეტექტორის მახასიათებლები

დეტექტირების მინიმალური ზღვარი მგრძნობიარობა	$1 \cdot 10^{-12} \div 10 \cdot 10^{-12}$ მგრძნობიარეა ორგანული ნივთიერებების და არ არის მგრძნობიარე აირების და წყლის მიმართ
ხაზოვანი დიაპაზონი მონაცემების სტაბილურობა მაქსიმალური სამუშაო ტემპერატურა აირმატარებელი	$10^6 \div 10^7$ საშუალო 400°C აზოტი, არგონი, ჰელიუმი

შენიშვნა: ხასიათდება საშუალო სტაბილურობით, მაღალი სწორხაზოვნებით, ახდენს სინჯის დაშლას

აირმატარებლის სიჩქარე სვეტის დიამეტრის შესაბამისად იცვლება: 3 მმ დიამეტრის მქონე სვეტისთვის მაქსიმალური სიჩქარე უმჯობესია იყოს 30 მლ/წთ; 6 მმ დიამეტრისთვის 80 მლ/წთ [15]. ცხრილში 2.14. მოყვანილია ალურ-იონიზაციური დეტექტორის მახასიათებლები:

ალურ-იონიზაციური დეტექტორების მგრძნობიარობის ამაღლების მიზნით [10,28] ნაშრომებში განხილულია ახალი აღწარმომქმნელი აგენტის და აირმატარებლის გამოყენების შესაძლებლობა. კერძოდ, აღწარმომქმნელი წყალბადი შეცვლილია ნახშირჟანგით, რაც აუმჯობესებს დეტექტორის მახასიათებლებს (მგრძნობიარობა).

2.2.7.5. ფოსფორის დეტექტორი

ფოსფორის დეტექტორები სელექტიური დეტექტორების ჯგუფს მიეკუთვნებიან და კონსტრუქციული თვალსაზრისით ალურ-იონიზაციური დეტექტორების მსგავსია, რომელთაც კვარცის სანთურის ბოლოს დამატებული აქვს ტუტე მეტალის მარილის ღერო. წყალბადისა და ჰაერის ნაკადის სიჩქარეების სწორი რეგულირებით, ეს დეტექტორები ძლიერი მგრძნობიარობით ხასიათდება.

ცხრილი 2.15.

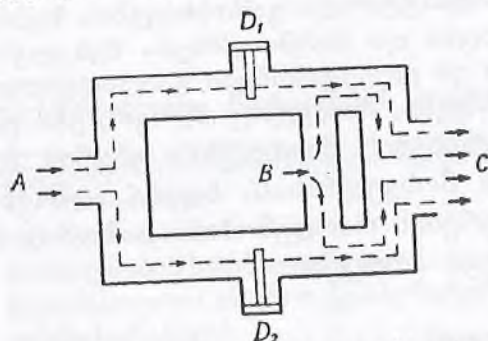
ფოსფორის დეტექტორის მახასიათებლები

დეტექტირების მინიმალური ზღვარი მგრძნობიარობა ხაზოვანი დიაპაზონი მონაცემების სტაბილურობა მაქსიმალური სამუშაო ტემპერატურა აირმატარებელი	0,00001 მკგ ფოსფორის შემცველი ნაერთების მიმართ 10^1 საშუალო 300°C აზოტი, ჰელიუმი
--	---

ბიან ფოსფორშემცველი ნაერთების მიმართ და სრულებით არ რეაგირებენ სხვა ორგანულ ნივთიერებებზე. ფოსფორის მიმართ მათი მგრძნობიარობა 3000-ჯერ აღემატება ალურ-იონიზაციური დეტექტორის მგრძნობიარობას [15].

2.2.7.6. სიმკვრივის დეტექტორი

სიმკვრივის დეტექტორები პირველ ქრომატოგრაფიულ დეტექტორებს წარმოადგენენ. ნახ. 2.20-ზე ნაჩვენებია დეტექტორის სქემა.



ნახ. 2.20. სიმკვრივის დეტექტორი
A-შესადარებელი აირი (სუფთა აირმატარებელი);
B-სვეტიდან გამოსული აირი;
C-აირის საერთო გამოსასვლელი;
D₁, D₂-მადეტექტირებელი ელემენტები

ნება, რომელთაც ახასიათებთ დაბალი თბოგამტარობა და მაღალი თბოშემცველობა, რათა გახურებული მგრძნობიარე ელემენტის მიერ გამოყოფილი სითბო უშუალოდ მხოლოდ აირ მატარებელში გადიოდეს. დეტექტორი განსაკუთრებით მგრძნობიარე უნდა იყოს ნაკადის ცვლილების მიმართ. მაღალი მგრძნობიარობის მისაღწევად ჰელიუმი და წყალბადი არ არის რეკომენდებული, რადგან შეიძლება ადგილი ჰქონდეს საანალიზო ნივთიერებების დიფუზიას. რაც შეეხე-

სიმკვრივის დეტექტორის მუშაობის პრინციპი დაფუძნებულია ქრომატოგრაფიული სვეტიდან გამოსული აირით შევსებულ ვერტიკალურ მილში წნევის ცვლილებაზე, როდესაც მასში მოხვდება საანალიზო ნივთიერება აირმატარებელთან ერთად. ამ მილში წნევის ცვლილება პროპორციულია აირის ნაკადის სიმკვრივის ცვლილებისა [1,5,15].

აღნიშნული დეტექტორებისთვის მნიშვნელოვანია აირმატარებლის სწორი შერჩევა. უმჯობესია ისეთი აირმატარებლების გამოყე-

ცხრილი 2.16.

სიმკვრივის დეტექტორის მახასიათებლები

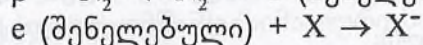
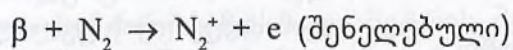
უნივერსალურია მგრძნობიარობის მინიმალური ზღვარი	დამოკიდებულია მგრძნობიარე ელემენტზე და აირმატარებელზე
მგრძნობიარობა	მგრძნობიარე ყველა ნივთიერებების მიმართ, რომელთა მოლეკულური წონა განსხვავდება აირმატარებლისგან 10^3
ხაზოვანი დიაპაზონი მონაცემების სტაბილურობა აირმატარებელი ტემპერატურა	კარგი N ₂ , CO, Ar ან სხვა. He და H ₂ არ გამოიყენება უკეთ მგრძნობიარე 150°C ქვემოთ

შენიშვნა: დეტექტორი არ იწვევს სინჯის დაშლას, სტაბილურია, საშუალო მგრძნობიარობის, მოითხოვს აირმატარებლის სიჩქარის გულდასმით რეგულირებას.

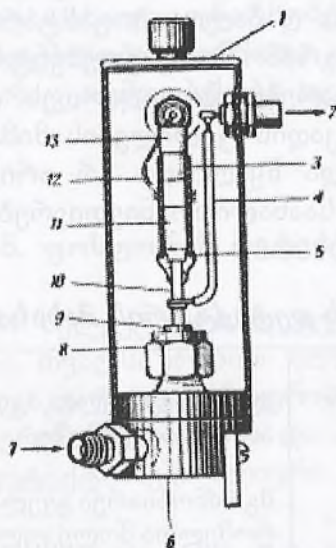
ბა აზოტს, იგი არ გამოიყენება CO , C_2H_4 და C_2H_2 -ის განსაზღვრისთვის. ასეთ შემთხვევაში უმჯობესია არგონის ან ნახშირორჟანგის გამოყენება [1,15]. ცხრილში 2.16. მოყვანილია სიმკვრივის დეტექტორის ძირითადი მახასიათებლები.

2.2.7.7. ელექტრონების წატაცების დეტექტორი

ელექტრონების წატაცების დეტექტორების მუშაობის პრინციპი დაფუძნებულია მასში წარმოქმნილი ელექტრული დენის შემცირების გაზომვაზე. დეტექტორში აზოტის ნაკადის გავლისას, რადიაქტიული გამოსხივების ზემოქმედებით ხდება მისი მოლეკულების იონიზაცია და წარმოიქმნება შენელებული ელექტრონები. მუდმივი ძაბვის გავლენით ეს ელექტრონები გადაადგილდებიან ანოდისკენ და წარმოიქმნება მუდმივი დენი, რომელიც ძლიერდება ელექტრომეტრული გამაძლიერებლით. ელექტრონების შთანთქმის უნარის მქონე საანალიზო ნივთიერებების დეტექტორში მოხვედრისას, ხდება აღნიშნული დენის შემცირება, რაც მოცემული ნივთიერების რაოდენობის საზომად ითვლება. დეტექტორში მიმდინარეობს შემდეგი პროცესი:



ელექტრონების დაკარგვა $\rightarrow$ დენის შემცირება



ნახ. 2.21. ელექტრონების წატაცების დეტექტორი

- 1-ცილინდრული სახურავი; 2-ელექტრომეტრთან მიმყვანი;
- 3-6მმ დიამეტრის მილი; 4-ანოდი; 5-მინის იზოლატორი; 6-დეტექტორის ფუძე;
- 7-სვეტთან მისაერთებელი; 8-სამაგრი ქანჩი; 9-ტეფლონის მილისი;
- 10-1.5 მმ დიამეტრის მილაკი; 11-ტრიტიუმის კილიტა; 12-კათოდი;
- 13- ტეფლონის სახშობი (დეტექტორის კამერიდან გამოსასვლელზე)

ელექტრონების შეპყრობის ალბათობა სხვადასხვა მოლეკულებისთვის დამოკიდებულია მათ სტრუქტურაზე ან მათში ისეთი ატომის შემცველობაზე, რომლებიც შეუძლებელია ელექტრონებს.

ელექტრონების წატაცების დეტექტორები გამოიყენება ჰაერში ტოქსიკური ნივთიერებების, პესტიციდების, ჰერბიციდების, ინსექტიციდების რაოდენობითი განსაზღვრისთვის, ჰორმონების, კანცეროგენული ნივთიერებების და მეტაბოლიტების ანალიზისთვის.

ცხრილში 2.17. მოყვანილია განხილული დეტექტორის ძირითადი მახასიათებლები:

ცხრილი 2.17.

ელექტრონული წატაცების დეტექტორების ძირითადი მახასიათებლები

დეტექტორების მინიმალური ზღვარი	10 ⁻⁸ მკგ
მგრძნობიარობა	ცვლადი
ხაზოვანი დიაპაზონი	500
მონაცემების სტაბილურობა	საშუალო
მაქსიმალური სამუშაო ტემპერატურა	225°C
აირმატარებელი	N ₂ ან Ar + 10% CH ₄

შენიშვნა: დეტექტორი არ არის ძვირად ღირებული და მისი კონსტრუქცია მარტივია. ადვილად ბინძურდება და სუფთავდება. მგრძნობიარეა წყლის მიმართ, ამიტომ აირმატარებელი უნდა იყოს მშრალი

2.2.8. თვითჩამწერი (V კვანძი)

ქრომატოგრაფიული ანალიზის შემდეგ მიღებული შედეგების მუდმივი ჩანერისთვის გამოიყენება თვითჩამწერი დიაგრამული ლენტით. ანალიზის სიზუსტეზე გავლენას ახდენს თვითჩამწერის შემდეგი მახასიათებლები:

მკვდარი ზონა (უგრძნობლობის ზონა). ეს არის დიაპაზონი, რომელშიც თვითჩამწერზე გადაცემული სიგნალის სიძლიერე იცვლება, მაგრამ ეს ცვლილება არ იწვევს თვითჩამწერის კალმის გადაადგილებას. ამ ზონის სიდიდე განისაზღვრება მთელი სკალის გარკვეული პროცენტით.

მგრძნობიარობის ზღვარი არის დიაპაზონი, რომელიც მოქცეულია თვითჩამწერის სკალის ბოლოებს შორის.

თვითჩამწერის კალმის მოძრაობის სიჩქარე ახასიათებს დროს, რომელიც საჭიროა სიგნალის რეგისტრაციისთვის მთლიან სკალაზე.

ხაზოვანი დიაპაზონი განისაზღვრება თვითჩამწერის სკალის 100% სიმაღლის მქონე პიკის სიმაღლის ფარდობით მინიმალურად გაზომილი პიკის სიმაღლესთან, რომელიც ტოლია სკალის 0.5%-ის [15].

თავი 2.3. კაპილარული ქრომატოგრაფია

2.3.1. ზოგადი მიმოხილვა

ქრომატოგრაფიული დაყოფის ეფექტურობის გაუმჯობესების უმარტივესი გზაა გამოყენებული სვეტის სიგრძის გაზრდა. მაგრამ მისი სიგრძის მხოლოდ მექანიკურ ზრდას თუნდაც 15-20 მეტრამდე (სადაც შეიძლება მიღწეულ იქნას 20-30 ათასი თეორიული თეფშების რიცხვი) უარყოფითი მხარეც აქვს. სვეტის სიგრძის გაზრდასთან ერთად მასში მომატებული წნევის გამო ძნელდება სინჯის შეყვანა და რთულდება აპარატის კონსტრუქცია.

მაღალეფექტური დაყოფის მიღწევა შესაძლებელი გახდა XX საუკუნის 50-60-იანი წლებიდან, კაპილარული ქრომატოგრაფიის, როგორც აირქრომატოგრაფიის ერთ-ერთი მიმართულების განვითარების შემდეგ. მის ფუძემდებლად შეიძლება ჩავთვალოთ ნობელის პრემიის ლაურეატი ა. მარტინი, რომელმაც 1956 წელს ინგლისში გამართულ აირქრომატოგრაფიის საერთაშორისო სიმპოზიუმზე გააკეთა მოხსენება „აირქრომატოგრაფიის განვითარების ტენდენციის“ შესახებ. მან მიუთითა ქრომატოგრაფიული სვეტის დიამეტრის რამდენიმე მეათედ მილიმეტრამდე შემცირების პერსპექტივაზე.

1958 წელს ნიდერლანდებში აირქრომატოგრაფიის საერთაშორისო სიმპოზიუმზე მ.გოლეიმ გააკეთა მოხსენება ანალიზურ ქიმიაში ღია კაპილარული სვეტების გამოყენების დიდ შესაძლებლობაზე (დიამეტრი 0.1-0.8 მმ). სვეტის ეფექტურობა აღემატებოდა 50000 თეორიულ თეფშს, ხოლო რთული ანალიზური ნარევის ყველა კომპონენტის დაყოფის ხანგრძლივობა არ აღემატებოდა 9 წთ-ს. ასეთი მაჩვენებლის მქონე ჩანაწერებიანი სვეტის შექმნა იმ დროისთვის არარეალური იყო. ამავე სიმპოზიუმზე მან პირველად გამოაქვეყნა თავისი ცნობილი განტოლება, რომელმაც შესაძლებელი გახდა ღია კაპილარული სვეტების ეფექტურობის განსაზღვრა და რომელმაც შემდგომში აღიარება ჰპოვა [29,30]:

$$H = \frac{2D_g}{u} + \frac{1+6k'+11k'^2}{24(1+k')^2} \left(\frac{r^2}{D_g} \right) \bar{u} + \frac{2k'}{3(1+k')^2} \frac{d_f^2}{D_L} \bar{u} \quad (2.6)$$

სადაც, $\bar{u}$ - აირმატარებლის ხაზოვანი სიჩქარეა, d_f - უძრავი ფაზის აპკის სისქე, D_g და D_L - დიფუზიის კოეფიციენტები შესაბამისად აირად და თხევად ფაზაში, k' - ტევადობის კოეფიციენტი, r - კაპილარის რადიუსი.

სიმპოზიუმის დამსწრე საზოგადოება აღფრთოვანებული დარჩა შეთავაზებული მეცნიერული სიახლით და ასე მიეწოდა სამეცნიერო საზოგადოებას პირველად მაღალეფექტური ქრომატოგრაფიული სვეტის ახალი ტიპი. შემდგომში შემუშავებული იქნა კაპილარულ სვეტში ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვის თეორია, რამაც ექსპერიმენტულად განავითარა აღნიშნული მეთოდი.

დიდი დიამეტრის მქონე შემავესებლიან სვეტებთან შედარებით, კაპილარული სვეტების გამოყენება ამცირებს მათში აირმატარებლის წინააღმდეგობას

და აუმჯობესებს სორბენტსა და აირმატარებელს შორის მასაგადაცემის პროცესს, რაც იწვევს ქრომატოგრაფიული დაყოფის ეფექტურობის გაზრდას. დღეისათვის აირქრომატოგრაფიის სფეროში მსოფლიოში გამოქვეყნებული ნაშრომების სამი მეოთხედი ეძღვნება სწორედ კაპილარულ ქრომატოგრაფიას [29,30,31].

2.3.2. კაპილარული სვეტები

კაპილარული ქრომატოგრაფიული მეთოდის წარმატებას ხელი შეუწყო განვითარებული შიგა ზედაპირის მქონე ახალი კაპილარული სვეტების შექმნამ. კაპილარული სვეტი არის 0.1-1.5 მმ შიგა დიამეტრის და რამდენიმე ათეული მეტრი სიგრძის მქონე მილი, რომლის შიგა კედელი დაფარულია თხევადი ფაზის თხელი ფენით. ქვემოთ ჩამოთვლილია ზოგიერთი მოთხოვნა, რომელსაც უნდა აკმაყოფილებდეს კაპილარული სვეტი ეფექტური მუშაობისთვის:

- კაპილარის შიგა ზედაპირზე არ უნდა მოხდეს საანალიზო ნარევის კომპონენტების, უძრავი ფაზის და საანალიზო ნივთიერებების ადსორბცია;
- კაპილარის შიგა ზედაპირი თანაბრად უნდა დასველდეს უძრავი ფაზით;
- სვეტის დასამზადებელი მასალა ადვილად უნდა გაიჭიმოს თანაბარი განივკვეთის მქონე კაპილარის მისაღებად, ხასიათდებოდეს საკმარისი მექანიკური სიმტკიცით და არ ამჟღავნებდეს ქიმიურ და კატალიზურ აქტივობას;
- კაპილარული სვეტის შიგა ზედაპირი მაქსიმალურად გლუვი უნდა იყოს. ფორები და ნაპრალები ართულებენ კაპილარის კედელზე სითხის ფენის დატანას, რაც იწვევს ადსორბციის აქტიური უბნების წარმოქმნას;
- კაპილარის დიამეტრი თანაბარი უნდა იყოს მის ნებისმიერ ადგილას, მიუხედავად მისი სიგრძისა;

ზემოთ ჩამოთვლილი მოთხოვნები ართულებენ კაპილარული სვეტის დასამზადებელი მასალის შერჩევას და თვით სვეტის დამზადების ტექნიკას. სვეტები ძირითადად მზადდება მინის, მეტალის, უჟანგავი ფოლადის და ზოგიერთი პოლიმერისაგან.

მინის კაპილარულ სვეტებს ახასიათებთ ყველაზე მცირე კატალიზური და ადსორბციული აქტივობა და მათი დამზადება ლაბორატორიულ პირობებში ადვილად შესაძლებელია. მაგრამ მათი გლუვი ზედაპირი ზოგ შემთხვევაში ძნელად სველდება და მოითხოვს სპეციალურ დამუშავებას უძრავი თხევადი ფაზის დაფენამდე.

მეტალის კაპილარული სვეტები ძირითადად მზადდება უჟანგავი ფოლადის, ქრომ-ნიკელის, ფოლადის და სპილენძისგან. სპილენძის სვეტები უმეტესად გამოიყენებოდა კაპილარული ქრომატოგრაფიის განვითარების დასაწყისში. შემდგომში კი ზედაპირის მაღალი აქტივობის გამო მათი გამოყენების სფერო მნიშვნელოვნად შემცირდა. მეტალის კაპილარები გამოირჩევა მექანიკური მდგრადობით, დრეკადობით და თერმოსტაბილურობით. მათი ზედაპირი საკმაოდ ხაოიანია და კარგად ეფინება თხევადი ფაზა, მაგრამ გაუმჭვირვალეა და ამიტომ

შეუძლებელია დაფენილი უძრავი ფაზის მდგომარეობაზე დაკვირვება. მეტალის კაპილარული სვეტების ზედაპირი კატალიზურ ზემოქმედებას ახდენს არა მარტო ორგანული ნაერთის დაყოფაზე, არამედ უძრავ ფაზაზე. ამას გარდა, უმეტეს შემთხვევაში ისინი ადსორბციის ძლიერ უნარს ამჟღავნებენ.

პოლიმერული მასალებიდან კაპილარული სვეტების დასამზადებლად უკეთესია პოლიამიდები: ნაილონი, პერლონი, დედერონი და სხვა, რომელთა ღირსება მათი პლასტიკურობაა. მათგან შეიძლება განსაზღვრული სიგრძის კაპილარების დამზადება, რომლებიც მეტალურისგან განსხვავებით გამჭვირვალეა. პოლიმერების კაპილარები კარგად სველდება ზედაპირის ყოველგვარი წინასწარი დამუშავების გარეშე. მათი ძირითადი უარყოფითი მხარეა დაბალი თერმოსტაბილურობა და მექანიკური მდგრადობა. ამ კაპილარებით შესაძლებელია 80°C -მდე ტემპერატურაზე მუშაობა. ამავე დროს, დასაყოფი ნარევების ზოგიერთი პოლარული ნაერთები შესაძლებელია გაიხსნას არა მხოლოდ უძრავ ფაზაში, არამედ კაპილარული სვეტის კედლებში ან ადსორბირდეს მათზე [29-33].

1977 წლიდან კაპილარული ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში ფართოდ გამოიყენება კვარცის კაპილარული სვეტები. მათი უპირატესობა მინის სვეტებთან შედარებით ძირითადად გამოწვეულია კვარცის მაღალი სისუფთავით. ეს განსაკუთრებით ეხება სინთეზურ კვარცს, რადგან მათში გაცილებით დაბალია მეტალის ოქსიდების შემცველობა (ძირითადად ტუტე მეტალის, ალუმინის და ბორის), რომლებიც ადვილად ურთიერთქმედებენ ელექტრონების დონორ მოლეკულებთან და ელუირდებიან ასიმეტრული პიკების სახით. კვარცის კაპილარული სვეტების მეორე თავისებურებაა წყალბადური ბმების წარმოქმნის უნარის მქონე ჰიდროქსილი ჯგუფების დაბალი შემცველობა, რაც უზრუნველყოფს ფუძე თვისებების მქონე ნივთიერებების დაყოფას. მესამე თავისებურებაა მათი მოქნილობა და ადვილად გაჭიმვის უნარი. ისინი უფრო ადვილად იჭიმება და ეხვევა კოჭაზე. გარედან მათ ფარავენ პოლიიმიდის ან პოლიამიდის ლაქით ატმოსფეროს და ტენის მავნე ზემოქმედებისგან დაცვის მიზნით.

2.3.3. უძრავი ფაზის დატანა კაპილარის კედლებზე

კაპილარული სვეტის შიგა კედლებზე უძრავი ფაზის დაფენის ხერხის შესაბამისად განასხვავებენ რამდენიმე ტიპის კაპილარულ სვეტს:

- ღია კაპილარული სვეტები (Wall Coated Open Tubular-WCOT), რომლებშიც უძრავი ფაზის თხელი აპკი დაფენილია უშუალოდ სვეტის შიდა ზედაპირზე. კაპილარის შიგა დიამეტრია $0.2 \div 0.75$ მმ, ხოლო აპკის სისქე იცვლება $0.1 \div 1.0$ მკმ;
- ღია კაპილარული სვეტები ფოროვანი ფენით (Porous Layer Open Tubular-PLOT), შიგა ზედაპირის მყარ სარჩულზე დაფენილია უძრავი თხევადი ფაზა. ფენის სისქე შეადგენს $1 \div 5$ მკმ;
- ღია კაპილარული სვეტები უძრავი ფაზით გაუდენთილი მყარი სარჩულით კაპილარის შიგა კედლებზე (Support Coated Open Tubular-SCOT); კაპილარული სვეტის ეფექტური მუშაობისთვის დიდი მნიშვნელობა აქვს

უძრავი ფაზის თანაბარ განაწილებას კაპილარის შიგა კედლებზე, რაც სვეტის მომზადების პროცესში ყველაზე რთულ საფეხურს წარმოადგენს.

უძრავი ფაზის დაფენა კაპილარის შიგა კედლებზე ორი გზით შეიძლება განხორციელდეს, დინამიკური და სტატიკური.

პირველ შემთხვევაში სვეტში ატარებენ უძრავი ფაზის 10-15% ხსნარს რომელიმე აქროლად გამხსნელში. ფაზის გადატანა სვეტში ხდება ინერტული აირის ნაკადით. გამხსნელის აორთქლების შემდეგ კაპილარის კედლებზე რჩება ხსნარის თხელი ფენა, რომლის სისქეც დამოკიდებულია ხსნარის კონცენტრაციაზე, სიმკვრივეზე, გადაადგილების სიჩქარეზე და კაპილარის დიამეტრზე.

სტატიკური მეთოდის დროს კი მთელ კაპილარს, რომლის ერთი ბოლო დახურულია, გაავსებენ 1-2%-იანი უძრავი ფაზის ხსნარით. მეორე ბოლოს მოათავსებენ რაიმე ცხელ ზონაში, რაც გამოიწვევს გამხსნელის აორთქლებას, ხოლო უძრავი ფაზა რჩება კაპილარის კედლებზე. დაფენილი ფენის სისქე ჩვეულებრივ 0.1-2 მკმ-ია.

კაპილარული ქრომატოგრაფია დღეისათვის ერთ-ერთ სწრაფად განვითარებად მეთოდს წარმოადგენს მრავალკომპონენტიანი ნარევების ანალიზისთვის და მან გაცილებით გაუსწრო ქრომატოგრაფიის სხვა მეთოდებს. ეს უპირატესობა სწორედ კაპილარული სვეტების მაღალი ეფექტურობიდან გამომდინარეობს, რომელთა თეორიული თეფშების ეკვივალენტური სიმაღლე 0.12-0.15 მმ აღწევს. პრაქტიკაში იყენებენ ძირითადად 30-50 მეტრი სიგრძის სვეტებს და მათზე მიიღწევა მილიონობით თეორიული თეფშების რიცხვი, მაშინ როდესაც შემავსებლიან სვეტში მათი რაოდენობა არ აღემატება ათობით ათასს [29,32,33].

თავი 2.4. აირქრომატოგრაფიული მეთოდის პრაქტიკული გამოყენება

2.4.1. ზოგადი მიმოხილვა

აირქრომატოგრაფიის მეთოდი შეგვიძლია გამოვიყენოთ ნებისმიერი ნივთიერების იდენტიფიკაციისათვის რომლის ორთქლის წნევა $70-400^{\circ}\text{C}$ სვეტის ტემპერატურის პირობებში იმყოფება $1\div 1000$ მმ ზღვრებში [15]. განხილული მეთოდი შესაძლებელს ხდის მცირე დროში ნიმუშის მინიმალური რაოდენობით განხორციელდეს ეფექტური დაყოფა. სხვადასხვა ობიექტების შესასწავლად ზუსტი მონაცემები აირქრომატოგრაფიის გამოყენების შესაძლებლობის შესახებ მოყვანილია შემდეგ მონოგრაფიებში რომლებიც ეძღვნება აირების ანალიზს [34], მავნე მინარევების განსაზღვრას ჰაერში [35,36,37], ნავთობსა და მისი გადამუშავების პროდუქტებს [38,39], კვების პროდუქტებს [40,41], ამინონაერთებს [42], ორგანული მჟავებს [43], ამინომჟავებს [44], პოლიმერების ქიმიას [45], პესტიციდების ანალიზს [46] და სხვა.

უკანასკნელ წლებში განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა ქრომატოგრაფიის გამოყენებას ეკოლოგიური ამოცანების გადასაწყვეტად. კერძოდ, ჰაერის, წყლის, ნიადაგის და ბიოსფეროს დაბინძურების იდენტიფიკაციისთვის [47].

აირქრომატოგრაფიის მეთოდი ფართოდ გამოიყენება არაანალიზური მიზნებისთვის. კერძოდ, საანალიზო ნივთიერების და უძრავი ფაზის ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლების შესასწავლად [48], რასაც საფუძვლად უდევს ამ მახასიათებლების ფუნქციონალური კავშირი ზოგიერთ ქრომატოგრაფიულ პარამეტრთან. ასეთია შეკავებითი მახასიათებელი და ქრომატოგრაფიული პიკის სიგანე [1,3].

ქრომატოგრაფიული მეთოდით განისაზღვრება ნივთიერების შემდეგი ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლები [5].

- განაწილების და აქტიურობის კოეფიციენტები;
- გახსნის თერმოდინამიკური ფუნქციები;
- სორბციის იზოთერმა;
- სპეციფიკური ურთიერთქმედების მახასიათებლები;
- ნაერთთა სტრუქტურები;
- სუფთა ნივთიერებების დუღილის ტემპერატურები და ორთქლის დრეკადობა;
- მყარი ნივთიერებების ნაწილაკების სტრუქტურა, ზედაპირი და ფორმანობა;
- დიფუზიის კოეფიციენტები სითხეებსა და აირებში;
- კინეტიკური მახასიათებლები;
- ნივთიერების თვისებები (ფაზური გარდაქმნის ტემპერატურა, სიბლანტე, მოლეკულური მასები და სხვა).

აირქრომატოგრაფიის გამოყენება არაანალიზური მიზნით აღწერილია მონოგრაფიებში [48,49,50] და ამ დარგით დაინტერესებულ მკითხველს შეუძლია გამოიყენოს მითითებული ლიტერატურა.

ლაბორატორიულ პირობებში პრეპარატული აირქრომატოგრაფია გამოიყენება ნარევებიდან განსხვავებული სტრუქტურის მქონე ნივთიერებების გამოსაყოფად. მაგალითად, მიკროპრეპარატული ქრომატოგრაფია გამოიყენება ნავთობიდან ინდივიდუალური ნახშირწყალბადების გამოსაყოფად [51].

აირქრომატოგრაფია წარმატებით გამოიყენება სამრეწველო პროცესების ავტომატიზაციისთვის. სპეციალურად კონსტრუირებული სამრეწველო ქრომატოგრაფი უშუალოდ მიერთებულია ტექნოლოგიურ მოწყობილობასთან და ახდენს საანალიზო ნარევის შედგენილობის რეგისტრირებას, იძლევა მართვის სიგნალს, რომლის საშუალებითაც ოპერატორი მართავს ტექნოლოგიური პროცესის მსვლელობას. გამოქვეყნებული მონაცემების მიხედვით, ნავთობგადამამუშავებელ მრეწველობაში ავტომატიზებული ანალიზატორების საერთო რიცხვიდან მეოთხედი სწორედ სამრეწველო ქრომატოგრაფიაზე მოდის [3].

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Сакодынский К.И и др. Аналитическая хроматография. М.; Химия, 1993, 463 с.
2. Руководство по газовой хроматографии. Пер. с немецкого, под редакцией Лейбница Э., Штруппе Х.Г., М.; Мир, 1988, 479 с.
3. Гольберт К.А., Вигдергауз М.С. Введение в газовую хроматографию, М., Химия, 1990, 351с.
4. Киселев А.В., Яшин Я.И. Адсорбционная газовая и жидкостная хроматография, М.; Химия, 1979, 288 с.
5. Айвазов Б.В. Введение в хроматографию. М.; Высшая школа., 1983, 239 с.
6. Ногаре С.Д., Джувет Р.С., Газо-жидкостная хроматография. Пер. с английского, под редакцией Александрова А.Н. и Дементьевой М.И. Л.; Недр, 1966, 471с.
7. Андроникашвили Т.Г. ЖВХО им Менделеева, т. XXVIII, №1, 1983, с. 96-99
8. Цицишвили Г.В., Андроникашвили Т.Г., В сб. Успехи хроматографии, М.; Наука, 1972, с. 226-235
9. Андроникашвили Т.Г., Цицишвили Г.В., В сб. Поверхностные явления на алюмосиликатах, Тбилиси, Мецниереба, 1965, с 34-64.
10. Андроникашвили Т.Г., Цицишвили Г.В. Химия и химическая технология. сборник трудов, Тбилиси, Мецниереба, 2001, с. 25-42
11. Андроникашвили Т.Г., Лаперашвили Л.Я., Квернадзе Т.К. Изв. АН ГССР, сер. хим., 1981, 7, №3, с. 224-229
12. Эприкашвили Л.Г. Газовая хроматография, Тбилиси, Мецниереба, 1986, с. 34-45
13. Сакодынский К.И. Панина Л.И., Полимерные сорбенты для молекулярной хроматографии. М.; Наука, 1977, 165 с.
14. Щербакова К.Д., Яшин Я.И. Современное состояние и перспективы развития теории

- адсорбции. IX Международная конференция по теоретическим вопросам адсорбции и адсорбционной хроматографии, 2001, Москва, 24-28 Апреля, с. 276-280
15. Мак-Неир Г., Бонелли Э. Введение в газовую хроматографию. Пер. с английского, под редакцией Жуховицкого А.А. М.; Мир, 1970, 277 с.
 16. Березкин В.Г., Пахомов В.П., Сакодынский К.И. Твердые носители в газовой хроматографии., М.; Химия, 1975, 200 с.
 17. Супина В. Насадочные колонки в газовой хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Березкина В.Г. М.; Мир, 1977, 254 с.
 18. Лурье А.А., Хроматографические материалы, М.; Химия, 1978, 440 с.
 19. Andronikashvili T.G., Tsitsishvili G.V., Kvernadze T.K., Okudzhava N.G. J. of Chromatography, 406, 1987, p. 145-150
 20. Andronikashvili T.G., Laperashvili L.YA., Kvernadze T.K. J. of Chromatography, 191, 1980, p. 323-325
 21. Коцев Н., Справочник по газовой хроматографии. Пер. с болгарского, под редакцией Березкина В.Г. и Урина А.Б. М.; Мир, 1976, 199 с.
 22. Андроникашвили Т.Г., Арустамова Л.Г., Султанов Н.Т., Макарян К.Г. Жидкие кристаллы в капиллярной хроматографии. Тбилиси, Мецниереба, 1982, 98 с.
 23. Сакодынский К.И., Орехов Б.И. Хроматография в науке и технике. М.; Химия, 1982/9, 63 с.
 24. Блаженнова А.Н., Ильинская А.А., Рапопорт Ф.М., Анализ газов в химической промышленности. М.; Госхимиздат, 1954, 327 с.
 25. Шингляр М. Газовая хроматография в практике, Пер. с словацкого, М.; Химия, 1964, 195 с.
 26. Janak J. Chem. List, 1953, 47, p. 817-823
 27. Бражников В.В. Дифференциальные детекторы для газовой хроматографии. М.; Наука, 1974, 223 с.
 28. Berezkin V.G., Andronikashvili T.G., Tsitsishvili G.V., Gvelesiani Z.A. Chromatographia, v.22, No.1-6, June, 1986, p. 95-98
 29. თ.გ. ანდრონიკაშვილი სოროსის საგანმანათლებლო ჟურნალი, 2002, №2, 56-70
 30. Руденко Б.А. Капиллярная хроматография. М.; Наука, 1978, 222 с.
 31. Березкин В.Г. Высокоэффективная газовая хроматография, 1987/10, Знание, 44 с.
 32. Дженнингс В. Газовая хроматография на стеклянных капиллярных колонках. Пер. с английского, под редакцией Березкина В.Г. М.; Мир, 1980, 232 с.
 33. Тесаржик К., Комарек К. Капиллярные колонки в газовой хроматографии. Пер. с чешского, под редакцией Березкина В.Г. М.; Мир, 1987, 222 с.
 34. Джеффери П., Киппинг П. Анализ газов методами хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Березкина В.Г. М.; Мир, 1976, 256 с.
 35. Яворская С.Ф. Газовая хроматография-метод определения вредных веществ в воздухе и биологических средах. М.; Медицина, 1972, 207 с.

36. Хроматографический анализ окружающей среды. Пер. с английского, под редакцией Березкина В.Г. М.; Химия, 1979, 606 с.
37. Другов Ю.С. и др. Методы анализа загрязнений воздуха. М.; Химия, 1984, 384 с.
38. Вигдергауз М.С. Газовая хроматография как метод исследования нефти. М.; Наука, 1973, 256 с.
39. Колесникова Л.П. Газовая хроматография в исследованиях природных газов, нефтей и конденсатов. М.; Недра, 1972, 135 с.
40. Круко В.И. Газохроматографический анализ пищевых продуктов. М.; Пищевая промышленность, 1965, 236 с.
41. Шатиришвили И.Ш. Хроматография в энологии. Тбилиси, Ганатлеба, 1986, 111 с.
42. Андерсон А.А. Газовая хроматография аминсоединений. Рига, Зинатне, 1982, 374 с.
43. Горяев М.И., Евдакова Н.А. Справочник по газожидкостной хроматографии органических кислот. Алма-Ата, Наука Каз.ССР, 1977, 552 с.
44. Сунозова Е.В., Трубников В.И., Сакодынский К.И. Газовая хроматография аминокислот. М.; Наука, 1976, 83 с.
45. Березкин В.Г., Алишоев В.Г., Немировская И.В. Газовая хроматография в химии полимеров. М.; Наука, 1972, 287 с.
46. Ермаков В.В. Газохроматографические методы определения пестицидов в биологических объектах. М.; Наука, 1972, 168 с.
47. Другов Ю.С., Зенкевич И.Г., Родин А.А. Хроматографическая идентификация загрязнений воздуха, воды, почвы и биосферы. М.; Биом, 2005, 752 с.
48. Вигдергауз М.С., Измайлов Р.И. Применение газовой хроматографии для определения физико-химических свойств веществ. М.; Наука, 1970, 160 с.
49. Березкин В.Г., Гавричев В.С., Зорина Г.П. Изв. АН СССР, сер. хим. 1972, №9, с. 1975-1982
50. Амирханашвили К. Оптимизация хроматографических исследований. Тбилиси, Универсал, 2004, 259 с.
51. Лунский М.Х. Сакодынский К.И., Шдяхов А.Ф. Итоги науки и техники. Хроматография. М.; ВИНТИ, 1980, т. 3, с. 51-77

ნაწილი 3. თხევადი სვეტური ქრომატოგრაფია

თავი 3.1.

თხევადი ქრომატოგრაფიის ძირითადი თეორია

შესავალი

XX საუკუნის შუა წლებიდან თხევადი ქრომატოგრაფიის მეთოდმა სწრაფი განვითარება დაიწყო და მალე იგი გახდა ორგანულ ნივთიერებათა დაყოფისა და ანალიზის საყოველთაოდ აღიარებული მეთოდი. უფრო მოგვიანებით, 70-იანი წლებიდან, ვითარდება **მაღალეფექტური თხევადი ქრომატოგრაფია (მედი)**, რომელმაც გამოყენების ტემპებით არა მხოლოდ შეცვალა კლასიკური სვეტური, თხელფენოვანი და ქაღალდზე ქრომატოგრაფია, არამედ საგრძნობლად ჩამოიტოვა უკან აირქრომატოგრაფიაც. მაღალეფექტური თხევადი ქრომატოგრაფიის სწრაფი განვითარება განპირობებული იყო საკვლევი ნივთიერების მოლეკულური მასების ფართო სპექტრით. თუ აირქრომატოგრაფია ძირითადად გამოიყენება 500-600 ნ.ე. მასის მქონე ნივთიერებების ნარევების დასაყოფად, თხევადი ქრომატოგრაფიის გამოყენებისას ეს რიცხვი რამდენიმე ასეულიდან მილიონამდე იზრდება. მათ შორისაა პოლიმერების საკმაოდ რთული მაკრომოლეკულები, ცილები, ნუკლეინმჟავები და სხვა რთული ნაერთები [1]. ამასთანავე თითქმის ყველა დაყოფა შეიძლება ჩატარდეს ოთახის ტემპერატურასთან ახლოს, ჰაერთან კონტაქტის გარეშე, რაც ძალზე მნიშვნელოვანია ლაბილური ნაერთების, კერძოდ, ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების და ბიოპოლიმერების კვლევისთვის [2].

3.1.1. თხევადი ქრომატოგრაფიის პროცესი

თხევადი ქრომატოგრაფიის პროცესი ხორციელდება თხევადი მოძრავი ფაზის გამოყენებით, რომლის საშუალებითაც ხდება საანალიზო ნარევის გადატანა სვეტის გასწვრივ. აირმატარებლისგან განსხვავებით მოძრავი ფაზა აქტიურად მონაწილეობს დაყოფის პროცესში და გავლენას ახდენს მასზე. ისევე როგორც აირქრომატოგრაფიაში, განხილულ შემთხვევაშიც ნარევის კომპონენტების დაყოფა ხორციელდება მათი სხვადასხვაგვარი განაწილების (ან ადსორბციის) უნარის მიხედვით უძრავ და მოძრავ ფაზებს შორის.

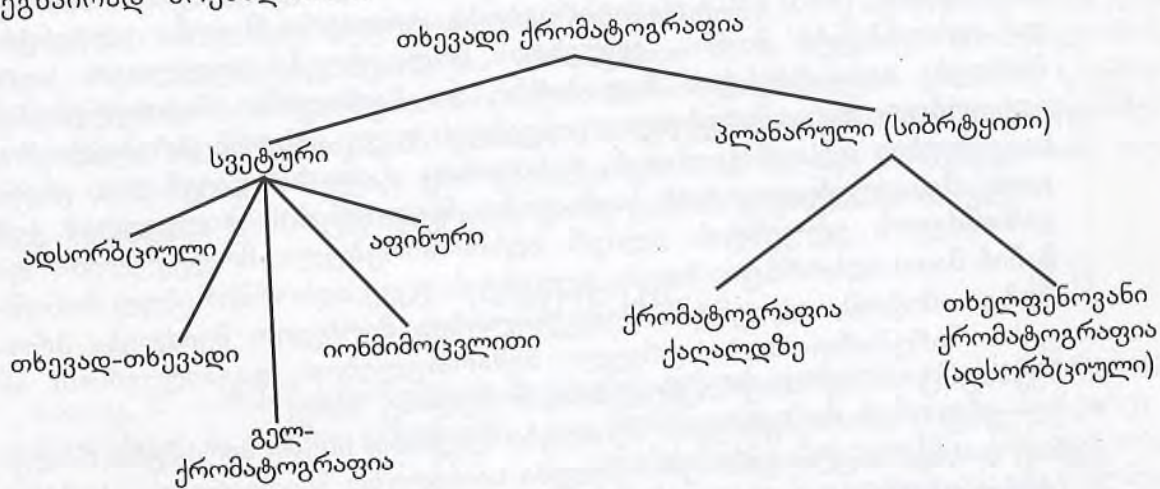
როდესაც საანალიზო ნივთიერებები იმყოფებიან მოძრავ ფაზაში, ისინი მასთან ერთად გადაადგილდებიან სვეტის (უძრავი ფაზის) გასწვრივ, ხოლო თუ უძრავ ფაზაში იმყოფებიან, გარკვეული დროის განმავლობაში რჩებიან ადგილზე. რაც მეტია კომპონენტის მსგავსება უძრავ ფაზასთან და ნაკლებია მისი მსგავსება მოძრავ ფაზასთან, მით ნელა მოძრაობს იგი სვეტის გასწვრივ და მეტად შეკავდება. სწორედ ეს მსგავსება ან განსხვავება უძრავი და მოძრავი ფაზების მიმართ, რაც თითოეული კომპონენტისთვისაა დამახასიათებელი,

განაპირობებს ქრომატოგრაფიულ დაყოფას, მაგრამ იგი მხოლოდ მაშინ განხორციელდება, თუ საანალიზო კომპონენტები გაიხსნება მოძრავ ფაზაში და ურთიერთქმედებაში შევა უძრავ ფაზასთან. თუ სინჯის კომპონენტები არ ურთიერთქმედებენ უძრავ ფაზასთან, ისინი გაივლიან სვეტს მოძრავ ფაზასთან ერთად და არ მოხდება მათი დაყოფა.

ქრომატოგრაფიული პროცესის ძირითადი საკითხები, როგორცაა სვეტის ეფექტურობა, ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვა, ტევადობის კოეფიციენტების და სხვა მახასიათებლების არსი და გაანგარიშებები მსგავსია აირქრომატოგრაფიის შესაბამისი სიდიდეებისა (იხ. ნაწილი I, II) და ამიტომ, ჩვენი სახელმძღვანელოს ამ ნაწილში თხევადი ქრომატოგრაფიის მხოლოდ განსხვავებულ პრინციპებს და პარამეტრებს განვიხილავთ.

3.1.2. თხევად-ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია

აპარატული გაფორმების და გამოყენებული უძრავი ფაზების ბუნების მიხედვით, თხევად-ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია შეიძლება შემდეგნაირად მოვახდინოთ:



ნახ.3.1 თხევად ქრომატოგრაფიული პროცესების კლასიფიკაცია

3.1.2.1. თხევად-ადსორბციული ქრომატოგრაფია

ადსორბციული ქრომატოგრაფიის საფუძველია საანალიზო ნივთიერების სხვადასხვაგვარი ადსორბციული უნარი მოცემულ სორბენტზე. მაგალითად, სილიკაგელზე ან ალუმინის ოქსიდზე, რომელთაც ზედაპირზე გააჩნიათ აქტიური ცენტრები. ამ აქტიურ ცენტრებთან საკვლევი ნივთიერებების განსხვავებული ურთიერთქმედება იწვევს მათ ზონებად დაყოფას. მიღებული დაყოფის ხარისხი დამოკიდებულია საანალიზო ნივთიერებების ურთიერთქმედებაზე როგორც მოძრავ ფაზასთან, ასევე ადსორბენტთან. განასხვავებენ ადსორბენტთან მოლეკულათაშორის ურთიერთქმედების სამ ტიპს [3]:

- ლონდონის დისპერსიული ძალები;

- ინდუქციური ძალები;

- სპეციფიკური ძალები, ასეთი ტიპის ძალებს მიეკუთვნება: დიპოლ-დიპოლური ურთიერთქმედება მუდმივ ან ინდუცირებულ დიპოლს შორის, წყალბადური ბმების წარმოქმნა და ქემოსორბცია, რაც შეკავების დროების გაზრდის, ეფექტურობის დაცემის და შეუქცევადი ადსორბციის ძირითადი მიზეზია.

ადსორბციულ ქრომატოგრაფიაში ძირითადად გამოიყენება სილიკაგელი და ალუმინის ოქსიდი. ამ ორ ადსორბენტს შორის უპირატესობა სილიკაგელს ენიჭება. ორივე ტიპის სორბენტს ჩვენ უფრო დეტალურად ქვემოთ განვიხილავთ.

ხსნარიდან ადსორბციის კანონზომიერების შესაბამისად, მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში მხედველობაში მიიღება მოძრავი ფაზის ურთიერთქმედება ადსორბენტთან და საანალიზო ნივთიერებასთან. ამიტომ თხევად ქრომატოგრაფიაში ვლავარაკობთ მთლიანად ქრომატოგრაფიული სისტემის, ადსორბენტი—ნივთიერება—ელუენტი, სელექტიურობაზე და საანალიზო ნივთიერების შეკავება შემდეგი თავისებურებით ხასიათდება [4,5,6]:

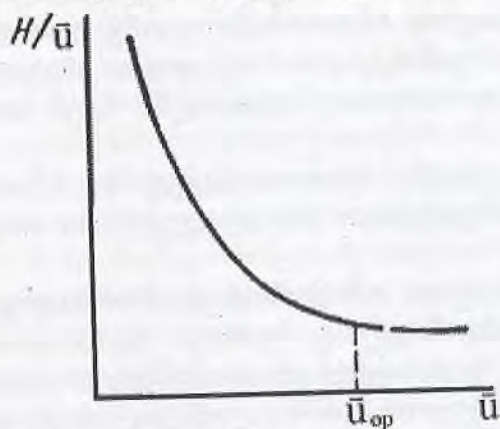
- დაყოფის პროცესში მეტად მნიშვნელოვანია მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედება როგორც საანალიზო ნივთიერებისა და ელუენტისა ადსორბენტთან, ასევე თვით ნივთიერებასა და ელუენტს შორის.
- იმის გამო, რომ სისტემაში არსებობს ურთიერთქმედება ელუენტსა და ადსორბენტს შორის, ელუენტის მოლეკულები ყოველთვის სორბირდება ადსორბენტის ზედაპირზე და საანალიზო ნივთიერებების ადსორბცია დაკავშირებულია ელუენტის უკვე ადსორბირებული მოლეკულების დესორბციასთან, რისთვისაც ისინი ხარჯავენ დიდ ენერგიას. შესაძლებელია რომ საანალიზო ნივთიერების მოლეკულამ ვერ გამოაძევოს ელუენტის ძლიერ ადსორბირებული მოლეკულები და მაშინ მათი ადსორბცია ხდება ელუენტის უკვე ადსორბირებულ მონოშრეზე. ამიტომ, ელუენტის შედგენილობის შერჩევით შეიძლება პროცესი წარმართოთ სასურველი მიმართულებით, გავაძლიეროთ ან შევასუსტოთ ურთიერთქმედების რომელიმე სახე;
- ელუენტის სწორი შერჩევით შეიძლება შევქმნათ ისეთი პირობები, როდესაც დისპერსიული ურთიერთქმედება საანალიზო ნივთიერებისა ადსორბენტი პრაქტიკულად გავლენას არ მოახდენს შეკავებაზე. ასეთ შემთხვევაში მაგალითად, ჰომოლოგიური რიგის ნივთიერებები არ დაიყოფიან და შესაძლებელია მათი მხოლოდ ჯგუფური დაყოფა კლასებად;
- ადსორბენტის ბუნების ცვლილების გარეშე შეგვიძლია მოვახდინოთ დაყოფის სელექტიურობის რეგულირება მხოლოდ საანალიზო ნივთიერებასა და ელუენტს შორის მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედების ცვლილებით. ელუენტის შედგენილობის ცვლილებით იცვლება ამ ურთიერთქმედების ენერგია, ამიტომ ელუენტში სულ მცირე რაოდენობით სპეციალური ნივთიერების დამატებით ადგილი აქვს ახალი ტიპის სპეციფიკური ურთიერთქმედების (იონური, კომპლექსნარმოქმნელი, დონორ-აქცეპტორული) ჩამოყალიბებას. აქ შეიძლება გამოვყოთ ორი შემთხვევა: ა) ელუენტში დამატებული კომპონენტი არ ადსორბირდება უძრავ ფაზაზე. ასეთ შემთხვევაში გაიზრდება მოლეკულათაშორი-

სი ურთიერთქმედება საანალიზო ნივთიერება-ელუენტს შორის, რის გამოც ელუენტი ადვილად მოწყვეტს თუნდაც უკვე ადსორბირებული ნივთიერების მოლეკულებს უძრავი ფაზის ზედაპირიდან და გადაიტანს მათ ხსნარში, რითაც შეკავება შემცირდება. ამგვარი პროცესების შედეგად ზოგიერთი ნივთიერებების მიმართ სისტემის სელექტიურობა იზრდება. ბ) ელუენტში მცირე რაოდენობით დამატებული სპეციალური ნივთიერება ძლიერ სორბირდება უძრავ ფაზაზე და აძლიერებს ურთიერთქმედებას საანალიზო ნივთიერება-ადსორბენტს შორის. ამგვარი სპეციფიკური ურთიერთქმედების გამო, ერთი და იგივე ადსორბენტზე, შეგვიძლია დავყოთ ნარევეები ქრომატოგრაფიის სხვადასხვა ვარიანტებით: ნორმალურ-ფაზური, იონ-წყვილური, ლიგანდმიმოცვლითი და სხვა [3,4].

დაყოფის ეფექტურობა, რომელიც t_{R1} -ით (H) განისაზღვრება, დამოკიდებულია უძრავ და მოძრავ ფაზებში მასაგადაცემის პროცესებზე. ქრომატოგრაფიული ზონების წარეცხვა იგივე ფაქტორებით განისაზღვრება როგორც აირქრომატოგრაფიაში და აღინერება ვან-დეემტერის განტოლებით. ასევე ძალაში რჩება დაყოფის კრიტერიუმის (R) გამოთვლა, მაგრამ ანალიზის ჩატარებისას მნიშვნელოვანია არა მარტო სრული დაყოფის მიღწევა, არამედ ანალიზის დროის სიმცირეც. აუცილებელია რომ ფარდობა R / t_R იყოს რაც შეიძლება დიდი, რისი მიღწევაც შეიძლება ორი გზით: R -ის მუდმივი მნიშვნელობის შენარჩუნებით შეირჩეს მუშაობის ისეთი პირობები, რომლის დროსაც t_R იქნება დაბალი ან პირიქით, t_R -ის დაბალი მნიშვნელობის შენარჩუნებით შეირჩეს ისეთი პირობები, რომელიც უზრუნველყოფს R -ის მაღალ მნიშვნელობას. თუ, $R=1$, ადგილი აქვს სრულ დაყოფას და t_R განისაზღვრება ფორმულით

$$t_R = n (1+K') H / \bar{u} \quad (3.1)$$

სადაც, K' - არის შესწორებული შეკავების დროის ფარდობა არასორბირებადი კომპონენტის შეკავების დროსთან; $\bar{u}$ - მოძრავი ფაზის ხაზოვანი სიჩქარე;



ნახ.3.2. $H/\bar{u}$ და $\bar{u}$ დამოკიდებულება, რომელიც ახასიათებს ხაზოვან სიჩქარეს და ანალიზის ხანგრძლივობას

სიჩქარის გაზრდით $H/\bar{u}$ სიდიდე თავდაპირველად მკვეთრად ეცემა, აღწევს გარკვეულ ზღვარს და მუდმივი რჩება ან უმნიშვნელოდ იცვლება (ნახ. 3.2). ამიტომ, ოპტიმალურ სიჩქარედ შეიძლება ჩაითვალოს ის მნიშვნელობა, რომლის მიღწევისასაც მრუდის დახრა $\bar{u}$ ღერძის მიმართ უმნიშვნელოა. სიჩქარის მომატებას ოპტიმალურზე ზევით აზრი აღარ აქვს სისტემაში წნევის ცვლილების გამო.

სვეტის ეფექტურობაზე გავლენას ახდენენ მის გარეთ მოქმედი ფაქტორებიც, ქრომატოგრაფიული ზოლის წარეცხვა

შემაერთებელ კაპილარებში და დეტექტორის კამერაში, ამიტომ ისინი მინიმალური ზომისა უნდა იყოს [3].

3.1.2.2. განაწილებითი (თხევად-თხევადი) ქრომატოგრაფია

განაწილებითი ქრომატოგრაფია თხევადი ქრომატოგრაფიის ერთ-ერთ ვარიანტს წარმოადგენს, როდესაც ნარევების დაყოფა შემადგენელ კომპონენტებად ხორციელდება, განაწილების სხვადასხვა კოეფიციენტის შესაბამისად ერთმანეთში შეურევად უძრავ და მოძრავ ფაზას შორის. ამ შემთხვევაში უძრავი ფაზა არის სითხე, დაფენილი მყარ, ინერტულ სარჩულზე ან ქიმიურად დაკავშირებულია მის ზედაპირთან (ე.წ. მიკერებულ-ფაზური სორბენტები) [2,7-9].

ისტორიულად თავდაპირველი სორბენტები, რომლებიც გამოიყენებოდა განაწილებით თხევად ქრომატოგრაფიაში, მზადდებოდა ფოროვან მყარ სარჩულზე თხევადი უძრავი ფაზის უშუალო დატანით. ამგვარად დამზადებულმა უძრავმა ფაზებმა გამოამჟღავნეს რიგი ნაკლოვანებები, რომელთა შორისაც უმნიშვნელოვანესია მყარი სარჩულიდან თხევადი უძრავი ფაზის გამორეცხვა, რის გამოც მცირდება სვეტში მისი რაოდენობა და შესაბამისად მცირდება საანალიზო ნივთიერებების შეკავების დროებიც. სვეტის დასაწყის ნაწილში წარმოიქმნება უძრავი ფაზისაგან თავისუფალი ადსორბირებული ცენტრები, რაც შემდეგ ქრომატოგრამაზე პიკის კუდის წარმოქმნის მიზეზი ხდება. ამ მოვლენის აღმოსაფხვრელად წინასწარ ახდენენ მოძრავი ფაზის გაჯერებას უძრავი თხევადი ფაზით და ამით შესაბამისად ამცირებენ მის გამოტანას სვეტიდან. ამავე მიზნით იყენებენ უფრო ბლანტი და ნაკლებად ხსნად პოლიმერულ ფაზებს, თუმცა სქელ პოლიმერულ ფენაში დიფუზიის პროცესი რთულდება, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს სვეტის ეფექტურობას.

ლოგიკურად დადგა საკითხი ისეთი სორბენტების შემუშავებისა, რომლებზეც თხევადი უძრავი ფაზა რაიმე მეთოდით იქნებოდა დაფიქსირებული და არ მოხდებოდა მისი ასე მარტივად მოცილება მყარი სარჩულის ზედაპირიდან. ქრომატოგრაფიული სორბენტების განვითარების ისტორიაში დაიწყო ახალი ერა ე.წ. მიკერებულ ფაზური სორბენტების გამოყენების პერიოდი. ამგვარი სორბენტების სტრუქტურისა და მომზადების ძირითად საკითხებს ჩვენ ზოგადად შემდგომში შევხებით.

მიკერებულ ფაზური სორბენტების გამოყენების ფართო სპექტრმა შესაძლებელი გახადა სწრაფი ტემპებით განვითარებულიყო მაღალეფექტური თხევადი ქრომატოგრაფიის მეთოდი.

განასხვავებენ განაწილებითი ქრომატოგრაფიის ორ ვარიანტს, **ნორმალურ** და **შებრუნებულ** ფაზურ ქრომატოგრაფიას. როდესაც უძრავი ფაზა არის პოლარული (სილიკაგელი, ალუმინის ოქსიდი, ნიტრილის და ამინის მიკერებულ ფაზური სორბენტები), ხოლო მოძრავი ფაზა შედარებით ნაკლებ პოლარულია, ადგილი აქვს **ნორმალურ-ფაზურ ქრომატოგრაფიას**. როდესაც უძრავი ფაზა არაპოლარულია (ნახშირწყალბადების სხვადასხვა სიგრძის რადიკალით მიკე-

რებულ ფაზური სორბენტები) ხოლო მოძრავი პოლარული (წყალი, მეთანოლი) საქმე გვაქვს **შებრუნებულ ფაზურ ქრომატოგრაფიასთან** [2]. ეს უკანასკნელი წარმოადგენს ფართოდ გამოყენებულ მეთოდს მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში და მისი წარმატებით გამოყენება განაპირობა ერთი მხრივ სპეციალურად სინთეზირებული სორბენტების სიუხვემ, მეორე მხრივ მოძრავი ფაზის სახით ისეთი გამხსნელების (აცეტონიტრილი, მეთანოლი, წყალი, შედა-რებით ნაკლებად ტეტრაჰიდროფურანი) გამოყენებამ, რომლებიც მათთვის დამახასიათებელი დაბალი შთანთქმის სპექტრის გამო (190-210 ნმ) ულტრაიის-ფერი სხივების ფართო დიაპაზონში მუშაობის საშუალებას იძლევიან.

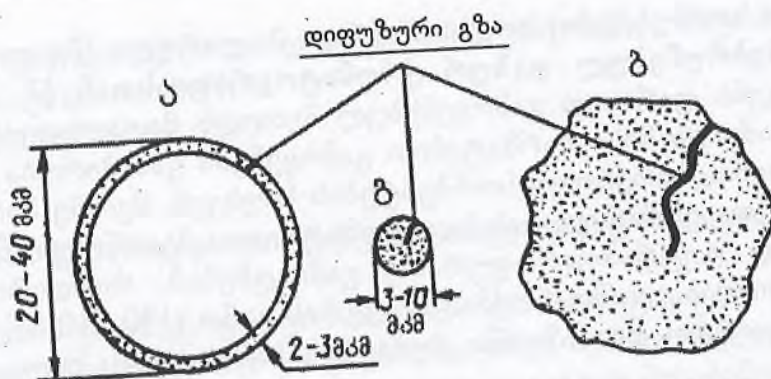
3.1.3. უძრავი ფაზები თხევად ქრომატოგრაფიაში

3.1.3.1. ზოგადი მიმოხილვა

უძრავი ფაზები თხევად ქრომატოგრაფიაში წარმოადგენენ მყარ ნივთიერებებს ან სითხეებს დაფენილს მყარ სარჩულზე, რომელზედაც კონცენტრირდება საკვლევი ნივთიერების მოლეკულები [9]. მათი რიცხვი გაცილებით ჩამორჩებოდა აირქრომატოგრაფიაში გამოყენებული უძრავი ფაზების რიცხვს, მაგრამ სპეციალური დანიშნულების სორბენტების შექმნასთან ერთად მათმა როდენობამ მნიშვნელოვნად იმატა და ამით შესაძლებელი შეიქმნა მეტად რთული ამოცანების გადაწყვეტა. პროცესის სპეციფიკიდან გამომდინარე, აირ და თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული სორბენტების მიმართ წაყენებული მოთხოვნები განსხვავდება ერთმანეთისგან. კერძოდ, იმის გამო, რომ თხევად ქრომატოგრაფიაში მოძრავი ფაზა თითქმის ყოველთვის სორბირდება უძრავი ფაზის ზედაპირზე, მისი ზედაპირის ერთგვაროვნება ნაკლებად მნიშვნელოვანია აირქრომატოგრაფიასთან შედარებით. აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ მასაგადაცემის პროცესი სითხეებში მიმდინარეობს გაცილებით ნელა, ვიდრე აირებში და შენელებული მასაგადაცემის გამო წვრილფორიანი სორბენტების გამოყენება შეზღუდულია. გარდა ამისა, რადგან უძრავი ფაზა თხევად ქრომატოგრაფიაში ყოველთვის მაღალი წნევის გავლენას განიცდის, აუცილებელია, რომ მას ჰქონდეს დიდი მექანიკური სიმტკიცე, ხოლო ნაწილაკის ფორმა შეძლებისდაგვარად სფერული იყოს [3].

ფორებში მიმდინარე დიფუზური პროცესის მიხედვით თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული სორბენტები იყოფიან ორ ჯგუფად: ზედაპირულ-ფორივანი და მოცულობითი სორბენტები. ნახ.3.3-ზე ნაჩვენებია სორბენტის ფორებში მიმდინარე პროცესის თავისებურებანი [9]

ზედაპირულ-ფორივანი სორბენტები ისტორიულად პირველი სორბენტებია თხევად ქრომატოგრაფიაში, მაგრამ მათი გამოყენება ანალიზური მიზნებისთვის თითქმის აღარ ხდება რიგი ნაკლოვანებების გამო. ესენია: ქრომატოგრაფიულ სვეტში სორბენტის მცირე ზედაპირი, ხოლო, თუ გრძელ სვეტებს გამოვიყენებთ დიდი ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა; დაბალი წარმადობა და არასაკმარისი ეფექტურობა.



ნახ.3.3. თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული სორბენტის ტიპები
 ა) ზედაპირულ-ფოროვანი; ბ) მოცულობითი; გ) მაკროფოროვანი მიკრონანილაკი

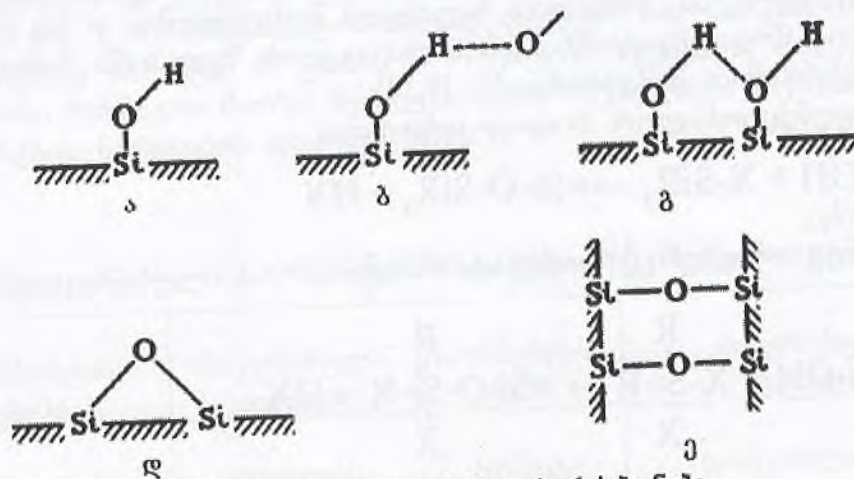
ზედაპირულ-ფოროვანი სორბენტების ნაცვლად პრაქტიკაში გამოიყენება მცირე ზომის (ნახ.3.3.გ), სფერული ან არარეგულარული ფორმის მქონე მოცულობითი სორბენტები. მათი გამოყენება ამცირებს დიფუზურ მანძილს ფორებში და შესაბამისად ზრდის სევეტის ეფექტურობას.

ქიმიური ბუნების მიხედვით სორბენტები შეიძლება დაიყოს სამ ჯგუფად: არაორგანული (სილიკაგელი, ალუმინის ჟანგი), ორგანული (მიკროფოროვანი და გელური სტრუქტურის მქონე პოლიმერების საფუძველზე) და შერეული. განსაკუთრებულ ჯგუფს წარმოადგენს სორბენტები ქიმიურად „მიკერებული“ ორგანული ფუნქციონალური ჯგუფებით ან ალკილის რადიკალით, რომელთაც მნიშვნელოვანი ადგილი უკავიათ მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოყენებულ სხვა სორბენტებს შორის. განსაკუთრებით ეს შეეხება სილიკაგელსა და მის ბაზაზე სინთეზირებულ სორბენტებს. ჩვენც სწორედ ამ ტიპის სორბენტებს განვიხილავთ უფრო დეტალურად [9].

3.1.3.2. სილიკაგელი

სილიკაგელი ანუ როგორც მას ხშირად უწოდებენ სილიციუმის ოქსიდი, განვითარებული ზედაპირის (100-600 მ²/გრ) გამო, წარმოადგენს ერთ-ერთ ფართოდ გამოყენებულ სორბენტს თხევადი ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში. სილიკაგელს სხვადასხვა მეთოდებით ღებულობენ, რის გამოც სხვადასხვაა მისი ზედაპირის pH, ფორების განაწილება ზომების მიხედვით და ხვედრითი ზედაპირი. მისი მიღების პირველ და ყველაზე ფართოდ გავრცელებულ მეთოდს წარმოადგენს ე.წ. თხევადი მინის (პოლისილიციუმჟავას ნატრიუმის მარილი) დამუშავება მჟავებით. მაღალეფექტური თხევადი ქრომატოგრაფიისთვის შემუშავებულია ნებისმიერი ზომის ნანილაკების (3-12 მკმ) მქონე სილიკაგელის მიღების სხვადასხვა მეთოდი, ხოლო ის ფაქტი თუ რა ფორმის ნანილაკებს (სფერულს თუ არარეგულარულს) მიენიჭოს უპირატესობა ეფექტურობისა და სტაბილურობის თვალსაზრისით, დადგენილი არ არის. თუმცა სხვადასხვა ფორმების მიერ შემოთავაზებული სორბენტების უმრავლესობა სფერული ფორმისაა.

თერმულად ჯერ კიდევ დაუმუშავებელი სილიკაგელის ზედაპირი შეიცავს ფიზიკურად ადსორბირებულ წყალს, რომელიც 150-200°C გახურებით სცილდება და მის ზედაპირზე რჩება ჰიდროქსილის ჯგუფები, რომლებთანაც ურთიერთქმედებენ საკვლევი ნივთიერების მოლეკულები. განასხვავებენ ჰიდროქსილის ჯგუფების შემდეგ სახეებს (ნახ.3.4): ა) სილანოლური ჯგუფები თავისუფალი ჰიდროქსილით; ბ) სილანოლური ჯგუფები, რომლის ჰიდროქსილიც მეზობელ ჟანგბადის ატომებთან წარმოქმნიან წყალბადურ ბმას, ე.წ. ბმული ჰიდროქსილი; გ) რეაქციის უნარის მქონე ბმული ჰიდროქსილი; დ) სილოქსანის ჯგუფები, რომლებიც წარმოიქმნება სილანოლური ჯგუფების კონდენსაციით სილიკაგელის 200-400°C გახურებისას. სორბენტის შემდგომი გახურება იწვევს კონდენსაციას „მეზობელი ზედაპირის“ ჰიდროქსილის ჯგუფებთან, რის გამოც ხდება ხვედრითი ზედაპირის შემცირება და სელექტიურობის დაკარგვა, წარმოიქმნება კონდენსირებული სილოქსანური ზედაპირი (ე) [2,9,10].



ნახ. 3.4. სილიკაგელის ზედაპირის ბუნება

ა) თავისუფალი ჰიდროქსილი; ბ) ბმული ჰიდროქსილი; გ) ბმული და რეაქციის უნარის მქონე ჰიდროქსილი; დ) ზედაპირული სილოქსანის ჯგუფები; ე) კონდენსირებული სილოქსანის ჯგუფები

სილიკაგელის ზედაპირი ხასიათდება სუსტი მჟავური თვისებებით, $pH=3-5$, რის გამოც მასზე უპირატესად ადსორბირდება ფუძე თვისებების მქონე ნივთიერებები. ადვილად ხორციელდება ჯგუფური დაყოფა ფუნქციონალური ჯგუფების ტიპის და რაოდენობის მიხედვით.

მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში სუფთა სილიკაგელის გამოყენებისას ძნელია შეკავების დროების და დაყოფის ხარისხის სტაბილური შენარჩუნება, რადგან სილიკაგელზე მუშაობისას მოძრავი ფაზის სახით ძირითადად ალკანები (n-ჰექსანი, n-ჰეპტანი, იზოოქტანი) გამოიყენება, რომლებიც მინარევის სახით მაინც შეიცავენ წყალს. სილიკაგელი კი, რომელსაც ზედაპირზე ადსორბირებული წყალი არ გააჩნია, კარგი გამშრობია და ადვილად ართმევს მას გამხსნელს, რის გამოც მისი ქრომატოგრაფიული თვისებები იცვლება. ეს პროცესი გრძელდება მანამ, სანამ არ დამყარდება წონასწორობა სილიკაგელის მიერ შთანთქმულ და გაცემულ წყლის რაოდენობებს შორის. თუ გამხსნელის ახალი პარტიის გამოყენებისას მასში წყლის შემცველობა სხვაა, აღნიშ-

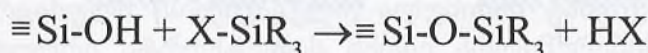
ნული წონასწორობის დამყარების პროცესი ხელახლა იწყება და ქრომატოგრაფიული მახასიათებლები კვლავ იცვლება. ამიტომ, სუფთა სილიკაგელის გამოყენების სფერო მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში თანდათან შემცირდა და მან ადგილი დაუთმო ე.წ. მოდიფიცირებულ სორბენტებს.

3.1.3.3. სილიკაგელის საფუძველზე მოდიფიცირებული სორბენტები

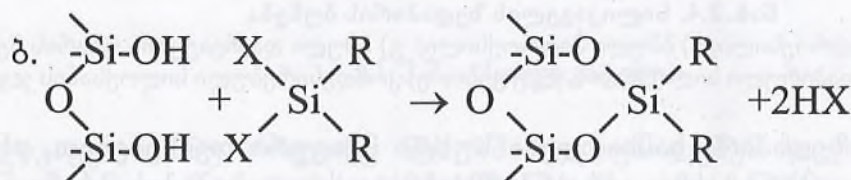
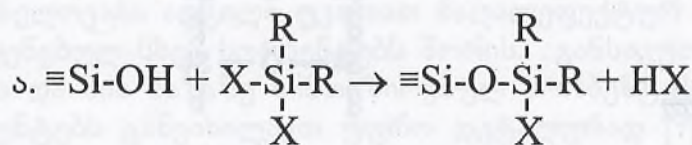
აღნიშნული ტიპის სორბენტები წარმოადგენენ სილიკაგელის მატრიცას, მასზე ქიმიურად დაკავშირებული ალკილის რადიკალით ან რომელიმე ფუნქციონალური ჯგუფით.

სილიკაგელის ზედაპირის მოდიფიცირებას ახდენენ სხვადასხვა მეთოდით. მოდიფიკატორის სახით იყენებენ ორგანოქლორსილანებს, რომლებიც კოვალენტური ბმებით უკავშირდება სილიკაგელის ზედაპირზე არსებულ სილანოლის $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ ჯგუფებს, რომელთა ზღვრული შემცველობაა $\approx 4,6 \text{ ნმ/მ}^2$. სავარაუდოა, რომ მოდიფიკატორსა და სილიკაგელის ზედაპირს შორის რეაქცია შემდეგი მექანიზმით მიმდინარეობს [9,11]:

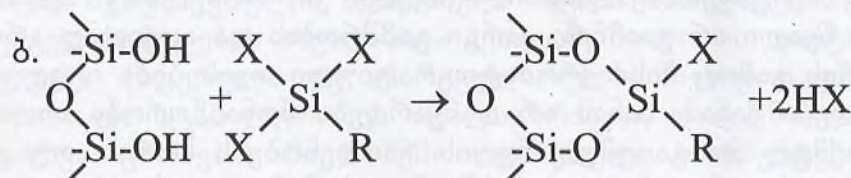
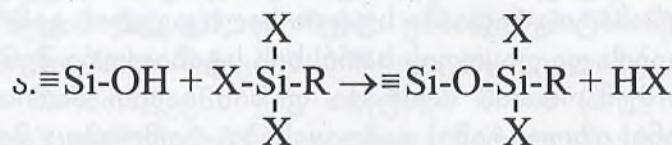
1. მონოფუნქციონალურ მოდიფიკატორთან

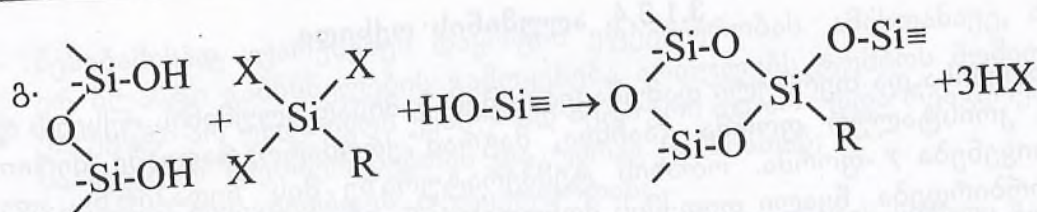


2. დიფუნქციონალურ მოდიფიკატორთან



3. ტრიფუნქციონალურ მოდიფიკატორთან





R - ალკილის რადიკალი;
X - ჰალოგენი.

მოდифიცირებული სორბენტების მომზადებისას მნიშვნელოვანია ორგანული მოდიფიკატორის კონცენტრაცია და სილიკაგელის ზედაპირზე დარჩენილი სილანოლის ჯგუფების რაოდენობა.

ცხრილში 3.1. მოყვანილი მოდიფიცირებული სორბენტები ხასიათდებიან მექანიკური სიმტკიცით მაღალი წნევის მიმართ. გამორიცხულია მიკერებული ფაზის გადასვლა ელუენტში. მდგრადია ელუენტის ტემპერატურის, წნევის და სხვადასხვა pH-ის მიმართ, ამიტომ მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში უპირატესად სწორედ ამ ტიპის სორბენტებს იყენებენ, რადგან მოძრავი ფაზის სწორი შერჩევით მათზე შეიძლება განხორციელდეს სხვადასხვა კლასის ნივთიერებების ნარევების დაყოფა [8,9].

ცხრილი 3.1.

მოდფიცირებული სორბენტების ტიპები მიკერებული ჯგუფებით

სორბენტის ტიპი	მიკერებული ჯგუფი	სორბენტის ტიპი	მიკერებული ჯგუფი
C ₂ - C ₈ (MOS, PR-8)	ალკილის რადიკალები	N(CH ₃) ₂	დიმეთილამინო ჯგუფი
C ₁₈ (ODS, RP)	ოქტადეცილი	OH (Diol)	OH-ჯგუფი
C ₆ H ₅	ფენილი	S _A	სულფოჯგუფი SO ₃ Na (ძლიერ მჟავა კატიონმიმომცველი)
NO ₂	ნიტროჯგუფი		
NH ₂ (APS)	ამინოჯგუფი	S _B	N ⁺ (CH ₃)Cl ⁻ (ძლიერ ფუძე ანიონმიმომცველი)

3.1.3.4. ალუმინის ოქსიდი

მიღებისა და თერმული დამუშავების შესაბამისად ალუმინის ოქსიდს რამდენიმე კრისტალურ ფორმა გააჩნია, მაგრამ ქრომატოგრაფიაში ძირითადად გამოიყენება γ -ფორმა. ოთახის ტემპერატურაზე მის ზედაპირზე ადვილად ადსორბირდება წყალი თითქმის მონოფენის წარმოქმნამდე, რომლის უმეტესი ნაწილი $300-400^{\circ}\text{C}$ -ზე გახურებისას სცილდება. რჩება წყლის მხოლოდ ის რაოდენობა, რომლებიც ჰიდროქსილის ჯგუფებს წარმოქმნიან ზედაპირთან და რომლებიც არ სცილდება 1000°C -ზე გახურებისას [10,11].

ალუმინის ოქსიდი, ისევე როგორც სილიკაგელი, წარმატებით გამოიყენება დაბალი წნევის პირობებში მომუშავე სვეტურ ქრომატოგრაფიაში, მაგრამ მათი გამოყენების სფერო მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში თანდათანობით მცირდება, რაც იმით არის გამოწვეული რომ დაყოფა, რომელიც ხდება ალუმინის ოქსიდზე, შეიძლება ჩატარდეს სილიკაგელზეც, ან მის საფუძველზე სინთეზირებულ სორბენტზე. ამასთანავე ალუმინის ოქსიდის კატალიზური აქტივობა მაღალია სილიკაგელთან შედარებით, რაც ხშირად იწვევს ადსორბატის დაშლას ან შეუქცევად ადსორბციას.

3.1.4. მოძრავი ფაზები თხევად ქრომატოგრაფიაში

3.1.4.1. ზოგადი მიმოხილვა

მოძრავი ფაზის, ელუენტის, როლი თხევად ქრომატოგრაფიაში მეტად რთული და მრავალფეროვანია. აირქრომატოგრაფიისგან განსხვავებით, სადაც იგი საანალიზო ნივთიერების მხოლოდ მექანიკური გადამტანის როლს ასრულებს, თხევად ქრომატოგრაფიაში მას სხვა ფუნქცია გააჩნია. კერძოდ, იგი აქტიურად მონაწილეობს თვით დაყოფის პროცესში, რომლის სწორი წარმართვისთვის მოძრავი ფაზის ბუნება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია. მოძრავი ფაზის სწორი შერჩევა გამხსნელების შეუზღუდავი რიცხვის გამო, საშუალებას იძლევა, რომ მეტად რთული ამოცანები გადაიჭრას ერთი ტიპის უძრავი ფაზის გამოყენებით და საკმარისია მხოლოდ მოძრავი ფაზის შედგენილობის და ბუნების შეცვლა. ხშირად, მოძრავი ფაზის შედგენილობის უმნიშვნელო ცვლილებაც კი პროცესის ოპტიმიზაციის საშუალებას იძლევა, აუმჯობესებს პიკის ფორმას, ცალკეული კომპონენტების დაყოფას. ამიტომ, მოძრავი ფაზის შერჩევისას მხედველობაში მიიღება მისი ყველა ის თვისება, რომელიც შესაძლო გავლენას მოახდენს ქრომატოგრაფიული პროცესის ჩატარებაზე [2].

თხევად ქრომატოგრაფიაში მოძრავ ფაზას წაეყენება გარკვეული მოთხოვნები. ეს მოთხოვნები შემდეგია:

- უზრუნველყოს საკმარის მაღალი სელექტიურობა. მცირე კომპონენტური ნარევებისათვის k' უნდა იყოს ზღვრებში: $2 < k' < 5$, ხოლო მრავალკომპონენტური ნარევებისთვის $0.5 < k' < 20$;
- ელუენტი არ უნდა იყოს ბლანტი (0.3 ± 0.5 სანტიპუაზი). მაღალი სიბლანტის მქონე გამხსნელები ართულებენ მასაგადაცემის პროცესს და

- შესაბამისად აუარესებენ დაყოფის ეფექტურობას. ამასთანავე, ძლიერ ბლანტი გამხსნელების გამოყენება ართულებს ტუმბოს მუშაობას;
- ელუენტი არ უნდა იყოს ქიმიურად აქტიური და არ უნდა რეაგირებდეს საანალიზო ნივთიერებებთან და უძრავ ფაზასთან;
 - არ უნდა რეაგირებდეს დეტექტორთან;
 - ელუენტმა უნდა უზრუნველყოს საანალიზო ნივთიერების სრული გახსნა;
 - ელუენტი უნდა იყოს იაფი და სამუშაოდ უსაფრთხო;
 - ელუენტი რაც შეიძლება სუფთა უნდა იყოს. გარეშე მინარევები გავლენას ახდენენ პროცესის ყველა ძირითად სტადიაზე — მის მიწოდებაზე, ქრომატოგრაფიულ სვეტში დაყოფაზე, დეტექტირებაზე და შედეგების აღწარმოებაზე.

3.1.4.2. გამხსნელის პოლარობა, ელუირების ძალა, და სელექტიურობა

თხევად-ქრომატოგრაფიული პროცესის მიმდინარეობისას მოძრავი ფაზის მოლეკულები ურთიერთქმედებაში შედიან სისტემის სხვა კომპონენტებთან — უძრავ ფაზასთან და საანალიზო ნივთიერების მოლეკულებთან. ამგვარი ურთიერთქმედება ქრომატოგრაფიულ სვეტში განისაზღვრება მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედების ოთხი ძირითადი ტიპით: დისპერსიული, ინდუქციური, ორიენტაციული, დონორ-აქცეპტორული (წყალბადური ბმების წარმოქმნის ჩათვლით) და დიელექტრიკული (იონების სოლვატაცია). მათ შორის რომელიმეს უპირატესი გამოვლინება განაპირობებს გამხსნელის სელექტიურობას, ხოლო ჯამური ეფექტი განსაზღვრავს მის პოლარობას P' , რაც გამხსნელის ფარდობითი აქტივობის მაჩვენებელია და განსაზღვრავს ელუირების ძალის სიდიდეს. **ელუირების ძალა** გამოხატავს მოძრავი ფაზის უნარს მოლეკულათაშორის ურთიერთქმედებაში შევიდეს სისტემის კომპონენტებთან, მონყვიტოს უძრავი ფაზის ზედაპირს ადსორბირებული საკვლევი ნივთიერების მოლეკულები და უზრუნველყოს ქრომატოგრაფიული ზონის სწრაფი გადაადგილება სვეტში. ტერმინი „ელუირების ძალის სიდიდე“ სნაიდერის მიერ იქნა შემოტანილი და მანვე პირობითად დაადგინა მისი მნიშვნელობა n -პენტანისთვის ალუმინის ოქსიდზე, რომელიც 0-ის ტოლად იქნა მიჩნეული ($\epsilon_0=0$) [8,9].

გამხსნელების შერჩევის გაადვილების მიზნით, ისინი ელუირების ძალის ზრდის მიხედვით განლაგებული იქნა გარკვეული რიგით და მას **ელუოტროპული რიგი** ეწოდა. ცხრილში 3.2. მოყვანილია ზოგიერთი ფართოდ გამოყენებული გამხსნელის ელუოტროპული რიგი.

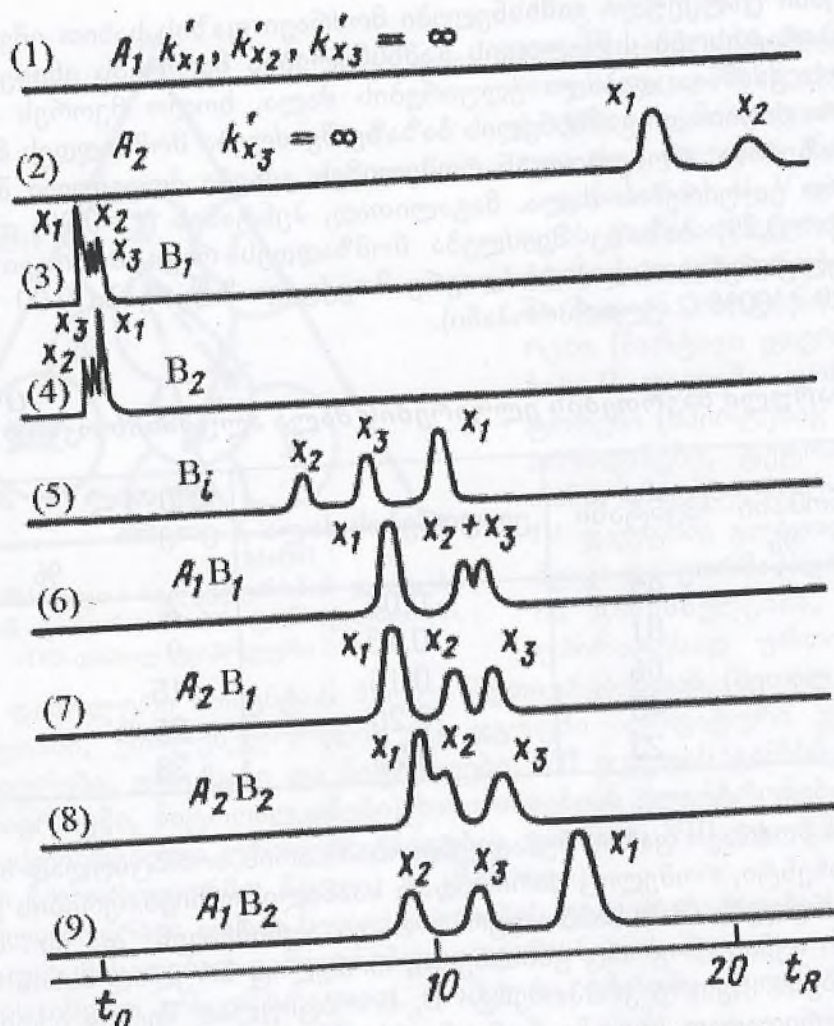
გამხსნელის თვისებები (ელუოტროპული რიგი)

გამხსნელები	ε' (Al_2O_3)	n_D	ულტრა- იისფერი სპექტრი (ნმ)	μ (სპ) 20°C	$t_{\text{დლ}}$ (°C)	P'
n-პენტანი	0.00	1.358	210	0.23	36.0	0.0
n-ჰექსანი	0.01	1.375	210		68.7	0.0
n-ჰეპტანი	0.01	1.388	210	0.41	98.4	0.0
ციკლოჰექსანი	0.04	1.427	210	1.00	81.0	0.0
ტოლუოლი	0.29	1.496	285	0.59	110.6	2.3
ქლორბენზოლი	0.30	1.525	280	0.80	132.0	2.7
ბენზოლი	0.32	1.501	280	0.65	80.1	3.0
ქლოროფორმი	0.40	1.443	245	0.57	61.2	4.4
დიქლორმეთანი	0.42	1.424	245	0.44	41.0	3.4
ტეტრაჰიდროფურანი	0.45	1.408	222	0.55	65.0	4.2
აცეტონი	0.56	1.359	330	0.32	56.2	5.4
ანილინი	0.62	1.586	325	4.40	184.0	6.2
აცეტონიტრილი	0.65	1.344	211	0.37	80.1	6.2
პროპანოლი-2	0.82	1.380	210	2.30	82.4	4.3
ეთანოლი	0.88	1.361	210	1.20	78.5	5.2
მეთანოლი	0.95	1.329	210	0.60	65.0	6.6
წყალი	მაღალი	1.330	200	1.00	100.0	10.2
ძმარმჟავა	—	1.372	251	1.26	118.5	6.2

$\varepsilon_{Al_2O_3}$ - ელუირების ძალა; n_D - გარდატეხის მაჩვენებელი;
 μ - სიბლანტე; P' - პოლარობის ინდექსი

ელუირების ძალის სიდიდის არსის გაგებისთვის წარმოვიდგინოთ ასეთი მაგალითი: ვთქვათ, დასაყოფია X_1 , X_2 და X_3 კომპონენტები ნარევი. გარკვეული თვალსაზრისით ჩვენს მიერ უკვე შერჩეულია უძრავი ფაზა და საჭიროა მოძრავი ფაზის სწორი შერჩევა. ვთქვათ, გამოვიყენეთ გამხსნელი A_1 და მივიღეთ ქრომატოგრამა (1), რომელზედაც არ შეიმჩნევა კომპონენტების არანაირი დაყოფა (ნახ.3.5). ახლა გამოვიყენოთ სხვა, A_2 გამხსნელი, რომლის დროსაც მივიღეთ ქრომატოგრამა (2) სადაც X_1 და X_2 კომპონენტები დაგვიანებით ელუირდებიან, ხოლო X_3 კომპონენტი შეუქცევადად სორბირდება მოცემულ სორბენტზე.

ორივე შემთხვევაში იტყვიან რომ გამხსნელს არა აქვს საკმარის ელუირების ძალა. ავიღოთ მესამე გამხსნელი B_1 , რომელზეც კომპონენტები თითქმის არ სორბირდებიან (ნახ.3.5, 3); მსგავსი შედეგი მიიღება B_2 გამხსნელის გამოყენებისას (ნახ.3.5, 4). ორივე უკანასკნელ შემთხვევაში დაყოფა არ არის დამაკმაყოფილებელი, რადგან გამხსნელს გააჩნია მეტად დიდი ელუირების ძალა. საანალიზო ნივთიერებები გამოირეცხებიან ქრომატოგრაფიული სვეტიდან და ადგილი აქვს ცუდ დაყოფას. თუ გავაგრძელებთ ცდას, შეირჩევა ისეთი B_3 გამხსნელი, რომელზედაც გვექნება ელუირების ძალის ოპტიმალური სიდიდე და ადგილი ექნება ნარევის დამაკმაყოფილებელ დაყოფას. (ნახ.3.5, 5).



ნახ.3.5. გამხსნელის ელუირების ძალის განსაზღვრა

A_1, A_2, B_1, B_2 გამხსნელებიდან შეგვიძლია მოვამზადოთ ბინალური ნარევი ($A_1B_1, A_2B_1, A_2B_2, A_1B_2$) რომლებსაც ექნებათ საჭირო ელუირების ძალა. შესაბამისი ქრომატოგრამები მოყვანილია ნახაზზე (ნახ.3.5, 6,7,8,9). (5)-(9) ქრომატოგრამებზე ყველა ნივთიერება საკმარისად კარგად შეკავდება, მაგრამ დაკმაყოფილებლად ჩაითვლება მხოლოდ 5,7,9. (6) და (8) ქრომატოგრამაზე პიკების წყვილები არასაკმარისად არის დაყოფილი. ასეთ დროს ვამბობთ, რომ სისტემის სელექტიურობა არასაკმარისია. სისტემის სელექტიურობა ძირითადად მოძრავი ფაზის სელექტიურობით განისაზღვრება, რაც თავის მხრივ დაკავშირებულია განსაკუთრებული სტრუქტურის მქონე საანალიზო ნივთიერებების მიმართ გამოვლენილი სპეციფიკური ურთიერთქმედების უნარზე. ეს კი იმაში გამოიხატება, რომ მოცემული გამხსნელის ან მათი ნარევის ელუირების ძალის სიდიდე სხვადასხვა სტრუქტურის ნივთიერების მიმართ შეიძლება სხვადასხვა იყოს. ბინალური მოძრავი ფაზის სელექტიურობა, ისევე როგორც ელუირების ძალა, განისაზღვრება ძლიერი კომპონენტის ბუნებით.

პრაქტიკაში ცალკეული გამხსნელები მოძრავი ფაზის სახით იშვითად გამოიყენება. უპირატესობა ყოველთვის გამხსნელების ნარევეს ენიჭება, რომელთაგან ერთს გააჩნია დაბალი ელუირების ძალა, ხოლო მეორეს გაცილებით მაღალი. ორი ძირითადი გამხსნელის ბაზაზე შეიძლება მომზადდეს მთელი რიგი მოძრავი ფაზებისა, რომელთაგან რომელიმეს ექნება მოცემული შემთხვევისთვის საჭირო ელუირების ძალა. მაგალითად, პენტანის ($\epsilon^\circ=0.00$) და 2-ქლორპროპანის ($\epsilon^\circ=0.29$) ბაზაზე შეიძლება მომზადდეს რიგი მოძრავი ფაზებისა, რომელთა ელუირების ძალის სიძლიერე მოექცევა ზღვრებში 0.00 (100% პენტანი) ÷ 0.29 (100% 2-ქლორპროპანი).

ცხრილი 3.3.

ბინარული ნაერთების ელუირების ძალა ალუმინის ოქსიდზე

2-ქლორპროპანი—პენტანი %		ელუირების ძალა ϵ°	დიეთილ ეთერი	პენტანი %
8	92	0.05	4	96
19	81	0.10	9	91
34	66	0.15	15	85
52	48	0.20	25	75
77	23	0.25	38	62

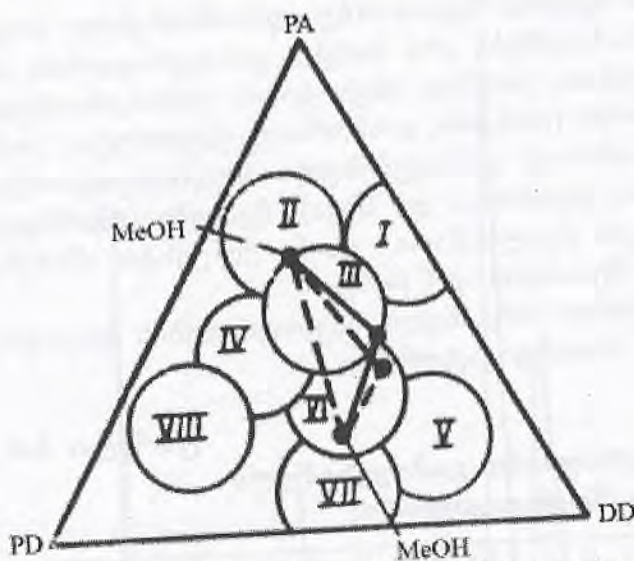
ნებისმიერი მოძრავი ფაზის შემადგენლობაში არის სორბციულად ნაკლებაქტიური კომპონენტი, რომელიც ძირითადად საანალიზო ნივთიერების გადამტანის როლს ასრულებს. მას სიმბოლურად A-თი აღნიშნავენ და ის შეიძლება გამოყენებული იქნას როგორც გამხსნელი, რომელიც სრულად ხსნის საანალიზო ნივთიერებებს. მეორე კომპონენტი B, სორბციულად მეტად აქტიურია და იგი ახდენს ძირითადად სვეტში წონასწორობის რეგულირებას. მაგრამ ერთი და იგივე კომპონენტის როლი სხვადასხვა მოძრავ ფაზაში შეიძლება იყოს სხვადასხვა. მაგალითად, მოძრავ ფაზაში ჰექსანი—ქლოროფორმი, უკანასკნელი ასრულებს წონასწორობის რეგულატორის როლს (B), ხოლო სისტემაში ქლოროფორმი—მეთანოლი, ის უკვე სატრანსპორტო ფუნქციის შემსრულებელია (A).

ორკომპონენტიანი ნარევის პოლარობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$P' = V_a P'_a + V_b P'_b \quad (3.2)$$

სადაც, V_a და V_b —მოცულობითი წილია; P_a და P_b —შესაბამისად A და B გამხსნელის პოლარობებია [2].

მოძრავი ფაზის მიზანდასახული შერჩევის ან მისი შედგენილობის ცვლილების გაადვილების მიზნით სწავიღერი გვთავაზობს გამხსნელების კლასიფიკაციას



ნახ.3.6. გამხსნელთა სელექტიურობის ჯგუფები
PD-პროტონ დონორი, PA-პროტონ აქცეპტორი,
DD-დიპოლ დიპოლური

მათი სელექტიურობის მიხედვით [9] სამკუთხა დიაგრამის სახით, სადაც გამხსნელები სელექტიურობის მიხედვით დაყოფილია რვა ჯგუფად (ნახ.3.6).

განაპირა I, II, V და VIII ჯგუფებს გააჩნიათ მკვეთრად გამოხატული სელექტიურობა: I ჯგუფში შედიან პროტონის აქცეპტორები (მარტივი ეთერები, ამინები); II ჯგუფში დონორ-აქცეპტორები (სპირტები); III ჯგუფში პირიდინები, ტეტრაგიდროფურანი, ამიდები, სულფოქსიდები; IV ჯგუფში გლიკოლები, ძმარმჟავა და ფორმამიდი; V ჯგუფში ის გამხსნელებია, რომლებიც უპირატესად ურთიერთქმედებენ

ბენ დიდი დიპოლური მომენტის მქონე ნივთიერებებთან (მეთილენქლორიდი, დიქლორმეთანი, ეთილენქლორიდი); VI ჯგუფში ალიფატური კეტონები და რთული ეთერები, დიოქსანი და ნიტრილები; VII ჯგუფის გამხსნელები (არომატული ნაერთები, ნიტროალკანები) ხასიათდებიან ელექტრონების აქცეპტორებთან გაძლიერებული ურთიერთქმედების უნარით; VIII ჯგუფში პროტონის დონორები (ქლოროფორმი, წყალი, *m*-კრეზოლი).

ბინარული მოძრავი ფაზის სელექტიურობის ცვლილება ხდება საჭირო ელუირების ძალის მისაღებად გამოყენებული გამხსნელის შეცვლით სხვა ჯგუფის გამხსნელის ისეთი კონცენტრაციით, რომელიც უზრუნველყოფს მოძრავი ფაზის იგივე ელუირების ძალას [9].

3.1.4.3. სპეციფიკური მოდიფიკატორები

ანალიზის მსვლელობისას ზოგჯერ საჭირო ხდება ქრომატოგრაფიული პროცესის წარმართვა გარკვეული მექანიზმით, რისთვისაც მოძრავი ფაზის შემადგენლობაში მეტად მცირე რაოდენობით (0.01-2%) შეჰყავთ ნივთიერებები ე.წ. მოდიფიკატორები, რომლებიც ცვლიან სისტემის თერმოდინამიკურ მახასიათებლებს. მოდიფიკატორის მოქმედება შეიძლება დაკავშირებული იყოს სხვადასხვა ფიზიკურ-ქიმიურ პროცესთან. კერძოდ, ის შეიძლება გამოყენებული იქნას სორბატის იონიზაციის უნარის ჩახშობისათვის, რაც შებრუნებულ-ფაზურ ქრომატოგრაფიაში იწვევს პიკის ფორმის გაუმჯობესებას. მოახდინოს უძრავი ფაზის სორბციულად აქტიური ცენტრების ბლოკირება და შესაბამისად გააძლიეროს მათი ქიმიური ერთგვაროვნება, ე.ი. მოხდეს უძრავი ფაზის დინამიკური მოდიფიკაცია. მოდიფიკატორის იონები სორბირდებიან უძრავ ფაზაზე და ცვლიან მის ზედაპირს. საანალიზო ნივთიერებები ძლიერ სპეციფიკურ

ურთიერთქმედებაში შედიან ადსორბენტის ზედაპირზე ადსორბირებულ მოდიფიკატორებთან და შეკავება განისაზღვრება არა მარტო ვან-დერ-ვალსის მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედებით, არამედ სხვა ტიპის ურთიერთქმედებითაც ადსორბენტ-ადსორბატს შორის (იონური, დონორ-აქცეპტორული, კომპლექსნარმოქმნელი). ყველაზე ფართოდ გამოყენებული მოდიფიკატორებია მარილები (ტეტრაალკილამონიუმის ქლორიდი და სხვა), მჟავები (ძმარმჟავა, ფოსფორმჟავა) და ფუძეები (ამიაკის წყალხსნარი). ისინი ელუენტს ანიჭებენ სასურველი ელუირების ძალას და შესაბამის pH [4,9].

ცხრილში 3.4. მოყვანილია ზოგიერთი ორგანული ნივთიერებების დაყოფისთვის გამოყენებული სპეციალური მოდიფიკატორები:

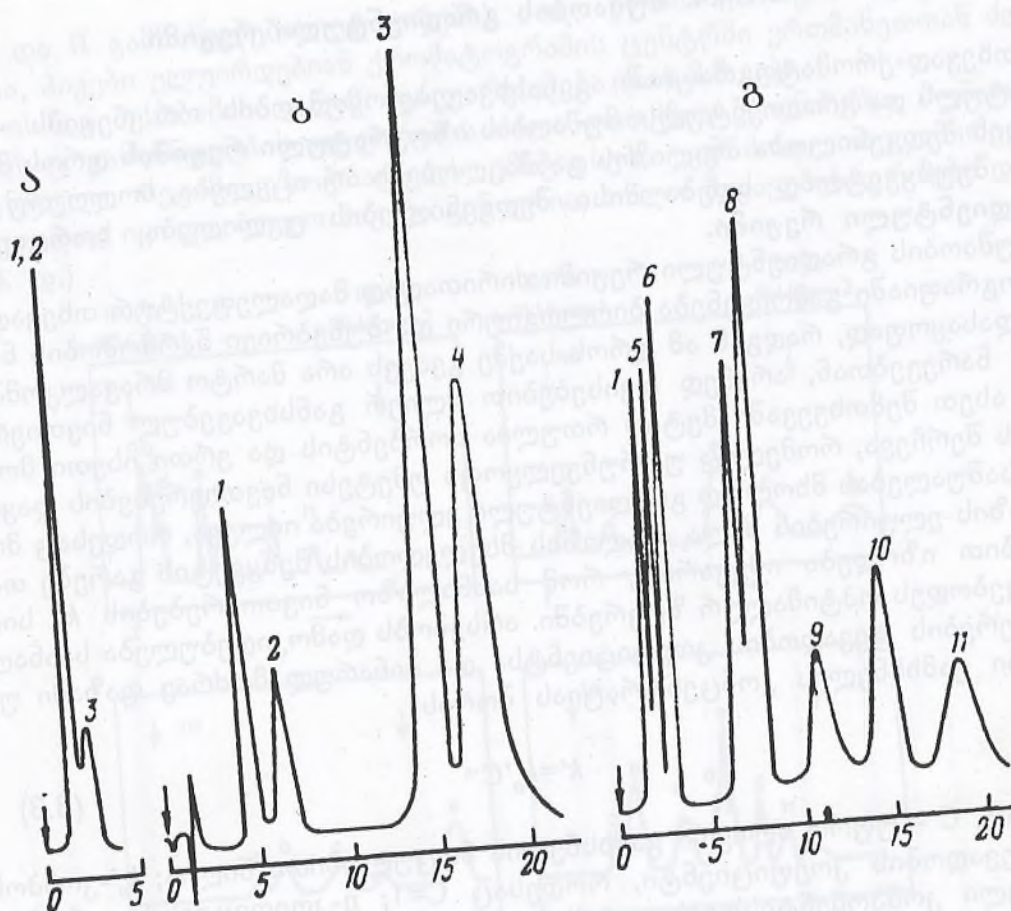
ცხრილი 3.4.

**თხევად-ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული
ზოგიერთი მოდიფიკატორი**

ელუენტში დამატებული მოდიფიკატორები	საანალიზო ნივთიერებები
ორგანული ამინები	ტრიციკლური ანტიდეპრესანტები
ამინები	ნამლები
ტეტრაბუტილამონიუმქლორიდი	არომატული მჟავები
მეტალთა ხელატები	დანსილწარმოებული ამინომჟავები
ქირალური დანამატები	α -ამინომჟავების იზომერები
აზოტშემცველი არომატული წარმოებულები	შაქრები
კარბოქსილმჟავები	პოლარულ ნივთიერებათა ნარევეები

მოდიფიკატორის მოქმედების უკეთ გაგებისთვის განვიხილოთ ტეტრაბუტილამონიუმის მარილების გავლენის მექანიზმი არომატული მჟავების (ფენოლმჟავების) დაყოფის მაგალითზე. ნახ.3.7-ზე ნაჩვენებია არომატული მჟავების დაყოფის ქრომატოგრამა, მოძრავ ფაზაში სპეციალური მოდიფიკატორის დამატების გარეშე (ა) და მოდიფიკატორის, ტეტრაბუტილამონიუმქლორიდის (ტბა), დამატების შემდეგ (ბ), (გ) [4,12].

მოდიფიკატორის დამატების გარეშე აღნიშნული მჟავების დაყოფა პრაქტიკულად არ ხდება და ისინი გამოირეცხებიან ქრომატოგრაფიული სვეტიდან. მოდიფიკატორის დამატება გაცილებით აუმჯობესებს დაყოფას. გამოყენებული მეთოდი დაფუძნებულია წყალში დისოცირებადი მჟავების უნარზე წარმოქმნან იონური წყვილები შესაბამის საწინააღმდეგო იონთან. წარმოქმნილი წყვილების შედეგად მნიშვნელოვნად იცვლება ნივთიერებების შეკავება, რაც ზრდის მათი დაყოფის შესაძლებლობას. მოძრავი ფაზის შემადგენლობაში მოდიფიკატორის, ჩვენს შემთხვევაში ტეტრაბუტილამონიუმქლორიდის დამატება ცვლის ქრომატოგრაფიული პროცესის მიმდინარეობის მექანიზმს და გადაჰყავს იგი იონ-წყვილურ რეჟიმში. სავარაუდოა, რომ ტეტრაბუტილამონიუმის მარილები წყლიანი ელუენტის გავლენით განიცდიან სრულ დისოციაციას და მისი კათიონები ადსორბირდებიან სორბენტის არაპოლარულ ზედაპირზე. იმის გამო, რომ აღნიშნული იონები მუდმივად იმყოფებიან მოძრავი ფაზის შემადგენლობაში,



ნახ.3.7. არომატული მჟავების დაყოფის ქრომატოგრამა

1- *n*-ოქსიბენზო, 2- *n*-ოქსი-*m* მეთოქსიბენზო, 3-ბენზო, 4-გიპურის, 5- *m*-ოქსიბენზო, 6-*o*-ნიტრობენზო, 7- *n*-ნიტრობენზო, 8- *m*-ნიტრობენზო, 9- *o*-ოქსიბენზო, 10- *o*-ქლორბენზო, 11- *m*-ქლორბენზო მჟავები.

ა) სვეტი (10×0.4) სმ; უძრავი ფაზა: სილიკაგელი KCK-2 მიკერებული C_{16} ; მარცვლების ზომა 10 მკმ; ელუენტი: წყალი-0.3% იზოპროპანოლი; $40^\circ C$;

ბ) იგივე პირობები, მხოლოდ ელუენტს დამატა $3 \cdot 10^{-3} M$ ტეტრაბუტილამონიუმ ქლორიდი (ტბა).

გ) სვეტი (10×0.4) სმ, სილასორბ-600 მიკერებული ფაზით C_{16} ; ნაწილაკების ზომა 5 მკმ; ელუენტი: წყალი-იზოპროპანოლი (95:5)-ტბა ($2 \cdot 10^{-3} M$); $50^\circ C$; ელუენტის სიჩქარე 2 სმ³/წთ.

სორბენტის ზედაპირზე ადგილი აქვს ადსორბირებული მონოშრის წარმოქმნას ისე, რომ მათი დადებითი მუხტი მიმართულია მოძრავი ფაზისკენ. ამ დროს სორბენტის ზედაპირზე წარმოიქმნება დამუხტული ნაწილაკების ფენა, ხოლო მჟავების პოლარული მოლეკულები ძლიერ ურთიერთქმედებაში შედიან თვით-სობრივად ახალ ზედაპირთან, რის შედეგადაც უმჯობესდება ქრომატოგრაფიული დაყოფა. [13,14,15].

3.1.4.4. მუშაობის გრადიენტული რეჟიმი

თხევად-ქრომატოგრაფიაში განასხვავებენ მუშაობის ორ რეჟიმს — იზოკრატულს და გრადიენტულს. მუშაობის **იზოკრატული რეჟიმის** დროს მოძრავი ფაზის შედგენილობა ანალიზის განმავლობაში არ იცვლება, ხოლო თუ ანალიზის შეუწყვეტლად ხდება მისი შედგენილობის ცვლილება, ხორციელდება **გრადიენტული რეჟიმი**.

მუშაობის გრადიენტული რეჟიმი ძირითადად მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოიყენება ბიოლოგიური და ბუნებრივი წარმოშობის ნარევების დასაყოფად, რადგან ამ დროს საქმე გვაქვს არა მარტო მრავალკომპონენტური ნარევებთან, არამედ თვისებებით ძლიერ განსხვავებულ ნივთიერებებთან. ასეთ შემთხვევაში მეტად რთულია სორბენტის და ერთი ისეთი მოძრავი ფაზის შერჩევა, რომელიც უზრუნველყოფს უმეტესი ნივთიერებების დაყოფას. ამის საშუალებას მხოლოდ გრადიენტული ელუირება იძლევა, როდესაც მოძრავი ფაზის ელუირების ძალა ანალიზის მსვლელობის შეწყვეტის გარეშე თანდათანობით იზრდება იმგვარად, რომ საანალიზო ნივთიერებების k' სიდიდე იმყოფებოდეს ოპტიმალურ ზღვრებში. არსებობს დამოკიდებულება საანალიზო ნივთიერების ტევადობის კოეფიციენტსა და ბინარულ მოძრავ ფაზაში უფრო ძლიერი გამხსნელის კონცენტრაციას შორის:

$$k' = k_0' C^n \quad (3.3)$$

სადაც, C - უფრო ძლიერი გამხსნელის მოცულობითი წილია; k_0' - კომპონენტის ტევადობის კოეფიციენტი, როდესაც $C=1$; n - კოეფიციენტი, რომელიც მოცემული კომპონენტისთვის განისაზღვრება ექსპერიმენტით [16].

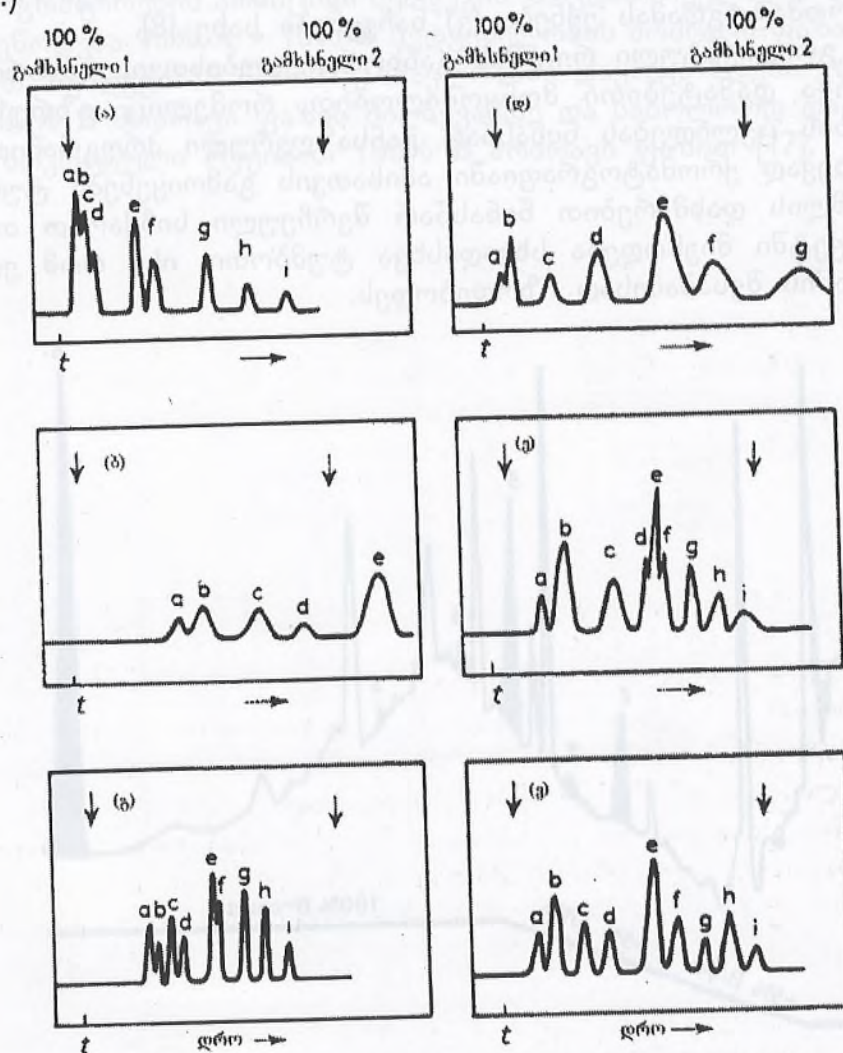
ვთქვათ, ელუირებას ვახდენთ ორი, სუსტი I და უფრო ძლიერი II გამხსნელებით. ქრომატოგრაფირება იწყება სუსტი I გამხსნელით, რომელიც ვერ ახდენს k' -ის დაბალი მნიშვნელობის მქონე ნივთიერებების კარგ დაყოფას ქრომატოგრამის დასაწყისში. I გამხსნელზე II გამხსნელის თანდათანობით დამატება ცვლის მისი ელუირების ძალას და ეს პროცესი გრძელდება მანამ, სანამ მივიღებთ სუფთა II გამხსნელს, საკმაოდ ძლიერს იმისთვის, რომ მოახდინოს k' -ის მაღალი მნიშვნელობის მქონე ნივთიერებების სასურველ დროში დაყოფა.

ნახ.3.8. გვიჩვენებს გრადიენტული ელუირების შედეგებს გამხსნელების შერჩევის პროცესში. ქრომატოგრაფირება არ შეიძლება დავიწყოთ ძლიერ მაღალი ელუირების ძალის მქონე გამხსნელით, რადგან ამ დროს პირველი ქრომატოგრაფიული ზოლები სვეტიდან გამოირეცხებიან ერთად და ადგილი არ ექნება მათ დაყოფას (ნახ.3.8. ა).

თუ II გამხსნელი მეტად დაბალი ელუირების ძალის მქონეა, ან მისი საბოლოო კონცენტრაცია I გამხსნელში მცირეა, საანალიზო ნივთიერებები ელუირდებიან მხოლოდ მას შემდეგ, რაც მიიღწევა II გამხსნელის მაქსიმალური კონცენტრაცია, ე.ი. განხორციელდება იზოკრატული რეჟიმი. ამგვარ შემთხვევაში ქრომატოგრაფიული ზონების სიგანე იზრდება და ზოგიერთი ნივთიერება შეიძლება საერთოდ არ ელუირდეს ქრომატოგრაფიული სვეტიდან (ნახ.3.8. ბ.)

თუ I და II გამხსნელების ელუირების ძალა ერთმანეთისგან ძლიერ განსხვავდება, პიკები ელუირდებიან ქრომატოგრამის ცენტრში ერთმანეთთან ძლიერ ახლოს და შესაბამისად დაყოფა უარესდება (ნახ.3.8. გ).

როდესაც გამხსნელების ელუირების ძალა თითქმის ერთნაირია, მუშაობის გრადიენტული რეჟიმი იზოკრატულს ემსგავსება. კერძოდ, თავდაპირველი პიკები ცუდად იყოფა, ბოლო პიკები განიერია, ხოლო შეკავების დროები დიდი (ნახ.3.8. დ.)



ნახ.3.8. გრადიენტული ელუირების ქრომატოგრამები

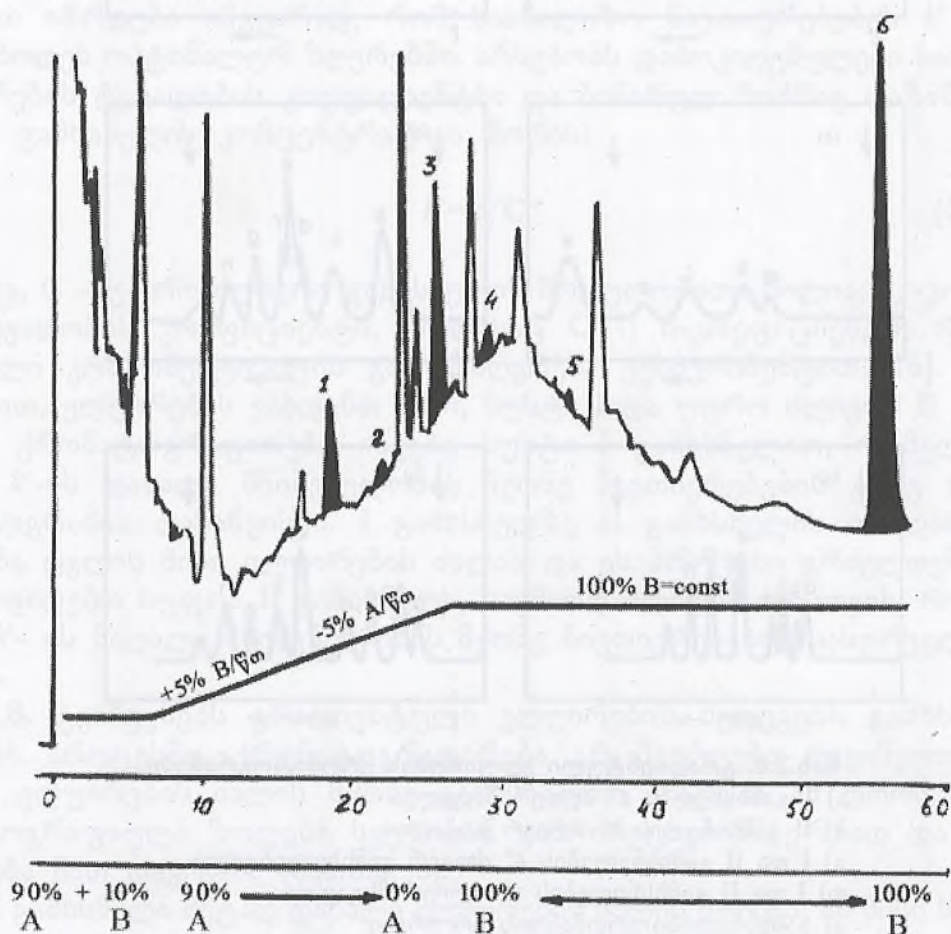
- ა) I გამხსნელის ϵ° ძლიერ მაღალია.
- ბ) II გამხსნელის ϵ° ძლიერ დაბალია.
- გ) I და II გამხსნელების ϵ° ძლიერ განსხვავებულია.
- დ) I და II გამხსნელების ϵ° ძლიერ მსგავსია.
- ე) გამხსნელები ერთმანეთს არ ერევა.
- ვ) გამხსნელთა ოპტიმალური პროგრამა.

ნახ.3.8. (ე) ასახავს გამხსნელების შეურევადობის შემთხვევას. ამ დროს II გამხსნელის ელუირების ძალა ძლიერ განსხვავდება I-გან, რის გამოც გრადიენტული ელუირების დასაწყისში იგი შეკავდება სვეტის შესასვლელში და

მხოლოდ სუფთა I გამხსნელი გაედინება სვეტში. ამის გამო პირველი პიკები (a, b, c) განიცდიან იზოკრატულ დაყოფას, ხოლო როდესაც II გამხსნელი გაჯერდება და დაიწყებს სვეტში მოძრაობას, განხორციელდება d, e, f პიკების ცუდი დაყოფა. საბოლოოდ, g, h, და i პიკები იყოფიან გრადიენტული ელუირებით.

როდესაც გამხსნელებთან დაკავშირებული ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი შენიშვნა მხედველობაში მიიღება და შეირჩევა მუშაობის სხვა ოპტიმალური პირობები, ქრომატოგრამას ექნება (ვ) ნაჩვენები სახე [8].

მუშაობის გრადიენტული რეჟიმის განხორციელებისთვის საჭიროა ხელსაწყო აღჭურვა დამატებითი მოწყობილობით, რომელიც უზრუნველყოფს მოძრავი ფაზის ცვლილებას წინასწარ განსაზღვრული პროგრამით. მაღალ-ეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში ამისათვის გამოიყენება ტუმბოს ორი სისტემა, რომლის დახმარებით წინასწარ შერჩეული სიჩქარით თითოეული გამხსნელი სვეტში მიეწოდება სხვადასხვა ტუმბოთი, ისე რომ ელუირების ძალა პროგრამის შესაბამისად იზრდებოდეს.

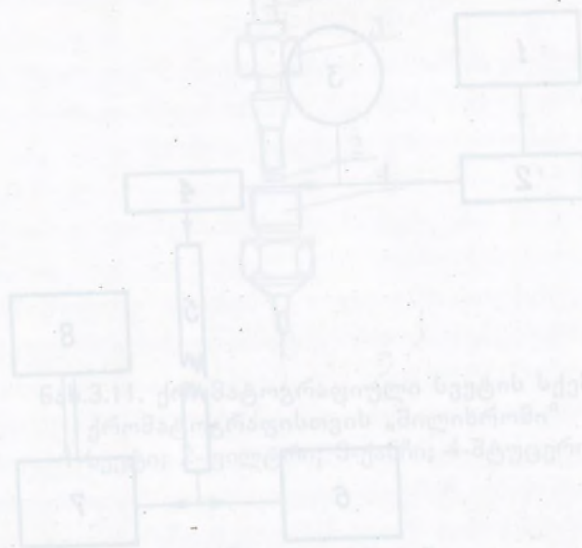


ნახ.3.9. ფენოლკარბონმჟავების დაყოფის ქრომატოგრამა

1-ვანილილმჟავა, 2-კოფეინმჟავა, 3-ვანილინი, 4-კუმარინმჟავა, 5-ფერულმჟავა, 6-დარიჩინმჟავა ნარევი A. წყალი-ძმარმჟავა (980:20)+0,02M ნატრიუმის აცეტატი.
ნარევი B. წყალი-ძმარმჟავა-იზოპროპანოლი-მეთანოლი (815:25:20:140)+0,02M ნატრიუმის აცეტატი

პროცესის მიმდინარეობის პირობების უკეთ გაგების მიზნით მოვიყვანოთ მაგალითი, სადაც გამოიყენება მუშაობის ეს ორივე რეჟიმი. ნახ.3.9-ზე ნაჩვენებია საკონიაკე სპირტის ბუნებრივ ნარევეში ფენოლკარბონმჟავების განსაზღვრის ქრომატოგრამა. მოცემული ამოცანის განსახორციელებლად ხელსაწყო დამატებით აღიჭურვა ტუმბოს ორი სისტემით, რომელთა საშუალებითაც მიეწოდებოდა **A** და **B** მოძრავი ფაზები.

ქრომატოგრაფირების პრინციპი შემდეგია: თავდაპირველად 6 წთ-ის განმავლობაში მიეწოდება 90% **A** + 10% **B** შედგენილობის მოძრავი ფაზა იზოკრატიული რეჟიმით. შემდეგი 19 წთ-ის განმავლობაში დაყოფა ხდება გრადიენტული რეჟიმით 100% **B** მოძრავი ფაზის მიღწევამდე და საბოლოოდ დაყოფა მიმდინარეობს იზოკრატიული რეჟიმით 100% **B** მოძრავი ფაზით [17].



3.2.3. ტუმბოები

ტუმბო უზიარებელია ქრომატოგრაფიის განუყოფელ ნაწილს. ქრომატოგრაფიულ სვეტში მდებარე მატრიცის ფენის წინააღმდეგ წინააღმდეგობის გამოყენებული ტუმბოები წარმოადგენს შემდეგი ნიშნებით:

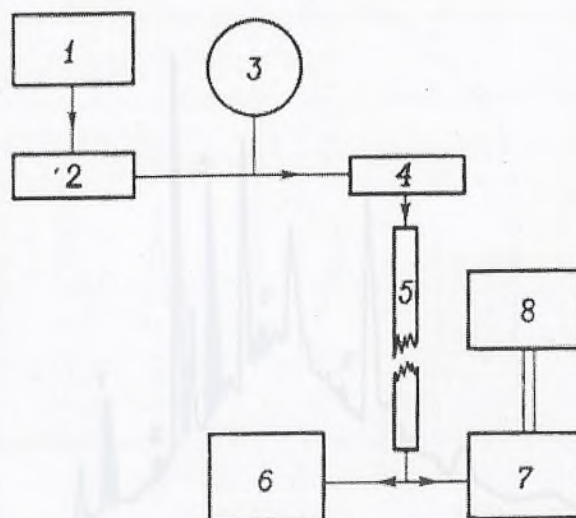
- მოძრავი ფაზის ტუმბო (მოდერნიზებული 3.2.3)
- მაღალ-საშუალო წნევა (15-20 მპა)

მოძრავი ფაზის ტუმბო უზიარებელია ქრომატოგრაფიის განუყოფელ ნაწილს. ქრომატოგრაფიულ სვეტში მდებარე მატრიცის ფენის წინააღმდეგობის გამოყენებული ტუმბოები წარმოადგენს შემდეგი ნიშნებით:

თავი 3. 2. თხევადი ქრომატოგრაფი

3.2.1. ზოგადი მიმოხილვა

მოძრავი ფაზის მაღალი სიბლანტისა და სვეტის დიდი წინააღმდეგობის გამო, თხევადი და აირქრომატოგრაფები ძლიერ განსხვავდებიან ერთმანეთისგან. თხევად ქრომატოგრაფიაში იყენებენ სხვადასხვა სირთულის ხელსაწყოებს, ძლიერ მარტივი სისტემებიდან კომპლექსურ ქრომატოგრაფებამდე, რომლებიც ავტომატიზაციის მაღალი ხარისხით უზრუნველყოფენ ანალიზის დიდ სიზუსტეს. ნებისმიერი ქრომატოგრაფის ჰიდრავლიკური სქემა შედგება ტუმბოს, სვეტისა და დეტექტორისაგან. ნახ.3.10-ზე ნაჩვენებია ტიპური თხევადი ქრომატოგრაფის სქემა, რომელიც საჭიროების შემთხვევაში შეიძლება აღიჭურვოს დამატებითი მოწყობილობებით [10,11].



ნახ.3.10. სვეტური ქრომატოგრაფის ბლოკ-სქემა

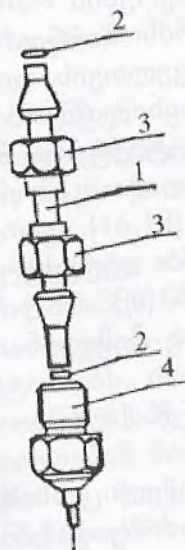
1-რეზერვუარი ელუენტისთვის; 2-ტუმბო; 3-მანომეტრი;
4-სინჯის შესაყვანი მოწყობილობა; 5-ქრომატოგრაფიული სვეტი;
6-კოლექტორი; 7-დეტექტორი; 8-თვითჩამწერი

3.2.2. ქრომატოგრაფიული სვეტი

ქრომატოგრაფიული სვეტი ითვლება ხელსაწყოს ძირითად ნაწილად. ნებისმიერი წარმატება თუ წარუმატებლობა განსაკუთრებით მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში, განპირობებულია როგორც უნივერსალური და სპეციფიკური სორბენტების შექმნით, ასევე სპეციალური სვეტებით, რომლებიც ითვალისწინებენ ქრომატოგრაფიული დაყოფის ყველა თავისებურებებს.

გამოყენების მიზნის მიხედვით განასხვავებენ ანალიზურ და პრეპარატულ სვეტებს, რომელიც პირველთან შედარებით ხასიათდება გაცილებით დიდი, 30 მმ-მდე შიგა დიამეტრით [9,18].

ანალიზური სვეტი წარმოადგენს 2.1 მმ, 3.2 მმ ან 4.5 მმ შიგა დიამეტრის და 5-25 სმ სიგრძის მქონე უჟანგავი ფოლადის მილს, რომელიც შევსებულია უძრავი ფაზით. მისი გადმოყრის თავიდან აცილების მიზნით სვეტის ორივე მხარე დახურულია 2 მკმ ფორების დიამეტრის მქონე ფილტრით, რომლის დანიშნულებაც სვეტში შესასვლელად მოძრავი ფაზის და სინჯის თანაბარი განაწილება. პრაქტიკაში იყენებენ აგრეთვე მიკროსვეტებს 0.5-1 მმ შიგა დიამეტრით და 5-10 სმ სიგრძით. სვეტი დეტექტორთან და დოზატორთან ერთდება მინიმალური სიგრძის კაპილარით. ნახ. 3.11-ზე ნაჩვენებია ქრომატოგრაფიული სვეტის სქემა.



ნახ.3.11. ქრომატოგრაფიული სვეტის სქემა
ქრომატოგრაფისთვის „მილიხრომი“
1-სვეტი; 2-ფილტრი; 3-ქაჩი; 4-შტუცერი

3.2.3. ტუმბოები

ტუმბო უზრუნველყოფს მოძრავი ფაზის მუდმივ დინებას ქრომატოგრაფიულ სვეტსა და დეტექტორში. მაღალეფექტურ თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული ტუმბოები ხასიათდებიან შემდეგი ნიშნებით:

- მოძრავი ფაზის მიმართ მაღალი ინერტულობა;
- მაღალი სამუშაო წნევა (15-20 მპ);
- ნაკადის სიჩქარის მაღალი სტაბილურობა.

განასხვავებენ ტუმბოების ორ ჯგუფს: მუდმივი წნევის და მუდმივი სიჩქარის. პირველი ტიპის ტუმბოები უზრუნველყოფენ სისტემის შესასვლელში მუდმივ წნევას, ხოლო სიჩქარე განისაზღვრება სვეტის წინააღმდეგობით. მეორე ტიპის ტუმბოები უზრუნველყოფენ მოძრავი ფაზის მუდმივ სიჩქარეს, ხოლო წნევა სვეტის შესასვლელში განისაზღვრება მისი წინააღმდეგობით [2,7].

3.2.4. დეტექტორები თხევად ქრომატოგრაფიაში

3.2.4.1. ზოგადი მიმოხილვა

დეტექტორის უმთავრესი მოთხოვნაა მაღალი მგრძნობიარობა და კიუვეტის მცირე მოცულობა, რაც საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ საანალიზო ნივთიერების მეტად მცირე კონცენტრაციები.

დეტექტორის მუშაობის პრინციპი დაფუძნებულია მოძრავი ფაზის და საანალიზო ნივთიერების ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებზე, რომლებიც გარკვეულად არიან დაკავშირებული ამ ნივთიერების რაოდენობასა და ბუნებასთან. პარამეტრს, რომლის მიმართაც მგრძნობიარეა დეტექტორი, ანალიზური პარამეტრი ეწოდება. ეს სახელი ყოველთვის ფიგურირებს დეტექტორის დასახელებაში. ელუატის და ელუენტის ანალიზური პარამეტრების სიდიდეებს შორის სხვაობას, რომლის აღმოჩენაც დეტექტორს შეუძლია, „დეტექტორის აბსოლუტური მგრძნობიარობა“ ეწოდება და გამოისახება გასაზომი პარამეტრების ერთეულებში [7].

მოცემული ნივთიერების მიმართ დეტექტორის სიგნალი R_i პროპორციულია ელუატის (a_{i0}) და მოძრავი ფაზის (a_0) ანალიზური პარამეტრების სიდიდეებს შორის სხვაობისა და გამოისახება შემდეგნაირად:

$$R_i = K [a_{i0}(C) - a_0] \quad (3.4)$$

სადაც, $a_{i0}(C)$ -არის ფუნქცია, რომელიც ასახავს ელუატის ანალიზური პარამეტრის (a_{i0}) დამოკიდებულებას მოძრავ ფაზაში მოცემული ნივთიერების კონცენტრაციაზე (C).

თხევად ქრომატოგრაფიაში ფართოდ გამოიყენება ისეთი ანალიზური პარამეტრები როგორიცაა გარკვეული ტალღის სიგრძის მქონე სინათლის შთანთქმა, სინათლის გარდატეხის მაჩვენებელი, ხვედრითი ელექტროგამტარობა, დიელექტრიკული შეღწევადობა, ზოგ შემთხვევაში კი ადსორბციის სიბო და იონიზაციის ხარისხი. აქედან გამომდინარე, განასხვავებენ ოპტიკურ, ელექტრულ, ელექტროქიმიურ, ადსორბციულ დეტექტორებს, აგრეთვე სპეციალურ დეტექტორებს რადიოაქტიური ნივთიერებების განსაზღვრისთვის და სხვა. ყველა ზემოთ ჩამოთვლილ დეტექტორებს ისევე როგორც აირქრომატოგრაფიაში, ყოფენ სელექტიურ და უნივერსალურ დეტექტორებად [8].

3.2.4.2. ოპტიკური დეტექტორები

ოპტიკური დეტექტორების მუშაობის პრინციპი ეფუძნება ბერის კანონს, რომლის თანახმად საანალიზო ნივთიერების კონცენტრაცია გამდინარე უჯრედში, მასში გამავალ სინათლის ნაკადთან დაკავშირებულია ტოლობით:

$$\log(I_0/I) = \epsilon bc \quad (3.5)$$

(ბერის კანონი)

$$I_0/I = 1/T \quad (3.6)$$

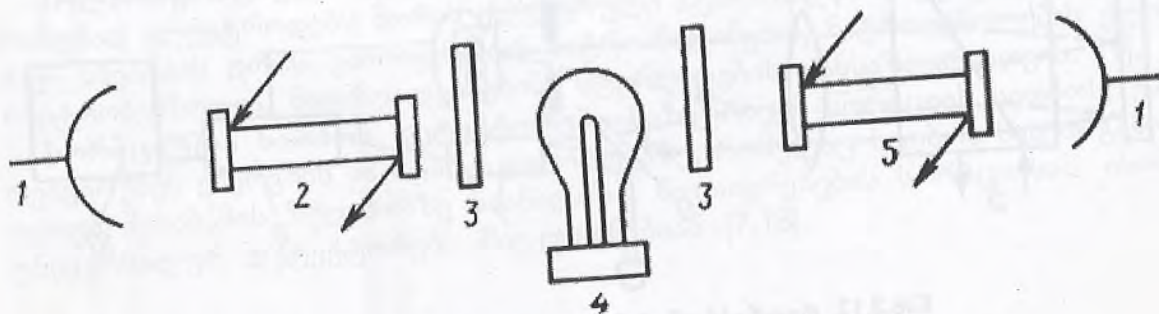
(გამტარობის კოეფიციენტის განსაზღვრა)

$$A = \epsilon bc \quad (3.7)$$

(ოპტიკური სიმკვრივის განსაზღვრა)

სადაც I - გამავალი სინათლის ინტენსივობა; I_0 - მიწოდებული სინათლის ინტენსივობა; T - გამტარობის კოეფიციენტი; ϵ - შთანთქმის მოლური კოეფიციენტი; b - კიუვეტის სიგრძე, სმ; c - საანალიზო ნივთიერების კონცენტრაცია (მოლი/ლ); A - ოპტიკური სიმკვრივე [16,18].

ოპტიკურ დეტექტორებს მიეკუთვნება აბსორბციული დეტექტორები, რომლებიც მუშაობენ ულტრაიისფერ (190-380 ნმ), ხილულ (380-800 ნმ) და ინფრაწითელ (380-500 ნმ) სპექტრში. თხევად-ქრომატოგრაფიაში უფრო ხშირად იყენებენ ფოტომეტრულ დეტექტორებს, რომელთა მუშაობაც დაფუძნებულია სინათლის შთანთქმაზე ულტრაიისფერ სპექტრში. მათი გამოყენებისას აუცილებელია, რომ საანალიზო ნივთიერებამ შთანთქმას სინათლის ნაკადი იმ ტალღის სიგრძეზე, რომელიც საჭიროა მოცემული ამოცანის გადასაჭრელად. უმეტეს ქიმიურ ნივთიერებებს შთანთქმის ინტენსიური ზოლი გააჩნიათ ულტრაიისფერ დიაპაზონში და ამიტომ, ეს დეტექტორები ფართოდ გამოიყენება გრადიენტული ელუირების პრაქტიკაში. ისინი შედარებით ნაკლებ რეაგირებენ მოძრავი ფაზის სიჩქარისა და ტემპერატურის ცვლილებაზე. გააჩნიათ მეტად მაღალი მგრძნობიარობა და შეუძლიათ დააფიქსირონ საანალიზო ნივთიერების დაბალი კონცენტრაციები (ნმ რაოდენობით). ნახ.3.12-ზე მოყვანილია ულტრაიისფერი ფოტომეტრის სქემა.



ნახ.3.12. ულტრაიისფერი ფოტომეტრის სქემა

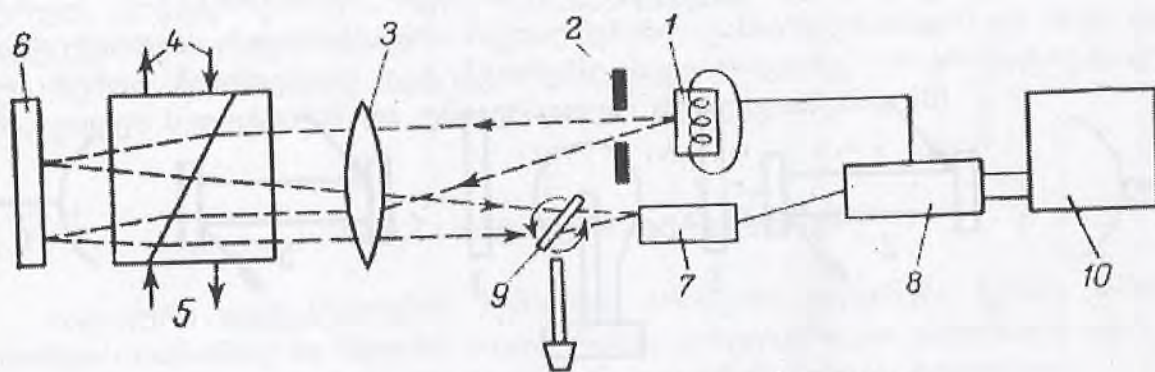
1-ფოტომიმლეტი; 2-მუშა კიუვეტა; 3-ფილტრი;
4-ვერცხლისწყლიანი ნათურა; 5-შესადარებელი მიკროკიუვეტა

ულტრაიისფერი გამოსხივების წყაროს წარმოადგენს დაბალი წნევის ვერცხლისწყლიანი ნათურა (4), რომელიც 254 ნმ ტალღის სიგრძეზე ასხივებს 90% ენერგიას. სხივები, ფილტრი 3 გავლით, ეცემა მუშა და შესადარებელ კიუვეტებს 2, 5 და ხვდება ფოტომიმდებში 1, საიდანაც სიგნალი გადაეცემა გამაძლიერებელს, რომელიც სინჯის კონცენტრაციის მიხედვით გამოსცემს დიფერენციალურ სიგნალს და ჩაიწერება რეგისტრატორის მიერ.

დეტექტორები, რომელებიც ზომავენ სინათლის შთანთქმის სიდიდეს, წარმოადგენს სელექტიურ დეტექტორებს და მათ გააჩნიათ მეტად მაღალი მგრძნობიარობა და დეტექტირების დაბალი ზღვარი [2,7,9].

3.2.4.3. რეფრაქტომეტრული დეტექტორები

რეფრაქტომეტრული დეტექტორები გამოყენების თვალსაზრისით მეორე ადგილზე დგანან ულტრაიისფერი დეტექტორების შემდეგ. მათი მუშაობის პრინციპი დაფუძნებულია მოძრავი ფაზის და მასში შერეულ საანალიზო ნივთიერებას შორის გარდატეხის მაჩვენებლის სხვაობაზე. როდესაც სინათლის ნაკადი გადის რეფრაქტომეტრის მგრძნობიარე უჯრედში, რომელშიც მოთავსებულია მუშა და შესადარებელი კიუვეტები, შევსებული ორი სხვადასხვა გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე სითხით, სინათლის სხივის გარდატეხა ხდება ამ სითხეების გარდატეხის მაჩვენებლებს შორის სხვაობის შესაბამისად. სპეციალური მგრძნობიარე ფოტოდეტექტორი სინათლის ნაკადის პროპორციულად გამოსცემს ელექტრულ სიგნალს, რომელიც ძლიერდება და გადაეცემა თვითჩამწერს. სითხის გარდატეხის მაჩვენებელი მეტად მგრძნობიარეა ტემპერატურის ცვლილების მიმართ, და ამიტომ მუშა და შესადარებელ კიუვეტაში გამავალ ნაკადებს ერთნაირი ტემპერატურა უნდა ჰქონდეთ. წინააღმდეგ შემთხვევაში ადგილი აქვს ხმაურის მაღალ დონეს და ნულოვანი ხაზის დრეიფს. ნახ.3.13-ზე მოყვანილია რეფრაქტომეტრის ზოგადი სქემა [2,19].



ნახ.3.13. რეფრაქტომეტრული დეტექტირების სქემა

- 1-ნათურა; 2-ეკრანი ხვრელით; 3-ლინზა; 4-მუშა კიუვეტა;
5-შესადარებელი კიუვეტა; 6-სარკე; 7-ფოტონინალობა; 8-გამაძლიერებელი;
9-ოპტიკური ნულის დასაყენებელი ფირფიტა; 10-თვითჩამწერი

აღნიშნული ტიპის დეტექტორები ხასიათდებიან საშუალო მგრძნობიარობით, რომელიც ძლიერაა დამოკიდებული წნევაზე, ტემპერატურაზე და საანალიზო ნივთიერების კონცენტრაციაზე, რის გამოც მათი გამოყენება გრადიენტული ელუირებისას შეუძლებელია.

ისინი უნივერსალური დეტექტორებია, რადგან რეაგირებენ ნებისმიერ ნივთიერებაზე, რომლის გარდატეხის მაჩვენებელიც განსხვავდება მოძრავი ფაზისაგან და მგრძნობიარობა დამოკიდებულია ამ სიდიდეების სხვაობაზე.

განხილული ორივე ტიპის დეტექტორი არადესტრუქციულია, რადგან საანალიზო ნივთიერების ყოფნის ხანგრძლივობა მგრძნობიარე კიუვეტაში იმდენად მცირეა, რომ გამორიცხულია მათი დაშლა ულტრაიისფერი ან ხილული სინათლის ზემოქმედებით, თუ ისინი მგრძნობიარე არიან ამგვარი გამოსხივების მიმართ.

3.2.4.4. თხევად ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული სხვა დეტექტორები

ფლუორომეტრული დეტექტორების მუშაობას საფუძვლად უდევს ნივთიერებათა ფლუორესცენციური თვისებები, ე.ი. ულტრაიისფერი გამოსხივების ზემოქმედების შედეგად სინათლის ხილულ სპექტრში გამოსხივების უნარი [20].

ამ თვისებით ხასიათდება ბევრი ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერება: მედიკამენტები, ვიტამინები, სტეროიდები, და სხვა. ამიტომ, ფლუორესცენციური დეტექტორები ფართოდ გამოიყენება ბიოლოგიაში, მედიცინაში, ფარმაკოლოგიაში, კვების პროდუქტების ანალიზის და გარემოს დაბინძურების კონტროლისთვის [2,9].

ელექტროქიმიური დეტექტორების მუშაობის პრინციპი დაფუძნებულია ელუენტის ნაკადში ნივთიერებათა ელექტროქიმიური თვისებების განსაზღვრაში. მათ მიეკუთვნება ვოლტამპერული, კულონომეტრული, პოლაროგრაფიული და კონდუქტომეტრული დეტექტორები.

ვოლტამპერული დეტექტორები გამოიყენება როგორც არაორგანული, ასევე ორგანული ნივთიერებების ანალიზისთვის [9,21].

პოლაროგრაფიული დეტექტორები ზომავენ პოლარიზებად და არაპოლარიზებად ელექტროდებს შორის ელექტრული დენის ძალას პოტენციალთა მუდმივი სხვაობის დროს. გამოიყენებიან ნიტროანილინების, ნიტროფენოლების ქლორნიტრობენზოლის, ნიტროალკანების, სტეროიდების განსაზღვრისთვის. [9].

სორბციული სითბოს დეტექტორები საზღვრავენ სორბციის სითბოს, ე.ი. რეაგირებენ ენერგიის იმ მცირე ცვლილებაზე, რომელიც სითბოს სახით გამოიყოფა შესაბამის ზედაპირზე საანალიზო ნივთიერებების სორბციისას. ისინი უნივერსალურ დეტექტორებს მიეკუთვნებიან [7,18].

თავი 3.3.

თხევადი ქრომატოგრაფიის გამოყენების სფერო

წინამდებარე თავში განხილული მაგალითები დაეხმარება დამწყებ ქრომატოგრაფისტს შეარჩიოს მისთვის სასურველი სვეტი, მოძრავი ფაზები და ანალიზის სხვა პირობები, დასაყოფი ნივთიერების მსგავსების მიხედვით ქვემოთ მოყვანილი მაგალითებიდან [8].

3.3.1. ფარმაცევტული პრეპარატები

3.3.1.1. ალკალოიდები

სინჯი	რეზერპინი 5.6 წთ; ერგოტამინი 7.5 წთ
სვეტი	მიკროფოროვანი სილიკაგელი (10 მკმ), (0.25 მ×2.2 მმ)
მოძრავი ფაზა	იზოპროპილის ეთერი-აცეტონიტრილი-მეთანოლი (69.5:30:0.5); 0.33 სმ ³ /წთ
დეტექტორი	ფლუორესცენციური

3.3.1.2. ანტიბიოტიკები

სინჯი	ოქსიტეტრაციკლინი HCl 2.4 წთ; ტეტრაციკლინი HCl 3.8 წთ; დიოქსიტციკლინი HCl 4.6 წთ.
სვეტი	Pellionex SCX (30-40 მკმ) (1.5 მ × 2.2 მმ); 45°C; 50 ატმ. წნევა
მოძრავი ფაზა	0.1M NH ₄ NaHPO ₄ (pH 8.2); 0.8 სმ ³ /წთ
დეტექტორი	ულტრაიისფერი; 280 ნმ;
სინჯი	დიოქსიკანამიცილინი 5.0 წთ; კანამიცილინი A 6.2 წთ; კანამიცილინი B 14.6 წთ.
სვეტი	Aminex A 28 (1.0 მ × 2.0 მმ); 40°C;
მოძრავი ფაზა	წყალი; 0.2 სმ ³ /წთ
დეტექტორი	ულტრაიისფერი; 280 ნმ;

3.3.1.3. ნარკოტიკული პრეპარატები

სინჯი	ფენციკლიდინი 0.2; მეტადონი 0.23; კოკაინი 1.00 (5.91 წთ); ტეტრაჰიდროკანაბინოლი 1.2; ვალიუმი 1.33; მეტამფეტამინი 2.66
სვეტი	Corasil II (37-50 მკმ) (0.5 მ×2.3 მმ)
მოძრავი ფაზა	0.22% ციკლოჰექსილამინი ციკლოჰექსანში 1.45 სმ ³ /წთ

სინჯი 3,4-მეთილენდიოქსიამფეტამინი 1.00 (4,14 წთ); სეკობარბიტალი 1.48; ჰეროინი 2.14; *N,N*-დიმეთილტრიფტამინი 2.52; ლიზერგინ მუავას დიმეთილამიდი 3.81; მესკალინი 6.66

სვეტი მოძრავი ფაზა Corasil II (0.5 მ×2.3 მმ)
0.22% ციკლოჰექსილამინი +1.5% მეთანოლი ციკლოჰექსანში; 1.45 სმ³/წთ;

3.3.1.4. სტეროიდები

სინჯი პროგესტერონი 1.2 წთ; ანდროსტენდიონი 1.5 წთ; Δ⁴-პრეგნენ-20β-ოლონი 2.05 წთ; 17α-ჰიდროპროგესტერონი 2.50 წთ; ადრენოსტერონი 2.8 წთ, კორტიზონ აცეტატი 3.6 წთ; კორტიზონი 5.5 წთ; ჰიდროკორტიზონი 6.6 წთ

სვეტი მოძრავი ფაზა (Micropak NH₂) (0.15 სმ)
გამხსნელი I: 0.2% იზოპროპანოლი ჰექსანში
გამხსნელი II: 50% იზოპროპანოლი მეთილენქლორიდში

3.3.2. ბიოქიმიური ნივთიერებები

3.3.2.1. ნახშირწყლები

სინჯი β-მეთილ-*D*-ალოპირანოზიდი-2,4,6-ტრიბენზოატი 4.75 წთ
β-მეთილ-*D*-გლუკოპირანოზიდი-2,3,6-ტრიბენზოატი 7.25 წთ
β-მეთილ-*D*-გლუკოპირანოზიდი-2,3,6-ტრიბენზოატი 8.75 წთ
β-მეთილ-*D*-გალაქტოპირანოზიდი-2,3,6-ტრიბენზოატი 10.0 წთ

სვეტი მოძრავი ფაზა დეტექტორი Pellosil HC (1 მ×4.0 მმ)
დიქლორმეთანი; 2.5 სმ³/წთ
ულტრაიისფერი, 254 ნმ

სინჯი

β-*D*-გალაქტოზ პენტა-აცეტატი 10 წთ; ფენილ β-*D*-გლუკოპირანოზიდი 22 წთ; მეთილ α-*D*-გლუკოპირანოზიდი 58 წთ

სვეტი

მოძრავი ფაზა დეტექტორი

Porasil A
მეთილეთილკეტონი-წყალი-აცეტონი (85:10:5) 2.1 სმ³/წთ
რეფრაქტომეტრი

3.3.2.2. ლიპიდები

სინჯი

მეთილ ლინოლენატი 14.6 წთ; მეთილ ლინოლეატი 18.4 წთ; მეთილ ოლეატი 24.8 წთ; მეთილ პალმიტატი 30.8 წთ; მეთილ სტეარატი 46.0 წთ

სვეტი

მოძრავი ფაზა დეტექტორი

Bondapak-C₁₈ Porasil
100% აცეტონიტრილი; 5.0 სმ³/წთ;
რეფრაქტომეტრი

სინჯი *p*-ბრომფენასილ ეთერები: პროსტაგლადინ F_2 -ის 11.5 წთ; პროსტაგლადინ E_2 -ის 14.0 წთ; პროსტაგლადინ D_2 -ის 16.0 წთ; პროსტაგლადინ A_2 -ის 32.0 წთ; პროსტაგლადინ B_2 -ის 34.0 წთ

სვეტი Bondapak- C_{18} (0.25 მ×4.0 მმ)
მოძრავი ფაზა აცეტონიტრილი-წყალი (50:50); 1.2 სმ³/წთ
დეტექტორი ულტრაიისფერი, 254 ნმ

3.3.2.3. ვიტამინები

სინჯი ნიკოტინამიდი 1.75 წთ; რიბოფლავინი 3.5 წთ; პირიდოქსინი 3.75 წთ

სვეტი Zipax SCX (1 მ×2.1 მმ)
მოძრავი ფაზა 0.05M NaH_2PO_4 +0.05M KH_2PO_4 ; pH=4.4; 1.2 სმ³/წთ

დეტექტორი ულტრაიისფერი

სინჯი

ვიტამინი A აცეტატი 3.42 წთ; ვიტამინი E 4.42 წთ; ვიტამინი D_3 11.24 წთ; ვიტამინი A ალკოჰოლი 15.12 წთ.

სვეტი

Corasil II (37-50 მკმ) (0.45 მ × 4.0 მმ);

მოძრავი ფაზა

25% ქლოროფორმი იზოოქტანში, 0.92 სმ³/წთ

დეტექტორი

ულტრაიისფერი

3.3.3. კვების პროდუქტები

სინჯი

ყურძნის წვენის შემადგენლობა:

ლიმონმჟავა 27.2 წთ; ვაშლიმჟავა 30.0 წთ;

ღვინომჟავა 33.3 წთ

სვეტი

Aminex A 25; 70°C;

მოძრავი ფაზა

1.0M ნატრიუმის ფორმიატი, 1 სმ³/წთ

დეტექტორი

რეფრაქტომეტრი

სინჯი

საკვები დანამატები:

ბენზოატი 4.1 წთ; სახარინი 13.5 წთ

სვეტი

Zipax SAX (1.0 მ × 4.0 მმ);

მოძრავი ფაზა

0.01M ნატრიუმის ტეტრაბორატი+0.02M ნატრიუმის ნიტრატი, 1.8 სმ³/წთ

დეტექტორი

ულტრაიისფერი

3.3.4. სოფლის მეურნეობა

პესტიციდები
სინჯი

p-ნიტროფენოლი 2.5 წთ; მეთილპარათიონი 5.0 წთ;
პარათიონი 12.0 წთ

სვეტი
მოძრავი ფაზა
დეტექტორი

Corasil/C₁₈; (37-50 მკმ)
0.05M KCl 30%მეთანოლ-70%წყლის ნარევეში, 0.5 სმ³/წთ
პოლაროგრაფიული

3.3.5. ნავთობგადამუშავება

სინჯი
სვეტი
მოძრავი ფაზა
დეტექტორი

ბენზოლი 4.0 წთ; ნაფტალინი 5.6 წთ; ფენენტრენი 9.6 წთ
Merck SI 60 (40 მკმ) + წყალი; (0.45 მ × 4.0 მმ)
n-ჰექსანი, 2.4 სმ³/სთ
ულტრაიისფერი

3.3.6. ფეთქებადი ნივთიერებები

სინჯი
სვეტი
მოძრავი ფაზა
დეტექტორი

ნიტროგლიცერინი 2.4 წთ; დიეთილპტალატი 4.6 წთ;
ეთილცენტრალიტი 13.6 წთ; აცეტანილიდი 20.6 წთ
Vydac (30-40 მკმ), (1.0 მ × 2.1 მმ)
1,1-დიქლორეთანი; 0.8 სმ³/წთ
ულტრაიისფერი

სინჯი
სვეტი
მოძრავი ფაზა

ტრინიტროგლიცერინი 2.5 წთ; 1,3-დინიტროგლიცერინი 6.5 წთ;
1,2-დინიტროგლიცერინი 8.0 წთ;
Vydac (30-40 მკმ), (1.0 მ × 2.1 მმ)
დიქლორმეთანი-ჰექსანი (60:40); 0.75 სმ³

3.3.4. სოფლის მეურნეობა

პესტიციდები

სინჯი

p-ნიტროფენოლი 2.5 წთ; მეთილპარათიონი 5.0 წთ;
პარათიონი 12.0 წთ

სვეტი

Corasil/C₁₈; (37-50 მკმ)

მოძრავი ფაზა

0.05M KCl 30%მეთანოლ-70%წყლის ნარევეში, 0.5 სმ³/წთ

დეტექტორი

პოლაროგრაფიული

3.3.5. ნავთობგადამუშავება

სინჯი

ბენზოლი 4.0 წთ; ნაფტალინი 5.6 წთ; ფენენტრენი 9.6 წთ

სვეტი

Merck SI 60 (40 მკმ) + წყალი; (0.45 მ × 4.0 მმ)

მოძრავი ფაზა

n-ჰექსანი, 2.4 სმ³/სთ

დეტექტორი

ულტრაიისფერი

3.3.6. ფეთქებადი ნივთიერებები

სინჯი

ნიტროგლიცერინი 2.4 წთ; დიეთილპტალატი 4.6 წთ;
ეთილცენტრალიტი 13.6 წთ; აცეტანილიდი 20.6 წთ

სვეტი

Vydac (30-40 მკმ), (1.0 მ × 2.1 მმ)

მოძრავი ფაზა

1,1-დიქლორეთანი; 0.8 სმ³/წთ

დეტექტორი

ულტრაიისფერი

სინჯი

ტრინიტროგლიცერინი 2.5 წთ; 1,3-დინიტროგლიცერინი 6.5 წთ;
1,2-დინიტროგლიცერინი 8.0 წთ;

სვეტი

Vydac (30-40 მკმ), (1.0 მ × 2.1 მმ)

მოძრავი ფაზა

დიქლორმეთანი-ჰექსანი (60:40); 0.75 სმ³

თავი 3.4. იონმიმოცვლითი ქრომატოგრაფია

შესავალი

იონმიმოცვლითი ქრომატოგრაფია ქრომატოგრაფიის სხვა მეთოდებს შორის ერთ-ერთი პირველია, რომელმაც პრაქტიკული გამოყენება მოიპოვა. მას ფართოდ იყენებენ მედიცინაში, ბიოლოგიაში, ბიოქიმიაში, კვების პროდუქტების ანალიზის, ჰაერის, წყლის, ნიადაგის და ბიოგარემოს დაბინძურების იდენტიფიკაციისთვის. ამასთანავე, ქრომატოგრაფიის სხვა მეთოდებისგან განსხვავებით იონმიმოცვლითი ქრომატოგრაფია საშუალებას იძლევა ეს ამოცანები გადაიჭრას წუთებში [1,2,18,].

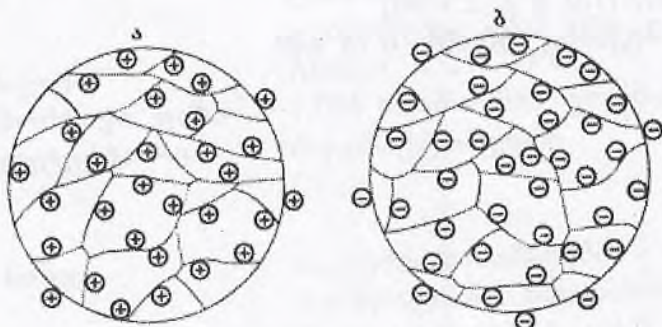
3.4.1. მეთოდის საფუძვლები

იონმიმოცვლითი ქრომატოგრაფია თხევადი ქრომატოგრაფიის ერთ-ერთ ვარიანტს წარმოადგენს, რომელსაც საფუძვლად უდევს მოძრავ ფაზაში არსებული იონების შექცევადი მიმოცვლა უძრავი ფაზის იონებთან [3].

იმისთვის რომ გავარკვიოთ რაში მდგომარეობს იონმიმოცვლითი ქრომატოგრაფიის არსი, ჯერ გავეცნოთ რა არის იონიტი ანუ იონმიმომცვლელი და რა პროცესი მიმდინარეობს მასზე.

იონმიმომცვლელი (იონიტები) წარმოადგენენ მყარ, წყალში უხსნად ნივთიერებებს, რომლებიც შეიცავენ დისოციაციის და იონმიმოცვლითი უნარის მქონე იონოგენურ ჯგუფებს.

ცნობილია ბუნებრივი და ხელოვნურად მიღებული იონიტები. ქრომატოგრაფიულ პრაქტიკაში ძირითადად გამოიყენება სინთეზური იონიტები [7,21]. ჩვეულებრივი იონმიმომცვლელი (ნახ.3.14) შედგება ფოროვანი მატრიცის ანუ კარ-



ნახ.3.14. იონმიმომცვლელის მარცვლის სქემატური გამოსახულება

- ა) ანიონმიმომცვლელი; ბ) კათიონმიმომცვლელი
ხაზები გამოხატავენ პოლიმერულ ჯგუფებს და განივ ბმებს, წრეები კი დამუხტულ იონოგენურ ფუნქციონალურ ჯგუფებს.
საწინააღმდეგო იონები გამოსახული არ არის

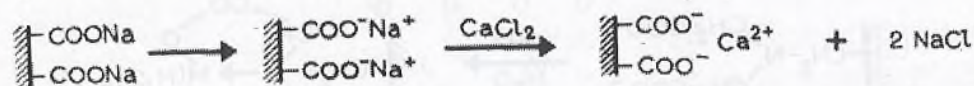
კასისაგან და მასთან კოვალენტური ბმებით დაკავშირებული დამუხტული იონოგენური ფუნქციონალური ჯგუფებისგან. მატრიცას გააჩნია დადებითი ან უარყოფითი მუხტი, რომელიც კომპენსირებულია საწინააღმდეგო მუხტის მქონე იონებით ისე, რომ იონიტი თვითონ ნეიტრალურია. მატრიცას მუხტს ანიჭებს მჟავის ან ფუძის მოლეკულების ატომთა გარკვეული ჯგუფი $-SO_3^-$ და $-N^+$. მათ იონოგენური ან ფუნქციონალური ჯგუფები ეწოდებათ, ხოლო იონებს, რომლებიც აკომპენსირებენ მატ-

რიცის მუხტს, საწინააღმდეგო იონები. მათ მოძრაობის უნარი გააჩნიათ, რაც განაპირობებს მათ იონმიმოცვლით უნარსაც.

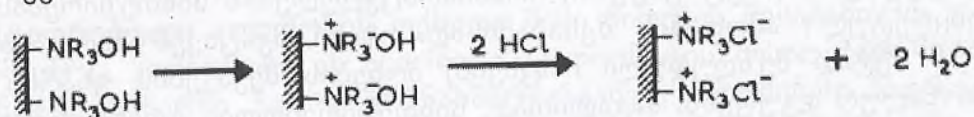
განასხვავებენ ფუნქციონალური ჯგუფების ხუთ ძირითად კლასს, რომელთაც იონმიმოცვლელები შეიცავენ და რომელთა მიხედვით ხდება მათი კლასიფიკაცია:

- კათიონმიმოცვლელები ანუ კათიონიტები
- ანიონმიმოცვლელები ანუ ანიონიტები
- ამფოტერული იონმიმოცვლელები
- ხელატური იონმიმოცვლელები
- სელექტიური სპეციფიკური იონმიმოცვლელები

კათიონიტები წარმოადგენენ მაღალმოლეკულურ დამუხტულ უხსნად ანიონებს, რომელთა იონოგენური ჯგუფები გაჯერებულია ცალკეული ხსნადი კათიონებით. რომელიმე ნივთიერების წყალხსნართან იონმიმოცვლელის კონტაქტისას ამ ჯგუფებს გააჩნიათ დისოციაციის და მოცემული ნივთიერების კათიონებთან მიმოცვლის უნარი:



ანიონიტები მაღალმოლეკულური დამუხტული უხსნადი კათიონებია, რომელთაც მათთან ელექტროსტატიკურად დაკავშირებული ანიონების მიმოცვლის უნარი აქვთ.



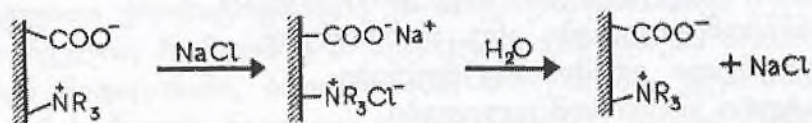
კათიონიტებს და ანიონიტებს თავის მხრივ მათში შემავალი აქტიური ფუნქციონალური ჯგუფების მიხედვით ყოფენ რამდენიმე ჯგუფად. ცხრილში 3.5. მოყვანილია მათი ძირითადი ტიპები [7].

ცხრილი 3.5.

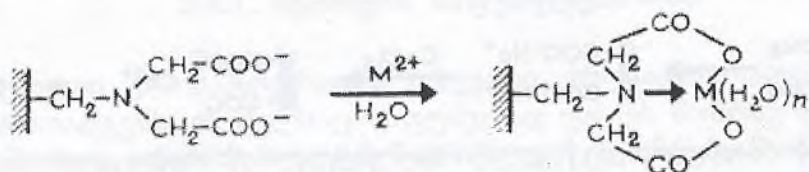
იონმიმოცვლელთა ძირითადი ტიპები

იონმიმოცვლელი	იონმიმოცვლელის ტიპი	ფუნქციონალური ჯგუფები
კათიონმიმოცვლელი	ძლიერმჟავა საშუალომჟავა სუსტმჟავა	RSO ₃ ⁻ RPHO ₃ CH ₃ COO ⁻
ანიონმიმოცვლელი	ძლიერფუძე	მეოთხეული ამონიუმის ჯგუფები
	საშუალო ფუძე	მესამეული და მეოთხეული ამონიუმის ჯგუფები
	სუსტფუძე	ამინები, პოლიამინები

ამფოტერული იონმიმომცველის მატრიცა შეიცავს როგორც კათიონ, ასევე ანიონმიმომცველით ჯგუფებს, რომლებიც წყალში დისოცირდებიან ისე, რომ მას არ გადასცემენ იონებს. ამის გამო, მათ გააჩნიათ უნარი შეაკავონ ხსნარში დისოცირებული მარილების იონები: კათიონები ანიონური ჯგუფებით, ხოლო ანიონები კათიონური ჯგუფებით.

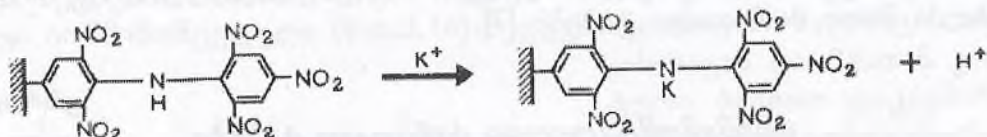


ხელატური იონმიმომცველები სინთეზური ფისებია, რომელთა შემადგენლობაშიც შეყვანილია კომპლექსნარმომქმნელი ფუნქციონალური ჯგუფები. ისინი შეაკავებენ მხოლოდ გარკვეული ჯგუფის იონებს. მაგალითად, მძიმე და ტუტე მინათა მეტალებს და შესაბამისად უფრო სელექტიურები არიან, ვიდრე კათიონიტები.



M^{2+} სიმბოლო შეესაბამება შემდეგ იონებს: Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} .

სელექტიური (სპეციფიკური) იონმიმომცველების სინთეზირებას ახდენენ კონკრეტული ამოცანის შესაბამისად. ისინი შეიცავენ მხოლოდ ერთი ტიპის (ან მეტად შეზღუდული რიცხვის) იონების შეკავების უნარის მქონე ფუნქციონალურ ჯგუფებს. მაგალითად, სინთეზირებულია ტრინიტროფენილამინოდინიტროფენილის ჯგუფების შემცველი იონმიმომცველი ფისი, რომელიც სელექტიურად შეაკავებს კალიუმის იონებს:



მატრიცის შედგენილობის მიხედვით იონმიმომცველები იყოფა შემდეგ ჯგუფად:

- არაორგანული იონმიმომცველები ალუმინის სილიკატიტის და სხვათა ბაზაზე.
- სხვადასხვა ტიპის სინთეზური ფისები
- იონმიმომცველი ცელულოზა
- იონმიმომცველითი პოლიდექსტრინი

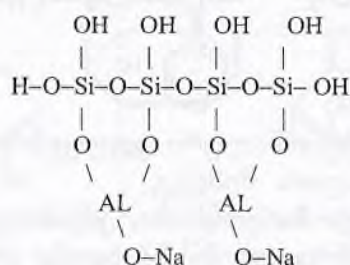
განსაკუთრებით ფართოდ გამოიყენება იონმიმომცველები პოლისტიროლის ან პოლიაკრილის საფუძველზე.

არაორგანული მინერალური იონიტები ცნობილია XIX საუკუნის მეორე ნახევრიდან. ისინი მაგარი კარკასის მქონე კრისტალური სილიკატებია ქარბი მუხტით. ამ ჯგუფის იონიტების წარმომადგენელია ცეოლიტები, მინერალი ანალციმი, შაბაზიტი, ნატროლიტი და სხვა. ყველა მათგანი ხასიათდება მო-

წესრიგებული სივრცითი ბადისებური სტრუქტურით. მათში საწინააღმდეგო იონის როლს ასრულებს ტუტე და ტუტე-მინათა მეტალების იონები. მაგარი სტრუქტურის გამო ცეოლითები ნაკლებად ჯირჯვდება და ხასიათდება მიკროფორების არსებობით. რის გამო ზოგიერთ კათიონებს და დიდი ზომის ნეიტრალურ მოლეკულებს არ შეუძლიათ მის კარკასში შეღწევა. ამიტომ ცეოლითებისთვის უფრო მეტად დამახასიათებელია საცრული ეფექტი და გამოიყენება მოლეკულური საცრების სახით [3].

ცნობილია აგრეთვე სინთეზური არაორგანული იონიტები, რომელთაც მიეკუთვნება პერმუტიტი, გააქტიურებული ალუმინის ოქსიდი, ცირკონიუმის და ტიტანის საფუძველზე სინთეზირებული იონიტები [3].

პერმუტიტი ჰიდრატირებული ალუმოსილიკატია და შემდეგი სტრუქტურით ხასიათდება:



სადაც Na^+ იონები ჟანგბადის ხიდების საშუალებით სილიციუმის ატომებთან კი არ არის დაკავშირებული, არამედ ალუმინის ატომებთან.

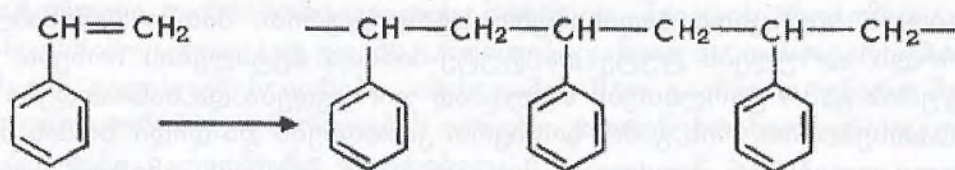
გააქტიურებული ალუმონის ოქსიდი მისი მიღების შესაბამისად გამოიყენება როგორც კათიონიტი ან ანიონიტი. კათიონიტის მისაღებად ნატრიუმის ალუმინატის ხსნარში ატარებენ ნახშირორჟანგს, ალუმინის ჰიდროქსიდის სრულ დალექვამდე, რომელსაც შემდეგ გამოანრობენ. ამგვარად მიღებული კათიონიტი შეესაბამება ფორმულას $[(\text{Al}_2\text{O}_3)_x \cdot \text{AlO}_2] \text{Na}^+$, ხოლო მისი დამუშავებით 2M HNO_3 საშუალებით იღებენ ანიონიტს — $[(\text{Al}_2\text{O}_3)_x \cdot \text{AlO}_2] \text{NO}_3^-$ [3].

განსაკუთრებით დიდი გამოყენება მოიპოვა ცირკონიუმფოსფატებმა, რომელთა ზოგადი ფორმულაა: $\text{Zr}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [7,22].

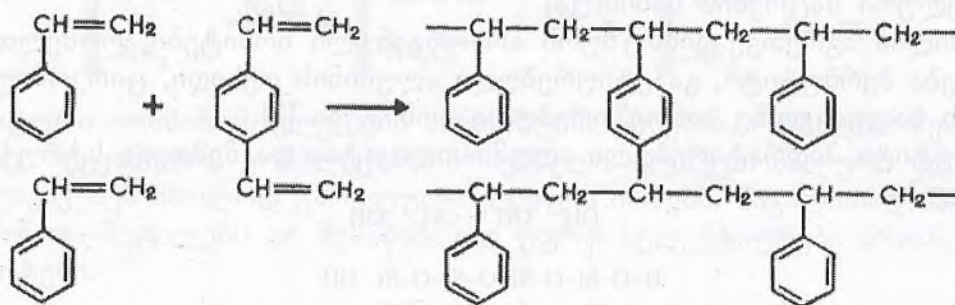
სინთეზური ფისები სინთეზური პოლიმერული ნივთიერებებია, რომლებსაც ახასიათებთ ქიმიური მედეგობა, მექანიკური სიმტკიცე, დიდი მოცულობითი ტევადობა და სელექტიურობის მაღალი უნარი. ისინი ტიპურ გელებს წარმოადგენენ და მათი კარკასი ე.წ. მატრიცა შედგება ნახშირბადის ჯაჭვების მაღალპოლიმერული სივრცითი ბადისაგან. მატრიცასთან მიერთებულია მუხტის მატარებელი ჯგუფები, ფიქსირებული იონები. კათიონიტებისთვის ეს ჯგუფებია:

$-\text{SO}_3^-$, $-\text{COO}^-$, $-\text{PO}_3^{2-}$, AsO_3^{2-} , ანიონიტებისთვის — $-\text{NH}_3^+$, $>\text{NH}_2^+$, $-\text{N}^+=$, $-\text{S}^+$. ფაქტობრივად იონიტის მარცვალი ერთ დიდ, გიგანტურ მოლეკულას წარმოადგენს, რომლის გახსნისთვისაც საჭიროა მტკიცე C-C ბმების განწყვეტა. ამიტომ, ისინი წყალში და ყველა იმ გამხსნელში, რომელთაც ამ ბმების დაშლა არ შეუძლიათ, პრაქტიკულად უხსნადია [3].

ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული უმეტესი იონმიმოცვლითი ფისები სინთეზირებულია პოლისტიროლის საფუძველზე. სტიროლის პოლიმერიზაციის შედეგად წარმოიქმნება წრფივი პოლიმერი [7].



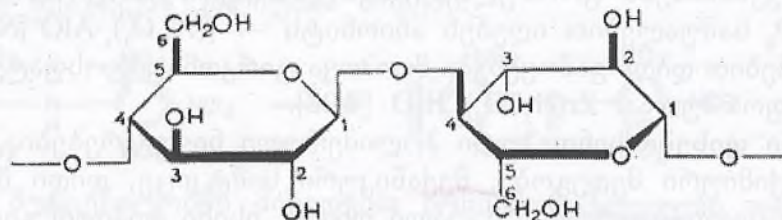
ხოლო მცირე რაოდენობით დივინილბენზოლის დამატებისას წარმოიქმნება:



ორივე შემთხვევაში ფუნქციონალური ჯგუფების შეყვანა პოლიმერის მარცვალში ხდება პოლიმერიზაციის შემდეგ.

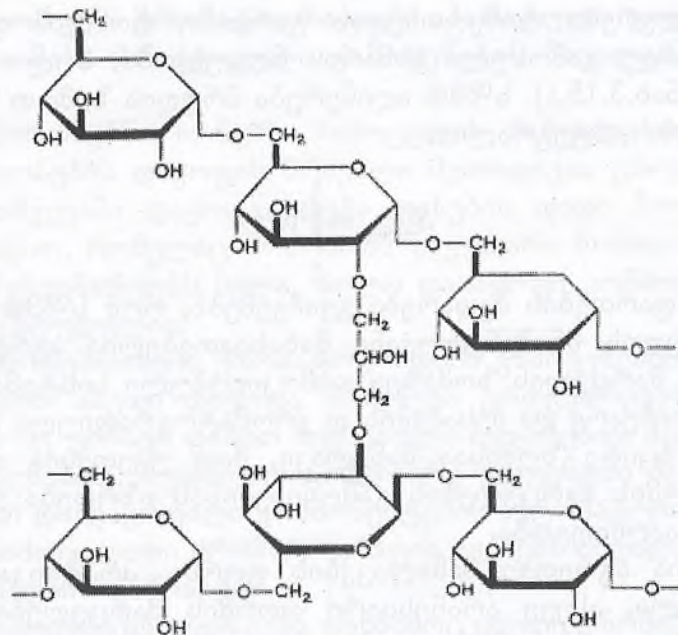
იონმიმოცვლითი ცელულოზა იონმიმოცვლითი ფისისგან ძირითადად განსხვავდება იმით რომ, იონმიმოცვლა მასზე ხდება არა გრანულების სიღრმეში, არამედ ბოჭკოს ზედაპირზე. ეს განპირობებულია იმით, რომ ცელულოზა იონიტები ხაზოვან პოლიმერებს წარმოადგენენ, რაც თავის მხრივ განაპირობებს იონიტის მეტად განვითარებულ ზედაპირს და შესაბამისად იონმიმოცვლითი რეაქციის დიდ სიჩქარეს.

ბუნებრივი ცელულოზა წარმოადგენს ანჰიდროგლუკოზის მონომერების პოლიკონდენსატს, რომლის ერთი მოლეკულა შეიცავს ათასობით ცელობიოზის ერთეულს:



ცელულოზა-იონიტი ქრომატოგრაფიაში გამოიყენება ფხვნილის (სვეტური ქრომატოგრაფია) ან აგაროზას გელების (თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია) სახით. [3,7]

იონმიმოცვლით პოლიდექსტრანებს გააჩნიათ კარგი თვისებები ბიოპოლიმერების ქრომატოგრაფიული ანალიზისთვის. დექსტრანების თანაპოლიმერიზაციით წარმოიქმნება განივი კავშირები. მიღებული თანაპოლიმერი იონოგენური ჯგუფების საუკეთესო მატარებელია და შემდეგი სტრუქტურა გააჩნია:



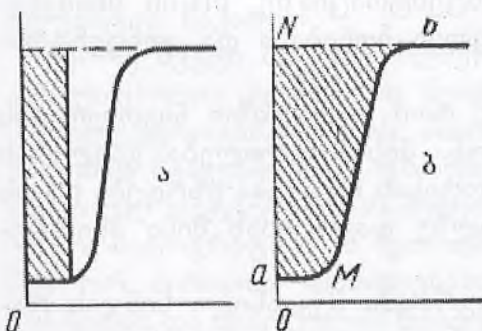
ისევე როგორც ცელულოზაში, ამ ფისების შემადგენლობაშიც გვხვდება თავისუფალი ჰიდროქსილის ჯგუფები. ტუტე არეში ეს ჯგუფები რეაგირებენ ჰალოგენწარმოებულებთან და წარმოქმნიან იონმიმოცვლით ცენტრებს [7].

იონიტის დამახასიათებელი თავისებურებაა მისი მოცულობითი ტევადობა.

იონმიმოცვლელის ტევადობა გვიჩვენებს იმ იონების სრულ რაოდენობას მილიეკვივალენტებში, რომლის შეკავებაც 1გ მშრალ ან 1მლ გაჯირჯვებულ ფისს შეუძლია. იგი ითვლება ყველა ელექტროსტატიკურად დამუხტული ფუნქციონალური ჯგუფების საერთო რაოდენობის საზომად. იონმიმოცვლელის რეალურ ტევადობაზე გავლენას ახდენენ ისეთი ფაქტორები, როგორიცაა ელუენტის კონცენტრაცია, იონური ძალა, pH, ტემპერატურა და სანინალმდე-გო იონის ბუნება [7,22].

სტატიკურ პირობებში განსაზღვრული იონიტის მოცულობითი ტევადობა

განსხვავდება დინამიურ პირობებში განსაზღვრული იგივე სიდიდისგან. ამიტომ ყოველთვის უნდა მიეთითოს რა პირობებში ხდება მისი განსაზღვრა. განასხვავებენ დინამიკური მიმოცვლითი ტევადობის ორ ტიპს: დინამიკური მიმოცვლითი ტევადობა გახტომამდე (დმტ) და სრული დინამიკური მიმოცვლითი ტევადობა (სდმტ). დმტ წარმოადგენს იონიტის ტევადობას, რომელიც განისაზღვრება სვეტიდან გამოსულ ხსნარში მოცემული იონის გამოჩენის მიხედვით. სდმტ კი განისაზღვრება მოცემული იონიტის სრული გაჯერებით. ეს განსხვავება კარგად ჩანს გრაფიკულად (ნახ.3.15).



ნახ.3.15. ა) დინამიკური მიმოცვლითი ტევადობის განსაზღვრა
ბ) სრული დინამიკური მიმოცვლითი ტევადობა

დმტ განისაზღვრება ოთხკუთხედის ფართით, რომლის ფუძეა სვეტიდან იონის გამოსვლამდე გამოსული ხსნარის მოცულობა, ხოლო სიმაღლე-იონის კონცენტრაცია (ნახ.3.15,ა). სდმტ აღინერება მრუდის ზემოთ სრული ფართით და განისაზღვრება ინტეგრალით

$$S_{aMbN} = \int_a^b y dx \quad (3.7)$$

დაშტრიხული ფართების შედარება გვიჩვენებს, რომ სდმტ მეტია დმტ-ზე. იონმიმომცველის მნიშვნელოვანი მახასიათებელია აგრეთვე მარცვლის ზომა და ფორმა. მარცვლის ზომაზეა დამოკიდებული სისტემაში წონასწორობის დამყარების სიჩქარე და შესაბამისად ქრომატოგრაფიული დაყოფის ხარისხი. რაც უფრო მცირე ზომისაა ნაწილაკი, მით უკეთესია დაყოფა. მაგრამ ძლიერ მცირე ზომის მარცვლების გამოყენებისას იზრდება ქრომატოგრაფიული სვეტის წინააღმდეგობა.

მნიშვნელოვანია აგრეთვე ნაწილაკების ფორმა. პრაქტიკაში გამოიყენება როგორც სფერული, ასევე არაწესიერი ფორმის მარცვლები. უპირატესობა ენიჭება სფერული ფორმის მარცვლებს, რადგან ისინი არცთუ ისე მჭიდროდ ავსებენ ქრომატოგრაფიულ სვეტს და მცირეა სვეტის წინააღმდეგობა მოძრავი ფაზის მიმართ [7].

3.4.2. მოძრავი ფაზის შერჩევა და დაყოფის პირობები

იონმიმომცვლითი ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში მოძრავი ფაზის სახით ხშირად გამოიყენება ბუფერული თვისებების მქონე სხვადასხვა მარილების წყალ-ხსნარები. ზოგჯერ მას მცირე რაოდენობით ორგანულ გამხსნელებსაც უმატებენ (მეთანოლი, აცეტონიტრილი, ტეტრაჰიდროფურანი). მათი მოქმედების პრინციპი მსგავსია ორგანული გამხსნელის დამატების პრინციპისა შებრუნებულ-ფაზურ ქრომატოგრაფიაში. მოძრავი ფაზის ძალა და სელექციურობა დამოკიდებულია მარილისა და ბუფერის კონცენტრაციაზე, pH-ის მნიშვნელობაზე და დამატებული ორგანული გამხსნელის ბუნებასა და კონცენტრაციაზე.

მოძრავი ფაზის pH-ის შერჩევა ხდება ისე, რომ საანალიზო ნივთიერების მოლეკულებმა სრული იონიზაცია განიცადონ. მისი ცვლილება გავლენას ახდენს შეკავებაზე. ანიონმიმომცველით დაყოფისას შეკავება იზრდება pH-ის ზრდასთან ერთად, ხოლო კათიონმიმომცველზე დაყოფისას მისი მნიშვნელობა მცირდება.

მეტად მნიშვნელოვანია აგრეთვე ქრომატოგრაფში შეყვანილი სინჯის რაოდენობა. 200-500 ნ.ე. მოლეკულური მასის მქონე ნივთიერებების ანალიზისას უმჯობესია 50 მგ სინჯის შეყვანა 1 გ პოლიმერულ სორბენტზე გადაანგარიშებით [2].

3.4.3. იონური ქრომატოგრაფიის აპარატული გაფორმება და მისი პრაქტიკული გამოყენების მაგალითები

დინამიკურ პირობებში იონური მიმოცვლის საშუალებით ორგანული და არაორგანული იონების დაყოფის მრავალი მეთოდიკაა ცნობილი [23,24].

უმეტეს შემთხვევაში დაყოფა ხდება ფისების დიდი ზომის ნაწილაკებზე ელუენტის ნაკადით, რომელიც მოძრაობს საკუთარი წონის გავლენით. დაყოფის პროცესი მიმდინარეობს ნელა, ხოლო დასაყოფი კომპონენტების რაოდენობა სინჯში შეზღუდულია.

ანალიზური მიზნებისთვის ქრომატოგრაფიის გამოყენებისას დაყოფა ეფექტური უნდა იყოს. ასეთი დაყოფა მიიღწევა ერთგვაროვანი, მცირე ზომის ნაწილაკების მქონე უძრავი ფაზით შევსებული შედარებით მცირე დიამეტრიანი სვეტების გამოყენებით; მუდმივად გამდინარე ელუენტში მცირე მოცულობის სინჯის შეყვანით და დაყოფილი კომპონენტების ავტომატური დეტექტირებით. ამისათვის იონმიმოცვლითი ქრომატოგრაფია იყენებს მაღალეფექტური თხევადი ქრომატოგრაფიის ვარიანტს.

1975 წელს შემოთავაზებული იქნა იონმიმოცვლითი ქრომატოგრაფიის ახალი მეთოდი ავტომატიზირებული კონდუქტომეტრიული დეტექტირებით და შემოღებული იქნა ტერმინი „იონური ქრომატოგრაფია“ [25].

დღეისათვის ტერმინი იონური ქრომატოგრაფია ასახავს როგორც ორგანული, ასევე არაორგანული წარმოშობის იონების დაყოფის პროცესს, რომელიც მთავრდება ავტომატური დეტექტირებით.

უფრო მეტად გავრცელებულია კონდუქტომეტრიული იონური ქრომატოგრაფია ერთი ან ორი სვეტის გამოყენებით. მისი საშუალებით შეიძლება დაიყოს როგორც ანიონები, ასევე კათიონები.

I. კონდუქტომეტრიული ანიონური ქრომატოგრაფია ორი სვეტით. როგორც სახელწოდებიდან ჩანს იგი ეფუძნება გამყოფი და საკომპენსაციო სვეტების გამოყენებას (ნახ.3.16.)

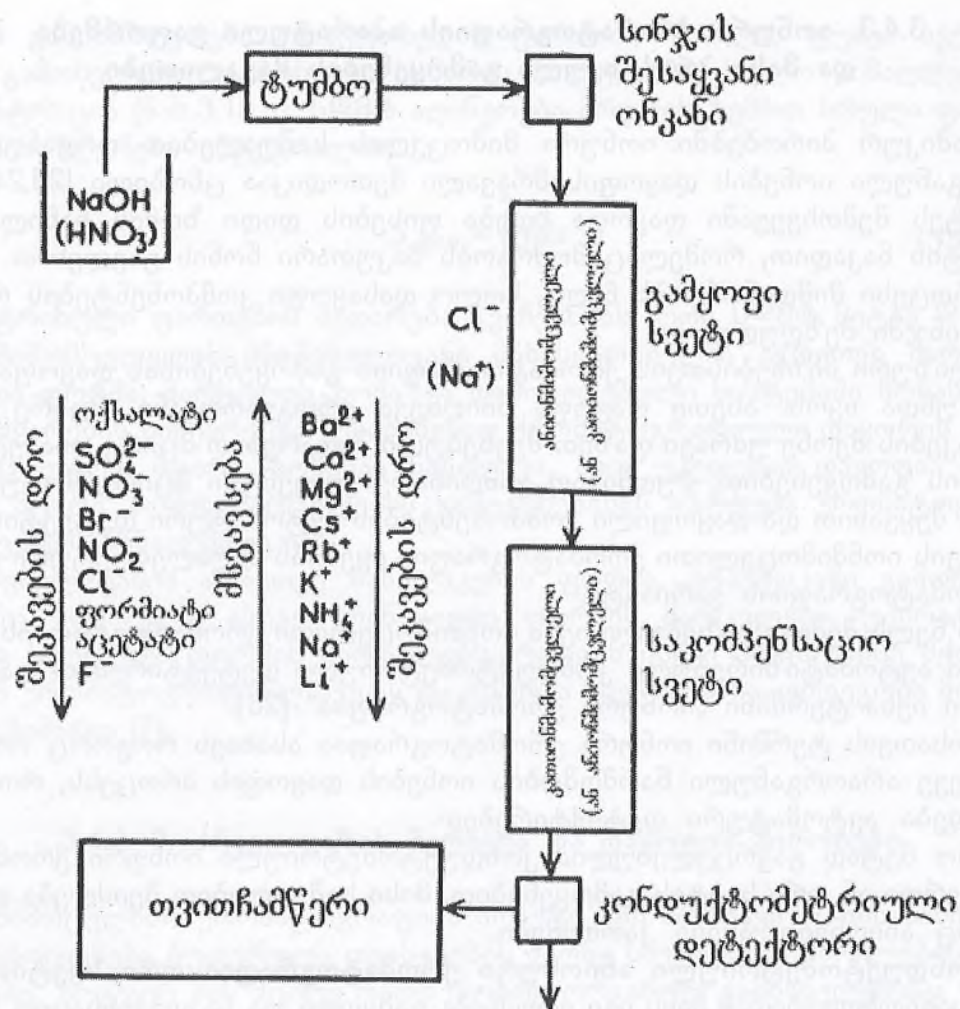
ანიონები იყოფიან პირველ სვეტზე, რომელიც შევსებულია მცირე ტევადობის ანიონმიმოცვლელი ფისით. საანალიზო ნარევის გადაადგილება ხდება ელუენტის ნაკადით.

მეორე სვეტი შეიცავს ძლიერმჟავურ კათიონმიმოცვლელს H^+ ფორმაში და განკუთვნილია ელუენტის ნეიტრალიზაციისთვის, რაც მკვეთრად ამცირებს მის ელექტროგამტარობას. ანიონები, რომელთა $pK < 7$, გადადიან ძლიერ იონიზირებად მჟავებში, რაც უზრუნველყოფს ანიონების მგრძნობიარე კონდუქტომეტრიულ დეტექტირებას შედარებით დაბალი გამტარობის ელუენტის ფონზე.

ქრომატოგრაფიის ამ მეთოდში გამოყენებული ელუენტები უნდა პასუხობდნენ ორ ძირითად მოთხოვნას: მათ უნდა გამოაძევონ ანიონები დამყოფი სვეტიდან და მიმოცვლის რეაქციაში შევიდნენ საკომპენსაციო სვეტში დაბალი გამტარობის მქონე წყლის და სუსტად დისოცირებადი ნაერთების წარმოქმნით.

ანიონების დაყოფისთვის ასეთი ელუენტებია ნატრიუმის ტეტრაბორატი, ნატრიუმის ჰიდროქსიდი, ნატრიუმის ბიკარბონატი და კარბონატი.

ნატრიუმის ჰიდროქსიდის შემცველი ელუენტი ფონური სიგნალის კომპენსაციის თვალსაზრისით იდეალურად ითვლება, მაგრამ, მისი ნაკლია დაბალი



ნახ.3.16. კათიონების და ანიონების დასაყოფი ხელსაწყო ბლოკ-სქემა (ქრომატოგრაფიული სისტემა Dionex)

მსგავსება დამყოფი ფისის მიმართ, რაც განაპირობებს მხოლოდ სუსტად შეკავებული ანიონების გამოძევებას სვეტიდან. ზოგჯერ იყენებენ ნატრიუმის კარბონატის და დიკარბონატის ნარევის. ანიონების დაყოფის მაღალი ხარისხი მიიღწევა ნატრიუმის ჰიდროქსიდის და ფენოქსიდის ნარევის გამოყენებით. ნატრიუმის ფენოქსიდი ხასიათდება ანიონების გამოძევების დიდი უნარით და მისი ელექტროგამტარობა მკვეთრად ეცემა საკომპენსაციო სვეტში მისი ფენოლად კონვერსიის შემდეგ.

გამყოფ სვეტში, უძრავი ფაზის სახის დაბალი ტევადობის, ზედაპირულ-ფენოვანი სტრუქტურის მქონე სინთეზური ფისების გამოყენება, საშუალებას გვაძლევს დავყოთ სხვადასხვა ანიონები შედარებით განზავებული ელუენტის გარემოში.

იონური ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში გამოიყენება კონდუქტომეტრიული დეტექტორები, რომლებიც ზომავენ ხსნარის ელექტროგამტარობას, მის წინა-ღობას ელექტროდებს შორის ელექტროლიზის არარსებობის პირობებში, რე-

აგირებენ ყველა იონზე და ინერტულები არიან მოლეკულურ მდგომარეობაში მყოფი ნივთიერებების მიმართ (წყალი, ეთანოლი ან სუსტი მჟავების არადისოცირებული მოლეკულები). ეს დეტექტორები ხასიათდებიან მაღალი მგრძნობიარობით და ნივთიერების რაოდენობებს საზღვრავენ რამდენიმე პიკოეკვივალენტის დონეზე.

ცხრილში 3.6. მოცემულია ის ანიონები, რომლებიც შეიძლება განისაზღვროს იონური ქრომატოგრაფიის საშუალებით [25].

ცხრილი 3.6.

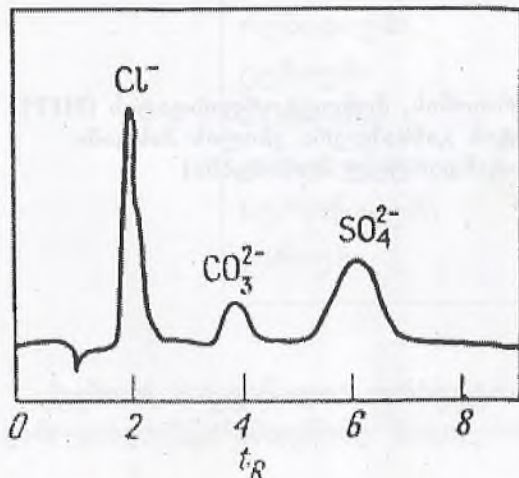
იონური ქრომატოგრაფიის მეთოდით განსაზღვრული ანიონები

ანიონები		ანიონები	
არაორგანული	ორგანული	არაორგანული	ორგანული
აზიდი	ადიპინატი	სულფატი	მეთაკრილატი
არსენატი	აკრილატი	სულფიტი	მეთილამინოაცეტატი
ბორატი	ასკორბატი	თიოსულფატი	მეთილფოსფონატი
ბრომატი	აცეტატი	თიოციანატი	ოქსალატი
ბრომიდი	ბენზოატი	ფტორიდი	ოქსიბუტირატი
ჰიპოქლორიტი	ბუტილფოსფატი	ქლორიდი	ოქსიციტრატი
დიტიონატი	ბუტილფოსფონატი	ქლორატი	პროპიონატი
იოდატი	ბუტირატი	ქრომატი	სუკცინატი
იოდიდი	გიპურატი		ტარტრატი
კარბონატი	გლიკოლატი		ფორმატი
ნიტრატი	გლუკონატი		ფტალატი
ორთოფოსფატი	იტაკონატი		ფუმარატი
პერიოდატი	ლაკტატი		ქლორაცეტატი
რენატი	მალეატი		ციტრატი
სელენატი	მალონატი		

შეუძლებელია ყველა ზემოთ მოყვანილი იონების ერთდროულად დაყოფა, მაგრამ რეალურ ხსნარებში ყველა ეს იონები ერთად არც არსებობენ.

ქვემოთ მოყვანილია ამ მეთოდის პრაქტიკული გამოყენების ზოგიერთი მაგალითი:

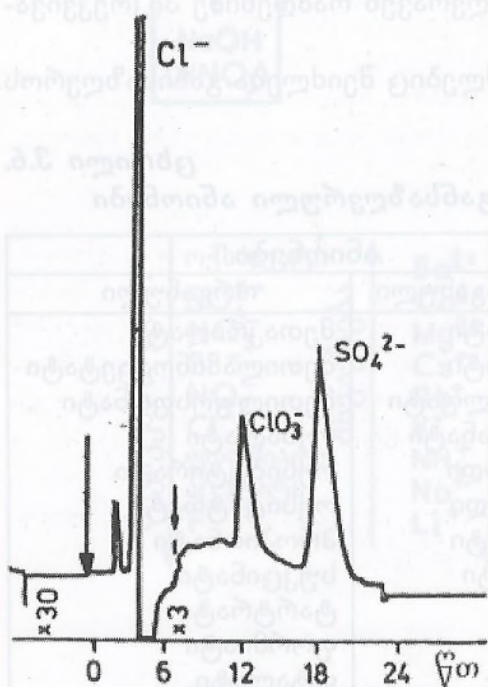
1). მდინარის წყალში არსებული ანიონების დაყოფა [26].



ნახ.3.17. ანიონების განსაზღვრა მდინარის წყალში

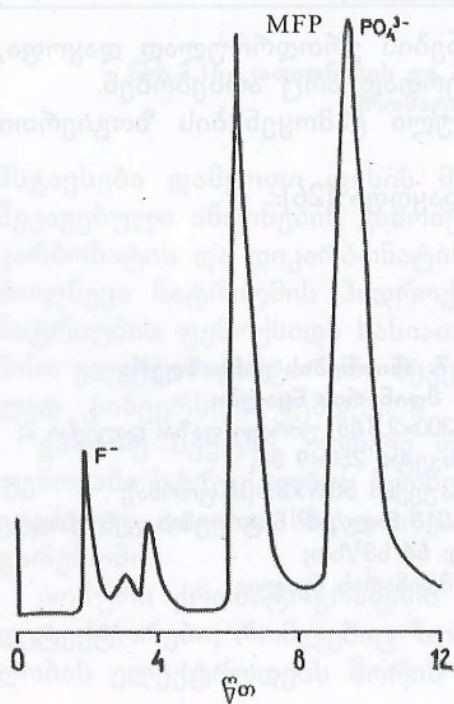
გამყოფი სვეტი: 300×2.8 მმ; უძრავი ფაზა: დაუექსი 2;
საკომპენსაციო სვეტი: 250×9 მმ;
უძრავი ფაზა: დაუექსი 50W×8; (H-ფორმა);
მოძრავი ფაზა: 0.015 მოლ/დმ³ ნატრიუმის ფენოქსიდი;
ნაკადის სიჩქარე: 64 სმ³/სთ;
სინჯი: 0.01 მლ მდინარის წყალი

2) იონური ქრომატოგრაფიის საშუალებით განისაზღვრა ქლორიონის, ქლორატის და სულფატის მცირე რაოდენობები კაუსტიკური სოდის ნაჯერ ხსნარში.



ნახ.3.18. ქლორ-იონის, ქლორატის და სულფატის განსაზღვრა

3). ამავე მეთოდის საშუალებით განისაზღვრა ფტორის იონები კბილის პასტაში.



ნახ.3.19. ფტორ-იონის, მონოფტორფოსფატის (MFP) და ფოსფატის განსაზღვრა კბილის პასტაში (სტანდარტულ პირობებში)

II. კონდუქტომეტრიული კათიონური ქრომატოგრაფია ორი სვეტით. კათიონების განსაზღვრა იმავე სისტემით ხდება, როგორც ანიონების (ნახ.3.16.). გამყოფი და საკომპენსაციო სვეტი შესაბამისად შევსებულია მცირე ტევადობის სტიროლ-დივინილბენზოლის თანაპოლიმერის ბაზაზე მიღებული ფისით (სულფოფგუფებით მის ზედაპირზე) და მაღალი ტევადობის მქონე ძლიერფუძე ანიონმიმოცვლითი ფისით.

გამყოფ სვეტში მჟავური ხსნარით დაყოფის შემდეგ კათიონებს ანეიტრალუბენ საკომპენსაციო სვეტში, რის გამოც ფონური გამტარობა ძლიერ ეცემა. დაყოფილი კათიონები გადადიან შესაბამის ჰიდროოქსიდებში, რაც საშუალებას იძლევა განხორციელდეს კონდუქტომეტრიული დეტექტირება.

ასეთ პირობებში ელუენტის როლი კათიონურ და ანიონურ ქრომატოგრაფიაში იდენტურია.

ორმუხტიანი კათიონები (ტუტე მინათა და გარდამავალი მეტალები) უფრო ძლიერად შეკავდება კათიონმიმოცვლელ ფისებზე და მათი გამორეცხვა ერთმუხტიანი იონების დაყოფისთვის გამოყენებული ელუენტებით შეუძლებელია. ამ კათიონების დაყოფისთვის გამოიყენება ფენილენდიამონიუმის ქლორიდის განზავებული ხსნარი.

ცხრილში 3.7. მოყვანილია ის კათიონები, რომელთა განსაზღვრაც შესაძლებელია ორსვეტიანი იონური ქრომატოგრაფიით [25].

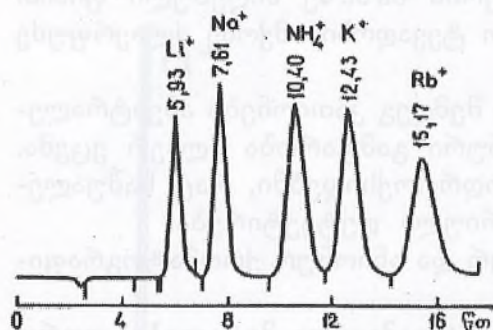
ცხრილი 3.7.

ორსვეტიანი იონური ქრომატოგრაფიის მეთოდით განსაზღვრული კათიონები

არაორგანული	ორგანული
ლითიუმი	მეთილამინი
ნატრიუმი	დიმეთილამინი
ამონიუმი	ტრიმეთილამინი
კალიუმი	ეთილამინი
რუბიდიუმი	დიეთილამინი
ცეზიუმი	ტრიეთილამინი
მაგნიუმი	n-ბუთილამინი
კალციუმი	ტეტრამეთილამონიუმი
სტრონციუმი	
ბარიუმი	

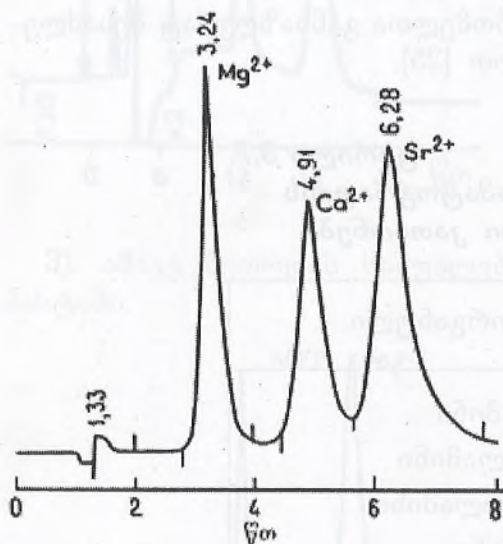
ქვემოთ მოყვანილია ორსვეტიანი იონური ქრომატოგრაფიის პრაქტიკული გამოყენების რამდენიმე მაგალითი.

1) ერთმუხტიანი კათიონები დამაკმაყოფილებლად იყოფიან აზოტმჟავას ან ქლორწყალბადმჟავას განზავებული ხსნარით [25].



ნახ.3.20. ლითიუმის, ნატრიუმის, ამონიუმის, კალიუმის, რუბიდიუმის განსაზღვრა

2) ორმუხტიანი კათიონები ეფექტურად იყოფიან განზავებული მარილმჟავა ან აზოტმჟავას ხსნარით, ფენილენდიამინის ნარევეში.



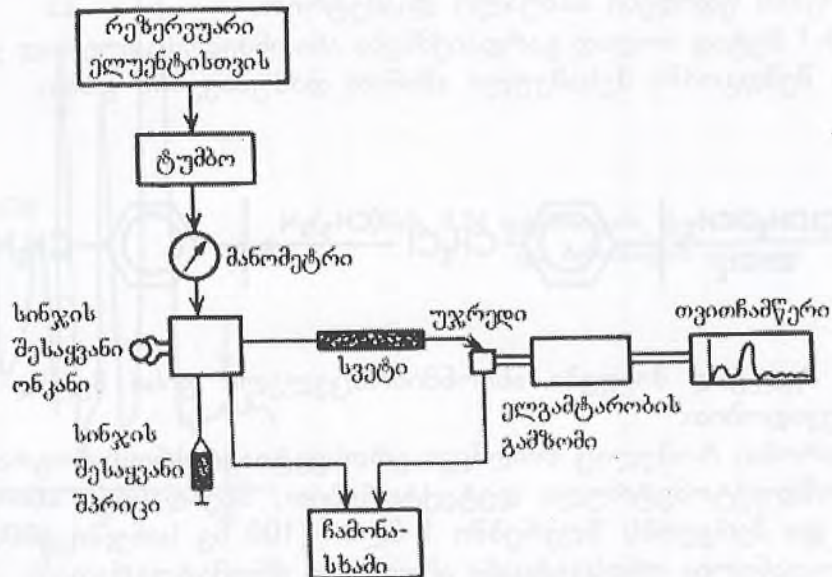
ნახ.3.21. მაგნიუმის, კალციუმის და სტრონციუმის განსაზღვრა

3) მინერალური სასუქების მწარმოებელი ქარხნების ჩამონადენში განისაზღვრა ნატრიუმი, ამონიუმი და კალიუმი 0.005 M აზოტმჟავის საშუალებით, ხოლო კალციუმი და მაგნიუმი 0.001 M ფენილენდიამონიუმის ქლორიდით. ანალიზის მეორე სტადიაზე აუცილებელია დეტექტორის მგრძნობიარობის შეცვლა, რაც უზრუნველყოფს მაგნიუმის და კალციუმის იონების ერთდროულ განსაზღვრას.

III. ერთმუხტიანი კონდუქტომეტრიული ანიონური ქრომატოგრაფია. ანიონები შეიძლება დაიყოს ერთ ქრომატოგრაფიულ სვეტზე და მოხდეს მათი რეგისტრაცია ელექტროგამტარობის დეტექტორით, თუ გამოვიყენებთ მცირე ტევადობის მქონე ანიონმიმომცველ ფისს და დაბალი ელექტროგამტარობის მქონე ელუენტს. ასეთ შემთხვევაში აღარ არის საჭირო მეორე სვეტის გამო-

ყენება ელუენტის ფონური გამტარობის „კომპენსაციისთვის“. უმეტესი ანიონებისთვის ერთსვეტიანი მეთოდი ხასიათდება მაღალი მგრძნობიარობით და კარგი დაყოფისუნარიანობით.

ამგვარ სისტემაში დამყოფი სვეტი უშუალოდ შეერთებულია ელექტროგამტარობის დეტექტორთან (ნახ. 3.22.).



ნახ.3.22. ერთსვეტიანი იონური ქრომატოგრაფის ბლოკ-სქემა

ყოველივე ეს უზრუნველყოფს ანიონების მეტად სწრაფ დაყოფას. საკომპენსაციო სვეტის უქონლობა ანალიზის განხორციელებას ხელს არ უშლის.

ქრომატოგრაფირების ამ მეთოდისთვის საჭიროა ელუენტის გულდასმით შერჩევა. კარგი ელუენტი უნდა შეიცავდეს არომატულ რადიკალს, რომელსაც გააჩნია მოცემულ ანიონმიმომცველ ფისზე მაღალი სელექტიურობის კოეფიციენტი. ასეთი კათიონები ელუენტში შეიძლება იყოს ნატრიუმის, კალიუმის, ამონიუმის და წყალბადის. ელუენტის pH იმგვარად ირჩევა, რომ მარილები მთლიანად დისოცირდნენ.

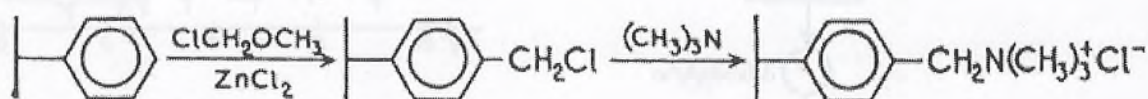
საუკეთესო ელუენტებია ნატრიუმის ან კალიუმის ბენზოატები, ფტალატები და სულფობენზოატები. ეს მსხვილი ორგანული ანიონები ნაკლები ძვრადობით ხასიათდებიან, ვიდრე უმეტესი არაორგანული ანიონები და მათთვის დამახასიათებელია ნაკლებ ეკვივალენტური ელექტროგამტარობა. მაგალითად, ბენზოატის იონის ეკვივალენტური ელექტროგამტარობა შეადგენს 32 ომი⁻¹ სმ² ექვ⁻¹, მაშინ, როდესაც ქლორიდის, სულფატის და სხვა ანიონებისთვის ეს სიდიდე 70 ომი⁻¹ სმ² ექვ⁻¹-ზე მეტია. სწორედ ამგვარი სხვაობაა აუცილებელი ელექტროგამტარობის დეტექტორით ანიონური ქრომატოგრაფიის წარმატებით ჩატარებისთვის.

ზემოთ მოყვანილი ელუენტები ეფექტურია ბევრი არაორგანული და ზოგიერთი ორგანული ანიონების დასაყოფად, მაგრამ არ გამოდგება ძლიერ სუსტი

მჟავების დაყოფისა და ანალიზისთვის (მაგალითად; ციანიდი, ბორატი, არსენიტი და სილიკატი). ასეთი ანიონების დაყოფისა და განსაზღვრისთვის ელუენტის სახით ხმარობენ ნატრიუმის ჰიდროქსიდს.

დამყოფ სვეტს ავსებენ სტიროლის და დივინილბენზოლის ბაზაზე დამზადებული სინთეზური ფისებით. ეფექტური ფისები იონური ქრომატოგრაფისთვის მიიღება XAD-1 ბაზაზე, ($100\text{მ}^2/\text{გ}^{-1}$) უმცირესი ხვედრითი ზედაპირით და ($250\text{ \AA}$) ფორების უდიდესი საშუალო დიამეტრით.

ფისი XAD-1 მეტად იოლად გარდაიქმნება ანიონმიმომცველად ქლორმეთილირების და შემდგომში მესამეული ამინით დამუშავების გზით.

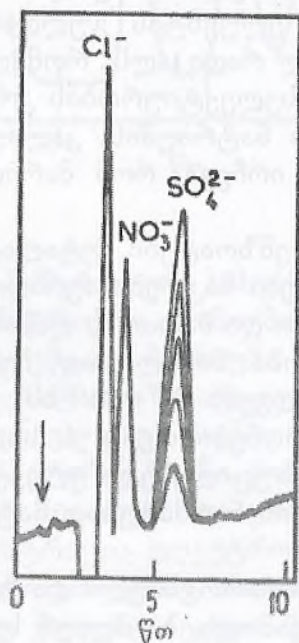


რეაქციის შედეგად მიიღება ანიონმიმომცველი ფისი მეტად მცირე მიმოცვლის ტევადობით.

მგრძნობიარობა, რომელიც მიიღწევა ერთსვეტიანი ქრომატოგრაფირებისას შემდგომი კონდუქტომეტრული დეტექტირებით, სხვადასხვა ანიონებისთვის სხვადასხვაა და მერყეობს ზღვრებში 1 მლმ^{-1} (100 ნგ სინჯში 100მკლ).

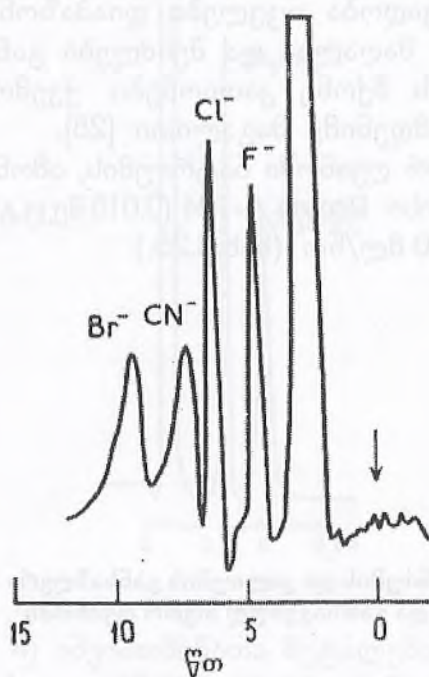
ქვემოთ მოყვანილია ერთსვეტიანი ანიონური ქრომატოგრაფიის პრაქტიკული გამოყენების რამდენიმე მაგალითი [25].

1) სასმელ წყალში ქლორიდის, ნიტრატის და სულფატის შემცველობის განსაზღვრა XAD-1 ფისით შევსებულ 50 სმ სიგრძის სვეტზე; ელუენტი: $5.0 \times 10^{-4}\text{M}$ კალიუმის ფტალატი, $\text{pH}-6.2$ (ნახ.3.23)



ნახ.3.23. სულფატის, ქლორიდისა და ნიტრატის სტანდარტული ხსნარის ანალიზი

2) XAD-1 ფისის ($0.023 \text{ მეკვ.გ}^{-1}$, 20-25 მკმ) გამოყენებით შეიძლება დაიყოს ფტორიდი, ქლორიდი, ციანიდი და ბრომიდი. ელუენტი- $1.0 \times 10^{-3} \text{M}$ ნატრიუმის ჰიდროქსიდი [25].



ნახ. 3.24 ფტორიდის, ქლორიდის, ციანიდის და ბრომიდის დაყოფა

IV. ერთსვეტიანი კონდუქტომეტრიული კათიონური ქრომატოგრაფია. დაბალი ტევადობის მქონე იონმიმოცვლითი ფისით შევსებულ სვეტზე შეიძლება დაიყოს მეტალების და ამინების კათიონები, შემდეგ კი მოხდეს მათი რეგისტრირება ელექტროგამტარობის დეტექტორით, რომელიც უშუალოდაა მიერთებული სვეტთან (ანალოგიურად ანიონური ქრომატოგრაფირებისას ერთ სვეტზე).

ტუტე მეტალების და ამონიუმის იონების დაყოფისას ეფექტური ელუენტებია წყალბადის იონის შემცველი ელუენტები, მაგალითად, აზოტმჟავის და ქლორმჟავის განზავებული ხსნარი. მჟავე ელუენტები არ უნდა შეიცავდნენ ორვალენტიანი მეტალების იონებს, რომლებიც შეიძლება დაგროვდეს ფისზე და მოწამლოს იგი.

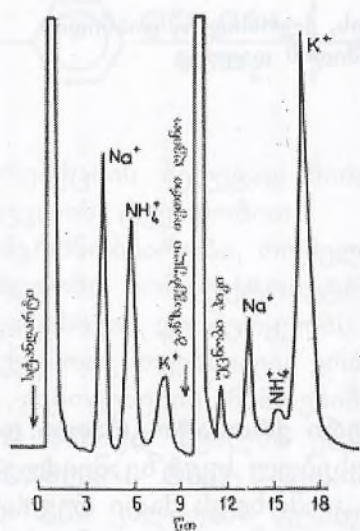
ტუტე მინათა მეტალების კათიონების დასაყოფად საუკეთესო შედეგები მიიღება ელუენტად ეთილენდიამონიუმის ნიტრატის გამოყენებით. თუთიის, კობალტის, მანგანუმის, კადმიუმის, ტყვიის და სტრონციუმის კათიონების დაყოფა შეიძლება განხორციელდეს როდესაც ეთილენდიამონიუმის კათიონის შემცველ ელუენტში შეჰყავთ კომპლექსნარმოქმნელი ანიონი, მაგალითად ტარტრატის ან α -ოქსიზობუტირატის.

ამგვარი ელუენტის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ იშვიათმინათა მეტალების იონების დაყოფა. მათი ფონური გამტარობა დაბალია, რაც დადებითად მოქმედებს დეტექტორის მგრძნობიარობაზე.

საანალიზო ნარევის კომპონენტების ელუირებისას ელექტროგამტარობა მცირდება, ამიტომ ქრომატოგრამაზე შესაბამისი კომპონენტების პიკები უარყოფითია.

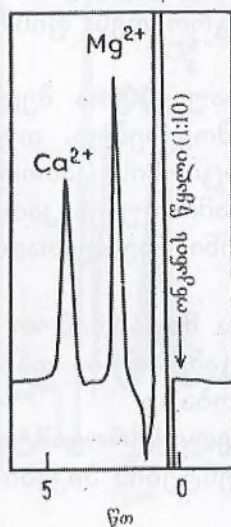
უკეთესი შედეგების მიღება შესაძლებელია სუსტად სულფირებული ფისით შევსებულ სვეტზე. პოლისტიროლის სფერული ნაწილაკების 4%-იანი დივინილბენზოლით (20 მკმ) სულფირებით მიიღება დაყოფის საუკეთესო მახასიათებლების მქონე ფისი. ასეთი ფისების ტევადობა იცვლება დიაპაზონში 0.017-0.06 მეკვ გ⁻¹. ამ მეთოდის მგრძნობიარობა მაღალია და შეიძლება განისაზღვროს 1 მლმ⁻¹-ზე ნაკლები კონცენტრაციის მქონე კათიონები. ქვემოთ მოყვანილია მისი პრაქტიკული გამოყენების რამდენიმე მაგალითი [25].

1) სტანდარტულ ხსნარში და განზავებულ თეთრ ღვინოში ნატრიუმის, ამონიუმის და კალიუმის განსაზღვრა. სვეტი: 350×2 მმ. ფისი: Benson A-104 (0.015 მეკვ.გ⁻¹). ელუენტი: 1.5×10⁻³M HNO₃. ნაკადის სიჩქარე 1.0 მლ/წთ (ნახ.3.25.).



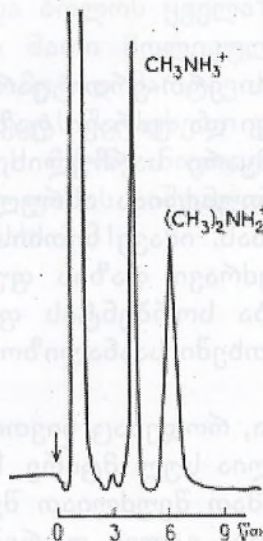
ნახ.3.25. ნატრიუმის, ამონიუმის და კალიუმის განსაზღვრა სტანდარტულ ხსნარში და განზავებულ თეთრ ღვინოში

2) 340×2 მმ ზომის BN-X4 (0.017 მეკვ.გ⁻¹) ფისით შევსებულ სვეტზე მაგნიუმის და კალციუმის რაოდენობის განსაზღვრა ონკანის წყალში. ელუენტი: 1.0×10⁻³M ეთილენდიამონიუმის ნიტრატი. ნაკადის სიჩქარე: 1.0 მლ/წთ (ნახ.3.26.).



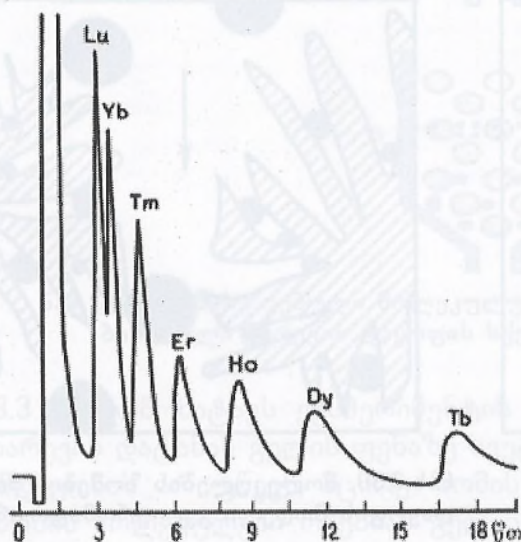
ნახ.3.26. მაგნიუმის და კალციუმის განსაზღვრა ონკანის წყალში.

3) მეთილამინის და დიმეთილამინის დაყოფა შესრულდა 350x2 მმ ზომის სვეტზე. შემავსებელი Benson A-104 (0.015 მეკვ.გ⁻¹); ელუენტი-1.5x10⁻³M HNO₃. ნაკადის სიჩქარე 1.0 მლ/წთ (ნახ.3.27).



ნახ.3.27. მეთილამინის და დიმეთილამინის დაყოფა

4) იშვიათმიწათა მეტალების იონები იყოფა 350x2 მმ ზომის სვეტზე. შემავსებელი: 20 მკმ ზომის ნაწილაკების მქონე 0.059 მეკვ.გ⁻¹ ტევადობის ფისი. ელუენტი: 4x10⁻³M ეთილამინი - 3x10⁻³M α-ოქსიიზოერბოჟაჟა, pH-4.5 [25].



ნახ.3.28. იშვიათმიწათა მეტალების იონების დაყოფა

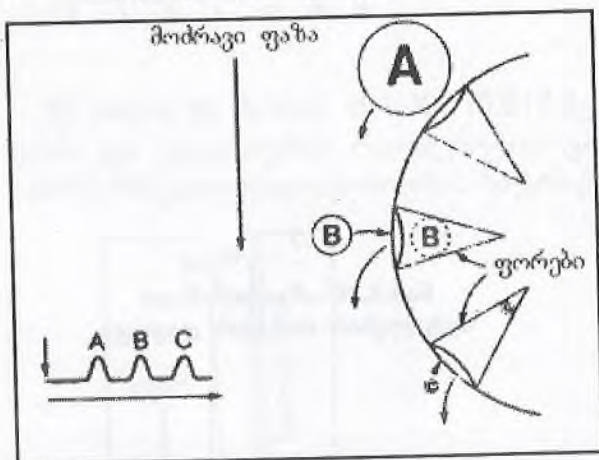
თავი 3.5. გელ-ქრომატოგრაფია

3.5.1 ზოგადი მიმოხილვა

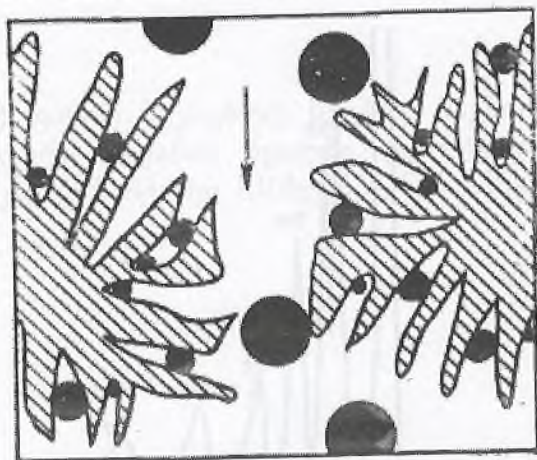
გელ-ქრომატოგრაფია* თხევადი ქრომატოგრაფიის ერთ-ერთი ვარიანტია. მეთოდის თავისებურებაა ის გარემოება, რომ მოძრავი და უძრავი ფაზა ერთი და იგივე სითხეა. სითხის ის ნაწილი, რომელიც მყარი საჩურის, გელის მარცვლების გასწვრივ გაედინება, მოძრავი ფაზის ფუნქციას ასრულებს და ახდენს საანალიზო ნარევის კომპონენტების გადატანას. იმავე სითხის მეორე ნაწილი ავსებს გელის მარცვლების ფორებს და უძრავი ფაზის ფუნქციას ასრულებს. ნარევის დაყოფის პროცესი კი ხდება სორბენტის ფორების შიგნით მყოფ და მის ნაწილაკებს შორის გამავალ სითხეში საანალიზო ნივთიერების მოლეკულების განაწილების შესაბამისად.

საანალიზო ნარევის დაყოფა იმ შემთხვევაში ხდება, როდესაც ნივთიერების მოლეკულების ზომები ერთმანეთისგან განსხვავებულია სულ მცირე 10%-ით, ხოლო გელის ფორების დიამეტრები ერთნაირია და მათ შეუძლიათ შეაკავონ მხოლოდ ის მოლეკულები, რომელთა ზომები ნაკლებია გელის ფორების დიამეტრზე. საანალიზო ნარევის გელის ფორებში ფილტრირებისას, უფრო მცირე ზომის მოლეკულები შეაღწევენ მის ფორებში, ყოვნდებიან იქ მყოფ სითხეში და საბოლოოდ მოძრაობენ გელის გასწვრივ უფრო ნელა, ვიდრე დიდი ზომის მოლეკულები, რომელთაც ეს უნარი არა აქვთ [3].

საანალიზო ნარევის შემადგენელი მოლეკულების გელის ფორებში მიგრაციის საილუსტრაციოდ შეგვიძლია გამოვიყენოთ ნახ.3.29. და ნახ.3.30. ნახ.3.29-ზე



ნახ.3.29. გელის ფორებში მოლეკულების მიგრაციის სქემა



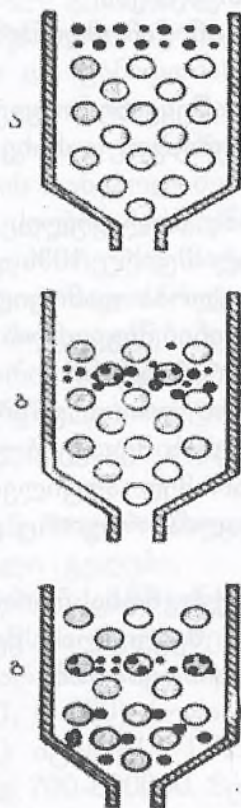
ნახ.3.30. მოლეკულების ზომების მიხედვით დაყოფის მოდელი გელ-ქრომატოგრაფიაში.

ფორები კონუსის ფორმითაა წარმოდგენილი. ვთქვათ, ნარევი შედგება A,B,C მოლეკულებისგან. სურათზე ყველაზე დიდი A მოლეკულა ვერ შედის ფორებში, B-ს შეუძლია მხოლოდ ნაწილობრივ და C-ს კი მთლიანად შესვლა. იმის გამო,

* მას სხვაგვარად საცრისებურ ქრომატოგრაფიას უწოდებენ

რომ გელ-ქრომატოგრაფიაში ადსორბციული ურთიერთქმედება უძრავ ფაზასთან გამორიცხულია (მისი სწორი შერჩევისას), მოლეკულების ელუირება ხდება A,B,C თანმიმდევრობით. კერძოდ, ჯერ ელუირდება ყველაზე დიდი მოლეკულა და ბოლოს ყველაზე პატარა, ე.ი. შეგვიძლია ნივთიერებების ნარევი დავყოთ მათი მოლეკულური ზომების და მასების შესაბამისად. დაყოფის მეთოდი მეტად მარტივია და სწრაფი.

თუ სვეტს შევავსებთ გელის მარცვლებით და მასში სხვადასხვა მოლეკულური მასის მქონე ნივთიერებების ნარევს ჩავასხამთ, მაშინ ფენის გასწვრივ მოძრავი ფაზის საშუალებით მათი გადაადგილებისას მოხდება ამ ნარევის დაყოფა (ნახ. 3.31.).



ნახ. 3.31. განსხვავებული მოლეკულური მასის მქონე ნივთიერებების ბინარული ნარევის დაყოფის სქემა გელ-ქრომატოგრაფიაში

ნახ.3.31.(ა) გამოხატავს ექსპერიმენტის დასაწყისს — საანალიზო ნივთიერებების ნარევის დატანას გელის ფენაზე სვეტში. (ბ) ასახავს მეორე ეტაპს — გელი წინააღმდეგობას არ უწევს მცირე ზომის მოლეკულების დიფუზიას ფორებში; დიდი ზომის მოლეკულები რჩებიან გელის მარცვლების გარშემო მყოფ ხსნარში და რადგან არ არსებობს მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედებები საანალიზო ნივთიერებასა და მოძრავ ფაზას შორის, ისინი იწყებენ გამხსნელის მოძრაობის სიჩქარით გადაადგილებას. მცირე ზომის მოლეკულები ჯერ უნდა გამოვიდნენ შიგა ფორებიდან მარცვლებს შორის მოცულობაში, რის გამო ისინი შეყოვნდებიან და მოგვიანებით გამოირეცხებიან სვეტიდან (გ) [3,22].

აღნიშნული მეთოდი გამოიყენება მაშინაც, როდესაც დასაყოფი ნარევის კომპონენტების ზომები მცირედ განსხვავდებიან ერთმანეთისგან. ამისთვის საჭიროა ისეთი გელის შერჩევა, რომლის ფორებიც ხელმისაწვდომია ნარევის ყველა მოლეკულისთვის. ხოლო როდესაც საანალიზო ნარევის მოლეკულებს ერთნაირი მოლეკულური მასები აქვთ, დაყოფას საფუძვლად უდევს მათი განსხვავებული ურთიერთქმედება გელთან. განასხვავებენ ორი სახის ურთიერთქმედებას [3,27]:

- კულონის ურთიერთქმედება, საანალიზო ნარევის დამუხტულ მოლეკულებს და გელის ჩონჩხში არსებულ იონოგენურ ჯგუფებს შორის;
- ნივთიერებასა და გაჯირჯებულ გელს შორის დისპერსიული ძალებით გამოწვეული ურთიერთქმედება.

ყოველივე ზემოთ ნათქვამიდან გამომდინარე შეგვიძლია გავაკეთოთ რამდენიმე დასკვნა:

1. ქრომატოგრაფიულ სვეტში შეყვანილი ყველა მოლეკულა ელუირდება და ქრომატოგრაფიის სხვა მეთოდებისგან განსხვავებით არც ერთი მოლეკულა სვეტში არ რჩება.
2. ორი განსხვავებული ტიპის მოლეკულის დასაყოფად მათ მოლეკულურ წონებს შორის განსხვავება სულ მცირე 10% უნდა იყოს.
3. ელუირების დრო ან მოცულობა დამოკიდებულია მხოლოდ მოლეკულის ზომასა და მასაზე. ამიტომ ისინი შეგვიძლია გამოვიყენოთ ნივთიერებების მოლეკულური წონის განსაზღვრისათვის.
4. ადგილი არა აქვს შეკავების დროის გაზრდის გამო პიკის წარეცხვას.
5. იმის გამო, რომ მოლეკულების შეკავება უმოძრაოდ მყოფ მოძრავ ფაზაში არა მარტო სასურველია, არამედ აუცილებელიც. მიღებული თეორიული თეფშების რიცხვი არც ისე მაღალია, როგორც ქრომატოგრაფიის სხვა ვარიანტებში.
6. რადგან სვეტში არა გვაქვს წონასწორული მდგომარეობა, არ ხდება სვეტის გადატვირთვა, ამიტომ შეგვიძლია მასში შევიყვანოთ და დავყოთ შედარებით დიდი მოცულობის სინჯები [28].

3.5.2 ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული გელების ზოგადი მიმოხილვა

ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში გამოიყენება სხვადასხვა ბუნების და თვისებების მქონე გელები, რომლებიც გარკვეულ კლასიფიკაციას ექვემდებარებიან.

განასხვავებენ გელების შემდეგ სახეებს: რბილი, ნახევრადხისტი და ხისტი. თითოეული მათგანი შეიძლება იყოს ჰიდროფილური ან ჰიდროფობური. გელების ამგვარი კლასიფიკაცია საშუალებას იძლევა შევარჩიოთ კონკრეტული სამუშაო პირობებისთვის უფრო მისაღები გელი.

რბილი გელი. ამ ტიპის გელები მაღალმოლეკულური ორგანული ნაერთებია. მათ უნარი აქვთ შთანთქან დიდი რაოდენობით გამხსნელი, რის გამოც ადვი-

ლად ჯირჯვდებიან და ზრდიან საკუთარ მოცულობას. გელების ფორიანობა იზრდება შთანთქმული გამხსნელის მოცულობის შესაბამისად. ამის შედეგად რბილი გელების მოცულობა მცირდება, ხოლო თვით გელი განიცდის დეფორმაციას. რბილ გელებს იყენებენ დაბალმოლეკულური ნივთიერებების ნარეგების დასაყოფად, ნაკადის გადაადგილების დაბალი სიჩქარის დროს.

ჰიდროფილურ რბილ გელს მიეკუთვნება სეფადექსები, აგაროზული გელები, პოლიაკრილამიდური გელები და სახამებელი.

ორგანულ გამხსნელებთან მუშაობისას იყენებენ ლიპოფილურ სეფადექსს. ასეთ გელებზე ქრომატოგრაფიულ პროცესს ზოგჯერ გელ-ფილტრაციულ პროცესებს უწოდებენ.

ნახევრადხისტი გელები. რბილი გელებისგან განსხვავებით მათი მოცულობა გაჯირჯვების შედეგად უმნიშვნელოდ იზრდება 1.1-1.8-ჯერ. ისინი ადვილად უძლებენ წნევის ზემოქმედებას და განიცდიან დეფორმაციას.

ნახევრადხისტი გელები ჰიდროფობულია. მათ ქიმიური ან ფიზიკური დამუშავებით (სულფირება) იღებენ. განსაკუთრებით ფართო გამოყენება მოიპოვა სტიროლის და დივინილბენზოლის თანაპოლიმერიზაციით მიღებულმა გელებმა, რომლებიც ცნობილია სტიროგელების სახელწოდებით.

ნახევრადხისტ გელებზე მიმდინარე ქრომატოგრაფიული პროცესები ცნობილია გელ-შელწევადი ქრომატოგრაფიის სახელწოდებით.

ხისტი გელები. მათ რიცხვს მიეკუთვნება ფოროვანი სილიკაგელი (პორასილი), ფოროვანი მინა (ერთნაირი ზომების, მაკროფოროვანი სტრუქტურის სილიციუმის ოქსიდით სინთეზირებული). ხისტი გელები ხასიათდებიან ფორების ფიქსირებული ზომებით, რომლებიც არ იცვლებიან არანაირი ზემოქმედების შედეგად [3,22].

ახლა უფრო დეტალურად განვიხილოთ ზოგიერთი ფორმის მიერ გელ-ქრომატოგრაფიისთვის დამზადებული გელები.

სეფადექსი. ერთ-ერთი ფართოდ გამოყენებული გელია ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში. ცნობილია სეფადექსის რვა სახეობა, რომლებიც ერთმანეთისგან განსხვავდებიან გაჯირჯვების ხარისხით და მოლეკულური წონით (G-10, G-15, G-25, G-50, G-75, G-100, G-150, G-200). სეფადექსის ტიპის მიხედვით წყლის მიმართ მათი ტევადობა (მგ/გ) იცვლება $1.0 \pm 0.1 - 20.2 \pm 2$ დიაპაზონში, ხოლო მოლეკულური წონა შესაბამისად 700-800000. მცირე ზომის ბურთულის ფორმის სეფადექსის მარცვლებს ყოფენ რამდენიმე ფრაქციად: განსაკუთრებით წვრილი, წვრილი, საშუალო და უხეში. სეფადექსი მდგრადია ტუტეების და სუსტი მჟავების მიმართ.

სეფადექს G-25-ის ალკილირებით ღებულობენ სეფადექს LH-20. იგი თანაბრად ჯირჯვდება წყალში, ეთანოლში და ქლოროფორმში.

ბიოგელი. პოლიაკრილამიდის გელია. მისი თერთმეტი განსხვავებული ტიპი მზადდება გამხსნელის (წყლის) ტევადობის მიხედვით. ცნობილია ბიოგელის შემდეგი საფორმო სახელწოდებები: P-2, P-4, P-6, P-10, P-30, P-60, P-100, P-230, P-200, P-300. წყლის მიმართ მათი ტევადობა შესაბამისად იზრდება 1.6 მგ/გ ÷ 22.0 მგ/გ. იგი მდგრადია მიკროორგანიზმების მიმართ.

აგაროზა. მისი საშუალებით შეიძლება დაიყოს ვირუსები, უჯრედის ფრაგმენტები, ბაქტერიები, რაც აგაროზას უპირატესი თვისებაა სხვა გელებთან

შედარებით. სხვადასხვა ფორმები ამზადებენ აგაროზას გელებს საფირმო სახელწოდებით: სეფაროზა, ბიოგელი და სხვა.

სტირაგელი. სპეციფიკური გელია, რომელიც მიიღება სტიროლის და დივინილბენზოლის განსაკუთრებულ პირობებში თანაპოლიმერიზაციით. მისი სფერული, 40-80 მკმ დიამეტრის მქონე მარცვლები თითქმის არ ჯირჯვდება. მარცვლების ფორების ზომები გელის ტიპის მიხედვით იცვლება 60-დან 10×10^5 Å-ის დიაპაზონში [22].

3.5.3. გამხსნელების შერჩევა გელ-ქრომატოგრაფიაში

ძირითადი მოთხოვნა გამხსნელის მიმართ, გელ-ქრომატოგრაფიაში, არის მისი უნარი გახსნას ნარევის ყველა კომპონენტი, დაასველოს შერჩეული გელის ზედაპირი და ადსორბირდეს მისი მარცვლების ზედაპირზე. გამხსნელმა აგრეთვე ხელი უნდა შეუწყოს გელების გაჯირჯვებას. იდეალურ შემთხვევაში გამხსნელი, რომელიც ავსებს გელის ფორებს და გელის ნაწილაკებს შორის სივრცეს, ერთნაირად უნდა ურთიერთქმედებდეს საანალიზო ნარევებთან. ასეთ შემთხვევაში ნივთიერების გადაადგილება ფორებში ხდება მხოლოდ დიფუზიის საშუალებით.

მეტად მნიშვნელოვანია აგრეთვე გამხსნელის სიბლანტე, რაც თავის მხრივ მასაგადაცემის სიჩქარეს განსაზღვრავს. განსაკუთრებით დაბალი სიბლანტით უნდა ხასიათდებოდნენ გამხსნელები მაღალმოლეკულური ნაერთების ნარევების დასაყოფად, რომელთათვისაც დამახასიათებელია დიფუზიის კოეფიციენტის დაბალი მნიშვნელობა.

გელ-ქრომატოგრაფიაში ყველაზე ფართოდ გამოყენებულ გამხსნელებს წყლის გარდა წარმოადგენენ N,N' -დიმეთილფორმამიდი, ქლოროფორმი, ოთხ-ქლორნახშირბადი, 1,1,2,2-ტეტრაქლორეთანი, ტოლუოლი, 1,2,4-ტრიქლორბენზოლი, ტეტრაჰიდროფურანი. გამხსნელის შერჩევისას მხედველობაში მიიღება აგრეთვე გამოყენებული დეტექტორი [27].

3.5.4. აპარატურული თავისებურებები

აპარატურული გაფორმების თვალსაზრისით გელ-ქრომატოგრაფია პრინციპულად არ განსხვავდება თხევადი ქრომატოგრაფიის სხვა ვარიანტებისგან და შეიძლება განხორციელდეს ნებისმიერ თხევად ქრომატოგრაფზე. მხოლოდ მეთოდის თავისებურებებიდან გამომდინარე მაინც გასათვალისწინებელია გარკვეული ცვლილებები.

გელ-ქრომატოგრაფიაში განსაკუთრებით დიდი ყურადღება ექცევა მოძრავი ფაზის სტაბილურობას და ამიტომ გამოიყენება ნაკადის მიწოდების მაღალი სიზუსტის მქონე ტუმბოები, არა ნაკლებ 0.3-0.5% ცდომილებით. სპეციალურად გელ-ქრომატოგრაფიისთვის დამუშავებული ტუმბოებისთვის ცდომილება ნაკადის მიწოდების სიჩქარეში დაყვანილია 0.1%-ზე.

ზოგჯერ გელ-ქრომატოგრაფიის მონაცემების სიზუსტე (მაგ. პოლიმერების დაყოფისთვის) დამოკიდებულია ტემპერატურაზე. 10°C -ით ცვლილებისას საშუალო მოლეკულური მასის განსაზღვრის ცდომილება იცვლება $\pm 10\%$. ამის გამო აუცილებელია დამყოფი სისტემის აღჭურვა თერმოსტატით.

გელ-ქრომატოგრაფიაში ფართოდ გამოყენებული დეტექტორია დიფერენციალური რეფრაქტომეტრი [3,7,22].

3.5.5. გელ-ქრომატოგრაფიის პრაქტიკული გამოყენების მაგალითები

1. სეფადექს G-10-ით შევსებულ 1.3×102 სმ ზომის სვეტზე განხორციელდა პოლიეთილენგლიკოლების ფრაქციონირება. ელუენტად გამოიყენება 0.05 M ფოსფორის ბუფერი ($\text{pH}=7.0$), ელუირების სიჩქარე – 6 მლ/წთ. ქრომატოგრაფიული სვეტიდან პირველი გამოდის პოლიეთილენგლიკოლი (საშუალო მოლეკულური წონა 600), შემდეგ თანმიმდევრობით: ტეტრაეთილენგლიკოლი (მოლ. წონა 194), ტრიეთილენგლიკოლი (მოლ. წონა 150), დიეთილენგლიკოლი (მოლ. წონა 106) და ბოლოს ეთილენგლიკოლი (მოლ. წონა 62).

2. სეფადექს LH-20-ის გამოყენებით 2.5×35 სმ ზომის სვეტზე იყოფა ერთი და იგივე ჰომოლოგიური რიგის დაბალმოლეკულური ნივთიერებები, მათი მოლეკულური წონების შესაბამისად. სვეტში შეჰყავთ 2 მლ ცხიმოვანი მჟავების ტრიგლიცერიდების ნარევის 0.2% -იანი ხსნარი. სვეტიდან გამოსვლის თანმიმდევრობა შემდეგია: ტრისტეარინი (მოლ. წონა 891), ტრიკაპრინი (მოლ. წონა 555), ტრიბუტირინი მოლ. წონა 302) და ტრიაცეტინი (მოლ. წონა 218). გლიცერიდები თავისუფალი ჰიდროქსილის ჯგუფებით ურთიერთქმედებენ გელთან, რაც იწვევს მათ ძლიერ შეკავებას სვეტში. ამის გამო დიპალმიტინი (მოლ. წონა 509) და განსაკუთრებით მონოსტეარინი (მოლ. წონა 359) გამოდიან გაცილებით გვიან, ვიდრე ეს სავარაუდო იყო მათი მოლეკულური წონებიდან გამომდინარე.

3. სეფადექს G-75-ის სვეტზე (2×24 სმ) კარგად იყოფა კუჭქვეშა ჯირკვლის ფერმენტები. ელუირებას ახდენენ 0.05 M ნატრიუმის აცეტატის ბუფერით. ქრომატოგრამაზე პირველი პიკი შეესაბამება ლიპაზას, მეორე რიბონუკლეაზას, მესამე ტრიპსინოგენს და ქიმოტრიპსინოგენს, მეოთხე ამილაზას.

4. გელ-ქრომატოგრაფიის საშუალებით შეიძლება მივიღოთ სრულიად სუფთა ჰემოგლობინი 2.0×52 სმ ზომის სეფადექს G-100-ით შევსებულ სვეტზე. ელუირების სიჩქარეა 40 მლ/სთ. სვეტში შეჰყავთ 3 მლ ლიზატი და ქრომატოგრაფიისას ჰემოგლობინი ელუირდება ალდოლაზას, კატალაზას და ლაკტატდეჰიდროგენაზას შემდეგ. ელუენტი: 0.1 M NaCl .

5. განსაკუთრებით ეფექტურია გელ-ქრომატოგრაფია ვირუსების დასაყოფად ძლიერ ფოროვან აგარაზე. მასზე დაყოფილი იქნა I-ტიპის პოლიომიელიტის ვირუსის (მოლ.წონა 6.8×10^6) და გრიპის A ტიპის ვირუსების (მოლ.წონა 1.7×10^8) ნარევი მოლეკულური წონების შესაბამისად. პირველი ელუირდება გრიპის ვირუსი და შემდეგ პოლიომიელიტის ვირუსი.

ექსპერიმენტისთვის გელის შერჩევისას სასურველია ისეთი გელის გამოყენება, რომლის ფორებშიც ვერ შეაღწევს საანალიზო ნარევის მხოლოდ ერთი

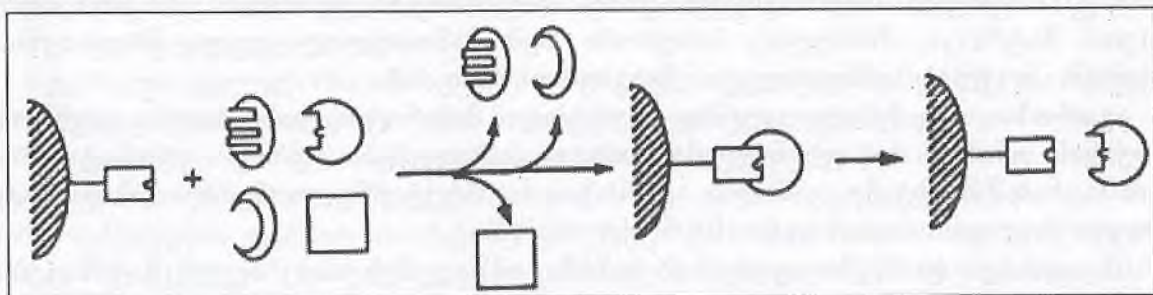
კომპონენტი. თუ კომპონენტები მოლეკულური წონის მიხედვით ძლიერ განსხვავდებიან ერთმანეთისგან, მიზანშეწონილია ჩატარდეს წინასწარი ფრაქციონირება საშუალო ფორების მქონე გელზე, ხოლო ამის შემდეგ მოხდეს მაღალ-მოლეკულურ და დაბალმოლეკულური ფრაქციების ხელმეორედ ქრომატოგრაფირება შესაბამის გელზე.

თავი 3.6. აფინური ქრომატოგრაფია

3.6.1. ზოგადი მიმოხილვა

აფინური ქრომატოგრაფია პირველად 1951 წელს გამოიყენეს ანტისხეულების გამოსაყოფად, ცელულოზასთან კოვალენტურად დაკავშირებული ანტიგენით შევსებულ სვეტზე. აღნიშნული მეთოდის განვითარება ძირითადად XX საუკუნის 80-იან წლებთან არის დაკავშირებული და იგი გახდა ერთ-ერთი ყველაზე ეფექტური მეთოდი ბიოპოლიმერების, ფერმენტების და მათი ინჰიბიტორების, ანტისხეულების და ანტიგენის, ნუკლეინის მჟავების, ჰორმონების და მათი რეცეპტორების გამოყოფის და გასუფთავებისთვის.

აფინური ქრომატოგრაფია წარმოადგენს ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოყოფის სპეციალურ მეთოდს, რომელიც დაფუძნებულია ბიოლოგიური და ბიოქიმიური პროცესებისთვის დამახასიათებელ სპეციალურ ურთიერთქმედებაზე. ამ ურთიერთქმედებას ადგილი აქვს ზოგიერთ ნივთიერებათა წყვილებს შორის. მაგალითად: ანტისხეული და ანტიგენი ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან; ფერმენტი რეაგირებს მხოლოდ მის ინჰიბიტორთან; რიბონუკლეინის მჟავა — ამინომჟავასთან, რომელიც მას შეუძლია გადაიტანოს რიბოსომის სილრმეში; ჰორმონი რეაგირებს შესაბამის რეცეპტორთან. თუ ერთ-ერთი ჩამოთვლილი წყვილი შეკავშირდება შესაბამის სარჩულთან კოვალენტური ბმით და კვლავ შეინარჩუნებს თავის თვისებებს, ასეთი პრეპარატი შეიძლება გამოვიყენოთ ხსნარიდან მისი წყვილი ნაერთის შერჩევითი შებოჭვისთვის. რეინერმა და ვოლჩმა მათ „აფინატები“ ანუ აფინური ლიგანდები (მოლეკულები, რომელთაც გააჩნიათ ამოცნობის უნარი) უწოდეს. თუ მოვამზადებთ სვეტს, მყარ სარჩულზე (მატრიცაზე) იმობილიზებული უხსნადი აფინატით და მასზე გავატარებთ ჩვენთვის საინტერესო ბიოლოგიურად აქტიური კომპონენტის შემცველ ექსტრაქტს, მისი ყველა კომპონენტი, რომელთაც არ გააჩნიათ მოცემული აფინატის მიმართ მსგავსება, ყოველგვარი წინააღმდეგობის გარეშე გაივლიან სვეტში ელუენტის ნაკადთან ერთად, ხოლო ნივთიერებები, რომლებიც ხასიათდებიან მის მიმართ მსგავსებით, შეკავდება სვეტში მსგავსების ხარისხის შესაბამისად. ეს ნივთიერებები შეიძლება შემდგომ ელუირდეს რომელიმე ხსნადი აფინატით ან მოძრავი ფაზის შემადგენლობის იმგვარი ცვლილებით, რომ გამოიწვიოს შეკავშირებულ აფინატთან გამოსაყოფი



ნახ.3.32. აფინური ქრომატოგრაფიის განხორციელების პრინციპი

ნივთიერების მიერ წარმოქმნილი კომპლექსის დისოციაცია. უმეტეს შემთხვევაში ამას აღწევენ მოძრავი ფაზის pH, იონური ძალის ან ტემპერატურის ცვლილებით ან მასში სპეციალური რეაგენტის დამატებით [7,22,29,30]. ნახ.3.32-ზე ნაჩვენებია აფინური ქრომატოგრაფიული პროცესის მიმდინარეობის ზოგადი სქემა.

საანალიზო ნივთიერებების შებოჭვა ლიგანდით, მონომოლეკულური ადსორბციული პროცესია და ხასიათდება წონასწორული იზოთერმით.

3.6.2. მატრიცის შერჩევა აფინური ქრომატოგრაფიული პროცესისთვის

აფინური ქრომატოგრაფიული პროცესის წარმატებით ჩატარებისთვის მეტად აქტუალურია შესაფერისი მატრიცის შერჩევა. ისევე როგორც ქრომატოგრაფიის სხვა მეთოდებში, უძრავი ფაზის მატარებელ მატრიცას წაეყენება გარკვეული მოთხოვნები.

უპირველეს ყოვლისა იგი ნაკლებად უნდა შედიოდეს ურთიერთქმედებაში დასაყოფ ნივთიერებებთან, რათა გამოირიცხოს არასპეციფიური სორბცია.

პრაქტიკული თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია აგრეთვე მატრიცის ჰიდროდინამიკური თვისებები და ეს თვისებები მან უნდა შეინარჩუნოს აფინური ლიგანდის მიერთების შემდეგაც. მატრიცამ ნაკლები წინააღმდეგობა უნდა გაუწიოს სვეტში გამავალი სითხის ნაკადს.

აფინური ლიგანდის მიერთებისთვის აუცილებელია მატრიცაში გარკვეული რაოდენობის ქიმიური ჯგუფების არსებობა, რომლებიც შეიძლება გააქტიურდნენ ან განიცადონ მოდიფიკაცია ისე, რომ არ მოახდინონ გავლენა მატრიცის სტრუქტურაზე ან აფინურ ლიგანდზე.

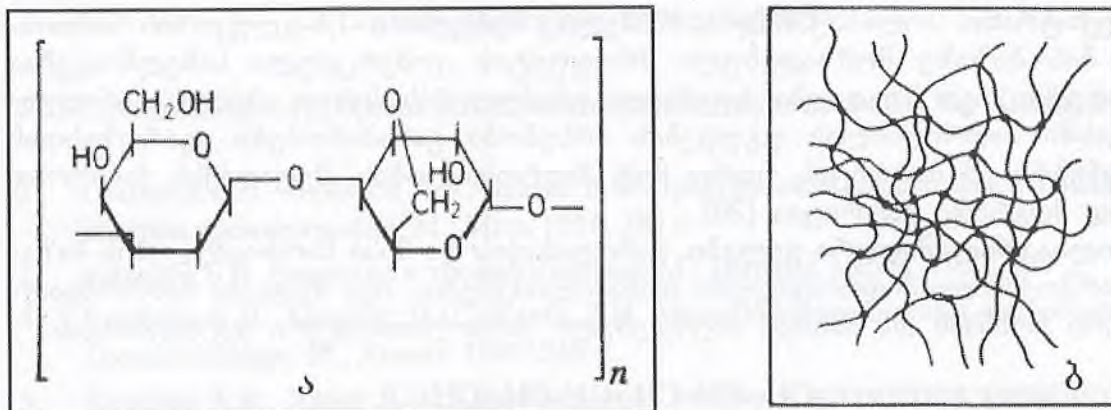
მატრიცამ უნდა შეინარჩუნოს სიმტკიცე და ქიმიური მდგრადობა აფინური ლიგანდის მიერთების პროცესში, pH-ის, იონური ძალის და ტემპერატურის ცვლილებისას. ეს თვისებები განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სპეციფიკური ადსორბენტების განმეორებით გამოყენებისთვის. თანამედროვე ექსპერიმენტების ჩასატარებლად მატრიცამ მაღალი წნევის (5 ბარ) ზემოქმედებას და მეტად დაბალ ტემპერატურაზე შენახვას უნდა გაუძლოს.

მატრიცის ნაწილაკები სფერული ფორმის, ერთნაირი ზომისა და ფოროვანი სტრუქტურის უნდა იყოს, რათა უზრუნველყოს თავისუფალი დიფუზია ფორებში.

ასეთი მკაცრი მოთხოვნების გამო დღეისათვის თითქმის არ არსებობს ისეთი მატრიცა, რომელიც პასუხობს ზემოჩამოთვლილ ყველა მოთხოვნას. ქვემოთ მოკლედ განვიხილავთ ზოგიერთ მათგანს.

აგაროზა. იგი ბიოლოგიურად ინერტული მატრიცაა, ხასიათდება გელწარმოქმნის უნარით და გრანულების სახით გამოიყენება აფინურ ქრომატოგრაფიაში. ნახ.3.33-ზე მოყვანილია აგაროზას სტრუქტურული რგოლი (ა) და მატრიცის მთლიანი სავარაუდო სტრუქტურა (ბ).

სხვადასხვა ფირმები აგაროზას ბაზაზე ამზადებენ სპეციალურ მატრიცებს, რომელთაგან ფართოდ არის გამოყენებული სეფაროზა და ბიოგელ A.



ნახ.3.33. აგაროზული გელის სტრუქტურული რგოლი (ა) და მატრიცის სტრუქტურა (ბ)

სეფაროზა. Pharmacia Fine Chemicals AB (შვეცია) ფირმის მიერ დამზადებული აგაროზას სფერული გელია. ცნობილია სამი სახის სეფაროზა: სეფაროზა 6B, სეფაროზა 4B და სეფაროზა 2B, რომლებშიც აგაროზას კონცენტრაცია შესაბამისად ~6, 4 და 2%-ია; გაჯირჯვებული გრანულების ზომა შესაბამისად 40-210, 40-190 და 60-250 მკმ-ია. ისინი ძირითადად განკუთვნილია 10^5 - 10^6 , 3×10^5 - 3×10^6 და 2×10^6 - 25×10^6 მოლეკულური მასის მქონე ნივთიერებების ფრაქციონირებისთვის. აფინურ ქრომატოგრაფიაში უმეტესად გამოიყენება სეფაროზა 4B; სეფაროზა 2B-ს კი ძირითადად იყენებენ განსაკუთრებით დიდი ზომის მოლეკულების გამოსაყოფად.

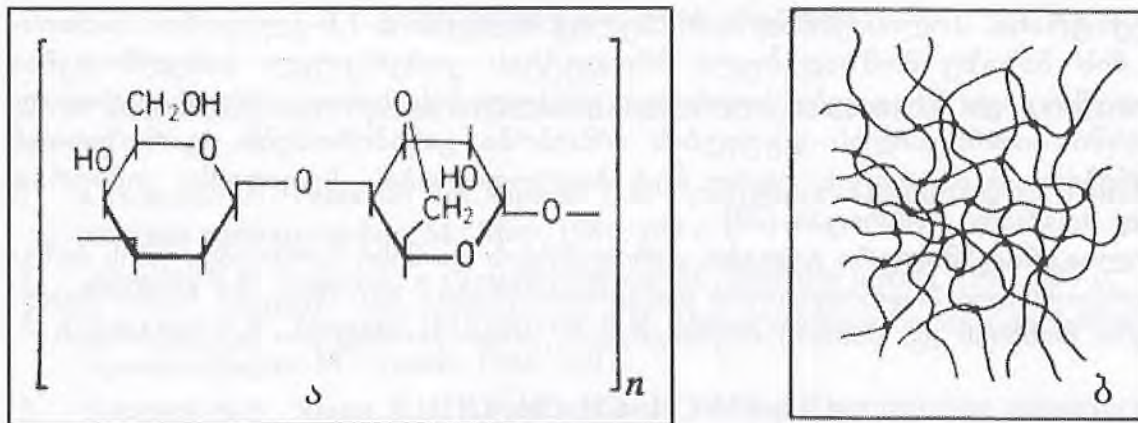
ბიოგელი A. ფირმა Bio-Rad (რიჩმონდი, კალიფორნია) აწარმოებს აგაროზას საფირმო სახელწოდებით ბიოგელი, სხვადასხვა პროცენტული შემცველობით (10,8,6,4,2,1) და გრანულების ზომებით (149-290 მკმ, 74-149 მკმ და 38-74 მკმ). მომხმარებელს მიეწოდება გაჯირჯვებულ მდგომარეობაში სუსპენზიის სახით [22,29].

ცელულოზა და მისი წარმოებულები აფინურ ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული პირველი მატარებლებია. იგი ხაზოვანი პოლიმერია, რომელიც შედგება β-1, 4-D-გლუკოზის ერთეულებისგან. გარკვეული დროის განმავლობაში ცელულოზური მატარებლების გამოყენება შემცირდა, რაც გამოწვეული იყო მისი არახელსაყრელი სტრუქტურით (არასაკმარისი ფორიანობა) და ზოგიერთი ნაწილაკების გამოუსადეგარი გეომეტრიული ფორმებით.

აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ ამ პრობლემის მოსაგვარებლად ამჟამად უკვე შემუშავებულია ცელულოზური მატარებლების ახალი სახეობები (ფოროვანი სფერული ცელულოზა).

სფერული ცელულოზა არის რეგენერირებული ცელულოზის (15%) და წყლისგან შემდგარი მაღალფოროვანი მატრიცა სფერული გრანულებით.

მთელი რიგი ფირმები ამზადებენ მატრიცებს ცელულოზის ბაზაზე. მაგალითად ფირმა Whatman ამზადებს სხვადასხვა ფორმის ცელულოზის და მის წარმოებულების ფართო ასორტიმენტს. ფირმა Bio-Rad Laboratories (კალიფორნია, აშშ) „ცელექს“ სახელწოდებით ამზადებს ცელულოზის სხვადასხვა წარმოებულებს (ცელექს-PAB- n-ამინობენზილის წარმოებულები, ცელექს-A ამინოეთილის წარმოებულები) და სხვა [22,29].



ნახ.3.33. აგაროზული გელის სტრუქტურული რგოლი (ა) და მატრიცის სტრუქტურა (ბ)

სეფაროზა. Pharmacia Fine Chemicals AB (შვეცია) ფირმის მიერ დამზადებული აგაროზის სფერული გელია. ცნობილია სამი სახის სეფაროზა: სეფაროზა 6B, სეფაროზა 4B და სეფაროზა 2B, რომლებშიც აგაროზის კონცენტრაცია შესაბამისად ~6, 4 და 2%-ია; გაჯირჯეებული გრანულების ზომა შესაბამისად 40-210, 40-190 და 60-250 მკმ-ია. ისინი ძირითადად განკუთვნილია 10^5 - 10^6 , 3×10^5 - 3×10^6 და 2×10^6 - 25×10^6 მოლეკულური მასის მქონე ნივთიერებების ფრაქციონირებისთვის. აფინურ ქრომატოგრაფიაში უმეტესად გამოიყენება სეფაროზა 4B; სეფაროზა 2B-ს კი ძირითადად იყენებენ განსაკუთრებით დიდი ზომის მოლეკულების გამოსაყოფად.

ბიოგელი A. ფირმა Bio-Rad (რიჩმონდი, კალიფორნია) აწარმოებს აგაროზის საფირმო სახელწოდებით ბიოგელი, სხვადასხვა პროცენტული შემცველობით (10,8,6,4,2,1) და გრანულების ზომებით (149-290 მკმ, 74-149 მკმ და 38-74 მკმ). მომხმარებელს მიეწოდება გაჯირჯეულ მდგომარეობაში სუსპენზიის სახით [22,29].

ცელულოზა და მისი წარმოებულები აფინურ ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული პირველი მატარებლებია. იგი ხაზოვანი პოლიმერია, რომელიც შედგება β -1, 4-D-გლუკოზის ერთეულებისგან. გარკვეული დროის განმავლობაში ცელულოზური მატარებლების გამოყენება შემცირდა, რაც გამოწვეული იყო მისი არახელსაყრელი სტრუქტურით (არასაკმარისი ფორიანობა) და ზოგიერთი ნაწილაკების გამოუსადეგარი გეომეტრიული ფორმებით.

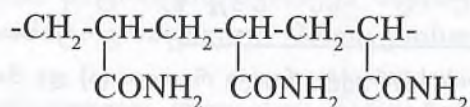
აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ ამ პრობლემის მოსაგვარებლად ამჟამად უკვე შემუშავებულია ცელულოზური მატარებლების ახალი სახეობები (ფოროვანი სფერული ცელულოზა).

სფერული ცელულოზა არის რეგენერირებული ცელულოზის (15%) და წყლისგან შემდგარი მაღალფოროვანი მატრიცა სფერული გრანულებით.

მთელი რიგი ფირმები ამზადებენ მატრიცებს ცელულოზის ბაზაზე. მაგალითად ფირმა Whatman ამზადებს სხვადასხვა ფორმის ცელულოზის და მის წარმოებულების ფართო ასორტიმენტს. ფირმა Bio-Rad Laboratories (კალიფორნია, აშშ) „ცელექს“ სახელწოდებით ამზადებს ცელულოზის სხვადასხვა წარმოებულებს (ცელექს-PAB-ი-ამინობენზილის წარმოებულები, ცელექს-A ამინოეთილის წარმოებულები) და სხვა [22,29].

დექსტრანი. პოლისაქარიდია, რომელიც შედგება α -1,6-გლუკოზის ნაშთისგან. მის ბაზაზე მომზადებული პროდუქტის კომერციული სახელწოდებაა სეფადექსი. იგი მზადდება სფერული გრანულების სახით. პოლისაქარიდულ კარკასში ჰიდროქსილის ჯგუფების არსებობა განაპირობებს აგაროზასთან შედარებით ამ მატრიცის უფრო მეტ ჰიდროფილობას. სეფადექსი ქიმიურად მეტად მდგრადი მატრიცაა [28].

პოლიაკრილამიდური გელები. აკრილამიდის და მისი წარმოებულების ბაზაზე წარმოქმნილი ჰიდროფილური თანაპოლიმერებია. იგი შედგება ნახშირწყალბადური ჩონჩხის და მასთან მიერთებული კარბოქსიამიდური ჯგუფებისგან.



პოლიაკრილამიდური გელები სტაბილურია $\text{pH}=1\div 10$ დიაპაზონში ჩვეულებრივი ელუენტების გამოყენებისას, ბიოლოგიურად ინერტულია და არ შეიცავენ დამუხტულ ჯგუფებს და ამიტომ, მინიმალურია მათი იონმიმოცვლითი ურთიერთქმედება საანალიზო ნივთიერებებთან.

სხვადასხვა ცნობილი ფირმები აწარმოებენ პოლიაკრილამიდურ გელებს, მაგალითად, ფირმა Bio-Rad Laboratories მომხმარებელს სთავაზობს „ბიოგელი“-ს სახელწოდების სხვადასხვა ზომის ნაწილაკების და ფორების მქონე სფერულ გელებს. აფინურ ქრომატოგრაფიაში განსაკუთრებით გამოიყენება ბიოგელი P-300 და სუსტი მუჟავური თვისებების მქონე ბიოგელი CM-100. ფირმა Koch-Light Laboratories Ltd. (ლონდონი, ინგლისი) ამზადებს პოლიაკრილამიდურ გელებს სახელწოდებით „ენზაკრილი“, რომლებიც შეიცავენ სხვადასხვა ფუნქციონალურ ჯგუფებს და რომლებთანაც შეიძლება მიერთდეს აფინური ლიგანდები.

აპარატული გაფორმების მიხედვით აფინური ქრომატოგრაფია არ განსხვავდება თხევადი სვეტური ქრომატოგრაფიის სხვა მეთოდებისგან.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Сакодынский К.И., Орехов Б.И. Хроматография в науке и технике. М.; Химия, 1982/ 9, 63 с.
2. Стыскин Е.Л., Ициксон Л.Б., Брауде Е.В. Практическая высокоэффективная жидкостная хроматография. М.; Мир, 1986, 287 с.
3. Айвазов Б.В. Введение в хроматографию. М.; Высшая школа, 1983, 239 с.
4. Киселев А.В., Пошкус Д.П., Яшин Я.И. Молекулярные основы адсорбционной хроматографии. М.; Химия, 1986, 269 с.
5. Киселев А.В., Яшин Я.И. Адсорбционная газовая и жидкостная хроматография. М.; Химия, 1979, 288 с.
6. Яшин Я.И. Журнал всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1982, т.37, с. 1400-1426
7. Жидкостная колоночная хроматография. В 2-х томах. Пер. с английского, под редакцией Дейла З., Мацека К., Янака Я. М.; Химия, 1993, 463 с.
8. Hamilton R.J. & Sewell P.A. Introduction to High Performance liquid Chromatography. London, Chapman & Hall, 1979, p. 183
9. Сакодынский К.И и др. Аналитическая хроматография. М.; Химия, 1993, 463 с.
10. Перри С., Амос Р., Брюер П., Практическое руководство по жидкостной хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Чмута К.В. М.; Мир, 1974, 260 с.
11. Яшин Я.И. Журнал всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1983, т. 28, №1, с. 18-25
12. Подалкина В.С., Аратокова А.А., Яшин Я.И. Журнал всесоюзного химического общества им Д.И. Менделеева, 1981, т. 26, с. 474-475
13. Andronikashvili T., Amirkhanashvili K., Urotadze S., Burkiashvili N., Osipova N. Proceedings of the Academy of Sciences of Georgia, 1999, v.25, № 3-4
14. ს. უროტაძე, ნ. ოსიპოვა, ნ. ბურკიაშვილი, რ. დევდარიანი საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მაცნე, 1998, ტ. 24, გვ. 1-4
15. Буркиашвили Н.О., Осипова Н.А., Андроникашвили Т.Г. Сообщения Академии Наук Грузии, 1995, 152, №1
16. Луговик Б.А., Жидкостная хроматография под высоким давлением. Томск, 1978, 138 с.
17. Буркиашвили Н.О., Сакодынский К.И., Андроникашвили Т.Г. Сообщения АН Грузии, 1989, т. 133, с. 305-307
18. Хадден Н., Бауман Ф. и др. Основы жидкостной хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Жуховицкого А.А. М.; Мир, 1973, 264 с.
19. Современное состояние жидкостной хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Дж. Киркланда. М.; Мир, 1974, 325 с.
20. Yost, R.W., Ettre L.S., Colon R.D. Practical Liquid Chromatography, an Introduction, Perkin-Elmer, 1980, p. 255

21. Высокоэффективная жидкостная хроматография в биохимии. Пер. с английского под редакцией Березина И.В. М.; Мир, 688 с.
22. Туркова Я. Аффинная хроматография. Лабораторное руководство по хроматографическим и смежным методам. В 2-х частях. Пер. с английского под редакцией Березкина В.Г. М.; Мир. 1982, 783 с.
23. Самуэльсон О. Ионообменные разделения в аналитической химии. Пер. с английского под редакцией Черноброва С.М. М.; Химия. 1966, 416 с.
24. Риман В, Уолтон Г. Ионообменная хроматография в аналитической химии. Пер. с английского под редакцией Чмутова К.В. М.; Мир, 1973, 375 с.
25. Фритц Дж., Гьерде Д., Поланд К. Ионная хроматография. Пер. с английского под редакцией Березкина В.Г. М.; Мир, 1984, 221 с.
26. Шведт Г. Хроматографические методы в неорганическом анализе. Пер. с английского под редакцией Березкина В.Г. М.; Мир, 1984, 254 с.
27. Детерман Г. Гель-хроматография. Пер. с немецкого под редакцией Хохлова А.С. М.; Мир, 1970, 249 с.
28. High Performance Liquid Chromatography. Macherey-Nagel. Düren, 1987, 317 p.
29. Аффинная хроматография, Методы. Пер. с английского под редакцией Дина П., Джонсона У., Мидла Ф. М.; Мир, 1988, 278 с.
30. Colin F. Poole. The essence of chromatography. Department of chemistry, Wayne State University, Detroit. 2003, 897 p.

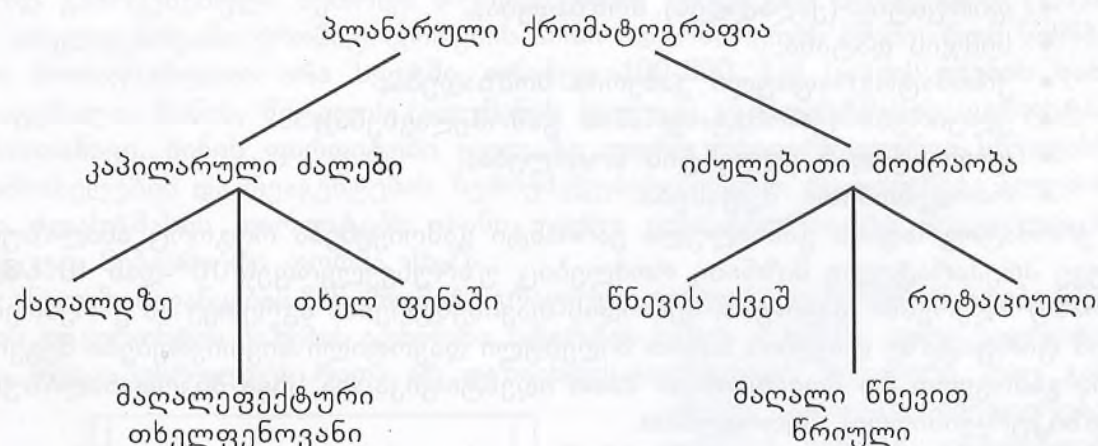
ნანილი 4 სიბრტყითი ანუ პლანარული ქრომატოგრაფია

თავი 4.1. თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია

შესავალი

პლანარული (სიბრტყითი) ქრომატოგრაფია წარმოადგენს თხევადი ქრომატოგრაფიის სახესხვაობას. აქ დაყოფა ხდება უძრავი ფაზის (ძირითადად ადსორბენტები ან იონმიმომცველები) ღია ფენაში, ე.ი. მსგავსად სვეტისა, რომელსაც ნაწილობრივ მოცილებული აქვს წინა და უკანა კედლები ანუ სხვაგვარად რომ ვთქვათ, დაყოფა ხდება სიბრტყეზე.

პლანარული ქრომატოგრაფიის მეთოდების კლასიფიკაციაზე წარმოდგენას იძლევა ნახ.4.1. [1].



ნახ. 4.1. პლანარული ქრომატოგრაფიული მეთოდების კლასიფიკაცია

პლანარული ქრომატოგრაფია მოიცავს არა მარტო იმ მეთოდებს, რომლებშიც ელუენტის მოძრაობა ხდება კაპილარული ძალების გავლენით (ქრომატოგრაფია ქაღალდზე, თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია და მისი სახესხვაობა მაღალეფექტური თხევადი ქრომატოგრაფია*), არამედ იმ მეთოდებსაც, რომლებშიც ელუენტი მოძრაობს სხვადასხვა გარეშე ძალების გავლენით.

მეორე ჯგუფის მეთოდებს მიეკუთვნება თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია წნევის ქვეშ და თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია ცენტრიდანული ძალების მოქმედებით, ე.წ. როტაციული ქრომატოგრაფია.

*მაღალეფექტური თხევადი ქრომატოგრაფია დაყოფისა და ანალიზის შედარებით ახალი ინსტრუმენტული მეთოდია, რომელიც საშუალებას იძლევა მნიშვნელოვნად ამაღლდეს დაყოფის ეფექტურობა, მგრძნობიარეობა და შედეგების აღწარმოება ჩვეულებრივ თხელფენოვან ქრომატოგრაფიასთან შედარებით.

ჩვენ შემოვიფარგლებით ანალიზური ქიმიის პრაქტიკაში ყველაზე ხშირად გამოყენებული თხელფენოვანი და ქაღალდზე ქრომატოგრაფიის მეთოდების განხილვით.

ამ მეთოდების ძირითადი თავისებურებაა კაპილარული ძალების გავლენით ელუენტის მოძრაობა სორბენტის ფენის (ქაღალდის) გასწვრივ, რაც ამართივებს ექსპერიმენტის ჩატარებას, ამცირებს აუცილებელი ძვირად ღირებული მონუობილობის გამოყენებას.

უმეტეს შემთხვევაში იაფი, უნივერსალური სილიკაგელის ადსორბენტის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს ქრომატოგრაფიული ფირფიტა გამოვიყენოთ ერთჯერადად. უძრავი ფაზის ღია ფენა კი უზრუნველყოფს სინჯის ფირფიტაზე დატანის სიმარტივეს, რაც გვაძლევს დიდი რაოდენობის სინჯების ერთდროული ანალიზის შესაძლებლობას. ასევე შეგვიძლია დავაკვირდეთ ელუირების პროცესის მიმდინარეობას და მოვახდინოთ ქრომატოგრამების ინტერპრეტაცია.

პლანარული ქრომატოგრაფიისთვის დამახასიათებელია ანალიზის მცირე დრო და ქრომატოგრამების კონტაქტური ფოტოგრაფირების შესაძლებლობა.

პლანარული ქრომატოგრაფიის მეთოდით ანალიზის ოპერაცია მოიცავს შემდეგ სტადიებს [1]:

- სინჯის მომზადება;
- ფირფიტის (ქაღალდის) მომზადება;
- სინჯის დატანა;
- ქრომატოგრაფიული კამერის მომზადება;
- ელუირება (ქრომატოგრამის გამომჟღავნება);
- ფირფიტიდან ელუენტის მოცილება;
- რაოდენობითი შეფასება.

ქრომატოგრაფიის განხილული ვარიანტი გამოიყენება როგორც ანალიზური ასევე პრეპარატიული მიზნით, რომლებიც უზრუნველყოფენ 10^{-3} -დან 10^{-12} -მდე (გრამი) ზღვრებში დაყოფას. მეთოდის თავისებურებაა აგრეთვე ის გარემოება, რომ ფირფიტაზე ლაქების სახით მიღებული დაყოფილი ნივთიერებები შეგვიძლია გამოვყოთ და მოვახდინოთ მათი იდენტიფიკაცია სხვა მიკროანალიზური (ფიზიკურ-ქიმიური) მეთოდებით.

თხელფენოვანი და ქაღალდზე ქრომატოგრაფიის მეთოდით ნარეკების დაყოფის ხასიათი და მექანიზმი პრაქტიკულად იდენტურია.

4.1.1. მეთოდის ზოგადი აღწერა

თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიის მეთოდი პირველად 1889 წელს გამოიყენა ჰოლანდიელმა ბიოლოგმა ბეიერინკმა. იგი აკვირდებოდა მარილმჟავას და გოგირდმჟავას ნარეკის დიფუზიას ჟელატინის თხელ ფენაში და შეამჩნია, რომ მარილმჟავა უფრო სწრაფად გადაადგილდება, ვიდრე გოგირდმჟავა და წარმოქმნის რკალს მის გარშემო. ფირფიტის დამუშავებით ვერცხლის ნიტრატის და ბარიუმის ქლორიდის ხსნარით მან შეძლო მარილმჟავას და გოგირდმჟავას ზონების იდენტიფიკაცია.

ცხრა წლის შემდეგ ვეისმანმა ანალოგიური მეთოდის გამოყენებით დაამტკი-

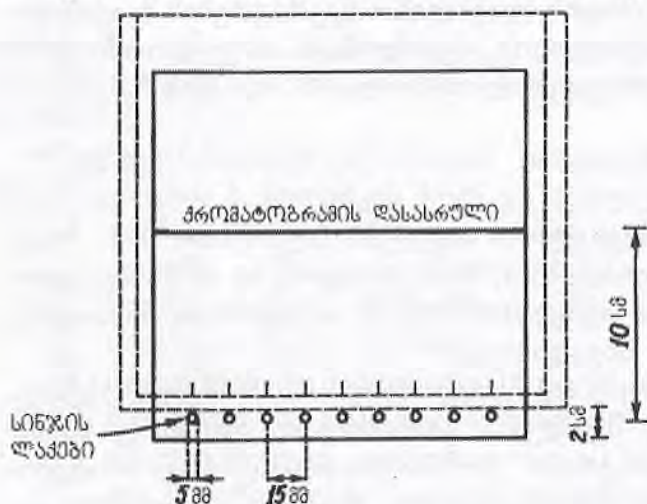
ცა ორი ფერმენტის არსებობა ალაოს დიასტაზაში და აჩვენა, რომ მხოლოდ ერთი მათგანი იწვევს მალტოზას დაშლას. მან პირველმა გამოიყენა ფლუორესცენციის მეთოდი ქრომატოგრაფიული ზონების აღმოსაჩენად. სახამებლის შემცველ ჟელატინის ფენაში შეიყვანა ცოცხალი მაფლუორესცირებელი ბაქტერია და შეისწავლა ამილაზური ნარევის დიფუზია თხელ ფენაში. ფლუორესცენციური ზოლები წარმოიქმნებოდა მხოლოდ იმ ადგილას, სადაც β -ამილაზა რეაგირებდა სახამებელთან. მის მიერ გამოყენებული ფლუორესცენციური რეაქტივი ითვლება ერთ-ერთ ყველაზე მგრძნობიარე რეაქტივად თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში [2,3].

1938 წელს იზმაილოვმა და შრაიბერმა შეიმუშავეს მინის ფორფიტაზე დაფენილი ალუმინის ოქსიდის გამოყენება ზოგიერთი მცენარეული ექსტრაქტის დასაყოფად და ამის შემდეგ თხელფენოვანმა ქრომატოგრაფიამ აღიარება ჰპოვა როგორც კვლევის ერთ-ერთმა მეთოდმა. მათვე გამოიყენეს წრიული ქრომატოგრაფიის მეთოდი და მიუთითეს გამხსნელების შესარჩევად სვეტურ ქრომატოგრაფიაში აღნიშნული მეთოდის გამოყენების შესაძლებლობაზე [4].

1956 წლის შემდეგ შტალმა ყურადღება მიაქცია რა იმ ფაქტს, რომ მეთოდის წარმატებით გამოყენებისთვის აუცილებელია სორბენტის, ხელსაწყო-მონყობილობის და მთელი ქრომატოგრაფიული პროცესის სტანდარტიზაცია, თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია გახდა საყოველთაოდ აღიარებული და ფართოდ გამოყენებული მეთოდი ნივთიერებათა ნარევების დასაყოფად [1,3,5].

თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ სორბენტი მოთავსებულია არა სვეტში, არამედ 100-300 მკმ სისქის ფენის სახით დაფენილია მინის, მეტალის (ალუმინის ფოლგა) ან პლასტმასის ფირფიტაზე. ამასთანავე, მინის ფირფიტები ყველაზე უფრო უნივერსალურია სხვადასხვა გამხსნელების და რეაგენტების ზემოქმედების მიმართ. რაც შეეხება ალუმინის და პლასტმასის ფირფიტებს, ისინი უფრო ელასტიურია და შეგვიძლია მათ მივცეთ ნებისმიერი ფორმა. [6,7]

ანალიზის დაწყების წინ ქრომატოგრაფიულ ფირფიტაზე წინასწარ ხდება სტარტის და ფრონტის ხაზების აღნიშვნა. სტარტის ხაზის აღნიშვნა დიდი სიფრთხილით უნდა შესრულდეს რათა არ დაზიანდეს სორბენტის ზედაპირი, რაც გამო-



ნახ. 4.2. სინჯის დატანის წესი ფირფიტაზე

იწვევს საანალიზო ნივთიერებათა ლაქების ფორმის დამახინჯებას. დაყოფის ოპტიმალური პირობების შესაბამისად, სტარტის ხაზი სორბენტის კიდედან დაცილებული უნდა იყოს 1.5-2 სმ, ხოლო მანძილი სტარტის და ფრონტის ხაზებს შორის დაახლოებით 10 სმ. ხშირად ფრონტის ხაზის შემდეგ სორბენტს მთლიანად ჩამოფხეკენ, რათა გამხსნელი არ გადასცდეს მას (ნახ.4.2.).

განსაკუთრებით დიდი სიფრთხილეა საჭირო სინჯის მომზადების და ფირფიტაზე მისი და-

ტანისას, რადგან ცდომილება რაოდენობრივი ანალიზის დროს ($\pm 6-20\%$) ძირითადად სწორედ ამით არის გამოწვეული. სინჯის დატანისას არ უნდა დაზიანდეს სორბენტის ზედაპირი, რათა არ დამახინჯდეს ლაქების ფორმა, რაც გაართულებს მათ რაოდენობრივ ანალიზს.

0.1-1% კონცენტრაციის მქონე არაპოლარულ გამხსნელში მომზადებული 2-10 მკლ მოცულობის სინჯი მიკროშპრიცით, მიკროპიპეტით ან სპეციალური დაკალიბრებული კაპილარით დაიტანება სტარტის ხაზზე ისე, რომ ლაქების დიამეტრი 2-4 მმ იყოს, მათ შორის მანძილი კი 1 სმ-ზე მეტი.

სინჯის დატანის ადგილზე ლაქის წარეცხვის თავიდან აცილებისთვის, რასაც ხშირად ადგილი აქვს პოლარული გამხსნელების შემთხვევაში და რაც გავლენას ახდენს R_f -ის მნიშვნელობებზე (განსაკუთრებით თუ შემდგომი ელუირება ხდება ნაკლებ პოლარული მოძრავი ფაზით) უმჯობესია არაპოლარული გამხსნელების გამოყენება, ამასთანავე, სასურველია გამხსნელი იყოს ისეთი, რომ იგი ადვილად მოსცილდეს ქრომატოგრაფიულ ფირფიტას გამომჟღავნების დაწყებამდე [6,7,8].

4.1.2. თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიული მეთოდის თეორიული საფუძვლები

თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში საანალიზო ნივთიერებასა და სორბენტს შორის სორბციული თვისებების დახასიათების მიზნით გამოიყენება R_f სიდიდე, რომელსაც ძვრადობის უნარს უწოდებენ. იგი წარმოადგენს საანალიზო ნივთიერების ზონის ცენტრის გადაადგილების სიჩქარის (a) ფარდობას გამხსნელის ფრონტის ხაზის გადაადგილების სიჩქარესთან (u):

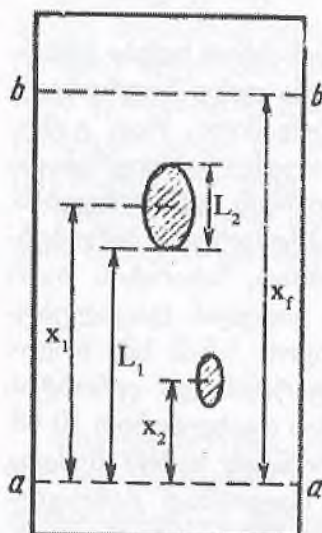
$$R_f = (a) / (u). \quad (4.1)$$

იმის გამო, რომ აღნიშნული სიდიდეების გაზომვა რთულია, R_f სიდიდე რაოდენობრივად განისაზღვრება სტარტის ხაზიდან საანალიზო ნივთიერების ლაქის დაშორების მანძილის (x_1) ფარდობით ამავე დროში გამხსნელის მიერ გავლილ მანძილთან (x_f) (ნახ.4.3.).

$$R_f = x_1 / x_f \quad (4.2)$$

R_f -ის მნიშვნელობა იცვლება ზღვრებში: $0 \div 1$., რადგან x_1 არ შეიძლება x_f -ზე მეტი იყოს, x_1 -ის მნიშვნელობა ერთი და იგივე პირობებში სხვადასხვა ნივთიერებებისთვის სხვადასხვაა.

სხვადასხვაა აგრეთვე მათი R_f მნიშვნელობებიც. ამიტომ, R_f შეიძლება განვიხილოთ როგორც საანალიზო ნივთიერება (სორბატი)-სორბენტის სისტემის სორბციული მახასიათებელი, რომელიც მოცემულ პირობებში მუდმივია [7].



ნახ. 4.3. R_f და N სიდიდეების განსაზღვრის სქემა თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიისთვის

R_f -ის განსაზღვრისას ხშირად საანალიზო ნივთიერებებთან ერთად ახდენენ რომელიმე ცნობილი ნივთიერების ე.წ. „მონმე“ ქრომატოგრაფირებას და ლაქების მდებარეობას ქრომატოგრამაზე გამოსახავენ საანალიზო ნივთიერების და მონმის R_f -ის ფარდობით [5]:

$$R_s = R_{f,x} / R_{f,st} \quad (4.3)$$

როგორც ვიცით, სვეტურ ქრომატოგრაფიაში სვეტის ეფექტურობა განისაზღვრება თეორიული თეფშების რიცხვით N . თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში კი ამ სიდიდის განსაზღვრისთვის საჭიროა გაიზომოს X_1 მანძილი სტარტის ხაზიდან მოცემული ნივთიერების ლაქის ცენტრამდე და L_2 მანძილი ლაქის ქვედა და ზედა ზღვრებს შორის. მაშინ თეორიული თეფშების რიცხვი განისაზღვრება ფორმულით:

$$N = 16 (X_1 / L_2)^2 \quad (4.4)$$

თუ მანძილს სტარტის ხაზიდან ლაქის ქვედა ზღვრამდე L_1 , ე.ი სორბენტის მოცემულ ფენაში ნივთიერების მიერ განვლილ მანძილს, გავყოფთ თეორიული თეფშების რიცხვზე N , მივიღებთ თეორიული თეფშების ეკვივალენტურ სიმაღლეს:

$$H = X_f / N \quad (4.5)$$

R_f და N მნიშვნელობები დაკავშირებულია ერთმანეთთან ტოლობით

$$K_f = \sqrt{N} \frac{R_{f,X_1} - R_{f,X_2}}{\sqrt{R_{f,X_1}} - \sqrt{R_{f,X_2}}} \quad (4.6)$$

სადაც R_{f, x_1} და R_{f, x_2} - დასაყოფი ნარევის ორი მეზობელი კომპონენტის ძვრადობის უნარია; K_f -დაყოფის კოეფიციენტი თხელ ფენაში, რომელიც ახასიათებს ორი მეზობელი კომპონენტის დაყოფის ხარისხს. (თუ, $R_{f, x_1} = R_{f, x_2}$, მაშინ, $K_f = 0$) [1,7].

ორგანული ნივთიერებებისთვის თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიის თეორია შემუშავებულია ბ. ბელენკის მიერ და საფუძვლად უდევს შემდეგი პირობები [9]:

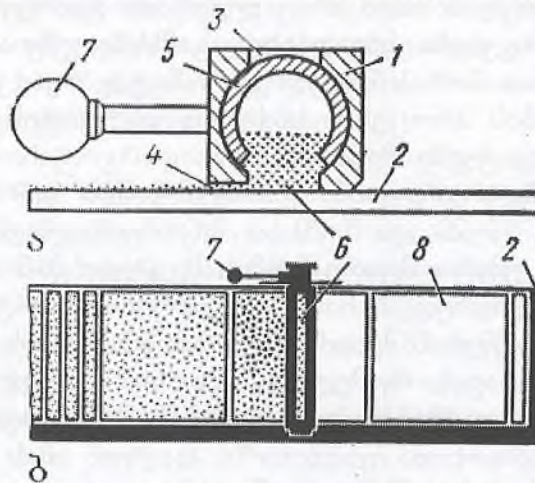
- საანალიზო ნივთიერების ზონის ცენტრის მოძრაობის სიჩქარე წარმოადგენს გამხსნელის მოძრაობის სიჩქარის მკვეთრად განსაზღვრულ წილს. ამიტომ, R_f წარმოადგენს სორბატ-სორბენტი-მოძრავი ფაზის მახასიათებელს ($R_f = a/u$).
- თხელ ფენაში მიმდინარე პროცესს თან ახლავს საანალიზო ნივთიერების დიფუზია გამხსნელის მოძრაობის მიმართულებით და მის პერპენდიკულარულად. დიფუზია იწვევს ნივთიერების ზონის წარეცხვას ყველა მიმართულებით და ეს დიფუზიური წარეცხვა განისაზღვრება დიფუზიის ეფექტური კოეფიციენტით ($D_{ef} \neq 0$).

4.1.3.3. სორბენტის მომზადება და დატანა ფირფიტაზე

თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიული ფირფიტის მომზადების პროცესში მეტად მნიშვნელოვანია სორბენტის დატანა ფირფიტაზე თანაბარი, ერთგვაროვანი ფენის სახით. ამ პროცედურის განხორციელებისთვის განასხვავებენ ოთხ ძირითად მეთოდს [6]:

- ფირფიტაზე დაასხავენ სორბენტის საჭირო რაოდენობის სუსპენზიას და ფირფიტის დახრით სხვადასხვა მიმართულებით, სახაზავის ან მინის წკირის გამოყენებით ახდენენ ფენის გათანაბრებას.
- დამუშავებულ (გასუფთავებულ) ფირფიტას ჩაუშვებენ სუსპენზიაში, ამოიღებენ და გააშრობენ.
- ფირფიტას შეასხურებენ სორბენტის წინასწარმომზადებულ სუსპენზიას.
- გამოიყენებენ სპეციალურ მექანიკურ გამანაწილებელ მოწყობილობას. ამ მეთოდით დატანილი სორბენტის ფენის სისქის აღწარმოება გაცილებით უკეთესია აღნიშნულ წინა სამ მეთოდთან შედარებით.

სორბენტის თხელი ფენის ფირფიტაზე დასატანი ფართოდგამოყენებული ხელსაწყო კონსტრუქცია შემუშავებულია შტალის მიერ (ნახ.4.4) [5]. ხელსაწყო შედგება შაბლონისგან, რომელზეც თავსდება ფირფიტა და რომელზეც მოძრაობს კორპუსი, მასრაში ჩასხმული წინასწარ მომზადებული სორბენტის მასით. კორპუსს აქვს ხვრელი, რომლის საშუალებითაც სორბენტის მასა ეფინება ფირფიტაზე. სპეციალური სახელურის (7) ბრუნვით, მასრის მდებარეობა იცვლება, ხვრელის სიმაღლე კი განსაზღვრავს დაფენილი სორბენტის სისქეს. მისი რეგულირება შესაძლებელია 0-2 მმ ზღვრებში. ხელსაწყო განკუთვნილია 20×20 სმ ან 5×20 სმ ზომის ქრომატოგრაფიული ფირფიტების დასამზადებლად.



ნახ. 4.4. სორბენტის თხელი ფენის დასატანი მოწყობილობის სქემა

ა) გვერდხედი (ჭრილი); ბ) ზედახედი;

1-ხელსაწყო კორპუსი; 2-შაბლონი; 3-გრძივი ჭრილი კორპუსში;

4-სორბენტის მასის გამოსასვლელი ჭრილი; 5-კორპუსში ჩამონტაჟებული მასრა;

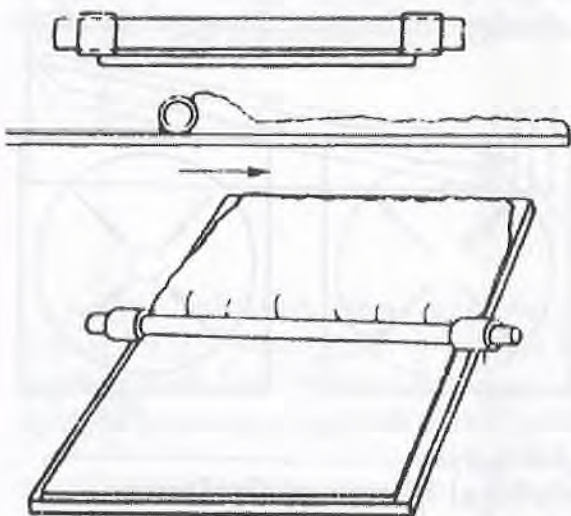
6-მასრის ჭრილი, 7-სახელური; 8-ფირფიტა

ახლა განვიხილოთ, როგორ ხდება სორბენტის სქელი მასის მომზადება სხვადასხვა შემთხვევით აგენტის გამოყენებით.

ასეთი მასის მისაღებად სორბენტის საჭირო რაოდენობას შეურევნ მისი რაოდენობის 5% თაბაშირს და ორჯერ მეტი მოცულობის წყალს, ვიდრე მოცემული სორბენტის და თაბაშირის რაოდენობა ერთად აღებული. ამისათვის, მშრალ ნარევს მოათავსებენ ფაიფურის ფილაში, დაუმატებენ საჭირო რაოდენობის წყლის 70%-ს და გულდასმით აურევენ ერთგვაროვანი მასის მიღებამდე, რომელიც არ შეიცავს ჰაერის ბუშტუკებს. ამის შემდეგ დაამატებენ წყლის დარჩენილ რაოდენობას. აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ სორბენტის მასის მომზადების მთლიანმა ხანგრძლივობამ არ უნდა გადააჭარბოს 2 წუთს და მომზადებული მასა დაუყოვნებლივ უნდა დაიტანონ ფირფიტაზე.

თუ შემაკავშირებელ ნივთიერებად გამოვიყენებთ სახამებელს, მაშინ სორბენტს და სახამებელს (5%) ერთად აურევენ ფაიფურის ფილაში და დაუმატებენ ორჯერ უფრო მეტი მოცულობის გამობდილ წყალს. მიღებულ მასას 5 წუთის განმავლობაში გააცხელებენ წყლის აბაზანაზე 85°C ტემპერატურაზე. ამის შემდეგ, კვლავ დაუმატებენ აღებული სორბენტის მასის რაოდენობის წყალს, აურევენ და დაიტანენ ჰორიზონტალურად მოთავსებულ ფირფიტაზე.

სორბენტის სახით იონიტის გამოყენებისას შერჩეულ იონიტს შეურევნ სორბენტის მასის 4% სახამებელს, დაუმატებენ იონიტისავე რაოდენობის წყალს, აურევენ და წყლის აბაზანაზე გააცხელებენ $75-80^{\circ}\text{C}$ ოცი წუთის გან-



ნახ. 4.5. თხელი, დაუმაგრებელი ფენის მიღება მინის ჩხირით, რომელსაც ბოლოებზე გაკეთებული აქვს კაუჩუკის მილი

მავლობაში. გაციების შემდეგ დაამატებენ იგივე რაოდენობის წყალს და მომზადებულ მასას დაიტანენ ფირფიტაზე 0.15-0.25 მმ სისქის ფენის სახით (პრეპარატიული ქრომატოგრაფიისთვის 0.5-0.75 მმ სისქით).

ქრომატოგრაფიული ფირფიტის მოსამზადებლად სორბენტის დაუმაგრებელი ფენით, სორბენტს დაყრიან სუფთა ფირფიტაზე და გაათანაბრებენ ბოლოებში გამსხვილებული სპეციალური ლილვაკით (ნახ.4.5). ლილვაკის ეს გამსხვილებული ბოლოები განსაზღვრავენ სორბენტის ფენის სისქეს. ბოლოებს შორის მანძილიც ნაკლები უნდა იყოს ფირფიტის სიგანეზე 10-12 მმ-ით, რათა მისი კიდეები 5-6 მმ მანძილზე არ დაიფაროს სორბენტით [8].

ზემოთ განხილული ნებისმიერი წესით მომზადებულ ქრომატოგრაფიულ ფირფიტას სჭირდება გამოშრობა და გააქტიურება. ქრომატოგრაფიული ფირფიტის წინასწარი გაშრობა ხდება ოთახის ტემპერატურაზე ჰაერით, ხოლო შემდეგ საშრობ კარადაში სადაც ის ჰორიზონტალურ მდგომარეობაშია მოთავსებული. თუ სორბენტის ფენა დაუმაგრებელია ფირფიტაზე, ნას ვერტიკალურ მდგომარეობაში ათავსებენ. გამოშრობა გრძელდება 30 წთ-ის განმავლობაში, 110°C ტემპერატურაზე. რაც შეეხება სილიკაგელისა და ალუმინის ოქსიდის აქტივაციას, ამ მიზნით ხდება ფირ-

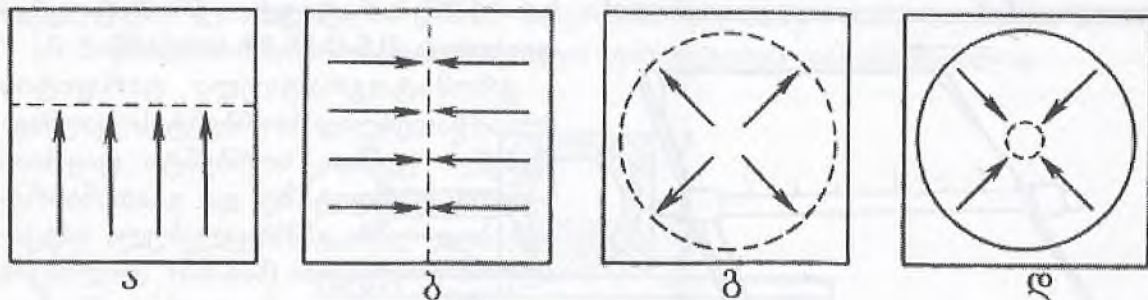
ფიტის დამატებით გაახურება 150°C ტემპერატურაზე 3-4 საათის განმავლობაში.

დღეისათვის თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში ძირითადად გამოიყენება სხვადასხვა ფირმების მიერ დამზადებული მზა ქრომატოგრაფიული ფირფიტები სორბენტების ფართო არჩევანით, რაც თავიდან გვაცილებს ქრომატოგრაფიული ფირფიტის ლაბორატორიაში მომზადების მეტად შრომატევად სამუშაოს [7,8,10,11].

4.1.4. თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიული ანალიზის ჩატარების მეთოდები (ქრომატოგრაფირების ტექნიკა)

თხევად სვეტურ ქრომატოგრაფიაში ელუენტი მხოლოდ სწორხაზოვნად მოძრაობს სვეტის გასწვრივ. თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში კი დაყოფის მიმდინარეობის პროცესს განვიხილავთ როგორც ორგანოზომილებიანს, რომლის დროსაც დიფუზია განივი მიმართულებით თანაზომადია დიფუზიისა გრძივი მიმართულებით.

სორბენტის ღია ფენის გამო თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში შესაძლებელია განხორციელდეს ელუირების სამი ვარიანტი: ხაზოვანი, წრიული და ანტინწრიული (ნახ.4.6).



ნახ.4.6. ელუირების ტიპები:

ა) ხაზოვანი; ბ) ხაზოვანი (ჰორიზონტალური); გ) წრიული; დ) ანტინწრიული

ამ სამი ვარიანტიდან უფრო ფართოდ გამოიყენება ქრომატოგრამის სწორ-ხაზოვანი გამოძლავნება. ამისათვის სინჯი დააქვთ ე.წ. სტარტის ხაზზე ფირფიტის ერთ-ერთი გვერდის პარალელურად (ნახ.4.6.ა). ელუენტის მიწოდება შეიძლება მოხდეს ფირფიტის როგორც ერთი ასევე მეორე მხრიდან (ნახ. 4.6.ბ).

წრიული ქრომატოგრაფიის შემთხვევაში სინჯი დააქვთ ფირფიტის ცენტრიდან გარკვეულ მანძილზე წრიულად, ხოლო ელუენტი მიეწოდება ცენტრში (ნახ.4.6.გ). ამის შედეგად ქრომატოგრაფიულ ფირფიტაზე წარმოიქმნება არა ლაქები, არამედ რგოლური ზონები. ყველაზე კარგი დაყოფა მიიღება R_f -ის დაბალი მნიშვნელობის მქონე ნივთიერებებისთვის.

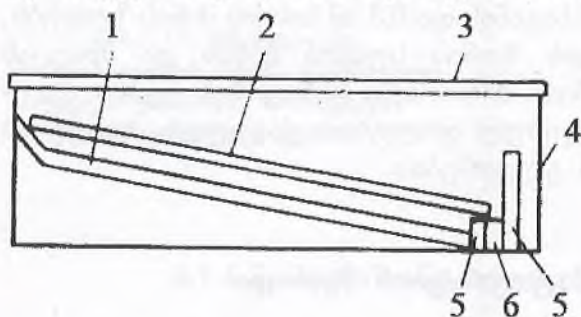
ანტინწრიულ ქრომატოგრაფიაში სინჯი დააქვთ წრიულად ფირფიტის პერიფერიისკენ. ელუენტი მიეწოდება ფირფიტის ცენტრისკენ (ნახ.4.6.დ). განსაკუთ-

რებით კარგი შედეგები მიიღება R_f -ის მაღალი მნიშვნელობის მქონე ნივთიერებებისთვის.

იმისდა მიხედვით თუ რა მიმართულებით გადაადგილდება მოძრავი ფაზა სორბენტის ფენის გასწვრივ, განასხვავებენ აღმავალ, დამავალ და ჰორიზონტალური ელუირების მეთოდს [1,3,6,7].

4.1.4.1. აღმავალი ქრომატოგრაფიის მეთოდი

ქრომატოგრაფიის ამ ვარიანტში მოძრავი ფაზა გადაადგილდება ქვემოდან ზემოთ მხოლოდ კაპილარული ძალების გავლენით. აღნიშნული მეთოდი ძირითადად გამოიყენება დამაგრებული სორბენტის ფენის მქონე ფირფიტებისთვის და გასამუშავებლად მისი მოთავსება კამერაში ხდება ვერტიკალურად. კამერის სახით შეგვიძლია გამოვიყენოთ ჰერმეტიკულად დახურული ბრტყელძირიანი შესაბამისი ზომის ჭურჭელი, რომელშიც ჩასხმულია მოძრავი ფაზა ისე, რომ ფენის ქვედა ბოლო ჩაშვებული იყოს გამხსნელში 5 მმ-ით. საჭიროების შემთხვევაში კამერაში შეიძლება მოთავსდეს რამდენიმე ფირფიტა (ნახ.4.7).



ნახ. 4.7. აღმავალი ელუირებისთვის საჭირო მოწყობილობის სქემა.

(დამაგრებული სორბენტით)

1. T-ებური სადგარი; 2. ფირფიტა;
3. მიჩილული სახურავი;
4. კრისტალიზატორი; 5. მინის საყრდენი;
6. შუასადები

კამერა წინასწარ უნდა გაჯერდეს გამოყენებული გამხსნელის ორთქლით. წინააღმდეგ შემთხვევაში ფრონტის ხაზი ფირფიტის ცენტრში გადაადგილდება გვერდებთან შედარებით სწრაფად. ამის შედეგად ერთი და იგივე ნივთიერების ლაქები გადაადგილდებიან არა მწყობრში, არამედ რკალურად. ეს გამოწვეულია გამხსნელის აორთქლებით ფირფიტის ნაპირებიდან (ნახ.4.8).



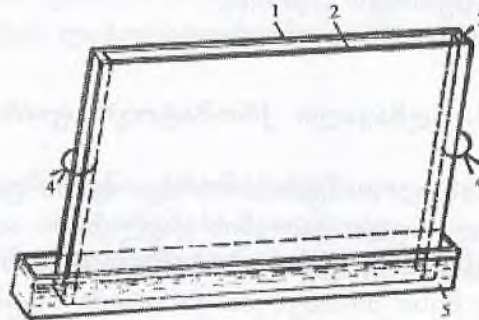
ნახ.4.8. „გვერდითი ეფექტი“ გამოწვეული გაუჯერებელი კამერით

ამ მოვლენის თავიდან აცილების მიზნით ახდენენ კამერის გაჯერებას, რისთვისაც კამერის კედელზე ამაგრებენ გამხსნელში დასველებულ ფილტრის ქაღალდს, რომლის მეორე ბოლო ჩაშვებულია მოძრავ ფაზაში და კამერას ხურავენ ჰერმეტიკულად [3,6,7].

თუ ექსპერიმენტის პირობები მოითხოვს განსაზღვრულ ტემპერატურას, კამერას ათავსებენ თერმოსტატში. ექსპერიმენტი მთავრდება როდესაც მოძრავი ფაზა ამოვა 10-11 სმ სიმაღლეზე. ამის შემდეგ, ფირფიტას ამოიღებენ კამერიდან,

აღნიშნავენ ფრონტის ხაზის მდებარეობას და გააშრობენ ამნოვ კარადაში ჰაერის ნაკადით. თუ გახურებაა საჭირო, გამოიყენება ინფრანიტელი ნათურა [7].

ქრომატოგრამის გამომჟღავნებისთვის პრაქტიკაში ხშირად იყენებენ სპეციალურ, ე.წ. C-კამერას (ნახ.4.9.).



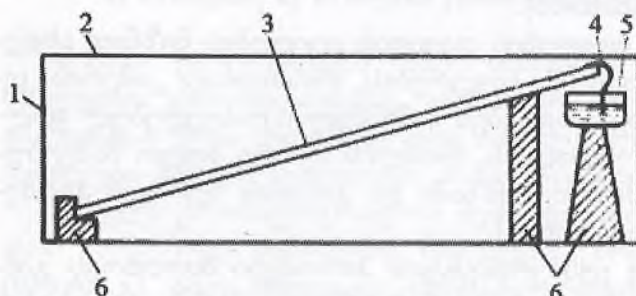
ნახ.4.9. C-კამერის სქემა

1-ფირფიტა თხევადი ფენით; 2- საფარი ფირფიტა 0.3 სმ სისქის და 0.5 სმ სიგანის მინის ზოლებით; 3-მინის გვერდითი ზოლები; 4-მომჭერები; 5-კიუვეტა გამხსნელით

ფირფიტის ნაპირებზე ათავსებენ 0.5 სმ სიგანის და 0.3 სმ სისქის მინის ზოლებს, რომელზეც შემდეგ დადებენ ფირფიტის ზომის სუფთა მინას და მთლიან სისტემას კრავენ მომჭერების საშუალებით. ძირითადი ფირფიტის უკანა კედელზე ამაგრებენ მოძრავ ფაზაში დასველებულ ფილტრის ქაღალდს. სისტემას ჩაუშვებენ მოძრავ ფაზაში და ახდენენ ელუირებას.

4.1.4.2. დამავალი ქრომატოგრაფიის მეთოდი

დამავალი ელუირების მეთოდით ქრომატოგრაფიული პროცესის განხორციელებისას მოძრავი ფაზა გადაადგილდება ადსორბენტის ფენის გასწვრივ ზემოდან ქვემოთ, როგორც კაპილარული, ასევე გრავიტაციული ძალების გავლენით. აღნიშნული მეთოდი გამოიყენება საანალიზო ნივთიერებების უწყვეტი ელუირებისას როგორც დამაგრებული ასევე დაუმაგრებელი ფენების გამოყენებით. ნახ.4.10. წარმოდგენილია სპეციალურ მოწყობილობა დამავალი ელუირების განსახორციელებლად.

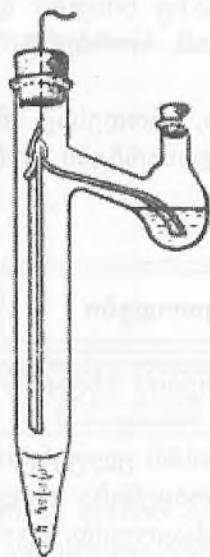


ნახ.4.10. დამავალი ელუირებისთვის საჭირო მოწყობილობის სქემა დაუმაგრებელი სორბენტით

1-კრისტალიზატორი; 2-მოხეხილი სახურავი;
3-ფირფიტა; 4-ფილტრი;
5-გამხსნელის ჭურჭელი; 6-საყრდენი.

როდესაც ვიყენებთ ფირფიტას სორბენტის დაუმაგრებელი ფენით, იგი კამერაში თავსდება ნახ.4.10. ნაჩვენებ მდგომარეობაში. სტარტის ხაზი უნდა იყოს ზემოთ და მოძრავი ფაზის მიწოდება ხდებოდეს კამერის ზედა ნაწილში მოთავსებული სპეციალური ჭურჭლიდან პატრუქის

ან ფილტრის ქაღალდის საშუალებით, რომლის ერთი ბოლოც ჩაშვებულია მოძრავ ფაზაში, მეორე კი მაგრდება სორბენტის ფენაზე.



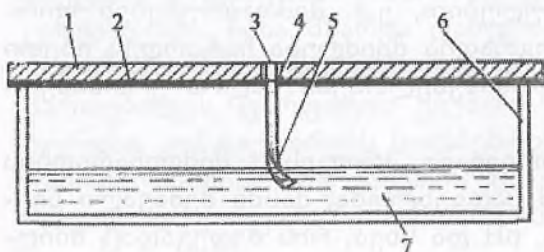
ნახ.4.11. უმარტივესი მოწყობილობის სქემა დადმავალი ელუირებისთვის სორბენტის დამაგრებული ფენით.

თუ ექსპერიმენტი ტარდება მცირე სიგანის ფირფიტაზე, რომელზეც მხოლოდ ერთი სინჯია დატანილი, რეკომენდებულია ნახ.4.11-ზე წარმოდგენილი ხელსაწყო.

ჭურჭელს, რომელშიც მოთავსებულია ფირფიტა, მჭიდროდ დახურავენ და საჭიროების შემთხვევაში მოათავსებენ თერმოსტატში. ექსპერიმენტი მთავრდება როდესაც ფრონტის ხაზი ფირფიტის ქვედა ბოლოდან დაც-ილებულია 2-3 სმ-ით.

4.1.4.3. ჰორიზონტალური ქრომატოგრაფიის მეთოდი

ჰორიზონტალური ელუირების მეთოდს სხვანაირად წრიულ ელუირებას უწოდებენ. ქრომატოგრაფიულ ფირფიტას ათავსებენ ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში და საანალიზო ნარევის სინჯი წვეთის სახით დააქვთ ფირფიტის ცენტრში, სადაც უწყვეტად მიეწოდება მოძრავი ფაზა, რომელიც კაპილარული ძალების გავლენით მოძრაობს ცენტრიდან რადიალური მიმართულებით. საანალიზო ნარევის კომპონენტები მათი სორბციული თვისებების შესაბამისად განლაგდებიან ადსორბენტის ფენაში კონცენტრული რგოლების სახით. განხილული მეთოდი ძლიერ სწრაფია. წრიული ქრომატოგრაფიის განსახორციელებლად იყენებენ მოწყობილობას (ნახ.4.12), რომელიც შედგება მცირე ზომის კრისტალიზატორის ან პეტრის ჯამისგან მასში მოთავსებული მოძრავი



ნახ.4.12. მოწყობილობის სქემა წრიული ქრომატოგრაფიისთვის

1-ფირფიტა; 2-სორბენტის ფენა; 3-2 მმ დიამეტრის ხვრელი; 4-სინჯის დატანის ადგილი; 5-ფილტრის ქაღალდი (პატრუქი). 6-გამხსნელის ჭურჭელი (პეტრის ჯამი); 7-გამხსნელი

ფაზით. ფირფიტას ცენტრში აქვს 2 მმ დიამეტრის მქონე ხვრელი და სინჯი რკალის სახით დააქვთ ამ ხვრელის ირგვლივ. ხვრელში მოთავსებულია პატ-რუქი, რომელიც ჩაშვებულია მოძრავ ფაზაში. ფირფიტაზე სინჯის დატანის შემდეგ მას მოათავსებენ კრისტალიზატორში ისე, რომ სორბენტის ფენა მოექცეს ქვემოთ.

წრიულ ქრომატოგრაფიას იყენებენ იმ შემთხვევაში, როდესაც ნარევი ჭარბობს რომელიმე კომპონენტის შემცველობა, ხოლო დანარჩენი კომპონენტები არიან მინარევების სახით [2,5,7].

4.1.4.4. ქრომატოგრაფიის სპეციალური მეთოდები

განასხვავებენ ქრომატოგრაფიული ფირფიტის ელუირების სხვადასხვა მეთოდს.

ქრომატოგრაფირების **გამდინარე** მეთოდის გამოყენებისას ელუენტის (მოძრავი ფაზის) მიწოდება ხდება უწყვეტად. მეთოდი გამოიყენება დაღმავალი ელუირებისას ნელა გადაადგილებადი ნივთიერებების დასაყოფად. იგი განსაკუთრებით ეფექტურია ერთმანეთთან R_f -ის მნიშვნელობით ახლოს მყოფი ან მისი დაბალი მნიშვნელობის მქონე ნივთიერებების დასაყოფად.

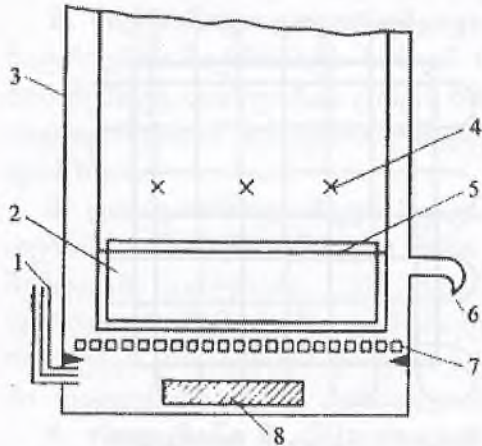
ორგანზომილებიან თხელფენოვან ქრომატოგრაფიას იყენებენ რთული ნარევების დასაყოფად, როდესაც ერთჯერადი ქრომატოგრაფიით მათი დაყოფა არ ხერხდება. პირველი ქრომატოგრაფირების შემდეგ ფირფიტას ამოიღებენ კამერიდან, ააორთქლებენ მოძრავ ფაზას, შემოაბრუნებენ 90° -ით და ახდენენ ხელმეორედ ქრომატოგრაფირებას იგივე ან სხვა მოძრავი ფაზის გამოყენებით. შედეგად ვლუბელობით მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებულ დაყოფას [6,7].

საფეხურებრივი და გრადიენტული ელუირება. დაყოფის პროცესის მიმდინარეობისას ზოგჯერ საჭიროა მოძრავი ფაზის შედგენილობის შეცვლა. თუ, ეს პროცესი ხდება საფეხურებრივად, ადგილი აქვს საფეხურებრივ ქრომატოგრაფიას, ხოლო თუ იგი იცვლება უწყვეტად, საქმე გვაქვს გრადიენტულ ელუირებასთან.

საფეხურებრივი ქრომატოგრაფიის შემთხვევაში თავდაპირველად ელუირება ხდება ისეთი მოძრავი ფაზით, რომელიც უზრუნველყოფს არაპოლარული ნივთიერებების დაყოფას. ფრონტის ხაზის სორბენტის ფენის კიდესთან მიღწევის შემდეგ, ფირფიტას ამოიღებენ კამერიდან, მოძრავ ფაზას ააორთქლებენ და ხელახლა ახდენენ ელუირებას ისე, რომ მისი ფრონტის ხაზი ჩამორჩებოდეს პირველად გამოყენებული მოძრავი ფაზის ფრონტის ხაზს. საჭიროების შემთხვევაში შეიძლება გამოვიყენოთ მესამე მოძრავი ფაზა და ელუირება განხორციელდეს სანინალმდეგო მიმართულებით, ე.ი. შემოაბრუნებენ ფირფიტას 180° -ით. საფეხურებრივი ქრომატოგრაფია შეიძლება ჩატარდეს ისეთი ნივთიერებების დასაყოფად, რომელთა R_f -მნიშვნელობები ახლოა ერთმანეთთან.

გრადიენტული ქრომატოგრაფიის შემთხვევაში პროცესის მიმდინარეობის შეუწყვეტლად იცვლება მოძრავი ფაზის შემადგენლობა, მასში შემავალი ნივთიერებების კონცენტრაციები, პოლარობა, pH და სხვა, რის შედეგადაც მიიღ-

წევა მრავალკომპონენტიანი ნარევების უკეთესი დაყოფა. გრადიენტული ელუირების მეთოდი მოითხოვს სპეციალურ აპარატულ გაფორმებას ნახ.4.13.



ნახ.4.13. გრადიენტული ელუირების განსახორციელებელი მოწყობილობის სქემა:
 1-გამხსნელის მისაწოდებელი კაპილარი; 2-ფილტრის ქაღალდი; 3-ქრომატოგრაფიის ჩასატარებელი ჭურჭელი; 4-ფირფიტა სორბენტის ფენით; 5- რეზინის რგოლი; 6-ჭარბი გამხსნელის გადმოსასვლელი სივონი; 7-ფოროვანი ტიხარი; 8-მაგნიტური სარეველა

მოდრავი ფაზის პოლარობის გაზრდის მიზნით მარცხნიდან მიენოდება პოლარული გამხსნელი, რომელიც მაგნიტური სარეველის საშუალებით ერევა კამერაში მოთავსებულ არაპოლარულ გამხსნელს. მოძრავი ფაზის მოცულობის შენარჩუნებისთვის იგი თავისუფლად გადმოედინება კამერის მეორე მხრიდან. [6]

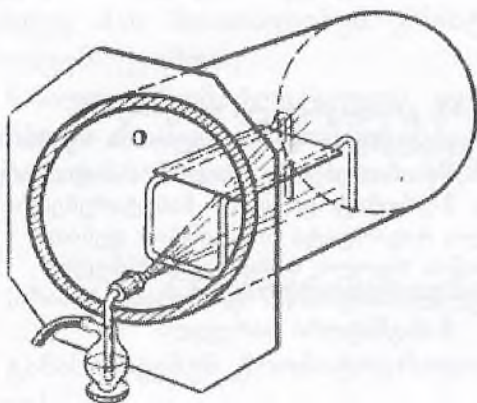
4.1.5. ქრომატოგრამის გამომჟღავნება

საანალიზო ნივთიერებების უმეტესობა უფეროა და ქრომატოგრაფიულ ფირფიტაზე მათი ლაქები არ შეიმჩნევა, თუ არ მოხდა ფირფიტის სპეციალურად გამომჟღავნება. განასხვავებენ გამომჟღავნების ქიმიურ და ფიზიკურ მეთოდებს.

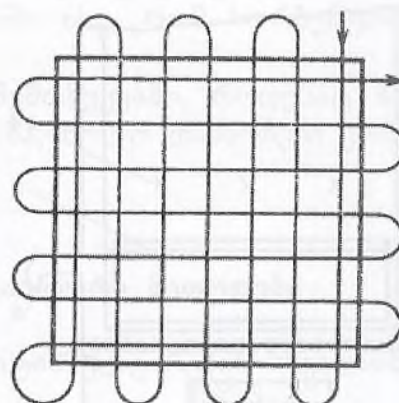
4.1.5.1. ქრომატოგრამის გამომჟღავნების ქიმიური მეთოდი

ქრომატოგრამის ქიმიური მეთოდით დამუშავებისას მას სპეციალურად ასხურებენ რეაქტივებს, რომლებიც ქიმიურ ურთიერთქმედებაში შედიან საანალიზო ნივთიერებებთან და წარმოქმნიან შეფერილ ნაერთებს. თუ შეუძლებელია ერთი რომელიმე რეაგენტის შერჩევა, რომელიც უზრუნველყოფს საანალიზო ნარევის ყველა კომპონენტის შეფერვას, შესხურებას გაიმეორებენ სხვა რეაგენტით. ფირფიტის დამუშავება რეაგენტით ხდება პულვერიზატორით სპეციალურ კამერაში (ნახ.4.14.). გასამჟღავნებელ ფირფიტას ათავსებენ მინის ცილინდრში. წინა მხარეს დახურავენ მინით, რომელსაც აქვს ხვრელი პულვერიზატორისთვის, რომელიც ისეა მოთავსებული, რომ სითხის ნაკადი მიემართებოდეს ფირფიტის ქვემოთ. კამერაში წარმოქმნილი გამამჟღავნებლის ბურუსი კონტაქტირებს სორბენტის ფენასთან და დაზიანების გარეშე ახდენს გამომჟღავნებას. თუ კამერის გამოყენების შესაძლებლობა არ არის, შეიძლება უშუალოდ ფირფიტაზე მოხდეს შესხურება, რისთვისაც მას ჰორიზონტალურად

მოათავსებენ ამწვავ კარადაში და პულვერიზატორის საშუალებით ასხურებენ რეაგენტს ნახ.4.15-ზე ნაჩვენები მიმართულებით.



ნახ.4.14. ქრომატოგრაფიული ფირფიტის გამამუღავნებელი კამერა



ნახ.4.15. ნაკადის მოძრაობის მიმართულება ფირფიტაზე შესხურებისას

ქრომატოგრაფიული ფირფიტის გამომჟღავნებისთვის მიმდინარე ზოგიერთი რეაქცია მოითხოვს გარკვეულ ტემპერატურას, რისთვისაც ფირფიტას რეაგენტით დამუშავების შემდეგ გაახურებენ ინფრანითელი ნათურით ან მოათავსებენ საშრობ კარადაში. ზოგჯერ საჭირო ხდება ფირფიტის გარკვეული დროით რაიმე ნივთიერების (ამიაკი) ორთქლში მოთავსება, რისთვისაც შესაბამისი ნივთიერების ორთქლით გაჯერებულ ჭურჭელს იყენებენ.

4.1.5.2. გამამუღავნებელი ქიმიური რეაგენტები

განასხვავებენ გამამუღავნებელი რეაგენტების ორ ჯგუფს [6,7,11]:

- საერთო დანიშნულების რეაგენტები, რომლებიც მოქმედებენ სხვადასხვა ტიპის ნაერთებთან;
- სპეციალური რეაგენტები, რომლებიც მიუთითებენ გარკვეული ნაერთების ან ფუნქციონალური ჯგუფების არსებობაზე;

4.1.5.2.1. საერთო დანიშნულების რეაგენტები

1. იოდის ორთქლი. ქრომატოგრაფიული ფირფიტის დამუშავება იოდის ორთქლით ერთ-ერთი ყველაზე მარტივი მეთოდია. გამხსნელის აორთქლებისთანავე ფირფიტას მოათავსებენ ჰერმეტიკულად დახურულ ჭურჭელში (ექსიკატორი), რომელშიც მოთავსებულია იოდის კრისტალები და წყალი. 10-15 წთ-ის შემდეგ ფირფიტას ამოიღებენ და იოდის ჭარბ რაოდენობას ააორთქლებენ. შედეგად ხდება სორბენტის მხოლოდ იმ ადგილებისა, რომლებიც შეიცავენ საანალიზო ნივთიერებებს. იოდით კარგად მუღავნდება უჯერი ნაერთები. მაგრამ მისი საშუალებით აღმოჩენილი ლაქები ჰაერზე უფერულდება და ამ პროცესის

თავიდან ასაცილებლად ახდენენ ფირფიტის დამუშავებას 7,8-ბენზოფლავინით, 0.3 გ რეაგენტი იხსნება ეთანოლ-30% გოგირდმჟავაში (95-5), რომელიც იოდთან ინტენსიურ ლურჯ შეფერილობას იძლევა.

2. ბიქრომატი-გოგირდმჟავა. აღნიშნული რეაგენტის მოსამზადებლად 5 გ ნატრიუმის ბიქრომატს ხსნიან 100 მლ 40% გოგირდმჟავაში და მისი მოსხურების შემდეგ ფირფიტას ცოტა ხნით ახურებენ 110°C , რის შედეგადაც ორგანულ ნივთიერებათა ლაქების უმეტესობა იფერება ღია ცისფრად ნარინჯისფერ ფონზე.

3. ფოსფორმოლიბდენ მჟავა. რეაქციაში შედის მთელ რიგ ორგანულ ნაერთებთან. იზოპროპანოლში მისი 5%-იანი ხსნარით ფირფიტის დამუშავება და შემდგომი გახურება 110°C -მდე იძლევა მუქ ცისფერ ლაქებს ყვითელ ფონზე. ფირფიტის შემდგომი დამუშავება ამიაკის ორთქლით ინვეცს ფონის გაუფერულებას. მიღებული ზონები სტაბილურია და შეგვიძლია შევინახოთ სიბნელეში რამდენიმე წლის განმავლობაში.

4. როდამინი B. 50 გ საღებავის 100 მლ ეთანოლში გახსნით მიღებული რეაგენტი ბევრი ორგანული ნივთიერებისთვის იძლევა მოვარდისფერო-იისფერ შეფერილობას ვარდისფერ ფონზე. ლაქების ფერის გაძლიერება ხდება ფირფიტის ბრომის ორთქლით დამუშავებისას, რაც აუფერულებს ფონს.

4.1.5.2.2. სპეციფიური რეაგენტები

ცხრილში 4.1. მოყვანილია ზოგიერთი სპეციალური რეაგენტები, რომლებიც საჭიროა ორგანულ ნივთიერებათა სხვადასხვა კლასების აღმოსაჩენად თხელ ფენაში.

ფუნქციონალური ჯგუფების განსაზღვროსთვის
გამოყენებული რეაქტივები

ცხრილი 4.1.

ნაერთთა კლასები	რეაქტივი	მეთოდика	შედეგი
1	2	3	4
მჟავები	ბრომკრეზოლის მწვანე	0.04 გ 100 მლ ეთანოლში, ემატება 0.1N NaOH ცისფერი შეფერილობის მიღებამდე	ყვითელი ლაქები მწვანე ფონზე
	2,6-დიქლორფენო- ლი-ინდოფენოლი (ნატრიუმის მარილი)	0.1 გ 100 მლ ეთანოლში	წითელი ლაქები იისფერ ფონზე

ცხრილი 4.1. გაგრძელება

1	2	3	4
სპირტები	ვანადიუმ-8-ოქსიზინოლინი	0.1 გ 100 მლ ქლოროფორმში	წითელი ლაქები მწვანე ფონზე
ალდეჰიდები	o-დიანიზიდინი	ნაჯერი ხსნარი ძმარმუავაში	სხვადასხვა ფერის ლაქები
	2,4-დინიტროფენილჰიდრაზინი	0.4 გ 100 მლ 2N HCl	მოყვითალო-წითელი ლაქები ნარინჯისფერ ფონზე
		განმეორებით ამუშავებენ 0.2% ნატრიუმის ფერიციანიდის ხსნარით 2N HCl-ში	მომწვანო-წენგოსფერი ლაქები ყვითელ ფონზე
კეტონები	o-დიანიზიდინი	იხ. ალდეჰიდები	სხვადასხვა ფერის ლაქები
	2,4-დინიტროფენილჰიდრაზინი	იხ. ალდეჰიდები	ცისფერი ლაქები თეთრ ფონზე
ფენოლები	4-ამინოანტიპირინი	ა) 3 გ 100 მლ ეთანოლში; ბ) 8 გ კალიუმის ფერიციანიდი 100 მლ H ₂ O; თანმიმდევრობით ამუშავებენ ა) და ბ) რეაგენტებით და აჩერებენ ამიაკის ორთქლში	წითელი, ნარინჯისფერი ან ვარდისფერი ლაქები მკრთალ ფონზე
ამინები	კობალტის თიოციანატი	3 გ ამონიუმთიოციანატი და 1 გ. კობალტის ქლორიდი 20 მლ წყალში	პირველადი, მეორეული და მესამეული ამინები იძლევიან ცისფერ ლაქებს ვარდისფერ-თეთრ ფონზე
	სალიცილმუავა	1 გ. 100 მლ ტოლუოლში	პირველადი ალიფატური და არომატული ამინები იძლევიან ყვითელ ლაქებს თეთრ ფონზე.
	2,3,-დიქლორ-1,4-ნაფტაქინონი	1 გ. 100 მლ ტოლუოლში	უმეტესი ამინები იძლევიან ნარინჯისფერიდან მუქი წითელი შეფერილობის ლაქებს ღია ნარინჯისფერ ფონზე

4.1.6. ქრომატოგრაფიული ფირფიტის გამომჟღავნების ფიზიკური მეთოდი

ქრომატოგრაფიული ფირფიტის გამომჟღავნების ფიზიკურ მეთოდს მიეკუთვნება ულტრაიისფერი გამოსხივების ზემოქმედება ფირფიტაზე. ზოგიერთი ნივთიერება ულტრაიისფერი სხივების გავლენით იძენენ ფლუორესცენციურ თვისებებს. ეს მეთოდი გამოსადეგია ფუნქციონალური ჯგუფების შემცველი ნივთიერებების, ამინომჟავების და მათი წარმოებულების აღმოსაჩენად.

თუ ნივთიერებას თვითონ არ გააჩნია ფლუორესცენციის უნარი, სორბენტის ფენის მომზადებისას მას დაუმატებენ ფლუორესცენციურ ინდიკატორს, მაგალითად, თუთიის სულფიდს. ფირფიტის დასხივებით ულტრაიისფერი სხივებით, შეიმჩნევა მუქი ლაქები და ახდენენ მათ ფიქსირებას. ფანქრით აღნიშნავენ ლაქების კონტურებს უშუალოდ სორბენტზე ან კალკაზე. თუ მაფლუორესცენცირებელი ნივთიერება წინასწარ არ დაემატება სორბენტს, მოძრავი ფაზის აორთქლების შემდეგ ფირფიტას შეასხურებენ რომელიმე ფლუორესცენციური ნივთიერების ხსნარს. დასხივებას უმეტესად ახდენენ მაქსიმალური ტალღის სიგრძის (254 და 365 ნმ) ულტრაიისფერი გამოსხივების წყაროთი.

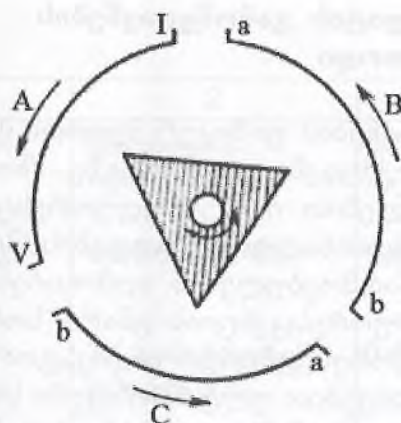
რადიაქტიული ნივთიერებების ლაქების აღმოსაჩენად იყენებენ რადიოაქტოგრაფიის მეთოდს, რომლისთვისაც გამხსნელის აორთქლების შემდეგ ფირფიტას გარკვეული დროით დააფენენ ფოტომგრძნობიარე ფირს, რომლის გამომჟღავნების შემდეგ მასზე შეიმჩნევა რადიაქტიური ნივთიერებების შესაბამისი შავი ლაქები [7].

4.1.7. მოძრავი ფაზების შერჩევა თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიული მეთოდისთვის

მოძრავი ფაზის შერჩევა თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში ხდება თითქმის იგივე მოთხოვნების მიხედვით, როგორც სვეტურ ქრომატოგრაფიაში. უპირველეს ყოვლისა მხედველობაში მიიღება სორბენტის ბუნება და საანალიზო ნივთიერების თვისებები.

ორგანული ნივთიერებების დასაყოფად მოძრავ ფაზად იყენებენ არა ინდივიდუალურ გამხსნელებს, არამედ ორ ან სამ კომპონენტიან ნარევეს. ამასთანავე მხედველობაში მიიღება ის გარემოება, რომ ხდება თვით მისი დაყოფა შემადგენელ კომპონენტებად, ე.ი. მივიღებთ სხვადასხვა გამხსნელების რამდენიმე ფრონტს მათი რაოდენობის შესაბამისად. საანალიზო ნივთიერების ზონების მიძრაობის სიჩქარე განსხვავდება ფრონტის გადაადგილების სიჩქარისგან, მის დაყოფას რომ არ ჰქონოდა ადგილი. ამიტომ, R_f -ს განსაზღვრავენ როგორც სტარტის ხაზიდან ლაქის ცენტრამდე მანძილის ფარდობას, ყველაზე სწრაფად გადაადგილებადი კომპონენტის ფრონტამდე მანძილთან.

არაორგანული იონების ანალიზისთვის იყენებენ როგორც ორგანული ნივთიერებების მრავალკომპონენტიან ნარევს, ასევე წყლიან ბუფერულ ხსნარებს. ყველა შემთხვევაში გამხსნელი უნდა იყოს ადვილად აქროლადი, რაც უზრუნველყოფს მის სწრაფ აორთქლებას ფირფიტიდან.



ნახ.4.16. თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიული მეთოდის პირობების შესარჩევი სქემა.

A-სორბენტის აქტივობა (ბროკმანის მიხედვით I-V);

B-გამხსნელები; C-საანალიზო ნივთიერებები;

a-პოლარული; b-არაპოლარული

თიერებებს. თუ სამკუთხედის ქვედა წვეროს მოვათავსებთ C შკალის ბოლოსთან (a-სთან ახლოს), სამკუთხედის მარჯვენა წვერო მიგვითითებს შესაბამის გამხსნელზე, მარცხენა კი საჭირო სორბენტს.

ხშირად გამხსნელის შესარჩევად იყენებენ წრიულ ქრომატოგრაფიას მისი სისწრაფის გამო. ამისათვის შერჩეული სორბენტის ფენაზე მოათავსებენ რამდენიმე სინჯს და ცოტა ხნის შემდეგ ცენტრში დაიტანენ სავარაუდო გამხსნელს. ქრომატოგრაფირების შემდეგ ფირფიტას გაამჟღავნებენ და წარმოქმნილი კონცენტრული ზონების მიხედვით შეარჩევენ შესაბამის გამხსნელს.

ცხრილში 4.2. მოყვანილია ადსორბციულ თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული ზოგიერთი გამხსნელები კონკრეტული საანალიზო ნივთიერებებისთვის:

ცხრილი 4.2.

თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული ზოგიერთი გამხსნელები სხვადასხვა კლასის ნივთიერებების დასაყოფად

საანალიზო ნივთიერებები	მოძრავი ფაზები
ოლეფინური ნახშირწყალბადები	ჰექსანი
ანტრაცენი და მისი წარმოებულები	მეთანოლი-დიეთილეთერი-წყალი. (4:4:1)
ალიფატური სპირტები	ბენზოლი-დიეთილეთერი (2:3)
ალიფატური ალდეჰიდები	ბენზოლი-წყალი (49:4)
კარბონმჟავები	პირიდინი-პეტროლეუმეთერი (1:2)
ფენოლები	ქლოროფორმი-ქსილოლი (3:1)
ნახშირწყლები	ტოლუოლი-ეთილაცეტატი-ეთანოლი-96% (2:1:1)
ამინომჟავები	n-ბუტანოლი-ყინულოვანი ძმარმჟავა-წყალი (4:1:1)

ადსორბციული ქრომატოგრაფიის შემთხვევაში გამხსნელების შერჩევისთვის გამოიყენება შტალის მიერ შემოთავაზებული სქემა (ნახ.4.16), რომლის გამოყენების პრინციპი შემდეგია: დაშტრიხულ სამკუთხედს შეუძლია ბრუნვა. თუ მის ერთ წვეროს გავაჩერებთ საანალიზო ნივთიერების შესაბამის თვისებებთან, მაშინ დანარჩენი ორი წვერო გვიჩვენებს სორბენტის და გამხსნელის თვისებებს. მაგალითად, დავუშვათ რომ საანალიზო ნარევი შეიცავს პოლარულ ნივ-

4.1.8. თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია ელუენტის იძულებითი მოძრაობით

თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიის ყველა ზემოთ განხილულ ვარიანტში ელუენტი მოძრაობს კაპილარული ძალების გავლენით, რაც გარკვეულწილად აფერხებს დაყოფის მაღალი ეფექტურობის მიღწევას ($N > 5000$ თეორიული თეფში). უკანასკნელ წლებში შემუშავებული ელუენტის იძულებითი გადაადგილების მეთოდი საშუალებას გვაძლევს აღმოვიფხვრას ეს ნაკლოვანება [1].

თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია წნევის ქვეშ. შექმნილია სპეციალური ხელსაწყოები, რომელთა კამერაშიც ქრომატოგრაფირება შეიძლება განხორციელდეს დაბალი, საშუალო ან მაღალი წნევის ქვეშ.

ამ მეთოდის გამოყენებით შეგვიძლია პარალელურად, სწრაფად და ეფექტურად დავყოთ ბევრი სინჯი, რაც მეთოდის უპირატესობას წარმოადგენს. მცირე ზომის მარცვლების (< 5 მკმ) მქონე სორბენტების და ბლანტი ელუენტების გამოყენებით შესაძლებელია საანალიზო ნარევის ელუირება მცირე დროში, როგორც ანალიზური, ასევე პრეპარატიული მიზნებისთვის. მაგრამ მისი უარყოფითი მხარეა სორბენტის ფენის ხარისხისადმი მეტად მაღალი მოთხოვნები.

როტაციული თხელფენოვანი ქრომატოგრაფია. სორბენტის ფენის გასწვრივ ელუენტის მოძრაობა ჩქარდება ცენტრიდანული ძალების გავლენით. ამისათვის ფირფიტის ცენტრში კეთდება ხვრელი, რომლის საშუალებითაც იგი მაგრდება ცენტრიფუგაზე. ცენტრალური ხვრელიდან 2.5 სმ მანძილის დაშორებით დაიტანება სინჯი და მიეწოდება ელუენტი თანაბარი სიჩქარით. ცენტრიფუგის ბრუნვის სიჩქარეა 500-700 ბრ/წთ. ანალიზის ხანგრძლივობა მნიშვნელოვნად მცირდება, დაახლოებით 1-1.5 წთ. დაყოფის პროცესზე დაკვირვება შეიძლება ულტრაიისფერი ლამპით.

4.1.9. თხელფენოვანი ქრომატოგრაფიის გამოყენების ზოგიერთი მაგალითი

1. სილიკაგელი-თაბაშირის ფენაში ჰექსანის, როგორც ელუენტის გამოყენებით, შეიძლება მოხდეს არომატული ნახშირწყალბადების იდენტიფიკაცია. ულტრაიისფერ გამოსხივების ზემოქმედებით და ფლუორესცენის 0.05%-იანი ხსნარის გამოყენებით აღმოჩენილი იქნა ხუთი არომატული ნახშირწყალბადი.
2. ალიფატური სპირტები C_4-C_8 შეიძლება დაიყოს ალუმინის ოქსიდის III/IV აქტივობის დაუმაგრებელი ფენაზე. ელუენტის სახით გამოიყენებოდა ჰექსან-აცეტონის (3:1) ნარევი. ლაქების აღმოჩენის მიზნით ქრომატოგრამას ამუშავებდნენ იოდის ორთქლით და შემდგომ ულტრაიისფერი გამოსხივებით ან შეასხურებენ $AgNO_3$ -ის 5%-იან ხსნარს 10%-იან ამიაკში.
3. მრავალატომიანი სპირტები კარგად იყოფიან თაბაშირის ფენაზე ქლოროფორმი-მეთანოლის (9:1) სისტემაში. ლაქების აღმოჩენა ხდება ფირფიტაზე

- კონცენტრირებული ფოსფორმჟავის შესხურებით და შემდეგ $100-120^{\circ}\text{C}$ -ზე გახურებით.
4. კარბონილის ჯგუფის სხვადასხვა მდებარეობის რვაზე მეტი ნახშირბადის ატომის შემცველი ალიფატური ალდეჰიდები და კეტონები იყოფა სილიკაგელი-თაბაშირის ფენაზე ბენზოლით, ტოლუოლით და პეტროლეუმეთერით. ლაქების აღმოჩენა ფირფიტაზე ხდება ფოსფორმოლიბდენ-მჟავით.
 5. პენიცილინის ჯგუფის ანტიბიოტიკები იყოფიან სილიკაგელი-თაბაშირის ფენაზე აცეტონი-მეთანოლის (1:1) და იზოპროპანოლი-მეთანოლის (3:7) სისტემებით. ლაქების აღმოსაჩენად ფირფიტას შეასხურებენ იოდის 0.1N-ის ხსნარს, რომელიც შეიცავს ნატრიუმის აზიდის 3.5%-იან ხსნარს. აღმოჩენის ქვედა ზღვარია 1-2 მკგ.
 6. ტეტრაციკლინი, ოქსიტეტრაციკლინი, ქლორტეტრაციკლინი და ანჰიდროტეტრაციკლინი შეიძლება დაიყოს სილიკაგელი-თაბაშირის ფენაზე 10%-იანი ლიმონმჟავას ხსნარით ან n-ბუთანოლი-მეთანოლი-10%-იანი ლიმონმჟავას ნარევით (4:1:2), (4:2:2). ქრომატოგრამის გამომჟღავნება ხდება მასზე 1N მარილმჟავას შესხურებით და 1 წთ-ის განმავლობაში 50°C -ზე გაცხელებით.
 7. Cu-ის ჯგუფის კათიონები (Cu, Pb, Cd, Bi, Hg) იყოფიან სილიკაგელი-თაბაშირის ფენაზე. ელუენტის სახით გამოიყენება 100 მლ n-ბუთანოლის, 20 მლ 1.5 N HCl და 0.5 მლ აცეტილაცეტონი. ლაქების აღმოსაჩენად ქრომატოგრამას ასხურებენ კალიუმიოდიდის 2%-იანი ხსნარს, ამრობენ, ათავსებენ ამიაკის ორთქლის ზემოთ და შემდეგ გადაიტანენ გოგირდწყალბადით შევსებულ კამერაში.
 8. ტუტე ჯგუფის კათიონებს ყოფენ აცეტატის სახით სილიკაგელი-სახამებლის ფენაზე. ელუენტი: 100 მლ აბსოლუტური სპირტი-1 მლ ძმარმჟავა. ლაქების გამოსამჟღავნებლად ფირფიტაზე შეასხურებენ გამოხდილ წყალში ვიოლურმჟავას 1.5%-იანი ხსნარს.
 9. ჰალოგენიდებს ყოფენ სილიკაგელი-თაბაშირის ფირფიტაზე. ელუენტი: 65 მლ აცეტონი-20 მლ n-ბუთანოლი-10 მლ კონცენტრირებული ამიაკის ხსნარი-5 მლ გამოხდილი წყალი. ლაქების აღმოჩენისთვის იყენებენ შემდეგ ოპერაციებს: 1) ფირფიტას შეასხურებენ ბრომკრეზოლის 0.1%-იან ხსნარს ეთანოლში, რომელსაც უმატებენ ერთ წილ ამიაკს. 2) ფირფიტას შეასხურებენ ვერცხლის ნიტრატის ამიაკიან ხსნარს და ეთანოლში გახსნილ ფლუორესცეინის 0.1%-იან ხსნარს. შემდეგ კი დაამუშავენ ულტრაიისფერი გამოსხვებით.

თავი 4.2. ქრომატოგრაფია ქაღალდზე

4.2.1. ზოგადი მიმოხილვა

ქრომატოგრაფია ქაღალდზე სიბრტყითი ქრომატოგრაფიის ერთ-ერთი ვარიანტია. მისი გამოყენების მცდელობა რკინის სულფატის აღმოსაჩენად სპეციალური ექსტრაქტით გაჟღენთილი პაპირუსის საშუალებით ჯერ კიდევ XIX საუკუნის შუახანებში განხორციელდა. მაგრამ ამ მეთოდის აღმოჩენის და განვითარების ისტორია დაკავშირებულია მარტინის, კონსდენის, გორდონის და სინჯის სახელებთან, რომლებმაც 1944 წ. გამოიყენეს იგი ამინომჟავების ნარევების ანალიზისთვის. აღსანიშნავია, რომ 1952 წლიდან დაიწყო ამ მეთოდის გამოყენების სფეროდან თანდათანობითი გამოდევნა. მან ადგილი დაუთმო თავის „უმცროს დას“- თხელფენოვან ქრომატოგრაფიას, რომელიც უფრო ეფექტური აღმოჩნდა ექსპერიმენტის ჩატარების სისწრაფისა და საანალიზო ნივთიერებების აღმოჩენის ფართო შესაძლებლობის გამო.

ქაღალდზე ქრომატოგრაფიული ანალიზის უმარტივესად ჩასატარებლად საკმარისია საანალიზო ნივთიერებების შემცველი ხსნარის პატარა წვეთი დავიტანოთ ფილტრის ქაღალდზე კიდესთან. როდესაც წვეთი გაშრება, ფილტრის ქაღალდს ჩაუშვებენ გამხსნელში (ძირითადად ორგანული გამხსნელის წყალხსნარი). კაპილარული ძალების გავლენით გამხსნელი იწყებს მოძრაობას და როდესაც მიაღწევს სინჯის ლაქას, მოახდენს მის დაყოფას შემადგენელ კომპონენტებად [6,12,13].

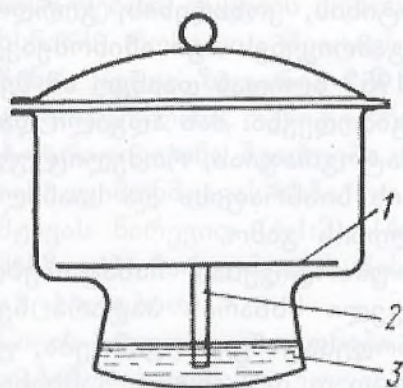
ისევე როგორც ქრომატოგრაფიის ნებისმიერი ვარიანტის შემთხვევაში, ქრომატოგრაფია ქაღალდზე შეიძლება განხორციელდეს განაწილებითი, ადსორბციული და იონმიმოცვლითი მექანიზმის მიხედვით, რაც იმაზეა დამოკიდებული, თუ როგორია უძრავი ფაზა, რომლითაც გაჟღენთილია ქაღალდი.

სპეციალური ქრომატოგრაფიული ქაღალდი უძრავი ფაზის მატარებელს წარმოადგენს, რომელსაც შეუძლია თავის ფორებში შეაკავოს გარკვეული რაოდენობის სითხე. განასხვავებენ ორი ტიპის ქაღალდს: **ჰიდროფილურს**, რომელსაც შეუძლია ფორებში შეაკავოს წყლის მოლეკულები და **ჰიდროფობულს**, სპეციალურად მომზადებულ ქაღალდს, რომელსაც შეუძლია შეაკავოს არაპოლარული ორგანული სითხეები.

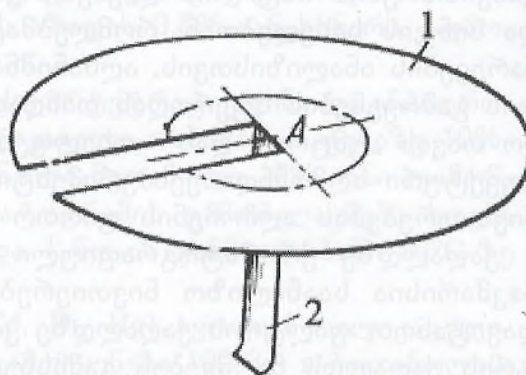
ქაღალდზე ქრომატოგრაფიის მიღების მეთოდიკა ისეთივეა როგორც თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში. ქრომატოგრაფიული ზონების მოქმედება ქაღალდზე ხასიათდება R_f -სიდიდით, რომლის გამოსათვლელი ფორმულა ისეთივეა, როგორც თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში. იდეალურ პირობებში R_f ახასიათებს კომპონენტის ზონის გადაადგილების სიჩქარეს ქაღალდის გასწვრივ. ეს სიდიდე დამოკიდებული არ არის სხვადასხვა ფაქტორებზე და განისაზღვრება მხოლოდ განაწილების კოეფიციენტით. პრაქტიკაში კი საანალიზო ნივთიერების მოძრაე ფაზასთან ურთიერთქმედების, ქაღალდის ბოჭკოების არასწორი განლაგების და სხვა ფაქტორების გამო, R_f -დამოკიდებულია ქაღალდის ტიპზე, ექსპერიმენტის ტექნიკაზე და სხვა. R_f -ის მნიშვნელობები არის ზღვრებში $0 \div 1$. როდესაც იგი ახლოა ერთთან, ნარევი არ იყოფა, ნულთან კი ზონების მოძ-

რაობა შენელებულია. საანალიზო ნარევის ორი მეზობელი კომპონენტის სრული დაყოფისთვის R_f -ის მნიშვნელობა უნდა განსხვავდებოდეს ერთმანეთისგან. მისი საუკეთესო მნიშვნელობა $0.1 \div 0.8$ ზღვრებში იქნება.

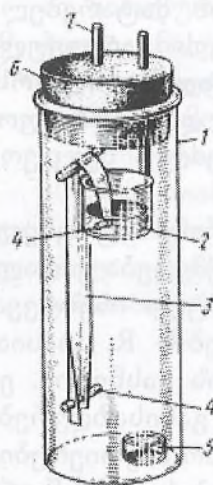
განხილული მეთოდით ანალიზის ჩატარების მეთოდის იგივეა რაც თხელ-ფენოვან ქრომატოგრაფიაში. ანალიზი შეიძლება ჩატარდეს აღმავალი, დამავალი ან წრიული ქრომატოგრაფიის მეთოდით. ნახ.4.17., 4.18. და 4.19-ზე მოყვანილია სპეციალური მოწყობილობები ქრომატოგრაფიული ანალიზის ჩატარებისთვის:



ნახ.4.17. წრიული ქრომატოგრამის მიღების სქემა
1-ქაღალდის ფილტრი; 2-პატრუქი;
3-მოძრავი ფაზა

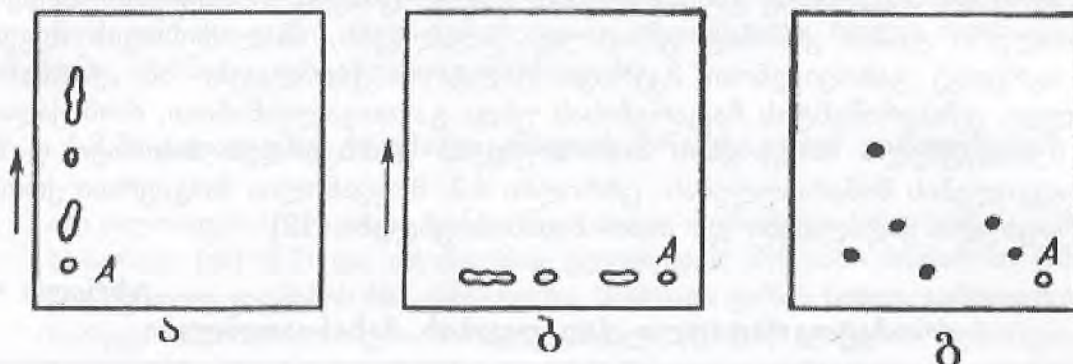


ნახ.4.18. წრიული ქრომატოგრამის მისაღები ქაღალდის ფორმა
A-ხსნარის წვეთის დატანის ადგილი;
1-ქაღალდის წრე; 2-ქაღალდის ამონაჭერი მოძრავი ფაზის მისაწოდებლად



ნახ.4.19. დამავალი ქრომატოგრამის მისაღები კამერის სქემა
1-ცილინდრი; 2-მოძრავი ფაზის რეზერვუარი;
3-ქაღალდის ზოლი; 4-ტვირთი; 5-ბიუქსი უძრავი ფაზით;
6-კორპის საცობი; 7-მინის Γ-ებური წკირი.

თუ გამოყენებული მოძრავი ფაზით არ ხდება საანალიზო ნარევის დაყოფა, მიმართავენ ორგანზომილებიან ქრომატოგრაფირების მეთოდს, რისთვისაც იყენებენ 20×20 სმ, 30×30 სმ ან 40×40 სმ ზომის კვადრატულ ქაღალდის ფურცლებს. ანალიზის დაწყებისას საანალიზო ხსნარის წვეთს დაიტანენ ქაღალდის მარცხენა კუთხეში კიდებიდან 5 სმ-ის დაშორებით (ნახ.4.20. ა).



ნახ.4.20. ორგანზომილებიანი ქრომატოგრამის სქემა

A-საანალიზო ნარევის წვეთის დასატანი ადგილი;

- ა) პირველი ქრომატოგრამა — ექვსკომპონენტიანი ნარევი არ იყოფა;
- ბ) იგივე ქრომატოგრამა მეორე მოძრავ ფაზაში მოთავსების წინ;
- გ) მეორე ქრომატოგრაფირების ქრომატოგრამა — ნარევი სრულად დაიყო

ისრით ნაჩვენებია მოძრავი ფაზის ფრონტის მიმართულება.

წარმოქმნილი ლაქების გაშრობის შემდეგ ქაღალდს ათავსებენ შესაბამის ქრომატოგრაფიულ ჭურჭელში და ახდენენ ქრომატოგრაფირებას აღმავალი მეთოდით. როდესაც მოძრავი ფაზის ფრონტი მიაღწევს სასურველ დონეს, ქრომატოგრაფირებას წყვეტენ, ქაღალდს აშრობენ და აბრუნებენ 90° საათის ისრის საწინააღმდეგო მიმართულებით. ამის გამო სინჯის დატანის ადგილი მოექცევა მარჯვნივ. ხაზი, რომლის გასწვრივაც ხდება საანალიზო ნივთიერებების ზონების აწევა, წარმოქმნის სტარტის ახალ ხაზს. (ნახ.4.20. ბ.) ქაღალდს ამ მდგომარეობაში ათავსებენ კვლავ ქრომატოგრაფიულ ჭურჭელში ისე, რომ მისი ქვედა ბოლო ჩაშვებული იყოს სხვა შედგენილობის მოძრავ ფაზაში და ახდენენ აღმავალ ქრომატოგრაფირებას. ახალი მოძრავი ფაზის ფრონტის სასურველი დონის მიღწევის შემდეგ წყვეტენ ანალიზს, ქაღალდს ამოიღებენ, გააშრობენ და გაამჟღავნებენ. შედეგად მიიღება ორგანზომილებიანი ქრომატოგრამა (ნახ.4.20. გ.).

4.2.2. ქრომატოგრაფიული ქაღალდი

ქრომატოგრაფიულ პროცესებში გამოიყენება ქიმიურად სუფთა, ნეიტრალური ქაღალდები, რათა არ მოხდეს მასზე საანალიზო ნივთიერებების და მოძრავი ფაზის ადსორბცია. ქრომატოგრაფიული ქაღალდი ერთნაირი სიმკვრივის უნდა იყოს მის ნებისმიერ ადგილზე და უზრუნველყოს მოძრავი ფაზის გადაადგილება გარკვეული სიჩქარით. მეტად მნიშვნელოვანია აგრეთვე შემადგენელი

ბოჭკოების სტრუქტურა და ორიენტაცია. ყოველივე ამის გარეშე შეუძლებელია ქრომატოგრაფიული ანალიზის წარმატებით ჩატარება.

ქიმიურად სუფთა ქაღალდის მისაღებად სასაქონლო ნიმუშებს ამუშავებენ სხვადასხვა რეაგენტებით, მაგალითად, ამინომარმუავით, 8-ოქსიქინოლინით და სხვა. ისინი ქაღალდში არსებულ იონებთან წარმოქმნიან ხსნად კომპლექსებს, რომელთაც შემდეგ გამხსნელებით გამორეცხავენ. პრაქტიკაში იყენებენ სპეციალური ტიპის ქრომატოგრაფიულ ქაღალდებს, ანალიზისთვის შეგვიძლია აგრეთვე გამოვიყენოთ მკვრივი ფილტრის ქაღალდები ან „ვატმანის“ ქაღალდი. ექსპერიმენტის ჩატარებისას უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ქაღალდის შემადგენელი ბოჭკოების მიმართულება ემთხვეოდეს მოძრავი ფაზის გადაადგილების მიმართულებას. ცხრილში 4.3. მოყვანილია ზოგიერთი ქრომატოგრაფიული ქაღალდები და მათი მახასიათებლები [12].

ცხრილი 4.3.

ქრომატოგრაფიული ქაღალდების მახასიათებლები

ქაღალდის მარკა	ხვედრითი მასა, გ/მ ²	სისქე, მმ	30სმ სიმაღლეზე წყლის კაპილარუ- ლი ანევის ხანგრძლივობა, წთ	ნაცრიანობა, %	გამოყენების ხასიათი
ვატმანი №1	85-89	0.16	140-220	0.06-0.07	სტანდარტული
№3 MM	180	0.31	140-180	0.06-0.07	პრეპარატული
№4	90-95	0.19	70-100	0.06-0.07	სწრაფმოქმედი
№31 ET	190	0.5	60-120	0.025	განსაკუთრებით სწრაფმოქმედი
№54	90-95	0.17	60-120	0.025	სწრაფმოქმედი

ჩვეულებრივი ტიპის ქაღალდები ჰიდროფილურია და მშრალ მდგომარეობაში შეიცავენ 20-22% წყალს, რაც სრულიად საკმარისია, რომ უძრავ ფაზად გამოყენებული იქნას წყალი, ხოლო მოძრავ ფაზად წყალში უხსნადი ორგანული სითხეები.

ჰიდროფობული ქაღალდის მისაღებად, ჩვეულებრივ ჰიდროფილურ ქაღალდს სპეციალურად ამუშავებენ. მას გაჟღენთავენ სხვადასხვა ჰიდროფობული ნივთიერებებით. დამუშავებას ახდენენ პეტროლეუმის ეთერში პარაფინის 1%-იანი ხსნარით ან სუფთა მცენარეული ზეთის დიეთილეთერში 1-2%-იანი ხსნარით. გაჟღენთვის დამთავრების და გამხსნელის აორთქლების შემდეგ ქაღალდის ჰიდროფობულობის შესამოწმებლად მასზე დაიტანენ ერთ წვეთ წყალს. წყალმა ქაღალდი არ უნდა დაასველოს, მასზე უნდა ჩამოედინოს.

ჰიდროფობულ ქაღალდზე ქრომატოგრაფიას იყენებენ წყალში უხსნადი ნივთიერებების ანალიზისთვის. მან მიიღო შებრუნებულ ფაზური მეთოდის სახელი, რადგან უძრავი ფაზა არის არაპოლარული გამხსნელი (ნახშირწყალბადი), ხოლო მოძრავი ფაზა პოლარული (სპირტების, წყალხსნარები, ორგანული მჟავები).

წყალში ხსნადი ნივთიერებების ანალიზისთვის მიმართავენ ჰიდროფილურ ქაღალდს. უძრავი ფაზა ასეთ შემთხვევაში არის წყალი, ხოლო მოძრავი ფაზა – წყალში უხსნადი ორგანული გამხსნელები.

4.2.3. ქაღალდზე ქრომატოგრაფიის პრაქტიკული გამოყენება*

- 1) ალკალოიდების დაყოფა განხორციელდა ამონიუმის სულფატის 2%-იანი ხსნარით ($\text{pH}=5.7$) და ამონიუმის ქლორიდის 2%-იანი ხსნარით ($\text{pH}=6.6$) გაუფლენთილ ვატმანის №1 ქაღალდზე. მოძრავი ფაზის სახით გამოიყენებოდა ნარევი: იზოპროპანოლი-ძმარმჟავა-წყალი (10:1:2). ლაქების აღმოჩენა ხდებოდა დრაგენდორფის რეაქტივით, რომელიც ლაქებს ღებავს აგურისფერ-წითელ ფერად, ყვითელ ფონზე.
- 2) ტეტრაციკლინის ჯგუფის ანტიბიოტიკები შეიძლება დაიყოს ბუთილაცეტატი-მეთილიზობუთილკეტონი-*n*-ბუთანოლი-წყალი სისტემის გამოყენებით ტენიან ქაღალდზე. ასეთ პირობებში რეკომენდებულია წრიული ქრომატოგრაფია. ამ ნაერთების აღმოჩენა ხდება მათი ფლუორესცენციური ინტენსივობის მიხედვით, რომელიც ძლიერდება ტუტე არეში (ამიაკის ორთქლის ზემოქმედებით).
- 3) ტუტე-მიწათა მეტალები, Ca, Sr, Ba და Mg იონები იყოფა წრიული ქრომატოგრაფიის მეთოდით გაუფლენთავ ქაღალდზე. ელუირებისთვის გამოიყენებოდა მეთანოლი-ეთანოლის სისტემა, ხოლო აღმოჩენა ხდებოდა ვიოლურმჟავით ან 8-ოქსიქინოლინით.
- 4) ნიკელის, კობალტის და სპილენძის ნარევი შეიძლება დაიყოს გაუფლენთავ ქაღალდზე ელუენტის სახით აცეტონი-6N მარილმჟავას (19:1) ან აცეტონი-ბუთანოლი-კონც. მარილმჟავა-აცეტილაცეტონი (28:15:16:1). აღმოჩენა შეიძლება განხორციელდეს ეთანოლში რუბენამჟავას 0.5%-იანი ხსნარის შესხურებით და შემდგომ ქრომატოგრამის მოთავსებით ამიაკის ორთქლში. რის შედეგადაც ნიკელის ლაქები შეიღებება ცისფრად, სპილენძი — მომწვანო-წენგოსფრად და კობალტი კი მოყვითალო-ყავისფრად.

* დღეისათვის პუბლიკაციების რიცხვი ამ მეთოდის გამოყენების შესახებ მნიშვნელოვნად შემცირდა.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Сакодынский К.И., Бражников В.В. и др. Аналитическая хроматография. М.; Химия, 1993, 469 с.
2. Высокоэффективная тонкослойная хроматография. Пер. с английского, под редакцией Златкиса А., Кайзера Р. М.; Мир, 1979, 245 с.
3. Кирхнер Ю. Тонкослойная хроматография. В 2-х томах. Пер. с английского, под редакцией Соколова Д.Н. и Яновского М.И. М.; Мир, 1981, 1139 с.
4. Измайлов Н.Л., Шрайбер М.С. Фармация. 1938, №3, с. 1-6
5. Шталь Э. Хроматография в тонких слоях. Пер. с немецкого, под редакцией Шталя Э. М.; Мир, 1965, 508 с.
6. Перри С., Амос Р., Брюер П., Практическое руководство по жидкостной хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Чмута К.В. М.; Мир, 1974. 260 с.
7. Айвазов Б.В. Введение в хроматографию. М.; Высшая школа, 1983, 239 с.
8. Ахрем А.А., Кузнецова А.И. Тонкослойная хроматография. М.; Наука, 1964, 175 с.
9. Беленький Б.Г., Виленчик Л.З. Хроматография полимеров. М.; Наука, 1978, 343 с.
10. Гейсс Ф. Основы тонкослойной хроматографии. В 2-х томах. Пер. с английского, под редакцией Березкина В.Г. М.; 1999, 753 с.
11. Прохазка З., Шебеста К., Томашек В., Гейтманек М. Бумажная хроматография. Лабораторное руководство по хроматографическим и смежным методам. В 2-х частях. Пер. с английского, под редакцией Березкина В.Г. М.; Мир, 1982, т. 1, с. 58-151
12. Блок Р., Лестранж Р., Цвейг Г. Хроматография на бумаге. Пер. с английского, под редакцией Гаузе Г.Ф. М.; И.Л., 1954, с. 212

ნაწილი 5. რაოდენობითი ანალიზი

თავი 5.1. რაოდენობითი ანალიზი სვეტური ქრომატოგრაფიული მეთოდებისთვის

5.1.1. ზოგადი მიმოხილვა

მიღებული ქრომატოგრამის ინტერპრეტაცია ქრომატოგრაფიული ანალიზის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი საფეხურია. როგორც უკვე აღვნიშნეთ (თავი.1.1), დიფერენციალური ქრომატოგრამა შედგება თანმიმდევრულად განლაგებული პიკებისაგან, რომელთა რიცხვიც სრული დაყოფის დროს შეესაბამება საანალიზო ნარევის შემადგენელი კომპონენტების რაოდენობას. მიღებული ქრომატოგრამის რაოდენობრივი დამუშავების საფუძველია პიკის ფართის ან მისი სიმაღლის დამოკიდებულება სვეტში შეყვანილი ნივთიერების რაოდენობასთან (q). კონცენტრაციული და ნაკადური ტიპის დეტექტორებისთვის პიკის ფართი პირდაპირპროპორციულია დეტექტორში მოხვედრილი ნივთიერების რაოდენობისა [1].

$$Q = Bq/u \quad \text{და} \quad Q = A_p q \quad (5.1)$$

სადაც, Q - პიკის ფართია; B - მუდმივა; A_p - პროპორციულობის კოეფიციენტი; q - ნივთიერების რაოდენობა და u - აირმატარებლის მოცულობითი სიჩქარე. როგორც ფორმულებიდან ჩანს, რადგან კონცენტრაციულ დეტექტორში უკუპროპორციული დამოკიდებულებაა პიკის ფართობსა და აირმატარებლის სიჩქარეს შორის, სიჩქარის ცვლილებით იცვლება პიკის ფართობი, ხოლო მისი სიმაღლე უცვლელი რჩება, რის გამოც ნივთიერების კონცენტრაცია უმჯობესია განისაზღვროს პიკის სიმაღლის მიხედვით. ნაკადურ დეტექტორებში კი პიკის ფართობი პირდაპირპროპორციულია დეტექტორის კამერაში გამავალი ნივთიერების რაოდენობისა და იგი არ არის დამოკიდებული აირმატარებლის სიჩქარეზე. რაც შეეხება პიკის სიმაღლეს, ასეთ შემთხვევაში ის იცვლება და ამის გამო ნივთიერების რაოდენობა უმჯობესია განისაზღვროს პიკის ფართობის მიხედვით.

რაოდენობითი ქრომატოგრაფიული ანალიზის ცდომილება დასახული ამოცანის ხასიათის მიხედვით მერყეობს, მეათედიდან რამდენიმე ათობითი პროცენტის ფარგლებში. კერძოდ: აპარატურის სწორი შერჩევით და პროცესის ჩატარების პირობებით; მიღებული პიკის განმსაზღვრელი პარამეტრის (სიმაღლე, ფართობი) სწორი შერჩევით და მისი გაზომვით; ქრომატოგრამის გაანგარიშების ოპტიმალური მეთოდის შერჩევით და გრაფიკების კოეფიციენტების სწორად გამოყენებით. ყველა ჩამოთვლილი ფაქტორი ერთმანეთთან ურთიერთკავშირშია და გავლენას ახდენენ მიღებულ შედეგებზე.

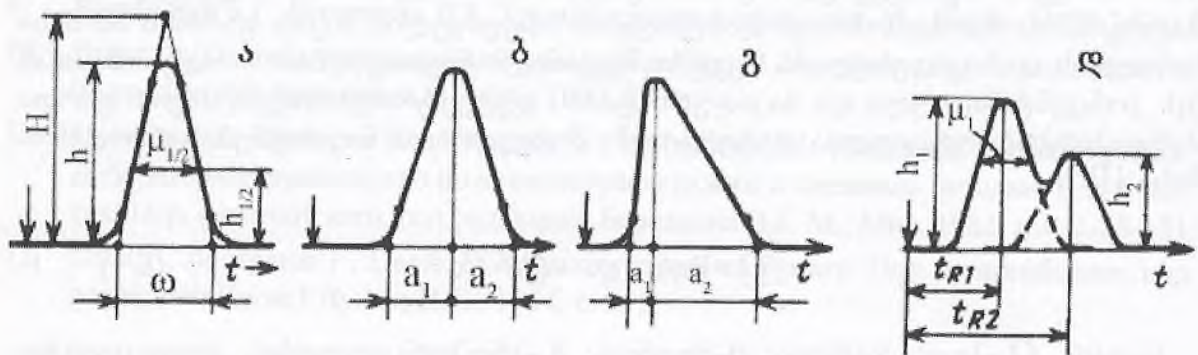
თუ ქრომატოგრაფიული ანალიზის ჩატარებისას გავითვალისწინებთ ყველა ზემოთ ჩამოთვლილ ფაქტორს, რთული ნარევების დაყოფის შემთხვევაშიც კი მიიღწევა მაღალი სიზუსტე.

რაოდენობითი ანალიზის ამოცანებია:

- ნარევის ერთ-ერთი ან რამდენიმე კომპონენტის განსაზღვრა;
- მრავალკომპონენტიანი ნარევის ინდივიდუალური (ან ჯგუფური) შემადგენლობის განსაზღვრა.

თითოეულ კონკრეტულ ამოცანას გააჩნია თავისი დასაშვები ცდომილების ან ანალიზის ხანგრძლივობის ზღვარი, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ლაბორატორიულ პირობებში ექსპერიმენტის ჩატარებისას.

რაოდენობითი გაანგარიშებისთვის გამოყენებული ქრომატოგრაფიული პიკის ძირითადი პარამეტრებია: პიკის სიმაღლე h ; მისი სიგანე პიკის სიმაღლის ნახევარზე- $\mu_{1/2}$ ან პიკის სიგანე მის ფუძესთან a ; პიკის ფართი- Q შემოსაზღვრული პიკის კონტურით და ნულოვანი ხაზით; ანალიზის ხანგრძლივობა- t_R ; შეკავებითი მოცულობა- V_R (ნახ.5.1) [1,2].



ნახ.5.1. სხვადასხვა ფორმის ქრომატოგრაფიული პიკები

- ა) პიკის ფართის განსაზღვრა სამკუთხედის მეთოდით;
 ბ) სიმეტრიული პიკი ($K=a_2/a_1=1$);
 გ) არასიმეტრიული პიკი ($K=a_2/a_1>1$); დ) პიკების არასრული დაყოფა.

5.1.2. პიკის სიმაღლე

პიკის სიმაღლეს ზომავენ სახაზავით ან ციფრული ვოლტმეტრით (ნახ.5.1). პიკის გაზომვის ეს მეთოდი მეტად მარტივი და სწრაფია. პიკის სიმაღლის დამოკიდებულება ნივთიერების რაოდენობაზე სწორხაზოვანია უფრო მცირე დიაპაზონში, ვიდრე პიკის ფართი. ამიტომ, დეტექტორის დაკალიბრებისას მხედველობაში უნდა მივიღოთ, რომ სვეტის გადატვირთვა გამოიწვევს დეტექტორის სწორხაზოვანი დიაპაზონის შემცირებას.

სვეტის სიმაღლე პროპორციულია უძრავი ფაზის რაოდენობისა სვეტში (რაც მცირეა ფაზა მით მაღალია პიკი). ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მიუკერებელი უძრავი ფაზების გამოყენებისას, რადგან ანალიზის მსვლელობისას ყოველთვის ხდება უძრავი ფაზის რაოდენობის შემცირება, რაც თავის მხრივ დიდ გავლენას ახდენს პიკის სიმაღლეზე.

პიკების გაანგარიშება მათი სიმაღლის მიხედვით ძლიერ მოსახერხებელია დაყოფის დაბალი ხარისხის შემთხვევაშიც, რადგან პიკების ნაწილობრივი გადაფარვის დროსაც კი ერთი პიკის მაქსიმუმში არ არის მეორე კომპონენტის მინარევი.

სიმაღლის მიხედვით პიკის გაანგარიშების მეთოდი ნაკლებ გამოსაყენებელია ტემპერატურული პროგრამირების რეჟიმით მუშაობის დროს, რადგან პიკის სიმაღლე დაახლოებით 4-5% იცვლება სვეტის ტემპერატურის 1°C ცვლილებისას. მაგრამ, განხილული მეთოდის უპირატესობა მდგომარეობს იმაში, რომ პიკის სიმაღლის აღწარმოება უფრო უკეთესია ნაწილობრივ დაყოფილი პიკების შემთხვევაშიც კი.

5.1.3. პიკის ფართის და მისი პროპორციული სიდიდეების გაზომვა

პიკის ფართის განსაზღვრა სამკუთხედის მეთოდით. პიკის მიერ მოხაზული სამკუთხედის ფართი განისაზღვრება აპროქსიმაციის მეთოდით, როგორც პიკის სიმაღლის ნახევრის ($h/2$) ნამრავლი პიკის სიგანეზე ნულოვან ხაზთან ω . ასეთი გაანგარიშების ცდომილება დამოკიდებულია სამკუთხედის აგების სისწორეზე, პიკის ფორმაზე, ფანქრის სისქეზე და სხვა ფაქტორებზე. თუ პიკს გაუსის მრუდის ფორმა აქვს, მაშინ მეთოდის სიზუსტე 97% აღწევს პიკის ნამდვილ ფართობთან შედარებით.

გაანგარიშების ცდომილება დამოკიდებულია მისი სიმაღლის და სიგანის გაზომვის ცდომილებაზე. ცდომილება ნაკლებია, თუ სიმაღლის და სიგანის მნიშვნელობები ძალიან დაბალი არ არის. ქრომატოგრამაზე ყველა პიკის ფართობი ერთნაირი სიზუსტით ვერ განისაზღვრება, რადგან სხვადასხვაა მათი მონაცემები. ტემპერატურის და აირმატარებლის ხარჯის პროგრამირებით ხდება დაახლოებით ერთნაირი ფორმის პიკების მიღება ყველა კომპონენტისთვის.

განხილული მეთოდის ცდომილება არსებითად დამოკიდებულია პიკის ფორმაზე. უფრო ზუსტი შედეგები მიიღება სიმეტრიული პიკებისთვის, რომელთა ასიმეტრიის კოეფიციენტი ახლოსაა ერთთან (ნახ.5.1., ბ); ასიმეტრიის კოეფიციენტის გაზრდით (ნახ.5.1., გ) ცდომილება იზრდება.

პიკების არასრული დაყოფისას (ნახ.5.1., დ) ზომავენ h_1 და h_2 სიმაღლეებს და სიგანეს- μ_1 . თუ პიკის μ_2 სიგანის გაზომვა შეუძლებელია, შეკავების დროსთან მისი სწორხაზოვანი დამოკიდებულების გამო, საშუალება გვეძლევა გამოვთვალოთ ფორმულით:

$$\mu_2 = t_{R2} \mu_1 / t_{R1} \quad (5.2)$$

სადაც t_{R1} და t_{R2} შესაბამისი პიკების მაქსიმალური დაშორებაა სინჯის შეყვანის ნერტილიდან (ანუ შეკავების დროები) [2].

პიკის ფართის პროპორციული სიდიდეების განსაზღვრისთვის ზოგჯერ იყენებენ ე.წ. „ქრონომეტრულ“ მეთოდს და პიკის სიგანეს ზომავენ წამზომით

მისი სიმაღლის გარკვეულ მონაკვეთზე. თუ პიკის სიგანე 40 ნმ-ზე ნაკლები არ არის, მისი გაზომვის სიზუსტეა 0.5%.

თუ პიკის სიგანის გაზომვა ვერ ხერხდება, პიკის ფართს (Q) გამოითვლიან მისი სიმაღლის გამრავლებით შეკავების დროზე (t_R) ან მოცულობაზე (V_R):

$$Q = ht_R \text{ ან } Q = hV_R \quad (5.3)$$

თავის მხრივ $V_R = t_R V_g$; სადაც V_g -აირმატარებლის ხარჯია. პიკის ფართის ამგვარი გამოთვლა უზრუნველყოფს ანალიზის დაბალ ცდომილებას და მას არ მოეთხოვება პიკების დაყოფის მაღალი ხარისხი. ცდომილება ამ შემთხვევაში პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული აირმატარებლის ხარჯზე. იგი უმნიშვნელოდ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე და მისი მნიშვნელობა იგივეა რაც აპროქსიმაციის მეთოდით გამოთვლილი ცდომილება. თუმცა, ის ძლიერ არის დამოკიდებული პიკების ასიმეტრიაზე და დაყოფის ეფექტურობაზე:

$$ht_R \approx 0,4 Q \sqrt{N} \quad (5.4)$$

სადაც, N -თეორიული თეფშების რიცხვია მოცემული პიკისთვის [2].

ანალიზის მსვლელობისას ნულოვანი ხაზის დრეიფის გამო პიკის ფორმის დამახინჯების შემთხვევაში უკეთესი შედეგები მიიღება პიკის ფართის უშუალო განსაზღვრით. როდესაც ნულოვანი ხაზი არ აღდგება ან პიკის „კუდი“ მოექცევა ნულოვანი ხაზის ქვემოთ, ასეთ შემთხვევაში არ შეიძლება გაიზომოს პიკის სიმაღლე და ფართობი, რადგან ადგილი ექნება გაანგარიშების დიდ ცდომილებას.

პიკის ფართის გაზომვა ანონვით. პიკის ფართი შეიძლება განისაზღვროს დიაგრამის ლენტიდან პიკის შესაბამისი უბნის ამოჭრით და მისი შემდგომი ანონვით ანალიზურ სასწორზე. ანონიან აგრეთვე ერთეული ფართის მქონე (1სმ^2) იმავე ქაღალდის ნაწილს და მარტივი არითმეტიკული გაანგარიშებით გამოითვლიან პიკის ფართს მისი წონის მიხედვით (პიკის ფართი = 1სმ^2 გამრავლებული პიკის წონაზე და გაყოფილი 1სმ^2 ქაღალდის წონაზე).

თავისთავად ცხადია, რომ პიკის ფართობის ამგვარად განსაზღვრისას დიაგრამის ქაღალდის სისქე და ტენის შემცველობა მასში ერთნაირი უნდა იყოს. ამ დროს ნადგურდება ქრომატოგრამები და პროცესი დიდ დროს მოითხოვს.

პლანიმეტრია. პლანიმეტრი მექანიკური ხელსაწყოა, რომელსაც ხელით შემოატარებენ პიკის კონტურებს და შესაბამისი ფართი ციფერბლატზე დაინერება ციფრებით. მეთოდი ძალიან დიდ დროს მოითხოვს, რადგან დამაკმაყოფილებელი აღწარმოების მისაღწევად საჭირო ხდება თითოეული პიკის რამდენიმეჯერ შემოვლა პლანიმეტრით, რაც მეტად შრომატევადია

რაოდენობითი ინფორმაციის ავტომატიზებული დამუშავება. რაოდენობითი ინფორმაციის დამუშავებისთვის გამოიყენება სპეციალური მოწყობილობა ინტეგრატორი, რომელიც მიერთებულია უშუალოდ თვითჩამწერთან. პიკის ფართობის გაზომვა ხდება ქრომატოგრამის ჩანერასთან ერთად. როგორც კი ქრომატოგრამაზე გამოჩნდება პიკი, ელექტრული იმპულსი გადაეცემა სპეციალურ მოწყობილობას, რომელიც აჯამებს მათ და საბეჭდი მოწყობილობის

მიერ ციფრებით დაინერება პიკის ფართი. ელექტრონულ-ციფრულ ინტეგრატორებს აქვთ ფართო წრფივი დიაპაზონი და მაღალი მგრძნობიარობა.

თანამედროვე ციფრული ინტეგრატორი ასრულებს შემდეგ ოპერაციებს: ნულოვანი ხაზის კორექციას, ურთიერთგადაფარული პიკების შემთხვევაში თითოეული კომპონენტის შესაბამისი სიგნალის გამოყოფას, პიკის განსაზღვრას და მისი ფართობის ციფრულ გამოსახვას და დაბეჭვდას ქაღალდზე [2,3,4,5].

თანამედროვე კომპიუტერული ტექნიკის განვითარებასთან ერთად მოხდა ქრომატოგრაფიის აღჭურვა პერსონალური კომპიუტერებით და დამუშავდა სპეციალური პროგრამები ყოველგვარი ქრომატოგრაფიული გაანგარიშებებისთვის. ამ საკითხების უფრო დეტალური აღწერა და თანამედროვე ავტომატიზებული სისტემები წარმოდგენილია ამ წიგნის სპეციალურ ნაწილში.

5.1.4. ქრომატოგრამის გაანგარიშების მეთოდები

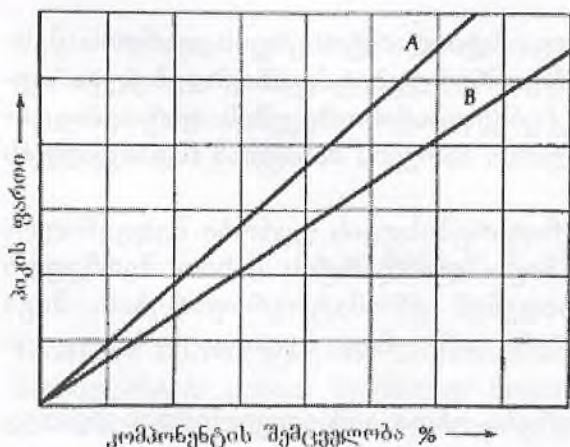
ტერმინი „რაოდენობითი“ ქრომატოგრაფიული ანალიზის მეთოდი [6] მოიცავს შემდეგ ძირითად ოპერაციებს:

- სინჯის შერჩევა და მომზადება;
- სინჯის შეყვანა ხელსაწყოში, ქრომატოგრაფირების პროცესი და მიღებული ქრომატოგრამების რეგისტრაცია;
- ქრომატოგრაფიული ჩანაწერის რაოდენობრივი პარამეტრების გაზომვა;
- მიღებული მონაცემების ინტერპრეტაცია.

ამ ჩამონათვალს ემატება მნიშვნელოვანი ოპერაცია — ქრომატოგრაფის დაგრაღუირება.

5.1.4.1. აბსოლუტური დაგრაღუირება

აბსოლუტური გრაღუირების არსია უცნობი შედგენილობის საანალიზო ნარევიში რომელიმე კომპონენტის პიკის ფართის ან სიმაღლის პირდაპირი შედარება



ნახ.5.2 აბსოლუტური დაგრაღუირების მეთოდი

ცნობილი შემადგენლობის მქონე ნარევიში მყოფი იმავე ნივთიერების პიკის ფართთან. ქრომატოგრაფიული ანალიზის შედეგად იღებენ ცნობილი ნივთიერებების და რაოდენობების ქრომატოგრამას. მაგალითად, ქრომატოგრაფში 1,2,3 მგ რაოდენობით შეყვანენ ცნობილ ნივთიერებებს, მიღებული პიკების ფართობს განსაზღვრავენ რომელიმე მეთოდით და ააგებენ პიკის ფართის და ქრომატოგრაფში შეყვანილი სინჯის რაოდენობას შორის დამოკიდებულების გრაფიკს (ნახ.5.2.).

ამის შემდეგ სვეტში მიენოდება ზუსტი რაოდენობის უცნობი შედგენილობის ნარევი და საანალიზო ნაერთის პიკის ფართს შეადარებენ სტანდარტის პიკის ფართს. საკვლევ ნარევეში სტანდარტის პროცენტული შედგენილობა განისაზღვრება გრაფიკით ან გამოითვლება ფორმულით:

$$C_i = k_q Q \cdot 100 / q \quad \text{ან} \quad C_i = k_h h \cdot 100 / q \quad (5.5)$$

სადაც, C_i – ნივთიერების კონცენტრაციაა (%); k – კოეფიციენტი (გრაფიკზე მიღებული სწორი ხაზის დახრის კუთხის ტანგენსი), რომელიც გამოიყენება დეტექტორის მხოლოდ საზოგადო დიაპაზონში და არ გამოიყენება სვეტის გადატვირთვის შემთხვევაში; q – ნივთიერების რაოდენობა ნარევეში.

გრადუირება უნდა მოხდეს სხვადასხვა შედგენილობის ნარევების ერთნაირი რაოდენობების ან ერთი და იგივე ნარევების სხვადასხვა რაოდენობების გამოყენებით. უკანასკნელ შემთხვევაში, თუ განმსაზღვრელი პარამეტრი პიკის სიმაღლეა, მაშინ დაუშვებელია სვეტის გადატვირთვა.

განხილული მეთოდი მარტივია, მაგრამ მისი სიზუსტე დიდად არის დამოკიდებული მუშაობის რეჟიმის მუდმივობაზე (ძირითადად პიკის სიმაღლით გაანგარიშების შემთხვევაში) და ეტალონად შერჩეული ნარევის მომზადების და ანალიზის სიზუსტეზე. აბსოლუტური გრადუირების მეთოდი ფართოდ გამოიყენება ნარევის ერთი ან რამდენიმე კომპონენტის განსაზღვრისას [4,6,7].

5.1.4.2. შიგა სტანდარტის მეთოდი

შიგა სტანდარტის მეთოდი ერთმანეთთან აკავშირებს ქრომატოგრაფიული პიკის პარამეტრს (პიკის ფართი ან სიმაღლე, სიმაღლის ნამრავლი შეკავების დროზე) შიგა სტანდარტის იგივე სიდიდესთან. განსაზღვრი ნივთიერების მასური წილი გამოითვლება ფორმულით:

$$C_i = K_i Q_i \cdot 100r / (K_{st} Q_{st}) \quad (5.6)$$

სადაც, K_i და K_{st} – კომპონენტის და შიგა სტანდარტის პიკის ფართის შესწორებითი (გრადუირების) კოეფიციენტებია, რომლებიც დამოკიდებულია დეტექტორის მგრძნობიარობაზე; Q_i და Q_{st} – შესაბამისი პიკების ფართებია; r – შიგა სტანდარტის მასის ფარდობა საანალიზო ნარევის მასასთან (სტანდარტის გარეშე).

განხილული მეთოდით გაანგარიშების ჩატარებისთვის უცნობი შედგენილობის მქონე ნარევის წინასწარ უმატებენ შიგა სტანდარტის სახით შერჩეული ნივთიერების ზუსტ რაოდენობას და ახდენენ ქრომატოგრაფირებას. შიგა სტანდარტის სახით შერჩეული ნივთიერება არ უნდა შედიოდეს საკვლევი ნარევის ძირითად შემადგენლობაში.

სტანდარტის სახით შერჩეული ნივთიერება უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ მოთხოვნებს:

ამის შემდეგ სვეტში მიენოდება ზუსტი რაოდენობის უცნობი შედგენილობის ნარევი და საანალიზო ნაერთის პიკის ფართს შეადარებენ სტანდარტის პიკის ფართს. საკვლევ ნარევაში სტანდარტის პროცენტული შედგენილობა განისაზღვრება გრაფიკით ან გამოითვლება ფორმულით:

$$C_i = k_q Q \cdot 100 / q \quad \text{ან} \quad C_i = k_h h \cdot 100 / q \quad (5.5)$$

სადაც, C_i – ნივთიერების კონცენტრაციაა (%); k – კოეფიციენტი (გრაფიკზე მიღებული სწორი ხაზის დახრის კუთხის ტანგენსი), რომელიც გამოიყენება დეტექტორის მხოლოდ ხაზოვან დიაპაზონში და არ გამოიყენება სვეტის გადატვირთვის შემთხვევაში; q – ნივთიერების რაოდენობა ნარევაში.

გრაფირება უნდა მოხდეს სხვადასხვა შედგენილობის ნარევების ერთნაირი რაოდენობების ან ერთი და იგივე ნარევების სხვადასხვა რაოდენობების გამოყენებით. უკანასკნელ შემთხვევაში, თუ განმსაზღვრელი პარამეტრი პიკის სიმაღლეა, მაშინ დაუშვებელია სვეტის გადატვირთვა.

განხილული მეთოდი მარტივია, მაგრამ მისი სიზუსტე დიდად არის დამოკიდებული მუშაობის რეჟიმის მუდმივობაზე (ძირითადად პიკის სიმაღლით გაანგარიშების შემთხვევაში) და ეტალონად შერჩეული ნარევის მომზადების და ანალიზის სიზუსტეზე. აბსოლუტური გრაფირების მეთოდი ფართოდ გამოიყენება ნარევის ერთი ან რამდენიმე კომპონენტის განსაზღვრისას [4,6,7].

5.1.4.2. შიგა სტანდარტის მეთოდი

შიგა სტანდარტის მეთოდი ერთმანეთთან აკავშირებს ქრომატოგრაფიული პიკის პარამეტრს (პიკის ფართი ან სიმაღლე, სიმაღლის ნამრავლი შეკავების დროზე) შიგა სტანდარტის იგივე სიდიდესთან. განსასაზღვრი ნივთიერების მასური წილი გამოითვლება ფორმულით:

$$C_i = K_i Q_i \cdot 100r / (K_{st} Q_{st}) \quad (5.6)$$

სადაც, K_i და K_{st} – კომპონენტის და შიგა სტანდარტის პიკის ფართის შესწორებითი (გრაფირების) კოეფიციენტებია, რომლებიც დამოკიდებულია დეტექტორის მგრძნობიარობაზე; Q_i და Q_{st} – შესაბამისი პიკების ფართებია; r – შიგა სტანდარტის მასის ფარდობა საანალიზო ნარევის მასასთან (სტანდარტის გარეშე).

განხილული მეთოდით გაანგარიშების ჩატარებისთვის უცნობი შედგენილობის მქონე ნარევს წინასწარ უმატებენ შიგა სტანდარტის სახით შერჩეული ნივთიერების ზუსტ რაოდენობას და ახდენენ ქრომატოგრაფირებას. შიგა სტანდარტის სახით შერჩეული ნივთიერება არ უნდა შედიოდეს საკვლევი ნარევის ძირითად შემადგენლობაში.

სტანდარტის სახით შერჩეული ნივთიერება უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ მოთხოვნებს:

- სტაბილურობა და ინერტულობა. სრული შერევის უნარი სინჯთან;
- კარგი გამოყოფის უნარი საანალიზო კომპონენტებიდან. (ქრომატოგრაფიაზე მისი პიკი კარგად უნდა იყოს გამოყოფილი დანარჩენი პიკებისგან);
- სტანდარტის და განსასაზღვრი ნივთიერების შეკავების მახასიათებლების და ქიმიური ბუნების მსგავსება;
- უნდა იყოს ქიმიურად სუფთა, არ შეიცავდეს მინარევებს;

მიუხედავად იმისა რომ ისეთი ნივთიერების შერჩევა, რომელიც შიგა სტანდარტის ყველა მოთხოვნას დააკმაყოფილებს საკმაოდ რთულია, ეს მეთოდი ფართოდ გამოიყენება ქრომატოგრაფიული ანალიზის პრაქტიკაში.

ახლა მოკლედ შევეხოთ სინჯის მომზადების წესს, რომელიც მეტად მნიშვნელოვანი ეტაპია ქრომატოგრაფიული ანალიზის განსახორციელებლად.

სინჯის მოსამზადებლად იყენებენ ნივთიერებათა მცირე რაოდენობებს. სტანდარტის რაოდენობა უნდა შეესაბამებოდეს საანალიზო ნარევეში მინარევების შემცველობას. ამისათვის, მცირე მოცულობის მინის ჭურჭელში (ხშირად იყენებენ ე.წ. პენიცილინის ბოთლს) ასხამენ 5 მლ საანალიზო ნარევს და მას უმატებენ 20-50 მკლ სტანდარტს. ამგვარი პროცედურის შემდეგ სტანდარტის კონცენტრაცია იქნება 1%. თუ, სინჯში სტანდარტის მეასედი ან მეათასედი წილია საჭირო, მიმართავენ ორმაგი განზავების მეთოდს, რომლის დროსაც დაახლოებით 40-50 მკლ პირველ ხსნარს ჩაასხამენ სხვა ჭურჭელში, რომელშიც უკვე მოთავსებულია 3-10 მლ საანალიზო სინჯი. ასეთი მცირე რაოდენობების დამატება ხდება 50-100 მკლ ტევადობის მიკროშპრიცით ან 0.1 მლ ტევადობის მიკროპიპეტით. ასეთ შემთხვევაში ნივთიერების და სტანდარტის მასების ცდომილება შეადგენს 1-2% და იგი არის ძირითადი შემადგენელი ნაწილი ქრომატოგრაფიული ანალიზის საბოლოო ცდომილებისა.

განხილული მეთოდის სახესხვაობებია ორმაგი შიგა სტანდარტის მეთოდი და დამატების მეთოდი[2,7].

5.1.4.3. ორმაგი შიგა სტანდარტის მეთოდი

ეს მეთოდი ემყარება სინჯში ორი ისეთი სტანდარტული ნივთიერების დამატებას, რომლებიც ელუირდებიან საანალიზო კომპონენტების წინ და ბოლოს. განსასაზღვრი ნივთიერების მასური წილის გამოსათვლელ ფორმულას შემდეგი სახე აქვს:

$$C_i = K_i Q_i \sqrt{r_{st_1} r_{st_2}} / (K_{st_1} Q_{st_1} K_{st_2} Q_{st_2}) \cdot 100 \quad (5.7)$$

st_1 და st_2 ინდექსები – შესაბამისად აღნიშნავენ პირველი და მეორე შიგა სტანდარტის სახით შერჩეულ ნივთიერებებს

ორმაგი სტანდარტის მეთოდი უზრუნველყოფს კონცენტრაციის გაანგარიშებისას შემთხვევითი ცდომილების კომპენსაციას.

5.1.4.4. დანამატების მეთოდი

გამოიყენება ისეთ შემთხვევაში, როდესაც შეუძლებელია იმ სტანდარტის შერჩევა, რომელიც რეგისტრირდება ცალკეული პიკის სახით. საანალიზო ნარევეში ახდენენ ისეთი კომპონენტის დამატებას, რომელიც უკვე იმყოფება მასში მინარევის სახით. ანალიზი ტარდება ორჯერ: საწყისი სინჯით დანამატის გარეშე (მასით m_a) და დანამატი (მასით m_b). საანალიზო ნარევეში i კომპონენტის შემცველობა (%) გამოსათვლელ ფორმულაში შიგა სტანდარტის პიკის ფართობის ნაცვლად (ან მისი ეკვივალენტური პარამეტრი h ან ht_R) გამოიყენება დანამატის სახით შერჩეული კომპონენტის პიკის ფართობის სხვაობა დანამატი მიღებულ ქრომატოგრამაზე (Q_b) და მის გარეშე (Q_a); იმის გამო რომ გაანგარიშებაში იყენებენ სხვადასხვა ქრომატოგრამებიდან აღებულ მონაცემებს, დოზირების დროს დაშვებული შესაძლო ცდომილების თავიდან ასაცილებლად შემოაქვთ შესწორებითი კოეფიციენტი Q_2^k / Q_1^k , სადაც Q_2^k და Q_1^k - k კომპონენტის პიკების ფართობია შესაბამისად დანამატი და დანამატის გარეშე მიღებულ ქრომატოგრამებზე. k კომპონენტის სახით საანალიზო ნარევიდან ირჩევენ ისეთ ნივთიერებას, რომლის პიკის ფართობი განსაზღვრავს მინიმალური ცდომილებით არის შესაძლებელი.

თუ ქრომატოგრაფირების ორივე შემთხვევაში შეყვანილი სინჯის მოცულობა ერთნაირია, მაშინ, $(Q_2^k / Q_1^k) = 1$.

თითოეული კომპონენტის მასური წილი (%) გამოითვლება ფორმულით:

$$C_i = \frac{Q_i K_i m_b \times 100}{[Q_b - Q_a (Q_2^k / Q_1^k)] m_a} \quad (5.8)$$

5.1.4.5. შიგა ნორმალიზაციის მეთოდი

შიგა ნორმალიზაციის მეთოდი დაფუძნებულია საანალიზო ნარევის კომპონენტების კონცენტრაციებს შორის თანაფარდობაზე. ნარევეში i კომპონენტის რაოდენობის გაანგარიშება ხდება ფორმულით:

$$C_i = K_i Q_i \cdot 100 / \sum_{i=1}^n (K_i Q_i) \quad (5.9)$$

სადაც, Q_i - შესაბამისად i კომპონენტის პიკის ფართობი; K_i - შესწორებითი კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს დეტექტორის მგრძნობიარობას კომპონენტის მიმართ.

ამ მეთოდის უპირატესობა მდგომარეობს იმაში რომ პიკის ფორმის დამახინჯება (რაც რეალურ პირობებში მეტ-ნაკლებად ყველა პიკისთვის არის დამახასიათებელი) გავლენას არ ახდენს შედეგების სიზუსტეზე, რაც განხილული მეთოდისთვის არის $\pm 10\%$ [2,6,7,8].

თავი 5.2. რაოდენობითი ანალიზი თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში

რაოდენობითი ანალიზის მეთოდები თხელფენოვან ქრომატოგრაფიაში შეგვიძლია დავყოთ ორ კატეგორიად: პირველ შემთხვევაში ნივთიერებათა დაყოფის შეფასება ხდება უშუალოდ ქრომატოგრაფიულ ფირფიტაზე (თხელ ფენაში), ხოლო მეორე შემთხვევაში დაყოფილ ნივთიერებებს, მათ რაოდენობრივ შეფასებამდე, გამორეცხავენ სორბენტის ფენიდან.

5.2.1. რაოდენობითი ანალიზი უშუალოდ ფენაში

გამომჟღავნებულ ქრომატოგრამაზე საანალიზო ნივთიერების ლაქის ფართი, რომელიც თავის მხრივ განსაზღვრავს მასში შემავალი ნივთიერების რაოდენობას, დამოკიდებულია სინჯის მოსამზადებლად გამოყენებული გამხსნელის პოლარობაზე, ლაქის მიერ განვლილ მანძილზე და სხვა ლაქების სიახლოვეზე. ამიტომ, უშუალოდ ქრომატოგრაფიულ ფირფიტაზე რაოდენობითი ანალიზის განხორციელებისთვის განკუთვნილი ქრომატოგრამის მისაღებად უნდა დავიცვათ შემდეგი პირობები [9,10]:

- ქრომატოგრაფიულ ფირფიტაზე საანალიზო ნივთიერებისა და სტანდარტის ხსნარის ერთნაირი მოცულობები დაიტანება. სტანდარტის ხაზზე ლაქის ფართი ყოველი ანალიზისთვის ერთნაირი უნდა იყოს. ხსნარი წვეთების სახით დაიტანება და თითოეული წვეთის დამატება ხდება გამხსნელის აორთქლების შემდეგ;
- სინჯის და სტანდარტის ხსნარების მომზადებისთვის გამოიყენება ერთი და იგივე გამხსნელი;
- სორბენტის სისქის ცვლილების და ქრომატოგრაფიული ფირფიტის გამჟღავნების მეთოდიკით გამოწვეული ცდომილების თავიდან ასაცილებლად, სტანდარტი და სინჯი ქრომატოგრაფირდება ერთი და იგივე ფირფიტაზე გვერდიგვერდ;
- სინჯის და სტანდარტის კონცენტრაციები შეძლებისდაგვარად ახლოს უნდა იყოს ერთმანეთთან;
- ქრომატოგრაფიულ ფირფიტაზე სტანდარტის და სინჯის ყველა ლაქის მიერ განვლილი მანძილი ერთნაირი უნდა იყოს.

5.2.1.1. ნივთიერების რაოდენობის განსაზღვრა ლაქის ფართის მიხედვით

თუ საანალიზო ნივთიერებათა ლაქების კონტურები გამოკვეთილია (არა აქვს დიფუზური ნაპირები), მისი ფართი დიდი სიზუსტით გაიზომება. ლაქის ფართი დამოკიდებულია სორბენტის ფენის სისქესა და აქტივობაზე, აგრეთვე დატანილი საანალიზო ნივთიერებების მოცულობაზე.

თუ საანალიზო ნივთიერებების კონცენტრაცია 1-80 მკგ-ის ფარგლებშია, სამართლიანია სწორხაზოვანი დამოკიდებულება

$$\sqrt{F} = a \cdot \lg M = b, \quad (5.10)$$

სადაც, F -ლაქის ფართობია; M -ფირფიტაზე დატანილი ნივთიერების რაოდენობა, ხოლო a და b -მუდმივები [11].

ლაქის ფართის განსაზღვრისთვის ახდენენ მის ფოტოგრაფირებას და ზომავენ მის ფართობს პლანიმეტრით, ან ლაქის კონტურს გადაიტანენ მილიმეტრულ ქაღალდზე, დაითვლიან მიღებული კვადრატების რაოდენობას და შეადარებენ მიღებულ მონაცემებს წინასწარ დაკალიბრებულ მრუდს. მრუდს აგებენ სინჯის რაოდენობის (მგ) და მიღებული ლაქის ფართობის (მმ²) მიხედვით.

ცალკეული განსაზღვრული რაოდენობის საანალიზო ნაერთისთვის შეიძლება გაკეთდეს შაბლონი (კილიტას ან მილიმეტრული ქაღალდისგან) გარკვეული ზომის ნახვრეტით. ფართობის გასაზომად შაბლონს დაადებენ ქრომატოგრამას ისე, რომ ლაქის ფართობი და შაბლონის ნახვრეტი შეძლებისამებრ დაემთხვას ერთმანეთს [11].

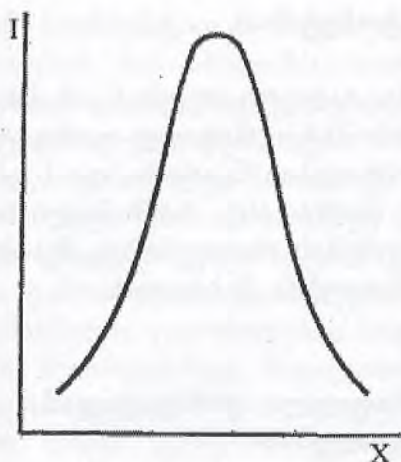
თითოეული ანალიზისთვის დაკალიბრებული მრუდების აგების პროცესის თავიდან აცილების მიზნით, პურდიმ და ტრუტერმა გამოიყენეს ალგებრული მეთოდი ნივთიერებათა რაოდენობის განსაზღვრად. ამისათვის, საჭიროა ერთი და იგივე ქრომატოგრაფიულ ფირფიტაზე ჩატარდეს სამი სინჯის ანალიზი: საანალიზო ნარევის, იმავე ნარევის განზავებული ხსნარის და სტანდარტული ხსნარის. ნივთიერების რაოდენობა საანალიზო ხსნარში განისაზღვრება ფორმულით:

$$\lg W = \lg W_s + \frac{\sqrt{A} - \sqrt{A_s}}{\sqrt{A_d} - \sqrt{A_s}} \lg d \quad (5.11)$$

სადაც, W და A -შესაბამისად საანალიზო ნივთიერების მასა და ლაქის ფართობია; W_s და A_s - სტანდარტული ხსნარის მასა და ლაქის ფართობი; A_d და d - განზავებული ხსნარის ლაქის ფართი და განზავების კოეფიციენტი [9,12,13,14].

5.2.1.2. დენსიტომეტრიული მეთოდი

დენსიტომეტრიული ანუ ფოტომეტრიული მეთოდი რაოდენობითი ანალიზის უფრო სრულყოფილი მეთოდია, მაგრამ მას სჭირდება სპეციალური ხელსაწყო დენსიტომეტრი. განხილული მეთოდის დადებითი მხარეა გაზომვის სისწრაფე, შედარებით მაღალი სიზუსტე და არ მოითხოვს დამატებით ოპერაციებს. თუმცა, შედეგების აღწარმოებაზე გავლენას ახდენს ლაქის შეფერილობის ინტენსივობა. გაანგარიშების სიზუსტეზე კი გავლენას ახდენს სორბენტის ფენის



ნახ.5.3. ქრომატოგრაფიული ლაქის დენსიტომეტრია გამხსნელის მოძრაობის მიმართულებით (X ღერძი)

სისქე და ერთგვაროვნება, რადგან პირდაპირი დენსიტომეტრიის დროს ფირფიტაზე დაცემული სინათლის სხივი სხვადასხვანაირად ნაწილდება: ნაწილი აირეკლება, ნაწილი გაიბნევა, ხოლო ნაწილი გაივლის სორბენტის ფენაში და მეტ-ნაკლებად შთაინთქმება სინჯის და ადსორბენტის მიერ.

ეს მეთოდი ითვალისწინებს ქრომატოგრაფიაზე მიღებული საბოლოო ლაქების სკანირებას ქრომატოგრამის გამომჟღავნების მიმართულებით. გამავალი და არეკლილი სხივი ხვდება ფოტომამრავლზე. დაცემული და არეკლილი, ან გამავალი სხივების ინტენსივობებს შორის სხვაობა, გაიზომება ელექტრონული სიგნალის სახით და ჩაიწერება ნახ.5.3-ზე ნაჩვენები გრაფიკის სახით. პიკის სიმაღლე გვიჩვენებს ლაქის ინტენსივობას, ხოლო პიკის სიგანე პროპორციულია ლაქის სიგრძისა სკანირების მიმართულებით. პიკის ფართსა და ლაქაში ნივთიერების რაოდენობას შორის კავშირს განსაზღვრავენ მრუდის ქვეშ მოქცეული ფართობის გაზომვით.

5.2.1.3. ფლუორომეტრიული მეთოდი

ნივთიერების რაოდენობის განსაზღვრა ფლუორომეტრიული მეთოდით მეტად მგრძნობიარე მეთოდია და ხორციელდება ორი გზით:

ა) ფლუორესცენციის გაზომვით; ამ დროს მუქ, არაფლუორესცენცირებად ფონზე ახდენენ ფლუორესცენცირებადი ლაქის სკანირებას ულტრაიისფერი სინათლის წყაროთი, რომელსაც ემისიის მაქსიმუმი გააჩნია 366 ნმ ტალღის სიგრძეზე.

ბ) ფლუორესცენციის ჩახშობით; ამ შემთხვევაში ახდენენ ულტრაიისფერ სპექტრში შთანთქმის უნარის მქონე ნივთიერების სკანირებას, რომელიც წითელ ფლუორესცენცირებად ფონზე ჩანს როგორც მუქი ლაქები. სკანირება ხდება ულტრაიისფერი გამოსხივების წყაროთი, რომელსაც ემისიის მაქსიმუმი აქვს 254 ნმ ტალღის სიგრძეზე.

ქრომატოგრამის მომზადება, სკანირების მექანიზმი და შედეგების ინტერპრეტაცია ისეთივეა როგორც დენსიტომეტრიის დროს. განხილული მეთოდის ფარდობითი ცდომილებაა 3-8%.

5.2.1.4. ლაქების სპექტროფოტომეტრია

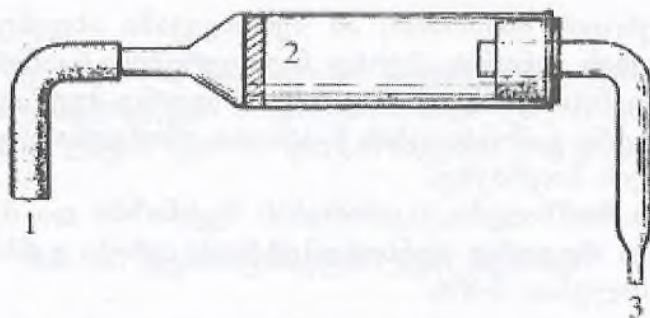
ლაქების სპექტროფოტომეტრიას ახდენენ სპეციალური ხელსაწყო-სპექტროფოტომეტრის საშუალებით. გამჟღავნებულ ქრომატოგრაფიულ ფირფიტას ათავსებენ ვერტიკალურად ულტრაიისფერი გამოსხივების წყაროსა და სკანერით აღჭურვილ სპექტროფოტომეტრის ხვრელს შორის ისე, რომ მთლიანად დაიფაროს ფირფიტის ფართობი სხივებით. ნივთიერების რაოდენობის შესახებ მსჯელობენ პიკის მაქსიმუმში შთანთქმის ინტენსივობის მიხედვით.

5.2.2. რაოდენობითი ანალიზი ქრომატოგრაფიული ფირფიტიდან საანალიზო ნივთიერების მოცილებით

ქრომატოგრაფიული ფირფიტიდან საანალიზო ნივთიერების გამოყოფას მართავენ როგორც რაოდენობითი ანალიზის ჩასატარებლად ასევე პრეპარატიული მიზნებისთვის. ეს პროცედურა ორნაირად შეგვიძლია განვახორციელოთ: შერჩეული გამხსნელით საანალიზო ნივთიერების გამორეცხვით (დამავალი ქრომატოგრაფია) და ქრომატოგრაფიული ფირფიტიდან საანალიზო ნივთიერების შემცველი სორბენტის ნაწილის მოცილებით (მას შემდეგ, რაც გამომჟღავნდება ფირფიტა და დადგინდება შეღებილი ლაქების საზღვრები).

პირველ შემთხვევაში ქრომატოგრაფიული ფირფიტიდან ჩამოსულ საანალიზო ნივთიერების შემცველ გამხსნელს შეაგროვებენ ცალკეულ ულუფებად და მასში ნივთიერების არსებობას განსაზღვრავენ სხვა რომელიმე ანალიზური მეთოდით. წარმოდგენილი მეთოდი შედარებით ნაკლებად გამოიყენება პრაქტიკაში.

დაუმაგრებელი ფენიდან სორბენტის ფენის მოცილება უმჯობესია მოხდეს ძაბრისგან დამზადებული სპეციალური მოწყობილობით (ნახ.5.4), რომელშიც მოთავსებულია ფოროვანი ფილტრი [11].



ნახ.5.4. სორბენტის და ნივთიერების მოსაცილებელი მოწყობილობის სქემა

1-წყალჭავჭავლურ ტუმბოსთან მისაერთებელი; 2-ფოროვანი მინის ტიხარი;

3-სორბენტის ფენასთან შემხები მილი

ძაბრში ათავსებენ საცობს, რომელშიც გადის მოხრილი მილი. ძაბრის მეორე ბოლო წყალჭავჭავლის ტუმბოსთან არის მიერთებული. მილის შევიწროებული ბოლოთი ეხებიან სორბენტის ფენას და იგი შეინოვება ძაბრში. ძაბრშივე ახდენ-

ნენ სორბენტიდან ნივთიერების ექსტრაქციას შესაბამისი გამხსნელით და ახდენენ მის ანალიზს. სორბენტის და ნივთიერების დაცილება შეიძლება მოხდეს ცენტრიფუგირებითაც.

განხილული მეთოდები საკმაოდ ზუსტია, თუმცა მეტად შრომატევადი და დიდ სიფრთხილეს მოითხოვს რათა თავიდან ავიცილოთ ნივთიერების რაოდენობის შემცირება. ამასთანავე დიდი მნიშვნელობა აქვს ადსორბენტის სისუფთავეს, რადგან ექსტრაქციის დროს მინარევები შეიძლება გადავიდნენ ხსნარში და გამოიწვიონ ცდომილება. იგივე შეეხება ექსტრაქციისთვის გამოყენებულ გამხსნელს. ცდომილების სიდიდე დამოკიდებულია აგრეთვე შემდგომი ანალიზის მეთოდებზეც. მაგალითად, კალორიმეტრული მეთოდების გამოყენებისას ცდომილება 1-5%-ია, სპექტროფოტომეტრული მეთოდებისთვის დაახლოებით 5%, ხოლო ფლუორომეტრული მეთოდისას 3-8%.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Айвазов Б.В. Введение в хроматографию. М.; Высшая школа., 1983, 239 с.
2. Сакодынский К.И и др. Аналитическая хроматография. М.; Химия, 1993, 463 с.
3. Мак-Нейр Г., Бонелли Э. Введение в газовую хроматографию. Пер. с английского, под редакцией Жуховицкого А.А. М.; Мир, 1970, 277 с.
4. Ногаре С.Д. Джувет Р.С. Газо-жидкостная хроматография. Пер. с английского, под редакцией Александрова А.Н. и Дементьевой М.И. Л.; 1966, 470 с.
5. Амирханашвили К. Оптимизация хроматографических исследований. Тбилиси, Универсал, 2004, 259 с.
6. Новак И. Количественный анализ методом газовой хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Сакодынского К.И. М.; Мир, 1978, 170 с.
7. Гольберт К.А., Вигдергауз М.С. Введение в газовую хроматографию. М.; Химия, 1990, 351 с.
8. Столяров Б.В., Савинов И.М., Витенберг Л.Г. Руководство к практическим работам по газовой хроматографии. Л.; Химия, 1988, 336 с.
9. Перри С., Амос Р., Брюер П. Практическое руководство по жидкостной хроматографии. Пер. с английского, под редакцией Чмута К.В. М.; Мир, 1974, 260 с.
10. Гейсс Ф. Основы тонкослойной хроматографии. Пер. с английского; под редакцией Березкина В.Г. М.; 1999, 753 с.
11. Ахрем А.А., Кузнецова А.И. Тонкослойная хроматография. М.; Наука, 1964, 175 с.
12. Кирхнер Ю. Тонкослойная хроматография. В 2-х томах. Пер. с английского, под редакцией Соколова Д.Н. и Яновского М.И. М.; Мир, 1981, 1139 с.
13. Высокоэффективная тонкослойная хроматография. Пер. с английского, под редакцией Златкиса А., Кайзера Р. М.; Мир, 1979, 245 с.
14. Шеллард Э. Количественная хроматография на бумаге и в тонком слое. Пер. с английского, под редакцией Ермакова А.Н. М.; Мир, 1971, 192 с.

ნაწილი 6 ქრომატოგრაფიული პროცესების ავტომატიზაცია

შესავალი

დღეისათვის ანალიზის თითქმის ყველა ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდი აღჭურვილია სპეციალური გამომთვლელი ხელსაწყოებით. გამონაკლისს არც ქრომატოგრაფია წარმოადგენს. ადრე ქრომატოგრაფების დამუშავება ხდებოდა ხელით, რაც ძლიერ შრომატევადი იყო. IBM PC ტიპის გამომთვლელი მანქანების გამოგონებამ და მათი ხელსაწყოებთან უშუალოდ ჩართვის შესაძლებლობამ ძალიან გაამარტივა და დააჩქარა ქრომატოგრაფიული ანალიზის წარმართვა.

რთული ნარევების ანალიზისას ქრომატოგრაფიული კვლევის ავტომატიზაცია საშუალებას იძლევა მივიღოთ უფრო ზუსტი და სარწმუნო შედეგები. დღეს მკვლევარ-ანალიტიკოსს შეუძლია მოახდინოს კომპონენტთა ელუირების პროცესის მოდელირება, ამოირჩიოს დაყოფის ყველაზე ეფექტური რეჟიმი, დაამუშაოს ქრომატოგრაფიული ანალიზის ახალი ვარიანტები.

ქრომატოგრაფიული ექსპერიმენტის ავტომატიზაცია ვითარდება შემდეგი მიმართულებით:

- სინჯის შეყვანა
- ქრომატოგრაფიული ექსპერიმენტის მართვა
- ექსპერიმენტის მონაცემების კომპიუტერული დამუშავება

აირქრომატოგრაფიაში გამოყენებული გამომთვლელი სისტემები შეიძლება გავყოთ ორ ჯგუფად: ა) „off-line“ სისტემები, რომლებიც ავტომატურია და ძირითადად დამოუკიდებლად მუშაობენ და ბ) „on-line“ სისტემები, რომლებიც ავტომატურია და მუშაობენ ძირითად ხელსაწყოებთან ერთად. აქედან ჩვენთვის უფრო მნიშვნელოვანია „on-line“ სისტემები, რომლებიც ინფორმაციას იღებენ უშუალოდ დეტექტორიდან და შუალედური ეტაპის გავლის გარეშე, რეალურ დროში გადასცემენ ელექტრონულ გამომთვლელ მანქანას (მპმ). ასეთი გამომთვლელი ტექნიკით აღჭურვილი ქრომატოგრაფიული აპარატურის გამოყენებისას ანალიზის შედეგების მიღება და გამოთვლა ხორციელდება ძალიან სწრაფად, პრაქტიკულად ანალიზის დამთავრებისთანავე.

ქრომატოგრაფიული ექსპერიმენტის ავტომატიზაციის ერთ-ერთი რგოლია ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავება. ქრომატოგრაფის დეტექტორიდან წამოსული სიგნალი „ინტერფეისის“ გავლით ხვდება მპმ-ში ციფრული სიგნალის სახით. ციფრული სიგნალი თავის მხრივ საბოლოო შედეგების მიღებამდე, გადის დამუშავების რთულ გზას. ესენია:

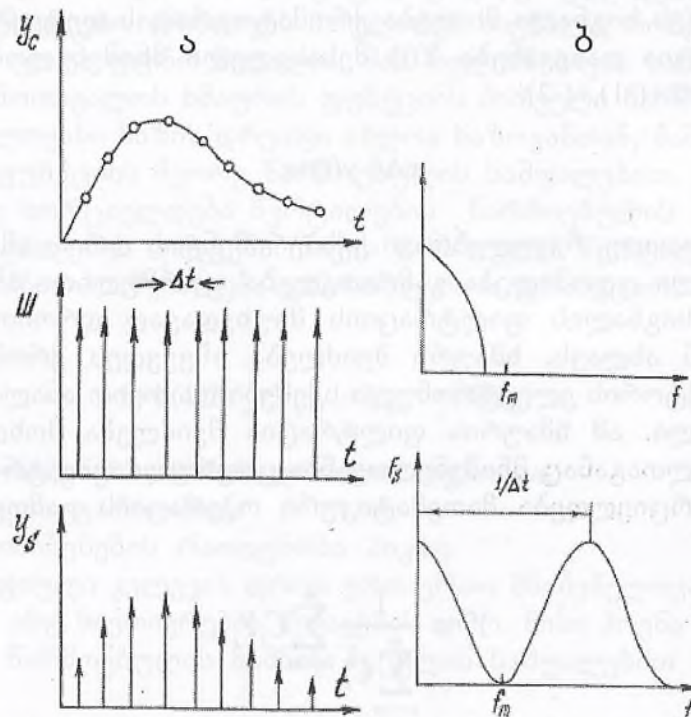
- ხმაურის სიხშირის განსაზღვრა
- პიკის სანყისი და საბოლოო წერტილის განსაზღვრა
- გადაფარული პიკების დაყოფა
- პიკის ფართობის განსაზღვრა
- ნულოვანი ხაზის განსაზღვრა, და ა.შ.

ამ ოპერაციების განხორციელებასთან ერთად ემმ-მ უნდა ჩაატაროს გამოთვლები, რომელთა შედეგები ოპერატორს შეუძლია ეტაპობრივად მიიღოს. ძირითადი გამოთვლებია: პიკების ნუმერაცია, შეკავების დროის განსაზღვრა, პიკის ფართობის გამოთვლა და სხვა დამატებითი გამოთვლები. ეს უკანასკნელი ითვალისწინებს ექსპერიმენტული მონაცემებიდან დამატებითი ინფორმაციის მიღების შესაძლებლობას, რომელიც შეიძლება ეხებოდეს ქრომატოგრაფიულ სვეტში მიმდინარე პროცესებს, სორბატის აგებულებას, მის ფიზიკურ-ქიმიურ მახასიათებლებს და სხვა. პირველი ეტაპის გამოთვლები ხორციელდება ყველა შემთხვევაში, მეორე ეტაპისა კი — საჭიროებისამებრ. აქედან გამომდინარე, განსხვავებულია მონაცემების დამუშავების სისტემა.

განვიხილოთ მონაცემების დამუშავების პირველი ეტაპის შესაბამისი სისტემის თეორიული საფუძვლები.

თავი 6.1. მონაცემთა ემმ დამუშავების თეორიული საფუძვლები

დეტექტორიდან მიღებული სიგნალი გადაეცემა ემმ-ს ციფრული ფორმით, რომელიც ხორციელდება ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელის საშუალებით ორ ეტაპად: პირველი ეტაპია დისკრედიტაცია, იგი განსაზღვრავს პროცესის მიმდინარეობას დროის სხვადასხვა მომენტში. მეორე ეტაპია მიღებული შედეგების კვანტირება, ანუ ანალოგური ფორმიდან ციფრულში გადაყვანა (ნახ.6.1., ა



ნახ.6.1 ა) ანალოგური სიგნალის ციფრულ ფორმაში გარდაქმნა

ბ) ანალოგური და ციფრული სიგნალის ფურიეს გარდამქმნელი

და 6.1., ბ). ანალოგური სიგნალის დროითი რიგის საშუალებით შესაძლებელი უნდა იყოს ორიგინალური ქრომატოგრამის აღდგენა.

$F(f)$ ციფრული სიგნალის მათემატიკური აღდგენა ხორციელდება ე.წ. ნაიკ-ვისტის კრიტერიუმის და ფურიეს გარდამქმნელის საშუალებით [1]:

$$F(t) = \int_{-a}^{+a} Y_c(t) \exp[-2\pi j f(t) dt] \quad (6.1)$$

სადაც, f -აღნიშნავს სიხშირეს, t -დროს, $Y_c(t)$ - ანალოგურ სიგნალს, $j = -1$. თუ ციფრული სიგნალია $F(t)$, მაშინ $Y_c(t)$ - ფუნქცია შეიძლება მივიღოთ უკუგარდამქმნელის საშუალებით:

$$Y_c(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-a}^{+a} F(f) \exp[2\pi j f(t) dt] \quad (6.2)$$

ეს ორი ფორმულა ალგორითმული პროგრამების შედგენისათვის აუცილებელ ფორმულებს წარმოადგენს.

ანალოგური სიგნალის ციფრულ ფორმაში გარდაქმნა მოიცავს უკვე დისკრედიტაციური შესასვლელი მონაცემების კვანტირების ოპერაციასაც. ანალოგიური სიგნალის ცვლილების დიაპაზონი იზომება Δ სიგრძის მქონე ინტერვალებით ვოლტებში (ეს სიგნალი მიიღება ქრომატოგრაფის დეტექტორიდან). კვანტირების ოპერაცია დაიყვანება $Y(t)$ შესასვლელი მნიშვნელობების შეცვლით $n\Delta$ -თი, სადაც $n=0, \pm 1, \pm 2$,

$$n\Delta = y(t) + \varepsilon \quad (6.3)$$

ε - ხმაურის სიდიდე, ჩვეულებრივი ექსპერიმენტის დროს ამ ხმაურის საშუალო კვადრატული ცდომილება გამოითვლება ფორმულით - $\Delta^2 / 12b^2$

ანალოგური სიგნალის ფილტრაციის მიუხედავად დროით რიგს ხმაური ყოველთვის თან ახლავს. ხმაურს შეიძლება ინვევდეს ქრომატოგრაფიული პროცესი, დეტექტორის ელექტრონული სქემები და თვით ანალოგურ - ციფრული გარდამქმნელი. ამ ხმაურის ფილტრაცია შეიძლება მოხდეს სხვადასხვა მეთოდით, რომელთაგანაც მნიშვნელოვანია ციფრული ფილტრაცია. ციფრული ფილტრაცია ხორციელდება მათემატიკური ოპერაციის გამოყენებით:

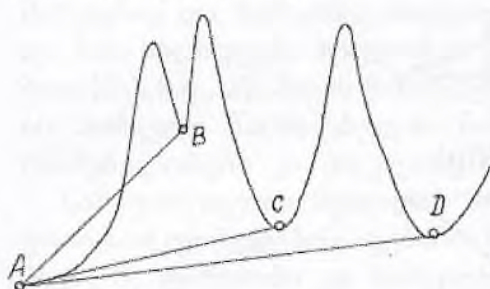
$$Y_j^* = \frac{1}{\sum_{i=-m}^m C_i} \sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+1} \quad (6.4)$$

სადაც, Y_{j+1} - გაუფილტრავი სიგნალის მნიშვნელობაა $j+1$ წერტილში; Y_j - არის j წერტილში გაფილტრული სიგნალი, C_i - მუდმივა [2].

ფილტრაციისათვის გამოყენებული წერტილების რაოდენობაა $(2m+1)$, არჩევით კი შეიძლება განხორციელდეს სხვადასხვა დონის ფილტრაცია [3-13].

ნულოვანი ხაზის კორექცია შეიძლება განვიხილოთ როგორც ყველაზე დაბალსიხშირიანი ხმაურის ფილტრაცია. ამ ოპერაციის წარმატებით ჩატარება საშუალებას იძლევა განესაზღვროთ პიკის ფართობი.

განსაზღვრული ჯგუფის პიკებისათვის ლოკალური კორექცია ტარდება შემდეგნაირად: ნულოვან ხაზზე პოულობენ ორ სხვადასხვა წერტილს Y_i და Y_j . დანარჩენი წერტილები კი ნულოვან ხაზზე არ მდებარეობენ და შემოხაზავენ პიკს. Y_i და Y_j წერტილებს აერთებენ სწორი ხაზით, რომელსაც იღებენ ნულოვან ხაზად (ნახ.6.2)



ნახ.6.2 ნულოვანი ხაზის დრეიფის (ხმაურის) კორექცია

ნულოვან ხაზზე რაიმე წერტილი რომ ვიპოვოთ, უნდა გავავლოთ AB, AC, AD მონაკვეთები. B და C წერტილები წარმოადგენენ ლოკალურ მინიმუმებს. საზღვრავენ მათ დახრილობას და პოულობენ ისეთ D წერტილს, რომელიც ნაკლებადაა დახრილი ნულოვანი ხაზისადმი [14-15].

ქრომატოგრამის დამუშავების შემდეგ ეტაპს წარმოადგენს პიკის პარამეტრების განსაზღვრა. პიკის ფართობის გასაზომად ზუსტად უნდა განესაზღვროთ მისი საწყისი და ბოლო წერტილები. ამისათვის პოულობენ სიგნალს, რომელიც ნულოვანი ხაზის დრეიფზე ცოტა უფრო მაღალია. მას თვლიან პიკის საწყისად (ნახ.6.3.).

ის შეიძლება გამოითვალოს ხმაურის ფუნქციის პირველი წარმოებულის საშუალებით. თუ ნულოვანი ხაზის დრეიფი ახლოა ხაზოვანთან, მაშინ პიკის აღმოჩენა შეიძლება ფუნქციის მეორე წარმოებულის საშუალებით. ე.გ.მ.-ის დახმარებით ადვილად ხორციელდება წერტილების წარმოებულის პოვნა და პიკის სასაზღვრო წერტილების დადგენა. პიკის სასაზღვრო წერტილების დადგენის შემდეგ პიკის ფართობი შეიძლება განისაზღვროს ტრაპეციის მეთოდის გამოყენებით:

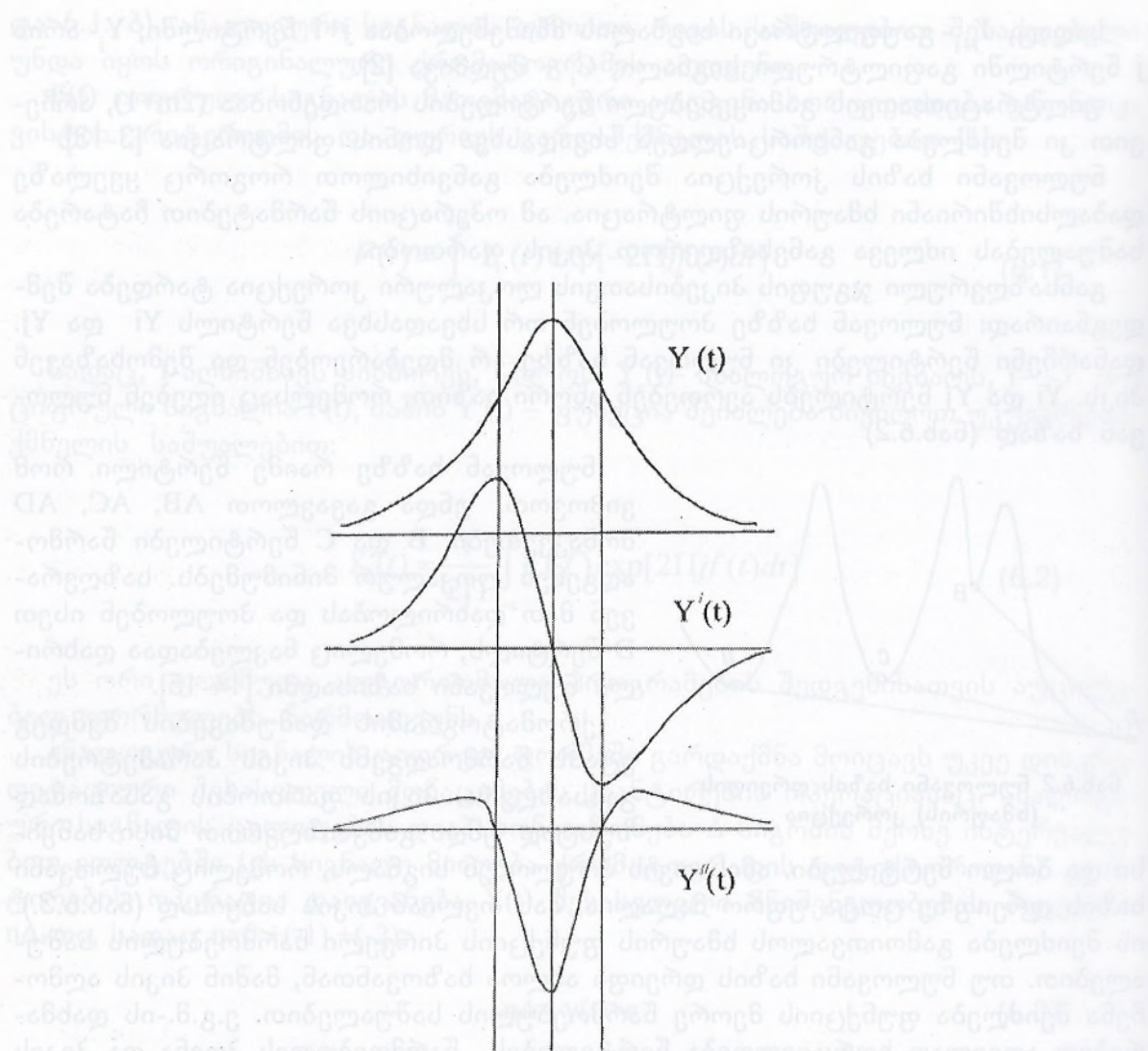
$$S=h(1/2Y_0+Y_1+...+Y_{n-1} +1/2Y_n) \quad (6.5)$$

სადაც, h - მონიშვნებს შორის დროითი სხვაობაა,

S - პიკის ფართობია,

n - მონიშვნების რაოდენობა პიკზე.

ქრომატოგრაფიული კვლევის დროს ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პარამეტრია პიკის მაქსიმუმი ანუ ნივთიერების შეკავების დრო. მისი პოვნა შეიძლება ფუნქციის პირველი წარმოებულის ნიშნის შეცვლის საშუალებით [15-22].



ნახ.6.3 (t) ფუნქციის სიგნალი და მისი წარმოებულები, რომელთა საშუალებითაც განისაზღვრება პიკის სასაზღვრო წერტილები და პიკის მაქსიმუმი

თავი 6.2. გადაფარული პიკების მათემატიკური დაყოფა

გარდა ზემოთ აღნიშნულისა, ქრომატოგრაფიის ძირითადი პრობლემაა რთული ნარევების სრულად დასაყოფად ოპტიმალური პირობების შერჩევა. ხშირად ადგილი აქვს მეზობელი პიკების გადაფარვას და შესაბამისად მიიღება არასრული დაყოფა. ებმ კი საშუალებას იძლევა მათემატიკურად დავყოთ გადაფარული პიკები. მათემატიკური დაყოფის მეთოდებს მიეკუთვნება: პერპენდიკულარების მეთოდი და სამკუთხედების მეთოდი [23-24].

პერპენდიკულარების მეთოდი მდგომარეობს შემდეგში: ქრომატოგრამების გადაღუნვის მინიმალური M წერტილიდან უშვებენ პერპენდიკულარს, რომლის მარჯვნივ და მარცხნივ მიღებული ფიგურების ფართობს აღნიშნავენ S_1 და S_2 და მათ სიდიდეებს პოულობენ ტრაპეციის ფორმულის ინტეგრირების საშუალებით (ნახ.6.4., ა). პიკის მინიმალური წერტილი განისაზღვრება მრუდის ფუნქციის პირველი წარმოებულის ნიშნის შეცვლით, შესწორებული კოეფიციენტის მნიშვნელობებს კი პოულობენ სპეციალურ ცხრილებში.

სამკუთხედების მეთოდის არსი მდგომარეობს მრუდის შიგნით წარმოსახვითი სამკუთხედების აგებაში. ნახ. 6.4., ბ-ზე S_1 ფართობი ეკუთვნის მარჯვენა პიკს, S_2 ფართობი კი მარცხენას. S_3 ფართობი საერთოა ორივე პიკისათვის. მის საპოვნელად პიკების მაქსიმუმების წერტილებიდან დაუშვებენ პერპენდიკულარებს ნულოვან ხაზზე, რომლებიც წარმოადგენენ მართკუთხა სამკუთხედის კათეტებს, ჰიპოტენუზას კი ავლებენ პიკების გადახრის წერტილებზე გავლით. აქედან გამომდინარე S_3 ფართი შეიძლება გამოვსახოთ Δ_1 და Δ_2 სამკუთხედების ფართობების მეშვეობით. თითოეული გადაფარული პიკის ფართობი გამოისახება ფორმულებით [25-27]:

$$S_r = S_1 + \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} S_3 \qquad S_l = S_2 + \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} S_3 \qquad (6.6)$$

პიკებზე გადაღუნვის წერტილები შეიძლება განისაზღვროს ფუნქციის მეორე წარმოებულის ნიშნის შეცვლით [28-31].

გადაფარული პიკების ფართობის განსაზღვრის მესამე მარტივ მეთოდს წარმოადგენს დაყოფის **დემოკრატიული** მეთოდი (ნახ.6.4., გ).

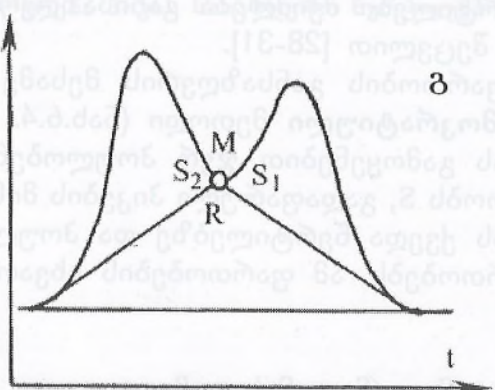
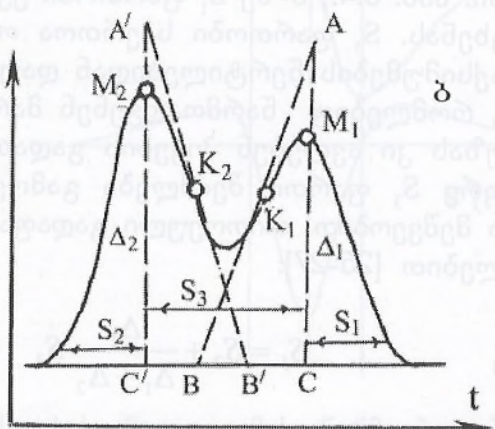
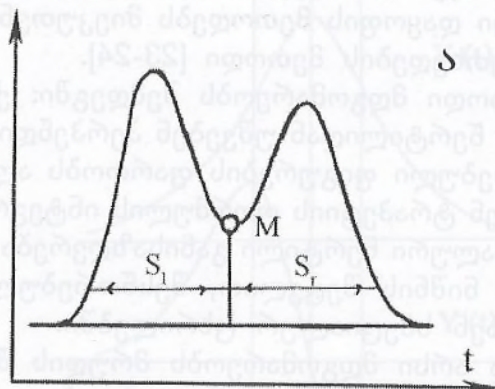
დემოკრატიული მეთოდის გამოყენებით ჯერ პოულობენ მრუდის ქვემოთ მოთავსებულ საერთო ფართობს S , გადაფარული პიკების მინიმუმის წერტილიდან ავლებენ მხებს მრუდის ქვედა წერტილებზე და პოულობენ მათ ზემოთ მოთავსებულ S_1 და S_2 ფართობებს. ამ ფართობების სხვაობა ტოლია R სამკუთხედის ფართობის:

$$S_r - (S_l - S_2) = R \qquad (6.7)$$

შემდეგ კი საზღვრავენ მარჯვენა და მარცხენა პიკის ფართობებს:

$$S_l = S_2 + \frac{S_2}{S_1 + S_2} R \quad S_r = S_1 + \frac{S_1}{S_1 + S_2} R \quad (6.8)$$

ეს მეთოდი წინა მეთოდებთან შედარებით უფრო მარტივია და ზუსტი [32], დეტალური ინფორმაცია ამ მეთოდების შესახებ მოცემულია [33-42].



ნახ. 6.4 გადაფარული პიკების ფართის განსაზღვრის მეთოდები:

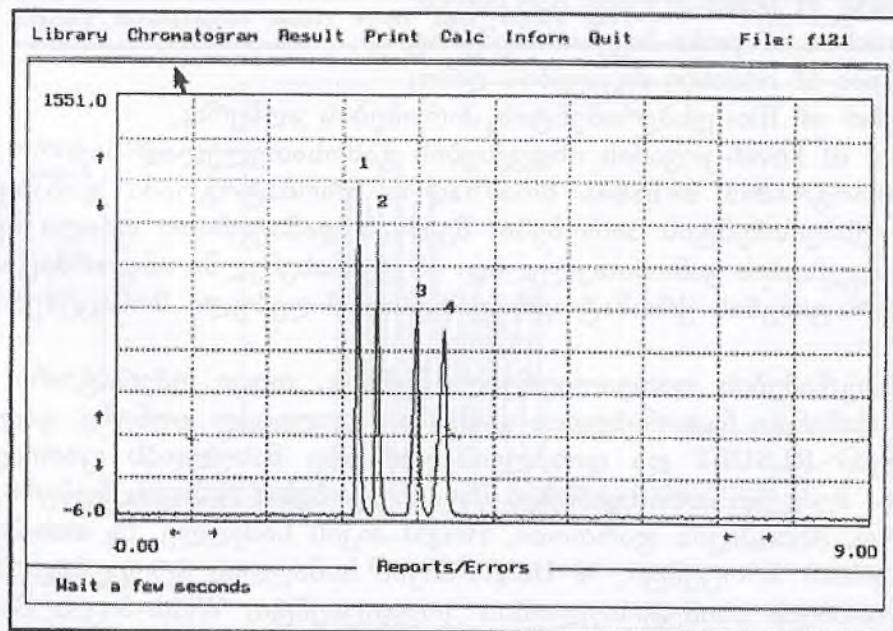
- ა) პერპენდიკულარების მეთოდი; ბ) სამკუთხედების მეთოდი;
გ) დაყოფის დემოკრატიული მეთოდი

თავი 6.3. ქრომატოგრაფიული მონაცემების კომპიუტერული დამუშავება

6.3.1. პროგრამა „SUPERCHROM V5“

საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის პ. მელიქიშვილის სახელობის ფიზიკური და ორგანული ქიმიის ინსტიტუტის კომპიუტერული ქიმიის ლაბორატორიაში, პროფ. კ. ამირხანაშვილის მიერ შემუშავებულია ქრომატოგრაფიული მონაცემების შეკრებისა და დამუშავების უნივერსალური პროგრამა „SUPERCHROM-V5“, რომელიც საშუალებას იძლევა მივიღოთ ტრადიციული და სტანდარტული მონაცემების გარდა უნიკალური ინფორმაცია უშუალოდ ქრომატოგრაფირების პროცესზე, მოვახდინოთ სვეტში მიმდინარე სორბციული პროცესების რაოდენობრივი შეფასება და ანალიზი, ელუირებადი კომპონენტების ზოგიერთი გათვლილი თერმოდინამიკური მახასიათებლების გამოყენებით. მივიღოთ თეორიული ქრომატოგრამები, რომლებიც ასახავენ ქრომატოგრაფიული ზონის დეტექტორში შესვლისას ნიმუშის მომზადების, დოზირების, ტემპერატურის, წნევის, უძრავი ფაზის სორბციული მახასიათებლებისა და კონცენტრაციის პროფილის გავლენას [43].

წარმოდგენილი ავტომატიზაციის სისტემები და მათემატიკური მოდელირების პროგრამები წარმატებით შეიძლება იქნეს გამოყენებული როგორც ფიზიკური ქიმიის ლაბორატორიებში, ასევე ბიოლოგიური, ბიოფიზიკური, სამედიცინო, გენური ინჟინერიის, ბიოტექნოლოგიის, ეკოლოგიის, სასამართლო ექსპერტიზისა და სხვა ლაბორატორიებში, ყველგან, სადაც აუცილებელია ქრომატოგრაფიული ანალიზის მეთოდების გამოყენება.



ნახ. 6.5. პროგრამა SUPERCHROM-ის მენიუს საერთო სურათი და დამუშავებული ქრომატოგრამა

პროგრამა SUPERCHROM-V5 შეიცავს შემდეგ ბლოკებს: LIBRARY, CHROMATOGR, RESULT, PRINT, CALC, INFORM და QUIT. განვიხილოთ თითოეული ბლოკი ცალ-ცალკე (ნახ.6.5.)

მას შემდეგ რაც კომპიუტერში პროგრამა SUPERCHROM V5 ჩაიტვირთება, დისპლეის ეკრანზე გამოჩნდება ძირითადი მენიუ ზემოთ ჩამოთვლილი ბლოკებით. პირველ რიგში ოპერატორი იყენებს ბლოკ LIBRARY-ს. მას აქვს თავისი მენიუ:

- Load-დამუშავებისთვის საჭირო ფაილის გამოძახება;
- Write-ახალი ფაილის ჩანერა და თუ, საჭიროა მასში შესწორების შეტანა მუშაობის პროცესში;
- Delete-ფაილის ნაშლა;
- New-ახალი ფაილის შექმნა.

ქრომატოგრამის დასამუშავებლად ოპერატორი იძახებს ქვეპროგრამას Load-ს, რის შემდეგაც იხსნება ფანჯარა და ოპერატორს კომპიუტერში შეჰყავს საჭირო ფაილი (სახელი მისი მისამართის მითითებით). ამის შემდეგ პროგრამა მუშაობს ავტომატურ რეჟიმში: პოულობს ფაილს და ამუშავებს ქრომატოგრამას.

მას შემდეგ რაც ეკრანზე გამოჩნდება ქრომატოგრამა, ოპერატორს შეუძლია დაათვალიეროს მისი ცალკეული ნაწილები (როგორც პორიზონტალური ასევე ვერტიკალური მიმართულებით), რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, როდესაც ექსპერიმენტის პროცესში მიიღება რთული ქრომატოგრამა (ბევრი პიკები, პიკების არასრული დაყოფა, ნულოვანი ხაზის დრეიფი, პიკების დაბალი სიმაღლე და სხვა).

დამაკმაყოფილებელი შედეგების შემთხვევაში ოპერატორი გადადის ბლოკ RESULT-ში (იხ. ქვემოთ).

ბლოკ CHROMATOGR-ის მენიუში შედის:

- Marks of peaks-პიკების მარკირება;
- Numbers of peaks-პიკების ნუმერაცია;
- Times of retention-შეკავების დრო;
- Label of file-ექსპერიმენტის პირობების აღწერა;
- File of kovat-კოვაჩის ინდექსების გამოსათვლელად საჭირო ფაილი.

ამ ქვეპროგრამის მიზანია მოამზადოს ქრომატოგრამა დასაბეჭდად და აღწეროს ექსპერიმენტის პირობები; შექმნას დამატებითი ფაილი შეკავებითი კოვაჩის ინდექსების გამოსათვლელად. ამ უკანასკნელში ინფორმაციის ჩანერა ხდება n-პარაფინების ქრომატოგრაფირებით მიღებული მონაცემების საფუძველზე.

ქრომატოგრამების დათვალიერების შემდეგ, თუკი ოპერატორი ჩათვლის, რომ ექსპერიმენტი ჩატარებულია დამაკმაყოფილებელ დონეზე, გადადის შემდეგ ბლოკში RESULT და დისპლეის ეკრანზე ნახულობს ცხრილს, სადაც მოცემულია შემდეგი პარამეტრების მნიშვნელობები: N-პიკის ნომერი, Time-დაყოფის დრო, Area-პიკის ფართობი, Height-პიკის სიმაღლე, % area-პიკის ფართობის საერთო პროცენტი, % Height-პიკის სიმაღლის პროცენტი, Type-პიკის ტიპი, Asym-პიკის ასიმეტრიულობის კოეფიციენტი, Width-პიკის სიგანე მისი სიმაღლის ნახევარზე, Index-კოვაჩის ინდექსი, Plate-თეორიული თეფშების რიცხვი.

სასურველი შედეგების შემთხვევაში ოპერატორი გადადის ბლოკში Print, რომელიც საშუალებას იძლევა ამოვბეჭდოთ შედეგები სასურველი ფორმით.

პროგრამა SUPERCHROM V-5-ში ძირითად სიახლეს წარმოადგენს ბლოკი CALC. მისი დანიშნულებაა ქრომატოგრაფიულ სვეტში მიმდინარე სორბციული პროცესების შესახებ დამატებითი ინფორმაციის მიღება.

ბლოკ CALC-ის მენიუში შედის შემდეგი ფუნქციების აგება:

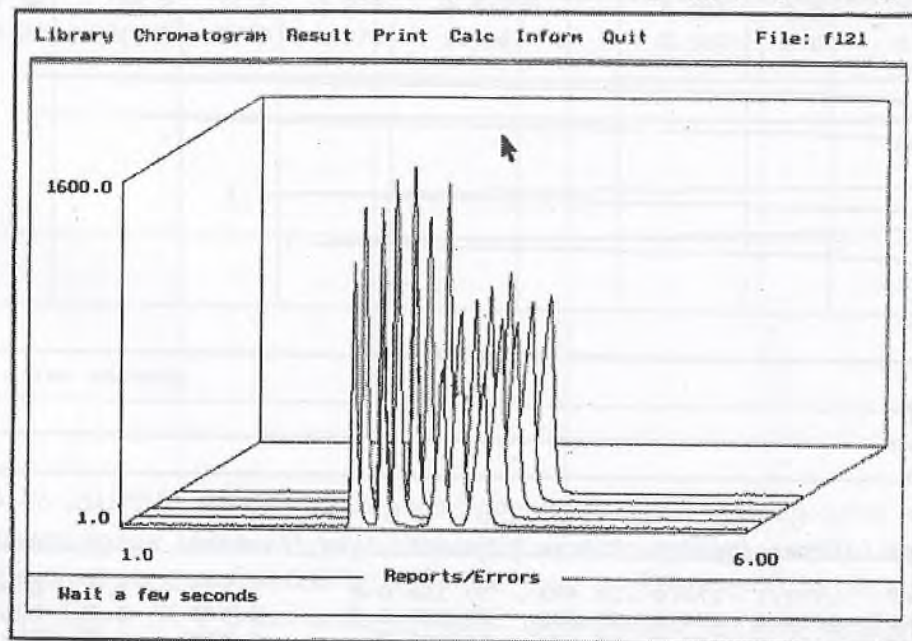
- $Adsorp=F(c)$ -ადსორბციის სითბოს კონცენტრაციაზე დამოკიდებულება;
- $Adsorp=F(c)$ -ადსორბციის სითბოს წნევაზე დამოკიდებულება;
- $Asym=F(c)$ -პიკის ასიმეტრიის კოეფიციენტის დამოკიდებულება მის სიმაღლეზე;
- 3D Board-სამგანზომილებიანი ქრომატოგრამების აგება.

ზემოთ აღნიშნული ფუნქციების გამოსათვლელად მონაცვლეობით იხსნება ორი ფანჯარა, გამოსათვლელი პიკის და დამატებითი ინფორმაციის შესაყვანად.

დამატებითი ინფორმაციის შეყვანის შემდეგ პროგრამა სწრაფად ითვლის ადსორბციის სიდიდეს (a) და საბოლოო შედეგებს წარმოადგენს ეკრანზე იზოთერმის სახით. (იხ. ქვემოთ მოყვანილი იზოთერმები).

„ $Asym=F(H)$ “ ფუნქციის აგება ხორციელდება მხოლოდ პიკის ნომრის მითითებით, რის შედეგადაც მიიღება ორიგინალური გრაფიკები (იხ. ქვემოთ)

როგორც ზემოთ იქნა აღნიშნული, „3D Board“ პროგრამის დანიშნულებაა ეკრანზე სამგანზომილებიანი ქრომატოგრამების წარმოდგენა, ხოლო აუცილებლობის შემთხვევაში მათი საბეჭდო მონაცემების გამოყვანაც. პროგრამის ეს ნაწილი ოპერატორს საშუალებას აძლევს მიიღოს დისპლეის ეკრანზე ქრომატოგრაფირების პროცესზე სხვადასხვა ფაქტორების მოქმედების დინამიური სურათი, შეცვალოს ქრომატოგრამების რაოდენობა, ამოჭრას მათი ცალკეული უბნები და დამუშავების ბოლო ეტაპზე მიიღოს სასურველი ვარიანტი (ნახ.6.6.).



ნახ.6.6. ბენზოლის, ტოლუოლის o-და p-ქსილოლების გაყოფის ხარისხზე ტემპერატურის გავლენის დინამიური სურათი

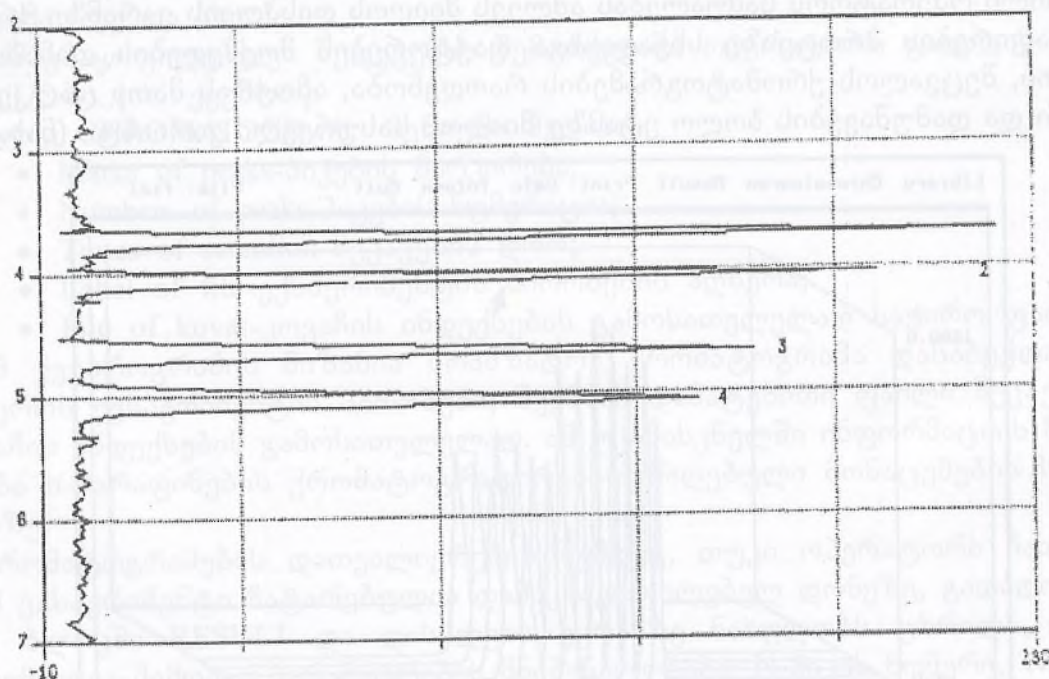
ქვემოთ მოყვანილია ბენზოლის და მისი წარმოებულების (ბენზოლი, ტოლუოლი, o-ქსილოლი, p-ქსილოლი) ქრომატოგრაფიული ანალიზის შედეგად მიღებული მონაცემები. ანალიზი ჩატარდა კვარცის კაპილარულ სვეტზე, სადაც უძრავ თხევად ფაზად გამოყენებული იყო „სმექტიკური“ კლასის პოლიმეთილაკრილატის პოლიმერული თხევადი კრისტალი, მეზოფაზური გარდაქმნის წერტილებით: $K \rightarrow S$ 100°C და $S \rightarrow L$ 175°C .

ცხრილი 6.1.

ბენზოლის და მისი წარმოებულების დამუშავებული
ქრომატოგრამის ამონაბეჭდი („ოქმი“)

SuperChrom System V4.0
Time : 06:57:28 Date : 10/02/95
File : t121

Phase of column : 1pc-1
Length of column,m : 28.65
Diameter of column,mm : 0.2
Thickness of film : 0.2
Temperature of column : 120.0
Temperature of injector : 240.0
Temperature of detector : 240.0
Linear velocity : 17
Frequency discretization : 20
Time of non-sorption gas : 40.0
Elapsed time : 600.0
Date : 09/09/91
Mixture : Benzene+ Toluene + o,p-Xylene



N	Time	Area	Height	% Area	% Height	Type	Asymmet.	Width	Index	Plate
1	3.67	972.1	270.0	22.493	30.366	B-B	1.372	3.3	636	370
2	4.01	1013.6	250.1	23.452	28.137	B-B	0.953	3.4	701	392
3	4.84	1096.9	193.0	25.380	21.706	B	0.330	4.8	766	321
4	5.06	1239.3	175.9	28.675	19.791	B	0.055	6.4	806	263

ანალიზი ჩატარდა ალურ-იონიზაციური ტიპის (FID) ორი დეტექტორით აღჭურვილ ქრომატოგრაფ M-3700-ზე; $t=250^{\circ}\text{C}$ - 280°C ; აირმატარებელი – ჰელიუმი; აირმატარებლის ოპტიმალური სიჩქარე (17.7 სმ/წმ), ხოლო წნევა ექსპერიმენტის პროცესში იცვლებოდა 0.8კგძ/სმ^2 – 1.2კგძ/სმ^2 –მდე. სვეტის ტემპერატურა იცვლებოდა 100°C -დან 180°C -მდე, 10° -იანი საფეხურებით.

მიღებული ქრომატოგრამები ჩაიწერა „on-line“ რეჟიმში კომპიუტერის მეხსიერებაში და ექსპერიმენტის დამთავრების შემდეგ დამუშავდა პროგრამა SUPERCHROM V5-ის საშუალებით.

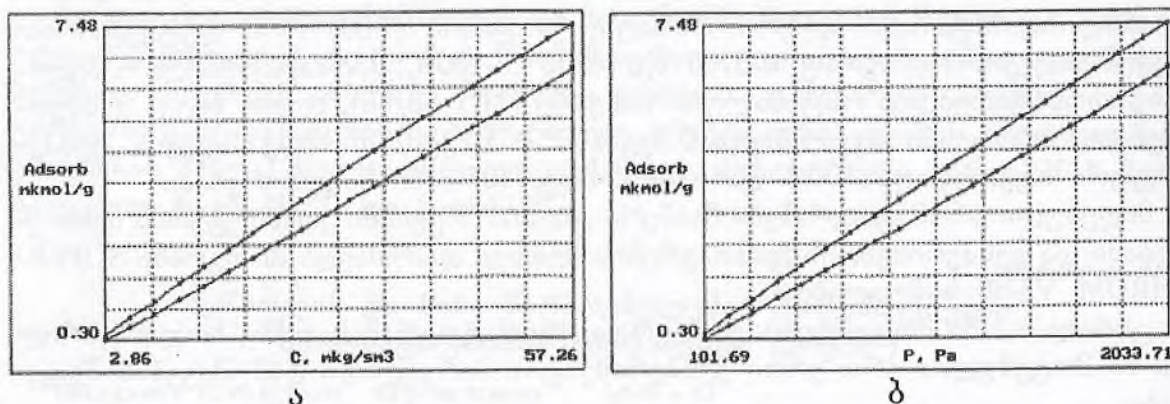
ცხრილ 6.1-ში მოცემულია ერთ-ერთი ქრომატოგრამის ოქმი, ხოლო ცხრილ 6.2-ში მოცემულია ერთ-ერთი ექსპერიმენტის პირველადი დამუშავების შედეგები.

ცხრილი 6.2.
ექსპერიმენტული ქრომატოგრამის პირველადი დამუშავების შედეგები

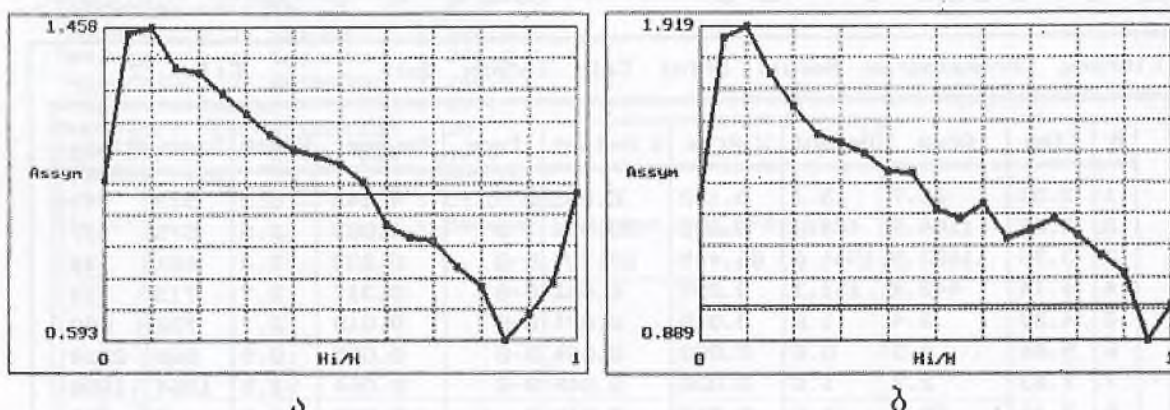
Library Chromatogram Result Print Calc Inform Quit										File: t2
N	Time	Area	Height	% Area	% Height	Type	Asymmet.	Width	Index	Plate
1	2.55	25.7	15.1	0.192	0.665	B	4.143	0.9	573	943
2	2.63	1104.9	474.3	8.232	20.902	B	1.003	2.0	575	437
3	3.75	11602.5	1581.6	86.449	69.704	B-B	0.202	7.2	651	174
4	4.14	442.4	151.1	3.297	6.661	B-B	0.317	2.7	715	519
5	4.29	2.4	1.6	0.018	0.071	B-B	0.010	2.1	732	680
6	5.66	0.5	0.8	0.003	0.034	B-B	0.035	0.9	868	2214
↑ 7	7.63	2.7	1.0	0.020	0.045	B-B	0.064	1.5	1064	1690
8	9.16	28.2	11.6	0.210	0.513	B	0.059	3.8	0	794
↓ 9	9.23	211.8	31.9	1.578	1.406	B	0.907	6.8	0	448

Wait a few seconds Reports/Errors

პროგრამა „SUPERCHROM V5“ შესაძლებლობას გვაძლევს ავაგოთ ადსორბციის იზოთერმები. ნახ.6.7-ზე გამოსახულია იზოთერმები $a=f(c)$ და $a=f(p)$ ტოლუოლისთვის, ხოლო ნახ.6.8-ზე გამოსახულია α -ქსილოლის პიკის ასიმეტრიის კოეფიციენტის (K_{as}) მისი სიმაღლისგან დამოკიდებულების ფუნქციები.



ნახ. 6.7. ტოლუოლის ადსორბციის კოეფიციენტის კონცენტრაციაზე (ა) და წნევაზე (ბ) დამოკიდებულების იზოთერმები. $P=0.8$ კგ/სმ², $C=0.6$ მკლ, $t=120^{\circ}\text{C}$



ნახ.6.8. o-ქსილოლის პიკის ასიმეტრიის კოეფიციენტის სიმაღლისგან დამოკიდებულების ფუნქცია. $P=1.1$ კგ/სმ², $C=0.6$ მკლ, $t=180^{\circ}\text{C}$ (ა), $t=170^{\circ}\text{C}$ (ბ)

6.3.2. ადსორბციული პროცესების ქრომატოგრაფიული კვლევა

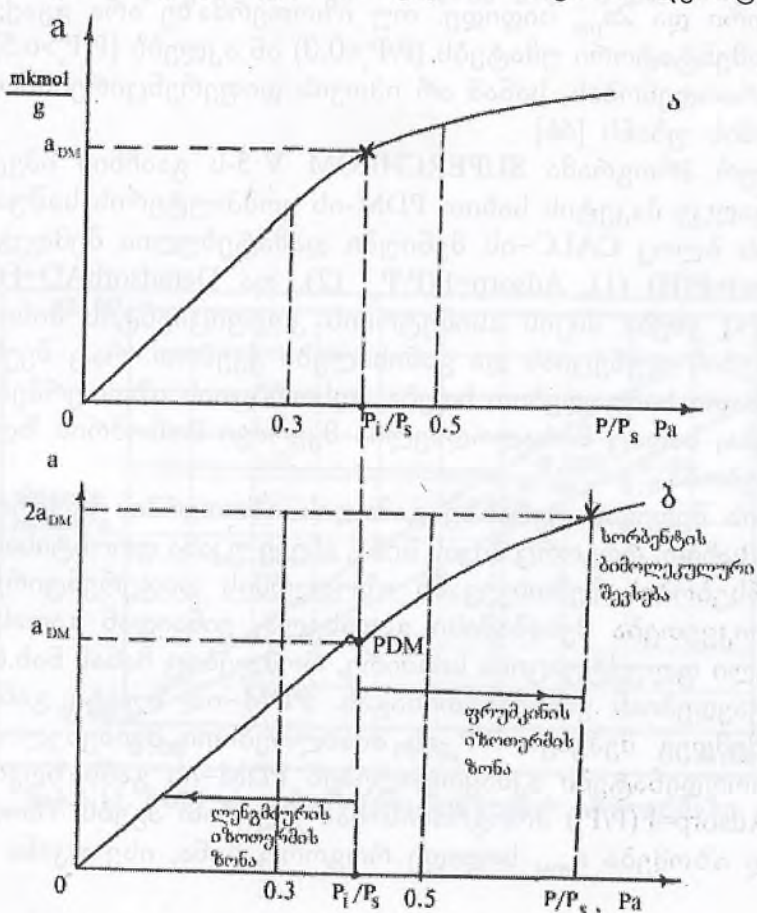
ცნობილია, რომ გაზის ან ორთქლის ადსორბციის სიდიდე დამოკიდებულია არა მარტო მის ბუნებაზე, არამედ სორბციის პროცესის პირობებზე, უპირველეს ყოვლისა წნევაზე, ტემპერატურაზე და ადსორბენტის სტრუქტურაზე. სხვა დანარჩენ ერთნაირ პირობებში გაზის წნევის მომატება, როგორც წესი, იწვევს ადსორბციის ზრდას. ადსორბციული იზოთერმის სხვადასხვა უბანზე ეს გავლენა სხვადასხვანაირად გამოიხატება. მაგალითად, არაფოროვანი და მიკროფოროვანი ადსორბენტებისთვის ეს გავლენა მკვეთრად არის გამოხატული დაბალი ფარდობითი წნევის უბანში, ხოლო მსხვილფოროვანი ადსორბენტებისთვის კი შეიმჩნევა უფრო მაღალი წნევის პირობებში (გაჯერების წნევასთან ახლოს). უნდა აღინიშნოს, რომ ადსორბციული მონოშრის შევსების უბანში ადსორბცია ნელდება წნევის გადიდებისას და შესაბამისად იზოთერმის ამ ნაწილში ქმნის მდორე უბანს, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია ფოროვანი სხეულის სტრუქტურაზე. წნევის შემდგომი

გადიდებისას ადსორბირებული ნივთიერების რაოდენობა იზრდება პოლიმოლეკულური ადსორბციის ხარჯზე და ფოროვანი სხეულების შემთხვევაში დასრულდება კაპილარული კონდენსაციით [44-45].

მყარი სხეულის შინაგანი სტრუქტურის გამომხატველი ადსორბციის იზოთერმის ხასიათი საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ამა თუ იმ სახის ფორების განვითარების ხარისხი, დავადგინოთ სორბენტის სტრუქტურის ტიპი, მისი კუთრი ზედაპირის სიდიდე და ბუნება.

ორთქლის სორბციის იზოთერმებით მიიღება ინფორმაცია ადსორბენტებისა და კატალიზატორების შინაგან სტრუქტურაზე და იგი გამოიყენება სორბენტის კუთრი ზედაპირის სიდიდისა და ბუნების განსაზღვრისთვის, რისთვისაც შემოტანილია ცნობილი პარამეტრი P/P_s (ფარდობითი წნევა), სადაც P_s არის ნაჯერი ორთქლის წნევა მოცემული ტემპერატურის დროს, ანუ როგორც მას უწოდებენ ადსორბირებული ნივთიერებების ნაჯერი ორთქლის „დრეკადობა“.

ზემოთ აღნიშნული მნიშვნელოვანი ინფორმაცია მიიღება $P/P_s=0.3-0.5$ უბანში (ფრუმკინის იზოთერმა), რომელიც მოიცავს სორბენტის მონომოლეკულური შევსებიდან ბიმოლეკულურში გადასვლას. სწორედ ამ უბანშია შესაძლებელი ასეთი გადასვლის აღმოჩენა, ანუ მონომოლეკულური შევსების ადსორბციისა და მამასადამე სორბენტის კუთრი ზედაპირის განსაზღვრა. ნახ.6.9 მოცე-



ნახ.6.9. იზოთერმაზე მკვრივი მონოშრის ზღვრული სიდიდის შესაბამისი წერტილის განსაზღვრის სქემა

მულია სქემა, რომელიც ასახავს ასეთი გამოთვლების აუცილებელ პროცედურას და გვიჩვენებს, რომ მკვრივი მონომოლეკულური შევსების ზღვრული მნიშვნელობის გასაგებად აუცილებელია ქრომატოგრაფიული ექსპერიმენტი ჩატარდეს სპეციალურ პირობებში, სადაც ტემპერატურისა (T) და ნიმუშის კონცენტრაციების (C) აუცილებელი სიდიდეები შეირჩევა.

კომპონენტის ქრომატოგრაფირების შემდეგ იგება ადსორბციის იზოთერმა $a=f(P/P_s)$ კოორდინატებში (ნახ.6.9., ა). ამ იზოთერმის საშუალებით განისაზღვრება ადსორბციის ხასიათი, ანუ შეფასდება ფარდობითი წნევის P/P_s ცვლილების უბანი (ზრდის). თუკი გრაფიკზე აღმოჩნდება $P/P_s=0.3-0.5$ -ის შესაბამისი იზოთერმის უბანი, მაშინ ხდება ამ უბნის დიფერენცირება (ნახ.6.9). დიფერენცირების შემდეგ იზოთერმის ამ უბანში გამოჩნდება სორბენტის ზედაპირის ადსორბირებული შევსების მახასიათებელი ცვლილება, რაც შეესაბამება მკვრივი მონომრის ზღვრულ მნიშვნელობას (PDM - Point of Dense Monolayer) და წარმოადგენს ლენგმიურისა და ფრუმკინის იზოთერმებს შორის საზღვარს. PDM-ის გაგების შემდეგ ადვილად ვიგებთ a_{PDM} -ს და შესაბამისად $2a_{PDM}$ -ს (სორბენტის ზედაპირის ბიმოლეკულური შევსება), რაც წარმოადგენს ფრუმკინის იზოთერმის ზედა უბნის საზღვარს [46].

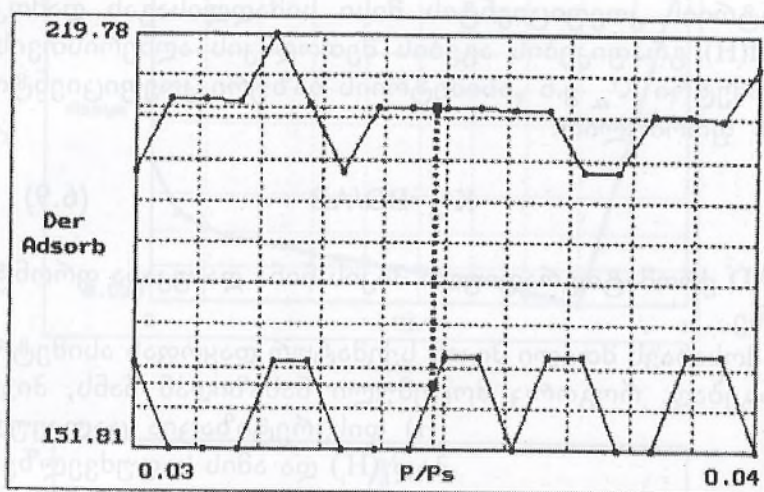
a_{PDM} -ის მნიშვნელობის გაგების შემდეგ ადვილად გამოითვლება სორბენტის კუთრი ზედაპირი და $2a_{PDM}$ სიდიდე. თუ იზოთერმაზე არა გვაქვს $P/P_s=0.3-0.5$ უბანი, ექსპერიმენტატორი უმატებს ($P/P_s < 0.3$) ან აკლებს ($P/P_s > 0.5$) ელუირებადი კომპონენტის რაოდენობას, სანამ არ იპოვის დიფერენცირებისათვის აუცილებელი იზოთერმის უბანს [46].

უნივერსალურ პროგრამა SUPERCHROM V 5-ს გააჩნია სპეციალური ქვეპროგრამები ცალკე პაკეტის სახით PDM-ის კომპიუტერის საშუალებით ასაგებად. ამისათვის ბლოკ CALC-ის მენიუში დამატებულია შემდეგი ქვეპროგრამები: $Asym(Few)=F(H)$ (1), $Adsorp=F(P/P_s)$ (2), და $DeradsorbAQ=F(P/P_s)$ (3).

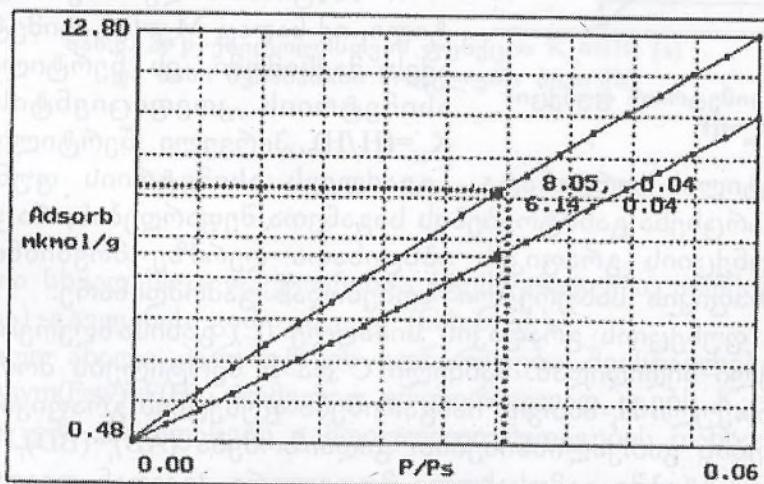
პროგრამა (1) ეხება პიკის ასიმეტრიის კოეფიციენტის მისი სიმაღლისგან დამოკიდებულების ფუნქციას და განიხილება ქვემოთ. რაც შეეხება (2) და (3) პროგრამებს, მათი საშუალებით ხდება ადსორბციის იზოთერმების იმ უბნების დიფერენცირება, სადაც მოსალოდნელია მკვრივი მონომრის ზღვრული მნიშვნელობის არსებობა.

გამოთვლების შედეგად ეკრანზე გამოდის იზოთერმის საჭირო უბანი დიფერენცირებული სახით, როგორც პიკის წინა, ასევე უკანა ფრონტისათვის (ნახ.6.10.).

PDM-ის არსებობის შემთხვევაში იზოთერმის დიფერენცირებულ მრუდზე აშკარად გამოიკვეთება შესაბამისი გადასვლა, ვინაიდან გადასვლის სიხშირე და ელუირებული ფლუქტუაციის სიხშირე, რომლებიც ჩანან ნახ.6.10-ზე, მთელი რიგით განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. PDM-ის ზუსტი განსაზღვრისთვის ოპერატორს შემდეგ შეჰყავს P/P_s -ის მიახლოებითი მნიშვნელობები და თუკი შეყვანილი კოორდინატები აკმაყოფილებენ PDM-ის განსაზღვრის სიზუსტეს, ოპერატორი $Adsorp=F(P/P_s)$ პროგრამის საშუალებით აგებს იზოთერმას, სადაც ავტომატურად იზომება a_{PDM} სიდიდე როგორც წინა, ისე უკანა ფრონტისთვის (ნახ.6.11.).



ნახ.6.10. ბენზოლის იზოთერმის დიფერენცირებული მრუდი



ნახ.6.11. PDM-ის განსაზღვრა ბენზოლის იზოთერმაზე

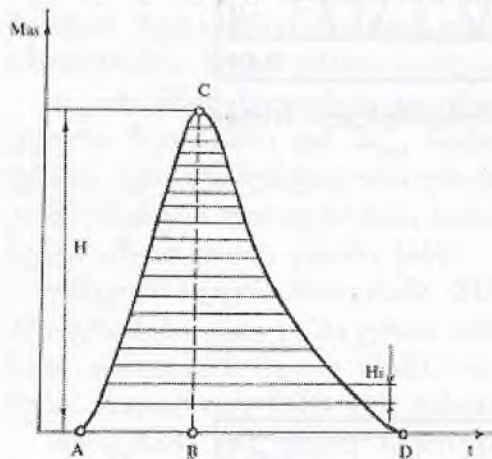
6.3.3. ასიმეტრიის კოეფიციენტის სიმაღლისგან დამოკიდებულების ფუნქცია, როგორც ქრომატოგრაფიაში ახალი მაიდენტიფიცირებელი პარამეტრი

პიკის ასიმეტრიის კოეფიციენტის მისი სიმაღლისაგან დამოკიდებულების ფუნქციის $K_{as}=f(H)$ გრაფიკების აგების მეთოდის აღწერისთვის შემოვიტანოთ ახალი პარამეტრი K'_{as} , ე.წ. „ასიმეტრიის ბაზური კოეფიციენტი“, განსაზღვრული შემდეგი ფორმულით:

$$K'_{as}=BD/AB \quad (6.9)$$

სადაც AB, AD ქრომატოგრაფიული პიკის წინა და უკანა ფრონტების სიგანეა ნულოვან ხაზზე.

ნახ. 6.12. გამოსახავს მთელი პიკის სქემატურ დაყოფას ასიმეტრიის ფუნქციის $M_{as}=f(t)$ ასაგებად. როგორც მოცემული ნახაზიდან ჩანს, პიკის სიმაღლის



ნახ.6.12. პიკის ასიმეტრიის ფუნქცია $M_{as}=f(t)$

(H) დისკრეტიზაცია ცალკეულ მდგენელებად (H_i) და ამის საფუძველზე $M_{as}=f(t)$ ფუნქციის აგება, საშუალებას იძლევა ვიზუალურად ინახოს და შეფასდეს პიკის ფორმა და აიგოს მოდელური ქრომატოგრაფიული პიკი სასურველ მასშტაბში.

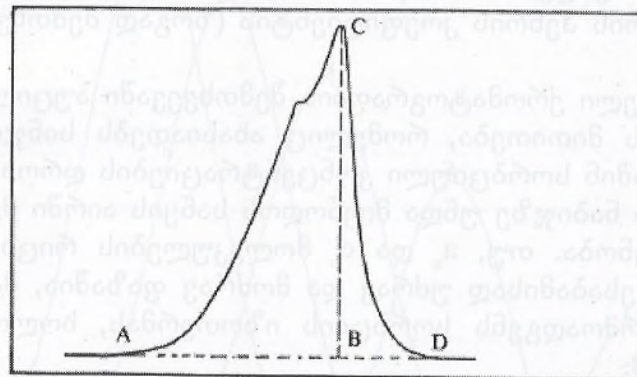
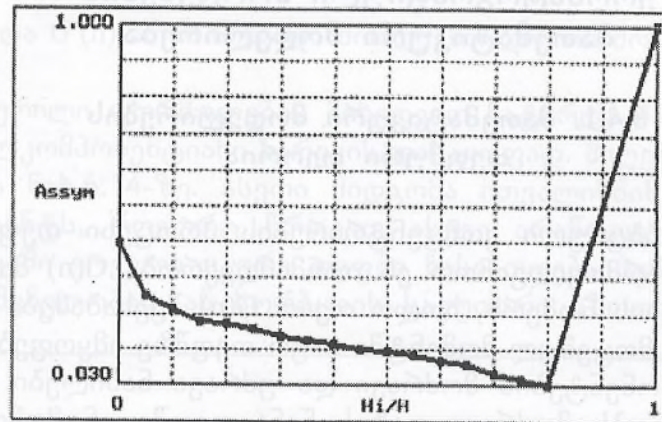
პიკის მოდელირება ხორციელდება $K_{as}=(H_i/H)$ ფუნქციის გამოთვლებისა და გრაფიკის გამოყენებით. პიკის გამოსახვა შემდეგი თანმიმდევრობით მიმდინარეობს:

1. აბსცისათა ღერძზე აიღება B წერტილი, იქ სადაც $M_{as}=f(t)$ ასიმეტრიის მრუდს აქვს მაქსიმუმი. ეს წერტილი ამოირჩევა ასიმეტრიის კოეფიციენტის გრაფიკზე $K_{as}=(H_i/H)$ პირველი წერტილის მიხედვით.

პირველი წერტილის ორდინატა გვაძლევს ასიმეტრიის ფუნქციის $M_{as}(t)$ მარჯვენა და მარცხენა განშტოებების სიგანეთა შეფარდებას, რაც საშუალებას იძლევა ამ ფუნქციის გრაფიკის აბსცისათა ღერძზე მოვნიშნოთ A და D წერტილები გრაფიკის სასურველი ზომებიდან გამომდინარე.

ასიმეტრიის ფუნქციის გრაფიკის სიმაღლე (C) განისაზღვრება მოდელური პიკის სასურველი სიდიდიდან. მანძილი C და B წერტილებს შორის იყოფა 20 ნაწილად, თითოეული H_i -სათვის იანგარიშება ფუნქციის გრაფიკიდან $(K_{as})_i=(H_i)$ და პიკის ზონების გათვალისწინებით გადაიზომება $(AB)_i=(BD)_i$ სიდიდეები.

სასურველ მასშტაბში გამოსახული მოდელური პიკიდან თვალნათლივ ჩანს ჩვეულებრივ ქრომატოგრამაზე შეუმჩნეველი ქრომატოგრაფიული პროცესის თავისებურებები. კერძოდ, K_{as} სიდიდე განსაზღვრავს სვეტის შიგნით მიმდინარე სორბციის პროცესის საერთო ხასიათს, ხოლო პიკის ფორმის მიხედვით



ნახ.6.13. p -ქსილოლისთვის ფუნქცია $K_{as}=f(H)$ (ა) და მისი შესაბამისი მოდელური პიკი (ბ)

შესაძლებელია სხვადასხვა ფაქტორების (ტემპერატურა, აირმატარებლის სიჩქარე და სხვა) გავლენის გამოკვლევა (ნახ.6.13.).

შემოღებული ახალი პარამეტრის აღწარმოება შეისწავლება სპეციალური პროგრამით $Asym(Few)=F(H)$, რომელიც ერთდროულად აგებს $K_{as}=f(H)$ ფუნქციის ათამდე მონაცემს და აფასებს გამოთვლილი შედეგების თანხვედრის ხარისხს.

თავი 6.4. ქრომატოგრაფიული პროცესების მათემატიკური მოდელირება

6.4.1. მათემატიკური მოდელირების თეფშური თეორია

განვიხილოთ სორბციული კონცენტრირების პროცესი თეფშების თანმიმდევრობის სახით. წარმოვიდგინოთ ეს თანმიმდევრობა $G(n)$ მასივით. რიცხვი n აღნიშნავს თეფშების ნომერს, ხოლო თვით $G(n)$ შეესაბამება მოლეკულების რიცხვს, რომლებიც მოცემულ მომენტში n -ურ თეფშზე იმყოფებიან. თითოეულ თეფშზე არის კომპონენტების მოძრავი და უძრავი ნაწილები. მოდელირების პროცესი მიმდინარეობს მოძრავი ფაზის წინა თეფშიდან მომდევნო თეფშზე თანმიმდევრული გადაადგილებისა და მომდევნოს უძრავ ნაწილთან შეკრებაში. შემდეგ ხდება კომპონენტების ახალი რაოდენობის გადანაწილება მოძრავ და უძრავ ნაწილებს შორის ჰენრის კოეფიციენტის (ზოგად შემთხვევაში იზოთერმის) შესაბამისად.

თუ, გასამჟღავნებელი ქრომატოგრაფიის შემთხვევაში აუცილებელია $G(n)$ -ის საწყისი განაწილების მითითება, რომელიც ახასიათებს სინჯის სიდიდეს და შეყვანის ხარისხს, მაშინ სორბციული კონცენტრაციების დროს პირველ თეფშზე ყოველ მომდევნო ნაბიჯზე უნდა მიენოდოს საწყის აირში მყოფი ადსორბირების მუდმივი რაოდენობა. თუ, a_n და c_n მოლეკულების რიცხვია, რომლებიც მოცემულ თეფშზე შესაბამისად უძრავ და მოძრავ ფაზაშია, მაშინ დამოკიდებულება $a_n = \phi(C_n)$ წარმოადგენს სორბციის იზოთერმას, ხოლო ჯამი $a_n + c_n$ ტოლია $G(n)$. ამიტომ:

$$G(n) = a_n + \phi^{-1}[G(n)] = \phi(a_n) \quad (6.10)$$

სადაც ϕ^{-1} არის ϕ -ის შებრუნებული ფუნქცია, ხოლო ϕ -ფუნქცია (6.8)-ის მარჯვენა ტოლობით მოცემული. მაშინ,

$$a_n = \phi^{-1}[G(n)] = f[G(n)] \quad (6.11)$$

$$c_n = G(n) - a_n \quad (6.12)$$

სადაც $f = \phi^{-1}$ არის ϕ -ის შებრუნებული ფუნქცია.

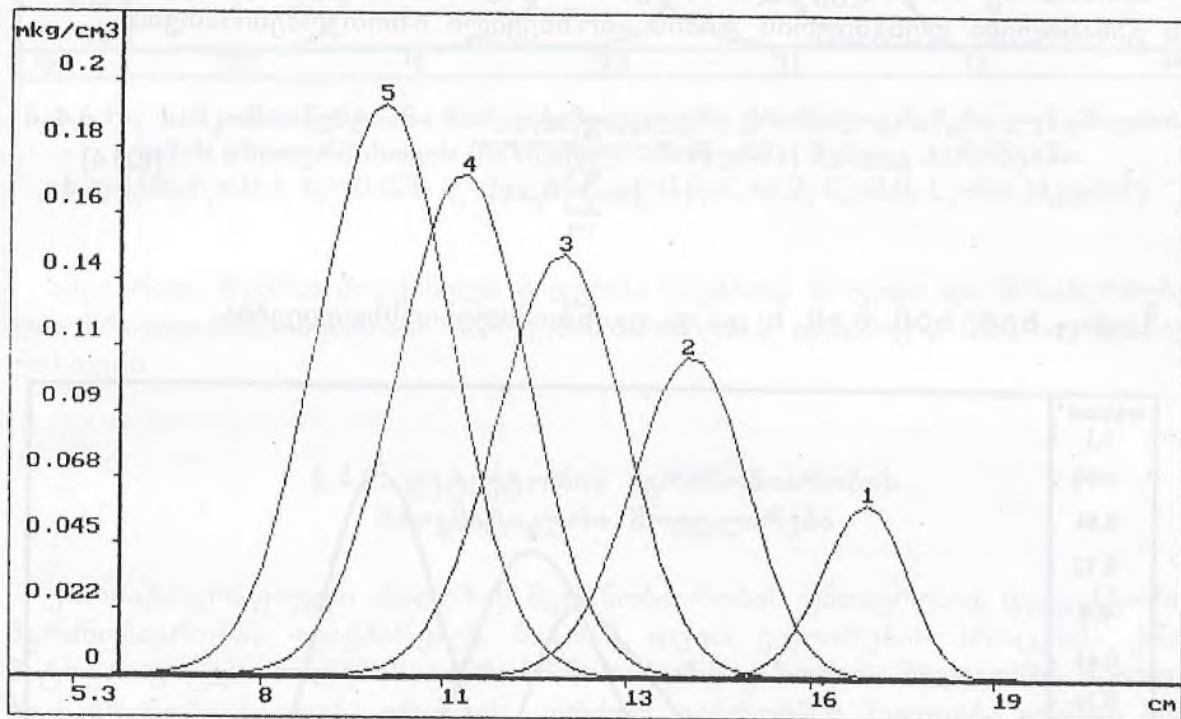
ფორმულები (6.11) და (6.12) იძლევიან a_n და c_n -ის განსაზღვრის ხერხს $G(n)$ მოლეკულების საერთო რიცხვის მიხედვით.

სორბციული კონცენტრირების დროს დაგროვილი ინდივიდუალური კომპონენტის მოძრაობა შეიძლება მოცემული იქნას შემდეგი თანაფარდობით:

$$G'(n+1) = f[G(n+1)] + G(n) - f[G(n)] \quad (6.13)$$

სადაც $G(n)$ და $G'(n)$ არის წინა და მომდევნო დროის მომენტებში შესაბამისი განაწილება.

ზემოთ აღწერილი ფორმულების მიხედვით ჩატარდა მათემატიკური მოდელირება მრავალკომპონენტიანი ნარევის დასაყოფად. მიღებული ქრომატოგრამა მოცემულია ნახ.6.14-ზე. ასეთი მიდგომა ითვალისწინებს ტემპერატურის ცვლად გრადიენტს, როგორც წრფივი, ასევე არაწრფივი იზოთერმისთვის. ასეთ შემთხვევაში ყოველი n -ური თეფში ხასიათდება ჰენრის კოეფიციენტის საკუთარი მნიშვნელობით ან სორბციის საკუთარი იზოთერმით.



ნახ. 6.14. მოდელური ქრომატოგრამა ჰენრის იზოთერმის შემდეგ პირობებში;
კომპონენტების რიცხვი $N=5$; $L=50$ სმ; $V=5.0$ სმ/წმ; $t=2.0$ წმ;
 $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=1.0$ მკლ/სმ³; $G_1=0.2$; $G_2=0.3$; $G_3=0.4$; $G_4=0.7$; $G_5=0.9$

თეფშური მიდგომა საშუალებას იძლევა ერთიანი მოდელის საფუძველზე განვიხილოთ ქრომატოგრაფიული პროცესის ყველა ეტაპი. ქრომატოგრაფიული ზონების მოძრაობა სვეტის გასწვრივ თეფშური მოდელის საფუძველზე ადრეც განიხილებოდა. თუმცა, სორბციის არაწრფივი იზოთერმის დროს არსებობს გაანგარიშების ალგორითმების სრულყოფის პრობლემები.

ქრომატოგრაფიული დაყოფის ტრადიციული მოდელირების ერთ-ერთ ნაკლს წარმოადგენს ის, რომ სვეტის გასწვრივ კონცენტრაციის გადანაწილება თეფშებზე დაიანგარიშება თითოეულ თეფშზე არსებული ნივთიერებების ჯამური რაოდენობის მიხედვით. არაწრფივი იზოთერმის დროს ამას მივყავართ არაწრფივ განტოლებათა სისტემის ძიების აუცილებლობისკენ. ამიტომ შემოთავა-

ზებულია თეფშური გაანგარიშების ახალი ვარიანტი [43]. კონცენტრაციის გადანაწილება ხდება ყოველ ნაბიჯზე მასივის საფუძველზე, რომელიც თითოეულ თეფშზე მოძრავი ფაზის მოდელირებას ახდენს. ამის შედეგად, ნებისმიერ შემთხვევაში აღარ წარმოიშობა არანაწილად განტოლებათა სისტემის ამოხსნის აუცილებლობა.

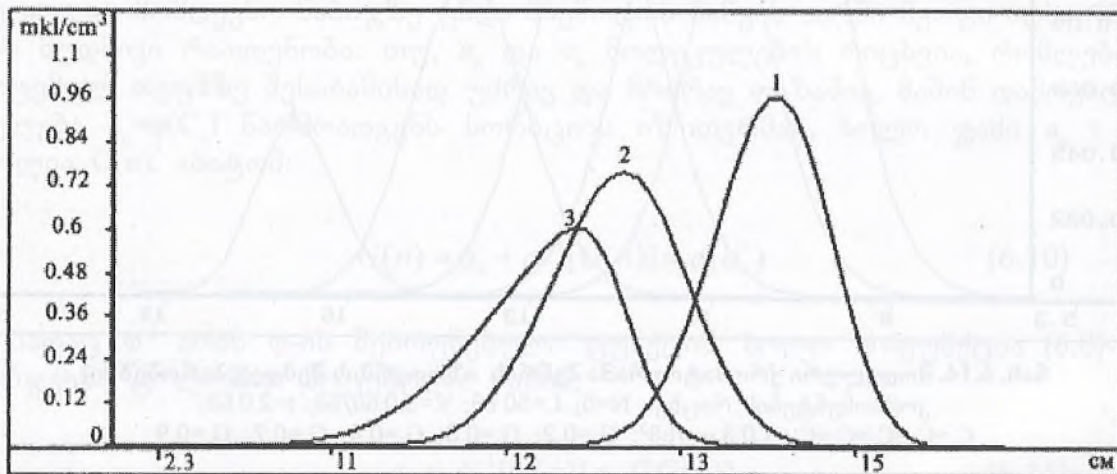
ამ მიდგომის თეორიული საფუძვლები, მათემატიკური აღწერა და ალგორითმი დეტალურად არის აღწერილი ნაშრომში [43]. წინამდებარე წიგნის სპეციფიკიდან გამომდინარე მასზე არ შევჩერდებით.

აღწერილი ალგორითმის მიხედვით ჩატარებულია მოდელირება სორბციის სხვადასხვა იზოთერმისა და სვეტის ეფექტურობის დროს.

ნახ.6.15-ზე წარმოდგენილია სამკომპონენტიანი ნარევის კონცენტრაციების განაწილება ლენგმიურის ტიპის ამოზნექილი იზოთერმებისათვის:

$$a_i = \frac{g_i x c_i}{1 + \sum_{j=1}^3 b_j x c_j} \quad (6.14)$$

სადაც $b_1 > 0$, $b_2 > 0$, $b_3 > 0$. b_i და g_i უგანზომილებო სიდიდეებია.



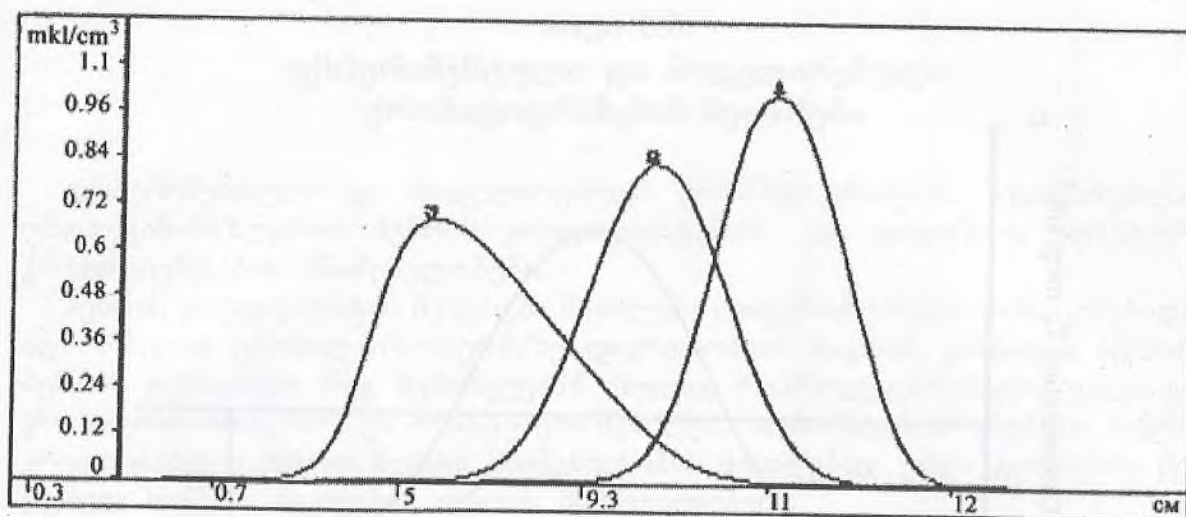
ნახ.6.15. სამკომპონენტიანი ნარევის მოდელური ქრომატოგრამები ლენგმიურის ტიპის იზოთერმისთვის (ამოზნექილი იზოთერმა)

შემდეგ პირობებში: $b_1=0.05$; $b_2=0.1$; $b_3=0.025$; $g_1=0.4$; $g_2=0.8$;

$g_3=1.0$; $C_1=2.2$; $C_2=2.0$; $C_3=3.0$ (მკლ/სმ³)

საწყისი სინჯი თავსდება 10 თეფშზე, ხოლო B-ს მნიშვნელობა ($B=V_a/V_e$) ერთს უტოლდებოდა.

ნახ. 6.16-ზე წარმოდგენილია სამკომპონენტიანი ნარევის კონცენტრაციების განაწილება (6.14.) ფორმულით წარმოდგენილი ტიპის ჩაზნექილი იზოთერმებისათვის კოეფიციენტების უარყოფითი მნიშვნელობებით.



ნახ.6.16. სამკომპონენტიანი ნარევის მოდელური ქრომატოგრამები ლენგმიურის ტიპის იზოთერმისთვის (ჩაზნეილი იზოთერმა) შემდეგ პირობებში:
 $b_1=-0.05$; $b_2=-0.1$; $b_3=-0.025$; $g_1=1$; $g_2=0.5$; $g_3=0.8$; $C_1=2.2$; $C_2=2.0$; $C_3=3.0$ (მკლ/სმ³)

ამგვარად, ზემოთ მოყვანილი მიდგომა საკმაოდ ზოგადი და მოსახერხებელია მრავალკომპონენტიანი ნარევების სორბციის დინამიკის ებმ-ით შესწავლისთვის.

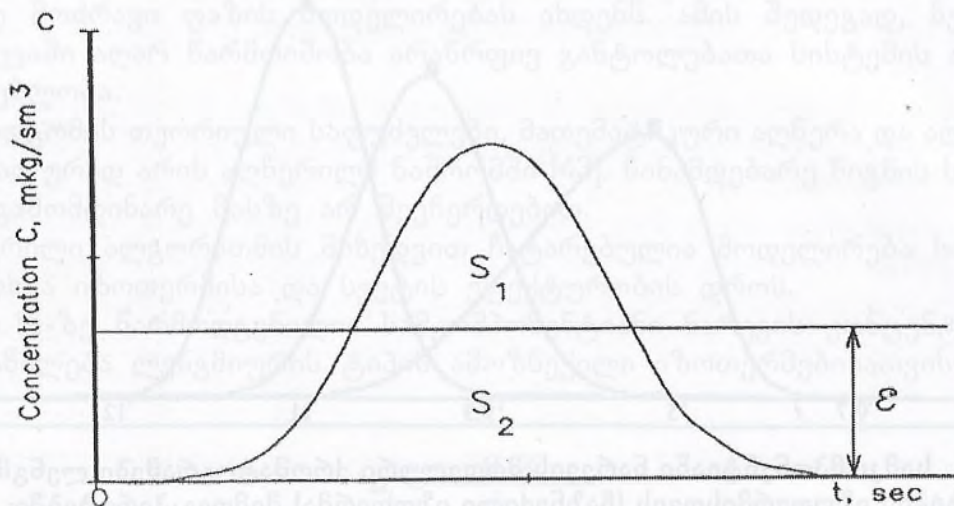
6.4.2. დეტექტორის მგრძნობიარობის მათემატიკური მოდელირება

ქრომატოგრაფიული ანალიზის მგრძნობიარობას უმთავრესად დეტექტორის მგრძნობიარობას უკავშირებენ. მაგრამ, თვით ელუირების პროცესმა ქრომატოგრაფიული ზოლების განრთხმის ხარჯზე გაზომვის შედეგებზე შეიძლება საგრძნობი გავლენა იქონიოს. კერძოდ, განრთხმამ შეიძლება იქამდე მიგვიყვანოს, რომ სინჯის საკმაოდ დიდი ნაწილი სვეტიდან გამოსვლისას მოხვდეს დეტექტორის მგრძნობიარობის ზონის გარეთ. აქედან გამომდინარე, გასათვალისწინებელია ქრომატოგრაფიული ანალიზის მგრძნობიარობის დამოკიდებულება სვეტში კომპონენტების მოძრაობის პარამეტრებზე.

გაანგარიშება ტარდებოდა თეორიული თეფშების მოდელზე დაყრდნობით ალგორითმის საფუძველზე შედგენილი პროგრამით, სადაც გათვალისწინებული იქნა დეტექტორის მგრძნობიარობის ღონის დანახვის შესაძლებლობა [43]. გაანგარიშებული იქნა აგრეთვე ელუირებული პიკის წილი როგორც მგრძნობიარობის ზონის გარეთ, ასევე დეტექტორის მგრძნობიარობის ზონაში.

აღნიშნული ნაწილების გაანგარიშების სქემა ნაჩვენებია ნახ.6.17-ზე.

გაანგარიშებული იქნა პიკის ფართობების $\alpha=S_1/(S_1+S_2)$ წილი სხვადასხვა კონცენტრაციების (C), ჰენრის კოეფიციენტების (G), სვეტის სიგრძესა (L) და დეტექტორის მგრძნობიარობის (ε) დროს.



ნახ.6.17. პიკის ფართის α წილის გაანგარიშების სქემა, სადაც S_1 და S_2 პიკის ფართობებია დეტექტორის მგრძნობიარობის არეში და მის გარეთ, E -დეტექტორის მგრძნობიარობის დონეა

ჩატარებული ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ შემდეგი:

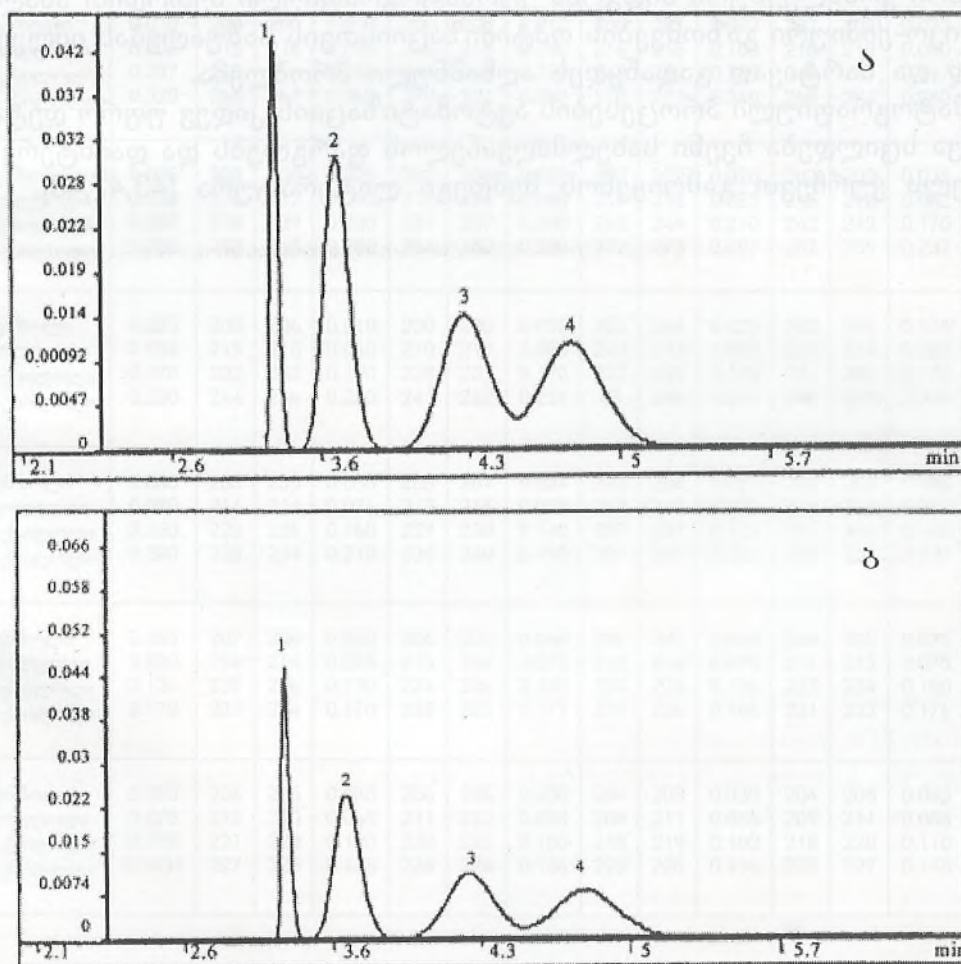
1. ქრომატოგრაფიული ანალიზის მგრძნობიარობა არსებითად დამოკიდებულია სვეტში სინჯის მოძრაობის პარამეტრებზე, ჰენრის კოეფიციენტზე, კონცენტრაციაზე, თევშების რიცხვზე და ა.შ.
2. წრფივი არისათვის (ჰენრი) მგრძნობიარობის დაკარგვაში სვეტური განრთხმის წილი შეიძლება დახასიათდეს უნივერსალური ფუნქციით: $\alpha = A \exp(-BL)$, რომელიც დეტექტორის მგრძნობიარობის ზონაში განსაზღვრავს პიკის წილის დამოკიდებულებას სვეტის სიგრძეზე. ეს ფუნქცია შეიძლება ნარმოადგენდეს კონკრეტული მაგრაღურიბელი მრუდების აგების საფუძველს.
3. იზოთერმის არანრფივობა ამახინჯებს მიღებულ დამოკიდებულებებს. ამიტომ, ქრომატოგრაფიის პრაქტიკაში წრფივი არე უდიდეს ინტერესს წარმოადგენს.
4. მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ქრომატოგრაფიული ანალიზის მეტროლოგიური სქემების აგების დროს.

თავი 6.5.

ექსპერიმენტული და მოდელირებული
ქრომატოგრამების შედარება

ექსპერიმენტული და მოდელირებული ქრომატოგრამების შესადარებლად უნდა განისაზღვროს ჰენრის კოეფიციენტების და დიფუზიის ეფექტური კოეფიციენტების მნიშვნელობები.

ჰენრის კოეფიციენტის შეფასება შეიძლება ლიტერატურული მონაცემებიდან ადსორბციის ცნობილ იზოთერმაზე დაყრდნობით. მაგრამ, ვინაიდან ადსორბენტის თვისებები რიგ შემთხვევაში ძნელად რეპროდუცირებადია უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ეს მონაცემები შეიძლება აღმოჩნდეს არაზუსტი. ჰენრის კოეფიციენტის უფრო ზუსტი მნიშვნელობის მისაღებად უნდა გაიზომოს მოცემულ სვეტში შეკავების დროის მნიშვნელობები.



ნახ.6.18. ექსპერიმენტული (ა) და მოდელირებული (ბ) ქრომატოგრამა ბენზოლის წარმოებულების ნარევისთვის თხევად კრისტალურ უძრავ ფაზაზე

ა) $L=28.65$ მ, $V=10.0$ სმ/წმ, $t=140^{\circ}\text{C}$, $C=2.0$ მკლ.

ბ) $L=28.65$ მ, $V=12.0$ სმ/წმ, $t=140^{\circ}\text{C}$, $C=1.0$ მკლ.

ბენზოლი (1), ტოლუოლი(2), o-ქსილოლი(3) და p-ქსილოლი(4)

ცხრილი 6.6.

შეკავებითი დროების თეორიული (t_{Rl}) და ექსპერიმენტული (t_{Re}) მნიშვნელობები ბენზოლისა და მისი წარმოებულებისთვის

P=1.1 კგ/სმ ²		C=1.0μl			C=1.6μl			C=2.0μl			C=2.4μl			C=2.8μl		
t°C	ნივთიერება	G	t _{Re}	t _{Rl}	G	t _{Re}	t _{Rl}	G	t _{Re}	t _{Rl}	G	t _{Re}	t _{Rl}	G	t _{Re}	t _{Rl}
120	ბენზოლი	0.010	200	200	0.010	200	200	0.010	200	201	0.010	200	201	0.020	202	202
	ტოლუოლი	0.100	218	219	0.100	218	219	0.110	220	221	0.110	220	221	0.116	221	223
	ო-ქსილოლი	0.293	256	257	0.290	256	267	0.296	257	259	0.298	267	259	0.295	258	260
	პ-ქსილოლი	0.460	289	290	0.460	289	291	0.430	283	286	0.426	283	285	0.426	282	285
130	ბენზოლი	0.010	200	200	0.010	200	200	0.010	200	201	0.023	202	203	0.023	205	206
	ტოლუოლი	0.085	215	218	0.090	216	215	0.090	216	215	0.100	218	219	0.090	216	218
	ო-ქსილოლი	0.237	245	246	0.250	248	260	0.250	248	250	0.250	248	251	0.197	237	241
	პ-ქსილოლი	0.320	265	267	0.360	270	271	0.360	270	271	0.340	268	271	0.280	253	255
140	ბენზოლი	0.025	203	205	0.025	203	204	0.022	202	202	0.020	202	203	0.035	205	206
	ტოლუოლი	0.090	216	217	0.090	215	216	0.088	217	218	0.085	215	216	0.082	215	216
	ო-ქსილოლი	0.205	238	239	0.200	237	237	0.200	248	249	0.210	242	243	0.170	232	233
	პ-ქსილოლი	0.280	253	265	0.280	254	253	0.280	272	273	0.297	257	259	0.237	245	246
150	ბენზოლი	0.033	205	206	0.010	200	200	0.020	203	204	0.022	203	205	0.035	205	206
	ტოლუოლი	0.084	215	215	0.060	210	212	0.080	213	214	0.080	213	214	0.082	214	215
	ო-ქსილოლი	0.170	232	232	0.150	228	231	0.170	232	233	0.155	231	230	0.170	233	234
	პ-ქსილოლი	0.230	244	246	0.220	241	242	0.237	45	246	0.240	246	245	0.240	245	246
160	ბენზოლი	0.035	205	205	0.035	205	207	0.024	203	204	0.026	204	203	0.035	206	206
	ტოლუოლი	0.080	214	214	0.076	213	215	0.070	212	213	0.070	212	212	0.082	214	215
	ო-ქსილოლი	0.150	228	226	0.160	229	230	0.140	227	227	0.143	227	228	0.160	229	229
	პ-ქსილოლი	0.200	238	234	0.210	239	240	0.195	237	240	0.200	238	238	0.210	239	238
170	ბენზოლი	0.045	207	206	0.040	206	207	0.040	206	207	0.030	204	205	0.035	206	206
	ტოლუოლი	0.080	214	214	0.075	213	214	0.072	212	214	0.070	211	213	0.075	213	214
	ო-ქსილოლი	0.136	225	226	0.130	224	226	0.130	224	228	0.126	223	224	0.150	226	225
	პ-ქსილოლი	0.178	233	234	0.170	232	233	0.177	233	236	0.166	231	233	0.176	233	234
180	ბენზოლი	0.040	206	205	0.035	206	206	0.030	204	205	0.030	204	205	0.045	207	205
	ტოლუოლი	0.075	212	210	0.065	211	213	0.055	209	211	0.055	209	211	0.055	209	211
	ო-ქსილოლი	0.125	221	220	0.120	220	222	0.100	218	219	0.100	218	220	0.110	218	221
	პ-ქსილოლი	0.1434	227	228	0.135	226	228	0.136	225	226	0.136	225	227	0.145	226	226

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Kelly P.C., Horlik G. Anal. Chem. 1973, v. 45, №3, p.518-527
2. Sutre P., Malenge J.P. Chromatographia. 1971, №2/3, p.141-145
3. Charrier C., Dupuis M.C., Merlivat J.C., Pons J., Sigelle R. Chromatographia. 1972, №2/3, p.119-129
4. Barth H., Dallmeier E., Courtois G., Keller H.E., Karger B.I. J.Chromatog. 1973, v.83, p.289
5. Montoga E., Hubbard I.R., Leung A.T. Spectra-Physics. Chromatography Technical Bulletin. 1975, p.113
6. Baumann F.A., Varian Aerograph. Research Notes., 1972, Sept.
7. Noonan D.I., March E.W. American Laboratory, 1971, 37
8. Stefanski A. Htwlett-Packard J. 1974, Dec
9. Savitzky A., Golay M. Anal.Chem. 1964, v. 36, p.1627-1639
10. Hettinger J.D., Hubbard J.R., Gill J.M., Miller L.A. J.Chromatogr.Sci. 1971, v. 2, №12 p.710-717
11. Пецев Н., Коцев Н. Справочник по газовой хроматографии. Пер. с болгарского, под редакцией Березкина В.Г. и Сакодынского К.И. 1987, М.; Мир, 260 с.
12. Weimann B. Chromatographia. 1974, v. 7, №9, p.472-476
13. Caesar F., Kiler M. Chromatogrphia. 1973, v.7, p.626
14. Гуревич А.Л. и др. Автоматизация обработки хроматографической информации. М.; Энергия, 1973, 273с.
15. Гуревич А. Л. и др. Труды ГИПС, 1968, Вып. 59, с.184
16. Hegedus L.I., Peterson E.E., J. Cchromatogr. Sci. 1971, v.9, №2, p.551-553
17. Gladney H.M., Dowden B.F., Swalen J.D. Anal.Chem. 1969, v.41, №9, p.883-888
18. Rijswik M.H., J.van. Chromatographia. 1974, v.7, №9, p.491-501
19. Руководство по газовой хроматографии. Пер. с немецкого, под редакцией Лейбница Э., Штруппе Х.Г., М.; Мир, 1988, 479 с.
20. Кюллик Э., Кальюранд М., Козль М.Н. Применение ЭВМ в газовой хроматографии, М.; Наука, 1978, 127с.
21. Гутер Р.С., Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М.; Наука, 1970
22. Андреев Л.В., Афанасьев М.И., Чаброва О.Г., Вигдергауз М.С. М. Успехи химии, 1965, т.34, с.920-948
23. Богомоллов В.И., Миначаев Х.М., Романова Н.В. Газовая хроматография, 1964, вып. 1, с.18-30
24. Proksch E., Brunder H., Cranzer V. J.Chromatogr.Sci. 1969, v.7, №8, p. 473-483

25. Коган Л.А., Количественная газовая хроматография. М.; Химия, 1975
26. Westerberg A.W. Anal.Chem. 1969, v. 41, №13, p.1770-1777
27. Вигдергауз М.С., Афанасьев М.Н. Нефтехимия. 1966, т.6, №1, с.123-130
28. Hancock H.A., Bahm L.A. Muldoon J.F. J Chromatogr. Sci. 1970, v.8, №1, p. 57-62
29. Коган Л.А., Копелиович Л.В. ЖАХ. 1975, т.30, №3, с.479 –482
30. Ball D.L., Harris W.E., Habyood H.N. Anal. Chem. 1968, v.40, №1, p.129-134
31. Bartoli B., Settimio M., Spinelli N., Vanoli F. J. Chromatogr. Sci., 1975, 107, 51
32. Keller W.O., Lusenbrink T.R., Sederholm C.H. J. Chem. Plus. 1966, v.44, p. 782
33. Fraser R.D., Suzuki E. Anal.Chem. 1966, v.38, №12, p.1770-1773
34. Pitha J., Jones R.N. Can.J.Chem. 1967, v. 45, №20, p.2347-2352
35. Schwartz L.M. Anal.Chem. 1971, v.43, №10, p.1336-1338
36. Anderson A.H., Gibb T.C., Littlewood A.B. J, Chromatogr. Sci. 1970, v.8, №11, p.640-646
37. Roberts S.M., Wilkinson D.H., Walker L.R. Anal.Chem., 1970, v.42, №8, p.886-893
38. Anderson A.H., Gibb T.C., Littlewood A.B. Anal. Chem. 1970, v.42, №4, p.434-440
39. Grushka E. J. Phys. Chem., 1972, v.76, P. 2586-2589
40. Chesler S.N., Gram S.P. Anal. Chem. 1973, v.45, p.1354-1357
41. Гуревич А.Л., Коломыцев Л.А., Русинов Л.А., Автоматизация обработки газо-хроматографической информации. М.; Энергия, 1973
42. Cuso E., Guardino X., Riera J.M., Gassiot M. J. Chromatogr. 1974, v.95, p. 145
43. Амирханашвили К. Оптимизация хроматографических исследований. Тбилиси, Универсал, 2004, 259с.
44. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.; Мир, 1984
45. Де Бур Я. Динамический характер адсорбции. М.; Иностран. Лит., 1962
46. Экспериментальные методы в адсорбции и молекулярной хроматографии. Под ред. Никитина Ю. С. и Петровой Р.С. М.; Изд. Моск. Гос. Университета, 1990
47. Аранович Г.Л. ЖФХ, 1985, т.59, №11, с. 2778
48. Николаишвили Л.Т., Амирханашвили К.Д., Андроникашвили Т.Г., Аранович Г.Л., Толмачев А.М., ДАН СССР. 1990, т.316, №5, с.1156-1161

ENGLISH-GEORGIAN-RUSSIAN DICTIONARY OF BASIC TERMS OF CHROMATOGRAPHY

**ქრომატოგრაფიაში გამოყენებული
ძირითადი ტერმინების მოკლე
ინგლისურ-ქართულ-რუსული ლექსიკონი**

**КРАТКИЙ АНГЛО-ГРУЗИНСКО-РУССКИЙ
СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ
ПО ХРОМАТОГРАФИИ**

- | | | | |
|-------------|--|-------------|--|
| A | | A 13 | Adsorption
ადსორბცია
адсорбция |
| A 1 | Absorption
აბსორბცია, შთანთქმა
абсорбция, поглошение | A 14 | Adsorption capacity
ადსორბციული ტევადობა
адсорбционная емкость |
| A 2 | Absorption capacity
აბსორბციული ტევადობა
адсорбционная емкость | A 15 | Alumina
ალუმინის ოქსიდი, თიხამინა
оксид алюминия, глинозем |
| A 3 | Absorption detector
შთანთქმის დეტექტორი
детектор поглощения | A 16 | Analytical column
ანალიზური სვეტი
аналитическая колонка |
| A 4 | Accumulative column
მაგროვებელი სვეტი
накопительная колонка | A 17 | Anion-exchange membrane
ანიონმიმომცვლელი მემბრანა
анионообменная мембрана |
| A 5 | Active carbon
გააქტიურებული ნახშირი
Активированный уголь | A 18 | Applicator
სორბენტის დასაფენი
მოწყობილობა
устройство для нанесения слоя |
| A 6 | Active solid
ადსორბენტი
адсорбент | A 19 | Asymmetry factor
ასიმეტრიის კოეფიციენტი
коэффициент асимметрии |
| A 7 | Adjusted retention time
შეკავების დაყვანილი დრო
приведенное время удерживания | A 20 | Autoinjector
სინჯის ავტომატური შეყვანის
მოწყობილობა, ავტოინექტორი
устройство для автоматического ввода проб |
| A 8 | Adjusted retention volume
შეკავების დაყვანილი მოცულობა
приведенный объем удерживания | A 21 | Autosampler
ავტომატური დოზატორი
автоматический дозатор |
| A 9 | Adhesion
ადჰეზია
адгезия | A 22 | Automation data handling
მონაცემთა ავტომატური
დამუშავების სისტემა
автоматизированная система обработки данных |
| A 10 | Adsorbability
ადსორბციული უნარი
адсорбционная способность | A 23 | Axial dispersion
გრძივი წარეცხვა (ზონის)
продольная размывание (зоны) |
| A 11 | Adsorbate
ადსორბატი, ადსორბირებული
ნივთიერება
адсорбат, адсорбированное вещество | | |
| A 12 | Adsorbent
ადსორბენტი
адсорбент | | |

- direct phase, normal phase
- ნორმალური ფაზით
- с нормальными фазами
- displacement
- გამოძევებითი
- вытеснительная
- dry-column
- „მშრალ“ სვეტზე
- на «сухих» колонках
- electrophoretic
- ელექტროფორეტიკული
- электрофоретическая
- elution
- სამელაენი
- проявительная
- exclusion, size exclusion, permeation
- ექსკლუზიური
- эксклюзионная
- extraction
- ექსტრაქციული
- экстракционная
- flow-programmed
- ნაკადის პროგრამირებით
- с программированием потока
- fluid
- ფლუიდური
- флюидная
- frontal
- ფრონტალური
- фронтальная
- gas
- აირ
- газовая
- gas-liquid
- აირ-თხევადი
- газо-жидкостная
- gas-solid
- აირად-აღსორბციული
- газо-адсорбционная
- (газо- твердофазная)
- gel
- გელ-
- гель-
- gel-permeation
- გელშელნევიითი (საცრისებური)
- гельпроникающая (ситовая)
- gradient
- გრადიენტული ელუირებით
- с градиентным элюированием
- high performance liquid (HPLC)
- მაღალეფექტური თხევადი (მმთმ)
- высокоэффективная жидкостная
- (ВЭЖХ)
- high-temperature (hot)
- მაღალტემპერატურული
- высокотемпературная
- horizontal
- ჰორიზონტალური
- горизонтальная
- hydrophobic interaction
- ჰიდროფობული
- ურთიერთქმედებით
- с гидрофобным взаимодействием
- interrupted-elution
- ელუირების (ნაკადის) შეწყვეტით
- с прерыванием элюирования (потока)
- Inversed phase, reversed phase
- შებრუნებული ფაზით
- с обращенными фазами
- ion
- იონური
- ионная

C41	-ion-exchange -იონმიმოცვლითი -ионообменная	C52	-micro -მიკრო -микро
C42	-ion-interaction -იონური ურთიერთქმედებით -с ионным взаимодействием	C53	-microcolumn -მიკროსვეტური -микроколоночная
C43	-ion-pair -იონ-წყვილური -ион-парная	C54	-molecular -მოლეკულური -молекулярная
C44	-isocratic -იზოკრატული ელუირებით -с изократическим элюированием	C55	-multy-dimensional -მრავალგანზომილებიანი -многомерная
C45	-isothermal -იზოთერმული -изотермическая	C56	-multiple thin layer -თხელფენოვანი მრავალჯერადი გამომჟღავნებით
C46	-iteration -იტერაციული -итерационная	C57	-тонкослойная с многократным проявлением
C47	-ligand exchange -ლიგანდმიმოცვლითი -лигандообменная	C58	-multimodal -მრავალვარიანტული -многовариантная
C48	-liquid -თხევადი -жидкостная		-“off-line” -დროის დაყოფის რეჟიმით - в режиме с разделением времени
C49	-liquid-adsorption, liquid-solid -თხევად ადსორბციული -жидкостная адсорбционная		-one-dimensional -ერთგანზომილებიანი -одномерная
C50	-liquid-gel -თხევად-გელ -жидкостно-гелевая		-“on-line” -რეალური დროის რეჟიმში -в режиме реального времени
C51	-low-temperature -დაბალტემპერატურული -низкотемпературная		-over pressure, liquid -ჭარბი წნევით (თხევადი) -при избыточном давлении, (жидкостная)
	-micellar -მიცელური -мицеллярная	C63	-paper -ქაღალდზე -на бумаге (бумажная)

- partition
-განაწილებითი
-распределительная
- planar
-სიბრტყითი
-плоскостная
- precipitation
-ნალექოვანი
-осадочная
- preparative
-პრეპარატული
-препаративная
- programmed pressure
(flow, temperature)
-წნევის პროგრამირებით
(ნაკადის, ტემპერატურის)
-с программированием давления
(потока, температуры)
- pyrolysis
-პიროლიზური
-пиролитическая
- radio
-რადიომეტრული დეტექტირებით
-с радиометрическим детектированием
- radial
-რადიალური
-радиальная
- recycling
-ცირკულაციური
-циркуляционная
- reversed
-შებრუნებული
-обращенная
- reversed-phase
-შებრუნებულ-ფაზური
-с обращенными фазами
- salting out
-გამომარილებით
-с высаливанием
- sieve
-მოლეკულურ საცრებზე
-на молекулярных ситах
- solid-liquid
-თხევად-აღსორბციული
-жидкостно-адсорбционная
- stepwise
-საფეხუროვანი
-ступенчатая
- supercritical
-ზეკრიტიკული
-сверхкритическая
- supercritical fluid
-ზეკრიტიკული ფლუიდური
-сверхкритическая флюидная
- thin-layer
-თხელფენაში (თხელფენოვანი)
-в тонком слое (тонкослойная)
- two-dimensional
-ორგანზომილებიანი
-двумерная
- vacancy
-ვაკანტური
-ваканто
- vacuum
-დაბალი წნევით
-при пониженном давлении
- vapor-phase
-ორთელფაზური
-парофазная

- | | |
|---|--|
| C41 Circular chromatogram
წრიული ქრომატოგრამა
круговая (кольцевая) хроматограмма | C52 Column form
სვეტის ფორმა (ტიპი)
форма (тип) колонки |
| C42 Clay (adsorbent)
თიხა (ადსორბენტი)
глина (адсорбент) | C53 Column oven
სვეტის თერმოსტატი
термостат колонки |
| C43 Cohesion
კოჰეზია
когезия | C54 Column packing
სვეტის შემავესებელი
насадка (наполнитель) колонки |
| C44 Column
სვეტი
колонка | C55 Column technique
სვეტის შევსების მეთოდი
способ заполнения колонки |
| C45 Column dimension
სვეტის ზომები
размер колонки | C56 Column parameters
სვეტის მახასიათებლები (პარამეტრები)
характеристики (параметры) колонки |
| C46 Column dispersion
წარეცხვა სვეტში
размывание в колонке | C57 Column performance
სვეტის ეფექტურობა
эффективность колонки |
| C47 Column efficiency
სვეტის ეფექტურობა
эффективность колонки | C58 Column regeneration
სვეტის რეგენერაცია (აღდგენა)
регенерация колонки |
| C48 Column electrophoresis
ელექტროფორეზი სვეტში
электрофорез на колонке | C59 Column resolution
სვეტის გაყოფის უნარი
разрешающая способность колонки |
| C49 Column exit
სვეტიდან გამოსასვლელი
выход колонки | C60 Column switching
სვეტის გადართვა
переключение колонки |
| C50 Column fittings
სვეტის შემაერთებლები
колоночные фитинги, соединители для
колонок | C61 Column volume
სვეტის მოცულობა
объем колонки |
| C51 Column flowrate
ნაკადის მოცულობითი სიჩქარე
სვეტში (ხარჯი)
объемная скорость потока через колонку
(расход) | C62 Compensating column
საკომპენსაციო სვეტი
компенсационная колонка |
| | C63 Complexing agent
კომპლექსნარმოქმნელი რეაგენტი
комплексообразующий агент |

- | | | | |
|----------|--|------|--|
| C 64 | Complexing resin
კომპლექსნარმომქმნელი იონიტი
комплексообразующий ионит | D 3 | “Dead volume”
„მკვდარი მოცულობა”
“мертвый объем” |
| C 65 | Composite column
შედგენილი სვეტები
составные колонки | D 4 | Degassing solvent
დეგაზირებული გამხსნელი
дегазированный растворитель |
| C 66 | Compressibility correction factor
კუმპეადობის კოეფიციენტი
коэффициент учитывающий
сжимаемость | D 5 | Degree of loading
გაუღენთის ხარისხი
степень пропитки |
| C 67 | Computer correction
კომპიუტერული კორექცია
компьютерная коррекция | D 6 | Densitometer
დენსიტომეტრი
денситометр |
| C 68 | Computing integrator
გამომთვლელი ინტეგრატორი
вычисляющий интегратор | D 7 | Derivatization
დერივატიზაცია
получение производного (derivatизация) |
| C 69 | Contamination
დაბინძურება
загрязнение | D 8 | Desorption
დესორბცია
десорбция |
| C 70 | Coulometric detector
კულონომეტრული დეტექტორი
кулонометрический детектор | D 9 | Detection
დეტექტირება, აღმოჩენა
обнаружение, детектирование |
| C 71 | Counter-current ion-exchange
წინაღდენითი იონმიმოცვლა
противоточный ионный обмен | D 10 | Detection limit
აღმოჩენის ზღვარი (დეტექტორის)
предел обнаружения |
| C 72 | Coupling technique
დაყოფის მეთოდების შეთავსების ხერხი
способ совмещения методов разделения | D 11 | Detector
დეტექტორი
детектор |
| D | | D 12 | Detector bride current
თბოგამტარობის დეტექტორის დენი
ток детектора по теплопроводность |
| D 1. | Data handling system
მონაცემთა დამუშავების სისტემა
система обработки данных | D 13 | Detector cell
დეტექტორის უჯრედი
ячейка детектора |
| D 2 | Dead time
„მკვდარი დრო”
«мертвое время» | D 14 | Detector characteristics
დეტექტორის მახასიათებლები
характеристики детектора |

- | | |
|---|---|
| D 15 Detector dynamic range
დეტექტორის დინამიკური დიაპაზონი
динамический диапазон детектора | D 27 Development chamber sandwich
„სენდვიჩ კამერა“ გამომჟღავნებისთვის
сэндвич-камера для проявления |
| D 16 Detector flow-sensitive
ნაკადური დეტექტორი
поточный детектор | D 28 Development rate
გამომჟღავნების სიჩქარე
скорость проявления |
| D 17 Detector input
დეტექტორში შემავალი სიგნალი
входной сигнал детектора | D 29 Development solvent
გამამჟღავნებელი (მოძრავი ფაზა)
(проявитель) подвижная фаза |
| D 18 Detector linearity
დეტექტორის სიგნალის წრფივობა
линейность сигнала детектора | D 30 Development technique
გამომჟღავნების მეთოდი
способ проявления |
| D 19 Detector noise
დეტექტორის ხმაური
шум детектора | D 31 Development two-dimensional
ორგანზომილებიანი გამომჟღავნება
двумерное проявление |
| D 20 Detector output
დეტექტორიდან გამომავალი სიგნალი
выходной сигнал детектора | D 32 Differential detector
დიფერენციალური დეტექტორი
дифференциальный детектор |
| D 21 Detector oven
დეტექტორის თერმოსტატი
термостат детектора | D 33 Diffusion coefficient
დიფუზიის კოეფიციენტი
коэффициент диффузии |
| D 22 Detector response
დეტექტორის სიგნალი (ჩვენება)
отклик (показатель, сигнал) детектора | D 34 Discharge
განმუხტვა
разряд |
| D 23 Detector time constant
დეტექტორის დროის მუდმივა
постоянная времени детектора | D 35 Dispersion
დისპერსია
дисперсия |
| D 24 Detector sensibility
დეტექტორის მგრძნობიარობა
чувствительность детектора | D 36 Displacement
გამოძევება, ჩანაცვლება
вытеснение, замещение |
| D 25 Detector stability
დეტექტორის სტაბილურობა
стабильность детектора | D 37 Displacer
გამომძევებელი
вытеснитель |
| D 26 Development
გამომჟღავნება (ქრომატოგრამის)
проявление (хроматограмм) | D 38 Distribution coefficient
განაწილების კოეფიციენტი
коэффициент распределения |

- | | | | |
|------|--|------|--|
| D 39 | Distribution isotherm
განაწილების იზოთერმა
изотерма распределения | E 7 | Electromagnetic vibrator
ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი
электромагнитный вибратор |
| D 40 | Double section column
ორ სექციიანი სვეტი
колонка с двумя секциями | E 8 | Electron-capture detector
ელექტრონების წატაცების
დეტექტორი
электронозахватный детектор |
| D 41 | Dry-packing technique
მშრალი მეთოდით შევსება (სვეტის)
сухой способ заполнения колонки | E 9 | Electrophoresis
ელექტროფორეზი
электрофорез |
| D 42 | Dual flame ionization detector
ორმაგი ალურ-იონიზაციური
დეტექტორი
двойной пламенно-ионизационный
детектор | E 10 | Electrophorogram
ელექტროფოროგრამა
электрофорограмма |
| D 43 | Dynamic (static) coating
ფაზის დინამიკური (სტატიკური)
დაფენა
динамическое (статическое) нанесение
фазы | E 11 | Eluate
ელუატი, ელუირება
элюат (элюируемый компонент),
элюирование |
| E | | E 12 | Eluent
ელუენტი, მოძრავი ფაზა
подвижная фаза |
| E 1 | Eddy diffusion
გრივალური დიფუზია
вихревая диффузия | E 13 | Elution
ელუირება, გამომჟღავნება
элюирование |
| E 2 | Electrochromatogram
ელექტროქრომატოგრამა
электрохроматограмма | E 14 | Elution behaviour
ელუირების თავისებურებები
(კანონზომიერება)
особенности (закономерности)
элюирования |
| E 3 | Electrochromatography
ელექტროქრომატოგრაფია
электрохроматография | E 15 | Elution curve
ელუირების მრუდი
кривая элюирования |
| E 4 | Electrochemical detector
ელექტროქიმიური დეტექტორი
электрохимический детектор | E 16 | End-capping
ნარჩენი (სილანოლური) ჯგუფების
ბლოკირება
блокирование остаточных (силанольных)
групп |
| E 5 | Electrodialysis
ელექტროდიალიზი
электродиализ | E 17 | Errors sources
ცდომილების წყარო
источники погрешностей |
| E 6 | Electrolytic conductivity detector
ელექტრო გამტარობის დეტექტორი
детектор по электропроводности | | |

- | | | | |
|------|---|------|--|
| E 18 | Exchange capacity
მიმოცვლითი ტევადობა
обменная емкость | F 7 | Flame photometric detector
ალურ-ფოტომეტრული დეტექტორი
пламенно-фотометрический детектор |
| E 19 | Exchange rate
მიმოცვლითი სიჩქარე
скорость обмена | F 8 | Flow controller
ხარჯის რეგულატორი
регулятор расхода |
| E 20 | Exchange reaction
იონმიმოცვლითი რეაქცია
ионообменная реакция | F 9 | Flow direction
ნაკადის მიმართულება
направление потока |
| E 21 | Extra-column effects
სვეტგარეთა ეფექტები
внеколоночные эффекты | F 10 | Flow rate
ნაკადის მოცულობითი სიჩქარე,
(ხარჯი)
объемная скорость потока, расход |
| E 22 | Extract
ექსტრაქცია, ექსტრაქტი
экстрагировать, экстракт | F 11 | Flow through electrophoresis
გამდინარე ელექტროფორეზი
проточный электрофорез |
| F | | F 12 | Fluorescence detector
ფლუორესცენციური დეტექტორი
флуоресцентный детектор |
| F 1 | Film thickness
აფსკის სისქე
толщина пленки | F 13 | Fraction collector
ფრაქციების კოლექტორი
коллектор фракций |
| F 2 | Film thickness Grob test
აფსკის სისქის განსაზღვრა გრობის
მეთოდით
оценка толщины пленки по методу Гроба | F 14 | Fraction purity
ფრაქციის სისუფთავე
чистота фракций |
| F 3 | Fixed phase
უძრავი ფაზა
неподвижная фвза | F 15 | Fronting
პიკის ფრონტის წარეცხვა
размывание фронта (пика) |
| F 4 | Flame detector
ალური დეტექტორი
пламенный детектор | F 16 | Fused silica capillary column
მდნარი კვარცის კაპილარული სვეტი
капиллярная колонка из плавленого кварца |
| F 5 | Flame emission detector
ალურ-ემისიური დეტექტორი
пламенно-эмиссионный детектор | G | |
| F 6 | Flame ionization detector
ალურ-იონიზაციური დეტექტორი
пламенно-ионизационный детектор | G 1 | Gas Chromatograph
აირქრომატოგრაფი
газовый хроматограф |

- G2 Gas chromatographic analysis
აირქრომატოგრაფიული ანალიზი
газохроматографический анализ
- G3 Gas density detector
აირის სიმკვრივის გაზომვის
დეტექტორი
детектор по плотности (газа)
- G4 Gas diffusion column
აირ-დიფუზიური სვეტი
газо-дифузионная колонка
- G5 Gas discharge detector
აირ-განმუხტვის დეტექტორი
газоразрядный детектор
- G6 Gas hold-up volume
აირის „მკვდარი“ მოცულობა
газовый «мертвый» объем
- G7 Gas sampling valve
აირის დოზირების ონკანი
дозирующий газовый кран
- G8 Gas sampling syringe
აირის დოზირების შპრიცი
шприц для дозирования газа
- G9 Glass beads
მინის ბურთულები
стеклянные шарики
- G10 Glass drawing machine
მინის კაპილარების გასაჭიმი
მოწყობილობა
машина для вытягивания стеклянных капилляров
- G11 Gradient elution
გრადიენტული ელუირება
градиентное элюирование
- G12 Graphitized carbon black
გრაფიტირებული მური
графитированная сажа
- G13 Guard column
დამცავი სვეტი
защитная колонка
- H
- H1 Hardware data handling
მონაცემთა დამუშავების სისტემის
მოწყობილობა
оборудование систем обработки данных
- H2 Heart cutting
ქრომატოგრაფიული პიკის ნაწილის
„ამოჭრა“
«вырезание» части хроматографического пика
- H3 Height equivalent to a theoretical plate (HETP)
თეორიული თეფშების
ეკვივალენტური სიმაღლე (თმთს)
высота, эквивалентная теоретической тарелке (ВЭТТ)
- H4 Helium ionization detector
ჰელიუმის იონიზაციური დეტექტორი
гелиевый ионизационный детектор
- H5 High pressure pump
მაღალი წნევის ტუმბო
насос высокого давления
- H6 Hold-up time
არასორბირებადი კომპონენტის
შეკავების დრო („მკვდარი“ დრო)
время удерживания несорбирующегося компонента („мертвое“ время)
- H7 Hold-up volume
არასორბირებადი კომპონენტის
შეკავებითი მოცულობა
(„მკვდარი“ მოცულობა)
объем удерживания несорбирующегося компонента („мертвый“ объем)

- | | |
|--|--|
| <p>H8 Hot-wire detector
თბოგამტარობის დეტექტორი
ვარვარების ძაფით
детектор по теплопроводности с нитью
накала</p> <p>H9 Hydrophobicity
ჰიდროფობულობა
гидрофобность</p> <p>I</p> <p>I1 Identification
იდენტიფიკაცია (აღმოჩენა)
идентификация</p> <p>I2 Immobilize stationary phase
იმობილიზაციური (მიკერებული)
უძრავი ფაზა
иммобилизованная (привитая)
неподвижная фаза</p> <p>I3 Impregnation of stationary phase
უძრავი ფაზის დაფენა
нанесение неподвижной фазы</p> <p>I4 Infrared gas analyser
ინფრანითელი აირანალიზატორი
ИК-газоанализатор</p> <p>I5 Initial and final temperature
საწყისი და საბოლოო ტემპერატურა
начальная и конечная температуры</p> <p>I6 Injection reproducibility
სინჯის შეყვანის აღწარმოება
воспроизводимость ввода (пробы)</p> <p>I7 Injection temperature
სინჯის შეყვანის ტემპერატურა
температура ввода (пробы)</p> <p>I8 Injection time
სინჯის შეყვანის დრო
время ввода (пробы)</p> | <p>I9 Injection valve
ონკან-დოზატორი
кран дозатор</p> <p>I10 Injection volume
შეყვანილი სინჯის მოცულობა
объем введенной пробы</p> <p>I11 Injector
დოზატორი
дозатор</p> <p>I12 Instrumental dispersion
ინსტრუმენტული (ხელსაწყოს)
წარეცხვა (ზონის)
инструментальное (приборное)
размывание (зон)</p> <p>I13 Integral detector
ინტეგრალური დეტექტორი
интегральный детектор</p> <p>I14 Integrator
ინტეგრატორი
интегратор</p> <p>I15 Interferometer detector
ინტერფერომეტრული დეტექტორი
интерферометрический детектор</p> <p>I16 Internal standard
შიგა სტანდარტი
внутренний стандарт</p> <p>I17 Inter-partical porosity
ფენის ფორიანობა
пористость слоя</p> <p>I18 Interstitial fraction
თავისუფალი მოცულობის ფარდობითი
წილი
относительная доля свободного объема</p> <p>I19 Interstitial volume
თავისუფალი მოცულობა
свободный объем</p> |
|--|--|

- | | | | |
|-----|--|----------|---|
| I20 | Ion-exchange
იონმიმოცვლა, იონური მიმოცვლა
ионный обмен | J | |
| | | J1 | Jet
საქმენი
сопло |
| I21 | Ion-exchanger, Ion-exchange resin
იონიტი, იონმიმოცვლითი ფისი
ионит, ионообменная смола | K | |
| I22 | Ion exchange capacity
იონმიმოცვლითი ტევადობა
ионообменная емкость | K1 | Kovats's index
კოვაჩის ინდექსი
индекс удерживания Ковача |
| I23 | Ion-exchange column
იონმიმოცვლითი სვეტი
ионообменная колонка | K2 | Kinetic factors
კინეტიკური ფაქტორები
кинетические факторы |
| I24 | Ion-exchange paper
იონმიმოცვლითი ქაღალდი
ионообменная бумага | L | |
| I25 | Ion-exchange reaction
იონმიმოცვლითი რეაქცია
ионообменная реакция | L1 | Laser photoionization detector
ლაზერული ფოტოიონიზაციური
დეტექტორი
лазерный фотоионизационный
детектор |
| I26 | Ionic strength
იონური ძალა
ионная сила | L2 | Layer equilibration
ფენის (წონასწორული) გაჯერება
(равновесное) насыщение слоя |
| I27 | Ionization current
იონიზაციური დენი
ионизационный ток | L3 | Layer thickness
ფენის სისქე
толщина слоя |
| I28 | Ionization detector
იონიზაციური დეტექტორი
ионизационный детектор | L4 | Limit of detection
აღმოჩენის ზღვარი
предел обнаружения |
| I29 | Ion(ic) mobility
იონების ძვრადობა
подвижность ионов | L5 | Linearity range
წრფივი დიაპაზონი
диапазон линейности |
| I30 | Ionophoresis
იონოფორეზი
ионофорез | L6 | Linear flow rate
ნაკადის ხაზოვანი სიჩქარე
линейная скорость потока |
| I31 | Isotachopheresis
იზოტახოფორეზი
изотахофорез | L7 | Liquid phase
თხევადი ფაზა
жидкая фаза |

- L 8 Liquid sample injector
თხევადი სინჯის დოზატორი
дозатор жидких проб
- L 9 Liquid volume
უძრავი ფაზის მოცულობა
объем неподвижной фазы
- M**
- M 1 Macrobore column
დიდი დიამეტრის სვეტი
колонка большого диаметра
- M 2 Macroporous polymer sorbent
მაკროფოროვანი პოლიმერული
სორბენტი
макропористый полимерный сорбент
- M 3 Manual valve
ხელის ონკან-დოზატორი
ручной кран-дозатор
- M 4 Marker, reference substance
მარკერი, შესადარებელი ნივთიერება
маркер, вещество-метка
- M 5 Mass transfer dispersion process
მასაგადაცემით გამონეული წარეცხვა
размывание за счет массопередачи
- M 6 Mass transfer kinetics
მასაგადაცემის კინეტიკა
кинетика массопереноса
- M 7 McReynolds constant
მაკ-რეინოლდსის მუდმივა
константа МакРейнольдса
- M 8 Micro-column
მიკროსვეტი
микроколонка
- M 9 Microbore column
მიკრო სვეტი
микро колонка
- M 10 Micro-porous
მიკროფოროვანი
микропористый
- M 11 Micro-syringe
მიკროშპრიცი
микрошприц
- M 12 Mobile phase
მოძრავი ფაზა
подвижная фаза
- M 13 Modified active solid
მოდიფიცირებული ადსორბენტი
модифицированный адсорбент
- M 14 Molar volume
მოლური მოცულობა
молярный объем
- M 15 Molecular separator
მოლეკულური სეპარატორი
молекулярный сепаратор
- M 16 Molecular sieve
მოლეკულური საცერი, ცეოლითი
молекулярное сито, цеолит
- M 17 Molecular size distribution
მოლეკულების განაწილება ზომების
მიხედვით
распределение молекул по размерам
- M 18 Molecular mass calibration
დაკალიბრება მოლეკულური მასების
მიხედვით
калибровка по молекулярным массам
- M 19 Monolayer
მონოშრე, მონომოლეკულური შრე
монослой, мономолекулярный слой
- M 20 Multiple elution
მრავალჯერადი ელუირება
многократное элюирование

M 21	Multiple head space extraction მრავალსაფეხურიანი გამოყოფა (ექსტრაქცია) აირადი ქრომატოგრაფიით многоступенчатое извлечение методом газовой хроматографии	непосредственное соединение хроматографа с ЭВМ (работа в режиме реального времени)	
N		O 3	Open tubular column კაპილარული სვეტი капиллярная колонка
N 1	Nitrogen phosphorous detector აზოტ-ფოსფორული დეტექტორი азотно-фосфорный детектор	O 4	Operating conditions სამუშაო რეჟიმი рабочий режим
N 2	Noise level ხმაურის დონე уровень шумов	O 5	Optically active stationary phase ოპტიკურად აქტიური უძრავი ფაზა оптически активная неподвижная фаза
N 3	Non-polar არაპოლარული неполярный	O 6	Overlapped peaks გადაფარული პიკები перекрывающиеся пики
N 4	Non specific adsorbent არასპეციფიკური ადსორბენტი неспецифичный адсорбент	O 7	Overloading column გადატვირთული სვეტი перегруженная колонка
N 5	Normal phase ნორმალური ფაზა нормальная фаза	O 8	Outlet pressure გამოსავალი წნევა выходное давление
N 6	Number of theoretical plates თეორიული თევშების რიცხვი число теоретических тарелок	P	
N 7	Number average molecular weight საშუალო მოლეკულური წონა средночисленная молекулярная масса	P 1	Packed column შემავსებლიანი სვეტი насадочная колонка
O		P 2	Packing material შემავსებელი (სორბენტი) насадка (сорбент)
O 1	On-column injection სინჯის შეყვანა უშუალოდ სვეტში ввод пробы непосредственно в колонку	P 3	Paper electrophoresis ელექტროფორეზი ქაღალდზე электрофорез на бумаге
O 2	On-line connection of chromatograph and computer უშუალო შეერთება ქრომატოგრაფისა პკმ-თან (რეალური დროის რეჟიმი)	P 4	Particle size ნაწილაკების ზომა размер частиц

- | | |
|---|---|
| <p>P 5 Particle size distribution
ნაწილაკების განაწილება ზომების მიხედვით
распределение частиц по размерам</p> <p>P 6 Partition coefficient
განაწილების კოეფიციენტი
коэффициент распределения</p> <p>P 7 Peak
პიკი
пик</p> <p>P 8 Peak area
პიკის ფართი
площадь пика</p> <p>P 9 Peak asymmetry
პიკის ასიმეტრია
асимметрия пика</p> <p>P 10 Peak base
პიკის ფუძე
основание пика</p> <p>P 11 Peak broadening
პიკის წარეცხვა
размывание пика</p> <p>P 12 Peak elution volume
ელუირების მოცულობა
объем элюирования</p> <p>P 13 Peak height
პიკის სიმაღლე
высота пика</p> <p>P 14 Peak inversion
პიკის ინვერსია
инверсия пика</p> <p>P 15 Peak maximum
პიკის მაქსიმუმი
максимум пика</p> <p>P 16 Peak retention parameters
შეკავების პარამეტრები
параметры удерживания</p> | <p>P 17 Peak shape
პიკის ფორმა
форма пика</p> <p>P 18 Peak tailing
პიკის საზღვრების წარეცხვა
(უკანა ზურგის)
размывание границы пика</p> <p>P 19 Peak width at base
პიკის სიგანე ფუძესთან
ширина пика у основания</p> <p>P 20 Peak width at half height
პიკის სიგანე სიმაღლის ნახევარზე
полуширина пика (ширина на половине высоты)</p> <p>P 21 Pellicular particles
ზედაპირულ-ფენოვანი
(პელიკულარული) ნაწილაკები
поверхностнослойные (пелликулярные) частицы</p> <p>P 22 Performance
ეფექტურობა
эффективность</p> <p>P 23 Permeability
შელწევადობა
проницаемость</p> <p>P 24 Pervaporation
აორთქლება მემბრანის გავლით
(პერვეპორაცია)
испарение через мембрану (первапорация)</p> <p>P 25 Phase ratio
ფაზების მოცულობების (რაოდენობის) შეფარდება
отношение объемов (количеств) фаз</p> <p>P 26 Photo-ionization detector
ფოტოიონიზაციური დეტექტორი
фотоионизационный детектор</p> <p>P 27 Plasma ionization detector
პლაზმურ იონიზაციური დეტექტორი
плазменный ионизационный детектор</p> |
|---|---|

- | | |
|---|---|
| <p>P 28 Plate
თეფში
тарелка</p> <p>P 29 Plate height
თეფშის სიმაღლე
высота тарелки</p> <p>P 30 Plate number
თეფშების რიცხვი
число тарелок</p> <p>P 31 Polarity
პოლარობა
полярность</p> <p>P 32 Polarographic detector
პოლაროგრაფიული დეტექტორი
полярографический детектор</p> <p>P 33 Polydispersity
პოლიდისპერსულობა
полидисперсность</p> <p>P 34 Pore radius (diameter)
ფორების რადიუსი (დიამეტრი)
радиус (диаметр) пор</p> <p>P 35 Pore size
ფორის ზომა
размер пор</p> <p>P 36 Pore size distribution
ფორების განაწილება ზომების
მიხედვით
распределение пор по размерам</p> <p>P 37 Porous layer open tubular column (PLOT)
კაპილარული სვეტი ფოროვანი ფენით
კედელზე
капиллярная колонка с пористым слоем
на стенках</p> <p>P 38 Preparative scale column
პრეპარატული სვეტი
препаративная колонка</p> | <p>P 39 Pressure reducing valve
რედუქტორი
редуктор</p> <p>P 40 Productivity
მწარმოებლურობა
производительность</p> <p>P 41 Programming rate
პროგრამირების სიჩქარე
скорость программирования</p> <p>P 42 Pump
ტუმბო
насос</p> <p>Q</p> <p>Q 1 Qualitative chromatographic analysis
თვისებითი ქრომატოგრაფიული
ანალიზი
качественный хроматографический
анализ</p> <p>Q 2 Quantitative chromatographic analysis
რაოდენობითი ქრომატოგრაფიული
ანალიზი
количественный хроматографический
анализ</p> <p>R</p> <p>R 1 Range of calibration
გრადუირების დიაპაზონი
диапазон градуировки</p> <p>R 2 Rate theory
სიჩქარეთა თეორია
теория скоростей</p> <p>R 3 Reciprocating piston pump
უკუქცევ-გადატანითი ტუმბო
возвратно-поступательный насос</p> <p>R 4 Recorder
თვითჩამწერი პოტენციომეტრი,
რეგისტრატორი
самопишущий потенциометр, регистратор</p> |
|---|---|

R 5	Refractive index (RI) detector რეფრაქტომეტრიული დეტექტორი рефрактометрический детектор	S	
		S 1	Safety უსაფრთხოება безопасность
R 6	Relative retention ფარდობითი შეკავება относительное удерживание	S 2	Sample სინჯი (ნიმუში) проба (образец)
R 7	Resin layer იონმიმოცვლითი ფენა ионообменный слой	S 3	Sample injector სინჯის შესაყვანი მონყობილობა, სინჯის ინექტორი устройство для ввода пробы, инжектор пробы
R 8	Retention შეკავება удерживание	S 4	Sample injection სინჯის შეყვანა ввод пробы
R 9	Retention index შეკავების ინდექსი индекс удерживания	S 5	Sample precision დოზირების სიზუსტე (სინჯის) точность дозирования
R 10	Retention theory შეკავების თეორია теория удерживания	S 6	Sample reproducibility ნიმუშის დოზირების აღწარმოება воспроизводимость дозирования (пробы)
R 11	Retention time შეკავების (შეკავებითი) დრო время удерживания	S 7	Sample size სინჯის ზომა (მოცულობა) размер (объем) пробы
R 12	Retention temperature შეკავების ტემპერატურა температура удерживания	S 8	Sample solubility ნიმუშის (სინჯის) ხსნადობა растворимость образца (пробы)
R 13	Retention volume შეკავებითი მოცულობა объем удерживания	S 9	Sample splitter სინჯის (ნაკადის) დამყოფი делитель пробы (потока)
R 14	Reversed phase შებრუნებული ფაზა обращенная фаза	S 10	Sample valve ონკან-დოზატორი кран-дозатор
R 15	Reynolds number რეინოლდსის რიცხვი (კრიტერიუმი) число (критерий) Рейнольдса	S 11	Sampling სინჯის შეყვანა ввод пробы
R 16	Rohrschneider constants რორშნაიდერის მუდმივა константы Поршнейдера		

- | | | | |
|------|---|------|---|
| S 12 | Sampling device
სინჯის შესაყვანი მოწყობილობა, ინჟექტორი
устройство для ввода пробы, инжектор пробы | S 23 | Separation number
დაყოფის რიცხვი
число разделения |
| S 13 | Scale up
მასშტაბირება
масштабирование | S 24 | Separation power
დაყოფის უნარი
разделительная способность |
| S 14 | SCOT capillary column
კაპილარული სვეტი კედლებზე დაფენილი ფოროვანი ფენით და უძრავი ფაზით
капиллярная колонка с развитым или нанесенным пористым слоем и неподвижной фазой на стенках | S 25 | Septa
თვითშემჭიდროვებადი მემბრანა
самоуплотняющаяся мембрана |
| S 15 | Selective elution
სელექტიური ელუირება
селективное элюирование | S 26 | Signal/noise ratio
ფარდობა სიგნალი/ხმაური
отношение сигнал/шум |
| S 16 | Selectivity
სელექტიურობა
селективность | S 27 | Silica
კაჟმინა
кремнезем |
| S 17 | Selectivity coefficient
სელექტიურობის კოეფიციენტი
коэффициент селективности | S 28 | Silica gel
სილიკაგელი
силикагель |
| S 18 | Sensitivity
მგრძნობიარობა
чувствительность | S 29 | Silylating reagent
სილილირების რეაგენტი
силилирующий реагент |
| S 19 | Separation
დაყოფა
разделение | S 30 | Simulation
მოდელირება
моделирование |
| S 20 | Separation coefficient
დაყოფის კოეფიციენტი
коэффициент разделения | S 31 | Soap film flowmeter
საპნიანი ხარჯმზომი
мыльный расходомер |
| S 21 | Separation efficiency
დაყოფის ეფექტურობა
эффективность разделения | S 32 | Solid sample
მყარი სინჯი
твердая проба |
| S 22 | Separation factor
დაყოფის ხარისხი
степень разделения | S 33 | Solid sample injector (sampler)
მყარი სინჯის დოზატორი, ინჟექტორი
дозатор твердых проб |
| | | S 34 | Solid support
მყარი საჩუქი
твердый носитель |

- | | |
|---|--|
| S 35 Solubility
ხსნადობა
растворимость | S 47 Split injection
სინჯის შეყვანა ნაკადის გაყოფით
ввод пробы с делением потока |
| S 36 Solvent front
მოძრავი ფაზის ფრონტი
фронт подвижной фазы | S 48 Splitter
ნაკადის გამყოფი
делитель потока |
| S 37 Solvent degassing
გამხსნელის დეგაზაცია
дегазация растворителя | S 49 Splitless injection
სინჯის შეყვანა ნაკადის გაყოფის გარეშე
ввод пробы без деления потока |
| S 38 Solvent migration distance
მოძრავი ფაზის გადაადგილების მანძილი
расстояние продвижения подвижной фазы | S 50 Splitless injector
ინექტორი ნაკადის გაყოფის გარეშე
инжектор без деления потока |
| S 39 Solvent selection
გამხსნელის შერჩევა
выбор растворителя | S 51 Spot
ლაქა, ზონა
пятно, зона |
| S 40 Sorbent
სორბენტი
сорбент | S 52 Starting point or line
სტარტის წერტილი ან ხაზი
стартовая точка или линия |
| S 41 Sorption
სორბცია
сорбция | S 53 Stationary phase
უძრავი ფაზა
неподвижная фаза |
| S 42 Sorption equilibrium
სორბციული წონასწორობა
сорбционное равновесие | S 54 Stationary phase fraction
უძრავი ფაზის წილი
доля неподвижной фазы |
| S 43 Sorption properties
სორბციული თვისებები
сорбционные свойства | S 55 Stepwise elution
საფეხურებრივი ელუირება
ступенчатое элюирование |
| S 44 Specific retention volume
ხვედრითი შეკავებითი მოცულობა
удельный объем удерживания | S 56 Stop flow
ნაკადის გაჩერება
остановка потока |
| S 45 Specimen
ნიმუში
образец | S 57 Streaming potential
დინების პოტენციალი
потенциал течения |
| S 46 Spectrophotometric detector
სპექტროფოტომეტრული დეტექტორი
спектрофотометрический детектор | S 58 Support
მყარი სარჩული
твердый носитель |

- S 59 Support coated open tubular column (SCOT)
კაპილარული სვეტი უძრავი ფაზით
გაჟღენთილი მყარი საჩხულით მის
კედლებზე
капиллярная колонка с пропитанным
неподвижной фазой твердым носителем
на стенках
- S 60 Support plate
მატარებელი ფირფიტა
несущая пластинка
- S 61 Surface charge
ზედაპირული მუხტი
поверхностный заряд
- S 62 Surface modification
ზედაპირის მოდიფიკაცია
модификация поверхности
- S 63 Syringe pump
დგუშიანი ტუმბო
поршневой насос
- S 64 Switching valve
გადამრთველი სარქველი
переключающий клапан
- T**
- T 1 Tailing
პიკის „კუდების“ წარმოქმნა
образование «хвоста» пика
- T 2 Test solution (mixture)
საკვლევი ხსნარი (ნარევი)
исследуемый раствор (смесь)
- T 3 Theoretical plate
თეორიული თეფში
теоретическая тарелка
- T 4 Thermal conductivity detector
თბოგამტარობის დეტექტორი
(კატარომეტრი)
детектор по теплопроводности (катарометр)
- T 5 Thermal desorption
თერმოდესორბცია
термодесорбция
- T 6 Thermoionic-ionization detector
თერმოიონური-იონიზაციური
დეტექტორი
термоионный ионизационный детектор
- T 7 Tool kit
ინსტრუმენტების კომპლექტი
набор инструментов
- T 8 Trace analysis
(ნივთიერების) კვალის ანალიზი
следовый анализ
- T 9 Trace isolation
მინარევების გამოყოფა
выделение примеси
- T 10 Transport
გადატანის პროცესი
процесс переноса
- T 11 Tubing
შემაერთებელი მილაკი
соединительная трубка
- U**
- U 1 Ultraviolet spectrophotometer
ულტრაიისფერი სპექტროფოტომეტრი
УФ-спектрофотометр
- V**
- V 1 Vacancy
ვაკანსია
вакансия
- V 2 Valve
ვენტილი, ონკანი
вентиль, кран
- V 3 Valve of automatic sampling
სინჯის ავტომატურად შემყვანი
ონკანი
кран автоматического ввода проб

V4	Valve of automatic switching ავტომატურად გადამრთველი ონკანი кран автоматического переключения	W 2	Weight-average molecular weight საშუალო მოლეკულური მასა усредненная молекулярная масса
V5	Van Deemter equation ვან-დეემტერის განტოლება уравнение Ван-Деемтера	W 3	Wetting of packing სორბენტის დასველება смачивание сорбента
V6	Viscosity effects სიბლანტით გამონეული ეფექტები вязкостные эффекты	W 4	Wide bore capillary columns დიდი დიამეტრის კაპილარული სვეტი (მაკროკაპილარული) капиллярные колонки большого диаметра (макрокапиллярные)
V7	Volume of the stationary phase უძრავი ფაზის მოცულობა объем неподвижной фазы	Y	
V8	Void volume „მკვდარი“ მოცულობა „мертвый“ объем	Y1	Yield მწარმოებლურობა, გამოსავალიანობა производительность, выход
W		Z	
W 1	Wall coated open tubular column (WCOT) კაპილარული სვეტი უძრავი ფაზის ფენით შიდა კედლებზე капиллярная колонка со слоем неподвижной фазы на внутренних стенках	Z 1	Zone ზონა зона
		Z 2	Zone electrophoresis ზონური ელექტროფორეზი зонный электрофорез

Перечень русских терминов

А

абсорбция, поглошение, А 1
 абсорбционная емкость, А 2
 автоматизированная система
 обработки данных А 22
 автоматический дозатор, А 21
 адгезия, А 9
 адсорбат, адсорбированное
 вещество, А 11
 адсорбент, А 6; А 12
 адсорбционная емкость, А 14
 адсорбционная способность, А 10
 адсорбция А 13
 азотно-фосфорный детектор, N 1
 активированный уголь, А 5
 аналитическая колонка, А 16
 анионообменная мембрана, А 17
 асимметрия пика, Р 9

Б

безопасность, S 1
 бимодальное распределение
 пор (по размерам), В 8
 бинарная фаза, В 9
 блокирование остаточных
 (силанольных) групп, Е 16
 буферный раствор, В 14

В

вакансия, V 1
 ввод пробы, S 4; S 11
 ввод пробы без деления
 потока, S 49
 ввод пробы непосредственно в
 колонку, О 1
 ввод пробы с делением потока, S 47
 вентиль, кран, V 2
 вихревая диффузия, Е 1
 внеколоночные эффекты, Е 21
 внутренний стандарт, I 16
 возвратно-поступательный
 насос, R 3
 воспроизводимость ввода
 (пробы), I 6
 воспроизводимость дозирования
 (пробы), S 6
 время ввода (пробы), I 8
 время удерживания, R 11
 время удерживания несорбиру-
 ющегося компонента „мерт-
 вое" время, Н 6

входной сигнал детектора, D 17
 выбор растворителя S 39
 выделение примеси, Т 9
 высота пика, Р 13
 высота тарелки, Р 29
 высота, эквивалентная теорети-
 ческой тарелке (ВЭТТ), Н 3
 вытеснение, замещение, D 36
 вытеснитель, D 37
 выход колонки, С 49
 выходной сигнал детектора, D 20
 выходное давление, О 8
 вычисляющий интегратор, С 68
 вырезание части хроматографи-
 ческого пика Н 2
 вязкостные эффекты, V 6

Г

газ-носитель, С 14
 газовый «мертвый» объем, G 6
 газовый хроматограф, G 1
 газо-диффузионная колонка, G 4
 газоразрядный детектор, G 5
 газохроматографический
 анализ, G 2
 гелиевый ионизационный
 детектор, Н 4
 гидрофобность, Н 9
 глина (адсорбент), С 42
 градиентное элюирование, G 11
 градуировка приборов (калибров-
 ка посуды), С 1
 графитированная сажа G12

Д

двойной пламенно-ионизационный
 детектор, D 42
 детектор, D 11
 двумерное проявление, D 31
 дегазация растворителя S 37
 дегазированный растворитель, D 4
 делитель потока S 48
 делитель пробы (потока), S 9
 денситометр, D 6
 десорбция, D 8
 детектор D 11
 детектор поглощения, А 3
 детектор по плотности (газа), G 3
 детектор по теплопроводности,
 (катарометр) Т 4

детектор по теплопроводности
 с нитью накала, Н 8
 детектор по электропроводности, Е 6
 диапазон градуировки, R 1
 диапазон линейности, L 5
 динамический диапазон
 детектора, D 15
 динамическое (статическое)
 нанесение фазы, D 43
 дисперсия, D 35
 дифференциальный детектор, D 32
 дозатор, I 11
 дозатор жидких проб, L 8
 дозатор твердых проб, S 33
 дозирующий газовый кран, G 7
 доля неподвижной фазы, S 54
 древесный уголь, С 22
 дрейф нулевой линии, В 6

Ж

жидкая фаза, L 7

З

загрязнение, С 69
 закономерности хроматографи-
 ческого удерживания, С 32
 защитная колонка, G 13
 зона, полоса, В 2, Z 1
 зонный электрофорез, Z 2

И

идентификация, I 1
 изотахофорез, I 31
 изотерма распределения, D 39
 ИК-газоанализатор, I 4
 иммобилизованная (привитая)
 неподвижная фаза, I 2
 инверсия пика, Р 14
 индекс удерживания, R 9
 индекс удерживания Ковача, К 1
 инжектор без деления потока S 50
 инструментальное (приборное)
 размывание (зон), I 12
 интегральный детектор, I 13
 интегратор, I 14
 интерферометрический
 детектор, I 15
 ионизационный детектор, I 28
 ионизационный ток, I 27
 ионит, ионообменная смола, I 21
 ионная сила, I 26

ионный обмен, I 20
ионообменная бумага, I 24
ионообменная емкость, I 22
ионообменная колонка, I 23
ионообменная реакция, I 25, E 20
ионообменный слой, R 7
ионофорез, I 30
испарение через мембрану
(первапорация) P 24
исследуемый раствор (смесь), T 2
источники погрешностей, E 17

К

калибровочная кривая, C 2
калибровочный коэффициент, C 3
калибровка по молекулярным
массам M 18
каломельный электрод, C 5
капиллярная колонка, C 8, O 3
капиллярная колонка из
плавленого кварца, F 16
капиллярная колонка со слоем
неподвижной фазы на внутрен-
них стенках, W 1
капиллярная колонка с пористым
слоем на стенках P 37
капиллярная колонка с пропитан-
ным неподвижной фазой твер-
дым носителем на стенках, S 59
капиллярная колонка с развитым
или нанесенным пористым сло-
ем и неподвижной фазой на стен-
ках, S 14
капиллярные колонки большого диа-
метра (макрокапиллярные), W 4
капиллярный изотахофорез, C 10
капиллярный электрофорез, C 9
катионит, катионообменник, C 18
катионообменная бумага, C 17
катионообменная мембрана, C 16
катионный обмен, C 15
качественный хроматографичес-
кий анализ, Q 1
кинетика массопереноса, M 6
кинетические факторы, K 2
когезия, C 43
количественный хроматографи-
ческий анализ, Q 2
коллектор фракций, F 13
колонка, C 44
колонка большого диаметра, M 1
колонка с двумя секциями, D 40

колоночные фиттинги, соединит-
ели для колонок, C 50
компенсационная колонка, C 62
комплексообразующий агент, C 63
комплексообразующий ионит, C 64
компьютерная коррекция, C 67
константа МакРейнольдса, M 7
константы Роршайндера, R 16
коэффициент асимметрии, A 19
коэффициент диффузии, D 33
коэффициент емкости, C 7
коэффициент разделения, S 20
коэффициент распределения,
P 6, D 38
коэффициент селективности, S 17
коэффициент учитывающий сжи-
маемость, C 66
кран автоматического ввода
проб, V 3
кран автоматического переключе-
ния, V 4
кран-дозатор, S 10, I 9
кремнезем, S 27
кривая элюирования, E 15
круговая (кольцевая) хроматог-
рамма, C 41
кулонометрический детектор, C 70

Л

лазерный фотоионизационный де-
тектор, L 1
лента регистратора, C 23
линейная скорость потока, L 6
линейность сигнала детектора, D 18

М

макропористый полимерный
сорбент M 2
максимум пика, P 15
маркер, вещество-метка, M 4
масштабирование, S 13
машина для вытягивания стеклян-
ных капилляров, G 10
„мертвое время“ D 2
„мертвый объем“ D 3; V 8
микроколонка, M 8
микро колонка, M 9
микропористый, M 10
микрошприц, M 11
многократное элюирование, M 20
многоступенчатое извлечение
методом газовой хроматогра-
фии, M 21

моделирование, S 30
модификация поверхности, S 62
модифицированный адсорбент, M 13
молекулярное сито, цеолит, M 16
молекулярный сепаратор, M 15
молярный объем, M 14
монослой, мономолекулярный
слой, M 19
мостиковая схема, B 12
мыльный расходомер, S 31

Н

набор калибровочных стандартов, C 4
набор инструментов, T 7
накопительная колонка, A 4
нанесение неподвижной фазы, I 3
направление потока, F 9
насадка (сорбент), P 2
насадка (наполнитель) колонки, C 54
насадочная колонка, P 1
насос, P 42
насос высокого давления, H 5
насыщение камеры, C 21
начальная и конечная темпера-
туры, I 5
неподвижная фаза, S 53, F 3
неполярный, N 3
непосредственное соединение хро-
матографа с ЭВМ (работа в ре-
жиме реального времени), O 2
неспецифичный адсорбент, N 4
несущая пластинка, S 60
нормальная фаза, N 5
нулевая линия, B 5

О

обменная емкость, E 18
обнаружение, детектирование, D 9
оборудование систем обработки
данных, H 1
образец (проба) S 2, S 45
образование „хвоста“ пика, T 1
обращенная фаза, R 14
объем введенной пробы, I 10
объем колонки C 61
объем неподвижной фазы, L 9; V 7
объем слоя, B 7
объемная плотность B 15
объем удерживания, R 13
объем удерживания (несорбиру-
ющегося компонента) („мерт-
вый“ объем), H 7; V 8
объем элюирования, P 12

объемная скорость потока,
расход, F 10
объемная скорость потока через
колонку (расход), C 51
оксид алюминия, глинозем, A 15
оптически активная неподвижная
фаза, O 5
основание пика, P 10
особенности (закономерности)
элюирования, E 14
остановка потока, S 56
отклик (показатель, сигнал) детек-
тора, D 22
относительное удерживание, R 6
относительная доля свободного
объема I 18
отношение объемов (количеств)
фаз, P 25
отношение сигнал/шум, S 26
оценка толщины пленки по методу
Гроба, F 2

П

параметры удерживания, P 16
перегруженная колонка, O 7
перекрывающиеся пики, O 6
переключающий клапан, S 64
переключение колонки, C 60
пик, P 7
плазменный ионизационный
детектор, P 27
пламенно-ионизационный
детектор, F 6
пламенно-фотометрический
детектор, F 7
пламенно-эмиссионный
детектор, F 5
пламенный детектор, F 4
площадь пика, P 8
поверхностнослойные (пелликуля-
рные) частицы, P 21
поверхностный заряд, S 61
подвижная фаза, E 12; M 12, D 29
подвижность ионов, I 29
полидисперсность, P 33
получение производного
(дериватизация), D 7
полуширина пика (ширина на по-
ловине высоты), P 20
полярность, P 31
полярографический детектор, P 32
пористость слоя, I 17
поршневой насос, S 63

постоянная времени детектора, D 23
потенциал течения, S 57
поточный детектор, D 16
предел обнаружения, L 4, D 10
препаративная колонка, P 38
приведенное время удерживания, A 7
приведенный объем удерживания, A 8
проба (образец), S 2
продольная размытие (зоны), A 23
производительность, P 40
производительность, выход Y 1
производительность, емкость, C 6
проницаемость, P 23
противоточный ионный обмен, C 71
проточный электрофорез, F 11
процесс переноса, T 10
проявление (хроматограмм), D 26
пятно, зона, S 51

Р

рабочий режим, O 4
(равновесное) насыщение слоя, L 2
радиус (диаметр) пор, P 34
разделение, S 19
разделительная способность, S 24
размер колонки, C 45
размер пор, P 35
размер (объем) пробы, S 7
размер частиц, P 4
размытие, B 13
размытие в колонке, C 46
размытие границы пика, P 18
размытие за счет массопереда-
чи, M 5
размытие задней границы зоны, B 4
размытие зоны, B 3
размытие пика, P 11
размытие фронта (пика), F 15
разрешающая способность коло-
нки, C 59
разряд, D 34
распределение молекул по разме-
рам, M 17
распределение пор по размерам, P 36
распределение частиц по разме-
рам, P 5
расстояние продвижения подвиж-
ной фазы, S 38
растворимость, S 35
растворимость образца (пробы), S 8
регенерация колонки, C 58
регулятор расхода, F 8
редуктор, P 39

рефрактометрический детектор, R 5
ручной кран-дозатор, M 3

С

сажа, C 12
самопишущий потенциометр,
регистратор, R 4
самоуплотняющаяся мембрана, S 25
свободный объем, I 19
селективное элюирование, S 15
селективность, S 16
силикагель, S 28
силилирующий реагент, S 29
система обработки данных, D 1
скорость обмена, E 19
скорость программирования, P 41
скорость протяжки ленты, C 24
скорость проявления, D 28
следовый анализ, T 8
смачивание сорбента, W 3
соединительная трубка, T 11
сопло, J 1
сорбент S 40
сорбционное равновесие, S 42
сорбционные свойства, S 43
сорбция, S 41
составные колонки, C 65
спектрофотометрический
детектор, S 46
способ заполнения колонки, C 55
способ проявления, D 30
способ совмещения методов
(разделения), C 72
среднечисленная молекулярная
масса, N 7
стабильность детектора, D 25
стартовая точка или линия, S 52
стеклянные шарики, G 9
степень пропитки, D 5
степень разделения, S 22
ступенчатое элюирование, S 55
сухой способ заполнения
колонки, D 41
сэндвич-камера для проявления,
D 27

Т

тарелка, P 28
твердая проба, S 32
твёрдый носитель, S 34, S 58
температура ввода (пробы), I 7
температура удерживания, R 12
теоретическая тарелка, T 3

теория скоростей, R 2
теория удерживания, R 10
термодесорбция, T 5
термоионный ионизационный
детектор, T 6
термостат детектора, D 21
термостат колонки, C 53
ток детектора по теплопровод-
ность, D 12
толщина пленки, F 1
толщина слоя, L 3
точность дозирования, S 5

У

удельный объем удерживания, S 44
удерживание, R 8
унос неподвижной фазы из
колонки, B 10
уравнение Ван-Деемтера, V 5
уровень шумов, N 2
усредненная молекулярная
масса, W 2
устройство для ввода пробы, ин-
жектор пробы, S 3; S 12
устройство для автоматического
ввода проб, A 20
устройство для нанесения слоя, A 18
УФ-спектрофотометр, U 1

Ф

флуоресцентный детектор, F 12
фоновый шум, B 1
форма пика, P 17
форма (тип) колонки, C 52
фотоионизационный детектор, P 26
фронт подвижной фазы, S 36

Х

характеристики детектора, D 14
характеристики (параметры)
колонки, C 56
хелатообразующий ионит, C 25
хемилюминесцентный детектор, C 26
химически связанная фаза
(привитая фаза), B 11
хроматограмма, C 29
хроматограф, C 30
хроматографическая бумага, C 34
хроматографическая зона, C 39
хроматографическая колонка,
C 33; C 38
хроматографическая пластинка, C 36

хроматографический анализ, C 31
хроматографический пик, C 35
хроматографическое разделение, C 37
хроматография, C 40
-адсорбционная
-аффинная
- в режиме разделением времени
- в режиме реального времени
- в тонком слое (тонкослойная)
-ваканто-
-восходящая
-высокотемпературная
-высокоэффективная жидкост-
ная (ВЭЖХ)
-вытеснительная
-газо-адсорбционная
-(газо- твердофазная)
-газовая
-газо-жидкостная
-гель-
-гельпроникающая (ситовая)
-горизонтальная
-двумерная
-деструкционная газовая
-дифференциальная
-жидкостная
-жидкостная адсорбционная
-жидкостно-гелевая
-жидкость-жидкостная
-изотермическая
-ионная
-ионообменная
-ион-парная
-итерационная
-квазиколончатая
-капиллярная
-колоночная
-корреляционная
-лигандообменная
-микро
-микроколоночная
-микронасадочная
-мицеллярная
-многовариантная
-многомерная
-молекулярная
-на бумаге (бумажная)
-на молекулярных ситах
-на «сухих» колонках
-непрерывная
-низкотемпературная
-нисходящая
-обращенная

-одномерная
-осадочная
-парофазная
-пиролитическая
-плоскостная
-препаративная
-при избыточном давлении (жид-
костная)
-при пониженном давлении
-противоточная
-проточная
-проявительная
-радиальная
-распределительная
-сверхкритическая
-сверхкритическая флюидная
-с высаливанием
-с гидрофобным взаимодейст-
вием
-с градиентным элюированием
-с изократическим элюированием
-с ионным взаимодействием
-с комплексообразованием
-с нормальными фазами
-с обращением потока (подвиж-
ной фазы)
-с обращенными фазами
-с прерыванием элюирования
(потока)
-с программированием давлес-
ния (потока, температуры)
-с программированием потока
-с радиометрическим детекти-
рованием
-ступенчатая
-тонкослойная с многократным
проявлением
-фронтальная
-флюидная
-центрифугальная
-циркуляционная
-циркуляционная газовая
-эксклюзионная
-экстракционная
-электрофоретическая
хроматоэлектрофорез, C 27
хроматоэлектрофорограмма, C 28

Ц

целлюлоза, C 19
центрифугирование, C 20

Ч

число атомов углерода, углеродное число, С 11
число (критерий) Рейнольдса, R 15
число разделения, S 23
число тарелок, P 30
число теоретических тарелок, N 6
чистота фракций, F 14
чувствительность, S 18
чувствительность детектора, D 24

Ш

ширина пика у основания, P 19
шприц для дозирования газа, G 8
шум детектора, D 19

Э

экстрагировать, экстракт, E 22
электродиализ, E 5
электромагнитный вибратор, E 7
электронозахватный детектор, E 8
электрофорез, E 9
электрофорез без носителя, C 13
электрофорез на бумаге, P 3

электрофорез на колонке, C 48
электрофорограмма, E 10
электрохимический детектор, E 4
электрохроматография, E 3
элюат (элюируемый компонент), элюирование, E 11
элюирование, E 13
электрохроматограмма, E 2
эффективность, P 22
эффективность колонки, C 57; C 47
эффективность разделения, S 21

Я

ячейка детектора, D 13

ქართული ტერმინების ნუსხა

ა

აბსორბცია, შთანთქმა, A1
 აბსორბციული ტევადობა, A2
 ადსორბენტი, A6, A12
 ადსორბციული უნარი, A 10
 ადსორბატი, ადსორბირებული
 ნივთიერება, A11
 ადსორბცია, A13
 ადსორბციული ტევადობა, A14
 ადჰეზია A9
 ავტომატური დოზატორი, A21
 ავტომატურად გადამრთველი
 ონკანი, V 4
 აირქრომატოგრაფი, G 1
 აზოტ-ფოსფორული
 დეტექტორი, N 1
 აირქრომატოგრაფიული
 ანალიზი, G 2
 აირის სიმკვრივისგაზომვის
 დეტექტორი, G 3
 აირ-დიფუზური სვეტი, G 4
 აირ-განმუხტვის
 დეტექტორი, G 5
 აირის „მკვდარი“
 მოცულობა, G 6
 აირის დოზირების ონკანი, G 7
 აირის დოზირების შპრიცი, G 8
 აირმატარებელი, C 14
 ალუმინის ოქსიდი, თიხამინა A15
 ალური დეტექტორი, F 4
 ალურ-ემისიური
 დეტექტორი, F 5
 ალურ-იონიზაციური
 დეტექტორი, F 6
 ალურ-ფოტომეტრული
 დეტექტორი, F 7
 ანალიზური სვეტი, A 16
 ანიონმიმომცველი
 მემბრანა, A 17
 აორთქლება მემბრანის გავლით
 (პერვეპორაცია) P 24
 არასორბირებადი კომპონენტის
 შეკავების დრო („მკვდარი“
 დრო), H 6
 არასორბირებადი კომპონენტის
 შეკავებითი მოცულობა
 („მკვდარი“ მოცულობა), H 7
 აფსკის სისქე, F 1
 აფსკის სისქის განსაზღვრა
 გრობის მეთოდით, F 2
 არაპოლარული, N 3

არასპეციფიკური ადსორბენ-
 ტი, N 4
 ასიმეტრიის კოეფიციენტი, A 19
 აღმოჩენის ზღვარი (დეტექ-
 ტორის), D 10, L 4

ბ

ბინარული ფაზა, B 9
 ბოგური სქემა, B 12
 ბუფერული ხსნარი, B 14

გ

გააქტივებული ნახშირი, A 5
 გადამრთველი სარქველი, S 64
 გადატანის პროცესი, T 10
 გადატვირთული სვეტი, O 7
 გადაფარული პიკები, O 6
 გამამჟღავნებელი, (მოძრავი
 ფაზა), D 29
 გამდინარე ელექტროფორეზი,
 F 11
 გამომჟღავნების სიჩქარე, D 28
 გამომჟღავნების მეთოდი, D 30
 გამომძევებელი, D 37
 გამოძევა, ჩანაცვლება, D 36
 გამოსავალი წნევა, O 8
 გამომჟღავნება (ქრომატოგრა-
 მის), D 26
 გამომთვლელი ინტეგრატორი,
 C 68
 განაწილების კოეფიციენტი,
 D 38, P 6
 გამხსნელის დეგაზაცია, S 37
 გამხსნელის შერჩევა, S 39
 განაწილების იზოთერმა, D 39
 განმუხტვა, D 34
 გაჟღენთის ხარისხი D 5
 გრადიენტული ელუირება, G 11
 გრადუირება (დაკალიბრება)
 ხელსაწყოსი, C 1
 გრადუირების დიაპაზონი, R 1
 გრაფიტირებული მური, G 12
 გრიგალური დიფუზია, E 1
 გრძივი წარეცხვა (ზონის) A 23

დ
 დაბინძურება, C 69
 დაკალიბრების მრუდი, C 2
 დაკალიბრების კოეფიციენტი,
 C 3
 დაკალიბრების სტანდარტების
 კომპლექტი, C 4

დაკალიბრება მოლეკულური
 მასების მიხედვით, M 18
 დამცავი სვეტი, G 13
 დაყოფის მეთოდების შეთავსე-
 ბის ხერხი, C 72
 დაყოფა, S 19
 დაყოფის კოეფიციენტი, S 20
 დაყოფის ეფექტიურობა, S 21
 დაყოფის ხარისხი, S 22
 დაყოფის რიცხვი, S 23
 დაყოფის უნარი, S 24
 დგუშიანი ტუმბო, S 63
 დენსიტომეტრი, D 6
 დეგაზირებული გამხსნელი, D 4
 დერივატიზაცია, D 7
 დესორბცია, D 8
 დეტექტირება, აღმოჩენა, D9
 დეტექტორი, D 11
 დეტექტორის სიგნალი
 (ჩვენება), D 22
 დეტექტორის დროის მუდმივა,
 D23
 დეტექტორის მგრძნობიარობა,
 D 24
 დეტექტორის სტაბილურობა,
 D 25
 დეტექტორში შემავალი სიგნა-
 ლი, D 17
 დეტექტორის სიგნალის წრფი-
 ვობა, D 18
 დეტექტორის ხმაური, D 19
 დეტექტორიდან გამომავალი
 სიგნალი, D 20
 დეტექტორის თერმოსტატი,
 D 21
 დეტექტორის უჯრედი, D 13
 დეტექტორის მახასიათებლე-
 ბი, D 14
 დეტექტორის დინამიკური დი-
 აპაზონი, D 15
 დიდი დიამეტრის კაპილარული
 სვეტი (მაკროკაპილარული), W 4
 დიდი დიამეტრის სვეტი, M 1
 დინების პოტენციალი, S 57
 დისპერსია, D 35
 დიფერენციალური დეტექტო-
 რი, D 32
 დიფუზიის კოეფიციენტი, D 33
 დოზატორი, I 11
 დოზირების სიზუსტე (სინჯის),
 S 5

ე

ელექტროდიალიზი, E 5
 ელექტრო გამტარობის დეტექტორი, E 6
 ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი, E 7
 ელექტრონების ნატაცების დეტექტორი, E 8
 ელექტროფორეზი, E 9
 ელექტროფორეზი ქაღალდზე, P 3
 ელექტროფოროგრაფია, E 10
 ელექტროქიმიური დეტექტორი, E 4
 ელექტროქრომატოგრაფია, E 2
 ელექტროქრომატოგრაფია, E 3
 ელექტროფორეზი მატარებლის გარეშე C 13
 ელექტროფორეზი სვეტში, C 48
 ელუატი, ელუირება, E 11
 ელუენტი, მოძრავი ფაზა, E 12
 ელუირება, გამოყოფა, E 13
 ელუირების მრუდი, E 15
 ელუირების მოცულობა, P 12
 ელუირების თავისებურებები (კანონზომიერება), E 14
 ეფექტურობა, P 22
 ექსტრაქცია, ექსტრაქტი, E 22

ვ

ვაკანსია, V 1
 ვან-დერვალის განტოლება, V 5
 ვენტილი, ონკანი, V 2

ზ

ზედაპირის მოდიფიკაცია, S 62
 ზედაპირულ-ფენოვანი (პელიკულარული) ნაწილაკები, P 21
 ზედაპირული მუხტი, S 61
 ზონა, ზოლი, B 2
 ზონა, Z 1
 ზონის წარეცხვა, B 3
 ზონური ელექტროფორეზი, Z 2
 ზონის უკანა საზღვრის წარეცხვა, B 4

თ

თავისუფალი მოცულობა, I 19
 თავისუფალი მოცულობის ფარდობითი წილი I 18
 თბოგამტარობის დეტექტორის დენი, D 12

თბოგამტარობის დეტექტორი ვარვარების ძაფით, H 8
 თბოგამტარობის დეტექტორი (კატარომეტრი), T 4
 თეორიული თეფშების ეკვივალენტური სიმაღლე (თიშეს), H 3
 თეორიული თეფშების რიცხვი, N 6
 თეორიული თეფში, T 3
 თეფში, P 28
 თეფშის სიმაღლე, P 29
 თეფშების რიცხვი, P 30
 თერმოდესორბცია, T 5
 თერმოიონური-იონიზაციური დეტექტორი, T 6
 თვითმემჭიდროვებადი მემბრანა S 25
 თვითნაწილი პოტენციომეტრი, რეგისტრატორი R 4
 თვისებითი ქრომატოგრაფიული ანალიზი, Q 1
 თიხა (ადსორბენტი), C 42
 თხევადი სინჯის დოზატორი, L 8
 თხევადი ფაზა, L 7

ი

იდენტიფიკაცია, აღმოჩენა I 1
 იზოტახოფორეზი, I 31
 იმობილიზაციური უძრავი ფაზა, I 2
 ინფრანითელი აირანალიზატორი, I 4
 იონმიმოცვლითი ფენა, R 7
 ინსტრუმენტების კომპლექტი, T 7
 ინსტრუმენტული (ხელსაწყო) წარეცხვა (ზონის), I 12
 ინჟექტორი ნაკადის გაყოფის გარეშე, S 50
 ინტეგრატორი, I 14
 ინტეგრალური დეტექტორი, I 13
 ინტერფერომეტრული დეტექტორი, I 15
 იონების ძვრადობა, I 29
 იონმიმოცვლა, იონური მიმოცვლა, I 20
 იონიტი, იონმიმოცვლითი ფილა, I 21
 იონმიმოცვლითი ტევადობა, I 22
 იონმიმოცვლითი სვეტი, I 23
 იონმიმოცვლითი ქაღალდი, I 24
 იონმიმოცვლითი რეაქცია, I 25, E 20

იონიზაციური დენი I 27
 იონიზაციური დეტექტორი I 28
 იონოფორეზი, I 30
 იონური ძალა, I 26

კ

კალომელის ელექტროდი, C 5
 კამერის გაჯერება, C 21
 კაპილარული სვეტი, C 8, O 3
 კაპილარული ელექტროფორეზი, C 9
 კაპილარული იზოტახოფორეზი, C 10
 კაპილარული სვეტი უძრავი ფაზის ფენით შიდა კედლებზე, W 1
 კაპილარული სვეტი უძრავი ფაზით გაუღნითი მყარი სარჩულით მის კედლებზე, S 59
 კაპილარული სვეტი კედლებზე დაფენილი ფოროვანი ფენით და უძრავი ფაზით, S 14
 კაპილარული სვეტი ფოროვანი ფენით კედელზე, P 37
 კაჟმინა, S 27
 კათიონური მიმოცვლა, C 15
 კათიონმიმოცვლელი მემბრანა, C 16
 კათიონმიმოცვლელი ქაღალდი, C 17
 კათიონიტი, კათიონმიმოცვლელი, C 18
 კინეტიკური ფაქტორები, K 2
 კოვჩის ინდექსი, K 1
 კომპიუტერული კორექცია, C 67
 კომპლექსნარმომქმნელი რეაგენტი, C 63
 კომპლექსნარმომქმნელი იონიტი, C 64
 კოჰეზია, C 43
 კულონომეტრული დეტექტორი, C 70
 კუმულაციის კოეფიციენტი, C 66

ლ

ლაზერულ-ფოტოიონიზაციური დეტექტორი, L 1
 ლაქა, ზონა, S 51
 ლენტის მოძრაობის სიჩქარე, C 24

მ

მაგროვებული სვეტი, A 4
 მაკ-რეინოლდსის მუდმივა, M 7
 მაკროფოროვანი პოლიმერული სორბენტი, M 2
 მასაგადაცემის კინეტიკა, M 6
 მასაგადაცემით გამოწვეული წარეცხვა, M 5
 მასშტაბირება, S 13
 მარკერი, (შესაღარბებული ნივთიერება), M 4
 მატარებელი ფირფიტა, S 60
 მაღალი წნევის ტუმბო, H 5
 მგრძნობიარობა, S 18
 მდნარი კვარცის კაპილარული სვეტი, F 16
 მიკროფოროვანი, M 10
 მიკროშპრიცი, M 11
 მიკროსვეტი, M 8, M 9
 მიმოცვლითი ტევადობა, E 18
 მიმოცვლითი სიჩქარე, E 19
 მინარევების გამოყოფა, T 9
 მინის ბურთულები, G 9
 მინის კაპილარების გასაჭიმი მოწყობილობა, G 10
 მკვდარი დრო D 2
 მკვდარი მოცულობა, D 3, V 8
 მოდელირება, S 30
 მოდიფიცირებული ადსორბენტი, M 13
 მოლური მოცულობა, M 14
 მოლეკულური სეპარატორი, M 15
 მოლეკულური საცერი, ცეოლითი, M 16
 მოლეკულების განაწილება ზომების მიხედვით, M 17
 მონაცემთა ავტომატური დამუშავების სისტემა, A 22
 მონაცემთა დამუშავების სისტემა, D 1
 მონაცემთა დამუშავების სისტემის მოწყობილობა, H 1
 მონოშრე, მონომოლეკულური შრე, M 19
 მოძრავი ფაზა, (გამამჟღავნებელი), M 12, D 29
 მოძრავი ფაზის გადაადგილების მანძილი, S 38
 მოძრავი ფაზის ფრონტი, S 36
 მოცულობითი სიმკვრივე, B 15
 მრავალჯერადი ელუირება, M 20
 მრავალსაფეხურიანი გამოყოფა (ექსტრაქცია) აირადი ქრომატოგრაფიით M 21

მყარი სინჯი, S 32
 მყარი სინჯის დოზატორი, ინექტორი, S 33
 მყარი სარჩული, S 34, S 58
 მშრალი მეთოდით შევსება (სვეტის), D 41
 მოძრავი ფაზის ფრონტი, S 36
 მწარმოებლურობა, გამოსავალიანობა, Y 1, P 40
 მწარმოებლურობა, ტევადობა, C 6

ნ

ნაკადის ხაზოვანი სიჩქარე, L 6
 ნაკადის მოცულობითი სიჩქარე სვეტში (ხარჯი), C 51, F 10
 ნაკადის მიმართულება, F 9
 ნაკადური დეტექტორი, D 16
 ნაკადის გამყოფი, S 48
 ნაკადის გაჩერება, S 56
 ნარჩენი სილანოლური ჯგუფების ბლოკირება, E 16
 ნახშირბადის ატომების რიცხვი, ნახშირბადის რიცხვი, C 11
 ნაწილაკების ზომა, P 4
 ნაწილაკების განაწილება ზომების მიხედვით, P 5
 ნივთიერების კვალის ანალიზი, T 8
 ნიმუში, S 45
 ნიმუშის დოზირების აღწარმოება, S 6
 ნიმუშის (სინჯის) ხსნადობა, S 8
 ნორმალური ფაზა, N 5
 ნულოვანი ხაზი, B 5
 ნულოვანი ხაზის დრეიფი, B 6

ო

ონკან-დოზატორი, I 9, S 10
 ოპტიკურად აქტიური უძრავი ფაზა, O 5
 ორგანოზომილებიანი გამომჟღავნება, D 31
 ორ სექციიანი სვეტი, D 40
 ორმაგი ალურ-იონიზაციის დეტექტორი, D 42

პ

პიკი, P 7
 პიკის სიმაღლე, P 13
 პიკის ინვერსია, P 14
 პიკის კუდების წარმოქმნა, T 1
 პიკის მაქსიმუმი, P 15

პიკის ფორმა, P 17
 პიკის (უკანა ზურგის) საზღვრების წარეცხვა, P 18
 პიკის სიგანე ფუძესთან, P 19
 პიკის სიგანე სიმაღლის ნახევარზე, P 20
 პიკის ფართი, P 8
 პიკის ასიმეტრია, P 9
 პიკის ფუძე, P 10
 პიკის წარეცხვა, P 11
 პიკის ფრონტის წარეცხვა, F 15
 პლაზმურ იონიზაციური დეტექტორი, P 27
 პოლარობა, P 31
 პოლაროგრაფიული დეტექტორი, P 32
 პოლიდისპერსულობა, P 33
 პრეპარატული სვეტი, P 38
 პროგრამირების სიჩქარე, P 41

რ

რაოდენობითი ქრომატოგრაფიული ანალიზი, Q 2
 რეგისტრატორის ლენტი, C 23
 რედუქტორი, P 39
 რეინოლდსის რიცხვი (კრიტერიუმი), R 15
 რეფრაქტომეტრიული დეტექტორი, R 5
 რორშნაიდერის მუდმივა, R 16

ს

საკვლევი ხსნარი (ნარევი), T 2
 საკომპენსაციო სვეტი, C 62
 სამუშაო რეჟიმი, O 4
 საპნიანი ხარჯმზომი, S 31
 საფეხურებრივი ელუირება, S 55
 საშუალო მოლეკულური მასა, W 2
 საშუალო მოლეკულური წონა, N 7
 საქმენი, J 1
 სანყისი და საბოლოო ტემპერატურა, I 5
 სელექტიური ელუირება, S 15
 სელექტიურობა, S 16
 სელექტიურობის კოეფიციენტი, S 17
 „სენდვიჩ კამერა“ გამომჟღავნებისთვის, D 27
 სვეტგარეთა ეფექტები, E 21
 სვეტი, C 44
 სვეტიდან გამოსასვლელი, C 49
 სვეტის გადართვა, C 60

სვეტის გაყოფის უნარი, C 59
 სვეტის ეფექტურობა, C 47, C 57
 სვეტის ზომები, C 45
 სვეტის თერმოსტატი, C 53
 სვეტის მახასიათებლები (პარამეტრები), C 56
 სვეტის მოცულობა, C 61
 სვეტის რეგენერაცია, C 58
 სვეტის ფორმა (ტიპი), C 52
 სვეტის შემავსებელი, C 54
 სვეტის შემაერთებლები, C 50
 სვეტის შევსების მეთოდი, C 55
 სილიკაგელი, S 28
 სილილირების რეაგენტი, S 29
 სიბლანტით გამოწვეული ეფექტები V 6
 სინჯი (ნიმუში), S 2
 სინჯის ავტომატური შეყვანის მოწყობილობა, ავტოინჟექტორი A 20
 სინჯის ავტომატურად შემყვანი ონკანი, V 3
 სინჯის (ნაკადის) დამყოფი, S 9
 სინჯის ზომა (მოცულობა), S 7
 სინჯის შეყვანა, S 4, S 11
 სინჯის შეყვანის აღწარმოება, I 6
 სინჯის შეყვანის ტემპერატურა, I 7
 სინჯის შეყვანა უშუალოდ სვეტში, O 1
 სინჯის შეყვანის დრო, I 8
 სინჯის შესაყვანი მოწყობილობა, ინჟექტორი, S 12
 სინჯის შეყვანა ნაკადის გაყოფით, S 47
 სინჯის შეყვანა ნაკადის გაყოფის გარეშე, S 49
 სიჩქარეთა თეორია, R 2
 სპექტროფოტომეტრული დეტექტორი, S 46
 სორბენტი, S 40
 სორბენტის ფენის მანაწილებელი მოწყობილობა, A 18
 სორბენტის დასველება, W 3
 სორბცია, S 41
 სორბციული წონასწორობა, S 42
 სორბციული თვისებები, S 43
 სტარტის წერტილი ან ხაზი, S 52

ტ

ტევადობის კოეფიციენტი, C 7
 ტუმბო, P 42

უ

უკუქცევ-გადატანითი ტუმბო, R 3
 ულტრაიისფერი სპექტროფოტომეტრი, U 1
 უსაფრთხოება, S 1
 უძრავი ფაზის წატაცება სვეტიდან, B 10
 უძრავი ფაზის დაფენა, I 3
 უძრავი ფაზა, F 3, S 53
 უძრავი ფაზის წილი, S 54
 უძრავი ფაზის მოცულობა, V 7, L 9
 უშუალო შეერთება ქრომატოგრაფისა მზმ-თან (რეალური დროის რეჟიმი), O 2 -

ფ

ფაზის დინამიკური (სტატიკური) დაფენა, D 43
 ფაზების მოცულობების (რაოდენობის) შეფარდება, P 25
 ფარდობა სიგნალი/ხმაური, S 26
 ფარდობითი შეკავება, R 6
 ფენის მოცულობა, B 7
 ფენის (წონასწორული) გაჯერება, L 2
 ფენის სისქე, L 3
 ფენის ფორიანობა, I 17
 ფლუორესცენციური დეტექტორი, F 12
 ფონური ხმაური, B 1
 ფორების ბიომოდალური, განაწილება (ზომების მიხედვით), B 8
 ფორების განაწილება ზომების მიხედვით, P 36
 ფორების რადიუსი (დიამეტრი), P 34
 ფორის ზომა, P 35
 ფოტოიონიზაციური დეტექტორი, P 26
 ფრაქციების კოლექტორი, F 13
 ფრაქციის სისუფთავე, F 14

ქ

ქემილუმინესცენციური დეტექტორი, C 26
 ქიმიურად შეკავშირებული (მიკერებული) ფაზა, B 11
 ქრომატოგრაფია, C 29
 ქრომატოგრაფი, C 30
 ქრომატოგრაფია, C 40
 -ადსორბციული

-აირ-ადსორბციული
 -აირ
 -აირ-თხევადი
 -აფინური
 -ალმავალი
 -გამომარილებით
 -გამოძევებითი
 -განაწილებითი
 -გელ
 -გელშელნევით, (საცრისებური)
 -გრადიენტული ელუირებით
 -დაბალი წნევით
 -დაბალტემპერატურული
 -დამავალი
 -დესტრუქციული აირადი
 -დიფერენციალური
 -დროის დაყოფის რეჟიმით
 -ელექტროფორეტიკული
 -ელუირების (ნაკადის) შეწყვეტით
 -ერთგანზომილებიანი
 -ექსკლუზიური
 -ექსტრაქციული
 -ვაკანტური
 -ზეკრიტიკული
 -ზეკრიტიკული ფლოიდური
 -თხევადი
 -თხევად ადსორბციული
 -თხევად-გელ
 -თხევად-თხევადი
 -თხელფენაში (თხელფენოვანი)
 -თხელფენოვანი მრავალჯერადი გამომჟღავნებით
 -იზოკრატული ელუირებით
 -იზოთერმული
 -იონმიმოცვლითი
 -იონური
 -იონური ურთიერთქმედებით
 -იონ-წყვილური
 -იტერაციული
 -კაპილარული
 -კომპლექსნარმოქმნითი
 -კორელაციური
 -კვაზისვეტური
 -ლიგანდმიმოცვლითი
 -მალალეფექტური თხევადი (მათი)
 -მალალტემპერატურული
 -მიცელური
 -მიკრო
 -მიკროსვეტური
 -მოლეკულური

-მოლეკულურ საცრებზე
-მრავალგანზომილებიანი
-მრავალვარიანტული
-„მშრალ“ სვეტზე
-ნაკადის პროგრამირებით
-ნალექოვანი
-ნორმალური ფაზით
-ნორმალურ ფაზური
-ორგანზომილებიანი
-ორთქლფაზური
-პიროლიზური
-პრეპარატული
-რადიომეტრული დეტექტი-
რებით
-რეალური დროის რეჟიმში
-რადიალური
-სამჟღავნი
-საფეხუროვანი
-სვეტური
-სიბრტყითი
-უნყვეტი
-უკუდინებით, წინაღდენიანი
-ფლუიდური
-ფრონტალური
-ქალაღზე
-შებრუნებული
-შებრუნებულ-ფაზური
-შებრუნებულ ნაკადით (მოძ-
რავი ფაზით)
-ცირკულაციური
-ცენტრიფუგული
-ცირკულაციური აირადი
-წნევის (ნაკადის, ტემპერა-
ტურის) პროგრამირებით
-ჭარბი წნევით (თხევადი)
-ჰიდროფობული ურთიერთ-
ქმედებით
-ჰორიზონტალური

ქრომატოგრაფიული ანალიზი,
C 31
ქრომატოგრაფიული დაყოფა,
C 37
ქრომატოგრაფიული ზონა, C 39
ქრომატოგრაფიული პიკი, C 35
ქრომატოგრაფიული პიკის ნა-
წილის „ამოჭრა“, H 2
ქრომატოგრაფიული სვეტი,
C 33, C 38
ქრომატოგრაფიული ფირფიტა,
C 36
ქრომატოგრაფიული ქალაღი,
C 34
ქრომატოგრაფიული შეკავების
კანონზომიერება, C 32
ქრომატოელექტროფორეზი,
C 27
ქრომატოელექტროფოროგრამა,
C 28

შ

შებრუნებული ფაზა, R 14
შედგენილი სვეტები, P 65
შეკავება, R 8
შეკავების (შეკავებითი) დრო,
R 11
შეკავების დაყვანილი დრო A 7
შეკავების დაყვანილი მოცუ-
ლობა A 8
შეკავების ინდექსი, R 9
შეკავების თეორია, R 10
შეკავების პარამეტრები, P 16
შეკავების ტემპერატურა, R 12
შეკავებითი მოცულობა, R 13
შემავსებელი (სორბენტი), P 2
შემავსებელიანი სვეტი, P 1
შემაერთებელი მილაკი, T 11

შეყვანილი სინჯის მოცულობა,
I 10

შელწევადობა, P 23
შიგა სტანდარტი, I 16
შთანთქმის დეტექტორი, A 3

ც

ცდომილების წყარო, E 17
ცელულოზა, C 19
ცენტრიფუგვა, C 20

წ

წარეცხვა, B 13
წარეცხვა სვეტში C 46
წინაღდენითი იონმიმოცვლა,
C 71
წრიული ქრომატოგრამა, C 41
წრფივი დიაპაზონი, L 5

ჭ

ჭვარტლი, მური, C-12

ხ

ხარჯის რეგულატორი, F 8
ხელატნარმომქმნელი იონიტი,
C 25
ხელის ონკან-დოზატორი, M 3
ხვედრითი შეკავებითი მოცუ-
ლობა, S 44
ხის ნახშირი, C 22
ხმაურის დონე, N 2
ხსნადობა, S 35

ჰ

ჰელიუმის იონიზაციური დეტექ-
ტორი, H 4
ჰიდროფობულობა, H 9



თეიმურაზ გიორგიშვილი

ქიმიის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი,
საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წევრი

დაიბადა 1928 წლის 23 ივლისს.

1953წ. დაამთავრა საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის ქიმიური ტექნოლოგიის ფაკულტეტი.

1957წ. დაიცვა საკანდიდატო, ხოლო 1972წ. სადოქტორო დისერტაცია.

1978წ. მიენიჭა საქართველოს რესპუბლიკის დამსახურებული მოღვაწის საპატიო წოდება.

1975-2005წწ. იყო საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის პ. მელიქიშვილის სახელობის ფიზიკური და ორგანული ქიმიის ინსტიტუტის ქრომატოგრაფიის ლაბორატორიის გამგე.

1978წ. მიენიჭა პროფესორის წოდება, 1979წ. იგი აირჩიეს საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წევრ-კორესპონდენტად, ხოლო 1988წ. ნამდვილ წევრად.

1989-2005წ. იყო ამავე ინსტიტუტის დირექტორი, ხოლო 2005წ-დან არის მთავარი სამეცნიერო კონსულტანტი.

1998წ. იგი დაჯილდოვდა „ღირსების ორდენით“.

თეიმურაზ ანდრონიკაშვილი არის რამდენიმე სამეცნიერო ჟურნალის სარედაქციო კოლეგიის წევრი; ავტორი და თანაავტორი რვა მონოგრაფიისა და ხუთასზე მეტი სამეცნიერო შრომის.



კობა დიმიტრის ახიანაშვილი

ქიმიის მეცნიერებათა დოქტორი,
პროფესორი

დაიბადა 1954 წლის 5 აგვისტოს.

1976წ. დაამთავრა საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის საინჟინრო-ფიზიკური ფაკულტეტი.

1981-84 წწ. გაიარა ასპირანტურის კურსი ქ. მოსკოვში, ფიზიკო-ტექნიკურ ინსტიტუტში.

1985წ. დაიცვა საკანდიდატო, ხოლო 1995 წ. სადოქტორო დისერტაცია.

1986წ. კ. ამირხანაშვილი დაინიშნა პ. მელიქიშვილის სახელობის ფიზიკური და ორგანული ქიმიის ინსტიტუტში ავტომატიზაციისა და გამოთვლითი ტექნიკის განყოფილების გამგედ, რომლის ბაზაზეც შემდგომ შეიქმნა საქართველოში პირველი კომპიუტერული ქიმიის ლაბორატორია.

1995 წ-დან კ. ამირხანაშვილი არის თბილისის ივ. ჯავახიშვილის სახ. სახელმწიფო უნივერსიტეტის პროფესორი, ოთხმოცდაათზე მეტი სამეცნიერო შრომისა და რამდენიმე მონოგრაფიის ავტორი. იგი არჩეულია სხვადასხვა სამეცნიერო ჟურნალისა და სამეცნიერო-საკვალიფიკაციო საბჭოს წევრად.

კ. ამირხანაშვილი 1995-1999 და 1999-2004 წლებში იყო საქართველოს პარლამენტის წევრი.

1990წ. მან დააარსა საქართველოში ერთ-ერთი პირველი არასამთავრობო საექველმოდო ორგანიზაცია „ღიაბეტიან ბავშვთა დაცვის ასოციაცია“, რომელსაც დღემდე ხელმძღვანელობს. ამ სფეროში განუღებელი ღვაწლისთვის კ. ამირხანაშვილი 2001წ. დაჯილდოვდა „ღირსების ორდენით“.

კ. ამირხანაშვილი არის ღიაბეტის საერთაშორისო ფედერაციის (IDF) და ღიაბეტის სწავლების ევროპის ასოციაციის (EASD) წევრი.



ნინო ოთარის ასული გურკიაშვილი

ქიმიის მეცნიერებათა კანდიდატი

დაიბადა 1960 წლის 28 თებერვალს.

1982წ. დაამთავრა საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის ქიმიური ტექნოლოგიის ფაკულტეტი, ხოლო 1998წ. ქ. თბილისის ი. ჭავჭავაძის სახელობის დასავლურ ენათა და კულტურის სახელმწიფო ინსტიტუტი.

1985 წლიდან მუშაობს საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის პ. მელიქიშვილის სახელობის სახ. ფიზიკური და ორგანული ქიმიის ინსტიტუტის ქრომატოგრაფიის ლაბორატორიაში მეცნიერ თანამშრომლად, აქვე გაიარა ასპირანტურის კურსი.

1995წ. დაიცვა საკანდიდატო დისერტაცია.

1998 წლიდან არის ამავე ინსტიტუტის კომპიუტერული ქიმიის ლაბორატორიის უფროსი მეცნიერ-თანამშრომელი. ნინო გურკიაშვილი თექვსმეტზე მეტი სამეცნიერო შრომის ავტორი და თანაავტორია.