

ლექია # 14

სითხეების თვისებები. ზედაპირული დაჭიმულობა

სითხე წარმოადგენს ნივთიერების აგრეგატულ მდგომარეობას, შუალედურს გაზურ და მყარ მდგომარეობებს შორის, რის გამოც იგი ფლობს გაზურ ასევე მყარ ნივთიერებათა თვისებებს. სითხეებს, ისევე როგორც მყარ სხეულებს, გააჩნიათ გარკვეული მოცულობა, ხოლო გაზების მსგავსად იღებენ იმ ჭურჭლის ფორმას, რომელშიც იმყოფებიან. გაზის მოლეკულები პრაქტიკულად არ არიან ერთმანეთთან დაკავშირებული მოლეკულათშორის ურთიერთქმედების ძალებით და მოცემულ შემთხვევაში გაზის მოლეკულის სითხური მოძრაობის საშუალო ენერგია გაცილებით მეტია მათ შორის მიზიდულობის ძალებით გაპირობებულ საშუალო პოტენციალურ ენერგიაზე, ამიტომ გაზის მოლეკულები განიბნევიან სხვადასხვა მხარეს და გაზი იკავებს მისთვის შესაძლო მოცულობას. მყარ და თხევად სხეულებში მოლეკულებს შორის მიზიდულობის ძალები უკვე მნიშვნელოვანი არიან და მოლეკულებს იჭერენ ერთმანეთისგან გარკვეულ მანძილზე. ამ შემთხვევაში მოლეკულების ქაოტური (სითხური) მოძრაობის საშუალო ენერგია ნაკლებია მოლეკულათშორის ურთიერთქმედების ძალებით გამოწვეულ საშუალო პოტენციალურ ენერგიაზე და იგი არ არის საკმარისი მოლეკულებს შორის მიზიდულობის ძალების გადასალახავად, ამიტომ მყარ სხეულებს და სითხეებს გააჩნიათ გარკვეული მოცულობა.

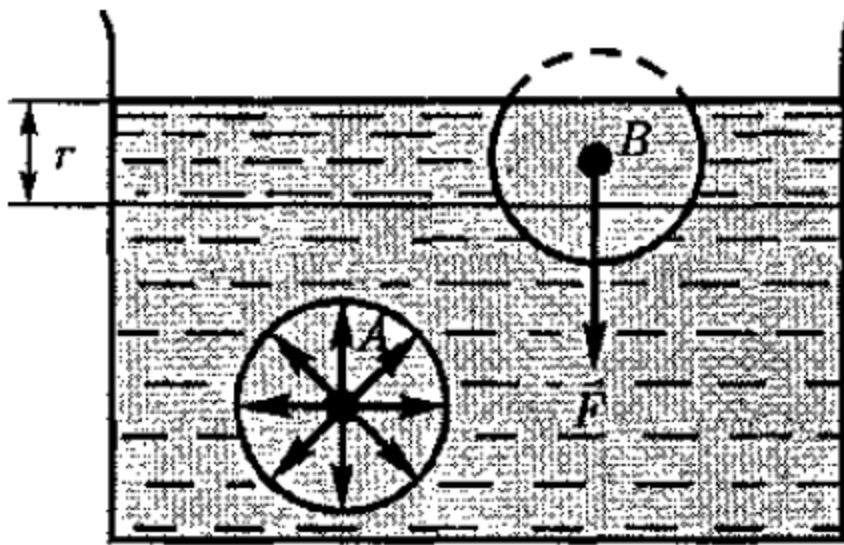
სითხეების რენტგენოსტრუქტურულმა ანალიზმა უჩვენა, რომ სითხის ნაწილაკების განლაგების ხასიათი შუალედურია გაზსა და მყარ სხეულს შორის. გაზებში მოლეკულები მოძრაობენ ქაოტურად, ამიტომ არ არის არავითარი კანონზომიერება მათ ურთიერთ განლაგებაში. მყარ სხეულებში ნაწილაკებს შორის დაიკვირვება ე.წ. შორი წესრიგი, ანუ მათი მოწესრიგებული განლაგება, რომელიც მეორდება დიდ მანძილებზე. სითხეებში ადგილი აქვს ნაწილაკებს შორის ე.წ. ახლო წესრიგს, ანუ მათი მოწესრიგებული განლაგება, მეორდება მანძილებზე, რომელიც სადარია ატომებს შორის მანძილთან.

სითხეების თეორია დღევანდელ დღემდე სრულად არ არის განვითარებული. სხვადასხვა თეორიებით სითხეში სითხური მოძრაობა აიხსნება იმით, რომ თითოეული მოლეკულა გარკვეული დროის განმავლობაში ირხევა წონასწორობის გარკვეული მდგომარეობის მახლობლობაში, რომლის შემდეგ ნახტომისებურად გადადის ახალ მდგომარეობაში, რომელიც საწყისი მდებარეობიდან დაშორებულია ატომთაშორის მანძილზე. ამრიგად სითხის მოლეკულები საკმარისად ნელა გადაადგილდებიან სითხის მთელ მასაში და მათში დიფუზია ხდება გაცილებით ნელა ვიდრე გაზებში. სითხის ტემპერატურის ზრდით, მკვეთრად იზრდება რხევითი მოძრაობის სიხშირე, იზრდება მოლეკულების მკრადობა, რომელიც თავის მხრივ წარმოადგენს სითხის სიბლანტის შემცირების მიზეზს.

სითხის თითოეულ მოლეკულაზე გარსმყოფი მოლეკულების მხრიდან მოქმედებენ მიზიდულობის ძალები, რომლებიც მანძილის მიხედვით სწრაფად მცირდებიან;

შესაბამისად, დაწყებული რომელიღაც მინიმალური მანძილიდან, მოლეკულებს შორის მიზიდულობის ძალები შეიძლება უგულვებელვყოთ. ეს მანძილი ($\approx 10^{-9}$ მ) იწოდება **მოლეკულური ქმედების r რადიუსად**, ხოლო r რადიუსის სფერო-**მოლეკულური ქმედების სფეროდ**.

სითხის შიგნით გამოვყოთ რომელიღაც A-მოლეკულა (სურ.1), და მის ირგვლივ გავატაროთ r -რადიუსის სფერო. განმარტების თანახმად საკმარისია გავითვალისწინოთ მოცემულ მოლეკულაზე მოქმედება მხოლოდ იმ მოლეკულების, რომლებიც იმყოფებიან მოლეკულური მოქმედების სფეროს შიგნით. ძალები, რომლითაც ეს მოლეკულები მოქმედებენ A მოლეკულაზე, მიმართული არიან სხვადასხვა მიმართულებით და საშუალოდ



სურ. 1

კომპენსირებული არიან, ამიტომ სითხის შიგნით, მოლეკულაზე, სხვა მოლეკულების მხრიდან მოქმედი ჯამური ძალა ტოლია ნულის. სხვანაირადაა საქმე, თუ მოლეკულა, ვთქვათ B, მოთავსებულია ზედაპირიდან r -ზე ნაკლებ მანძილზე. მოცემულ შემთხვევაში, მოლეკულური ქმედების სფერო, მხოლოდ ნაწილობრივია განლაგებული სითხის შიგნით. ამ შემთხვევაში მოლეკულური ქმედების სფერო, მხოლოდ ნაწილობრივია მოთავსებული სითხის შიგნით. რადგან მოლეკულების კონცენტრაცია სითხის ზემოთ მოთავსებულ გაზში ნაკლებია, სითხეში მის კონცენტრაციასთან შედარებით, ამიტომ ზედაპირულ ფენაში, თითოეულ მოლეკულაზე მოქმედი ძალების ტოლქმედი არ არის ნულის ტოლი და მიმართულია სითხის შიგნით. ამრიგად, ზედაპირული ფენის ყველა მოლეკულების ჯამური ძალა ახდენს სითხეზე წნევას, რომელსაც უწოდებენ **მოლეკულურ (ან შინაგან) წნევას**. მოლეკულური წნევა არ მოქმედებს სითხეში მოთავსებულ სხეულზე, რადგან იგი გაპირობებულია ძალებით, რომლებიც მოქმედებენ მხოლოდ სითხის მოლეკულებს შორის.

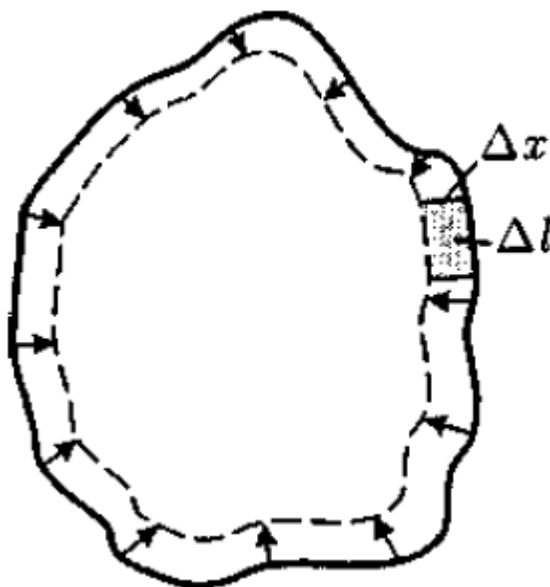
სითხის ნაწილაკთა ჯამური ენერგია შედგება მათი ქაოტური (სითბური) მოძრაობისა და მოლეკულათა შორის ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგიების ჯამისგან. მოლეკულის გადასადგილებლად სითხის სიღრმიდან ზედაპირულ ფენაში უნდა შესრულდეს მუშაობა. ეს მუშაობა სრულდება მოლეკულათა კინეტიკური ენერგიის ხარჯზე და მიდის მათი პოტენციალური ენერგიის გაზრდაზე. ამიტომ სითხის ზედაპირული ფენის მოლეკულებს გააჩნიათ უფრო მეტი პოტენციალური ენერგია, ვიდრე მოლეკულებს სითხის შიგნით. ამ დამატებით ენერგიას, რომელსაც ფლობენ მოლეკულები სითხის ზედაპირულ ფენაში ეწოდება **ზედაპირული ენერგია**, და პროპორციულია ფენის ფართის ΔS :

$$\Delta E = \sigma \Delta S, \quad (1)$$

სადაც σ ზედაპირული დაჭიმულობაა.

რადგანაც წონასწორული მდგომარეობა ხასიათდება პოტენციალური ენერგიის მინიმუმით, ამიტომ სითხე გარე ძალების არ არსებობისას, მიიღებს ისეთ ფორმას, რომ მოცემულ მოცულობისას მას გააჩნდეს მინიმალური ზედაპირი, ე.ი. სფეროს ფორმას. ჰაერში შეწონილი უმცირესი წვეთების დაკვირვებისას, შეგვიძლია დავინახოთ, რომ მათ მართლაც ბურთულების ფორმა აქვთ, რომელიც რამდენადმე შეცვლილია დედამიწის მიზიდულობის ძალების გამო. უწონობის მდგომარეობაში, ნებისმიერი სითხის წვეთს გააჩნია სფერული ფორმა, რომელიც დამტკიცებულია ექსპერიმენტალურად კოსმოსურ ხომალდებზე.

ამრიგად, სითხის მდგრადი წონასწორობის პირობას წარმოადგენს ზედაპირული ენერგიის მინიმუმი. ეს ნიშნავს, რომ სითხეს მოცემული მოცულობისას უნდა გააჩნდეს მინიმალური ზედაპირის ფართი, ე.ი. სითხე ცდილობს შეამციროს თავისუფალი ზედაპირის ფართი. ამ შემთხვევაში სითხის ზედაპირული ფენა შეიძლება გაიგივებულ იქნას გაჭიმულ დრეკად აპკთან, რომელშიც მოქმედებენ დაჭიმულობის ძალები.



სურ. 2

განვიხილოთ სითხის ზედაპირი, რომელიც შემოფარგლულია ჩაკეტილი კონტურით (სურ. 2). ზედაპირული ძალების მოქმედების გამო (მიმართულების ზედაპირის მხებად და კონტურის უბნის პერპენდიკულარულად, რომელზეც იგი მოქმედებს) სითხის ზედაპირი მცირდება და განსახილველი კონტური გადაადგილდება ახალ მდგომარეობაში, რომელიც სურათზე გამოსახულია ისრებით. ძალები, რომლებიც მოქმედებენ გამოყოფილი უბნის მხრიდან მეზობელ უბნებზე ასრულებენ მუშაობას

$$\Delta A = f \Delta l \Delta x,$$

სადაც f -ზედაპირული დაჭიმულობის ძალაა, რომელიც მოქმედებს სითხის ზედაპირის კონტურის სიგრძის ერთეულზე. სურათიდან ჩანს, რომ $\Delta l \Delta x = \Delta S$, ანუ

$$\Delta A = f \Delta S. \quad (2)$$

ეს მუშაობა სრულდება ზედაპირული ენერგიის შემცირების ხარჯზე, ე.ი.

$$\Delta A = \Delta E \quad (3)$$

(1)-ს და (3)-ს შედარებით გამოდის, რომ

$$\sigma = f, \quad (4)$$

ე.ი. ზედაპირული დაჭიმულობა ტოლია, ზედაპირის შემოფარგლავი კონტურის ერთეულოვან სიგრძეზე მოსული, ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის. ზედაპირული დაჭიმულობის ერთეულია ნიუტონი/მეტრი, ან ჯოული/მ². სითხეების უმეტესობის, ზედაპირული დაჭიმულობა 300°K-ზე $\approx 10^{-1}$ ნ/მ-ის რიგისაა. ზედაპირული დაჭიმულობა ტემპერატურის ზრდით მცირდება, რადგანაც იზრდება საშუალო მანძილი სითხის მოლეკულებს შორის.

ზედაპირული დაჭიმულობა მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული სითხეში არსებული მინარევებისგან. ნივთიერებები, რომლებიც ამცირებენ ზედაპირულ დაჭიმულობას იწოდებიან ზედაპირულად აქტიურებად. ყველაზე ცნობილ ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებას წყლის მიმართ წარმოადგენს საპონი. იგი მნიშვნელოვნად ამცირებს სითხის ზედაპირულ დაჭიმულობას (დაახლოებით $7,5 \cdot 10^{-2}$ -დან $4,5 \cdot 10^{-2}$ ნ/მ-ამდე). წყლისთვის ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებებს ასევე წარმოადგენენ სხვადასხვა სპირტები, ეთერი, ნავთი და ა.შ.

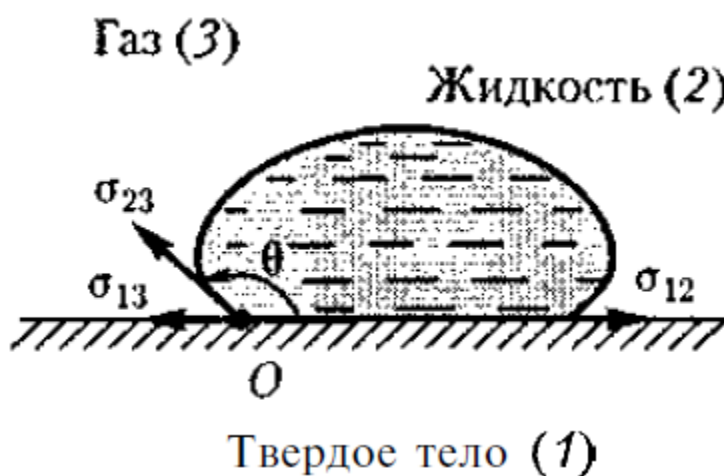
არსებობენ ნივთიერებები (შაქარი, მარილი), რომლებიც ზრდიან ზედაპირულ დაჭიმულობას იმის გამო, რომ მათი მოლეკულები მოქმედებენ უფრო ძლიერად სითხის მოლეკულებთან, ვიდრე სითხის მოლეკულები ერთმანეთთან. მაგ. თუ საპნის ხსნარს შევურევთ მარილს, მაშინ სითხის ზედაპირულ ფენაში „გამოიგდება“ უფრო მეტი მოლეკულები, ვიდრე მტკნარ წყალში. საპნის მწარმოებელ ტექნიკაში საპონი ასეთნაირად „გამომარილდება“ ხსნარიდან.

დასველება

ყოველდღიური ცხოვრებიდან ცნობილია, რომ წყლის წვეთი განერთხმევა მინის ზედაპირზე და იღებს სურ. 3-ზე გამოსახულ ფორმას, იმ დროს, როდესაც ვერცხლის წყალი იგივე ზედაპირზე გარდაიქმნება რამდენადმე შეჭყლეტილ წვეთად (სურ. 4).



სურ. 3



სურ. 4

პირველ შემთხვევაში ამბობენ, რომ სითხე ასველებს მყარ ზედაპირს, მეორეში არა.

დასველება დამოკიდებულია შემხებ გარემოთა ზედაპირული ფენების მოლეკულებს შორის მოქმედი ძალების ხასიათზე. დამასველებელი სითხისთვის სითხის მოლეკულებსა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის მიზიდულების ძალები მეტია, ვიდრე თვით სითხის ედაპირი. მოლეკულებს შორის, და ამიტომ სითხე ცდილობს გაზარდოს მყარ სხეულთან შეხების ფართი. არადამსველებელი სითხისთვის პირიქით, სითხის მოლეკულებსა და მყარ

სხეულს შორის მიზიდულობის ძალები ნაკლებია, ვიდრე სითხის მოლეკულებს შორის და ამიტომ, სითხე ცდილობს შეამციროს მყარ სხეულთან შეხების ზედაპირის ფართი.

სამი გარემოს შეხების ხაზთან (წერტილი O არის მისი გადაკვეთა ნახაზის სიბრტყესთან) მოდებულია ზედაპირული დაჭიმულობის სამი ძალა, რომელიც მიმართულია შესაბამისი ორი გარემოს შეხების ზედაპირების შიგნით, მხეზად. ეს ძალები მისადაგებული შეხების წირის სიგრძის ერთეულთან, ტოლი არიან შესაბამისი დაჭიმულობების σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} . კუთხე θ -ს სითხისა და მყარი სხეულის ზედაპირების მხეზებს შორის ეწოდება **სასაზღვრო კუთხე**. წვეთის წონასწორობის პირობად ითვლება ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების მყარი სხეულის ზედაპირის მხეზის მიმართულებაზე პროექციების ჯამის ნულთან ტოლობა, ე.ი.

$$-\sigma_{13} + \sigma_{12} + \sigma_{23}\cos\theta = 0,$$

საიდანაც

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{13}-\sigma_{12}}{\sigma_{23}} \quad (5)$$

ამ დამოკიდებულებიდან გამოდის, რომ სასაზღვრო კუთხე შეიძლება იყოს მახვილი ან ბლაგვი დამოკიდებით σ_{13} და σ_{12} -ის მნიშვნელობებისგან. თუ $\sigma_{13} > \sigma_{12}$, მაშინ $\cos\theta > 0$, და θ კუთხე მახვილია, ე.ი. სითხე ასველებს მყარ ზედაპირს. თუ $\sigma_{13} < \sigma_{12}$, მაშინ $\cos\theta < 0$, და θ კუთხე ბლაგვია, ე.ი. სითხე არ ასველებს მყარ ზედაპირს. სასაზღვრო კუთხე აკმაყოფილებს (5) პირობას, თუ

$$\frac{\sigma_{13}-\sigma_{12}}{\sigma_{23}} \leq 1 \quad (6)$$

თუ ეს პირობა არ სრულდება, მაშინ სითხის წვეთი, θ -კუთხის არანაირი მნიშვნელობისთვის არ შეიძლება იმყოფებოდეს წონასწორობაში. თუ $\sigma_{13} > \sigma_{12} + \sigma_{23}$, მაშინ სითხე განერთხმევა მყარი სხეულის ზედაპირზე, ფარავს რა მას თხელი აპკით (მაგ. ნავთი მინის ზედაპირზე) - ანუ ადგილი აქვს *სრულ დასველებას* ($\theta=0$). თუ $\sigma_{12} > \sigma_{13} + \sigma_{23}$, სითხე იკუმშება სფერულ წვეთად, გააჩნია რა მხოლოდ ერთი შეხების წერტილი ზღვარში, (მაგ. წყლის წვეთი პარაფინის ზედაპირზე) - ადგილი აქვს *სრულ არდასველებას* ($\theta=\pi$).

დასველება და არ დასველება ფარდობითი ცნებებია, ანუ სითხე რომელიც ასველებს ერთ მყარ ზედაპირს, შეიძლება არ ასველებდეს მეორეს. მაგალითად წყალი ასველებს მინას, მაგრამ არ ასველებს პარაფინს; ვერცხლისწყალი არ ასველებს მინას, მაგრამ ასველებს მეტალების სუფთა ზედაპირებს.

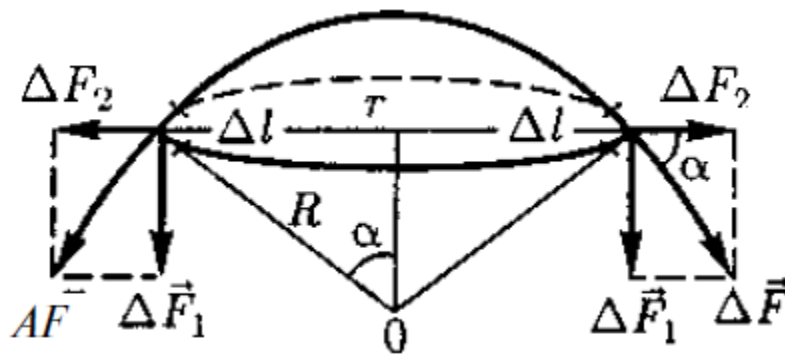
დასველება არ დასველების პრობლემას დიდი მნიშვნელობა აქვს ტექნიკაში. მაგალითად მადნის გამდიდრების ფლოტაციურ მეთოდში (მადნის გამოყოფა ცარიელი ქანებიდან), მას, წვრილად დამსხვრეულს ანჯდრევენ სითხეში, რომელიც ასველებს ცარიელ ქანებს და არ სველებს მადანს. ამ მინარევს უბერავენ ჰაერს, ხოლო შემდეგ მას წრიტავენ. ამ დროს სითხით დასველებული ქანების ნაწილაკები ეშვებიან ფსკერზე, ხოლო მინერალების ნაწილაკები

ეწებებიან ჰაერის „ბუმტულებს“ და ამოტივტივდებიან სითხის ზედაპირზე. მეტალების ედაპირი მექანიკური დამუშავებისას მათ ასველებენ სპეციალური სითხეებით, რომლებიც აადვილებენ და აჩქარებენ მათ დამუშავებას.

წნევა სითხის გამრუდებულ ზედაპირს ქვემოთ

თუ სითხის ზედაპირი არ არის ბრტყელი, გამრუდებულია, მაშინ იგი სითხეზე ახდენს დამატებით (ჰარბ) წნევას. ეს წნევა, რომელიც გაპირობებულია ზედაპირული დაჭიმულობის ძალებით, ამოწნეკილი ზედაპირისთვის დადებითია, ხოლო ჩაწნეკილისთვის უარყოფითი.

დამატებითი წნევის გამოსათვლელად ჩავთვალოთ, რომ სითხის თავისუფალ ზედაპირს გააჩნია სფეროს ფორმა რადიუსით R , რომლისგანაც აზრობრივად ჩამოჭრილია სფერული სეგმენტი, რომელიც ემყარება ემყარება წრეწირს, რადიუსით $r = R \sin \alpha$ (სურ. 5). ამ კონტურის



სურ. 5

თითოეულ უსასრულოდ მცირე ელემენტზე სიგრძით Δl , მოქმედებს ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა $\Delta F = \sigma \Delta l$, მიმართული სფეროს ზედაპირის მხეზად.

თუ ΔF -ს დავშლით ორ მდგენელად (ΔF_1 და ΔF_2 -ად), ვნახავთ, რომ ΔF_2 ძალების გეომეტრიული ჯამი 0-ს ტოლია, რა დგანაც ეს ძალები კონტურის ურთიერთსაწინააღმდეგო მხარეს, მიმართული არიან უკუ მიმართულებით და აწონასწორებენ ერთმანეთს. ამიტომ ამოჭრილ სეგმენტზე მოქმედი ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების ტოლქმედი, მიმართულია კვეთის სიბრტყის პერპენდიკულარულად სითხის შიგნით და ტოლია ΔF_1 მდგენელების ალგებრული ჯამის:

$$F = \sum \Delta F_1 = \sum \Delta F \sin \alpha = \sum \sigma \Delta l \frac{r}{R} = \frac{\sigma r}{R} \sum \Delta l = \frac{\sigma r}{R} 2\pi r.$$

თუ ამ გამოსახულებას გავყოფთ სეგმენტის საყრდენ ფართზე πr^2 მივიღებთ დამატებით წნევას სითხეზე, რომელსაც ქმნიან ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები და გაპირობებულია ზედაპირის სიმრუდით:

$$F = \frac{2\sigma}{R}. \quad (7)$$

თუ სითხის ზედაპირი ჩაზნექილია, შეიძლება დამტკიცება, რომ ზედაპირული დაჭიმულობის ჯამური ძალა მიმართულია სითხიდან გარეთ და ტოლია

$$\Delta p = \quad . \quad (8)$$

შესაბამისად წნევა სითხის შიგნით, ჩაზნექილი ზედაპირის ქვეშ, ნაკლებია ვიდრე გაზში Δp -სიდიდით. ფორმულები (7) და (8) წარმოადგენენ ლაპლასის ფორმულების კერძო შემთხვევას, რომელიც განსაზღვრავს ჭარბ წნევას სითხის ნებისმიერი ზედაპირისთვის, ორმაგი სიმრუდით:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (9)$$

სადაც R_1 და R_2 , ორი ნებისმიერი, ურთიერთ პერპენდიკულარული, სითხის ნორმალური ზედაპირების სიმრუდის რადიუსებია მოცემულ წერტილში. სიმრუდის რადიუსი დადებითია, თუ შესაბამისი კვეთის სიმრუდის ცენტრი იმყოფება სითხის შიგნით, და უარყოფითია თუ სიმრუდის ცენტრი სითხის გარეთაა.

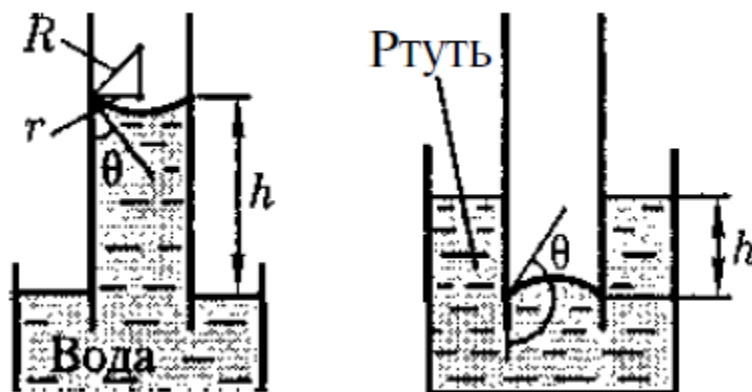
სფერული გამრუდებული ზედაპირისთვის ($R_1=R_2=R$), გამოსახულება (9) გადადის (7)-ში, ცილინდრულისთვის ($R_1=R$, და $R_2 \rightarrow \infty$) ჭარბი წნევა

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{\infty} \right) = \sigma/R$$

ბრტყელი სიბრტყის შემთხვევაში ($R_1=R_2 \rightarrow \infty$) ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები არ ქმნიან ჭარბ წნევას.

კაპილარული მოვლენები

თუ ვიწრო მილის (კაპილარის) ერთ-ერთ ბოლოს მოვათავსებთ სითხით შევსებულ ფართე ჭურჭელში, მაშინ სითხის მიერ კაპილარის კედლების დასველების ან არ დასველების გამო, სითხის ზედაპირის სიმრუდე კაპილარში ხდება მნიშვნელოვანი. თუ სითხე ასველებს მილის



სურ. 6

მასალას, მაშინ მის შიგნით სითხის ზედაპირს - **მენისკს** - გააჩნია შეზნექილი ფორმა, თუ არ ასველებს ამოზნექილი (სურ. 6).

სითხის ჩაზნექილი ზედაპირის ქვეშ წარმოიქმნება უარყოფითი ჭარბი წნევა, რომელიც განისაზღვრება (8) ფორმულით. ამ წნევის არსებობას მივყავართ იქამდე, რომ სითხე კაპილარში აიწევს ზევით, რადგანაც ჭურჭლის ბრტყელი ზედაპირის ქვეშ ჭარბი წნევა არ არსებობს. თუ კი სითხე არ ასველებს კაპილარის კედლებს მაშინ დადებით ჭარბ წნევას მივყავართ სითხის დაწევასთან კაპილარში. კაპილარებში სითხის დონის სიმაღლის ცვლილების მოვლენას **კაპილარობა**. სითხე კაპილარებში იწევს ან ეშვება ისეთ h სიმაღლეზე რომლის დროსაც სითხის სვეტის წნევა (*ჰიდროსტატიკური წნევა*) ρgh წონასწორდება ჭარბი წნევით A_p , ე.ი.

$$\frac{2\sigma}{R} = \rho gh,$$

სადაც ρ - სითხის სიმკვრივეა. თუ r კაპილარის რადიუსია, ხოლო θ უკიდურესი კუთხეა, მაშინ სურათიდან (6) გამოდის, რომ $\frac{2\sigma \cos \theta}{r} = \rho gh$, საიდანაც

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho gr}. \quad (10)$$

იმის შესაბამისად, რომ დამასველებელი სითხე კაპილარში აიწევს, ხოლო არადამასველებელი დაიწევს, (10) ფორმულიდან θ -სთვის $\cos \theta > 0$ მივიღებთ h -ს დადებით მნიშვნელობებს, ხოლო θ -სთვის $\cos \theta < 0$ უარყოფითს. (10) ფორმულიდან ასევე ჩანს, რომ სითხის აწევის (ან დაწევის) სიმაღლე კაპილარში, უკუპროპორციულია მისი რადიუსის. თხელ კაპილარებში სითხე აიწევს საკმარისად მაღლა. სრული დასველებისას $\theta=0$, ($\rho=1000$ კგ/მ³, $\sigma=0,0735$ ნ/მ), წყალი კაპილარში დიამეტრით 10 მკმ, აიწევს $h \approx 3$ მ სიმაღლეზე.

კაპილარული მოვლენები დიდ როლს თამაშობენ ბუნებასა და ტექნიკაში. მაგალითად ტენის გაცვლა ნიადაგსა და მცენარეებს შორის წყლის აწევით თხელ კაპილარებში. კაპილარობაზეა დამყარებული ფიტილების მოქმედება, ტენის შეწოვა ბეტონის მიერ და ა.შ.

მყარი სხეულები. მონო- და პოლიკრისტალები

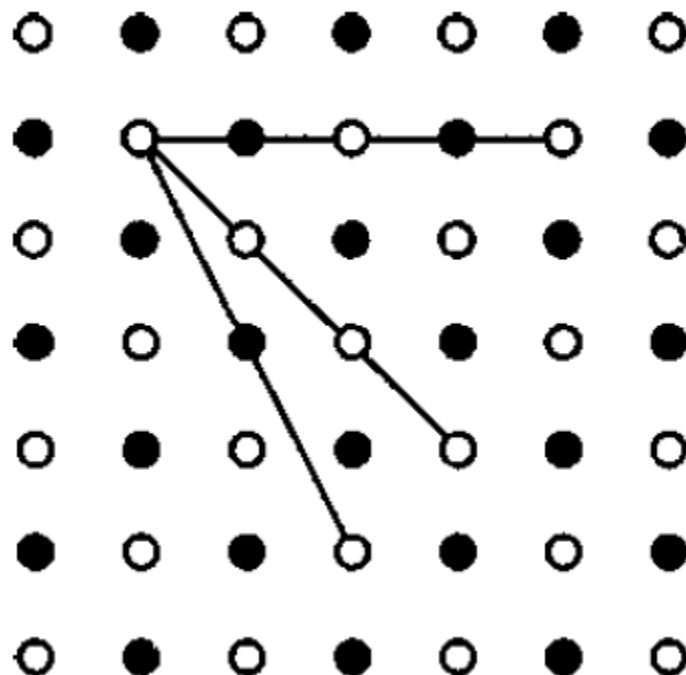
მყარი სხეულები (კრისტალები) ხასიათდებიან მოლეკულათშორის ურთიერთქმედების მნიშვნელოვანი ძალების არსებობით და ამის გამო ისინი ინახავენ უცვლელად არამარტო მოცულობას, არამედ ფორმასაც. კრისტალებს გააჩნიათ სწორი გეომეტრიული ფორმა, რომელებიც წარმოადგენენ კრისტალის შემადგენელი ნაწილაკების (ატომები, მოლეკულები, იონები) მოწესრიგებული განლაგების შედეგს.

სტრუქტურას რომელთათვისაც მახასიათებელია ნაწილაკების რეგულარული განლაგება, პერიოდული განმეორადობით სამ განზომილებაში, ეწოდება **კრისტალური მესერი**.

კრისტალური სხეულები იყოფიან ორ ჯგუფად: მონოკრისტალებად და პოლიკრისტალებად. **მონოკრისტალები** არიან მყარი სხეულები რომელთა ნაწილაკებიც ქმნიან ერთიან კრისტალურ მესერს. მონოკრისტალების კრისტალური სტრუქტურა დაიკვირვება მათი გარეგანი ფორმით. თუმცა ერთიდაიგივე ტიპის მონოკრისტალების გარეგანი ფორმა შეიძლება იყოს განსხვავებული, მაგრამ მათთვის კუთხეები შესაბამის გვერდებს შორის რჩება მუდმივი. ეს კანონი, კუთხეების მუდმივობის შესახებ ფორმულირებულ იქნა ლომონოსოვის მიერ. მან გააკეთა მნიშვნელოვანი დასკვნა იმის შესახებ, რომ კრისტალების სწორი ფორმა დაკავშირებულია კრისტალის შემადგენელი ნაწილაკების კანონზომიერ განლაგებასთან.

მინერალთა უმრავლესობა წარმოადგენს მონოკრისტალებს. მაგრამ ზომით დიდი ბუნებრივი მონოკრისტალები გვხვდება ძალზე იშვიათად (მაგალიად ყინული, ისლანდიური შპატი). დღესდღეობით მრავალი მონოკრისტალები გამოყავთ ხელოვნურად. დიდი მონოკრისტალების გამოყვანის პირობები (სუფთა ხსნარები, ნელი გაცივება და ა.შ.) ხშირად არ არის დაცული, ამიტომ მყარი სხეულების უმრავლესობას გააჩნიათ წვრილ კრისტალური სტრუქტურა, ანუ შედგება უამრავი, მოუწყვრისებლად ორიენტირებული მცირე კრისტალური მარცვლებისაგან. ასეთ მყარ სხეულებს უწოდებენ **პოლიკრისტალებს** (მრავალი სამთო მადანი, მეტალები და ნაერთები).

მონოკრისტალების მახასიათებელ თავისებურებას წარმოადგენს მათი **ანიზოტროპიულობა**, ანუ მათი ფიზიკური თვისებების (დრეკადი, მექანიკური, სითბური, ელექტრული, მაგნიტური, ოპტიკური) დამოკიდებულება მიმართულებისგან. მონოკრისტალების ანიზოტროპია აიხსნება იმით, რომ კრისტალურ მესერში



სურ. 7

განსხვავებულია ნაწილაკთა რიცხვი, რომელიც მოდის ერთი და იგივე სიგრძის, მაგრამ განსხვავებული მიმართულებების მონაკვეთებზე, ანუ კრისტალურ მესერში, სხვადასხვა მიმართულებით ნაწილაკების განლაგების სიმკვრივე არაერთნაირია, რასაც მივყავართ კრისტალების თვისებების განსხვავებასთან ამ მიმართულებებით. (სურ. 7). პოლიკრისტალებში ანიზოტროპია დაიკვირვება მხოლოდ ცალკეული მცირე კრისტალებისთვის, მაგრამ მათ არაერთნაირ ორიენტაციას მივყავართ იქამდე, რომ პოლიკრისტალების თვისებები ყველა მიმართულებებით საშუალოდ ერთნაირია.

კრისტალების კლასიფიკაციისთვის არსებობს ორი ნიშანი: 1) კრისტალოგრაფული და 2) ფიზიკური (კრისტალური მესერის კვანძებში განლაგებული ნაწილაკების ბუნება, და მათ

1.კრისტალები კრისტალოგრაფული ნიშანი. მოცემულ შემთხვევაში ნაწილაკების განლაგებაში მნიშვნელოვანია, მხოლოდ სივრცული პერიოდულობა, ამიტომ შეგვიძლია ყურადღება არ მივაქციოთ მათ შინაგან სტრუქტურას და ნაწილაკები განვიხილოთ, როგორც გეომეტრიული წერტილები.

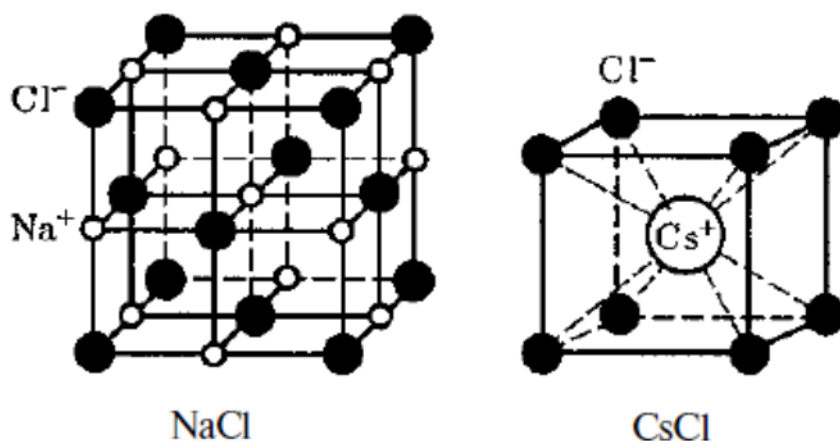
კრისტალური მესერი შეიძლება ფლობდეს სხვადასხვა სახის სიმეტრიებს. *კრისტალური მესერის სიმეტრია*- ეს მისი თვისებაა, იყოს თავსებადი თავის თავთან ზოგიერთ სივრცული გადაადგილებებისას, მაგ. პარალელური გადატანებისას, ბრუნვისას, არეკვლისას ან მათი კომბინაციებისას და ა.შ. სამგანზომილებიან სივრცეში გადატანით სიმეტრიასთან აკავშირებენ სივრცული მესერის სამგანზომილებიანი პერიოდული სტრუქტურის ცნებასთან (ბრავეს მესერი). ნებისმიერი სივრცული მესერი შეიძლება შედგენილ იქნას ერთდაიგივე მიმართულებით. ელემენტარული უჯრედების აღსაწერად სარგებლობენ კრისტალოგრაფიული ღერძებით, რომლებსაც ატარებენ ელემენტარული უჯრედების გვერდების პარალელურად, ხოლო სათავედ ირჩევენ ელემენტარული უჯრედის წინა წახნაგის მარცხენა კუთხეს. ელემენტარული კრისტალური უჯრედი წარმოადგენს a, b , და c წახნაგებზე აგებულ პარალელეპიპედს, α , β და γ კუთხეებით წახნაგებს შორის. ამ სიდიდეებს უწოდებენ ელემენტარული უჯრედის პარამეტრებს და ისინი ცალსახად განსაზღვრავენ მას.

2. კრისტალების ფიზიკური ნიშნები.

კრისტალური მესერის კვანძებში განლაგებული ნაწილაკების გვარობისა და მათ შორის ურთიერთქმედების ძალების ხასიათისგან დამოკიდებულებით კრისტალები იყოფიან ოთხ ჯგუფად: იონურები, ატომურები, მეტალურები და მოლეკულარულები.

იონური კრისტალები. კრისტალური მესერის კვანძებში მორიგეობით განლაგებულია მოპირდაპირე ნიშნის იონები. ასეთი ტიპური იონური კრისტალებია (NaCl , CsCl , KBr) და ასევე სხვადასხვა ელემენტების ოქსიდები (MgO , CaO , და ა.შ.).

იონური კრისტალების, ორი ყველაზე მახასიათებელი მესერის სტრუქტურა ნაჩვენებია სურ. 8-ზე. იონებს შორის მოქმედი ძალები ძირითადად ელექტროსტატიკურია (კულონური).



სურ. 8

მესერი წარმოადგენს ერთმანეთში ჩალაგებულ, ორ ერთნაირ წახნაგ ცენტრირებულ კუბური ფორმის მესერს, რომლის ერთ კვანძში იმყოფება Na^+ -ს იონები, ხოლო მეორისაში Cl^- -ს იონები. მეორე კი წარმოადგენს კუბურ მოცულობით ცენტრირებულ მესერს, რომლის ცენტრშიც იმყოფება იონი.

კავშირი, რომელიც გაპირობებულია სხვადასხვა მუხტის მქონე იონებს შორის კულონური მიზიდულობის ძალებით იწოდება **იონურად** (ან **ჰეტეროპოლარულად**). იონურ მესერში შეუძლებელია ცალკეული მოლეკულების გამოყოფა: კრისტალი თავისთავად წარმოადგენს ერთ, ასე ვთქვათ გიგანტურ მოლეკულას.

ატომური კრისტალები. კრისტალური მესერის კვანძებში განლაგებული არიან ნეიტრალური ატომები, რომლებსაც ამ კვანძებში აკავებს ქვანტურ-მექანიკური წარმოშობის **გომეოპოლარული**, ანუ **კოვალენტური** ბმები (მეზობელ ატომებში გაერთიანებულია ატომურ ბირთვთან სუსტად ბმული ვალენტური ელექტრონები). ატომურ კრისტალებს წარმოადგენს ალმასი და გრაფიტი (ნახშირბადის ორი განსხვავებული მდგომარეობა), ასევე ზოგიერთი არაორგანული ნაერთები, და ასევე ტიპიური ნახევარგამტარები გერმანიუმი Ge და კრემნიუმი Si. ალმასის მესერის სტრუქტურა მოყვანილია სურ. 9-ზე, სადაც ნახშირბადის თითოეული ატომს გარს აკრავს ოთხი ასეთივე ატომი, რომლებიც განლაგებული არიან ტეტრაედრის წვეროებში მისგან ერთდაიგივე მანძილზე. ვალენტური კავშირები ხორციელდება ორივე ატომის მომცველ ორბიტებზე მოძრავი ელექტრონული წყვილებით, და არიან მიმართული ხასიათის: კოვალენტური ძალები მიმართულია ცენტრალური ატომიდან ტეტრაედრის წვეროებისკენ. გრაფიტისგან განსხვავებით, ალმასის მესერი არ შეიცავს ბრტყელ ფენებს, რაც არ იძლევა კრისტალის ცალკეული უბნების წანაცვლების საშუალებას. სწორედ ამიტომაც, რომ ალმასი წარმოადგენს მტკიცე შენაერთს.

მეტალური კრისტალები. კრისტალური მესერის კვანძებში განლაგებულია მეტალის დადებითი იონები. კრისტალური მესერის შექმნისას ატომებთან შედარებით სუსტად დაკავშირებული ვალენტური ელექტრონები გამოეყოფა ატომებს და კოლექტივიზირდება:



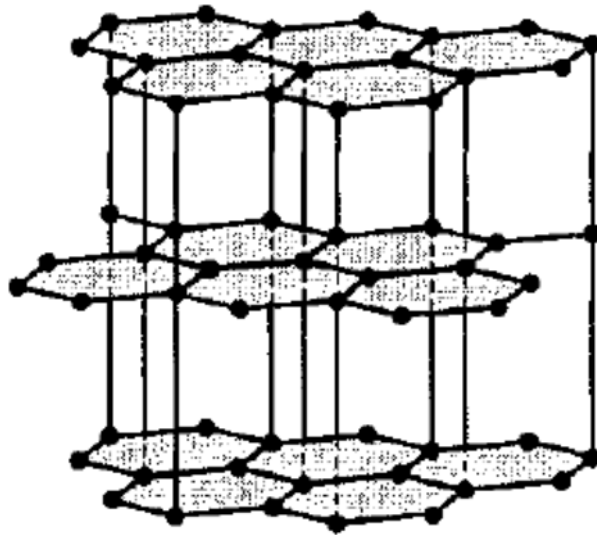
სურ. 9

ისინი უკვე აღარ მიეკუთვნებიან ერთ ატომს, როგორც იონური კავშირისას ან მეზობელ წყვილ ატომებს, როგორც ჰომეოპოლური კავშირისას, არამედ მიეკუთვნებიან მთელ კრისტალს. ამრიგად მეტალებში დადებით იონებს შორის მსგავსად გაზის მოლეკულებისა, ქაოტურად მოძრაობენ თავისუფალი ელექტრონები, რომელთა არსებობაც უზრუნველყოფს მეტალების კარგ ელექტროგამტარობას. რადგანაც მეტალურ კავშირებს არა აქვთ მიმართული მოქმედება და მესერის დადებითი იონები ერთნაირი თვისებებისაა, ამიტომ მეტალებს უნდა გააჩნდეთ მაღალი რანგის სიმეტრია. მართლაც მეტალების უმრავლესობას გააჩნიათ კუბური მოცულობით ცენტრირებული და კუბური წახნაგცენტრირებული მესერები. ყველაზე ხშირად მეტალები გვხვდება პოლიკრისტალების სახით.

მოლეკულური კრისტალები. კრისტალური მესერის კვანძებში განლაგებული არიან ნივთიერების ნეიტრალური მოლეკულები, რომელთა შორის ურთიერთქმედების ძალები გაპირობებული არიან ელექტრონების უმნიშვნელო ურთიერთ წანაცვლებით ატომის ელექტრონულ გარსებში. ამ ძალებს უწოდებენ **ვან-დერ-ვაალსის ძალებს**, რადგანაც ისინი ისეთივე ბუნების არიან, როგორც მოლეკულებს შორის მიზიდულობის ძალები, რომელთაც მიყვავართ გაზების გადახრასთან იდეალურობისგან.

მოლეკულურ კრისტალებს წარმოადგენენ, მაგ. ორგანული ნაერთების უმრავლესობა (პარაფინი, სპირტი, რეზინი და ა.შ.), ინერტული გაზები (Ne, Ar, Kr, Xe) და გაზები CO₂, O₂, N₂ მყარ მდგომარეობაში ყინული, ასევე ბრომისა და იოდის კრისტალები. ვან-დერ-ვაალსის ძალების სიმცირის გამო, მოლეკულური კრისტალები ადვილად დეფორმირდებიან.

ზოგიერთ მყარ სხეულებში შეიძლება ერთდროულად განხორციელდეს კავშირის რამდენიმე სახეობა. ამის მაგალითს წარმოადგენს გრაფიტი (გექსაგონალური მესერი). გრაფიტის მესერი (სურ. 10), რიგი პარალელური სიბრტყეებისაგან, რომლებშიც ნახშირბადის ატომები განლაგებული არიან სწორი ექვსკუთხედები წვეროებში.



სურ. 10

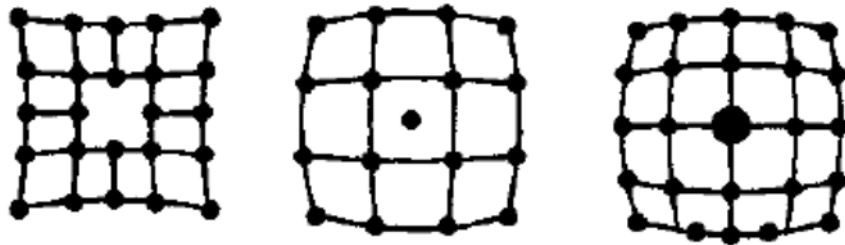
მანძილი წვეროებს შორის ორჯერ უფრო მეტად აღემატებაექვსკუთხედის ატომებს შორის მანძილს. ბრტყელი ფენები ერთმანეთთან დაკავშირებული არიან ვან-დერ-ვაალსის ძალებით. ფენის ფარგლებში თითოეული ატომის სამი ელექტრონი ქმნის კოვალენტურ ბმას ნახშირბადის მეზობელ ატომებთან, ხოლო მეოთხე ელექტრონი რჩება რა „თავისუფალი“ კოლექტივიზირდება, მაგრამ არა მთელ მესერში (როგორც მეტალების შემთხვევაში), არამედ ერთი ფენის ფარგლებში. ამრიგად ამ შემთხვევაში ხორციელდება კავშირის სამი სახე: ჰომეოპოლარული და მეტალური - ერთი ფენის ფარგლებში, და ვან-დერ-ვაალსის ერთი ფენებს შორის. ამით აიხსნება გრაფიტის სირბილე, რადგან მათ ფენებს შეუძლიათ სრიალი ერთმანეთის მიმართ.

კრისტალური მესერის აგებულებაში განსხვავება ნახშირბადის ორი სახესხვაობის, გრაფიტი და ალმასის, ფარგლებში ცხადს ხდის განსხვავებას მათ ფიზიკურ თვისებებში: გრაფიტის სირბილეს და ალმასის სიხისტეს; გრაფიტი ელექტრობის გამტარია, ალმასი-დიელექტრიკი (არ გააჩნია თავისუფალი ელექტრონები) და ა.შ.

რეალურ კრისტალებში არსებობენ მხოლოდ ძალზე მცირე მოცულობებში, რომლებშიც ყოველთვის არსებობენ მესერის კვანძებში ნაწილაკების მოწესრიგებული განლაგებიდან გადახრა, რომელსაც უწოდებენ **კრისტალური მესერის დეფექტებს**. დეფექტები იყოფა **მაკროსკოპულარულებად**, რომლებიც წარმოიქმნებიან კრისტალების წარმოქმნისა და ზრდის პროცესებში (მაგალითად ნაპრალები, ფორები, უცხო მაკროსკოპული ჩართვები) და

მიკროსკოპულეზად, რომლებიც გაპირობებულ არიან პერიოდულობიდან მიკროსკოპული შორეულ გადახრებით.

მიკროდეფექტები იყოფა წერტილოვნად და ხაზოვნად. წერტილოვანი დეფექტები არიან სამი ტიპის: 1. ვაკანსიები - კრისტალურ მესერში ატომის ადგილი ცარიელია (სურ. 11),



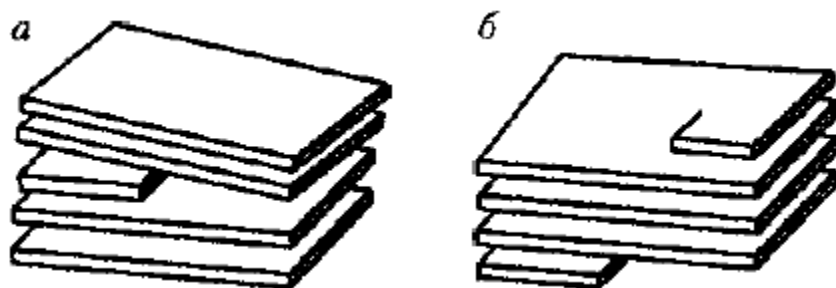
სურ. 11

3. მინარევული ატომი - მინარევის ატომი, რომელიც ცვლის ან ძირითადი ნივთიერების ატომს კრისტალურ მესერში (ჩანაცვლების ნარევი), ან ჩანერგილია კვანძთა შორის სივრცეში (ჩანერგვის ნარევი).

წერტილოვანი დეფექტები კრისტალურ მესერში არღვევენ მხოლოდ უახლოეს წესრიგს, არ ეხებიან რა შორეულ წესრიგს, სწორედ ამაში მდგომარეობს მათი მახასიათებელი თავისებურება.

ხაზოვანი დეფექტები არღვევენ შორეულ წესრიგს. როგორც ცდები უჩვენებს, კრისტალების მექანიკური თვისებები მნიშვნელოვნად განისაზღვრება გარკვეული სახის დეფექტებით - დისლოკაციებით. დისლოკაციები - ხაზოვანი დეფექტებია, რომლებიც არღვევენ ატომური სიბრტყეების სწორ მონაცვლეობას.

დისლოკაციები არსებობენ სასაზღვრო და ხრახნისებური. თუ ერთერთი ატომურ სიბრტყეთაგანი წყდება კრისტალის შიგნით, მაშინ ამ სიბრტყის ნაპირი ქმნის სასაზღვრო დისლოკაციას (სურ. 12ა), ხრახნური დისლოკაციისას (სურ.12ბ), კრისტალის შიგნით



სურ. 12

არცერთი ატომური სიბრტყე არ წყდება, ხოლო თვით სიბრტყეები მხოლოდ მიახლოებით არიან პარალელურები და ისე ებჯინებიან ერთმანეთს, რომ ფაქტიურად კრისტალი შედგება ერთი ატომური სიბრტყისგან, მოღუნულის ხრახნულ ზედაპირზე.

დისლოკაციის სიმკვრივე (კრისტალის ზედაპირის ფართის ერთეულზე მოსული დისლოკაციების რიცხვი) სრულქმნილი მონოკრისტალებისთვის შეადგენს 10^2 - 10^3 სმ⁻², ხოლო დეფორმირებული კრისტალებისთვის 10^{10} - 10^{12} სმ⁻². დისლოკაციები არასდროს არ წყდებიან, ისინი ან გამოდიან ზედაპირზე, ან განშტოებდებიან, ამიტომ რეალურ კრისტალებში წარმოიქმნებიან დისლოკაციების ბრტყელი ან სივრცული ბადეები. დისლოკაციები და მათი მოძრაობები შეიძლება დაკვირვებულ იქნან ელექტრონული მიკროსკოპის საშუალებით.

კრისტალურ სტრუქტურაში დეფექტების არსებობა რა თქმა უნდა გავლენას ახდენს კრისტალების თვისებებზე.