

ა. ავალიანი

მალდი ვეპვირაფუჩები  
ბუნებებსა და ვექნიკაში

ბაჟომცემლობა „ვეცნიერება“

თ ბ ი ლ ი ს ი

1966

536  
536+62:536  
ა 297

ნარკვევში განხილული საკითხები ეხება ნივთიერებათა მოქცევის თავისებურებას მაღალი ტემპერატურის პირობებში, მაღალი და ზემალაი ტემპერატურის მიღების ხერხებსა და ტექნიკური გამოყენების შესაძლებლობას ამჟამად და მომავალში.

## ენიასიზმის გამოცემა

ბუნების ცოდნა და მის ძალთა და-  
მორჩილება შეადგენს ერთს უმთავრეს  
ბურჯს ერისა და კაცობრიობის ბედნიე-  
რებისას.

გოგებაშვილი

ტექნიკის განვითარების ახლანდელი საფეხური მაღალი და ზემოაღიარებული წინეების, ტექნოლოგიებისა და სინთეზების გამოყენებისაგან სწრაფვით ხასიათდება. მომეტებული ყურადღება მათ შორის მაღალ ტექნოლოგიებს ეთმობა. ეს, ცხადია, ასეც უნდა იყოს. როგორც კარნოს პროცესის კლასიკური მაგალითიდან გამომდინარეობს, რაც უფრო მაღალია მუშა ტექნოლოგია, მით უფრო მეტ სიმძლავრეს აწვდიან მანქანას; მაგრამ მაღალ ტექნოლოგიებს სხვა დიდი უპირატესობაც აღმოაჩნდათ. სწორედ მათი მეშვეობით დაისახა ნივთიერებათა გარდაქმნის ახალი გზები ქიმიასა და მეტალურგიაში, გამოვლენდა არნახული ხარისხობრივი ცვლილებების შესაძლებლობანი. საკმარისია დავასახელოთ თუნდაც გრაფიტის აღმასად გარდაქმნის მაგალითი, მაღალი სისუფთავის ძნელდნობადი ნაერთების მიღება, ატომგულური ტექნიკისა და კოსმონავტიკის მიღწევები და მრავალი სხვა.

მაღალი ტექნოლოგიების საკვირველი ძალა დასაბამიდანვე ფლობდა ადამიანის გონებას. მაგრამ ბუნებრივი მაღალტექნოლოგიური „ლაბორატორიების“ — ვულკანების, ელვისა და შხის საიდუმლოებას მხოლოდ ახლახან ეხდებოდა ფარდა. მიუხედავად ამისა, ადამიანმა არამც თუ განკვირება მაღალი ტექნოლოგიების შესაძლებლობათა პორიზონტები, არამედ ბევრ შემთხვევაში მათი თავისი ნების მიხედვით მართვის პრაქტიკული საშუალებებიც გამოიყენა.

მაღალტექნოლოგიური პროცესების განვითარებასა და გამოყენებას თავიდანვე ფართოდ გაეხსნა გზა. დღითიდღე ფართოვდება, მაგალითად, რამდენიმე ათას გრადუსამდე გავარვარებული აირის — ე. წ. პლაზმის გამოყენების სფერო ტექნიკის სულ სხვადა-

სხვა დარგში, სპეციალური ფოლადებისა და ძნელდნობადი მასალების დამუშავება იქნება ეს, თუ ახალი ქიმიურ-მეტალურგიული პროცესები.

მაღალი ტემპერატურის პირობებში სრულიად განსხვავებულად მიმდინარეობს ქიმიური პროცესები. ამან განაპირობა პლანშის გამოყენების ფართო პერსპექტივები არა მარტო არაორგანული რეაქციების ჩასატარებლად, არამედ ორგანულ ნივთიერებათა რთული სინთეზებისათვის. მაგრამ ეს მიღწევები არ ამოიწურება ფიზიკური და ქიმიური პროცესების სიჩქარეთა გაზრდით. მთავარია ის, რომ მაღალი ტემპერატურები თვისობრივად განსხვავებული რეაქციების ჩატარების საშუალებას იძლევა, ახალი საინტერესო მოვლენების წინაშე გვაყენებს და მათი ახსნისა და, მაშასადამე, უკეთ დაუფლების გზებს სახავს.

რევოლუციური ძვრები, რაც მომავლის ენერგეტიკაშია ნავა-რაუდები, აგრეთვე მაღალ ტემპერატურებს უკავშირდება.

წარმატებები, რომლებიც ადამიანის გონებამ მოიპოვა, არა მარტო მეცნიერებისა და ტექნიკის განვითარების დონის მაჩვენებელია, არამედ შემდგომი წინსვლის ერთგვარი საწინდარიცაა. ამ წარმატებებისათვის ბრძოლის მაგალითებმა უნდა აღაფრთოვანოს მომავალი თაობა, ჩაუსახოს რწმენა არსებულ სიძნელეთა გადალახვის შესაძლებლობაში, შესძინოს სათანადო ცოდნა, ძალა და გამოცდილება; ნაყოფიერი შრომისა და მოღვაწეობისათვის კი აუცილებელია ახალგაზრდობაში ისეთი ჩვევების ადრეული დანერგვა, რომლებიც მათ დაუხმარება არა მარტო ბუნების მოვლენებზე დაკვირვებასა და სწორად აღქმაში (რაც თავისთავად აგრეთვე ღიღმნიშვნელოვანია), არამედ ამ მოვლენების ახსნის სწორი გზების გამოძებნაშიც.

ბუნების კანონზომიერ, მაგრამ მაინც საკვირველ მოვლენათა შორის ტემპერატურის ცნება ერთ-ერთი ძნელად ხელმოსაკიდი აღმოჩნდა. მიუხედავად ამისა, ადამიანი უკვე ჩაწვდა იმ საინტერესო მოვლენებს, რაც ძლიერ დაბალ ან ძლიერ მაღალ ტემპერატურებზე ვითარდება. მათი შემდგომი კვლევისა და დაუფლებისათვის, ჩვენი აზრით, სასარგებლო უნდა იყოს არსებული ცნობების თავმოყრა და მკითხველისათვის მიწოდება.

მასალის დიდი მოცულობისა და ასეთ საკითხზე მსჯელობის სირთულის გამო, ეს ცნობები არ შეიძლება სრული იყოს. აქ უკვე არა „ერთისა და ორისა კლებაზეა“ ლაპარაკი. მხოლოდ იმ გარემოებამ, რომ მსგავსი ნაშრომი მშობლიურ ენაზე ერთობ მცირე რაოდენობითაა, გვაფიქრებინა ამ ნარკვევის ქართველი მკითხველისათვის მიწოდების საჭიროება.

## უჩვეულო სამყარო

რამდენ ვალენტია ნია ბარიუმი? მაღალ ტემპერატურებზე ნივთიერებები საკმაოდ უჩვეულო და საინტერესო თვისებებს ავლენენ. უწინარეს ყოვლისა, ეს ელემენტთა ვალენტობას შეეხება.

ვისაც ქიმიის თუნდაც დაწყებითი საფუძვლები გაუვლია, ემახსოვრება, მაგალითად, რომ ნატრიუმი ტიპური ერთვალენტია ელემენტია, ბარიუმი — ორვალენტია, ხოლო ალუმინს გარკვეულად გამოსახული სამვალენტია ახასიათებს. საშუალო სკოლის მოწაფემ რომ  $\text{NaCl}$ -ის მაგივრად  $\text{NaCl}_2$ , ან მით უმეტეს —  $\text{Na}_3\text{Cl}$  დაწეროს, ხოლო  $\text{BaCl}_2$ -ის ნაცვლად  $\text{BaCl}$ , მას, ცხადია, „ორიანი“ არ ასცდება და სამართლიანადაც. მაგრამ ნუ გაგიკვირდებათ, თუ ვიტყვით, რომ მოწაფე შემთხვევით შეიძლება მართალიც გამოდგეს.

საქმე იმაშია, რომ როდესაც ამა თუ იმ რეაქციაზე ვმსჯელობთ, ვგულისხმობთ ისეთ გარემო პირობებს, რომლებიც დიდად არ განსხვავდება ჩვეულებრივისაგან (ოთახის ტემპერატურა, ნორმალური წნევა და სხვ.). სწორედ ასეთი პირობებისათვის არის დადგენილი. რომ ნატრიუმი ერთვალენტია, ხოლო კალციუმი და ბარიუმი — ორვალენტია.

მაგრამ უკანასკნელი წლების გამოკვლევებმა აჩვენეს, რომ მაღალ ტემპერატურებზე ნივთიერებები ჩვეულებრივისაგან საკმაოდ განსხვავებულ და ზოგჯერ მოულოდნელ თვისებებს იძენენ.

დადგინდა, რომ  $2000^\circ$ -ის ფარგლებში „ჩვეულებრივი“ ქიმიის თითქმის ყველა მახასიათებელი ქრება<sup>1</sup>. შეიძლება ითქვას, ამ ტემპერატურის ზევით სრულიად უცხო სამყარო გვაქვს. საკვირველია, მაგალითად ის, რომ მაღალი ტემპერატურები არა მარტო მოლეკუ-

<sup>1</sup> შემდეგში სიადვილისათვის მივიღოთ, რომ თუ ტემპერატურული სკალა მითითებული არ არის, იგულისხმება ცელსიუსის გრადუსები ( $^\circ\text{C}$ ).

ლების დისოციაციასა და ნაერთების დაშლა-დახლეჩას უწყობს ხელს, არამედ, როგორც გამოირკვა, ამ დროს გაცილებით უფრო რთულ, ერთის შეხედვით თითქოსდა მოულოდნელ პროცესებთანაც გვაქვს საქმე. ამის მიზეზი შემდეგში უნდა ვეძიოთ.

მართალია, რთული ნივთიერებები მაღალი ტემპერატურის ზეგავლენით აგზნებულ მდგომარეობაში მოდიან, რაც მათ დაშლას უწყობს ხელს, მაგრამ, მეორე მხრივ, არც იმ გარემოების უგულვებლყოფა შეიძლება, რომ მკვეთრად იზრდება აგზნებული ნაწილაკების სიჩქარე და ურთმანეთთან ურთიერთქმედების შესაძლებლობა, ე. ი. ის, რაც რეაქციის უნარს განსაზღვრავს. ეს განაპირობებს ისეთი ნაერთების წარმოქმნას, რომელთაც ჩვეულებრივ პირობებში არ ვხვდებით.

მაშასადამე, წარმოდგენა იმის შესახებ, თითქოს მაღალ ტემპერატურებზე უფრო მარტივი ქიმიური ფარდობები უნდა გვექონდეს, ცალმხრივად უნდა ჩაითვალოს.

ამიტომ არის, რომ ვალენტობის ჩვეულებრივი წესები მაღალ ტემპერატურებზე ირღვევა. ალუმინი, რომელსაც ჩვენ მკაფიოდ გამოაანხულ სამვალენტიან ელემენტად ვთვლით, ამ დროს ერთ-, ორ- და, ასე გასინჯეთ, ოთხვალენტიანობასაც კი გამოავლენს ხოლმე. სარწმუნოდ ითვლება, მაგალითად, ნაერთების —  $Al_2O$ ,  $AlO$  და სხვათა არსებობა.

მაღალ ტემპერატურაზე დიდი მნიშვნელობა ენიჭება მყარ და აირად ნივთიერებათა ურთიერთქმედებასაც. მყარ ნივთიერებათა მოლეკულები ამ დროს შეიძლება ისე გადავიდნენ აირად ფაზაში, რომ დისოციაცია არ განიცადონ. უფრო მეტიც: ეს მოლეკულები ზოგჯერ გაცილებით რთული აგებულებისაც კი შეიძლება გახდნენ. ასე, მაგალითად, სუფრის მარილის გახურების შედეგად მის ორთქლში,  $NaCl$ -ის მარტივი მოლეკულების გვერდით, უფრო რთულ,  $Na_2Cl_2$ -ის ტიპის მოლეკულებსაც ვნახულობთ.

ძნელი დასაჯერებელია, რომ ამ დროს ისეთი უცნაური ნაერთებიც წარმოიქმნება ხოლმე, როგორიცაა:  $Na_3Cl$ ;  $NaCl_2$ ;  $CaCl$ ;  $BaCl_3$ ;  $Ba_2O_3$  და სხვ.

ასეთივე უჩვეულო ვალენტობაა შემჩნეული არა მარტო ტუტე და ტუტემიწა ლითონებისა და ალუმინისათვის, არამედ ბევრი სხვა ელემენტისათვისაც. ლიტერატურაში არის მითითება, მაგალითად,  $SiO$ ,  $SO$  და სხვ. არსებობის შესახებ. გრაფიტის გახურების დროს აირად ფაზაში, ნახშირბადის „ნორმალური“ ატომების გვერდით,  $C_2$ ,  $C_3$  და, ზოგიერთის აზრით,  $C_5$  და  $C_9$  შედგენილობის მოლეკულებიც არსებობენ.

ლითონი იხსნება თავისივე მარილში. უჩვეულო ვალენტობის იონები ზოგჯერ  $1000^{\circ}$ -ზე უფრო დაბალ ტემპერატურაზედაც შეიძლება არსებობდნენ. ჯერ კიდევ წარსული საუკუნის დასაწყისში ინგლისელმა მკვლევარმა პ. დევიმ შენიშნა, რომ ლითონი იხსნება თავისივე მარილის ლლობილში. მას შემდეგ ეს მოვლენა მრავალი კვლევის ობიექტი გახდა. სწადაობა კარგად შეიმჩნევა განსაკუთრებით ელექტროლიზის პროცესის მიმდინარეობის დროს: ლითონის ზედაპირიდან (კათოდიდან) ლლობილში გავრცელებას იწყებს მუქი ფერის დინება, რომელიც თანდათან ავსებს მთელ მოცულობას. გამჭვირვალე მარილი შესამჩნევად მუქდება; ტყვია, მაგალითად, თავის გამლღვალ ქლორიდს ყველაფერად ღებავს, კადმიუმში — წითლად, ლითიუმში — შავად, თუთია — მუქ ლურჯად და ა. შ.

კიდევ უფრო საკვირველია ის გარემოება, რომ ლლობილი, რომელიც ჩვეულებრივად მაღალი ელექტროგამტარობით ხასიათდება, ლითონით გაჯერების შემდეგ დენს საერთოდ აღარ ატარებს. ელექტროლიზის პროცესი წყდება. ამ არასასურველი მოვლენის გამო დენით გამოსავალი შესამჩნევად მცირდება.

ლითონების ლლობილებში გახსნას პირველ ხანებში ლითონის აორთქლებასა და პიროზოლის, ე. წ. „ლითონური ბურუსის“ წარმოქმნას მიაწერდნენ. შემდეგში უფრო სარწმუნოდ იქნა მიჩნეული დაბალვალენტიანი ნაერთების (სუბნაერთების) წარმოქმნა. მაშასადამე, მაღალ ტემპერატურაზე ლითონის ატომი კარგავს არა ყველა სავალენტო ელექტრონს, არამედ ისეთებს, რომელთა მოწყვეტის (იონიზაციის) ენერგია ნაკლებია. ალუმინი, მაგალითად, ადვილად გასცემს გარე ორბიტის 3p ელექტრონს, რომელსაც იონიზაციის უფრო მცირე პოტენციალი აქვს, ვიდრე შიგა ორბიტის 3s ელექტრონს. წარმოიქმნება ერთვალენტიანი ალუმინის ნაერთი —  $AlCl$ ,  $AlF$  და სხვ. ასევე ხდება ბარიუმისა და სხვა ლითონების შემთხვევაშიც.

მაღალ ტემპერატურებზე მუშაობის თავისებურებანი.  $1200^{\circ}$ -მდე მუშაობა „ჩვეულებრივი“ მეთოდებით ხდება. ჯერ კიდევ შესაძლებელია მყარი და თხევადი ბუნებრივი საწვავით გახურება, ელექტროწინალობის ღუმელების გამოყენება, რეაქციების ჩატარება კვარცის მინისაგან დამზადებულ ზელსაწყობებში, ტემპერატურის შედარებით ზუსტი გაზომვა თერმომეტრით ან თერმოწყვილით და სხვ.

უფრო მაღალ ტემპერატურებზე, თუნდაც  $1600^{\circ}$ -ის ფარგლებში მუშაობის შესაძლებლობანი უკვე საკმაოდ შეზღუდულია. ელექტროწინალობის გამახურებელი ელემენტები მხოლოდ ძნელდნო-

ბადი, თერმულად და კოროზიულად მედეგი მასალისაგან უნდა იყოს დამზადებული. ამასთანავე, მიუხედავად იმისა, რომ ძნელდნობადი კერამიკული ნაერთები და შენადნობები თითქოს საკმაო რაოდენობით მოგვეპოვება, ელექტროწინალობის ელემენტების მასალებად მხოლოდ სამიოდე მათგანი თუ შეიძლება გამოვიყენოთ. პრაქტიკისათვის ასეთი გამოდგა კარბორუნდი — SiC (სილიტის ტიპისა), მოლიბდენის დისილიციდი — MoSi<sub>2</sub> და ცირკონიუმის დიბორიდი — ZrB<sub>2</sub>.

რაც შეეხება ტემპერატურის გაზომვას, ამისათვის ზოგაერთი სპეციალური თერმოწყვილები ან ოპტიკური მეთოდებია გამოყენებული.

2000°-ის ზევით მუშაობა იმდენად გაძნელებულია, რომ ქიმიურ ნაერთთა ბევრი თვისება ჯერაც არ არის შესწავლილი და სარწმუნოდ დადგენილი. ტემპერატურის ზუსტ გაზომვაზე ხომ ლაპარაკიც ზედმეტია. ამ მიზნისათვის გამოყენებული ოპტიკური მეთოდების სიზუსტე მხოლოდ ათეული გრადუსების ფარგლებში შეიძლება იყოს.

საკმაოდ გართულებულია ტემპერატურის ერთ დონეზე შენარჩუნების შესაძლებლობა მეტნაკლებად მოზრდილ სივრცეში. გამახურებელ აგენტად ძირითადად ელექტრორკალია გამოყენებული. დიდ პრობლემას წარმოადგენს სარეაქციო გარემოსათვის ცეცხლგამძლე მასალების შერჩევა.

ვინაიდან 2000°-ს ზევით თხევადი წყალი არც ერთ შემთხვევაში აღარ შეიძლება გვექონდეს, ამიტომ გამორიცხებულია რაიმე რეაქციის ჩატარების შესაძლებლობა წყალხსნარებში.

ამ ტემპერატურებზე მყარი სხეულების რაოდენობა საკმაოდ შეზღუდულია; მცირეა ორგანული ან კომპლექსური მოლეკულების რიცხვიც. ქიმიური არე ძირითადად ორ და სამატომიანი ძოლეკულებიდან შედგება.

4000°-ზე და უფრო მაღალ ტემპერატურებზე მხოლოდ განსაკუთრებით მდგრადი მოლეკულები შეიძლება შემორჩეს. მათ რიცხვს მიეკუთვნება აზოტი და ნახშირყანავი. საინტერესოა, რომ ეს უკანასკნელი ამ დროს ეანგბადის არეშიც კი არ იწვის.

10 000°-ზე ზევით, საერთოდ, აღარც მოლეკულები არსებობს და აღარც „ჩვეულებრივი“ რეაქციები მიმდინარეობენ.

საქმე გვაქვს უმთავრესად ატომებსა და იონებთან.

პროცესები მაღალ ტემპერატურებზე მყისიერად, წამის მეათასედ ან მემილიონედ ნაწილში მთავრდება. ეს, ცხადია, არამც თუ აძნელებს, არამედ ზოგჯერ გამორიცხავს კიდევ პროცესის ნამდვილი მექანიზმის დადგენის პირდაპირი გზის გამოჩვენის შესაძლებ-



ლობას. მიუხედავად ამისა, იმ დიდი მნიშვნელობის გამო, რაც მაღალ ტემპერატურებს აღმოაჩნდათ ტექნიკის წინსვლის საქმეში, მეცნიერები გაცხოველებით იკვლევენ მისი მიღებისა და გამოყენების გზებს.

მაღალ ტემპერატურებზე ნივთიერებათა ერთმანეთთან რეაგირების უნარის მკვეთრად ზრდის გამო ძნელი ხდება ამ პირობებში სამუშაოდ გამოსადეგი მასალების შერჩევა. ეს გარემოება საგრძნობლად ზღუდავს ამა თუ იმ პროცესის პრაქტიკული განხორციელების შესაძლებლობას. სიძნელები განსაკუთრებით საგრძნობია მაშინ, როდესაც დანადგარის რომელიმე ნაწილის ასე თუ ისე ხანგრძლივად დაყოვნება საჭირო 2000°-ზე უფრო მაღალ ტემპერატურაზე. ამ პირობებში აბსოლუტურად პასიური მასალები, მკაცრად რომ ვიმსჯელოთ, აღარ გვაქვს, არის მხოლოდ ისეთები, რომლებიც ტემპერატურის განსაზღვრულ ფარგლებში შესამჩნევად არ უშლიან ხელს პროცესის მსვლელობას.

ამასთანავე, არ შეიძლება არ აღინიშნოს ისიც, რომ ცნობილია ზოგიერთი მარტივი აირადი ნაერთი, რომელიც უმდგრადაა ჩვეულებრივ პირობებში, 1500°-ის ზევით კი საკმაოდ მდგრადობას იჩენს. მათ შეუძლიათ მოულოდნელად აქროლდნენ, ხოლო შემდეგ დაკონდენსირდნენ დანადგარის ცივ დეტალებზე მყარ მდგომარეობაში.

მაღალ ტემპერატურებზე მუშაობის დროს გასათვალისწინებელია ის გარემოებაც, რომ ცეცხლგამძლე მასალები და ლითონები შეიძლება მედეგი იყოს ამა თუ იმ პირობებში სამუშაოდ, მაგრამ მათი გამოყენება მაინც ვერ მოხერხდება. მიზეზი ამისა არის ის, რომ განსაზღვრულ ტემპერატურაზე ეს მასალები აირგამტარი ხდება. ეს გამოორიცხავს ასეთი მასალისაგან დამზადებულ აპარატსა და კუროვალში მორეაგირე აირების ან გარემოს მუდმივი შედგენილობის შენარჩუნების შესაძლებლობას, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც პროცესის მსვლელობისათვის წნევის ან გაიშვიათების გამოყენება აუცილებელია.

დაბალ ტემპერატურაში პლაზმის სამუშაო. როდესაც მაღალ ტემპერატურებზე ვლაპარაკობთ, უწინარეა ყოვლისა, საჭიროა შევთანხმდეთ — რის მიმართ ვიხმართ ეს ტერმინი. როგორც შემდეგ ვნახავთ, მაღალი ტემპერატურების სფერო მეტად ვრცელია და ათასეული გრადუსიდან მილიარდ გრადუსამდე ინტერვალს მოიცავს. აღნიშნულის გამო, მიზანშეწონილად უნდა ჩაითვალოს ამ საქმეში ერთგვარი პირობითი საფეხურების დაწესება.

მაღალი ტემპერატურის ცნება სხვადასხვა დარგის მუშაკს სხვადასხვანაირად შეიძლება ესმოდეს. სამრეწველო პრაქტიკაში

ჩვეულებრივად ასეთად მიიჩნევენ ტემპერატურებს 1000°-ის ზევით, უმთავრესად 1500—2500°-ის ფარგლებში. რაკეტულმა ტექნიკამ ეს ზღვარი 3000°-მდე ასწია. სწორედ ასეთი სიმზურვალე ბოზოქრობს კოსმოსური ხომალდის წვის კამერაში. ეს იმის მაჩვენებელია, რომ, მიუხედავად დიდი სიძნელეებისა, თანამედროვე ტექნიკას ამ პირობებში სამუშაოდ უკვე აქვს გამონახული და გამოცდილი შესაბამისი მასალები. მართალია, ასეთი მასალების რიცხვი ჭერჯერობით ბევრი არ არის, მაგრამ სხვადასხვა ტექნიკურ ღონისძიებათა გამონახვის შედეგად შესაძლებელი ხდება მათი გამძლეობის გადიდება. ასეთ ღონისძიებათა საჭიროება გაპირობებულია იმ გარემოებით, რომ აპარატურას ასეთ დანადგარებში მეტად ძნელ, მრავალმხრივ დაძაბულ გარემოში უხდება მუშაობა. მაღალ ტემპერატურას ზედ ერთვის მაღალი წნევა და აგრესიული გარემო, სითბოს გაცვლის დიდი ინტენსიურობა და სხვ. ყოველი ამ ფაქტორთაგანი ცალ-ცალკე და ერთად ძლიერ ართულებს მუშაობას. კონსტრუქტორები იძულებული არიან შეამცირონ აგრეგატების მუშაობის ხანგრძლიობა, რაშიც მათ „ეხმარებათ“ ის ფაქტორი, რომ პროცესებიც ამ დროს უაღრესად დიდი სიჩქარით მიმდინარეობს. კოსმოსური ხომალდი, მაგალითად, ორბიტაზე გასვლას სულ რაღაც 4 წუთს თუ ანდომებს.

ამიტომ არის, რომ, მიუხედავად საკმაოდ დიდი სიძნელეებისა, ტექნიკა დაჟინებით ცდილობს აითვისოს ტემპერატურის ეს ფარგლები.

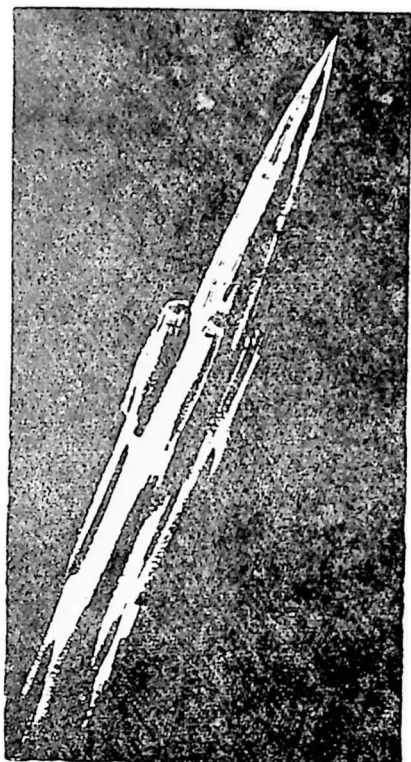
მაგრამ ეს კიდევ არ ნიშნავს, რომ მაღალი ტემპერატურების პირველი საფეხური 3000°-ით შემოვსაზღვროთ. შეიძლება ერთგვარ შეუსაბამობადაც კი მივიჩნიოთ, მაგრამ ფაქტია, რომ გაცილებით უფრო მაღალი, 6000—10000°-ის ფარგლები უკვე ამჟამად ტექნიკის ბევრმა დარგმა უფრო აითვისა, ვიდრე 2000—4000°-ის ინტერვალი. ამის მიზეზი უმთავრესად შემდეგში უნდა ვეძიოთ: პირველ შემთხვევაში უშუალოდ გავარჯარებული აირის — პლაზმის ჰაველია გამოყენებული — მისი რეაქტორის კედლებთან შეხების გარეშე; მეორე შემთხვევაში — პროცესის ჩატარება თითქმის ყოველთვის სარეაქციო არეს მთლიან გახურებასთანაა დაკავშირებული, ამისთვის მაღალი ცეცხლგამძლეობის თვისების მქონე ამონაგის გამონახვა საჭირო.

მაგრამ რა არის პლაზმა? ასე ეწოდება რამდენიმე ათას გრადუსამდე გავარჯარებულ აირს, რომელიც განსაკუთრებული, ჩვეულებრივი აირისაგან ძირეულად განსხვავებულ მდგომარეობაშია. თერმული იონიზაციის შედეგად, პლაზმის ნივთიერება დაშლილია დადებით იონებად და თავისუფალ ელექტრონებად. ამის გამო მას

დიდი ელექტროგამტარობა შეეძინება, ძლიერ განიცდის მაგნიტური ველის გავლენას და სხვ.

მიუხედავად იმისა, რომ არ არსებობს ისეთი ნივთიერება, რომელიც პლაზმის ყოვლის შემმუსვრელ ძალას აღუდგება წინ, ტექნიკამ მაინც გამოიყენა მისი გამოყენების შესაძლებლობა ქიმიური რეაქციების ჩასატარებლად, ლითონებისა და ძნელდნობადი მასალების დასამუშაებლად და სხვ. უფრო მეტიც: მეცნიერები არამცთუ ათეული, არამედ ასეული ათასისა და მილიონი გრადუსების სფეროსაც შეწვდნენ და საფუძვლიანადაც მათთვის 10000° უკვე „დაბალტემპერატურულ“ პლაზმად ითვლება. ასე ვუწოდოთ ჩვენც მაღალი ტემპერატურების პირველ საფეხურს.

ზემაღალი ტემპერატურების სფერო. მაღალი ტემპერატურების მიღებისა და გამოყენების ზედა ზღვარი ტექნიკის განვითარების დონითაა გაპირობებული, ამიტომ დროის მიხედვით ეს ზღვარი იცვლება. წარსული საუკუნის ბოლომდე ასეთად ითვლებოდა წყალბადის ენგბადის არეში წვის დროს წარმოქმნილი ალის ან ნახშირის ელექტროდებს შორის ელექტროგანმუხტვის შედეგად მიღებული რკალის ტემპერატურა; მაგრამ იგი 4000° არ აღემატება. ამ დროს ზოგიერთი ნივთიერება, კერძოდ, ნახშირბადი, ჯერ კიდევ შეიძლება იყოს მყარ მდგომარეობაში.



კოსმოსური ხომალდი ორბიტაზე გასვლას 4 წუთსაც არ ანლომებს

მეოცე საუკუნის დასაწყისში პრაქტიკამ დღის წესრიგში დააყენა გავარყვარებული აირების შესწავლის საჭიროება.

გამოირკვა, რომ აირების გადახურებულ მდგომარეობაში შენარჩუნება გაცილებით მაღალ ტემპერატურაზეა შესაძლებელი (20 000—50 000°), ვიდრე ნახშირბადის აქროლების ტემპერატურაა.

თითქოს საკვირველია, მაგრამ ასეთი ტემპერატურებიც აქა-იქ უკვე იკიდებს ფეხს ჩვენს პრაქტიკაში, კერძოდ, ქიმიურ და მეტალურგიულ პროცესებში. ამას დიდად შეუწყობ ხელი ნივთიერების მეოთხე მდგომარეობის, ე. წ. პლაზმის მიღებისა და მისი გამოყენების ტექნიკის განვითარებამ.

ტემპერატურების ამ ინტერვალს შეიძლება ზემოაღნიშნული ტემპერატურების სფერო ეწოდოს. მას პრაქტიკული გამოყენების პერსპექტივები ესახება ტექნიკის ბევრი დარგისათვის არც თუ ისე შორეულ მომავალში.

**ულტრამაღალი ტემპერატურები.** ბოლო ორი ათეული წლის მანძილზე სულ უფრო და უფრო ხშირად ახსენებენ მილიონი გრადუსების ტოლ ტემპერატურებს. კვლევების უაღრესი სიძნელის (და სიძვირის) მიუხედავად, მეცნიერები გაცხოველებით მუშაობენ ტემპერატურის ამ ფარგლების ასათვისებლად. ეს გარემოება გაპირობებული იყო მართვადი ატომგულური და თერმოატომგულური რეაქციების ჩატარების პერსპექტივებით. დაისახა გზები ისეთი მაღალი ტემპერატურების მიღებისა და მათი ბუნების შესწავლისათვის, რომელთა სიდიდე მილიონ და ათეულ მილიონ გრადუსს შეიძლება აღემატებოდეს.

ტემპერატურის ფარგლებს ასეთი ათასიდან ათეული მილიონი გრადუსების ჩათვლით შეიძლება ულტრამაღალი ეწოდოდო. ამ ტემპერატურების დიდი მასშტაბით მიღება შესაძლებელია ატომგულური რეაქციის მეშვეობით. მაგრამ მათი შენარჩუნება ხელოვნური გზით ჯერ მხოლოდ ძალიან მცირე დროის განმავლობაში ხერხდება, ვინაიდან ნივთიერება ამ დროს არა აირის, არამედ ე. წ. მაღალტემპერატურიანი პლაზმის განსაკუთრებულ მდგომარეობაშია და მისი რაიმესთან შეხება შეუძლებელია — მყის აორთქლებს ნებისმიერ ცეცხლგამძლე მასალას.

მაღალტემპერატურიანი პლაზმის მისაღებად მასში ატარებენ მილიონ ამპერამდე დენს რამდენიმე ათეული ათასი ვოლტის ძაბვით. ამისათვის საჭირო დანადგარის სიმძლავრე მნიშვნელოვნად აღემატება მთელი საბჭოთა კავშირის ჰიდროელექტროსადგურების სიმძლავრეს. მაგრამ არის სხვა გზაც—პლაზმაში დენის გატარება იმპულსებით, წამის მემილიონედი ნაწილის განმავლობაში. ამისათვის ლაბორატორიული მაღალვოლტიანი კონდენსატორებისაგან შემდგარი მძლავრი ბატარეაც კმარა.

ჩვენ, მართალია, საშუალება გვაქვს ვიმსჯელოთ მილიონი გრადუსების შესახებ, მაგრამ მხოლოდ ვიმსჯელოთ, ვინაიდან არ არსებობს რაიმე კრიტერიუმი ამ დროს მიმდინარე ფანტასტიური მოვლენების აღსაქმელად და შესაცნობად.

შედარებისათვის შეიძლება აღვნიშნოთ მხოლოდ, რომ მზის შიგა სივრცეებში, სადაც ნივთიერება მილიარდი ატმოსფეროს წნევის ქვეშ უაღრესად შეკუმშულია (მისი აწონა რომ შეგვეძლოს, ყოველი ლიტრი 100 კგ გამოვიდოდა), ატმთა ელექტრული გარსები აღარ არსებობს — ისინი გასრეხილია. იქნება პირობები თერმოატომგულური რეაქციების უწყვეტად მიმდინარეობისათვის, რის შედეგადაც 15—20 მილიონი გრადუსი ტემპერატურები ვითარდება. მართალია, მზის ზედაპირიდან ამოტყორცნილ ნივთიერებებს „სულ რაღაც“ 6—7 ათასი გრადუსი ტემპერატურა აქვს, მაგრამ ვნერგის საერთო დიდი რაოდენობა საკმარისია იმისათვის, რომ თითქმის 150 მილიონ კმ მანძილზე დედამიწაზე სიცოცხლის არსებობა განაპირობოს.

ს უ პ ე რ მ ა ლ ა ლ ი ტ ე მ პ ე რ ა ტ უ რ ე ბ ი. ტემპერატურის ქვედა ზღვარის არსებობა შეცნობილად ითვლება და შესაფერის თეორიულ დასაბუთებასაც ნახულობს. არსებობს თუ არა ტემპერატურის ზედა ზღვარი და რა განსაზღვრავს მას? ამ კითხვაზე პასუხის გაცემა ამჟამად არავის ძალუძს; თეორიული მსჯელობა გვარწმუნებს მხოლოდ, რომ ეს ზღუდე უსასრულოდ დიდი არ შეიძლება იყოს. ტრილიონი გრადუსების მქონე ტემპერატურების არსებობა, რა იზოლირებულადაც უნდა წარმოვიდგინოთ უაღრესი სიმკვრივის მქონე ნივთიერება, უბრალოდ შეუძლებელია. სითბოს დანაკარგი კოსმოსში გაცილებით უფრო ინტენსიური იქნება, ვიდრე ამ ნივთიერების ჩვენი გონებისათვის მისაწვდომი რაიმე ფანტასტიკური საშუალებით გახურებაა სავარაუდო.

ავიღოთ თუნდაც ისეთი უაღრესად გავარვარებული გიგანტური ზომის ვარსკვლავი, როგორც ბეტელჯეიზეა. მისი დიამეტრი 350-ჯერ აღემატება ჩვენი მზისას, გულში არაერთი მილიარდი ატმოსფეროს წნევია, ნივთიერებების სიმკვრივე კი წარმოუდგენლად დიდია. მაგრამ ასეთ პირობებშიაც კი ტემპერატურა არ შეიძლება მილიარდ გრადუსებს აღწევდეს, ვინაიდან როგორც სათანადო განგარიშება ადასტურებს, ამ შემთხვევაში ვარსკვლავი სულ რაღაც რამდენიმე წლის მანძილზე 10-ჯერ უფრო მეტად უფრო გაცივებულიყო, ვიდრე ამჟამად არის.

ასეთი სახის თეორიული განზოგადობებიდან გამომდინარე, მეცნიერები ვარაუდობენ, რომ ტემპერატურის ზედა ზღვარის არსებობა სადღაც 100 მლრდ გრადუსის ფარგლებშია მოსალოდნელი.

## ვემპეიაზუკა ღა ვემპეიაზუკელი სკაღა

რა არის ტემპერატურა? „სითბოსა“ და „სიცივის“ შეგრძნება ადამიანის სიცოცხლის თანამგზავრია. ვეხებით რა ორ სხეულს, ჩვენ ადვილად ვადარებთ მათი გათბობის ხარისხს ანუ ტემპერატურას. ყოველდღიურ პრაქტიკულ საქმიანობაზე ხომ ლაპარაკიც ზედმეტია — ძნელად რომ ვინმემ დაასახელოს ისეთი დარგი, წარმოების რომელიმე სახეობა იქნება ეს; ნაირგვარი ტრანსპორტი თუ ჩვენი მოღვაწეობის სხვა ნებისმიერი სფერო, საოჯახო საქმიანობის ჩათვლით, სადაც დაბალი, ზომიერი ან მაღალი ტემპერატურის რაიმე საჭიროება და გამოვლინება არ გქონდეს. კაცობრიობის უპირველეს მოთხოვნილებათა უზრუნველყოფი ისეთი დარგებისათვის კი, როგორც ქიმიური და მეტალურგიული მრეწველობა, ენერგეტიკა, ტრანსპორტი თუ ატომგულური მრეწველობა, ტემპერატურა უმრავლეს შემთხვევაში ძირითად განმსაზღვრელ პარამეტრად გვევლინება.

მიუხედავად ჩვენს ყოველდღიურ საქმიანობასთან მჭიდრო კავშირისა, უნდა ვალიაოთ, რომ ტემპერატურის არსი, განსაკუთრებით მისი ფილოსოფიური გაგებით, ჩვენთვის ჯერ კიდევ სათანადოდ შეცნობილი არ არის. მისი საყოველთაოდ მიღებული განმარტება, როგორც სხეულის გახურების ხარისხისა, ანუ, მეტი მეცხიერული სიზუსტით რომ ვთქვათ, მოლეკულების უწყესრიგო თბური მოძრაობის შინაგანი ენერჯიის საზომისა, მეტად ზოგადია და ტემპერატურის უშუალოდ განსაზღვრის საშუალებას არ იძლევა.

კარგა ხანია მეცნიერებმა ყურადღება მიაქციეს იმ უაღრესად მნიშვნელოვან გარემოებას, რომ ენერჯია თითქოს ცდილობს განბნევას, გაუფასურებას, უფრო დაბალ ხარისხში გადასვლას. ამის გამოვლინებას ჩვენ ყოველ ნაბიჯზე ვხვდებით. თუ ერთი სხეულის გათბობის ხარისხი აღმატება მეორისაჲ, ე. ი. მის ნივთიერ ნაწილაკებს მეტი სითბური ენერჯია აქვთ, მაშინ იგი ცდილობს თავისი ენერჯია სითბოს სახით გადასცეს მეორეს, უფრო ცივს, ნაკლები

ტემპერატურის მქონე სხეულს<sup>2</sup>. ეს არის ტემპერატურის პირველი დამახასიათებელი თვისება, რომელიც სამართლიანია როგორც მცირე, ისე დიდი მოცულობის სისტემებისათვის — ნებისმიერი რაოდენობის მატერიისათვის, კოსმოსური სხეულისა და ცალკეული მოლეკულებისათვის.

ტემპერატურის პირველი ძირითადი თვისებიდან გამომდინარეობს მეორე, სახელდობრ ის, რომ იგი ერთნაირია ყველა სხეულისათვის, რომლებიც ერთ შეკრულ სისტემას წარმოქმნიან, თუ ეს უკანასკნელი თერმოდინამიკური წონასწორობის მდგომარეობაშია. მაგრამ აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ რეალური პროცესებისათვის თერმოდინამიკური წონასწორობის პირობა თითქმის ყოველთვის გამორიცხებულია. ამ შემთხვევაში ენერგია (სითბო) მაღალი ტემპერატურის მქონე სხეულიდან დაბალი ტემპერატურის მქონეს გადაეცემა.

ამ მიზეზით ტემპერატურის გაზომვას, კერძოდ, ცხელი აირის ალში, პრაქტიკულად არ შეიძლება ახასიათებდეს სიზუსტე, რაც გაპირობებულია ტემპერატურის გრადიენტებით ალის სისქეში. აცეტილენ-ჟანგბადის ალი, მაგალითად, სტეჟიომეტრული შედგენილობის შემთხვევაში 300°-მდე ტემპერატურას აწვითარებს. ალის ზონის სისქე ამ დროს სულ რაღაც 0,03 მმ ტოლია. ეს იმას ნიშნავს, რომ 1 მმ მანძილზე ტემპერატურის ვარდნა 10 000°-ს აღწევს.

ტემპერატურული სკალის შექმნის საჭიროება. მეცნიერებისა და წარმოების პროგრესი შეუძლებელია, თუ იგი ზუსტ მონაცემებს არ ეყრდნობა. „ბუნებაში ზომა და წონა შეცნობის მთავარი იარაღია“ (დ. მენდელეევი). ამა თუ იმ ფიზიკური სიდიდის საზომ ერთეულს ისეთივე მნიშვნელობა აქვს, როგორც ენას საერთო კულტურისათვის. ამიტომ გასაგებია ის დიდი ყურადღება, რაც, ენერგიისა და ტემპერატურის ცნებების შემოტანის შემდეგ, მათი გაზომვის ზუსტი მეთოდების გამომუშავებასა და ათვისებას დაეთმო.

ტემპერატურის გაზომვის ისტორია სამასობით წელს ითვლის, მაგრამ პირველი თერმომეტრები მხოლოდ ამ საუკუნე-ნახევრის

---

<sup>2</sup> მკაცრად რომ ვიმსჯელოთ, სითბო იმდენად არა ენერგიის ფორმაა, რამდენადაც ამ ენერგიის გადაცემისა. მართლაც, სითბო და მუშაობა, ენერგიის საწინააღმდეგოდ, არ წარმოადგენს სხეულის ან სისტემის მდგომარეობის ფუნქციას, არამედ დამოკიდებულია გადასვლის გზისაგან, რომელიც საწყის და საბოლოო მდგომარეობას აერთებს. ამრიგად, ისინი არა მდგომარეობას, არამედ პროცესს განაპირობებენ და მხოლოდ მაშინ გამოვლინდებიან, როდესაც მათი გადაცემის პირობები იქმნება.

წინათ გამოჩნდა. მანამდე კი ადამიანს სიცხის საზომიც არ ჰქონდა. რაც შეეხება ტემპერატურის მაღალი სიზუსტით გაზომვას, უნდა ითქვას, რომ იგი თანამედროვე ტექნიკის პირობებშიც კი ერთ-ერთ ძნელ საქმედ ითვლება.

როგორც უკვე იყო აღნიშნული, ტემპერატურა არ არის ისეთი სიდიდე, რომლის გაზომვა (ათვლა) პირდაპირ, უშუალოდ სხეულზე იყოს შესაძლებელი. ჩვეულებრივად ამისათვის შუალედი დამხმარე ნივთიერების იმ თვისების გაზომვას მიმართავენ, რომელიც შესამჩნევად მგრძობობიარეა ტემპერატურის ცვალებადობისადმი. თვით ეს თვისება, ცხადია, გასაზომად მოსახერხებელი უნდა იყოს. ემპირიულად დადგინდა, რომ ასეთად 1500°-ის ფარგლებში შეიძლება მივიღოთ, უწინარეს ყოვლისა, ამა თუ იმ ნივთიერების მოცულობის ცვალებადობა ტემპერატურის მიხედვით. რაც შეეხება ასეთი თვისების მქონე თერმომეტრის მასალას, პრაქტიკისათვის გამოსადეგი აღმოჩნდა არა მარტო ჩვეულებრივ პირობებში თხევადი ნივთიერებები, მაგალითად, ვერცხლისწყალი ან განზავებული სპირტი, არამედ მყარი ლითონები და, უფრო მეტად კი, აირები; მაგრამ ისინი უნდა აკმაყოფილებდნენ აუცილებელ პირობას — შერჩეული თვისების ცვლილება უნდა ხდებოდეს თანაზომიერად. წყლის თერმომეტრი, მაგალითად, 0°-დან 4°C-მდე გათბობის დროს მოცულობას ჯერ შეამცირებდა (ე. ი. გვიჩვენებდა ტემპერატურის დაკემას მომატების ნაცვლად) და მხოლოდ შემდეგ დაიწყებდა თანაზომიერ გაფართოებას, ვინაიდან ამ ორ ტემპერატურაზე მას ერთნაირი სიმკვრივე აქვს და, მაშასადამე, ტოლ მოცულობას იჭერს. აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ ამა თუ იმ სხეულის ნებისმიერი თვისებების ცვალებადობას ტემპერატურის მიხედვით სინამდვილეში ზუსტი თანაზომიერება არ ახასიათებს, რაც თერმომეტრების პრინციპულ ნაკლად ითვლება. მაგალითად, თუ სპირტისა და ვერცხლისწყლის თერმომეტრის ჩვენება ორი წერტილისათვის თანხვედნილია, ეს იმას არ ნიშნავს, რომ თანხვედნილი იქნება შუალედი მაჩვენებლებიც.

დაკვირვებებმა ცხადყო, რომ ამ მხრივ უკეთესი მახასიათებლები აქვთ აირებს. წყალბადი ან აზოტი, მაგალითად, ყოველთვის ზუსტ თანხვედნას გვაძლევს ტემპერატურის დიდი ინტერვალისათვის.

თერმომეტრისათვის იდეალურ თერმოდინამიკურ ნივთიერებად უნდა ჩაითვალოს რაც შეიძლება მცირე წნევის ქვეშ მყოფი აირი. წნევა ამ დროს ნულს უნდა უახლოვდებოდეს.

ც ე ლ ს ი უ ს ი და შ ტ რ ე მ ე რ ი. როდესაც ტემპერატურის გაზომვაზეა ლაპარაკი, ჩვეულებრივ წარმოვიდგენთ ვერცხლის-



წყლის თერმომეტრს ცელსიუსის ასგრადუსიანი სკალით. მართლაც, ვერცხლისწყალი საკმაოდ მოსახერხებელი ნივთიერებაა ჩვეულებრივ პირობებში ტემპერატურის გასაზომად. მაგრამ ტექნიკური მიზნებისათვის გამოყენების დროს მისი მუშაობის შესაძლებლობა, ერთი მხრივ, გამყარებისა ( $-38.87^{\circ}\text{C}$ ) და, მეორე მხრივ, შედარებით დაბალი დუღილის ტემპერატურითაა ( $356.9^{\circ}\text{C}$ ) შემოფარგლული.

საინტერესოა ცელსიუსის ასგრადუსიანი სკალის შემოღების ისტორია. ყინულის დნობისა და წყლის დუღილის წერტილების ტემპერატურული სკალის გამოსავალ წერტილებად გამოყენების იდეა ზუსტად ამ სამასი წლის წინათ წამოაყენა ცნობილმა პოლანდიელმა ფიზიკოსმა ქრისტიან ჰიუგენსმა (1629—1695) ინგლისელ რობერტ ჰუკთან (1635—1703) ერთად. 77 წლის შემდეგ ნიჟიერმა ფიზიკოსმა და ასტრონომმა ანდერს ცელსიუსმა (1701—1744) მის მიერ დაარსებული უპსალის ობსერვატორიისათვის აღნიშნული პრინციპის გამოყენებით დაამზადა ორიგინალური თერმომეტრი, რომლის ნულის დანაყოფი ( $0^{\circ}$ ) შეესაბამებოდა წყლის დუღილს, ხოლო  $100^{\circ}$  ყინულის დნობის წერტილს! ახლა ყველა ჩვენთაგანისათვის ცხადია, რომ ასეთი „შებრუნებული“ სკალა არ შეიძლება მოხერხებული ყოფილიყო. ცელსიუსის სიკვდილის შემდეგ უკანასკნელა საჭირო ნაბიჯი გადადგა მისმა მოწაფემ მორტენ შტრემერმა; მან შეაბრუნა (ახლანდელი ვაგებით შეიძლება ითქვას — გაასწორა) ცელსიუსის სკალა და მისცა მას ის სახე, როგორიც დღეს საყოველთაოდაა მიღებული.

სწორედ ამიტომ იყო, რომ შტრემერის სახელი ეწოდებოდა ამ სკალას შეეციაში კარგა ხნის მანძილზე, სხვა ქვეყნებში კი იგი „შვედურის“ სახელით იყო ცნობილი. ცელსიუსის სახელის უკვდავყოფა მიეწერება გამოჩენილ შვედ ქიმიკოსს იაკობ ბერცელიუსს (1779—1848), რომელმაც თავისი ცნობილი წიგნის — „ქიმიის სახელმძღვანელოს“ III ტომში ასგრადუსიან სკალას ცელსიუსის სკალა უწოდა.

სწორედ ამის შემდეგ დამკვიდრდა მსოფლიოს ყველა ენაში ეს სახელწოდება.

ინდექსის „ $^{\circ}\text{C}$ “ ქვეშ ზოგჯერ გულისხმობდნენ აგრეთვე „ასგრადუსიან სკალასაც“ („Centigrade scale“).

ფარენჰაიტის სკალა. იმის საილუსტრაციოდ, თუ რა ძნელია შესაფერისი მახასიათებლის შერჩევა ამა თუ იმ ფიზიკურ-ტექნიკურ სიდიდეთა საზომი ერთეულის დასადგენად, საკმარისია ფარენჰაიტის ტემპერატურული სკალის მაგალითი ავიღოთ.

ეს სკალა შემოიღო გერმანელმა ფიზიკოსმა, სამინამბერო საქმის კარგმა ოსტატმა დანიელ ფარენჰაიტმა 1724 წელს.

ავტორმა ყინულის ღნობის ტემპერატურა მიიღო  $32^{\circ}$ -ის ტოლად, ხოლო წყლის დუღილისა —  $212^{\circ}$ -ად. მათ შორის მანძილი გაყოფილია 180 ნაწილად. საწყის ნულოვან წერტილად მან ჩათვალა მარილია და ყინულის ნარევის ღნობის ტემპერატურა, რომელიც დაახლოებით  $-20^{\circ}\text{C}$  ეთანადება. ავტორის მოსაზრებით, როგორც ამბობენ, მის სამშობლო მხარეში ტემპერატურა ამ ზღვრის ქვევით არ ეცემა.

$100^{\circ}$ -ად ფარენჰაიტმა, თითქოს, ადამიანის ნორმალური ტემპერატურა აიღო (მაგრამ ეს ტემპერატურა  $37,78^{\circ}\text{C}$  ეთანადება, რაც, ცხადია, „ნორმალურად“ არ შეიძლება მივიჩნიოთ).

საინტერესოა ალინიშნოს, რომ  $-40^{\circ}$  ორივე სკალით თანხვედრენილია, ხოლო  $10^{\circ}\text{C}$  ზუსტად უდრის  $50^{\circ}\text{F}$ .

ის გარემოება, რომ ზოგიერთი ტექნიკურად მოწინავე ქვეყანა, კერძოდ ამერიკა, დანარჩენი მსოფლიოსაგან განსხვავებით, ფარენჰაიტის სკალით სარგებლობს, გარკვეულ უხერხულობას ქმნის არა მარტო მეცნიერებისა და ტექნიკის სფეროში.

ჩვენთვის, მაგალითად, უცნაურად ეღერს ფრაზა, რომ „ექიმმა ავადმყოფს ზომიერი,  $97^{\circ}$ -იანი აბაზანა გამოუწერაო“. მაგრამ მკურნალი არ შემცდარა — იგი ფარენჰაიტის სკალას გულისხმობდა, რაც ცელსიუსით მხოლოდ  $36^{\circ}$ -ია.

გრადუსის ძველი და ახალი „პასპორტი“. ასეთ თუ ისე, მაგრამ ტემპერატურის ძირითადი საზომი ერთეულია — გრადუსის განსაზღვრა ნებისმიერ სკალაში 1954 წლამდე ყინულის ღნობისა და წყლის დუღილის ტემპერატურებს შორის სხვაობაზე იყო დამყარებული. როგორც ვიცით, დედამიწაზე ესოდენ გავრცელებული და სიცოცხლის პირველი განმსაზღვრელი ნივთიერების — წყლის ფიზიკური მახასიათებელი წერტილების მუდმივობიდან გამომდინარეობდა გრადუსის, კალორიისა და ზოგიერთი სხვა ძირითადი და ნაწარმოები საზომი ერთეულის განმსაზღვრელი ცნებებიც.

მაგრამ გამოჩენილ მეცნიერთა ძიებამ ცხადყო, რომ წონისა და ზომის ერთეულთა შერჩევა არც ისე ადვილი საქმეა. ამ პრობლემების ირგვლივ რამდენიმე ათეული წელია მსჯელობენ არა მარტო ცალკეული მეცნიერები, არამედ ავტორიტეტული საერთაშორისო კომისიები და კონფერენციები.

სხვა ძირითადი ერთეულების გვერდით, განსაკუთრებული მნიშვნელობის გამოდგა ტემპერატურის ძირითადი საზომი ერთეულის — გრადუსის ზუსტი განსაზღვრა. ცხადი გახდა, რომ მხოლოდ ამის შემდეგ შეიძლებოდა უნივერსალური ტემპერატურული სკალის შემუშავებაზე ფიქრი.

ერთი შეხედვით თითქოს გასაკვირია, რატომ იქცა მსჭელობის საგნად უკვე საკმაოდ მეცნიერულად დასაბუთებული გრადუსის საერთაშორისო ვიზის მქონე „პასპორტი“, რომელიც 1954 წლამდე იყო ძალაში. თანახმად მანამდე მიღებული შეთანხმებისა, ის მდგომარეობა, რომელსაც იკავებს კაპილარში მოთავსებული ვერცხლისწყალი ყინულის დნობის პროცესში, ანუ უფრო ზუსტად რომ ვთქვათ — ყინულსა და ჰაერით გაჯღენთილ წყლის ორთქლს შორის წონასწორობისას, აღებული იყო, როგორც ნულოვანი წერტილი. იგი ითვლებოდა პირველ ძირითად სარეპერო წერტილად. მეორე ასეთ წერტილს წარმოადგენდა წყლის დუდილის ტემპერატურა. რომელიც ცელსიუსის გავრცელებული სკალის მიხედვით აღინიშნებოდა, როგორც 100°. მანძილი ამ ორ ძირითად წერტილს შორის დაყოფილი იყო 100 თანაბარ ნაწილად — გრადუსად.

სწორედ ეს განსაზღვრა არ ჩათვალეს სპეციალისტებმა საკმაოდ დასაბუთებულად. უფრო მეტიც: იყო ადამიანი, რომელმაც ჯერ კიდევ წარსული საუკუნის ორმოცდაათიან წლებში განჰვერთა. რომ უნივერსალური ტემპერატურული სკალის შექმნა სხვა მოსაზრებაზე უნდა ყოფილიყო დაფუძნებული. ლაპარაკია გამოჩენილ ინგლისელ მეცნიერზე უილიამ თომსონზე (1824—1907), რომელიც უფრო ლორდი კელვინის სახელით არის ცნობილი.

მისი განსაზღვრით ტემპერატურული სკალის საწყისი ანათვალის, 0° არა ორი, არამედ მხოლოდ ერთი რომელიმე მუდმივი წერტილის მიხედვით უნდა იყოს განსაზღვრული. ეს მუდმივი წერტილი სადღაც სკალის შუაშიც შეიძლება იყოს, მაგრამ მას ზუსტად გარკვეული რიცხვითი მნიშვნელობა უნდა მიეწეროს.

აღსანიშნავია, რომ მოგვიანებით იმავე მოსაზრებას ანვითარებდა დ. მენდელეევიც.

უ. თომსონის დასკვნა ემყარებოდა თავის მიერ ჩამოყალიბებული თერმოდინამიკის მეორე კანონს, რაც ზუსტი ტემპერატურული სკალის აგების ძირითადი საყრდენი გახდა.

უ. თომსონმა ჯერ კიდევ 1848 წელს მოგვცა აბსოლუტური ტემპერატურის მკაცრი განსაზღვრა, როგორც ერთ-ერთი თერმოდინამიკური მახასიათებლისა წონასწორულ მდგომარეობაში, რაც თბური ძრავის ინტენსიურობის მაჩვენებელია. იგი არ შეიძლება დამოკიდებული იყოს სხეულის თავისებურებებზე. მისი განსაზღვრისათვის საკმარისია ერთი რომელიმე სარეპერო წერტილის (ათვლის საწყისის) დადგენა და მისთვის ტემპერატურის გარკვეული რიცხვითი მნიშვნელობის მინიჭება; სხვანაირად რომ ვთქვათ, საჭიროა კონკრეტული განსაზღვრა, თუ რას უდრის ამ სკალით რომე-

ლიმე კარგად აღწარმოებადი წონასწორული სისტემის ტემპერატურა.

მრავალი წლის კვლევა და განსჯა დასჭირდა ისეთი, თითქმის იდეალური, წერტილის შერჩევას, რომელიც თერმომეტრული სხეულის თვისებებზე არ იქნებოდა დამოკიდებული; რაც კიდევ უფრო მნიშვნელოვანია, იგი აღწარმოების მაღალი სიზუსტით უნდა გამოირჩეოდეს.

ასეთი აღმოჩნდა არა ყინულის დნობისა და წყლის დუღილის წერტილი, არამედ მის სამ ფაზას — მყარსა (ყინული), თხევადსა და აირადს (წყლის ორთქლი) შორის წონასწორობის ტემპერატურა, რომელიც წყლის სამმაგი წერტილის სახელით არის ცნობილი.

ამ საკითხზე ზომისა და წონის X გენერალურმა კონფერენციამ 1954 წელს მიიღო მნიშვნელოვანი დადგენილება, რომელიც შეთანხმებულია შესაბამის საერთაშორისო ორგანიზაციებთან. იგი 1963 წლიდან სავალდებულოდ ითვლება საბჭოთა კავშირის ყველა სამეცნიერო, ტექნიკური, სავაჭრო და სხვა ორგანიზაციისათვის („გოსტ 5068—61“). ამ დადგენილების მიხედვით ტემპერატურის გაზომვის საფუძველი არის თერმოდინამიკური ტემპერატურული სკალა ერთი ექსპერიმენტულად კარგად აღწარმოებადი წერტილით. მას მიეწერება რიცხვითი მნიშვნელობა  $273,16^{\circ}\text{K}$  (ზუსტად)<sup>3</sup>. მეორე მუდმივ წერტილს წარმოადგენს ტემპერატურის აბსოლუტური ნული ( $0^{\circ}\text{K}$ ).

ტემპერატურის აბსოლუტური ნულის შემოღება არის სკალის ექსტრაპოლაციის შედეგი და არ არის დაკავშირებული რეალურ შესაძლებლობასთან, რომ მივიღოთ ტემპერატურას, რა დროსაც ჩვენ მიერ აღებული სხეულის თვისება გაუტოლდება ნულს.

ამ სკალის მთავარი უპირატესობაა ტემპერატურის ძირითადი საზომი ერთეულის — გრადუსის გაცილებით უფრო ზუსტად აღწარმოების შესაძლებლობა, ვიდრე ეს ყინულის დნობისა და წყლის დუღილის წერტილების შემთხვევაში ხერხდება.

ამგვარად, კ ე ლ ვ ი ნ ი ს გ რ ა დ უ ს ი (რაც ამ მეცნიერის სახელის უკვდავსაყოფად არის დაწესებული) წარმოადგენს ტემპე-

---

<sup>3</sup> საჭიროა კარგად გვახსოვდეს, რომ წყლის სამმაგი წერტილი არ ემთხვევა ყინულის დნობის ტემპერატურას, არამედ  $0,01^{\circ}$ -ით აღემატება მას. პირველ შემთხვევაში წყლის ორთქლის წნევა სამი ფაზის არეში მხოლოდ  $4,579$  მმ (ვერცხლისწყლის სვეტით) აღწევს. მაშინ, როდესაც ყინულის დნობის ტემპერატურის განსაზღვრა ხდება ნორმალურ წნევაზე ( $760$  მმ). ამ დროს ჰაერი უფრო დიდი როლენობითაა გახსნილი წყალში. ორივე ამ ფაქტორის მოქმედება იწვევს ტემპერატურული წერტილის გადაადგილებას  $0,01^{\circ}$ -ით უფრო ქვევით. ამრიგად, ცელსიუსის წინანდელი სკალის ნული ტოლია  $273,15^{\circ}\text{K}$ .

რატურის საზომ ერთეულს თერმოდინამიკური ტემპერატურულ სკალით; ეს ერთეული განისაზღვრება, როგორც  $\frac{1}{273,16}$  ნაწილი ინტერვალისა ტემპერატურის აბსოლუტური ნულიდან წყლის სამმაგი წერტილის ტემპერატურამდე.

ექვსი ძირითადი ცნებიდან (მეტრი, კილოგრამი, წამი, ამპერი, კელვინის გრადუსი, სანთელი), რაც ერთეულების საერთაშორისო სისტემის („სისტემა ინტერნაციონალური“ ანუ შემოკლებით „სი“) საფუძველს წარმოადგენს, ერთ-ერთი მთავარია კელვინის გრადუსი.

საერთაშორისო პრაქტიკული ტემპერატურული სკალა. ტემპერატურის გაზომვის პრაქტიკული შედეგების გამოსახვის საჭიროებისათვის, 1927 წ. ზომისა და წონის VII გენერალურმა კონფერენციამ საჭიროდ სცნო, თერმოდინამიკური სკალის გარდა, შემოეღო მეორე, ე. წ. საერთაშორისო პრაქტიკული ტემპერატურული სკალა. შესაბამისი დებულება დამტკიცდა 1948 წელს IX გენერალურ კონფერენციაზე, ხოლო XI ასეთივე კონფერენციამ 1960 წელს მიიღო ამ დებულების ახალი რედაქცია. რომელიც ამჟამად მოქმედებს. მისი მიხედვით, 1948 წლის საერთაშორისო პრაქტიკულ სკალაზე ტემპერატურა გამოისახება ცელსიუსის გრადუსებით, აღინიშნება „°C“, ან „°C (საერთაშორ. 1948 წ.)“ და წარმოდგენილია სიმბოლოთი — „t“ ან „t (საერთაშორ.)“

ამ სკალის შემოღება ამარტივებს ტემპერატურის გაზომვის მეთოდებს. სკალა ემყარება ქიმიურად სუფთა ნივთიერებების გამყარებისა და დუღილის ექვს სარეპერო წერტილს, რომლებიც საკმაოდ სანდო და კარგად აღწარმოებადი არიან; ამასთანავე, მათ ზუსტად განსაზღვრული რიცხვითი მნიშვნელობა მიეწერებათ (იხ. ცხრილი 2).

აღნიშნული მუდმივი სიდიდეები დადგენილია წონასწორობის მდგომარეობის შესაბამისად, ნორმალური ატმოსფერული წნევის (101325 ნიუტონი კვ. მეტრზე) პირობებში.

საერთაშორისო პრაქტიკული ტემპერატურული სკალის ქვედა ზღვრად აღებულია სუფთა ეანგბადის დუღილის ტემპერატურა, ტოლი —  $182,97^{\circ}\text{C}$  (ანუ  $90,19^{\circ}\text{K}$ ), ხოლო ზედა ზღვრად — ოქროს გამყარების ტემპერატურა, რომელიც უდრის  $1063^{\circ}\text{C}$ .

ტემპერატურის შუალედის —  $182,97^{\circ}$ -დან  $630^{\circ}\text{C}$ -მდე — სახელწოდებად მიღებულია საშუალო ტემპერატურათა სფერო.

ქვედა ზღვრის ქვევით გვაქვს დაბალი ტემპერატურების სფერო, რომელიც შესაძლებელია მივიღოთ წყალბადით ( $90^{\circ}$ -

დან 10°K-მდე) და პელიუმით (10°-დან 1°K-მდე) გაცივების შედეგად.

10°K ქვევით, პელიუმის დუდილის ტემპერატურამდე (4,2°K), გვაქვს ე. წ. შუალედური სფერო, რომელიც პრაქტიკული თერმომეტრიისათვის დიდ სიძნელეებს ჰქმნის.

1°K ქვევით მდებარე ტემპერატურებს ქვედაბალი ტემპერატურები ეწოდება.

უმდაბლესი ტემპერატურა, რომლის მიღება ჯერჯერობით მოხერხდა, არის  $2 \cdot 10^{-5} K$  ახლოს.

საერთაშორისო პრაქტიკული ტემპერატურული სკალის სარეპერო წერტილები

№ რიგზე	სარეპერო წერტილები	მიღებული მნიშვნელობა,	სტანდარტული ცდობა,
1	ჟანგბადის დუდილის ტემპერატურა (თხევად ჟანგბადსა და მის ორთქლს შორის წონასწორობის ტემპერატურა)	-182,97	$\pm 3 \cdot 10^{-2}$
2	წყლის სამმაგი წერტილი (ყინულსა, თხევად წყალსა და წყლის ორთქლს შორის წონასწორობის ტემპერატურა)	0,01	$\pm (1 \div 2) \cdot 10^{-1}$
3	წყლის დუდილია ტემპერატურა (თხევად წყალსა და მის ორთქლს შორის წონასწორობის ტემპერატურა)	100	$\pm (5 \div 7) \cdot 10^{-4}$
4	გოგირდის დუდილის ტემპერატურა (თხევად გოგირდსა და მის ორთქლს შორის წონასწორობის ტემპერატურა)	444,6	$\pm (5 \div 7) \cdot 10^{-4}$
5	ვერცხლის გამყარების ტემპერატურა (მყარ და თხევად ვერცხლს შორის წონასწორობის ტემპერატურა)	960,8	$\pm 0,1$
6	ოქროს გამყარების ტემპერატურა (მყარ და თხევად ოქროს შორის წონასწორობის ტემპერატურა)	1063	$\pm 0,1$

სიზუსტის შემცირება ორ უკანასკნელ შემთხვევაში გამოწვეულია იმით, რომ 630—1063°-ის უბანზე ინტერპოლაცია მხოლოდ თერმოწყვილით ხერხდება, მაშინ როდესაც უფრო დაბალი ტემპერატურების გასაზომად მეტი სიზუსტის მქონე პლატინის წინააღმდეგობის თერმომეტრი იხმარება.

საკითხის არსს თუ ღრმად ჩავუყვირდებით, ვნახავთ, რომ სკალის უზნისათვის, სადაც ტემპერატურის გაზომვას თერმოწყვილით

<sup>4</sup> იმის გამო, რომ გოგირდის დუდილის ტემპერატურის განსაზღვრა შედარებით დიდი ცდომილებით ხდება, დებულების თანახმად, მის ნაცვლად აიღება თუთიის გამყარების ტემპერატურა, რაც ტოლია 419,505°C.

ახდენენ. გრადუსის ზომა ტემპერატურული სკალის მუდმივი წერტილების რიცხვითი მნიშვნელობების დადგენის სიზუსტეზეა დამოკიდებული.

კელვინისა და ცელსიუსის სკალის გრადუსები პრაქტიკულად ერთნაირია, მაგრამ, ზედმეტად მკაცრად თუ ვიმსჯელებთ, საერთაშორისო პრაქტიკული ტემპერატურული სკალის გრადუსის ზომა ზუსტად არ უდრის აბსოლუტური თერმოდინამიკური ტემპერატურული სკალის გრადუსის ზომას. სკალებს შორის არსებული ცნობილი ფარდობების სიდიდე (რაც წლების მიხედვით კიდევ უფრო ზუსტდება) საშუალებას გვაძლევს ტემპერატურის ყველანაირი გაზომვა საბოლოო ჯამში თერმოდინამიკურ სკალამდე დავიყვანოთ.

ორივე სკალით ტემპერატურა შეიძლება გამოვსახოთ როგორც კელვინის, ისე ცელსიუსის გრადუსებით, იმის მიხედვით, თუ რას ვიღებთ ათვლის საწყის, ანუ ნულის მდებარეობის წერტილად.

აბსოლუტური თერმოდინამიკური ტემპერატურა აღინიშნება  $T$ , ხოლო თერმოდინამიკური —  $t$ .

საერთაშორისო პრაქტიკული თერმოდინამიკური სკალით ტემპერატურა აღინიშნება  $t_{\text{საერთაშორ.}}$  ან  $t_{\text{IP}}$ , ხოლო გრადუსები

$^{\circ}\text{C}$  (საერთაშორ. 1948) ან  $^{\circ}\text{C}$  (Int. 1948). ასეთივე ინდექსები აქვს კელვინის გრადუსებსაც. მაგრამ პრაქტიკაში ინდექსებს არ ხმარობენ.

რენკინის სკალა. ამერიკის შეერთებულ შტატებში, ავსტრალიასა, კანადასა და ზოგიერთ სხვა ქვეყანაში ხმარობენ ტემპერატურულ სკალას, რომელიც ფარენჰაიტის პრაქტიკული გრადუსებითაა ( $^{\circ}\text{F}$ ) დაგრადუირებული და რენკინის სკალად იწოდება.

პირველის შესახებ უკვე გვქონდა საუბარი. რაც შეეხება მეორეს, მისი გრადუსების, როგორც ტემპერატურული შუალედის, ზომა ემთხვევა ფარენჰაიტისას (ისევე, როგორც ცელსიუსისა და კელვინის გრადუსები), მაგრამ ტემპერატურის ქვედა ზღვრად რენკინმა აიღო აბსოლუტური ნულის მნიშვნელობა ( $0^{\circ}\text{K}$ ). ყინულის დნობის ტემპერატურა ამ სკალაში  $459,67^{\circ}\text{R}$  დონეზეა.

ოთხივე დასახელების გრადუსებს შორის შემდეგი სახის დამოკიდებულება არსებობს:

$$t_{\text{C}} = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32) = T_{\text{K}} - 273,15 = \frac{5}{9}T_{\text{R}} - 273,15$$

5 ეწოდა შოტლანდიელი ინჟინრისა და ფიზიკოსის უ. რენკინის (1820—1872) პატივსაცემად.

$$T_K = t_c + 273,15 = \frac{5}{9} t_F + 255,37 = \frac{5}{9} T_K$$

აირის თერმომეტრები. შეიძლება ისეთი აირებისა და პირობების შერჩევა, როდესაც რეალური აირების თვისებები დაუახლოვდება იდეალურისას. ასეთად უწინ წყალბადი ითვლებოდა, ამჟამად კი ჰელიუმსა და აზოტს აძლევენ უპირატესობას. ამასთანავე, იდეალურთან მიახლოვება მით მეტია, რაც ნაკლებია წნევა.

ჰელიუმი და აზოტი კარგი თერმომეტრული მასალა გამოდგა, კერძოდ, მეცნიერული და ტექნიკური გაზომვებისათვის საჭირო თერმომეტრების დაგრადუირებისა და რეპერული წერტილების დაზუსტებისათვის.

ტემპერატურის ცვლილების გაზომვას ამ შემთხვევაში საფუძვლად აქვს კვარცის, ლითონის ან მინის მცირე ბალონში მოთავსებული აირის მოცულობის ან წნევის ცვლილების გაზომვა. ვინაიდან იმ კაპილარის მოცულობა, რომლითაც ბალონი მანომეტრს უერთდება, მკვნი მოცულობას წარმოქმნის და შედეგებში ძნელად განსასაზღვრი შესწორებების შეტანას მოითხოვს, ამიტომ მიმართავენ არა აირის მოცულობის გაზომვას, არამედ იმ წნევის გაწონასწორების ხერხს, რასაც აირი ანვითარებს სპეციალურ მემბრანაზე. მგრძნობიარე ელექტრონული სქემა ზუსტი ანათვალების მიღების საშუალებას იძლევა.

მიუხედავად კონსტრუქციული სქემის გადატვირთვისა და მუშაობის სირთულისა, აირიან თერმომეტრებს დიდი მნიშვნელობა აქვთ, როგორც პირველად თერმომეტრულ ინსტრუმენტებს. მისი სკალა თერმოდინამიკურ აბსოლუტურ სკალასთან თანხვედნილია. რეალური აირების გამოყენებით მიღებულ შედეგებში საჭიროა სათანადო შესწორებების შეტანა, რაც საერთაშორისო დადგენილებებით არის რეგლამენტირებული.

აირიან თერმომეტრების გამოყენების სფეროა  $4^{\circ}\text{K}$ -დან ოქროს დნობის ტემპერატურამდე ( $1063^{\circ}\text{C}$ ).

უფრო დაბალი ტემპერატურების გაზომვა დამყარებულია პარამაგნეტიკების მაგნიტური ამთვისებლობის ტემპერატურის მიხედვით განსაზღვრაზე.

აბსოლუტური მყუდროების სამყაროში. ყველაზე შესაფერისი მასალა თერმომეტრისათვის, ცხადია, ისეთი იდეალური აირი იქნებოდა, რომლის ნაწილაკებს არც მოცულობა გააჩნიათ და არც ერთმანეთთან ურთიერთქმედებენ.



ამ შემთხვევაში საშუალება გვეძლევა გამოვიყენოთ იდეალური აირის კანონები. კერძოდ, ზუსტი თანაზომიერებით წარმართება აირის მოცულობის ცვლილებაც ტემპერატურის მიხედვით. მაგრამ მოცულობის შემცირების საზღვარია ნული. მასზე ნაკლები, ე. ი. უარყოფითი მოცულობა ხომ წარმოუდგენელია! როგორც გამოირკვა, აირი ცელსიუსის ერთი გრადუსით გაცივებისას მოცულობაში  $\frac{1}{273,15}$  ნაწილით იკლებს.

მაშასადამე, ცინულის დნობის ტემპერატურიდან ( $0^{\circ}\text{C}$ ) აირის ნულ მოცულობამდე დაყვანისათვის საჭირო იქნება მისი  $273,15^{\circ}$ -ით, ე. ი.  $-273,15^{\circ}\text{C}$ -მდე გაცივება. ამ წერტილს ეწოდება ტემპერატურის აბსოლუტური ნული — ზღვარი ყოველგვარი თბური ძრაობის არსებობისა.

ეს წერტილი შემთხვევით ან რომელიმე ნივთიერების რაიმე თვისებების შესაბამისად არ არის არჩეული; იგი შეესაბამება უმცირეს ტემპერატურას, რომელიც ბუნებაში შეიძლება არც არსებობდეს. მაშასადამე, იგი პრაქტიკულად არც მიიღწევა და ამიტომ ზღვარია ყოველი რაციონალური ტემპერატურული სკალისა.

როგორც ფილოსოფიური გაგებით, ისე თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობით აბსოლუტური ნული მრავალმხრივ არის შესანიშნავი. ტემპერატურის ამ ქვედა საზღვარზე სხეულს არავითარი საშუალებით არ შეიძლება წავართვათ სითბო, ვინაიდან ნაწილაკების კინეტიკური ენერჯია ნულის ტოლია, ხოლო პოტენციალურს უმცირესი შესაძლებელი მნიშვნელობა აქვს.

აბსოლუტური ნულის ახლო ტემპერატურების კვლევამ მეცნიერები მრავალი მოულოდნელი და საკვირველი მოვლენის წინაშე დააყენა. რად ღირს, კერძოდ, ზოგიერთი სითხის ზედენადობა ან ლითონის ზეგამტარობის თვისების აღმოჩენა. ეს უკანასკნელი თვისება 26-მდე ლითონისათვის (ელემენტისათვის) და 50-მდე შენადნობისა და ნაერთისათვისაა ნაჩვენები. ძლიერ დაბალ ტემპერატურებზე ლითონები თურმე კარგავენ ელექტროწინალობის თვისებას, რის გამოც მისი უებრუნებული სიდიდე — ელექტროგამტარობა ათასჯერ და მილიონჯერ იზრდება. სხვანაირად რომ ვთქვათ, ასეთ გამტარში აღძრული დენი განუწყვეტლივ ცირკულირებს წყაროს გამორთვის შემდეგაც. მიზეზი, როგორც ფიქრობენ, ელექტრონთა წყვილის წარმოქმნაა, რომელთა ძრაობა ზუსტად ემთხვევა იონთა რხევას კრისტალური გისოზის კვანძებში.

ზეგამტარ მდგომარეობაში ლითონებს აღმოაჩნდათ მეორე საკვირველი თვისებაც — განზიდავენ მაგნიტურ ძალხაზებს და მაგ-

ნიტური ველი მათში ყოველთვის ნულის ტოლია. ლითონებისაგან განსხვავებით, არალითონებს გამტარი ელექტრონები მხოლოდ მაღალ ტემპერატურაზე აღმოუჩნდებათ ხოლმე. აბსოლუტური ნულის ახლოს ეს თვისება საერთოდ ქრება.

სადა აქვთ მეტი მიღწევები ფიზიკოსებს? ატომგულური რეაქციების პრაქტიკული მიზნებით გამოყენების შედეგად აღამიანმა მართლაც რომ გრანდიოზული ნაბიჯი გადადგა ულტრამალალი ტემპერატურების დაუფლების სფეროში. ეს მეტად საპატიო გამარჯვებაა ბუნების საიდუმლოებათა შეცნობის ესოდენ ძნელ, მაგრამ საინტერესო გზაზე.

ტემპერატურები, რაც ატომური ბომბის აფეთქების დროს ვითარდება ცეცხლოვანი ბირთვის შიგნით, ხოლო უკანასკნელ ხანებში კი ლაბორატორიულ პირობებშიაც იქნა მიღწეული, რამდენიმე ათეული მილიონი გრადუსის საზღვარს სცილდება. კელვინის სკალით თუ ვიანგარიშებთ, ეს ტემპერატურები 10—15 ათასჯერ აღემატება ნორმალურ ტემპერატურას.

რა მდგომარეობაა ტემპერატურული სკალის მეორე პოლუსზე? ქვედა ზღვარი, რომლის მიღწევაც ხელოვნურ პირობებში მოხერხდა, არის  $0,00002^{\circ}\text{K}$ . მაგრამ ესეც მკვლევართა დიდ გამარჯვებად ითვლება. მართლაც, მათემატიკური ენით რომ ვილაპარაკოთ, ეს ტემპერატურა 14,5 მილიონჯერ ნაკლებია, ვიდრე ნორმალური:

$$\frac{273,16 + 20}{0,00002} = 14500000,$$

რაც ააქვრ და მეტად აღემატება ულტრამალალი ტემპერატურების სფეროში მოპოვებულ წარმატებას. მიუხედავად იმისა, რომ ცეცხლსა და მაღალ ტემპერატურებს აღამიანი ათეული ათასი წლის წინათ იცნობდა, სამაცივრო ტექნიკას არც ისე დიდი ხნის ისტორია აქვს. დაბალი ტემპერატურების მიღების სიძნელეზე მიუთითებს ისიც, რომ სითბოს ერთეულის — კალორიის მიღება აღამიანს ათჯერ ნაკლები უჭდება, ვიდრე სიცივის ერთეულის — ფრიგორიისა.

ძლიერ დაბალი ტემპერატურის შესწავლამ თეორიის არა ერთ მნიშვნელოვან საკითხზე უნდა მოძებნოს პასუხი. მოსალოდნელია, რომ იგი გადატრიალებას მოახდენს ტექნიკის ბევრ წამყვან დარგშიაც. დაბალი ტემპერატურების დაუფლების შედეგად, უკვე ამჟამად დანერგვის სტადიაშია ისეთი ქიმიური პროცესები, რომელთა განხორციელებაზე ფიჭრი უწინ არც შეიძლებოდა. ამიტომ გასაგებია ის დიდი შრომა, რაც არა მარტო მაღალი, არამედ დაბალი ტემპერატურების კვლევისაკენ არის მიმართული.

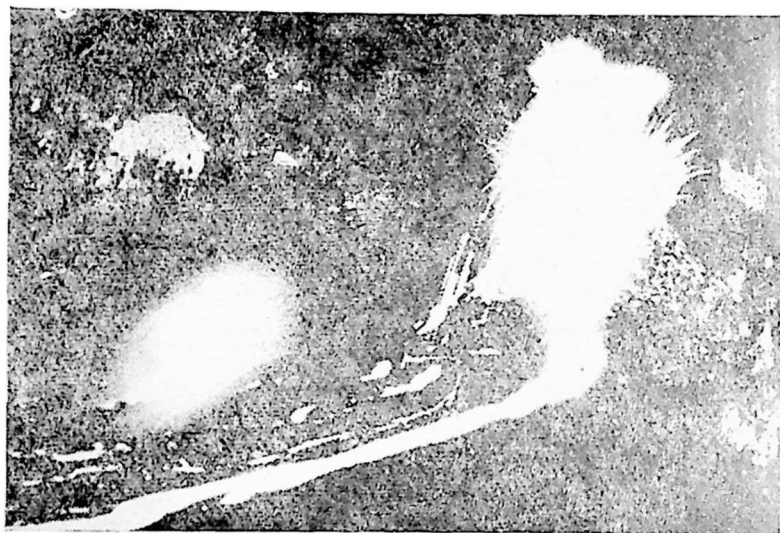
## ბუნების მაღალტემპერატურული დაბოლოებები

„პლუტონის სამეფოში“. ადამიანს უხსოვარი დროიდან აკვირვებდა და იზიდავდა ბუნებრივი მაღალტემპერატურიანი „ლაბორატორიების“ — ვულკანების, კეკა-ქუხილისა და ჩვენი მნათობის — მზის საიდუმლოება. მათი ქმედების მექანიზმის დასადგენად მხოლოდ უკანასკნელ ათეულ წლებში მოხერხდა პირველი ნაბიჯების გადადგმა. გამოიჩქვა. რომ ამ საიდუმლოებათა შეცნობა ენერჯის საზღაპრო რესურსებისა დაუფლებისა და, მაშასადამე, ადამიანთა კეთილდღეობის ნებისმიერ სიმაღლეზე აყვანის წინაპირობაა.

მაგრამ ბუნებრივი მაღალტემპერატურიანი პროცესები ყველგან ერთნაირად არ არის შესწავლილი. ამ მხრივ საკმაოდ უცნაურადაც კი ეღერს იმის აღიარება, რომ შორეულ ვარსკვლავთა ჯურღმულების საიდუმლოებაში მეცნიერები უკეთ არიან ჩახედულნი, ვიდრე ჩვენი მშობლიური პლანეტის წიაღსა და იქ მიმდინარე პროცესების რაობაში. მეტად მიუყარებელი გამოდგა ის საბურველი, რომელიც მრისხანე „პლუტონის სამფლობელოს“ აკრავს თითქმის 3 000 კმ სისქის მანტიისა და რამდენიმე ათეულ კილომეტრიანი გარეთა ქერქის სახით. ერთობ საიმედოდ იცავენ იქ ჩამარხულ საუნჯეებს სამთავიანი „ცერბერები“ — მაღალი ტემპერატურები, უდიდესი სამთო წნევები და ჭიმიურად აგრესიული გარემო. მაშინ, როდესაც ადამიანი უკვე 250 კმ სიმაღლეზე აიჭრა კოსმოსში, ქვევით, მიწის წიაღში, მისი სისქის მხოლოდ მეათასედი თუ არის მოსინჯული — სულ რაღაც ხუთი-ექვსი კმ.<sup>6</sup> 15 კმ სიღრმეზე ჩასასვლელად მზადება კი მხოლოდ ახლა მიმდინარეობს. ბურღვა განზრახულია დაიწყოს კოლის ნახევარკუნძულის გრანიტებსა და ბაზალტებში (სიადვილისათვის) და ჰავაის კუნძულებთან — ოკეანის ფსკერზე. იმედოვნებენ, რომ 1972 წლისათვის შესაძლებელი იქნება პირველი სინჯების ამოღება ბაზალტის ქვედა ფენებიდან.

<sup>6</sup> ერთადერთი ღრმა კაბურღილი ამჟამად გაყვანილია ტეხასში (აშშ) — 7724 მ, მაგრამ მცირე სიღრმის გამო იგი მხოლოდ გრანიტების ფენას წვდება და მეცნიერებისათვის საინტერესო დასკვნების გამოტანის საშუალებას არ იძლევა.

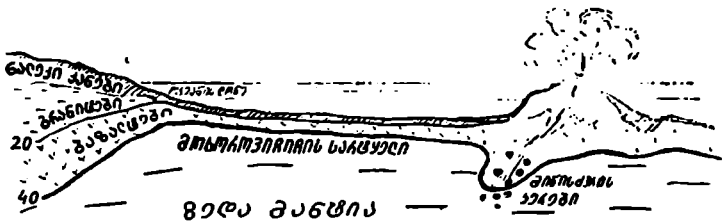
როგორც ვარაუდობენ, იქ  $400^{\circ}$ -მდე სიცხე უნდა იყოს. უფრო ღრმად კი, სადაც ე. წ. მოზოროვიჩიჩის სარტყელია. მანტიის ზედა ფენები ალბათ  $1200^{\circ}$ -მდე ნაინც იქნება გავარვარებული<sup>7</sup>. ამაზე მეტყველებს წიალიდან ამონადენი ვულკანური ლავა. ამ გავარვარებული „მდინარის“ ტემპერატურა კრატერთან სომ  $1000^{\circ}$  და ზოგჯერ მეტიცაა.



გავარვარებული ლავის ნაკადი შამუშუმბეს მთის კრატერიდან (კოსგო)

მანტიისა და დედამიწის გულის გამყოფი წარმოსახვითი ზედაპირის ტემპერატურა  $3500-4000^{\circ}$ -მდეა ნავარაუდები. ალბათ ამიტომ შეარქვა ადამიანმა ქვეცნობიერად მას საშინელებათა სამყაროს — ტარტარის სახელი. ასეთ პირობებში მანტიის შემდგენელი სილიკატური და ალუმინ-სილიკატური ქანები თითქოს თხევად მდგომარეობაში უნდა იყოს. მაგრამ სეისმური დაკვირვება გვიჩვენებს, რომ მანტიის ნივთიერება სამჯერ და ოთხჯერ უფრო მაგარია, ვიდრე ყველაზე სალი ფოლადი. ამ შემთხვევაში გარკვეულ როლს უნდა ასრულებდეს უდიდესი, მილიონი ატმოსფეროს ტოლი სამთო წნევები. რომლებიც იქ მძვინვარებს. საფიქრებელია, რომ

<sup>7</sup> უკანასკნელი მონაცემებით, არც ჩვენი მთვარე არის დედამიწის ცივი თანამგზავრი. პირიქით — მისი წიაღი საკმაოდ ძლიერადაც უნდა იყოს გავარვარებული. როგორც ვარაუდობენ, მის სიღრმეში ტემპერატურა  $50^{\circ}$ -ჯერ უფრო ინტენსიურად მატულობს ( $1,5^{\circ}$  ყოველ მეტრზე), ვიდრე დედამიწის წიაღში.



სიღრმე მ	ტემპერატურა °C	სიჩქარე მ/წმ	წონა ტონა
150	1000°	3,5	60 000
500	2200°	4,0	200 000
1000	2600°	4,3	400 000
2000	3600°	5,0	800 000
		5,5	1 300 000
3000	3800°	10,0	1 400 000
4000	4000°	11,5	2 200 000
5000	4000°	12,2	3 200 000
6000	4000°	12,6	3 600 000

ასე წარმოგვიდგება ლეღამი-  
წის პრილი აქედან. უზრაღლბას  
იხსრობს ნივთიერების კუთრი წო-  
ნის ნახტომისგან უკლებლად გუ-  
ლისა და ნახტომის განყოფ ზედა-  
პირზე. მაქსიმალურ წნევაზე (3,2 მლნ  
ტნ) მიწის გულში (ნივთიერება მზის  
ზედაპირის ტემპერატურამდე (5000°)  
უნდა იყოს გავარეკებული. ლეღამი-  
მიწის გარეთა ქერქში, რომელიც  
თხელ ნაქუქად იყვარს ჩვენს პლა-  
ნეტას. სამ ძირითად ფენას არჩევენ:  
ქვეით — ბაზალტებია. შემდეგ —  
კონტიენტების შემდეგნელი გრანი-  
ტები, ხოლო ზევით — დანალექი ქა-  
ნები. სწორედ ამ უკანასკნელის ეი-  
წრო ზოლშია თაემოყრილი ნავთო-  
ბისა და ნახშირის. საწვავი აირის,  
მარილებისა და მანუელის მარაგი.  
გრანიტებისა და ბაზალტების ფენა  
ზღვის ქვეშ ათჯერ უფრო თხელია  
(4—5 კმ), ვიდრე ხმელეთის ქვეშ  
(30—40 კმ).

ასეთ პირობებში ნივთიერებას ჩვენთვის უცნობი ახალი თვისებები გამოუვლინდება.

მ აღსანიშნავია უკანასკნელ ხანებში ჩატარებული გაანგარიშების მოულოდ-  
ნელი შედეგი: ვარსკვლავების შიდა არეებშია ცი, ულტრამალ ტემპერატურ-  
ებისა და ზემალაღი წნევების პირობებში, როდესაც ატომების ელექტრონუ-  
ლი გარსები „გაქვლეტილია“ და ნაწილაკებს 100 კმ/წმ სიჩქარე აქვთ, ნივთიერება  
თითქოს არა პლაზმის სახით, არამედ კრისტალურ მდგომარეობაში უნდა იყოს!  
მეცნიერები თანდათან იხრებიან იმ მოსაზრებისაკენ, რომ მიწის გულიც ალბათ  
მყარ მდგომარეობაშია.

ადამიანის ოცნება მუდამ იყო ძუნწი პლუტონის სამფლობელოში ჩახედვა. მიზანი არა მარტო იქ დაგროვილი საუნჯის — ნავთობისა და ნახშირის, საწვავი აირის, მარილის, მადნეულისა და სხვათა დაუფლებაა კაცობრიობის საკეთილდღეოდ. კიდევ უფრო მნიშვნელოვანია ისეთი ძირეული საკითხების გადაწყვეტა, რომელნიც არა ერთი საუკუნეა აღეღებს ჩვენს გონებას და გადაულახავ კედლად ელობება ტექნიკის წინსვლას. გაეარვარებული იყო და ეხლა ცივდება ჩვენი პლანეტა, თუ პირიქით; ხდება თუ არა მიწის წიაღში ორგანულ ნივთიერებათა სინთეზი არაორგანულისაგან; რა ახალი თვისებები შეიძლება გამოუვლინდეს მატერიას ზემალე ტემპერატურებსა და წნევებზე; როგორ წარმოიშობიან მატერიკე-



ოკეანისქვეშა ვულკანის ამოფრქვევა აზორის კუნძულებზე. ამოფრქვევის ძალა ატომური ბომბის აფეთქებას არ ჩამოუვარდება.

ბი; რატომ გადაადგილდებიან ელემენტები მიწის ქერქისაქენ; რას მიეწერება მაგმატიზმის კერების წარმოქმნა და სხვა მრავალი. ყოველი ამ პრობლემათაგანის გადაწყვეტა უაღრესად მნიშვნელოვანია ადამიანისათვის. რად ღირს. მაგალითად, ვულკანების საიდუმლოების დაუფლება! მათი მოქმედება ხომ ღიდ ზეგავლენას ახდენს მიწის ქერქის ცვლილებებზე და, მაშასადამე, მის მომავალზე.

მიწის სიღრმეში იმალება თბური ენერგიის უსაზღვრო და იაფი წყაროც. მართალია, მისი გამოყენების მეთოდები ჯერ კიდევ არ არის მიგნებული, მაგრამ რამდენადაც ძნელი არ უნდა გამოდგეს ეს, შრომა მაინც ღირს იმ გრანდიოზულ შესაძლებლობად, რასაც

იქ დაგროვილი ენერჯის დაუფლება მისცემდა კაცობრიობას. ჯერ კიდევ ბუნდოვანია — რის შედეგად წარმოიქმნება სითბოს ეს უშრეტი წყარო — ქანების დიდი მასების გადაადგილების დროს განვითარებული მექანიკური ხახუნით, თუ რადიოაქტიურ ნივთიერებათა დაშლის შედეგად, რაც მათ მიწის ქერქისავე გადაადგილებასა და დაგროვებას უნდა მოსდევდეს.

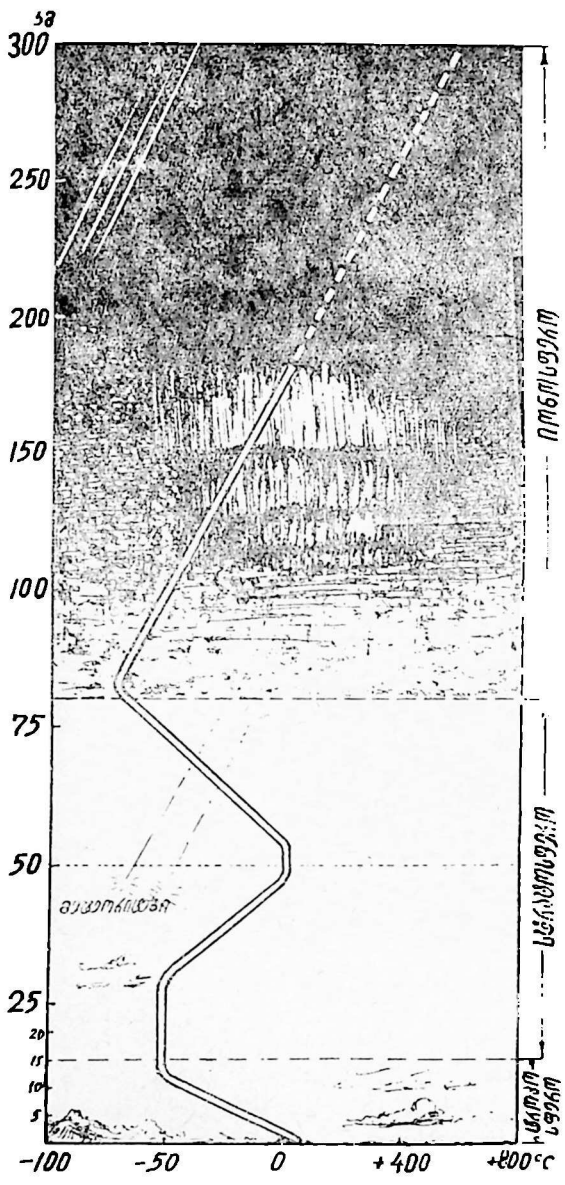
მიწის წიაღის მაღალი ტემპერატურების, უწინარეს ყოვლისა კი ვულკანური ლავის ენერჯის დაუფლების იდეა დიდი ხანია იპყრობს მეცნიერთა ყურადღებას, მაგრამ ჯერჯერობით ამაოდ. იმედოვნებენ, რომ „მიწისქვეშა კოსმოსის“ ევლევია სეზამის სანუკვარ გასაღებს მისცემს ადამიანს „პლუტონის სამეფოში“ შესაღწევად.



გამღვალი ლავის ტბა ვულკან კილაუზეს კრატერში (ჰაეისი კუნძულები)

სტრატოსფეროში სიცივე, კოსმოსში კი... ატმოსფერო საიმედო საბურველად ეკვრის დედამიწას, იცავს რა მას როგორც მზის მწველი გამოსხივების მავნე მოქმედების, ისე კოსმოსური სიცივისაგან. სწორედ ასეთი საიმედო „ქურქის“ წყალობითაა, რომ დედამიწაზე შედარებით მცირედ ცვალებადი თანაზომიერი ტემპერატურა სუფევს. მართალია, აქაც გვაქვს უფრო მაღალი,  $+58^{\circ}$ -მდე უდაბნოებსა და ეკვატორიალურ ქვეყნებში (კერძოდ, კალიფორნიის „მკვდარი ველის“ მიდამოებში და საჰარაში),

3. ა. ავალიანი



ტემპერატურის ცვალებადობა სიმაღლის მიხედვით



და უფრო დაბალი, —  $90^{\circ}\text{C}$ -მდე (ანტარქტიდის პირობებში) ტემპერატურები; მათი მერყეობა საგრძნობია წელიწადის დროთა მიხედვითაც, მაგრამ დედამიწის ზედაპირის საერთო საშუალო წლიური ტემპერატურა საკვირველი მუდმივობით ხასიათდება. ვარაუდობენ, რომ მისი თუნდაც  $1^{\circ}$ -ით შეცვლა კატასტროფულ ცვლილებებს გამოიწვევდა.

ვიდრე აღამიანი კოსმოსში ფეხს შედგამდა, ცნობილი იყო, რომ მიწის ზედაპირის ახლოს (ატმოსფეროში) ტემპერატურა სიმაღლის მიხედვით დაახლოებით თანაზომიერად ეცემა — საშუალოდ 5—6 გრადუსით ყოველ კილომეტრზე; ასე, რომ 20—30 კმ დონეზე საკმაოდ ყინავს — დაახლოებით —  $50^{\circ}\text{C}$ . მოსალოდნელი იყო, რომ უფრო ზედა ფენებში — ტროპოსფეროსა და იონოსფეროში, და მით უმეტეს კოსმოსის უკიდვგანო სივრცეში საშინელი სიცივე იქნებოდა —  $220^{\circ}\text{C}$  მაინც! მაგრამ აქ მეტად საინტერესო მოვლენას წააწყდნენ მეცნიერები: გამოიკვია, რომ იქ მოძრავ ნაწილაკებს არამც თუ დაბალი, არამედ პირიქით — საოცრად მაღალი ტემპერატურა აქვთ — რამდენიმე ათას გრადუსამდეც კი! მაშასადამე, თითქოს არ არსებობს მასალა, რომლისგანაც კოსმოსის პირობების გამძლე ხომალდი შეიძლება დამზადდეს! ახლა ყველამ ვიცით, რომ ეს ასე არ არის. მაგრამ მეცნიერული მონაცემებიც ხომ სარწმუნოა! რაშია საქმე? უშუალო გაზომვებმა აჩვენეს, რომ კოსმოსური ხომალდის განათებულ მხარეზე თერმომეტრი მხოლოდ  $30\text{—}40^{\circ}\text{C}$  გვიჩვენებს, ჩრდილოვან მხარეზე კი ტემპერატურა —  $200^{\circ}$ -მდე ეცემა. ასეთი „შეუსაბამობის“ მიზეზია ის, რომ კოსმოსურ სივრცეში, კერძოდ 200 კმ სიმაღლეზე, სადაც კოსმოსური ხომალდების ტრასა გადის, ატომების ან ელემენტალური ნაწილაკების სრბოლის სიჩქარე იმდენად დიდია, რომ ათასი და მეტი გრადუსის ტემპერატურას შეესაბამება (ტემპერატურას ხომ ნაწილაკთა კინეტიკური ენერგია განსაზღვრავს), მაგრამ თვით ამ ნაწილაკების კონცენტრაცია უაღრესად მცირეა — 1 კმ<sup>3</sup> სივრცეში მათი სიმკვრივე სულ რაღაც 50 გრამი თუ იქნება! ამიტომ, თუმცა თვითუღი ნაწილაკის ენერგია საკმაოდ დიდია, მაგრამ მათი ხომალდის გარსაცმთან შეჯახებათა რაოდენობა ისე მცირე, რომ არ ძალუძს გარსაცმის ტემპერატურის რამდენადმე აწევა. ტემპერატურის ცვალებადობა კი ხომალდის განათებულ და ჩრდილოვან მხარეს, რაც აგრეთვე საგრძნობ სიდიდეს აღწევს და გარკვეულ მექანიკურ დაჰიმულობას ქმნის მის კორპუსში, მხოლოდ მზის სხივების მოქმედებით არის გაპირობებული.

ნივთიერებათა განსხვავებული კონცენტრაციით აიხსნება ის გარემოებაც, რომ მზის ხილული ზედაპირი — ფოტოსფერო, რომ-

ლის ტემპერატურა 6000° არ აღემატება, სინათლისა და სითბოს უფრო მძლავრ გამოსხივებას იძლევა, ვიდრე მზის გარეთა გვირგვინი, და ეს მაშინ, როდესაც ამ უკანასკნელის ტემპერატურა მილიონ გრადუსებს შეიძლება აღწევდეს.

მზის გვირგვინში ნაწილაკები, მართალია, უფრო სწრაფად მოძრაობენ (სწორედ ამიტომ არის მათი ტემპერატურა მაღალი), ვიდრე ფოტოსფეროში. მაგრამ ურთიერთ ძლიერი დაშორების გამო მათი შეჯახებები, რაც გამოსხივებას იწვევს, გაცილებით ნაკლებად ხდება. ცხადია, რომ მისი გამოსხივების საერთო ეფექტიც ნაკლებია, ვიდრე ფოტოსფეროსი.

ელვის ტემპერატურა. ვულკანებს გარდა, ადამიანს მუდამ აოცებდა ბუნების მეორე მაღალტემპერატურიანი სოველენა — ქექა-ქუხილი. დედამიწის ატმოსფეროში ყოველდღე 50 000-ჯერ მაინც გაიელვებს და დაიქუხებს ხოლმე (საშუალოდ თითო ელვა 2 წამში).

ელვის ელექტრული ბუნება დიდი ხანია შეიცნეს. ცნობილი იყო აგრეთვე, რომ განმუხტვის ძაბვა მეტად დიდია (როგორც შემდეგ გამოირკვა — 100 მილიონ ვოლტამდე). ამ მედგარი ძალის „ჩამოყვანას“ დედამიწაზე ჯერ კიდევ მ. ლომონოსოვი და ჯ. ფრანკლინი ცდილობდა, მაგრამ ამაოდ. რაც შეეხება თვით ელვის ტემპერატურას, ბოლო დრომდე სარწმუნო ცნობები არ გვქონია. სიძნელის მიუხედავად, მაინც გამოინახა მისი გაზომვის საშუალება. ამ ცოტა ხნის წინათ სპექტრის ანალიზის მეთოდით დადგინდა, რომ ელვის არხის შიგნით საკმაოდ მაღალი ტემპერატურაა, დაახლოებით 20 000°. ამიტომ გასაკვირი აღარ არის, რომ დედამიწაზე განმუხტვისას მეხი გზადაგზა ანგრევს ყველაფერს და ადვილად აღლობს ძნელდნობად ქანებსაც კი. ბისი კვალი იშვიათად, მაგრამ მაინც შეიმჩნევა ხოლმე ზოგჯერ მიწაზე.

რაც შეეხება ქუხილის წნევას, მისი სიდიდე დარტყმითი ტალღის ფრონტზე შედარებით მცირე აღმოჩნდა — სულ რაღაც 0,25 კგ/სმ<sup>2</sup> ამ ფრონტიდან 0,5 მ მანძილზე.

სავარაუდოა, რომ ატმოსფერული ელექტროგანმუხტვისა და პლაზმის ნაირსახეობას უკავშირდება აგრეთვე ისეთი საინტერესო მოვლენა, როგორიც ე. წ. „სფერული ელვაა“. კაცობრიობა, ათასი წელი მაინც იქნება, რაც იცნობს ამ საკვირველებას, ხოლო მეცნიერები უკვე სამასი წელია ცდილობენ მის საიდუმლოებაში ჩაწვდომას, მაგრამ ჯერჯერობით ამაოდ.

გაუგებარი რჩება — საიდან აქვს ასეთი მედგარი ძალა 20—30 სმ დიამეტრის მქონე მოციმციმე მანათობელ ბუშტს<sup>9</sup>, რომელიც ერთი შეხედვით სრულიად უვნებელია და თავისუფლად დაცურავს ჰაერში. საკვირველია ისიც, რომ „სფერული ელვა“ არა მარტო დიდი ჰექა-ქუხილის დროს წარმოიშვება, არამედ ზოგჯერ მშვიდ ამინდშიაც შეიმჩნევა.

მისი წარმოქმნის მექანიზმის და ბუნების შესახებ ოცამდე ჰიპოთეზაა წამოყენებული. ზოგი მეცნიერი იმ აზრსაც კი ემხრობა, რომ აქ ახალი სახის ენერგიის, კერძოდ — ანტიმატერიის ნაწილაკის გამოვლინებასთან უნდა გვექონდეს საქმე. მაგრამ გარკვევით ჯერ არაფერია დადგენილი. ნივთიერების ზემადალ ტემპერატურაზე მოქცევის ბუნების შესწავლამ ალბათ ბევრ ამგვარ საიდუმლოებას უნდა ახადოს ფარდა.

ბუნებრივი თერმობატომგულური „ქეაბები“. ყველაზე დიდი ტემპერატურები სამყაროში ვარსკვლავთა შიგა არეებშია ნავარაუდები. სწორედ იქ არის შექმნილი პირობები თერმობატომგულური რეაქციების ჩასატარებლად, რასაც უზომო ენერგიის გამოყოფა მოსდევს.

ჩვენთვის უახლოესი ვარსკვლავი არის მზე. მისი გავარჯარებული ბირთვის დიამეტრი 109-ჯერ სჭარბობს დედამიწისას. ბირთვს გარედან გაიშვიათებული აირის თხელი, 300 კმ-იანი ფენა აკრავს, რომელიც დედამიწიდან მოჩანს, როგორც მზის ზედაპირი. მისი ტემპერატურა 6000° აღწევს. სწორედ აქედან — ფოტოსფეროდან ვიღებთ ჩვენ მაცოცხლებელ გამოსხივებას. მაგრამ მზის ნივთიერება გაცილებით შორს, თითქმის დედამიწამდე განივრცობა. აქ სამ ფენას გამოყოფენ.

ფოტოსფეროს შემდეგ დაახლოებით 1000 კმ სიმაღლეზე ტემპერატურა 5000°-მდე ეცემა. მომდევნო 14000 კმ-იანი ფენა, რომელიც მოწითალო ფერისაა და ქრომოსფეროდ იწოდება, წყალბადისაგან შედგება. სწორედ ქრომოსფეროდან ამოისროლებიან პროტუბერანტები, რომელთა სიმაღლე ზოგჯერ 700 000 კმ აღწევს, ხოლო ტემპერატურა — 20 000°.

მზის დაბნელების დროს შესამჩნევი ხდება მესამე ფენაც, ე. წ. მზის გვირგვინი. სწორედ მისი ტალღები იწვევენ ჩვენს ატმოსფეროში მაგნიტურ ქარიშხალსა და ე. წ. ჩრდილოეთის ციალს.

მეშინ, როდესაც ფოტოსფეროში და მის ზევით დიდი გაიშვიათება გვაქვს, მზის წიაღში მილიარდი ატმოსფეროს ტოლი წნევე-

<sup>9</sup> იშვიათად, მაგრამ აღნუსხულია უფრო დიდი ზომის „ბუშტებიც“, ზოგჯერ რამდენიმე მეტრის დიამეტრითაც კი.

ბი და 16 მლნ გრადუსამდე ტემპერატურები ბობოქრობენ. ამ პირობებში აირადი ნივთიერების ატომები იონიზებულია. გარე ელექტრონების დაკარგვის გამო, ატომგულები იმდენად ახლოს არიან ერთმანეთთან, რომ ნივთიერების სიმკვრივე 130 გ/სმ<sup>3</sup> აღწევს. ატომები 200 კმ/წმ სიჩქარით მოძრაობენ ქაოტიურად, ელექტრონები კი, მცირე მასის გამო, კიდევ უფრო სწრაფად. მზის ცენტრალურ არეებში ძლიერი რენტგენისა და გამა-გამოსხივებაც აღინიშნება.

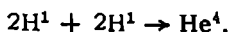
ორმოციოდე წლის წინათ ა. ედინგტონმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ მზის აქტივობა ატომგულური პროცესებით უნდა იყოს გაპირობებული. ეს იყო ა. ეინშტეინის გენიალური კანონის შედეგი, რომლის თანახმადაც ნივთიერების ენერგია მისი მასის ექვივალენტურია:

$$E = mc^2.$$

(აქ ენერგია  $E$  გამოსახულია ერგებით, მასა  $m$  —გრამებით, ხოლო სინათლის სიჩქარე  $C = 3 \cdot 10^{10}$  სმ/წმ).

მაშასადამე, მატერიის ყოველი გრამის გარდაქმნას იმდენი ენერგია შეუძლია მოგვცეს, რაც 20 000 ტ ნახშირის დაწვით მიიღება ( $2 \cdot 10^{13}$  კალ.).

ეს კანონზომიერება გახდა ატომგულური მეცნიერებისა და ტექნიკის საფუძველი. მის შესაბამისად მიმდინარეობენ პროცესებიც მზის წიაღში. მეცნიერები მიდიან იმ დასკვნამდე, რომ მზის კოლოსალური და მუდმივი ენერგიის ძირითადი წყარო არის წყალბადის ატომგულებიდან ჰელიუმის ატომგულების წარმოქმნის რეაქცია:



პირველთა მასა მეტია მიღებულ ნივთიერებათა მასაზე. სწორედ მასის ეს დეფექტი იქცევა ენერგიად. მისი სიდიდე გაცილებით აღემატება აქამდე ცნობილი ენერგიის ნებისმიერ წყაროს. ეს ენერგია 400-ჯერ სჭარბობს იმავე რაოდენობის წყალბადის დაწვით (ჩვეულებრივი ქიმიური რეაქციის შედეგად) მიღებულ ენერგიას.

მაგრამ ხსენებული თერმოატომგულური რეაქცია არა უშუალოდ, არამედ რთული საფეხურების გავლით მიმდინარეობს. ამ პროცესებში ამაჩქარებლის როლს ნახშირბადისა და აზოტის ატომგულები უნდა ასრულებდეს.

თანდართულ ნახაზზე გამოსახულია თერმოატომგულური „წვის“ ერთ-ერთი სავარაუდო გზა, ნახშირბად-წყალბადის, ანუ ე. წ. ბეტეს ციკლი.

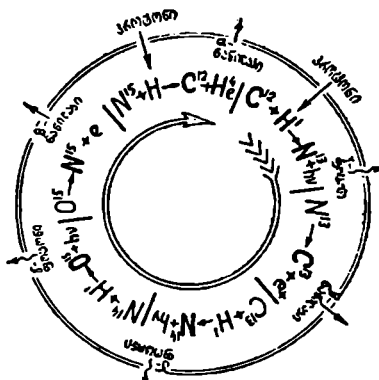
მთელი ეს ციკლი საკმაოდ ხანგრძლივია; ნახშირბადის რომელიმე ატომი მის გავლას მილიონ წლებს ანდომებს. მაგრამ იმის

გამო, რომ მზის გულში უსასრულო რაოდენობის ასეთი გარდაქმნების ჯაჭვია, ენერჯის დიდი რაოდენობით გამოყოფა პრაქტიკულად უწყვეტ პროცესს წარმოადგენს.

ციკლის თავისებურება ის არის, რომ საბოლოო ჯამში მხოლოდ წყალბადი იხარჯება, ნახშირბადის რაოდენობა კი უცვლელია.

მზის გულში არსებული ულტრამალალი ტემპერატურებისა და წნევების პირობებში შესაძლებელია კიდევ ერთი, ე. წ. პროტონ-პროტონული რეაქცია.

პირველ საფეხურზე პროცესი გულისხმობს ორი პროტონის შერწყმას და დეიტრონის წარმოქმნას. პროტონის შემდგომი დამატებით უნდა მივიღოთ ჰელიუმის მსუბუქი იზოტოპი —  ${}^3\text{He}$ . ორი ასეთი იზოტოპის შეერთებით კი ჰელიუმის ჩვეულებრივი  ${}^4\text{He}$  ატომგულეები მიიღება და გამოითქვორცნება ორი პროტონი. ეს რეაქცია ენერჯის დიდი რაოდენობის გამოყოფით გამოირჩევა.



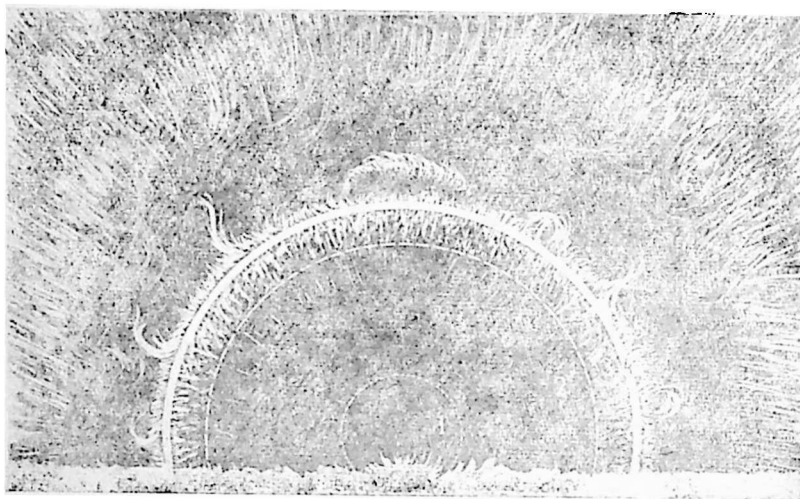
მზეზე მიმდინარე თერმოატომგულური პროცესების შესაძლებელი ციკლი

მზის წიაღში მიმდინარე პროცესების მასშტაბი გრანდიოზულია. იქ ხომ ყოველ წამში 564 მლნ ტონა წყალბადი 560 მლნ ტ ჰელიუმს გვაძლევს. მასის დანაკარგი — 4 მლნ ტ ნივთიერება იქცევა სითბოდ და სინათლედ და გამოსხივდება კოსმოსში. მაგრამ საწვავის ასე დიდი ხარჯი ნურავის შეაშინებს. მზის საერთო მასის წარმოუდგენელი სიდიდის გამო (იგი 329390-ჯერ აღემატება დედამიწისას და 750-ჯერ — მზის სისტემის ყველა 9 პლანეტის მასას) ეს დანაკარგი შეუმჩნეველია.

ვინაიდან წყალბადის ჰელიუმად გარდაქმნისას მასის დანაკარგი 1% არ აღემატება, გამოდის, რომ 1 მლრდ წლის მანძილზე მზეზე არსებული წყალბადის 1—2% თუ გაიხარჯებოდა. თეორიულად მზეს 50 მლრდ წელი კიდევ შეუძლია წვას თავისი წყალბადი, ყოველ შემთხვევაში მიაი დანაკლისი ჩვენთვის 5—10 მლრდ წლის განმავლობაში შეუმჩნეველი იქნება.

მზის ენერჯის 90% გამოიმუშავდება ცენტრალურ გულში, რომლის რადიუსი მზის სფეროს რადიუსის მეოთხედს შეადგენს.

შეიძლება საოცრად გვეჩვენოს, მაგრამ ამ ფანტასტიკურად გაეარვარებული ნივთიერების სამყაროში უკუნი სიბნელე სუფევს, ვინაიდან იქ მხოლოდ რენტგენის უხილავი გამოსხივება გვაქვს. შემდგომში ეს სხივები უთვალავ ზიგზაგებს აკეთებს, ვიდრე ზედაპირამდე მიაღწევდეს. ამ დროს იგი თანდათან იცვლება: ყოველი გადატეხის შემდეგ მისი ტალღის სიგრძე მატულობს, ხოლო სიბ-შირე მცირდება. საბოლოოდ მთელი გამოსხივება ულტრაიისფერ ხილულ სინათლედ იქცევა. ამ პროცესს დაუჭერებლად დიდი დრო — დაახლოებით 20 ათასი წელი სჭირდება.



ასეთი უკუნი სიბნელეა ჩვენი მნათობის წიაღში

1—ცენტრალური ბირთვი — ატომგულური რეაქციების სფერო. ნივთიერების სიმკვრივე აქ 11,4-ჯერ აღემატება ტყვიის სიმკვრივეს. 2—რადიაციის ზონა. ენერჯის გადაცემა ხდება გამოსხივებით. ტემპერატურა 1500000-მდე ეცემა. ნივთიერების სიმკვრივე წყლის სიმკვრივის მეთაღეს შეადგენს. 3—კონვექციის ზონა — 170000 კმ სისქის ფენა. ენერჯია გადაეცემა აირის გაეარვარებული ტურბულენტური ნაკადებით. 4—მზის ატმოსფეროს ქვედა ფენა — ფოტოსფერო, რომელიც დედაშიწიდან ჩანს, როგორც მზის დისკო. ცალკეულ უბნებში აქ ტემპერატურა 4000-დან 5000000-მდე მერყეობს. 6—მზის გვირგვინი — მზის ატმოსფეროს ზედა ფენა, ულტრაიისფერი გამოსხივების ძლიერი წყარო. ტემპერატურა აქ 500000-დან 30000000-ის ფარგლებშია.

თვით პროცესებიც მზეზე გაცილებით ნელა მიმდინარეობს, ვიდრე შეიძლებოდა გვეფიქრა. გამოყოფილი ენერჯის სიდიდე თვით მზის მასის გრანდიოზულობით აიხსნება. წონის ერთეულზე

კი მზე ხუთჯერ ნაკლებ ენერგიას გამოყოფს, ვიდრე ადამიანის სხეული.

ლაქებზე დაკვირვებებიდან ჩანს, რომ მზე აღმოსავლეთიდან დასავლეთის მიმართულებით ბრუნავს. მაგრამ მყარი დედამიწისაგან განსხვავებით, ბრუნვის ხანგრძლიობა სხვადასხვა განედზე სხვადასხვაა — ეკვატორზე მყოფი წერტილის მოქცევას 25 დღე სჭირდება, პოლუსის ახლოს კი 34 დღე.

ლაქების მაგნიტური ველების დაჭიმულობა კოლოსალურია და იგი ათი დედამიწის ოდენა ფართზე ვრცელდება. ამ ველების წყაროა ძლიერი, 10 ათას მილიარდ ამპერამდე ძალის ელექტროდენები. ფიქრობენ, რომ ეს დენები ქვესკნელიდან მომდინარე ცხელი აირისა და მისი შემხვედრი უფრო ცივი აირის ნაკადების დაგრივების შედეგად წარმოიქმნება, რასაც მზის ბრუნვა განაპირობებს.

მზის ზედაპირისაგან დაშორებისას ტემპერატურა თითქოს უნდა ეცემოდეს. მაგრამ აღმოჩნდა, რომ 15 ათას კმ სიმაღლეზე იგი 100000, ხოლო უფრო მაღლა — მილიონ გრადუსამდეც კი იზრდება. ამ მოვლენას ამჟამად ასე ხსნიან: გავარვარებული აირის ტალღები ზედაპირზე სასტიკი სიძლიერით ეჯახებიან ერთმანეთს, რაც წარმოუდგენელი ძალის ხმაურს უნდა იწვევდეს. მზის გაიშვით ათებულ ატმოსფეროში ბგერის ტალღები დიდ სიჩქარეს იძენენ. მათი ურთიერთ შეხლა აირს ასეულ რიას გრადუსამდე გადაახურებს.

მზის ზედაპირზე ყოველ მომენტში გავარვარებული აირის ასეულ ათასამდე ცეცხლოვანი „ენები“ (სპიკულები) დაითვლება. ეს „ენები“ (გავარვარებული ნივთიერების მასა) ზოგჯერ 150 ათას კმ-მდე სიმაღლეზე აიტყორცნება და შორს, 800 ათასამდე კმ-ის მანძილზე გადაისროლება.

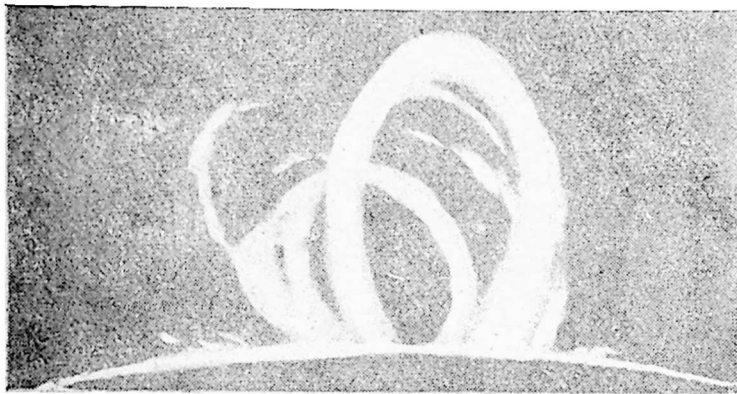
მზეზე მომხდარი ამოფრქვევების დაკვირვებებმა ცხადყო მათი სრული მსგავსება დედამიწაზე ჩატარებულ აფეთქების პროცესებთან. ყოველი ასეთი ამოფრქვევა მაგნიტური ველების მყისიერ და თავისებურ „შეკუმშვას“ და დაშლას უკავშირდება. ეს იწვევს შედარებით მცირე, დაახლოებით 1 კმ დიამეტრის მქონე სივრცეების მყისიერ იმპულსურ გადახურებას 15 მლნ გრადუსამდე და მძლავრ ამოფრქვევებს.

ეს ამოფრქვევები ზოგჯერ წარმოუდგენელი ძალისაა. 1956 წლის 23 თებერვალს, 3 საათსა და 40 წუთზე მსოფლიო დროით, მზეზე მოხდა აფეთქება, ტოლი მილიონი წყალბადის ბომბის აფეთქებისა. ამ აფეთქებათა შედეგად მსოფლიო სივრცეში დამუხტული ნაწილაკების — კორპუსკულების დიდი რაოდენობა გადაისროლება. მათი სიჩქარე 1000 კმ-ზე მეტია წამში. შეიქრებიან რა დედამი-

წის ატმოსფეროში, ეს ნაწილაკები მაგნიტურ გრიგალებს იწვევენ. ნამდვილად მართებულია თქმა, რომ ჩვენ მზის ატმოსფეროში ვცხოვრობთ.

ძლიერ მაღალ ტემპერატურამდე გავარვარებული აირის ჰავლს დიდი ელექტროგამტარობის უნარი შეეძინება, ამიტომ ელექტრულ ან მაგნიტურ ველში იგი ისევე იტყვევა, როგორც კარგი ელექტროგამტარობის მქონე მავთული.

ამ მიზეზით არის, რომ პროტუბერანცები, მზის ძლიერი მაგნიტური ველის გავლენით, იკლაკნებიან და ზოგჯერ საკმაოდ დაგრიგალდებიან კიდევ მზის ხილული ზედაპირის აბლო სივრცეში.



მაგნიტური ველებით გამოწვეული სპირალური დაგრიგალება მზის ზედაპირზე. თვითეული „რგოლის“ დიამეტრი 130 ათას კმ აღწევს.

მზეზე მიმდინარე პროცესები რამდენადმე ჩამოგავს გაიშვითებული აირის შეკუმშვას და გაფართოებას, როდესაც მასში დიდი ძალის — 500 ათას ამპერამდე იმპულსური განმუხტვა ხდება.

სამყაროს უსასრულობისა და საკვირველების წარმოსადგენად შეიძლება აღვნიშნოთ, რომ არიან ცალკეული გიგანტი (უფრო სწორად — სუპერგიგანტი) ვარსკვლავები, რომელთა ნათება გაცილებით მეტია, ვიდრე ჩვენი გალაქტიკის („ირმის ნახტომის“) ყველა ასი მილიარდი ვარსკვლავისა; ასეთი სუპერგიგანტის მასა მილიარდჯერ სჭარბობს ჩვენი მნათობისას.

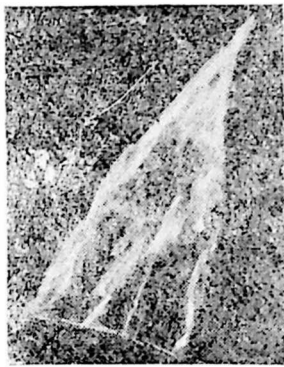
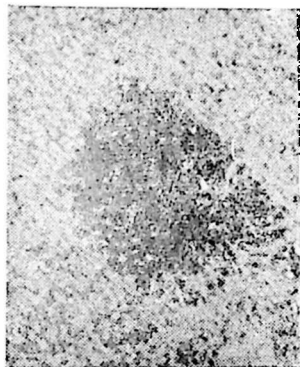
ატომგულური საწვავის გამოღვევის შემდეგ ასეთი ვარსკვლავები წარმოუდგენელი სისწრაფით იკუმშებიან, რის შედეგადაც მათ გულში ვითარდება სუპერმაღალი ტემპერატურა; მაგრამ შეკუმშვის სიჩქარე იმდენად დიდია, რომ ისინი არ ანათებენ — მიზი-



დულობის ძალები არ აძლევენ საშუალებას გარეთ გამოვიდეს არამც თუ სინათლე, არამედ ნეიტრონებიც კი.

ასეთი ვარსკვლავების სიმკვრივე შედარებით მცირედ ითვლება, თუმცა მილიონ გრამობით იზომება ყოველ სმ<sup>3</sup>-ზე.

რაც უფრო დიდია ვარსკვლავი, მით უფრო ადრე იწყებს იგი შეკუმშვას. ასი მზის ოდენა ვარსკვლავი განვითარებას არა მილიონობით, არამედ „სულ რაღაც“ 30—50 მილიონი წლის მანძილზე ამთავრებს.



მზის ზედაპირი. შავი ლაქას ტემპერატურა 4500°-მდეა, ნათელი წარმონაქმნებისა კი 6000° აღწევს

ერუპტიული პროტუბერანციები მზის ზედაპირიდან ხანდახან 1,5 მლნ კმ სიმაღლეზე აიჭრებიან ხოლმე. წყალბადის ქაელის სიჩქარეა 400 კმ/წმ

მაღალი ტემპერატურები და ქიმიური ელემენტების წარმოქმნა. ფიზიკოსები ამჟამად უბრუნდებიან — ახალი გაგებით — წარსული საუკუნის დასაწყისში ინგლისელი ექიმის ვ. პრაუტის მიერ გამოთქმულ მოსაზრებას, რომ ყველა არსებული ელემენტი წყალბადისაგანაა წარმოქმნილი.

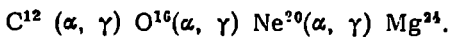
მართლაც, ასტრონომებისათვის მისაწვდომი სამყაროს გამოკვლევამ აჩვენა, რომ მისი წონის 76% წყალბადია, 26% — ჰელიუმში, ხოლო დანარჩენი ელემენტები უმნიშვნელო მინარევად შეიძლება ჩითვალოს — მათი საერთო რაოდენობა 1%-საც არ შეადგენს.

მართალია, არსებობენ ვარსკვლავები, სადაც ან ლითიუმი ან მეტი, ან ბარიუმი, ტიტანი, ცირკონიუმი და ა. შ., მაგრამ ასეთი ვარსკვლავები ასში ერთი თუ გამოერევა.

ქიმიური ელემენტების წარმოქმნა მხოლოდ ატომგულური რეაქციების შედეგად არის სავარაუდო. ასეთი რეაქციები შეიძლება როგორც დამუხტული ნაწილაკების, ისე ნეიტრონების მონაწილეობით მიმდინარეობდეს. პირველის მაგალითია ჰელიუმის წარმოქმნა წყალბადისაგან მზის წიაღში, სადაც ტემპერატურა 20 მლნ გრადუსს შეიძლება აღწევდეს. უფრო მძიმე ელემენტების წარმოსაქმნელად კი ეს არ არის საკმარისი. ნახშირბადის ატომგულების მიღება, მაგალითად, მხოლოდ 150 მლნ გრადუსის ფარგლებშია მოსალოდნელი.

აღფერის, ბეტესა და გამოვის მიხედვით (ე. წ. „ $\alpha$ — $\beta$ — $\gamma$ “ ჰიპოთეზა), ელემენტები თითქოს თვით ვარსკვლავის ჩასახვამდე უნდა წარმოქმნილიყვნენ; მაგრამ ამ აზრმა საბოლოო დასაბუთება ვერ ჰპოვა.

თანამედროვე თეორიით ელემენტთა წარმოქმნის პირველადი წყარო არის წყალბადი. იკუმშება რა სიმძიმის ძალის გავლენით, ესა თუ ის ვარსკვლავი წიაღში ანვითარებს თერმოატომგულური რეაქციის დასაწყებად საკმარის წნევასა და ტემპერატურას. პირველი საფეხურია წყალბადის ჰელიუმად გადაქცევა. მილიარდი წლების შემდეგ, როდესაც წიაღის მთელი წყალბადი დაიხარჯება, ვარსკვლავი განსხვავებულ თვისებას იძენს. გული იწყებს შეკუმშვას, რის გამოც მისი ტემპერატურა იზრდება, გარსაცმში დარჩენილი წყალბადი კი ფართოვდება და მისი ტემპერატურა ეცემა. როდესაც ტემპერატურა წიაღში 150 მლნ გრადუსს მიაღწევს, იწყება მეორე საფეხური —  $\alpha$ -ნაწილაკების შეერთებით ბერილიუმი-8-ისა და ნახშირბადი-12-ის მიღება. ამ უკანასკნელის წარმოქმნა ხელს უწყობს აზოტ-ნახშირბადის ციკლის მიმდინარეობას მაგნიუმ-24-ის წარმოქმნით



აღნიშნულის მაგალითია, კერძოდ, ლალისფერი ვარსკვლავი ანტარესი. მასში მთელი წყალბადი უკვე გარდაქმნილია ჰელიუმად, რომლის ატომგულებიც ერთდებიან და გვაძლევენ ნახშირბადს, ეანგბადს, ნეონს, მაგნიუმს, კაუბადს, გოგირდს, არგონსა და კალციუმს.

მაგრამ ელემენტის რიგობრივი ნომრის გაზრდასთან ერთად,  $\alpha$ -ნაწილაკის შთანქმის ალბათობა მცირდება, მაგნიუმ-24-ის შემთხვევაში კი საერთოდ წყდება.

ჰელიუმის მარაგის გახარჯვას  $10^7$ — $10^8$  წელი სჭირდება. შემდეგ გული ისევ იკუმშება, რის გამოც ტემპერატურა უკვე მილიარდ გრადუსამდე შეიძლება ამაღლდეს. ეს განაპირობებს ნახშირბადი-

12-ის ორი ატომგულის შერწყმით მაგნიუმი-24, ნეონი-20-ისა და  $\alpha$ -ნაწილაკის ან ნატრიუმი-23-სა და ფოსფორის წარმოქმნას. მთავარი კი ის არის, რომ ამ დროს ისეთი დიდი ენერჯის  $\gamma$ -ქვანტები გამოსხივდება, რომ მათ  $\alpha$ -ნაწილაკების მოგლეჯა შეუძლიათ ნეონი-20-საგან. მიიღება დიდი ენერჯის მქონე ჰელიუმის თავისუფალი ატომგულები, რომელთა წატაცების შედეგად მაგნიუმი უფრო მძიმე ატომგულებს წარმოქმნის (კაუბალი-28, გოგირდი-32, არგონი-36, კალციუმი-40, ტიტანი-48). ეს პროცესი „სულ რაღაც“ 100—1000 წელიწადში მთავრდება.

ვარსკვლავის გულის შეკუმშვის შემდგომ საფეხურზე, თუ ტემპერატურა 3 მლრდ გრადუსს გადააჭარბებს, ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ) და ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ) რეაქციების გარდა, პროცესი პროტონების მონაწილეობით და შემდგომ  $\beta$ -დაშლით შეიძლება წარიმართოს. ამგვარად, ატომგულური რეაქციების მთელი კომპლექსი ვითარდება. ამ შემთხვევაში წონასწორობა რამდენიმე წამში უნდა დამყარდეს. საშუალო ატომწონის ელემენტების ნარევი რკინისა და მისი მოსაზღვრე ელემენტების ატომგულები სქარბობენ.

რაც შეეხება უფრო მძიმე ელემენტებს, ფიქრობენ, რომ ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებისას უნდა ხდებოდეს ნეიტრონების დიდი რაოდენობით გამოტყორცნა. რკინის ჯგუფის ელემენტების მიერ მათი შთანთქმის სწრაფ პროცესში კი ნებისმიერი ატომგულების წარმოქმნა საუარაუდო. კალიფორნიუმი-254-ის წარმოქმნა, მაგალითად რკინისაგან, 10—100 წამში უნდა დამთავრდეს.

ამ მცირე დროში იმდენი კალიფორნიუმი მიიღება, რომ მისმა მოცულობამ 20-ჯერ შეიძლება გადააჭარბოს დედამიწისას.

აფეთქების პროდუქტები უდიდესი სიჩქარით გაიტყორცნებიან კოსმოსში. მათი კონდენსაციის შედეგად ახალი თაობის ვარსკვლავი იბადება, რომლის ევოლუცია გრძელდება.

## პლაზმა ჩვენს გარშემო

რას გულისხმობდნენ ძველი ბერძნები? როგორი სახით გვაქვს ნივთიერება სამყაროში? ამ კითხვაზე ამჟამად მხოლოდ ერთი პასუხი არსებობს — ძირითადად პლაზმის სახით. საკმარისია ითქვას, რომ ვარსკვლავები, რომლებშიც გალაქტიკის ნივთიერების თითქმის მთელი მასაა თავმოყრილი, პლაზმური წარმონაქმნებია. მაგრამ კოსმოსის პირობებში ასეთი სიუხვის მიუხედავად, დედამიწაზე ბუნებრივ პირობებში ნივთიერება პლაზმის სახით ძალიან იშვიათად გვხვდება. მიუხედავად ამისა, თანამედროვე ტექნიკის მოთხოვნილებამ აიძულა მეცნიერები ფართო კვლევები გაეშალათ პლაზმის შესწავლისა და დაუფლებისათვის. სულ ჩქარა მას მრავალმხრივი გამოყენების პერსპექტივებიც დაეცა, რაც საკვებით კანონზომიერად უნდა ჩაითვალოს.

საერთოდ პლაზმის ცნება ძლიერ გავარვარებული აირის მდგომარეობას გულისხმობს. მაღალი ტემპერატურა კი პლაზმის ჯავლის ძლიერ ზეპოქმედებას განაპირობებს ამა თუ იმ მასალის მიმართ. ამასთანავე დიდი მნიშვნელობა აქვს პლაზმის არა მარტო თბურ და ენერგეტიკულ, არამედ აირდინამიკურ მახასიათებლებსაც. როგორც შემდეგ ვნახავთ, ეს მახასიათებლები შეიძლება ადვილად და ზუსტად ვარეგულიროთ ფართო დიაპაზონში. ტემპერატურა, მაგალითად, ათასიდან ათეულ ათას გრადუსამდე შეიძლება ვცვალოთ, სიმძლავრე — კილოვატიდან მეგავატამდე, ნაკადის სიჩქარე კი ბგერის სიჩქარემდე და მეტადაც.

ნივთიერების პლაზმის მდგომარეობაში გადასაყვანად საჭირო ტემპერატურები ათეულ და ასეულ ათას გრადუსს შეიძლება აღწევდეს. ეს განაპირობებს ნებისმიერი აირის ან ლითონთა ორთქლის ატომების თერმულ იონიზაციას და მათ მიერ ელექტრონების დაკარგვას. მიიღება უარყოფითი მუხტის მქონე ელექტრონებისა და დადებითი იონური ნაწილაკების ნაკადი — პლაზმა. თვისებების განსაკუთრებულობის გამო მას უწოდებენ ნივთიერების მეოთხე მდგომარეობასაც — ჩვეულებრივად მიღებული და თერმოდინამი-

კით დაშვებული მყარის, თხევადისა და აირადისაგან განსხვავებით. თითქოსდა მართლდება „ყოვლის მომცველი თავის“ — დიდი არისტოტელეს მოსაზრება სამყაროში ოთხი სტიქიონის არსებობის შესახებ—მიწა (მყარი მდგომარეობა), წყალი (თხევადი), ჰაერი (აირადი) და ცეცხლი. უკანასკნელი პლაზმის სინონიმად უნდა ვიგულისხმოთ. თუ ეს ასეა, ნამდვილად ალტაცების ღირსად უნდა ჩაითვალოს ძველ ბერძენთა მიერ ბუნების მოვლენათა არაში ჩაწვდომის უნარი!

მაგრამ ვინ უწყის, რა არის პლაზმის იქით, ვინაიდან დაშვებულია, რომ სამყაროში არსებული ტემპერატურის ზედა ზღვარი, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, არ შემოიფარგლება ათეული და ასეული მილიონი გრადუსებით. იქნებ მილიარდ გრადუსებზე ამ მართლაც და ამოუწურავ მატერიას შეხუთე და მეტი მდგომარეობაც მოენახება!

ნივთიერება მეოთხე მდგომარეობაში. პლაზმის მისაღებად საკმაოდ მაღალი ტემპერატურებია საჭირო, რაც ჩვეულებრივ პირობებში დედამიწაზე არ არსებობს. ეს ტემპერატურები მზის ზედაპირისას აღემატება. ისეთი დაბალი იონიზაციის მქონე ლითონთა ატომებიც კი, როგორც ცეზიუმი და კალიუმი, საგრძნობ იონიზაციას მხოლოდ 3000°-ის ფარგლებში განიცდიან.

5000°-ის ახლოს თერმული იონიზაციის შედეგად პლაზმაში წარმოიქმნება დადებითი იონებისა და თავისუფალი ელექტრონების დიდი რაოდენობა. პლაზმა ხდება ელექტროგამტარი, რითაც იგი განსხვავდება ჩვეულებრივი აირისაგან. ერთ-ერთი მთავარი პირობა ამ დროს არის კვაზინეიტრალობა, ე. ი. დადებითი და უაი-ყოფითი მუხტების თანაფარდობა.

აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ ვინაიდან ელექტრონების მასა ბევრად ნაკლებია იონისაზე, ამიტომ სწორედ მათ გადააქვთ დენის თითქმის მთელი რაოდენობა და იღებენ ენერგიას გარეთა ელექტროველიდან.

ხისტი შეჭახებისას ელექტრონი მცირე ენერგიას გადასცემს (კარგავს). აღნიშნული გვაფიქრებინებს, რომ მისი ტემპერატურა პლაზმის საერთო მასაში უფრო მაღალია, ვიდრე იონებისა.

შედარებით მაღალ ტემპერატურებზე (10000°) იონიზაციის ხარისხი კიდევ უფრო იზრდება — პლაზმა ლითონურ ელექტროგამტარობას იძენს, დაახლოებით ისეთს, როგორც სპილენძს ახასიათებს. მაგრამ ლითონებისაგან განსხვავებით, პლაზმის ეს თვისება ტემპერატურის ზრდასთან ერთად შემცირების ნაცვლად მატულობს. ფიზიკოსები ვარაუდობენ, რომ ძლიერ მაღალ ტემპერატურებზე პლაზმა ზეგამტარიც კი ხდება, ე. ი. მასში აღძრული დენი არავითარ წინააღმდეგობას აღარ ხვდება და პოტენციალის ვარდნაც ნულს

უტოლდება. ამ პირობებში პლაზმას სითბოს გადაცემის იდეალური თვისებაც აღმოაჩნდა, მაღალი ელექტროგამტარობა განაპირობებს პლაზმის ძლიერი ურთიერთქმედების უნარს გარე ელექტრულ და მაგნიტურ ველებთან. თავის მხრივ მაღალი ძალის ელექტროდენი პლაზმაში წარმოქმნის თვითნდლუცირებულ მაგნიტურ ველს, რომელიც ცდილობს შეეუმშოს პლაზმა: რკალში ვითარდება რადიალური და აქსიალური (ღერძული) ვარდნა, რაც განაპირობებს ნივთიერი ნაწილაკების წატაცებას და ნაკადის წარმოქმნას.

მაგნიტური ველის მეშვეობით შესაძლებელი ხდება პლაზმის შეეუმშვა და სივრცეში შეზღუდვა. ასეთი „გარსაცმი“ არა მარტო გამორიცხავს პლაზმის კონტაქტს რეაქტორის ამონაგთან, არამედ დიდი წნევების შექმნის საშუალებასაც იძლევა. ჩვეულებრივი რკალური განმუხტვისაგან პლაზმა გამოირჩევა დიდი დენის სიმკვრივით ელექტროდებზე. გამოყოფილი ენერჯიის რაოდენობა გაცილებით აღემატება მის განფანტვას სითბოს გადაცემისა და გამოსხივების ხარჯზე.

პლაზმის განსაკუთრებულ თვისებად უნდა ჩითვალოს ენერჯიის დიდი კონცენტრაცია განსაზღვრულ მცირე მოცულობაში. 40 კვტ სიმძლავრის პლაზმურ დანადგარში, მაგალითად, ანოდის დიამეტრი 13 მმ ტოლია, ხოლო 3000 კვტ დანადგარში 75 მმ აღწევს.

პლაზმის ტემპერატურას ვერ უძლებს ვერც ერთი აქამდე ცნობილი ცეცხლგამძლე მასალა, ამიტომ პლაზმაში მხოლოდ უწყვეტი ქიმიური პროცესების ჩატარება შეიძლება და ისიც განსაზღვრულ მოცულობაში, აირადი რეაგენტების რეაქტორის კედლებთან შეხების გარეშე.

პლაზმა არის დრეკადი გარემო, რომელშიაც უფრო ადვილად აღიძვრება და ვრცელდება სხვადასხვა რხევები, ბგერები და ტალღები, ვიდრე ჩვეულებრივ აირში. აღნიშნულის გამო, მისთვის სამართლიანია არა მარტო ელექტრომაგნიტური, არამედ თხევადი არეების მექანიკის კანონზომიერებანი.

ბუნებრივ პირობებში დედამიწის ზედაპირზე პლაზმა იშვიათი მოვლენაა. ატმოსფეროს ზედა ფენებში კი, მაიონიზებული აგენტების ქმედების შედეგად, მუდამ არის სუსტად იონიზებული პლაზმა, რომელსაც იონოსფერო ეწოდება. უფრო იქით, კოსმოსურ სივრცეში კი ნივთიერების ყველაზე უფრო გავრცელებული მდგომარეობა სწორედ პლაზმაა.

მზე, ცხელი ვარსკვლავები, ზოგიერთი მაღალტემპერატურიანი ვარსკვლავთმორისი ნისლოვანება სრულიად იონიზებულ პლაზმად ითვლება. ამიტომ გასაკვირი არ არის, რომ ასტროფიზიკის ბევრი პრობლემა პლაზმის ფიზიკური თვისებების კვლევას ეხება.

სწორედ ასტროფიზიკამ ჩაუყარა საფუძველი მაგნიტურ ჰიდროდინამიკას, რომელმაც პლაზმის ბევრი თვისებები გამოიკვლია და ახსნა.

ცხადია, რომ პლაზმის ღრმა შესწავლა, რაც რკალის ნათურაში სხვადასხვა აირების გატარებით ხდება, არა მარტო აფართოებს ამ საინტერესო მოვლენის ბევრი ფიზიკური პრობლემა და პრაქტიკული გამოყენების გზებსაც სახავს.

მაღალი ტემპერატურების ხელოვნური წყაროები ელექტროგანმუხტვის რკალი. 2000°-ზე უფრო მაღალი ტემპერატურების მიღების საშუალებები საკმაოდ შეზღუდულია. თხევადი სათბობის ორთქლისა და საწვავი აირის, მათ შორის აცეტილენის ნარევი ჟანგბადთან, მართალია, 3100°-მდე სიმხურვალეს იძლევა, მაგრამ მისი სამრეწველო მასშტაბით გამოყენება უმრავლეს შემთხვევაში მოუხერხებელია.

უფრო მაღალი ტემპერატურის მომცემი და პრაქტიკული თვალსაზრისით გამართლებული აღმოჩნდა ელექტრორკალური განმუხტვის გამოყენება.

ნახშირის ელექტროდებს შორის რკალისმაგვარი ელექტროგანმუხტვის მოვლენა პირველად ვ. პეტროვმა აღმოაჩინა ჭერ კიდევ: 1803 წელს. ვ. პეტროვისა და პ. დევის კლასიკურმა ცდებმა, ხოლო მოგვიანებით ბეკის, ელენბაასის, პელერის, შულცისა და სხვათა შრომებმა ელექტრორკალის გამოყენებას ფართო სარბიელი დაუსახა. მაგრამ საუკუნე-ნახევრის ინტენსიური კვლევების მიუხედავად, ამ საინტერესო მოვლენის ბევრი ფიზიკური პრობლემა და პრაქტიკული შესაძლებლობა ამჟამად არ არის ამოწურული.

რკალური განმუხტვის დამახასიათებელია ის, რომ ამ დროს ელექტროდების მასალის მნიშვნელოვანი აორთქლება ხდება. ელექტროდებს შორის არე გავსებულია პლაზმით — ელექტრონების, იონებისა და ნეიტრონების ნაწილაკებით. აქ არის როგორც აზოტისა და ჟანგბადის მოლეკულები, ისე ელექტროდის მასალის ატომები.

პლაზმის ტემპერატურა ელექტროდებთან უფრო მეტია (5000—7000°), ვიდრე განმუხტვის შუა ნაწილში („დადებით სვეტში“).

ატომების კონცენტრაცია განმუხტვის სხვადასხვა სფეროში მუდმივი არ არის.

ატომები, იონები, ელექტრონები პლაზმაში დიდი სიჩქარით მოძრაობენ, ეჯახებიან ერთმანეთს. ამ დროს ატომები და იონებზე გადადიან აგზნებულ მდგომარეობაში და გამოასხიებენ სინათლის ქვანტს.

მაღალი ტემპერატურების ხელოვნური წყაროები

წყაროები	ტემპერატურა, °K	უენი უენა
აირის სანთურას ალი ლურჯი ალი მართვადი ატომგულურბი რეაქტია	1800—2100 1900 3000	ლიმიტირებულია საკონ- სტრუქციო მასალების ხარისხით.
წყალბადის წვა ეანგბადში ეანგბად-აცეტილენის ალი	3100 3400	უმხურვალესი ტემპერატუ- რა, რომელიც მიღწეუ- ლია დაბალფასიანი ქი- მიური საწვავის გამოყე- ნებით.
ელექტრორკალი ალუმინის ფხვნილის წვა სუფთა ეანგბადში	3700 3800—4400	თეორიული მაქსიმუმი (წნე- ვა 1 და 10 ატმ.).
მზის ღუმელი	4000	მაქსიმალური ტემპერატუ- რა, რომელსაც პრაქტი- კულად შეიძლება მიეღ- წიოს.
ნახშირბადის სუბნირიდის წვა	5000-მდე	
ელექტრული ინდუქციური ღუმელი	5000-მდე	ლიმიტირებულია მილის საკონსტრუქციო მასა- ლის ხარისხით.
პლაზმის რკალი	2000— დან 50000-მდე	დამოკიდებულია რკალის ტიპსა და დენზე.
ელექტრული წინაღობით გახურება	10000	არსებობს მხოლოდ რამ- დენიმე წამი, წნევა 10000 ატმ.
მაეთულის აფეთქება მაღა- ლი ძაბვის განმუხტვისას დარტყმითი ტალღის ფრონტი	20000 1000000	ხანგრძლივობით 1 წამზე ნაკლებია. არსებობს 1 წამზე ნაკლები დროის განმავლობაში.
მეისეული ატომგულური რეაქტია (ატომის ბომბი) თერმოატომგულური სინ- თეზი (წყალბადის ბომბი)	1000000 100000000	მიღწეულია მიღწეულია

შედულებების რკალი არის მდგრადი ელექტროგანმუხტვა აირ-  
ში — მყარ ან თხევად ელექტროდებს შორის ატომოსფერულ წნე-  
ვაზე.

რკალურ განმუხტვას აქვს ორი წერტილი (ღაქა) — კათოდუ-  
რი (უარყოფით ელექტროდზე) და ანოდური (დადებით ელექტრო-  
დზე). მათ შორის კონცენტრირდება დენის ძალხაზები. ლაქების  
სიდიდე მცირეა, რაც განაპირობებს დენის დიდ სიმკვრივეს მათ-



ზე — რამდენიმე ათას ამპერამდე 1 სმ<sup>2</sup> (230—300 ამპ-ზე ლაქის დიამეტრია 5—6 მმ, 4000 ამპ-ზე — 20—25 მმ).

დენის დიდი სიმკვრივე რკალური განმუხტვის ერთ-ერთი დამახასიათებელი და განმასხვავებელი თვისებაა.

რკალის ძაბვა მცირედ იცვლება — 10—15 ვ.

ლაქებს შორის წარმოიქმნება რკალის თვალისმომკრელი მანათობელი სვეტი ცილინდრული ან კონუსური ფორმისა, რომელშიც მაქსიმალური ტემპერატურა 5—6 ათას გრადუსს აღწევს. რკალი გარშემორტყმულია ნაკლებად გავარვარებული აირებით და ელექტროდის მასალის ორთქლით (რკალის ჩირაღდან).

აირი, როგორც ცნობილია, იზოლატორია. მაღალი ტემპერატურის მეოხებით იგი იონიზდება. ელექტრონებისა და იონების გადაადგილება განაპირობებს ელექტროდენის გატარებას.

კათოდზე ელექტრონების ემისიისა და აირის მოცულობით იონიზაციის შედეგად წარმოიქმნება პლაზმა.

დამუხტული ნაწილაკების ქაოტურ ძრაობას ელექტროველი აწესრიგებს. ელექტრონები ანოდისაკენ მიისწრაფიან, დადებითი იონები — კათოდისაკენ. ელექტროდენი შედუღების რკალში თითქმის ელექტრონებისგან შედგება. მცირე მასის გამო, ეს უკანასკნელები უფრო დიდ სიჩქარეებს იძენენ, ვიდრე სხვა ნაწილაკები, ამიტომ ითვლება, რომ მათი ტემპერატურაც უფრო მაღალია.

პლაზმის დანადგარები. ელექტროგანმუხტვის რკალის უპირატესობა ალის სტაბილიზაციისა და ენერგიის კონცენტრირების შესაძლებლობით ნათელი იყო, მაგრამ მისი გამოყენება პრაქტიკულად გამართლებული გახდა რკალური ფრქვევანას შემუშავების შემდეგ.

ქიმიურ სინთეზში, აერონავტიკაში და სხვ. ორსაფეხურიანი პლაზმური ფრქვევანა გამოიყენება, რომელიც ორი მარტივი ფრქვევანასაგან შედგება. აირები, რომლებიც კოროზიის ან მყარი ნივთიერების გამოლექვის საშიშროების გამო ძირითად კონტურში არ შეიძლება მოხვდეს, მეორე კამერის აირის ნაკადს ერევა.

ზოგიერთ კონსტრუქციაში აირი ორი ცალკე ელექტროდიდან მაღალი წნევის კამერაში გადადის. თუმცა ამ დროს გაქუჩყვიანების ხარისხი მცირეა, ხოლო ენთალპიების მნიშვნელობა მაღალი, მწარმოებლობა 35%-ს არ სცილდება.

მაღალი წინვის რკალი ენერგიის უდიდეს ნაწილს ანოდის ზედაპირს გადასცემს. ეს იწვევს ანოდის მასალის აორთქლებას. ორთქლი 7000°-მდე გადახურდება და რკალიდან გამოირტყორცნება პლაზმის ნაკადის სახით („რკალის კუდის ალი“).

მაშინ, როდესაც პლაზმური ფრეკვენანას უმრავლესობისათვის რკალის სვეტის შეკუმშვა გარედან ზემოქმედებით ხდება, მაღალი ძაბვის სიხშირის რკალის შეკუმშვას სიმძლავრის ამალღების ხარჯზე აღწევენ.

სხვა კონსტრუქციებში დიდი მნიშვნელობა აქვს რკალის სვეტის გარეთა ნაწილების გაცივებას იონიზაციისა და ელექტროგამტარობის შესამცირებლად.

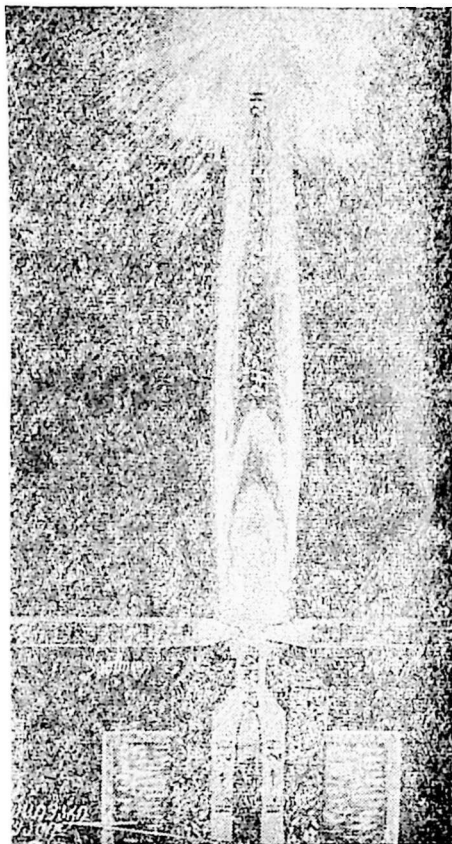
ეს განაპირობებს დენის სიმკვრივის ამალღებას სვეტის ცენტრში, ვინაიდან დენი უფრო მაღალი ტემპერატურისა და მეტი ელექტროგამტარობის სფეროში კონცენტრირდება.

ასეთი ტიპის ელექტროგანმუხტვის რკალი გამოიყენება, როგორც დენის წყარო, მაგალითად, მძლავრ პროექტორებში, აირებისა და სითხეების გასახურებლად ქიმიურ მრეწველობაში, ძნელდნობადი ნაერთების დასაწევადად და სხვ.

სხვადასხვა ფორმის პლაზმათა მისაღებად გამოცდილი იყო სოლენოიდური მაგნიტური ველები, ფოკუსირებული ელექტრონული სხივები, ცეზიუმის ორთქლის შეხება გახურებული ლითონის ზედაპირთან და სხვ.

მეტალურგიული პროცესებისათვის გამოყენებული პლაზმის ქავლი სამი სხვადასხვა გზით შეიძლება იყოს მიღებული:

1. ელექტრორკალში აირის შებერვით,
2. ელექტრორკალის ელექტროდის აორთქლებით,
3. მაღალი სიხშირის განმუხტვით.



წყალბადის პლაზმა. მოლეკულების დისოციაცია და ასოციაცია ელექტროგანმუხტვის რკალში.

პირველ შემთხვევაში სასურველი აირის პლაზმა ორ ელექტროდს შორის აღძრულ ელექტრორკალში წარმოიქმნება. ერთ-ერთ ელექტროდს მილის ფორმა აქვს. აირის სიჩქარე მასში ბგერასა და კი შეიძლება აქარბებდეს. აირი აცივებს მილის კედელს და წარმოქმნის პლაზმას.

ასეთი პლაზმური გენერატორის მქვ საკმაოდ მაღალია—65%; აღის ტემპერატურა 10—15 ათას გრადუსს აღწევს.

ცხადია, რომ დანადგარის სიმძლავრეს ელექტროდის მააალის მედეგობა განსაზღვრავს.

მეორე შემთხვევაში პლაზმა თვით ელექტროდის მააალის აორთქლებით მიიღება. ამ დროს ტემპერატურა თუმცა შედარებით დაბალია (6—10 ათასი გრადუსი), მაგრამ სამაგიეროდ მქვ უკვე 75%-მდე აღის. ასეთი გენერატორის სიმძლავრე აღარ არის დამოკიდებული ელექტროდის მედეგობაზე და ამიტომ მას ჭიმოურ-მეტალურგიულ პროცესებში ფართო პერსპექტივა ესახება.

პლაზმის ჭავლის მიღება შეიძლება ელექტროდის გარეშეც აირის ნაკადის ძლიერ ელექტრომაგნიტურ არეში გატარებით. უკანასკნელის გრიგალისებურ დენება აირი პლაზმის მდგომარეობაში გადაჰყავთ. ასეთი მაღალი სიხშირის გენერატორები ძლიერ სუფთა პლაზმის მიღების შესაძლებლობას ქმნის, ვინაიდან იგი ელექტროდის ეროზიის პროდუქტებით არ შეიძლება იყოთ გაჟუჟყიანებული. ტემპერატურა აქაც საკმაოდ მაღალია — 10—12 ათასი გრადუსი, მაგრამ პლაზმის ნაკადს ნაკლები სიჩქარე აქვს — სულ რაღაც რამდენიმე მეტრი წამში.

ასეთი სუფთა პლაზმის გამოყენება განსაკუთრებით მაღალი სიწმინდის ძნელდნობადი ლითონების დასამუშავებლად არის მოსახერხებელი.

დიდი პერსპექტივები იქმნება სხვადასხვა პოლიმეტალური კომპლექსური მადნების თერმული დამუშავების მიმართულებით. აღსადგენ ელემენტთა ჟანგეულების ნარევი ჭერ ფხვნილის სახით მზადდება. პროცესის მომდევნო საფეხურზე შესაძლებელი ხდება ამ ჟანგეულების აღდგენა და სუფთა ლითონების მიღება.

პლაზმის ჭავლი შეიძლება გამოვიყენოთ აგრეთვე როგორც უფრო მაღალი ტემპერატურების მიღების საშუალება, სხვადასხვა სადნობ და მარაფინირებელ აგრეგატებში პროცესების გაუმჯობესების მიზნით.

პლაზმური მეტალურგიის დიდი მომავალი ექვს არ იწვევს. ჩვენ ჭერ მის სათავეებთან ვართ. პლაზმამ უნდა შეცვალოს თანამედროვე გიგანტური და მოუქნელი მეტალურგიული აგრეგატები, ხოლო პროცესები გახადოს უწყვეტი. უნდა ახდეს მეტალურგთა ოც-

ნება, კერძოდ, ლითონთა დნობის პროცესების სრული ავტოკიმიზაციის შესახებ.

ახალი ტექნიკისათვის საჭირო უაღრესად სუფთა მასალების მიღების აუცილებლობა განსაკუთრებულ მოთხოვნებს უყენებს არა მარტო გამოსავალ ნედლეულს, არამედ იმ აპარატურასაც, რომელშიც იგი უნდა გადაამუშავდეს.

ელექტროდიანი პლაზმის სანთურა ასე თუ ისე მაინც აქუქყიანებს ჰავლს და, მაშასადამე, მასალასაც. ცხადია, რომ თუ მოხერხდებოდა პლაზმის მიღება ელექტროდის გარეშე, ეს ბევრად უფრო სრულყოფილს გახდიდა პროცესს. ასეთი დანადგარები ამჟამად უკვე არის დამუშავებული. სარეაქციო არეს სისუფთავის გარდა, მათი დადებითი თვისებაა არა მარტო ინერტული, არამედ ნებისმიერი აირებისა და მათი ნარევების გამოყენების შესაძლებლობა.

აღნიშნული უპირატესობა საშუალებას იძლევა მაღალი სიხშირის პლანზოტრონში ჩავატაროთ უაღრესად სუფთა ნივთიერებათა მიღების რეაქციები.

პლანზოტრონის განმუხტვის კამერა წარმოადგენს ლობილი კვარცის მილს. კვების წყაროა 15-30 მეგაჰერცის სამუშაო სიხშირის გენერატორი.

აღის ასანთებად ჯერ დამხმარე ელექტრორკალს აღძრავენ არგონის ატმოსფეროში ინდუქტორსა და გრაფიტის ელექტროდს შორის, რომელიც წყლით ცივდება; რკალური განმუხტვის წარმოქმნის შემდეგ ელექტროდს ამოწევენ. არგონისა და მატარებელი აირის რაოდენობის გაზრდა აუმჯობესებს პლაზმის ჩირაღდანის მედეგობას და ხელს უწყობს განმუხტვის მილის გაცივებას. არგონს ატარებენ იმდენს, რომ პლაზმის „თასმა“ მილის ღერძს ემთხვეოდეს. საჭირო შემთხვევაში გარედან ჰაერით გაცივებასაც მიმართავენ.

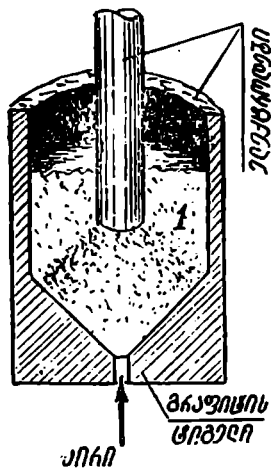
ინდუქციური პლანზური სანთურა წარმოადგენს კვარცის მილს, სადაც გამდინარე აირის ჰავლაში, ელექტროდის გარეშე, მაღალი სიხშირის დენის მეშვეობით აღიძვრება მაღალი ტემპერატურა. მილის ბოლოში ყალიბდება პლაზმის ალი; იგი ჩვეულებრივი ქიმიური წვის შედეგად მიღებულ ალს ჰგავს.

ენერჯის წყაროს 5-დან 30 კვტ-მდე სიმძლავრისა და 1-დან 60-მდე მჰც სიხშირის ელექტრონმილაკიანი გენერატორი წარმოადგენს.

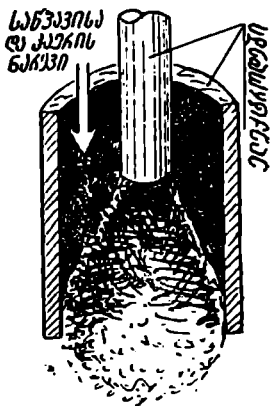
კვარცის მილისათვის სპეციალური მაცივარი მოწყობილობის შექმნა საჭირო, ვინაიდან წარმოქმნილი პლაზმის დიდ ტემპერატურას (9000—10500°) 20—30 წამში შეუძლია გააღლოს იგი.

მაცივარი დანადგარის ძირითად ნაწილს წარმოადგენს. იგი სამი ტიპის შეიძლება იყოს:

1. მილის იძულებითი გაცივება აირის ნაკადის მეშვეობით. ამ ტიპის დანადგარში ნაკადი ყალიბდება სპეციალური სამარჯვის მეშვეობით და, დიდი სიჩქარით (1—1,5 მ/წმ) გავლინება რა მილის შიგა კედლის გასწვრივ, იცავს მას პლაზმის ჰველის შეხებისაგან. მაგრამ იმის გამო, რომ მილიდან გამოსვლისას საგრძნობი დაგრივალეობა ხდება, გაცივების ეს ხერხი, მაგალითად, ძნელდნობადი მასალის მონოკრისტალის მიღების შემთხვევაში, უვარგისია, ვინაიდან ნედლეულის (ფხენილის) გაფანტვა ხდება, ეს კი დანაკარგებს ზრდის.



მალატემპერატურაიანი რეაქტორი ფსევდოთხევადი შრით



რეაქტორი გაცანიერებული ალით

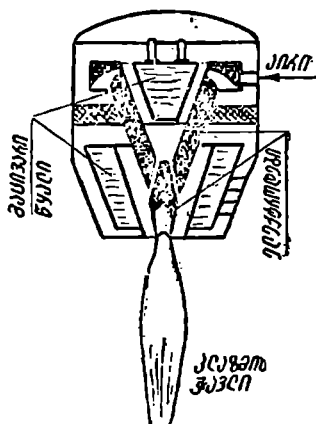
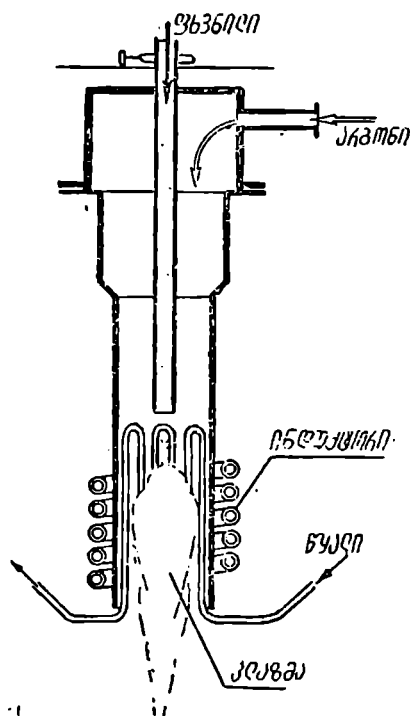
2. მილის გაცივება ორმაგ კედელს შორის გამდინარე წყლით. მცირე სიმძლავრის დანადგარებისათვის ასეთი ხერხი გამოსადეგია, მაგრამ დიდი დატვირთვები შიგნითა კედლის გადახურებას და ბზარების გაჩენას იწვევს.

3. უკეთესი აღმოჩნდა კვარცის მილში ინდუქტორის ღერძის პარალელურად სპილენძის კლაკნილას ჩადგმა, რომელშიც მაცივარი წყალი გავლინება. ასეთი უელექტროლო ინდუქციური განმუხტვა რამდენიმე ათეული კვტ სიმძლავრის აგრეგატიან შექმნის საშუალებას იძლევა. პროცესი უწყვეტად მიმდინარეობს ხანგრძლივი დროის განმავლობაში.

მაღალი ინტენსივობის რკალი ორ ელექტროდს შორის აღძრული ელექტრორკალის განსაკუთრებულ სახეს წარმოადგენს.

დენის განსაზღვრულ მნიშვნელობამდე გაზრდის შემდეგ, ანოდზე განვითარებული სიმძლავრის არინება სითხის გამტარობისა და გამოსხივების მეოხებით უკვე აღარ არის შესაძლებელი. ქარბი სიმძლავრე ანოდის აორთქლებასა და მის გადახურებაზე იხარჯება, ამის გამო ტემპერატურა 6000—10000°-მდე იწევს. აორთქლების

შედეგად, ანოდის კრატერიდან 50 მ/წამში სიჩქარით ამოიტყორცნება ანოდური პლაზმა. ანოდური ალით დადებითი იონების წატაცება კიდევ უფრო აღიდებს რკალში ანოდურ დაცემას.



ინდუქციური პლაზმური სანთურა

ელექტროდული პლაზმოტრონი

ეს გარემოება თავის მხრივ დენის შემდგომი გაძლიერების დროს სიმძლავრეს ანოდზე კიდევ უფრო ზრდის. ვინაიდან სიმძლავრის მატება გაცილებით ჩქარა ხდება, ვიდრე ანოდის აორთქლება, ამიტომ ნაქარბი დენი ორთქლის ტემპერატურის გაზრდაზე იხარჯება.

აორთქლების ეფექტურობის გაზრდისა და ჩვეულებრივი რკალიდან მაღალი ინტენსივობის რკალზე გადასვლის გაადვილებისათვის მიზანშეწონილად ითვლება ნახშირის ელექტროდისათვის (ანოდისათვის) ადვილად აქროლადი მარილების დამატება (ჩაწნეხვა).

მაღალი ინტენსივობის რკალის მეტი სტაბილურობისათვის ელექტროდებს განსაზღვრული კუთხით აყენებენ ერთმანეთის მიმართ. პლაზმური ჩირაღდნის პარამეტრები ბევრ ფაქტორზეა დამოკიდებული — ელექტროდებს შორის კუთხეზე, რკალის სიგრძეზე, დენის სიდიდეზე, ანოდის დიამეტრსა და მასალაზე, აგრეთვე გარემო ატმოსფეროსა და წნევაზე.

რკალის პარამეტრების რეგულირებას უფრო ხშირად ელექტროდებს შორის კუთხისა და მანძილის შეცვლით ახდენენ.

მაღალტემპერატურული დანადგარების სხვა სახეები. დნობა ელექტრონული სხივით. მხურვალმტკიცე ლითონებისა და შენადნობების მიღების საჭიროებამ ინდუქციურ-ვაკუუმის დნობის განვითარებას მისცა ბიძგი, ტიტანის შენადნობებისათვის აუცილებელი შეიქნა რკალის ვაკუუმ-ღებელი. ბოლო წლებში კი სუფთა ძნელდნობადი ლითონების გამოსადნობად სხვა ახალი მეთოდის გამოძებნაც დასჭირდა ტექნიკას. ასეთი გამოდგა ელექტრონული სხივი, რომელიც დიდი ენერგიით გამოიტყორცნება ელექტროდისაგან და, ეცემა რა შესაბამის სინჯს, აღნობს მას. ელექტრონული დაყუმბარება სულ უფრო და უფრო ენერგება როგორც ჩვეულებრივი, ისე ზონური ლობისათვის, ლითონთა შედუღებისა და სხვა სახის დამუშავებისათვის, კერძოდ, პრეციპიტული ნასკრეტის გასახერხებლად, ნაკეთობის თხელი ფენით დაფარვისათვის და სხვ.

ამ მეთოდის გამოყენებამ შესაძლებელი გახადა ისეთი ძნელდნობადი ლითონების ზუსტი დამუშავება, როგორიცაა ჰაფნიუმი, მოლიბდენი, ნიობიუმი, ტანტალი, რენიუმი და სხვ. ამ მხრივ აღსანიშნავია არა მარტო მუშა ტემპერატურის მიღების სიაღველე, ენერგიის ხარჯის შემცირება და გამოსავლიანობის გაზრდა, არამედ მასალის დამუშავების სიაღველე და მიღებული ნაკეთობის მაღალი სიუფთავე.

ღუმელთა კონსტრუქციები ორი ძირითადი მიმართულებით ვითარდება — რგოლური კათოდის შექმნისა და აქსიალური (ღერძული) ელექტროდაყუმბარების მეთოდის სრულყოფის გზით. კონსტრუქციის შემდგომმა გაუმჯობესებამ და სიმძლავრისა და საიშედობის გაზრდამ ეკონომიური მაჩვენებლები კიდევ უფრო მისაღები უნდა გახადოს.

ა ფ ე თ ქ ე ბ ი ს ტ ა ლ დ ა . ამ რამდენიმე ათეული წლის წინათ უძველესი ცეცხლის შესახებ ჩვენ ნაკლები ვიცოდით, ვიდრე გაცილებით ახალგაზრდა ელექტრობის შესახებ. ამის მიზეზად უნდა ვიგულოთ ის, რომ ეს უკანასკნელი უფრო ადრე იქნა გამოყენებული უშუალო მუშა აგენტად. მაგრამ აგუგუნდნენ ავტომანქანები და თვითმფრინავები და პრაქტიკამ მოითხოვა წვისა და აფეთქების თეორიის შექმნა. ფ. ენგელსის მოხდენილი თქმით, პრაქტიკის მოთხოვნილება უფრო მძლავრად ანვითარებს მეცნიერებას, ვიდრე ათეული უნივერსიტეტები. წვის თეორია ამ ორმოციოდე წლის წინათ შექმნა ნ. სემიონოვმა და ჰინშელვუდმა.

მაგრამ ახლანდელი ტექნიკის მიერ გამოყენებული ცეცხლი სხვა თვისებებისაა. ატმოსფეროში შემოჭრილი მეტეორიტის ან ხელოვნური თანამგზავრის ირგვლივ წარმოქმნილი კაშკაშა გვირგვინი ან რაკეტის საქშენიდან გამოტყორცნილი ნაკადი სულ არ ჰგავს შეშის წვის ალს; აქ უკვე სწრაფი მყისეული წეა გვაქვს, რომელიც აფეთქებას ესაზღვრება. მას დიდი პერსპექტივები აღმოაჩინდა. საჭირო იყო აფეთქების თეორიის შექმნა, რათა შესაძლებელი გამხდარიყო მისი დაუფლება და გამოყენება. ასეთი თეორიის საფუძვლები დაამუშავეს ი. ზელდოვიჩმა ჩვენთან და ნეიმანმა და დიურინგმა — ამერიკაში.

ამ თეორიის თანახმად, აფეთქების შედეგად წარმოიქმნება ე. წ. დარტყმითი ტალღის ფრონტი, რომელიც თხელი, 1 მმ-მდე სისქის ფენის სახით ვრცელდება გარემოში. მას მოსდევს ძლიერ შეკუმშული აირის ფენა, შემდეგ — აალების ფრონტი და ბოლოს — წვის პროცესების ნარჩომები.

ზელდოვიჩ-ნეიმან-დიურინგის თეორიის თანახმად, აალების ფრონტსა და დარტყმით ტალღას გლუვი სფერული ზედაპირი უნდა ჰქონდეს. ბოლო დროს გამოკვლევებმა კი აჩვენა, რომ აალების ფრონტი საკმაოდ არამდგრადია. მასზე წარმოიქმნება ნაოჭები და ბორცვები, რომლებიც სწრაფად იზრდებიან და დარტყმით ტალღასაც კი უსწრებენ წინ. ეს უკანასკნელი თავის მხრივ იღუნება, აგრეთვე წარმოშობს ბორცვებს, რომლებიც დიდ აჩქარებას იძენენ, გაიჭრებიან წინ და უსწორმასწოროდ გადაადგილებენ ფრონტის მთელ ზედაპირს. გამოზნეჭილობათა იქით ტემპერატურა სწრაფად მალღდება — ზოგჯერ 1,5-ჯერაც კი.

აალების ფრონტსა და დარტყმით ტალღაში წარმოშობილი ტენილები ეჩახებიან და კვეთენ ერთმანეთს. იქმნება „დუღილის“, განუწყვეტელი პულსაციის შთაბეჭდილება. ბორცვების წარმოქმნა-გაქრობა უდიდესი სიჩქარით ხდება—წამში 40 ათასამდე, გაიშვიათე-



ბულ აირში ჩვეულებრივი წნევის დროს კი მათი რიცხვი რამდენიმე მილიონამდე იზრდება.

დაჯანებათა შედეგად ტემპერატურა ორჯერ მეტი შეიძლება იყოს, ვიდრე აფეთქების პირვანდელი თეორიით იყო ნაგარაუდელი. მაშასადამე, ქიმიური გარდაქმნებიც ამ დროს გაცილებით სწრაფად მიმდინარეობს. ყოველივე ეს ახლებურად წყვეტს არა მარტო თვით აფეთქების ბუნების საკითხს, არამედ მისი ტექნიკური გამოყენების პრობლემებსაც.

„მზის ღუმელები“. მზის სხივების კონცენტრირებისათვის შეზნეპილი სარკეების გამოყენების პირველი ცდები ჯერ კიდევ ანტიკური ეპოქიდან მომდინარეობს (გაიხსენოთ თუნდაც ლეგენდა არქიმედეს სარკეების შესხებ). მე-17 საუკუნეში კი სარკიან მზის ღუმელებს ჩეხოსლოვაკიაში უკვე კერამიკის გამოსაწვავად ხმარობდნენ. თითბრის შენადნობისაგან დამზადებული სარკის დიამეტრი 1,7 მ-ს უდრიდა.

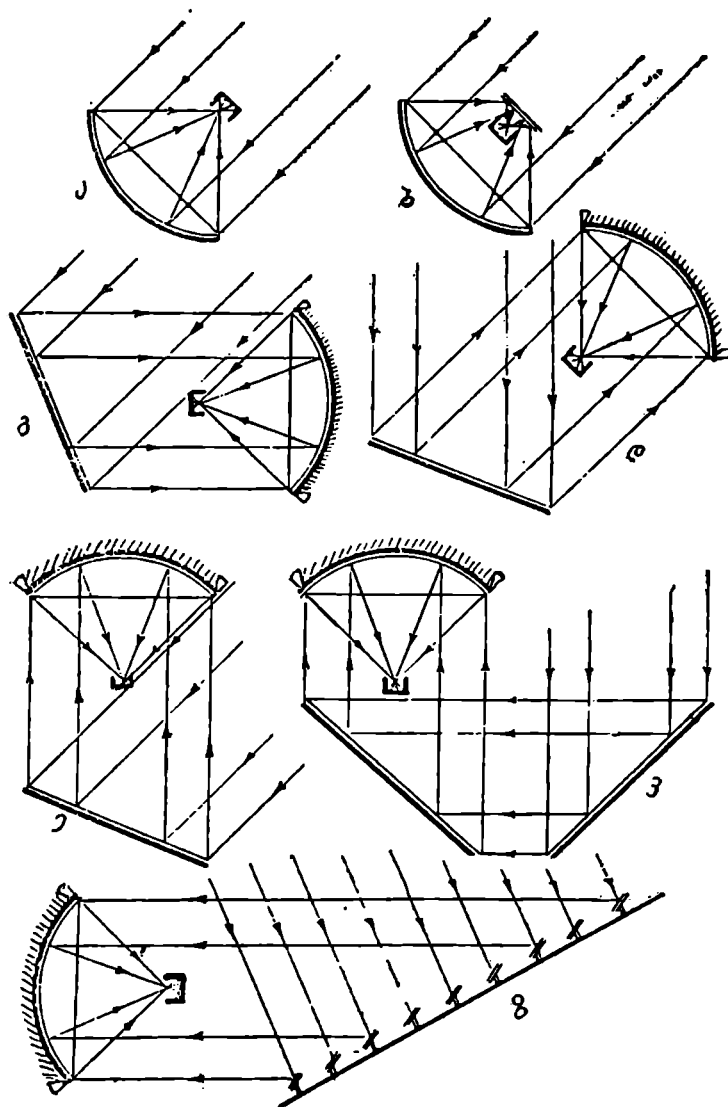
ამჟამად მზის სხივების უხვი და უფასო ენერჯიის გამოყენებაზე ფართო მასშტაბის კვლევები წარმოებს. შემუშავებულაა და გამოცდილი პარაბოლოიდური სარკეების სხვადასხვა სახეები მცირე და დიდი სტაციონალური დანადგარებისათვის. უკანასკნელი წლების კონსტრუქციებში მომეტებული ყურადღება უძრავ პარაბოლოიდებს ექცევა, რომლებზედაც სხივების მიმართვა ბრტყელი მოძრავი სარკეების მეშვეობით ხდება. სპეციალური ავტომატური მოწყობილობის მეოხებით ეს სარკეები მუდმივად მზის დისკოსაკენ არის მიმართული.

პარაბოლური სარკის ფოკუსში, საჭიროების მიხედვით, საკმაოდ მაღალი — 2000°-დან 4000°-მდე ტემპერატურა შეიძლება გვექონდეს. მაგრამ ფოკუსის დიამეტრი შედარებით მცირეა — 2—5 სმ არ აღემატება. რეაქტივები შეიძლება მინის ჭურჭელში ან სპეციალურ ტიგლებში ჩავატაროთ.

იაპონიაში შექმნილია შეიღიარუსიანი ღუმელი მბრუნავი პელიოსტატით. პარაბოლური სარკის დიამეტრი 10 მ აღწევს, ფოკუსის დაშორება — 3,2 მ. პარაბოლოიდის ზედაპირი 181 სარკისაგან შედგება. თვითეული მათგანი 10 მმ სისქის მინისაგან არის დამზადებული და ალუმინის თხელი ფენით მოპირკეთებულ ზედაპირზეა ჩამაგრებული.

ღუმელი მაღალტემპერატურული ფიზიკური და ქიმიური ხასიათის კვლევებისათვის არის განკუთვნილი. მთლიანი მინისაგან დამზადებულ სარკეებს კარგი ოპტიკური მახასიათებლები, მაგრამ არადაამაკმაყოფილებელი მექანიკური თვისებები აქვთ, რაც, დიდ

ღირებულებასთან ერთად, ზღუდავს მათი სამრეწველო მასშტაბით გამოყენების შესაძლებლობას.



მზის ღუმელების ოპტიკური სქემები

ბოლო დროს დიდ იმედებს ამყარებენ ალუმინის ოქსიდირებული სარკეებზე. შექმნილია 2,7 მ დიამეტრის უნაკერო კონცენტრატორები.

მზის სხივები ფოკუსირდება 10 სმ დიამეტრის ლაქად, რაც იმას ნიშნავს, რომ გამოსხივების ძალა 800-ჯერ ძლიერდება. გამოცდას გადის ლავსანისაგან დამზადებული ფირებიც.

ფიქრობენ, რომ ასეთი სარკეების მქონე დანადგარები უკვე ახლო მომავალში ნახავენ გამოყენებას მზის სხივებით მდიდარ და ენერჯიის წყაროებს მოშორებული რაიონებისათვის.

დიდ იმედებს ამყარებენ მასზე კოსმოსური ხომალდების მომავალი მოგზაურებიც. მათთვის უკვე ამჟამად შექმნილია დანადგარები, რომლებშიც მზის სხივების 10 — 14% შეიძლება ელექტროენერჯიად გარდა-  
საიზოლაციო  
მასალა  
 იქმნას.

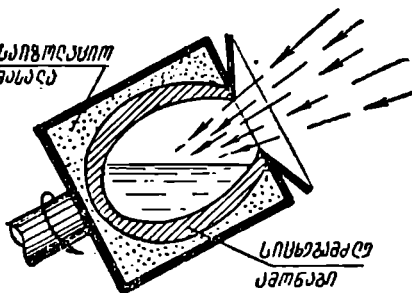
არის ცნობები 300—1000 კვტ სიმძლავრის საცდელი ელექტროსადგურების მშენებლობის შესახებ, სადაც კაუბადის ფოტოელემენტები იქნება გამოყენებული.

თერმოემისიური მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში პარალელური სარკის ფოკუსში კათოდი 1700—2000°-მდე ხურდება. ამ დროს ხდება ელექტრონების ამოტყორცნა, რომელსაც იჭერს ანოდი და გვაძლევს დენს.

შესწავლის პროცესშია მზის თერმოელექტრონული გენერატორები.

„მ ა ვ თ უ ლ ი ს ა ფ ე თ ქ ე ბ ა“. კარგა ხანია ცნობილია, რომ ძლიერი დენის გავლა ელექტრომავთულში ამ უკანასკნელის რღვევას — გაღობასა და სწრაფ დაშლას იწვევს. ხოლო როდესაც დენის ენერჯია იმდენად დიდია, რომ მავთული მყისიულად ორთქლდება, მაშინ ნამდვილ აფეთქებასთან გვაქვს საქმე. კაშკაშა ფეთქისა და ძლიერი ბგერის გარდა, ამ დროს დიდი სიჩქარის აფეთქების ტალღებიც წარმოიქმნება, ამასთანავე, რაც უფრო ნაკლებია აფეთქების დრო, მით უფრო ძლიერია თვით აფეთქება.

მავთულის აფეთქების მოვლენა ბოლო დროს მეცნიერთა გაცხოველებული ყურადღების საგანი გახდა. საქმე იმაშია, რომ იგი ბევრი საინტერესო მოვლენის შეცნობის საშუალებას გვაძლევს.



მზურეალმედვი ტიგელი მაღალი სისუფთავის ლითონების საღნობად.

ამ გზით შორეულ ვარსკვლავთა წიაღში მიმდინარე პროცესების მოდელირებასაც კი ახდენენ.

მავთულის აფეთქების მექანიზმი თუმცა ჯერჯერობით ნათელი არ არის, მაგრამ თვით ამ მოვლენას ტექნიკის ზოგიერთ დარგში უკვე დაესახა გამოყენების პერსპექტივები.

ფეთქის სიკაშკაშე იმდენად ძლიერია, რომ იგი წარმატებით დაინერგა სპეციალურ ფოტოგრაფიაში, კერძოდ — თვითმნათ გარემოში გადაღებებისათვის. ასე ხერხდება, მაგალითად, რეაქტიული ძრავას შინაგანი ნაწილების მუშაობის პროცესის აღბეჭდვა საქმენიდან გამოტყორცნილი აირის გამჭოლ ალში.

მავთულის აფეთქების დროს წარმოქმნილი დარტყმითი ტალღის გამოყენება ნავარაუდევია აგრეთვე ლითონთა მექანიკური დამუშავებისთვისაც, კერძოდ, ტვიფრვის საქმეში. ლითონის ფურცლის ჩაწნევას ამა თუ იმ ფორმის ბუდეში (მატრიცაში) სულ რაღაც მიკროწამები სჭირდება. ამგვარად მოხერხდა ისეთი მაღალი სიმტკიცის მქონე შენადნობების ტვიფრვა, რომელთა დამუშავება სხვა რომელიმე ხერხით შეუძლებლად იყო მიჩნეული.

მავთულის აფეთქებისათვის დიდი ენერჯიის მყისიერი დაცვლაა საჭირო. ეს ენერჯია რამდენჯერმე აღემატება მავთულის ასაორთქლებლად საჭირო ენერჯიის რაოდენობას. ამისათვის ელექტრულ სქემაში რამდენიმე ათასი მიკროფარადის ტევადობის ბატარეებია გათვალისწინებული. ძაბვა 1000 კილოვოლტს მაინც უნდა აღწევდეს. გადამწოდის ამოქმედება რამდენიმე ნანოწამს (წამის მემილიონედს) არ აღემატება.

მავთულის აფეთქება, როგორც აღვნიშნეთ, აირების სწრაფ გაფართოებას და ძლიერი დარტყმითი ტალღების წარმოქმნას იწვევს. ამ მოვლენის გამოყენება კოსმოსური ხომალდის ელექტროძრავებშია ნავარაუდევო. მაგრამ აფეთქების უზრუნველყოფი ენერგეტიკული დანადგარის დიდი წონის გამო ასეთი ვარაუდი ჯერჯერობით მხოლოდ თეორიული ხასიათისაა.

პ ლ ა ზ მ ი ს ჭ ა ვ ლ ი ს ტ ე ქ ნ ი კ უ რ ი გ ა მ ო ყ ე ნ ე ბ ა . ვინაიდან პლაზმის ჭავლის ტემპერატურებზე პროცესები უაღრესად ჩქარდება, ხოლო ნივთიერებები განსაკუთრებულ თვისებებს იძენენ, ამიტომ პლაზმამ ფართო გამოყენება ჰპოვა ტექნიკის სულ სხვადასხვა დარგში, უმთავრესად კი სპეციალური მასალების მიღებისა და დამუშავებისათვის.

პლაზმაში ყველა ნივთიერება აირად მდგომარეობაშია, რაც აადვილებს რეაქციების მიმდინარეობას. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ქიმიური რეაქციების მყისიერად ჩატარება, რაც სამრეწველო მასშტაბით განხორციელების სტადიაშია. პლაზმა გამოიყენ-

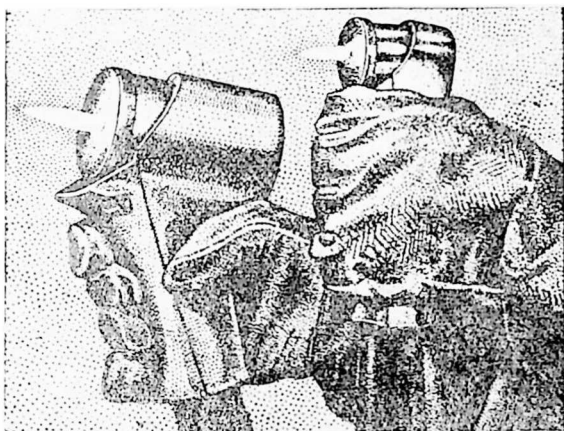
ნება აეროდინამიკურ და კოსმოსურ ძრავებში, მასალების თვისებათა შესასწავლად და სხვ.

აღსანიშნავია აგრეთვე მაღალი ტემპერატურისა და წნევის ერთდროული მოქმედების ქვეშ მომუშავე აპარატების დაფარვა ძნელდნობადი ლითონებით და მასალებით.

ამ მხრივ პლაზმის ერთ-ერთი პირველი გამოყენება იყო რაკეტულ ძრავას გრაფიტის ნაწილების დაფარვა ჩვენი პლანეტის ყველაზე ძნელდნობადი ლითონის — ვოლფრამის ფენით. ამ ტიპის ხელსაწყოები ამჟამადაც გამოიყენება არა მარტო ძნელდნობადი შენადნობებით, უანგეულებით, კარბიდებით და სხვ., არამედ ქიმიურად აქტიური მასალებით დაფარვისათვისაც.

მასალა გასაფრქვევად პლაზმაში მავთულის ღეროს ან სპეციალურ აირ-მატარებელში დისპერგირებული ფხვნილის სახით მიეწოდება.

ბოლო წლებში დაიწყო პლასტიკური მასების გაფრქვევაც. კარგი შედეგები გამოიღო, კერძოდ, პენტონის, ნეილონის, ტეფლონისა და ეპოქსიდური ფისების გაფრქვევამ.



ფხვნილის გამფრქვევი პლაზმოტრონები

ამგვარად მიიღება როგორც თხელი, კოროზიის საწინააღმდეგო, ისე საიზოლაციო და დეკორაციული დანაფარები.

პლაზმური განმუხტვის რკალი დიდ გამოყენებას პოულობს მეტალურგიაშიც. ინდუქციური სანთურის მეშვეობით ხერხდება სუფთა ლითონებისა და ძნელდნობად ნაერთთა კრისტალების მიღება.

## მაღალი ზემოქარაჯუკები ქიმიურ ქიმიურ მაგნიტობაში

მაღალი ტემპერატურების ქიმიის თავისებურებანი. ქიმიურ პროცესებში მაღალი ტემპერატურების გამოყენებას ელექტრორკალის აღმოჩენის შემდეგ გაეხსნა გზა. კარგა ხანს, თითქმის უკანასკნელ დრომდე, ელექტრორკალი ერთადერთი მოსახერხებელი საშუალება იყო რეაგენტების სწრაფად გახურებისათვის განსაზღვრულ მოცულობაში, ამიტომ იგი საკმაოდ ფართოდ დაინერგა მრეწველობის ბევრ დარგში. საკმარისია დავასანგლოთ ჰაერის აზოტის უშუალო დაქანგვა ბირკელანდ-ეიდეს მეთოდით, ელემენტური ყვითელი ფოსფორის მიღების თერმული ხერხი, კალციუმის კარბიდის წარმოება და ელექტროთერმულ წარმოებათა ტექნოლოგიის სხვა საყოველთაოდ ცნობილი დარგები.

მაგრამ ეს პროცესები შედარებით დაბალ ტემპერატურაზე, 2000—3000°-ის ფარგლებში ხორციელდება. შემდგომში ტექნიკურ საშუალებათა სრულყოფის საფუძველზე დადგინდა უფრო მაღალი ტემპერატურების გამოყენების არნახული პერსპექტივები. ამ გარემოებამ საკმაოდ გააცხოველა ინტერესი რამდენიმე ათას და ათეულ ათას გრადუსამდე გავარვარებული აირებისადმი. მაგრამ 4000°-იან საფეხურის დაძლევისა და მის დიდ სამრეწველო მასშტაბში განხორციელებას ამჟამადაც კი ბევრი ტექნიკური სიძნელე ელოდება წინ. მიზეზი ამისა არის ის, რომ პლაზმის მდგომარეობაში ყოველი ნივთიერება უალრეს ქიმიურ აქტივობას იჩენს, რაც დიდად აძნელებს შესაფერისი აპარატურისა და სარეაქციო გარემოს შერჩევის საქმეს. პლაზმური პროცესების დაუფლებისათვის დიდმნიშვნელოვანია მათი ღრმა შესწავლა, რაც აგრეთვე რთულდება იმის გამო, რომ პროცესების მიმდინარეობა წამის მეათასედსა და მეათიათასედს არ აქარბებს. მიუხედავად ამისა, კვლევები ამ მიმართულებით უკანასკნელი წლების მანძილზე დღითიდღე ფართოვდება.

მაღალტემპერატურიანი ქიმიისადმი ინტერესს მრავალი ფაქტორი განაპირობებს. მთავარი მათ შორის არის ის, რომ პლაზმის სანთურას გაცილებით მაღალი ტემპერატურა შეუძლია განხვეთაროს, ვიდრე ქიმიური საწვავის ან ელექტრორკალის გამოყენების შემთხვევაში გვაქვს. ასეთ ტემპერატურებზე რეაქციები წარმოუდგენლად ჩქარდება, ხოლო რეაგენტების ურთიერთკონტაქტის დრო შესაბამისად მცირდება, რაც ტექნიკური პროგრესის ფართო პერსპექტივებს სახეის.

მომეტებულ ყურადღებას იქცევს დაბალტემპერატურიანი პლაზმის გამოყენების საკითხები ( $\sim 5000^{\circ}$ -მდე). ამ პირობებში არსებით როლს თამაშობს ქიმიური პროცესების უფრო განსხვავებულად მიმდინარეობა, ვიდრე კლასიკური კანონებით არის გათვალისწინებული. მაშინ, როდესაც ნივთიერების დეზაგრეგაციის, დისოციაციის, მოლეკულათა დაშლა-დახლეჩის რეაქციებია მოსალოდნელი, სინამდვილეში გაცილებით უფრო რთულ და ზოგჯერ უჩვეულო პროცესებთანაც გვაქვს საქმე. როგორც დასაწყისში უკვე გვქონდა აღნიშნული, მაღალ ტემპერატურებს არა მარტო ქიმიურ ფარდობათა გამარტივებისაყენ მივყავართ, არამედ მოულოდნელ რეკომბინაციებსაც გვაძლევს.

პლაზმის ჭავლი არა მარტო მაღალი ტემპერატურისა და დიდი სითბოს შემცველობის მქონე წყაროა, რაც ძირითადად განსაზღვრავს მის გამოყენებას ქიმიურ პროცესებში, არამედ იონებისა და ელექტრონების მქონე უხვი ნაკადიცაა. ეს შესაძლებლობას იძლევა თვით ინერტული აირებიც კი გადავაქციოთ რეაქციის უნარის მქონე იონებად. ამგვარადაა მიღებული ჰელიუმის, ნეონის, არგონის, კრიფტონის იონები და მათი ზოგიერთი ნაერთი —  $(NeH)^+$ ,  $(NeHe)^+$ ,  $(ArH)^+$ ,  $(RrH)^+$  და სხვ.

გარდა აღნიშნულისა, პლაზმის ჭავლი ქიმიკოსებისთვის იმითაც არის საგულისხმო, რომ იგი რთული პროცესების მართვის საშუალებას იძლევა, ვინაიდან რეაქციის კინეტიკა დიდად არის დამოკიდებული გავარვარებული აირის ნაკადის პარამეტრებისაგან—მისი ტემპერატურისა, შედგენილობისა და სიჩქარისაგან, რომელთა ცვლათვის მხრივ თითქმის ნებისმიერ ფარგლებშია შესაძლებელი.

პირველი შეხედვით, მაგალითად, შეიძლება მოგვეჩვენოს, რომ მზის ზედაპირის ტემპერატურაზე ( $5000^{\circ}$ ) ნახშირბადი მყის აენთება და დაიწვება. სრულებითაც არა! საკითხის არსს თუ ღრმად ჩავუკვირდებით, ვნახავთ, რომ ამ პირობებში ნახშირბადი მხოლოდ აორთქლდება, გარემოში ქანგბადი ბევრიც რომ იყოს!

პლაზმის ქიმია ჩვეულებრივისაგან სრულებით განსხვავებული,

ახალი დარგია მეცნიერებისა, ეს გასაგებიცაა, 5000<sup>2</sup>-ზე ზევით ატმოსფერულ წნევაზე მყარი სხეული უკვე აღარ შეიძლება არსებობდეს — იგი იშლება მის შემდგენელ იონებად და ელექტრონებად. ნეიტრალური ნაწილაკებიც კი უდიდეს კინეტიკურ ენერგიას იძენენ. ძლიერ აგზნებული მდგომარეობის გამო, ატომები ზოგჯერ ძნელად სავარაუდო შედგენილობის ნაერთებს გვაძლევენ.

მაგრამ ამა თუ იმ ნაერთის მიღებას იმდენად არა მაღალი ტემპერატურის მიღების ტექნიკური სიძნელე განაპირობებს, რამდენადაც ამ პროდუქტების დაუშლელად შენარჩუნების შესაძლებლობა. სწორედ ეს საკითხი განსაზღვრავს საბოლოო ჯამში მაღალი ტემპერატურების პრაქტიკულ გამოყენებას.

მრავალი ძიების შემდეგ დადგინდა, რომ რეაქციის პროდუქტების შენარჩუნება შეიძლება ნარევის მყისეული გაცივებით.

ვარაუდობენ, რომ პლაზმურ ალში ამა თუ იმ ნაერთის წარმოქმნა ორ საფეხურად მიმდინარეობს. პირველად ხდება აირის ან პლაზმის ალის დაშლა აქტივირებულ ატომებად და მათი ახალი რეკომბინაცია. მყარდება მოძრავი წონასწორობა. ამ რეაქციას საკმაოდ დიდი სიჩქარე აქვს. მეორე საფეხურია მიღწეული ქიმიური წონასწორობის მყისეული გაყინვა. სწორედ ეს პროცესია ტექნიკურად ძნელი განსახორციელებელი. შეიძლება მოხდეს მიღებული ნაერთის დაშლა ელემენტებად ან ნაკლები ენერგიის მქონე ნაწილაკებად და ენდოთერმული ნაერთის გამოყოფა. ეგზოთერმული რეაქციები კი გამოირიცხულია, რადგან ქიმიური წონასწორობა მაღალ ტემპერატურაზე ესწრაფვის გადაიხაროს ელემენტების და არა ნაერთების წარმოქმნისაკენ. მეორე შესაძლებლობა, რომელსაც მაღალი ტემპერატურა სახავს, ეს არის თავისუფალი რადიკალების წარმოქმნა. თავისუფალი რადიკალები კი ის მეტად აქტიური თვისების მქონე შუალედი ნაერთებია, რომლებიც რეაქციის ახალი მიმართულებით განვითარებას განაპირობებენ.

პლაზმის ქაეღში მიმდინარე პროცესების თერმოდინამიკა. პლაზმის ქაელისადმი მრავალმხრივი ინტერესის გაღვიძების გამო, რაც მის ფართო სამრეწველო გამოყენების პოტენციალურ შესაძლებლობებს უკავშირდება, უკვე შესწავლილია რამდენიმე ტიპური სინთეზის ძირითადი პარამეტრები. მიღებული მონაცემები კვაზიწონასწორულ პროცესებში: სასურველი პროდუქტის მაქსიმალურ გამოსავალს განსაზღვრავს და ამდენად არა მარტო სუფთა თეორიული, არამედ მნიშვნელოვანი პრაქტიკული გამოყენებაც აქვს.

ტექნიკური ქიმიის თვალსაზრისით მაღალი ტემპერატურები, უწინარეს ყოვლისა, ისეთი ახალი რაციონალური პროცესების ჩა-



ტარების თვალთახედვით არის საინტერესო, რომლებიც ჩვეულებრივ პირობებში არ მიმდინარეობენ, უფრო სწორად — ამ რეაქცი-ათა სიჩქარეები საშუალო ტემპერატურებზე იმდენად მცირეა, რომ შთავერც ვამჩნევთ და ვერც ვზომავთ. ასეთი რეაქციები 2000° ზევით, როგორც წესი, მყისიერად მიმდინარეობს. ეს მოვლენა ერთის შეხედვით შეიძლება საკვირველად მოგვეჩვენოს, ვინაიდან ამ შემთხვევაშიც ჩვეულებრივ ნივთიერებებთან გვაქვს საქმე, ხოლო თერმოდინამიკისა და ქიმიური კინეტიკის ზოგადი კანონები ყოველთვის ძალაში რჩება. მაგრამ აქ გასათვალისწინებელია ის გარემოება, რომ ცალკეულ კოეფიციენტთა სიდიდეები, რაც სტანდარტული მეთოდებით არის დადგენილი ჩვეულებრივი პირობებისათვის, მაღალ ტემპერატურებზე იმდენად იცვლება, რომ მოლეკულების მოქცევა უკვე არაჩვეულებრივ იერს იღებს.

მორეაგირე ნივთიერებათა ამა თუ იმ გარდაქმნისადმი მიდრეკილების შესახებ პირველი მიახლოებით რეაქციის დროს გამოყოფილი სითბოს რაოდენობით მსჯელობენ. ითვლება, რომ ენთროპია ამ დროს მხედველობაში არ არის მისაღები. მაღალ ტემპერატურებზე კი ენთროპიის ცვლილება უკვე საგრძნობ სიდიდეს აღწევს და მისთვის ანგარიშის გაუწევლობა დიდი ცდომილების მიზეზი შეიძლება გახდეს.

პირველ მოვლენასთან კატალიზატორებისა და საერთოდ ზედაპირზე მიმდინარე პროცესების შემთხვევაში გვაქვს საქმე. ჩვეულებრივ პირობებში კატალიზატორი რამდენიმე ათასი კალორიით აღიღებს მორეაგირე ნივთიერებათა აქტივაციის ენერგიას. ამასთანავე დიდმნიშვნელოვანია აგრეთვე აირის მოლეკულების კონტაქტი მყარი მასის — კატალიზატორის ზედაპირთან, როგორც ეს ნავთის კატალიზური კრეკინგის ან ამიაკის სინთეზის დროს ხდება. გახსნილი ნივთიერების არამტკიცე კავშირის შემთხვევაში კი დიდი როლი განეკუთვნება ასეთივე კავშირს გამხსნელის მოლეკულებთან. ასეთ პროცესებში კატალიზატორი საგრძნობლად ცვლის რეაქციის სიჩქარეს. 2000° ზევით მორეაგირე ნივთიერებათა ნაწილაკებს უკვე იმდენად დიდი აქტივაციის ენერგია აქვთ შეძენილი, რომ რამდენიმე ათასი კალორია, რაც კატალიზატორის ან ზედაპირული კონტაქტის შედეგად შეიძლება დაემატოს ნივთიერების საერთო დიდ თბოშეცულობას, მეტად მცირეა არსებული ენერგიის მთელ მარაგთან შედარებით და პროცესის აჩქარებისათვის გადამწყვეტი მნიშვნელობა არ შეიძლება ჰქონდეს.

მაშასადამე, მაღალ ტემპერატურებზე მუშაობისას, უწინარეს ყოვლისა, ანგარიში უნდა გაეწიოს. არა რეაქციის სიჩქარეს (იგულისხმება, რომ ეს სიდიდე საკმაოდ მაღალია და არ განსაზღვრავს

პროცესის მსვლელობას), არამედ რეაგენტთა ქიმიურ შედგენილობას წონასწორობის პირობებში.

პ ლ ა ზ მ უ რ - ქ ი მ ი უ რ ი პ რ ო ც ე ს ე ბ ი. ეს პროცესები პირობითად ხუთ ჯგუფად შეიძლება დაიყოს:

1. რეაქციები, რომელთა შედეგად ჩვენთვის სასურველ ნივთიერებათა წონასწორული კონცენტრაციები მაქსიმალურ მნიშვნელობას მაღალ ტემპერატურაზე აღწევენ.

ასეთ შემთხვევებში გადამწყვეტი მნიშვნელობა არა მარტო რეაგენტების საჭირო ტემპერატურამდე გახურებას, არამედ რეაქციის პროდუქტების მყისიერ გაცივებას („წრთობას“) აქვს. უამისოდ ეს პროდუქტები ისევ დაიშლება.

ამ ჯგუფის რეაქციების მაგალითებია:

ა. აზოტის ჟანგის მიღება უშუალოდ ჰაერიდან. პროცესი  $3000-7000^{\circ}$ -ის ფარგლებში ტარდება დამაკმაყოფილებელი გამოსავლით, მაგრამ ზოგიერთი ტექნიკური სიძნელის გამო მეთოდი ჯერჯერობით კონკურენციას ვერ უწევს ამიაკის სინთეზის ამჟამად გავრცელებულ სამრეწველო ხერხს.

ბ. ლითონებისა და მეტალოიდების აღდგენა მათი ჟანგებულებიდან. სახარჯ ელექტროდად ამ დროს გამოყენებულია შესაფერისი ჟანგეულისა ( $Fe_2O_3$ ;  $SiO_2$ ;  $Al_2O_3$ ;  $MgO$ ;  $B_2O_3$ ;  $TiO_2$ ;  $TiO$ ) და ნახშირის ფხვნილისაგან დაწნეხილი ბრიკეტი. წრთობა ხდება სპილენძის ჭურჭელში, რომელიც წყლით ცივდება.

გ. ტიტანის ნიტრიდისა და სამქლორიდის მიღება მისი ოთხქლორიდისაგან. რეაქცია ამიაკის ან აზოტ-წყალბადის ნარევის პლაზმაში ტარდება.

2. პლაზმურ-ქიმიური პროცესების მეორე ჯგუფშია კატალიზატორებზე და მყარი ან თხევადი ფაზის ზედაპირზე მიმდინარე რეაქციები (პროცესები ფსევდოთხევად შრეში და სხვ.).

3. მესამე ჯგუფის რეაქციებში მიზნობრივი პროდუქტები შუალედურია. ამ შემთხვევაში ყველაფერს წყვეტს „წრთობის“ მომენტის ზუსტი შერჩევა.

რეაქციათა ამ ჯგუფს მიეკუთვნება ორგანული ნაერთების — აცეტილენის, უჯერი ნახშირწყალბადების, ტეტრაფთორეთილენის, პიდრაზინის, ფთორწყალბადმეჯავას, ტრიქლორსილანისა და სხვათა მიღება.

4. მეოთხე ჯგუფში პლაზმოქიმიური რეაქციების დასაწყებად ე. წ. „ელექტრული დარტყმა“ საჭირო. მისი მაგალითია, კერძოდ პოლიმერული ზედაპირული ფენების აქტივაციის პროცესები.

5. რეაქციების მეხუთე ჯგუფს მიეკუთვნებიან ისეთები, რომელთა მიმდინარეობისათვის პლაზმის არა სითბური ენერგია, არამედ გამოსხივებაა საჭირო. ასეთებია ფოტოქიმიური პროცესები.

მაღალი ტემპერატურები და აზოტის ჟანგეულების მიღების პრობლემა. მაღალი ტემპერატურების გამოყენების ერთ-ერთი ყველაზე პერსპექტიული მიმართულება არის აზოტის ჟანგეულების მიღება უშუალოდ ჰაერიდან. პრობლემის დიდი მნიშვნელობის გამო, უკანასკნელ წლებში ეს კვლევები საკმაოდ ფართო მასშტაბებით ტარდება.

აზოტის მრავალფეროვანი ნაერთების მნიშვნელობა კაცობრიობისათვის საყოველთაოდ ცნობილია, მაგრამ მათი წარმოქმნისათვის საჭირო გამოსავალი მასალის — ამიაკის მიღება, რაც ჰაერის აზოტის წყალბადით შებოჭვას გულისხმობს, პრაქტიკულად საკმაოდ ძნელი ტექნოლოგიური პრობლემების გადაჭრას უკავშირდება. ამიაკის სინთეზის ამჟამად არსებულ მეთოდს თუმცა უკვე ნახევარ საუკუნეზე მეტი ხნის ისტორია აქვს, მაგრამ, თანამედროვე ტექნიკის განვითარების მაღალი დონის მიუხედავად, მაინც დიდ და ძნელად სარეგულირებელი პროცესების ციკლს მოიცავს.

პროცესის მსვლელობისათვის უაღრესად სუფთა აზოტისა და წყალბადის ნარევის მომზადებაა საჭირო. ამ აირნარევის რაოდენობა საკმაოდ დიდია — საშუალო წარმადობის ქარხნისათვის რამდენიმე ათეულ ათას კუბურ მეტრს აღწევს საათში. სინთეზი 500—600° ტემპერატურისა და 300—700 ატმ წნევის პირობებში ხორციელდება სპეციალური კატალიზატორის თანაობით.

შემდეგ საფეხურზე ამიაკიდან მიიღება აზოტის ჟანგეულები, რომელთა აბსორბცია წყლით გვაძლევს ქიმიურად მეტად აქტიურ აზოტმჟავას; სწორედ ეს უკანასკნელი წარმოადგენს ძირითად გამოსავალ მასალას აზოტშემცველი ნაერთების — სასუქების, ნაირგვარი რეაგენტების, ამფეთქ ნივთიერებათა და სხვათა დასამზადებლად.

მაშასადამე, პროცესის არსი მდგომარეობს ქიმიურად საკმაოდ ინერტული აზოტის გადაყვანაში რეაქციის უნარის მქონე ნერთად — ჯერ ამიაკად, ხოლო შემდეგ აზოტმჟავად, რათა საშუალება მოგვეცეს განვახორციელოთ შემდგომი ქიმიური გარდაქმნები.

ცხადია, რომ ჰაერის აზოტისა და ჟანგბადის უშუალო შეერთება ბევრად გაამარტივებდა პროცესს, გამორიცხავდა რა ამიაკის სინთეზის რთულ და შრომატევად საფეხურს.

ამ მიმართულებით საკმაოდ ხანგრძლივი მუშაობა იყო გაწეული, მაგრამ ქიმიური ტექნოლოგიის ეს ერთ-ერთი ძირითადი პრობლემა დღემდე გადაუჭრელია. მართალია, ჰაერის ელექტროორკალ-

ში გატარების შედეგად (ბირკელანდ-ეიდეს მეთოდი) თუმცა აზოტის ქანგეულები წარმოიქმნება, მაგრამ უმნიშვნელო რაოდენობით — არა უმეტეს 0,3%-სა. ასეთი მცირე მინარევის დაქვრა კი პრაქტიკულ ინტერესს არ შეიძლება წარმოადგენდეს: ამ შედეგნილობის აირი აზოტის ახლანდელი ქარხნებისათვის დანაკარგია და ატმოსფეროში განიდევნება.

უკანასკნელ დროს გვხვდება მითითებები იმის შესახებ, რომ მაღალი ტემპერატურების დახმარებით შესაძლებელია აღნიშნული პროცესის უფრო ხელსაყრელი შედეგებით განხორციელება.

დადგენილია, რომ 2100°-ზე ჰაერის აზოტისა და ქანგბადის შეერთების რეაქცია თითქმის მყისიერად მიმდინარეობს. მიღებულ ნარევეში აზოტის ქანგეულები უკვე 2%-ზე მეტი რაოდენობითაა.

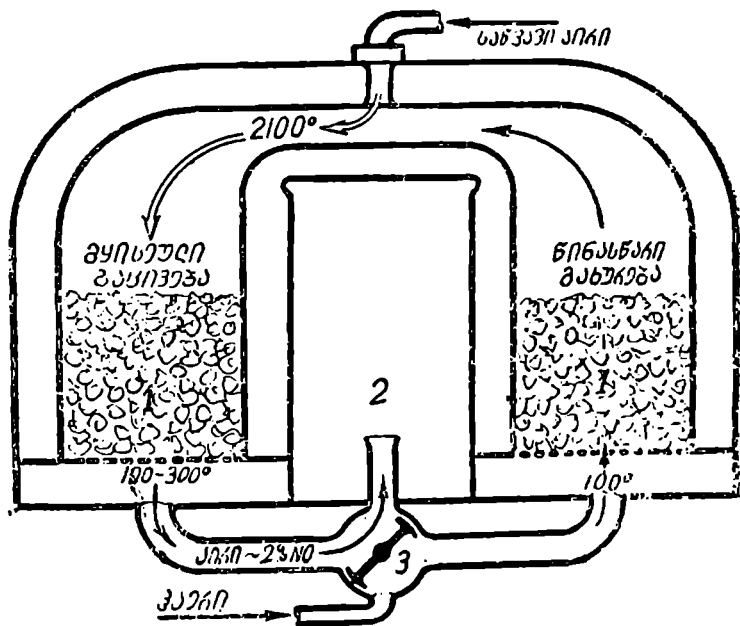
მაგრამ ამ პროცესის განხორციელებასაც აღმოაჩნდა თავისი სიძნელე. ჩვეულებრივ ტემპერატურამდე გაცივებისას მიღებულ ქანგეულები ისევ იშლებიან შემდგენელ კომპონენტებად — ელემენტურ აზოტად და ქანგბადად. საჭირო გახდა ამ სიძნელის გადალახვა. ბოლოს მიაგნეს გამოსავალსაც. გამოიკვია, რომ თუ აირნარევეს მყისიერად გავაცივებთ თუნდაც 1500°-მდე, ე. ი. ჩავატარებთ მის ე. წ. „წრთობას“, აზოტის ქანგეულები შემდგომი გაცივებით აღარ დაიშლება.

ეს გარემოება ერთის შეხედვით საკვირველად შეიძლება მოგვეჩვენოს, ვინაიდან ცნობილია, რომ თერმოდინამიკის თანახმად ჩვეულებრივ ტემპერატურაზე NO საერთოდ არ შეიძლება არსებობდეს. მაგრამ პრაქტიკულად იგი მაინც გვაქვს გარემო ატმოსფეროში. ასეთი „შეუსაბამობა“ თეორიული და პრაქტიკული მონაცემებისა მხოლოდ მოჩვენებითია. საჭიროა პროცესის კინეტიკის გათვალისწინება. NO, ცხადია, იშლება, მაგრამ საკმე იმაშია, რომ ეს დაშლა ჩვეულებრივ ტემპერატურაზე იმდენად ნელა მიმდინარეობს, რომ იგი პრაქტიკულად მდგრად ნაერთად შეიძლება ჩაითვალოს (გავიხსენოთ რკინის მაგალითი: ჩვეულებრივ ტემპერატურაზე სუფთა სახით ისიც თითქოს არ უნდა გვეკონდეს). ამ გარემოებით არის გამოწვეული ქანგეულების თანაობა განსაკუთრებით ქალაქის ჰაერში. ავტომანქანის ძრავას გამონამუშევარი აირების გაცივება ხდება სწრაფად, რის გამოც მასში მყოფი NO აღარ იშლება და შემდეგ საკმაო დროის განმავლობაში რჩება ჰაერში მანე მინარევეად.

მაშასადამე, მაღალი ტემპერატურების დიდი შესაძლებლობები საკმაო პერსპექტივებს შლის აზოტის ქანგის უშუალოდ ჰაერიდან მიღების პროცესის განხორციელებისათვის. ასეთი საკმაოდ დიდი ზომის დანადგარი ჯერ კიდევ რამდენიმე წლის წინათ იქნა გაშვე-

ბული აშშ ერთ-ერთ სამხედრო ქარხანაში. მიღებული ჟანგეულების გადამუშავება 40 ტონამდე აზოტმეყავას იძლეოდა დღელამეში. მისი სქემა ქვემოთმოყვანილ სურათზეა მოცემული.

პროცესი ორკამერიან ღუმელში ტარდება. კამერების კედლები მაღალი სისუფთავის მაგნეზიალური აგურითაა ამოგებული, ხოლო შიგ ამავე მასალის მრგვალი კენჭებია ჩაწყობილი სითბოს გადაცემის გაძლიერებისათვის. ასეთ შევსებას პროცესის მსვლელობისთვის გადაწყვეტი მნიშვნელობა აღმოაჩნდა, ვინაიდან აღვილდება სითბოს წართმევა ცხელი აირიდან და მისი ეფექტური გადაცემა ცივი აირისადმი.



ჰაერის აზოტის პირდაპირი დაჟანგვის სქემა

ჰაერი ჯერ გაივლის ცხელ კამერას, სადაც ხურდება ჩანაწყობის მიერ მანამდე შეთვისებული სითბოს ხარჯზე. აქში მას ერევა საწვავი აირი და ცხელდება 2100°-მდე. მყისეული რეაქციის შედეგად წარმოიქმნება აზოტის ჟანგი — NO, რომლის შენარჩუნებისათვის ასევე მყისეული გაცივება საჭირო 1500°-მდე მაინც, რაც ჩანაწყობის (მაგნეზიტის კენჭების) მეშვეობით ხორციელდება იმავე კამერაში. კამერიდან გამოსვლისას აირის ტემპერატურა 100-300°-მდე ეცემა. როდესაც მეორე კამერაში ჩანაწყობი საკმარისად გახურდება,

აირის სვლაგეზი იცვლება. ციკლი მეორდება, სანამ კამერის ზედა ნაწილის ტემპერატურა  $2100^{\circ}$  არ მიაღწევს.

ჰაერის ამგვარი წინაწარი გახურებით უფრო მაღალი ტემპერატურა მიიღება, ვიდრე აირის უშუალოდ დაწვას შეუძლია მოგვცეს.

ლუმელის სპეციფიკა მდგომარეობს იმაში, რომ შესაძლებელი ხდება აირნარევის სწრაფი გაცივება  $2100^{\circ}$ -დან  $1500^{\circ}$ -მდე (თერმულად მდგრად მდგომარეობამდე), რათა მინიმუმამდე დავიყვანოთ NO-ს დაშლა. გაცივების სიჩქარე საკმაოდ მაღალია და წამში  $36000^{\circ}$  აღწევს.

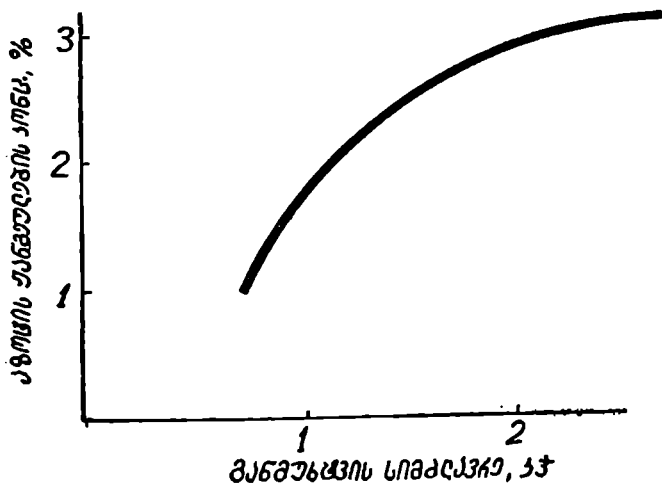
ციკლის მაცივარ ნაწილში შთანთქმული სითბო ახლად შემოსული აირის წინასწარი გახურებისათვის გამოიყენება, რაც კამერების გადართვისა და აირის სვლაგეზის შეცვლით ხორციელდება.

მიუხედავად დადებითი შედეგებისა, მეთოდმა საბოლოო ჯამში ეკონომიური კონკურენცია მაინც ვერ გაუწია ამიაკის სინთეზის არაებულ ხერხს. ამის მიზეზია ზოგიერთი უარყოფითი მხარე. ასეთია, უწინარეს ყოვლისა, მიღებული აზოტის ქანგეულების შთანთქმის სიძნელე მათი შედარებით მცირე კონცენტრაციის გამო აირნარევი ( $2\%$ ). საჭირო ხდება დამატებითი ოპერაციის ჩატარება — აზოტის ქანგეულების შთანთქმა ჯერ სილიკაგელით, რომლის შემდგომი გახურება ამ ქანგეულებით მდიდარ აირს გვაძლევს. მათი აბსორბცია წყლით უკვე იოლად ხდება; სწორედ ეს დამატებითი ოპერაცია გამოდგა პროცესის განმსაზღვრელი, რადგან სილიკაგელის ხარჯი (ცვეთის გამო) აძვირებს პროდუქტს. ტემპერატურის აწვევა სარეაქციო კამერაში, ცხადია, გააუმჯობესებდა საქმეს, მაგრამ ეს იმ შემთხვევაში, თუ აზოტის ქანგეულების უფრო ეფექტური შთანთქმელი გამოინახებოდა, ვიდრე სილიკაგელია. მაგრამ ტემპერატურის გაზრდა მაგნიუმის ქანგის კენჭების დაწვრილმანებისა და მათი გაღობის საშიშროებასთან არის დაკავშირებული.

ჰაერის აზოტის შესაბოჭად ნაცადი იყო რაკეტის ძრავას გამოყენება, რომელშიც ქანგბადით გამდიდრებული ჰაერით ახდენენ ეთანის წვას. აირები ისეთი პროპორციით აიღება, რომ ქანგბადისა და აზოტის ფარდობა ნარევი ექვიმოლარული გამოვიდეს. რეაქცია  $2500-2800^{\circ}$  და  $21$  ატმ წნევაზე მიმდინარეობს წამის მეათასედის განმავლობაში. საქმენიდან გატყორცნისა და გაფართოების შედეგად აირნარევი  $1500^{\circ}$ -მდე ცივდება. გაცივების დიდი სიჩქარის გამო, რაც მილიონ გრადუსს აღწევს წამში, წარმოქმნილი ქანგის  $90\%$  შეინარჩუნება. მისი შეცულობა აირნარევი  $2,7\%$ -ია.

ტურბინის ზედმეტად გადახურების თავიდან აცილების მიზნით გამავალ აირს დიდი სიჩქარე უნდა ჰქონდეს.

ცდებმა გვიჩვენა, რომ აზოტის ჟანგეულების წარმოსაქმნელად კიდევ უფრო მაღალი ტემპერატურებია ხელსაყრელი, 5000°-ის ფარგლებში (წნევა — 10 ატმ), მაგრამ შეუძლებელი ხდება მყისეული წრთობის ჩატარება. დარტყმითი ტალღისა და ბალისტიკური დგუშების გამოყენება თუმცა გაცივების მეტ სიჩქარეს უზრუნველყოფს, ვიდრე ლავალის საქშენი, მაგრამ იმის გამო, რომ ეს უკანასკნელი პროცესის უწყვეტად წარმართვის ერთადერთი საშუალებაა, იძულებული არიან აზოტის შებოჭვის ოპტიმალური ტემპერატურა 3200°-ის ფარგლებში ივარაუდონ. მაგრამ ეს არ ნიშნავს, რომ მკვლევარები უბრუნდებიან ბირკელანდ-ეილეს მეთოდს. თუ პროცესი ეკონომიურად მისაღები მაჩვენებლებით განხორციელდა, ახალი მეთოდი საკმაოდ განსხვავებული იქნება ძველისაგან.



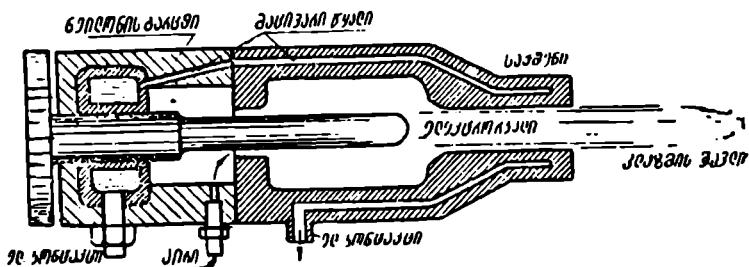
აზოტის ჟანგის გამოსავლიანობის დამოკიდებულება მაღალი სიხშირის განმუხტვის სიმძლავრისაგან

იმისათვის, რომ გაფართოების შედეგად ეფექტური გაცივება მოხდეს, წნევა დანადგარში 20—28 ატმ უნდა იყოს. ელექტროდების ეროზიის თავიდან აცილების მიზნით, სტაბილიზატორად უმჯობესია აზოტი გამოვიყენოთ და არა ჰაერი. რეაქციისათვის საჭირო ენგბადი კი ცალკე კამერაში ერევა აზოტის პლაზმას. სარეაქციო კამერის შემდეგ, 5%-მდე NO-ს შემცველი აირნარევი ლავალის საქშენით გაიტყორცნება.

სპეციალური გენერატორის მეშვეობით შესაძლებელი ხდება აირების კინეტიკური ენერჯის ნაწილის რეგენერირება.

პროცესის დიდ მასშტაბში განხორციელებას უმთავრესად ჰაერის გარემოში 3200°-ზე მედგი მასალების უქონლობა უშლის ხელს.

ოზონის სინთეზი. ოზონი —  $O_3$ , როგორც საუკეთესო დამყანგველი, მნიშვნელოვან კომპონენტს წარმოადგენს, კერძოდ, მაღალკალორიანი ხელოვნური საწვავის მისაღებად. ასეთ საწვავს დიდი გამოყენება აქვს თანამედროვე ავიაციაში, რაკეტული ტექნიკისათვის და სხვ.



სამრეწველო პლაზმური დანადგარი.

ოზონის სამრეწველო მასშტაბით მიღება აქამდე დიდ სიძნელებთან იყო დაკავშირებული. ბოლო დროს კვლევებმა კი ახალი შესაძლებლობების წინაშე დაგვაყენა ამ მხრივ.

ათიოდე წლის წინათ ამერიკელმა მეცნიერებმა მაღალ ტემპერატურაზე მოახერხეს ჟანგბადის თავისუფალი რადიკალების მიღება; მათი მყისეული გაცივებით აბსოლუტურ ნულამდე. გამჭვირვალე მყარი ნალექი გამოიყოფა; მცირედი გათბობით ეს ნალექი ნაწილობრივ ორთქლდება. დარჩენილი იისფერი მასა ჟანგბადის ჩვეულებრივი ( $O_2$ ) და ოზონის ( $O_3$ ) მოლეკულების ნარევი აღმოჩნდა. ტემპერატურის შემდგომი აწევით შესაძლებელი გახდა ოზონის გამონათვისუფლება. ამ მეთოდსაც სავსებით რეალური გამოყენების შესაძლებლობა ექნება, თუ მოხერხდა მყისეული გაცივების პრაქტიკულად გამართლებული ხერხის შერჩევა.

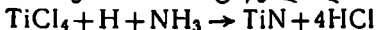
ამგვარად გადაიდგა პირველი ნაბიჯი თავისუფალი რადიკალების ხელშესახები რაოდენობით მიღების საქმეში. თავისუფალი რადიკალების დაუფლება კი იმითაც არის მნიშვნელოვანი, რომ ქიმიის ბევრ ამოუცნობ საილუმლოებას შეუძლია ახადოს ფარდა. ამასთანავე ისახება პერსპექტივები სრულიად ახალი პროცესების შესწავლისა და სამრეწველო განხორციელებისათვის.

ტიტანის ნიტრიდისა და სამქლორიდის მიღება. ტიტანი პასიურია ჩვეულებრივ პირობებში, მაღალ ტემპერა-



ტურებზე კი ძლიერ აქტივობას იჩენს როგორც აირების, ისე სხვა მასალების მიმართ. 1000°-ზე ზევით ტიტანი აზოტთანაც რეაგირებს ნიტრიდის (TiN) წარმოქმნით. ამ ნაერთს მეტად საინტერესო თვისებები აღმოაჩნდა. ფიზიკურ-ქიმიური თვისებებით — მექანიკური გამძლეობით, გარეგნული შესახედაობით, ტიტანზე უკეთესი ელექტროგამტარობით და სხვ. იგი უფრო ლითონებს მიეკუთვნება, ვიდრე ქიმიური ნაერთების კლასს. ტიტანის ნიტრიდი საკმაოდ სიცხემტკიცე მასალაა და ახალი ტექნიკის ბევრ დარგშია გამოყენებული.

ტიტანის ნიტრიდი 2700°-ზე მიიღება ტიტანის ოთხქლორიდის შეებრვით ამიაკის ან აზოტ-წყალბადის ნარევის პლაზმაში:



რეაქცია ორ საფეხურად შეიძლება მიმდინარეობდეს. წყალბადის პლაზმაში ოთხქლორიდი ჯერ აღსდგება სამქლორიდად, რომელიც თავის მხრივ ამიაკთან (მეორე საფეხურზე) ტიტანის ნიტრიდის ლამაზ ოქროსფერ კრისტალებს ან ფხვნილს იძლევა (95% TiN).

როგორც პირველი, ისე მეორე რეაქცია აირად ფაზაში მიმდინარეობს. პროდუქტის სარეაქციო არედან გამოყვანის დროს კი ფაზური გარდაქმნა ხდება.

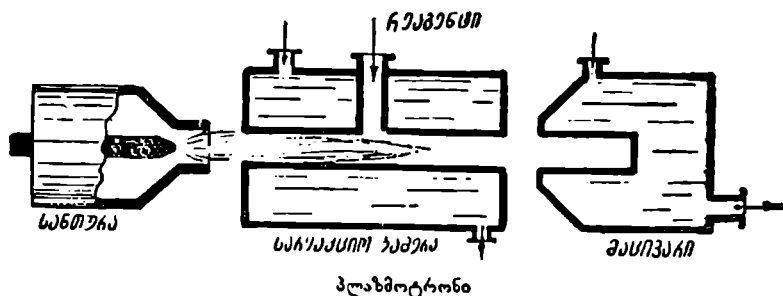
ლითონთა ნიტრიდების მიღება ნაცადი იყო აგრეთვე სხვა ორიგინალური მეთოდითაც: ლითონთა ფხვნილს ჯერ თხევად აზოტში ურევდნენ, შემდეგ ახდენდნენ შეფრქვევას აზოტის პლაზმაში. დადგინდა, რომ გარდაქმნის ხარისხი ტიტანის შემთხვევაში საბოლოოდ 30% აღწევს, ხოლო მაგნიუმისათვის — 40%. ამ გზით შესაძლებელი გამოდგა აგრეთვე ტანტალისა და ცირკონიუმის ნიტრიდის მიღებაც. მოლიბდენისა და ვოლფრამისათვის კი ეს მეთოდი უვარჯისი აღმოჩნდა.

არის ცნობები ბორის ნიტრიდის მიღების შესახებ ბოჰკოს სახით. ეს მასალა დამყანგველ ატმოსფეროში 920° უძლებს, ინერტულში კი—2480°. მისი გამოშვება ძაფების და ქსოვილის სახით შეიძლება. სიმტკიცე გაგლეჯაზე — 14000 კგ/სმ<sup>2</sup>, დრეკადობის მოდული — 914000 კგ/სმ<sup>2</sup>.

ბორის ნიტრიდი მედეგია უმრავლესი ორგანული გამხსნელები-სა და მაკოროდირებელი აგენტების მიმართ, არ რეაგირებს გამლღვალ რკინასთან, კაუბადთან, ალუმინთან, კრიოლიტთან, სპილენძთან, ურანთან. ქლორს უძლებს 700°-მდე. აღნიშნულის გამო, ბორის ნიტრიდი კარგი მასალა გამოდგა არმირებისათვის, ელექტროდა თბოიზოლაციისათვის, ქიმიური ფილტრების მასალად და სხვ.

ა ლ უ მ ი ნ ი ს ქ ა ნ გ ი ს ა ლ დ გ ე ნ ა. ქიმიურ-მეტალურგიული პროცესებისათვის მომეტებული ინტერესის მქონეა აღდგენის

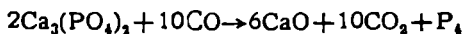
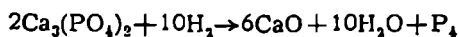
რეაქციების ჩატარების შესაძლებლობა პლაზმის ჭავლში. საქმე ეხება არა მარტო მაღალი ტემპერატურების სასურველ გავლენას ნერთის დაშლის ენდოთერმულ პროცესზე. კიდევ უფრო მნიშვნელოვანია ამ პროცესის მაღალი სიჩქარით ჩატარებისა და, მაშასადამე, დიდი მწარმოებლობის მქონე დანადგარების შექმნის შესაძლებლობა.



დადგენილია, რომ ალუმინის ჟანგი პლაზმის ჭავლში ძნელად, მაგრამ მაინც იშლება ლითონის პატარა სორსალების გამოყოფით; მიღებული პროდუქტი საჭიროებს მყისიერ გაციებას ელემენტების რეკომბინაციის თავიდან ასაცილებლად. მართალია, ეს პროცესი ალუმინის შემთხვევაში თითქოს არ უნდა ვითარდებოდეს ჟანგბადისა და ალუმინის შეერთების რეაქციის დიდი ეგზოთერმულობის გამო, მაგრამ პრაქტიკამ აჩვენა, რომ გარდაქმნა ხდება, რის გამოც პროცესი შედარებით მცირე გამოსავლით ხასიათდება.

ფოსფორის მიღების პლაზმური ხერხი. სუფთა ფოსფორი ამჟამად ელექტროლუმელში მიიღება ფთორაპატიტის დაშლით. პროცესის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს სითბოს დიდი ხარჯი, რაც კავბადის უსარგებლო ნაღობის წარმოქმნაზე მოდის.

პლაზმის ჭავლის სამრეწველო დანერგვის შემდეგ მიზანშეწონილად მიიჩნეის მისი მეშვეობით ფოსფორის მადნების დამუშავებაც. აღმდგენელად გამოყენებულია მეთანის კონვერსიის შედეგად მიღებული აირი. ნახულია, რომ აღდგენის რეაქციები —

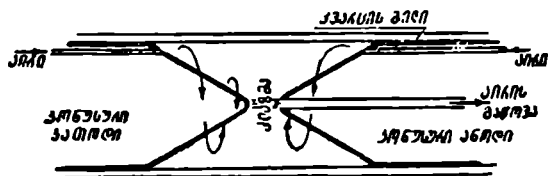


შედარებით დაბალ ტემპერატურაზე (<3000°) ტარდება. ეფექტური ტემპერატურის შენარჩუნებისათვის დაწნევის კამერაში ცივ აირს ამატებენ.

რეაქციები პლაზმური გამოსხივებით. პლაზმა არა მარტო სითბური ენერჯიის წყაროა. მისი მძლავრი გამოსხივება ფოტოქიმიური პროცესების ჩატარების შესაძლებლობასაც იძლევა. დამუშავებულია პლაზმური გენერატორი, რომელშიაც სამუშაო აირის შედგენილობისა და განმუხტვის პირობების ცვლით ფოტოქიმიური პროცესებისათვის საჭირო სიგრძის ტალღები შეიძლება მივიღოთ.

ქსენონისა და არგონის ნარევი, მაგალითად, იძლევა სინათლის წყაროს, რომლის სპექტრიც მზისას უახლოვდება; ნეონის გამოსხივება ინფრაწითელი ტალღების სფეროშია, არგონისა — ულტრა-ინფერში.

სარეაქციო ცილინდრი ღლობილი კვარცისაგან, ლითიუმისა და მაგნიუმის ფთორიდისაგან და საჭიროების მიხედვით — საფირონი-საგანაც კი მზადდება. აირი ცილინდრში ტანგენციალურად მოძრაობს.



პლაზმოტრონი ფოტოქიმიური რეაქციის ჩასატარებლად

კონუსურად წაკვეთილი ორივე ელექტროდი ერთ ღერძზეა განლაგებული. სამუშაო აირი კვარცის ცილინდრის შიგა კედელსა და ელექტროდს შორის მიეწოდება მხებად, დაგრივალდება ღერძის მიმართულებით და გადის ანოდის ცენტრალურ ნახვრეტში. აირის სვლაგეზის ასეთი ცვლა ხელს უწყობს პლაზმის შეკუმშვას და ინფრაწითელი გამოსხივების შთანთქმას.

არგონის პლაზმოტრონი შედარებით მცირე სიმძლავრისაა (24.8 კვტ), მაგრამ მასში 17 ატმ წნევაზე 7000°-მდე ტემპერატურა ვითარდება. გამოსხივების ნაკადი საერთო სიმძლავრის 30% შეადგენს.

პლაზმური დანადგარის გამოყენება განზრახულია, კერძოდ, კაპროლაქტამის წარმოებაში, SO<sub>2</sub>-ის კონვერსიისათვის SO<sub>3</sub>-ად, აკრილიტრილის მისაღებად პროპილენისა და ამიაკისაგან (ყანგბადის თანაობით), ბენზილის დაყენგვისათვის უშუალოდ ფენოლად და სხვ.

უფრო მიზანშეწონილად უნდა ჩაითვალოს პლაზმის როგორც სითბური, ისე გამოსხივების ენერჯიის ერთდროული გამოყენება თუნდაც ურთიერთდამოკიდებული პროცესების ჩასატარებლად.

## მაღალი ზეგზავიანობის და ორგანული ქიმია

პოლიმერული ქიმიის ნედლეული — ბუნებრივი აირიდან. მაღალტემპერატურიან ქიმიას თითქოს არაფერი საერთო არ უნდა ჰქონდეს ორგანულ ნივთიერებათა ტექნოლოგიის საკითხებთან, ვინაიდან რთული ორგანული ნაერთები 2000°-ის ფარგლებში არ შეიძლება არსებობდნენ. არაორგანული ქიმიისათვის კი ამ მხრივ მეტი შესაძლებლობები ჩანს. მაგრამ პრაქტიკამ დაგვანახა, რომ მაღალ ტემპერატურებს ორგანულ ნივთიერებათა ტექნოლოგიისათვისაც ესახება გარკვეული პერსპექტივები.

თანამედროვე ტექნიკის ოცნებად კარგა ხანს ითვლებოდა პოლიმერული ქიმიის ნედლეულის — აცეტილენის ( $C_2H_2$ ) მიღება ბუნებრივი აირიდან. ეს ადვილად აალებადი, უსიამოვნო სუნის აირი არა მარტო ლითონთა შედუღებისთვის არის საჭირო (ბევრს ალბათ უნახავს ეს პროცესი). აცეტილენი — პოლიმერული მრეწველობის საფუძველია, უპირველეს ყოვლისა ხელოვნური ბოქსოს და სხვა ნაერთების ძირითადი საწარმოო ნედლეული. მას ჩვეულებრივად კალციუმის კარბიდის —  $CaC_2$ -ის წყალთან ურთიერთქმედებით იღებენ; ეს კი საკმაოდ ძვირი პროცესია.

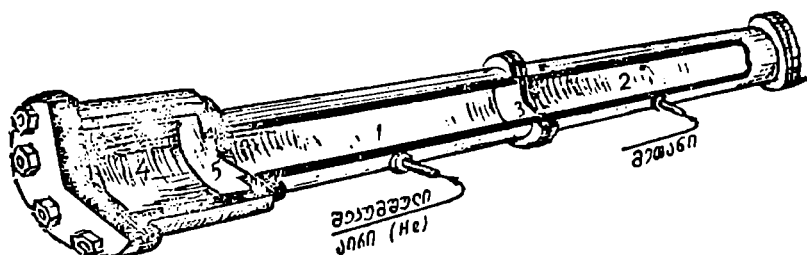
დაძაბული მუშაობა მიმდინარეობს აცეტილენის მისაღებად იაფი და ნაკლებად დეფიციტური ნედლეულიდან, კერძოდ ბუნებრივი აირიდან, რომელიც უმთავრესად მეთანისაგან შედგება.

აფეთქების ტალღა ქიმიის სამსახურში. გამოიკვია, რომ თუ მეთანს მყისეულად, 0,0001 წამზე მცირე დროის განმავლობაში გავახურებთ 1500°-ზე უფრო მაღალ ტემპერატურამდე, მიიღება აცეტილენი. მაგრამ იგი რამდენიმე წამში შეიძლება დაიშალოს. ეს რომ არ მოხდეს, აქაც მყისეულ გაცივებას მიმართავენ. ერთის შეხედვით თითქოს შეუძლებელი უნდა იყოს ამგვარი სწრაფი გაცივება-გაცივების ოპერაციების ჩატარება, განსაკუთრებით სამრეწველო დანადგარებზე. მაგრამ ჩვენ უკვე მივეჩვიეთ, რომ ადამიანის გონებისა და ტექნიკის შესაძლებლობათა ერთობლიობა შეუძლებელის ზღუდესაც გადააბიჯებს ხოლმე. ამ შემთხვე-

ჟამიაც მყისეული გახურებისა და გაცივებისათვის მეტად საინტერესო მეთოდი გამოინახა — დარტყმითი (აფეთქების) ტალღის ძალა. საერთოდ ცნობილია, რომ დარტყმითი ტალღა წარმოადგენს შეკუმშული აირის თხელ „კედელს“, რომელიც ბგერაზე უფრო სწრაფად ვრცელდება. ამ „კედლის“ სისქე მეტად მცირეა — მილიმეტრის მეთასედზე ნაკლები, მაგრამ იქ, ე. წ. დარტყმითი ტალღის ფრონტზე, წნევა და ტემპერატურა სწრაფად იზრდება. იმ აირის გაცხელება, რომლის გარემოშიაც ტალღა ვრცელდება, დამოკიდებულია „ფრონტის“ სისქესა და გავრცელების სიჩქარეზე.

ასეთი მეთოდით, ჰითბოხს წყაროს გარეშე, შეიძლება 50 000°-მდე ტემპერატურაც კი მივიღოთ! მართალია, ეს ტემპერატურა მხოლოდ დროის მცირე — წამის მეთასედ მონაკვეთში არსებობს, მაგრამ სათანადო პროცესიც ასევე მყისეულად სრულდება.

აღსანიშნავია კიდევ ერთი საკვირველი მოვლენა: დარტყმითი ტალღის პერპენდიკულარული ჰიბრტყიდან არეკვლისას ახალი ფრონტის გადამა ტემპერატურა თითქმის 2-ჯერ იზრდება! ამას-



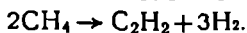
აუციუენის მიღება დარტყმითი ტალღის მეშვეობით  
 1 — წნევის კამერა; 2 — სარეაქციო კამერა; 3 — მემბრანა-ტიხარი;  
 4 — რესივერი; 5 — ტიხარი რესივერსა და კამერას შორის

თანავე პირველი დარტყმითი ტალღა თან იტაცებს აირს, არეკვლილი ტალღა კი აჩერებს; ასე რომ არეკვლილი დარტყმითი ტალღის ფრონტსა და კედელს შორის ცხელი აირის უძრავი ფენა გვაქვს.

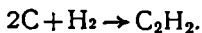
ამ პრინციპებს ეყრდნობა მეთანიდან აუციუენის მიღების ახალი მეთოდი, რომელიც შეიძლება ფართო სამრეწველო მასშტაბითაც განხორციელდეს. ძირითადი აპარატი წარმოადგენს სქელკედლიან დახშულ ცილინდრს ორი ტიხარით. შუა განყოფილებაში შეჰყავთ ინერტულ აირი დიდი წნევით, მაგალითად, ჰელიუმი. ტიხარის უეცარი გაგლეჯის მომენტში მაღალი წნევის აირი ანვითარებს დარტყმით ტალღას სარეაქციო განყოფილებაში, სადაც მეთანი გვაქვს. მყისეული შეკუმშვისა და გახურების შედეგად მეთანი 2000°-ზე გადადის აუციუენად.

აპარატს აქვს აგრეთვე რესივერი მცირე გაუხშობებით, სადაც, სათანადო ტიხარის აღების შედეგად, „ჩავარდება“ არეკვლილი დარტყმითი ტალღა, რომელიც ჩაქრება და ცივდება.

ა ც ე ტ ი ლ ე ნ ი ს მ ი ლ ე ბ ა პ ლ ა ზ მ ი ს ქ ა ვ ლ შ ი. აცეტილენის მიღება ნაცადი იყო პლაზმის მეშვეობითაც, კერძოდ, ნახშირწყალბადების შეფრქვევით წყალბადის პლაზმის ქავლში და მეთანის გავარვარებით მალალ ტემპერატურამდე. მაგრამ გამოცდას კარგი შედეგი არ მოუცია. არგონის პლაზმაში კი 12000°-ზე მეთანის 50% შეიძლება აცეტილენად გარდაიქმნას:



მალალი ინტენსივობის რკალის გამოყენებით შესწავლილი იყო ელემენტური ნახშირბადისა და წყალბადის რეაქცია  $> 2500^\circ$ -ზე. მიიღება აცეტილენი:



გაცივების არეში აცეტილენის კონცენტრაცია 15,6% (მოც.) აღწევს, თუ პლაზმის ნაკადი ინერტული აირით არ განზავდება.

ცდებმა აჩვენეს, რომ ნახშირბადსა და წყალბადს შორის რეაქციის მიმდინარეობისათვის მალალი ინტენსივობის რკალის გამოყენებაა უფრო მიზანშეწონილი.

გაუმჯობესებულ ვარიანტში მეთანი მიეწოდება ელექტროგანმუხტვის რკალში, რომელიც ცილინდრულ ანოდსა და მის ღერძზე მოთავსებულ კათოდს შორის ანთია. ანოდი წყლით ცივდება. რკალი ძლიერ ჩქარა ბრუნავს (7000 ბრ/წმ), რა დროსაც უწყვეტ კონუსსა ქმნის. ანოდისა და კათოდის წრიულ შუალედში ხდება მეთანის კრეკინგი. რკალის ზონის ქვევით აირები ცივდება 1400°-მდე უფრო მძიმე ნახშირწყალბადებით (მოლეკულური წონით 16-დან 150-მდე). მეთანის კრეკინგის აირების ქავლში ხორციელდება ამ მძიმე ნახშირწყალბადების პიროლიზი აცეტილენამდე. შემდგომ გაცივებას წყლით ახდენენ. პროცესის შედეგად მეთანის 80% აცეტილენად იქცევა. მისი კონცენტრაცია, პროცესის ორ საფეხურად განხორციელების გამო, უკვე 22% აღწევს.

აცეტილენი შესაძლებელია კეროზინისა და პროპანისგანაც მივიღოთ.

კარგი შედეგებია მიღებული დაბალქტანიანი ბენზინის გამოყენებით. შეიძლება ითქვას, რომ ეს არის პირველი პლაზმოქიმიური პროცესი, რომელიც უკვე ფართო მასშტაბით დაინერგა პრაქტიკაში.

ნახშირწყალბადების ორთქლი რეაქციის ზონიდან განიღვენება კედლისაკენ და ცენტრიდანული ძალის მეოხებით აღის ზევით,

საიდანაც წყალბადის ჰაელი იტაცებს მას ქვევით ცენტრისაკენ. ამგვარად, რეაქციის პროდუქტებს „კედლად“ აქვთ ნახშირწყალბადების ორთქლი.

ეკონომისტების აზრით, აცეტილენის მიღება ნახშირწყალბადებიდან სავსებით გამართლებულად უნდა ჩაითვალოს. დანადგარი, რომლის სიმძლავრეა 2500 კვტ, საათში ერთ ტონა ბენზინს გადაამუშავებს. გამოსავალი 90%-ს აღწევს.

ს ხ ვ ა ო რ გ ა ნ უ ლ ი ნ ა ე რ თ ე ბ ი ს მ ი ლ ე ბ ა. ფართო მასშტაბით ჩატარებულმა კვლევებმა გვიჩვენეს პლაზმის ჰაელის გამოყენების შესაძლებლობა ნაირგვარი ორგანული პროდუქტების წარმოებისათვის, მათ შორის პოლიმერული ქიმიის მნიშვნელოვანი ნედლეულის — ტეტრაფთორეთილენის ( $F_2C=CF_2$ ) მისაღებად. ეს უკანასკნელი ცხიმოვანი რიგის უჯერ ფთორორგანულ ნაერთს წარმოადგენს და მაღალ ტემპერატურაზე წნევის ქვეშ ძვირფასი ტექნიკური მაჩვენებლების მქონე ფისებად პოლიმერიზდება; ამ ფისებს ქიმიური და თერმული მედეგობა და მაღალი ელექტროიზოლაციის თვისება ახასიათებს.

გამოირკვა, რომ ტეტრაფთორეთილენი თავის მხრივ ტეტრაფთორმეთანიდან შეიძლება მივიღოთ, თუ ამ უკანასკნელს ნახშირის ელექტროდებს შორის ანთებულ რკალში გავატარებთ.

კონვერსიის ხარისხი 68 %-მდეა ნახული. მაგრამ საჭიროა, რომ მიღებული პროდუქტების წრთობის სიჩქარე იყოს მაღალი — მილიონ გრადუსს მაინც უნდა აღწევდეს წამში.

არაორგანულ და ორგანულ ნივთიერებათა ტექნოლოგიაში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ენერგიულ დამყანგველ აგენტებს. ასეთია, კერძოდ, ჰიდრაზინი (დიამიდი —  $H_2N-NH_2$ ). სწორედ მისი მეშვეობით ხერხდება ნახშირწყალბადების მიღება კეტონებიდან. ჰიდრაზინის წარმოებული, ე. წ. არასიმეტრული დიმეთილ-ჰიდრაზინი გამოიყენება, როგორც რაკეტული ძრავას საწვავი. დამყანგველად ამ დროს ხმარობენ აზოტის ორქანგს.

დადგენილია, რომ ჰიდრაზინი შეიძლება მივიღოთ ამიაკის შებერვით აზოტის ან ამიაკისავე პლაზმის ჰაელში. ამჟამად კვლევები პროდუქტის გამოსავლიანობის გაზრდის მიმართულებით მიმდინარეობს.

არის მითითება, რომ პლაზმის ჰაელის გამოყენებით შეიძლება სხვა დეფიციტური ორგანული ნაერთების მიღებაც, კერძოდ—ბუთადიენისა ბუთანიდან და შუალედი ნაერთების წარმოება საწვავი აირების გადამამუშავებით.

კ ა ე ბ ა დ ი ს ა და მ ი ს ი ნ ა ე რ თ ე ბ ი ს მ ი ლ ე ბ ა. ნაცადი იყო მაღალი სისუფთავის კაუბადისა და მისი კარბიდის ისეთი დანა-

ფენების მიღება, რომელთაც ნახევარგამტარობის თვისებები აღ-  
მოაჩნდებოდათ.

სუფთა კაჟბადის მიღება მოხერხდა მისი ოთხქლორიდის დაშ-  
ლით ნეიტრალურ და აღმდგენელ გარემოში ან მეთილქლორსი-  
ლანიდან. პროცესი  $3200^{\circ}$ -ზე იწყება, ხოლო  $4200^{\circ}$ -ზე გარდაქმნა  
თითქმის 100%-ს აღწევს.

პლაზმის ჭავლი კარგი საშუალება აღმოჩნდა კაჟბადის სხვა ნა-  
ერთების მისაღებადაც. მონოქსიდის ( $\text{SiO}$ ) მიღებისათვის ორჟანგის  
ან ოთხქლორიდის აღდგენას მიმართავენ, რაც ტემპერატურის ფა-  
რთო ინტერვალში ( $2200\text{—}4700^{\circ}$ ) შეიძლება ჩატარდეს. ნედლეუ-  
ლი — მაღალდისპერსული ფხვნილის (აეროზოლის) სახით რეაქ-  
ტორში მუშა აირის მეშვეობით შეჰყავთ.

რეაქციის პროდუქტების წროთობა ცივ ზედაპირთან შეხებით  
ან სარეაქციო არეში ცივი აირის დიდი რაოდენობის შეყვანით ხდე-  
ბა. მიღებული ფხვნილი წროთობის ზონის ქვევით სპეციალურ ფილ-  
ტრებზე იკრიბება, ნაწილობრივ კი განმუხტვის კამერის კედლებზე  
ჯდება.

ტექნიკის სხვადასხვა დარგისათვის მნიშვნელოვანი პროდუქ-  
ტია ტრიქლორსილანიც —  $\text{SiCl}_3$ . იგი საკმაოდ მაღალი გამოსავ-  
ლით (70%) არის მიღებული იმავე ტეტრაქლორსილანის აღდგენით  
წყალბადის პლაზმის ჭავლში.

ამიაკისა და წყლის ორთქლის შეყვანით აზოტის პლაზმაში ნა-  
ცადია ჰიდროქსილამინის ( $\text{NH}_2\text{OH}$ ) მიღება.

აღსანიშნავია აგრეთვე, რომ წყლის ორთქლისა და ჟანგბადის  
ნარევისაგან წარმოქმნილ პლაზმაში ჟანგბადის შებერვა წყალბა-  
დის ზეჟანგს გვაძლევს, ხოლო ბუნებრივი აირის დაჟანგვა ჰაერის  
ჟანგბადით — ფორმალდეჰიდს ( $\text{HCHO}$ ).

პოლიმერების ზედაპირული აქტივაცია. ცდებ-  
მა აჩვენებს, რომ სუსტი მღვივარი განმუხტვის შემწეობით  $1700^{\circ}$ -  
ზე, ნაწილობრივ (3—4%-ით) დისოცირებული ჟანგბადით დამუშა-  
ვების შედეგად, ზოგიერთი პოლიმერი საკმაოდ ამცირებს კუთრ  
წონას და იცვლის თვისებებს — შესველების უნარს, დანაფართან  
შეჭიდულების ძალას და სხვ.

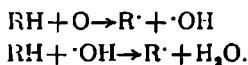
ამ მიმართულებით სხვადასხვა პოლიმერული მასალები იყო  
გამოცდილი — პოლიპროპილენი, პოლიეთილენი, პოლიტეტრა-  
ფთორეთილენი, პოლიტრიფთორქლორეთილენი, პოლივინილფთო-  
რიდი და სხვ.

აქტივაციის პროცესის მექანიზმი, მკვლევართა აზრით, შემდეგ-  
ში მდგომარეობს. დაჟანგული პოლიმერული რადიკალები, ჯაჭ-  
ვური რეაქციის შედეგად, ატომურ ჟანგბადთან ნაკლები მოლეკუ-  
82

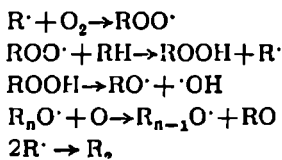


ლური წონის ნაერთებს გვაძლევს. ეს უკანასკნელი აქროლდება და ორთქლის დიდი დრეკადობის წყალობით იცავენ პოლიმერის აქტიურ ზედაპირს.

ამგვარად, უანგბადის ატომები, ეჭახებიან რა პოლიმერის მოლეკულას, იწვევენ რეაქციას:

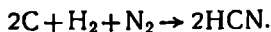


შემდეგში პროცესი ასე წარმართება:



ციანწყალბადმჟავას მიღება. ამ ნაერთისა და მისგან წარმოებული პროდუქტების მნიშვნელობისა და სპეციფიკურობის გამო, საკმაოდ ბევრი ცდები ტარდება მისი მიღების რაციონალური გზების გამოსაძებნად. უპირველეს ყოვლისა შესწავლილი იყო სამმაგი სისტემა  $\text{H}-\text{N}-\text{C}$ , რაც მრავალმხრივ არის საინტერესო და მნიშვნელოვანი. მიღებული მონაცემები ვარგისია ორმაგი სისტემებისათვისაც ( $\text{C}-\text{H}$ ;  $\text{C}-\text{N}$ ;  $\text{H}-\text{N}$ ). მათი მიხედვით სხვა ორგანული ნაერთების ტექნოლოგიის პერსპექტივებზედაც შეიძლება მსჯელობა.

თვით ციანწყალბადმჟავას მიღების ცდები ჩატარებული იყო ინერტული აირის პლაზმის ქველში. აზოტისა და წყალბადის სხვადასხვა შეფარდებისას ვითარდება რეაქცია:



ნახშირბადის წყაროს წარმოადგენდა გრაფიტის სახარჯო ელექტროდი, ხოლო წყალბადი მიეწოდებოდა აზოტის ქველის პლაზმაში.

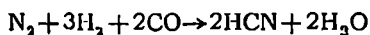
აორთქლებული ნახშირბადის 50% ციანოვან წყალბადს გვაძლევს. მაგრამ ამ დროს 13—14% აცეტილენის წარმოქმნაც ხდება.

აზოტის ან არგონის პლაზმაში წყალბადის ნაცვლად შესაძლებელი აღმოჩნდა ამიაკის მიწოდება. მაღალ ტემპერატურაზე იგი შემდგენელ კომპონენტებად იშლება. ნათელია, რომ აზოტის სიჭარბე ციანოვანი წყალბადის წარმოშობის პროცესზე დადებითად მოქმედებს.

ამიაკის ნაცვლად ან მათთან ერთად ნაცადი იყო მეთანის გამოყენებაც; მაგრამ თუ ამ დროს პლაზმის ალი არგონისაგან შედგება, მაშინ უმეტესად აცეტილენის წარმოქმნაა მოსალოდნელი.

რეაქციის შედეგად მიღებული პროდუქტების გაცივების სიჩქარეს გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს პროცესის მსვლელობაზე. საკმე იმაშია, რომ აცეტილენის წარმოქმნის რეაქცია უფრო ენდოთერმული ეფექტით ხასიათდება, ამიტომ მყისული გაციება მის წარმოქმნას უწყობს ხელს.

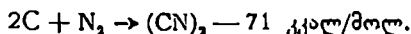
გამოირკვა აგრეთვე, რომ ციანოვანი წყალბადის მიღება ე. წ. წყლისა და გენერატორული აირის<sup>10</sup> ურთიერთქმედებით შეიძლება:



მაგრამ ეს საკითხი ჯერ ისევ კვლევის პერიოდშია.

დიციანის სინთეზი. ამ ნაერთის მნიშვნელობა უმთავრესად განისაზღვრება, როგორც გამოსავალი მასალისა, სხვა ძვირფასი ქიმიური პროდუქტების დასამზადებლად.

მისი სინთეზის რეაქცია საკმაო ენდოთერმულობით ხასიათდება:



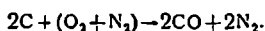
ამიტომ დიციანის მიღება პლანზმის ქავლში სავსებით შესაძლებლად ითვლება. ჩატარებული იყო ცდები, რა დროსაც ნახშირბადი გრაფიტის ჩვეულებრივი კათოდიდან ორთქლდებოდა, ხოლო აზოტი სარეაქციო არეში უშუალოდ ან არგონთან ერთად მიეწოდებოდა. ორივე შემთხვევაში აორთქლებული ნახშირბადის 1-2% გადადიოდა დიციანად.

პროცესის ეკონომიურობას თითქმის მთლიანად დახარჯული ენერჯის რაოდენობა განსაზღვრავს. წინასწარი მონაცემებით, მეთოდს პრაქტიკული ინტერესი უნდა ჰქონდეს ახლო მომავლისათვის.

<sup>10</sup> წყლის აირი ეწოდება ნახშირყანგისა და წყალბადის თანაბარ ნარევს, რომელიც 1000°-მდე გავარვარებულ კოქსზე ან ანტრაციტზე წყლის ორთქლის გატარების შედეგად მიიღება:



სინამდვილეში მას სხვა მინარევებიც აქვს მცირე რაოდენობით. რაც შეეხება გენერატორულ აირს, იგი აზოტისა და ნახშირყანგის ნარევი; მიიღება პაერის გატარებით ქვანახშირზე:



წყლის აირის მიღება მეტად მნიშვნელოვან სამრეწველო პროცესს წარმოადგენს.

## პლაზმა - მეჯალუკვი

არ შეიძლება მეტალურგების ყურადღება არ მიექცია პლაზმის ისეთი მახასიათებლების ერთობლიობას, როგორცაა:

1. ტემპერატურის, წნევისა და სამუშაო ატმოსფეროს ფართო ზღვრებში ცვლის შესაძლებლობა, რამაც პლაზმის ნაირგვარ პროცესებში გამოყენების გზები დასახა.

2. ენერჯისა და თბური ნაკადების მაღალი კონცენტრაცია მცირე სამუშაო მოცულობაში; ეს განაპირობებს პლაზმური დანადგარის დიდ მწარმოებლობას. მისი კუთრი სიმძლავრე, ელექტროდის ერთეულ ფართზე გადაანგარიშებით, 3—4-ჯერ მეტია, ვიდრე ისეთ სრულყოფილ და მძლავრ მეტალურგიულ აგრეგატში, როგორც ალუმინის საელექტროლიზო აბაზანა.

3. პლაზმური დანადგარის მცირე ზომა და კონსტრუქციული სიმარტივე ახლებურად წყვეტს მეტალურგიის ბევრ რთულ პრობლემას, ხოლო სხვა შემთხვევაში საერთოდ ხსნის ცეცხლგამძლე ამონაგის საჭიროებას. ვარაუდობენ, რომ ერთ დროს მარტენის დუმელს ასეთი ამონაგი შეიძლება აღარც დააჭირდეს.

4. პრაქტიკისათვის განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია პლაზმის ქავლში განვითარებული მაღალი ტემპერატურისა და ალის ჩირადნის შედგენილობისა და სიჩქარის ადვილად რეგულირების შესაძლებლობა.

პლაზმის ენერგეტიკული, თბური და აირდინამიკური მახასიათებლების ასეთი იშვიათი ერთობლიობის შედეგად პერსპექტიული აღმოჩნდა მადნების კომპლექსური გადამუშავება, უაღრესად სუფთა ლითონებისა და შენადნობების გამოდნობა, მათი ქრა და დამუშავება.

პლაზმა და ლითონების პირდაპირი აღდგენა მადნებიდან. თანამედროვე მეტალურგიის ერთ-ერთ ღირსშესანიშნავ პრობლემად ითვლება ლითონის უშუალო აღდგენა მადნიდან ან წინასწარ შემზადებული კონცენტრატებიდან. ამ მხრივ

საკმაოდ პერსპექტიული ჩანს პლაზმური დანადგარების გამოყენება.

მოწოდებულია ასეთი დანადგარის რამდენიმე ვარიანტი, რომელთაც რკალური და მაღალი სიხშირის განმუხტვა ან მაღალი ინტენსიობის რკალის გამოყენება უდევთ საფუძვლად. მათგან უფრო პერსპექტიული ჩანს უკანასკნელი.

ამ შემთხვევაში არა მარტო სასურველი ატმოსფეროს შექმნაა გაადვილებული, არამედ დასამუშავებელი მასალის დაშლისათვის მოსახერხებელი უნიკალური სარეაქციო ზონის არსებობაც არის უზრუნველყოფილი.

ძნელდნობადი ლითონების მადნებიდან პირდაპირი აღდგენის დროს ანოდად გამოყენებულია თვით დასამუშავებელი მასალა, რომელსაც ელექტროგამტარობის გაზრდის მიზნით გრაფიტს უმატებენ. მაღალი ინტენსიობის რკალით წარმოქმნილი პლაზმის ჩირაღდანი ამ შემთხვევაში შედგება ანოდის ორთქლისაგან, ე. ი. ლითონის, ნახშირბადისა და ჟანგბადის ორთქლისაგან.

პროცესის სირთულე ამ ნარევიბიდან ჩვენთვის სასურველი კომპონენტების სრულად და სწრაფად ამოღების სიძნელით არის გაპირობებული; ამისათვის ნარევის მყისიერად გაცივებას მიმართავენ, რა დროსაც ლითონის კონდენსაცია და კრისტალიზაცია, ან ადგილად აღსადგენ ნაერთად შებოჭვა ხდება.

გამოკვლევებით დამტკიცდა, რომ ასეთი გზით შესაძლებელია ძნელად აღსადგენი ლითონების — ბერილიუმის, ალუმინის, მაგნიუმის, ტიტანის, ცირკონიუმის, კაუბადისა და სხვ. სუფთა სახით მიღება.

ქ ი მ ი უ რ მ ე ტ ა ლ უ რ გ ი უ ლ ი პ რ ო ც ე ს ე ბ ი. მაღალი ტემპერატურების მეტალურგიაში გამოყენების ერთ-ერთი მიმართულება არის ნაერთებისა და მადნების თერმული დაშლა ელექტრორკალში. სახარჯ ულექტროდთან (ანოდთან) წარმოიქმნება პლაზმა, რომელიც ძირითადად ქიმიური ელემენტების ორთქლისაგან შედგება. მასში 15—20% ნახშირბადის ორთქლიცაა.

შექცეული რეაქციების თავიდან ასაცილებლად საჭიროა მიღებული ორთქლის მყისიერი გაცივება — ახალი ქიმიური გამყინავი აგენტების ან მექანიკური მოწყობილობის მეშვეობით. მათი კონსტრუქციების შესამუშავებლად აგრეთვე ინტენსიური კვლევა მიმდინარეობს. დადგენილია, მაგალითად, რომ ლავალის საქმენში გაცივების სიჩქარე შესაძლებელია მილიონ გრადუსამდე ავიყვანოთ წაშში. ბალისტიკური დგუშების გამოყენებით ეს სიჩქარე კიდევ უფრო იზრდება.

მაღალ ტემპერატურაზე ფრაქციული დისტილაციით პერსპექტიული ჩანს სუფთა ლითონების მიღება. როდონიტის— $MnSiO_3$ -ის აღდგენისას, მაგალითად, ანოდის ალი მანგანუმის ორთქლისა და ნახშირბადისაგან შედგება, თხევად ფაზაში კი გამლღვალი კვარცი —  $SiO_2$  და სხვა მინარეები გვაქვს.

როდესაც სუფთა ლითონების მიღება ჟანგეულებისა და ნახშირბადის მინარეების გარეშე ზოთულდება, მაშინ მნიშვნელოვანი ინტერესის მქონე ხდება სუფთა ჟანგეულების ფრაქციული კონდენსაცია; კერძოდ, იმავე როდონიტისაგან აღვილად მიიღება დიასპერსული  $MnO$  და  $SiO_2$ ; ბერილისაგან —  $BeO$ ,  $Al_2O_3$  და  $SiO_2$ . ეს პროდუქტები მომეტებული ქიმიური აქტივობით ხანიათღებიან, რაც აადვილებს მათგან ლითონების აღდგენას. ამავე ხერხით ახდენენ მადნების განათვისუფლებას გოგირდისა და დარიშხანას აქროლადი მინარეებისაგან. კონდენსირებული ჟანგეულების დასაპერად ფილტრს დგამენ იქ, სადაც ამ არასასურველი მინარეების დანამვის ტემპერატურა უფრო ნაკლები იქნება, ვიდრე გარემოს ტემპერატურა.

ანოდთან შექმნილ პლაზმაში, რომელიც მადნისა და ნახშირბადის ნარევისაგან შედგება, უშუალოდ შეკავთ ქლორი. დაქლორების პროცესი ადვილად მიმდინარეობს.

ქლორიდების ორთქლი შეიძლება ფრაქციულად დავაკონდენსიროთ სპეციალურ მაცივრებში. ეს მეთოდი უკვე პრაქტიკულად არის განხორციელებული ბერილის, კალინისა და ბორაქსის ვადასამუშავებლად.

პლაზმაში დაქლორვა გაცილებით უფრო ეფექტურია, ვიდრე ამჟამად ხმარებულ სტაციონალურ ქლორატორებში. მიუხედავად იმისა, რომ გარკვეულ მომენტში პლაზმის ზონაში კაზმი მეტად მცირე რაოდენობითაა, აგრეგატის წარმადობა საკმაოდ დიდია. აღსანიშნავია, რომ ამ დროს აპარატურის ქლორით კოროზიის საკითხი მოხსნილია, რაც პირველი მნიშვნელობის პრობლემაა მაღალ ტემპერატურებზე მუშაობის დროს.

ჟანგეულების კარბოთერმული პლაზმური აღდგენისათვის ლითონთა ჟანგეულებისა და ნახშირბადის ნარევისაგან შედგენილი სახარჯი ელექტროდები გამოიყენება; პლაზმის კონფიგურაცია (შედარებით გრძელი და ვიწრო ალი) და აირების მაღალი სიჩქარე ხელს უწყობს აირების სწრაფ გაცივებას და გამორიცხავს მიღებული პიროფორული მასალების აფეთქების შესაძლებლობას.

ენერჯის მაღალი ინტენსივობის რკალთან მიყვანა ისე რეგულირდება, რომ სახარჯი ელექტროდის აორთქლება არ მოხდეს; რეაქცია ანოდის ზედაპირზე თხევად ფაზაში უნდა მიმდინარეობდეს.

ამ გზით ურანის ორენაგისა —  $UO_2$  და ნახშირბადის სტეჟიომეტრული ნარევიდან მიღებულია ურანის კარბიდი, რომლიდანაც შემდეგ სახარჯ ელექტროდს ამზადებენ. რკალი მცირე წნევაზე ანთია; ალში მხოლოდ ნახშირბადი გვაქვს. თხევადი კარბიდი — სუფთა UC თხელ ფენად ჩამოედინება ანოდის ზედაპირიდან (მისი ტემპერატურა  $3500^{\circ}$  აღწევს) და მომცრო, 8 მმ-იანი ბურთულაყების სახით მყარდება. დამტკიცებულია, რომ ამ შემთხვევაში (ღუღილის ტემპერატურის ქვევით) შექცეული რეაქციები არ მიმდინარეობს.

ჭ ა რ თ ი დ ა ნ — ს ა ი ა რ ა ლ ო ფ ო ლ ა დ ი. ინგლისში წარმატებით დაიწყო მუშაობა პლაზმურმა ლუმელმა, რომელიც ჯართიდან უშუალოდ აღნობს მაღალხარისხოვან ფოლადს.

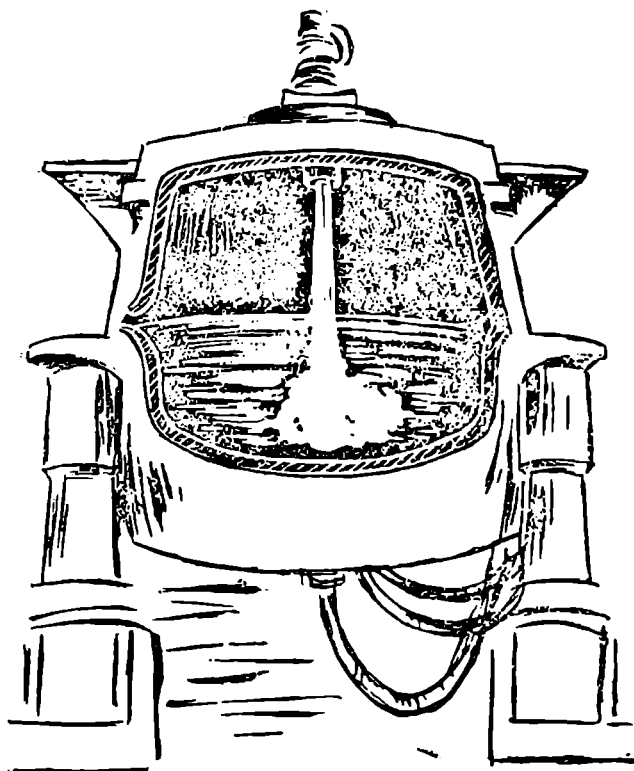
ჩვეულებრივი ელექტრორკალური დნობისაგან განსხვავებით, პროცესი სახარჯი ელექტროდების გარეშე მიმდინარეობს. ინერტული აირი — არგონი (ან აზოტი) ელექტროგანმუხტვის რკალში იქცევა პლაზმად; ამ უქანაპენელის სითბოს გადაცემის მაღალი უნარი განაპირობებს ჯართის სწრაფ დნობას, ხოლო ინერტული ატმოსფერო უზრუნველყოფს წილის ჩანართებისა და ეანგეულებისაგან თავისუფალი ფოლადის გამოდნობას. როგორც პრაქტიკამ აჩვენა, მიღებული მასალა იდეალურია მაღალხარისხოვანი ინსტრუმენტების დასამზადებლად და საავიაციო მრეწველობაში გამოსაყენებლად.

სამრეწველო მასშტაბის კვლევებმა დამტკიცა, რომ პლაზმას შეუძლია გადააწყვეტი სიტყვის თქმა ისეთი დიდი დანადგარების შემთხვევაშიც, როგორც მარტენის ლუმელები და კონვერტორები. ისინი, მართალია, შედარებით დაბალ,  $2000^{\circ}$ -ზე ნაკლებ ტემპერატურებზე მუშაობენ, მაგრამ ლუმელის ამონაგის პრობლემა ასეთი „დაბალი“ ტემპერატურების დროსაც ჯერ კიდევ არ არის გადაწყვეტილი. ამონაგს არა მარტო მექანიკური სიმტკიცე და მხურვალმედვეობა უნდა ახასიათებდეს, არამედ საკმარისი ქიმიური ინერტობაც ლლობილის მიმართ — არ ურთიერთქმედებს მასთან, რათა არ გააჭუქყიანოს იგი; საკმარისია „უცხო“ ნივთიერების თანობა პროცენტის მეასედი და მეათასედი ნაწილის რაოდენობით, რომ ასეული ტონა ლითონი უვარგისი გახადოს.

ამონაგის საკითხი არც ელექტროსადნობი ლუმელების შემთხვევაშია საბოლოოდ გადაწყვეტილი. ამ მხრივ მეტალურგები დიდ იმედებს ამყარებენ პლაზმაზე, რომლის გამოყენებამ ჩვეულებრივ ლითონადნობ ლუმელში საკმარის კარგი შედეგი გამოიღო.

გავარჯარებული ინერტული აირის — არგონის ნაკადი კაზმში ქმნის ღრმულს. წარმოქმნილი ლლობილი ძლიერ გადახურებულია და ინტენსიურად გადასცემს სითბოს ლითონის ახლო ფენებს.

პლაზმის დიდ უპირატესობად უნდა ჩაითვალოს ენერგიის ეკონომიურად ხარჯვა და აირის ჭავლის სიძლიერის ადვილი რეგულირება — გადახურებული ლითონის ტალღა კედლებამდე არ აღწევს და არ აზიანებს მას. ლუმელის ამონაგი 200-მდე დნობას იტანს.



ლითონის სადნობი პლაზმური ლუმელი

ტემპერატურის ადვილი რეგულირების გარდა, პლაზმური დნობა საინტერესოა იმ მხრივაც, რომ ლუმელში შესაძლებელია აღმდგენელი ატმოსფეროს შექმნა და სასურველი რეაქციების ჩატარება. ამ გზით მიღებული ფოლადი ხარისხით ვაკუუმში გამოდნობილს არ ჩამოუვარდება.

გერმანიის დემოკრატიულ რესპუბლიკაში ასეთ ლუმელებს წყლის კრისტალიზატორი აქვს მორგებული, რომელშიც უშუალოდ იღებენ საჭირო ფორმის ნაკეთობას, მაგალითად, ვოლფრამის მავაულს. ჩეხი მეტალურგების პრაქტიკაში ლითონი პირდაპირ ამო-

წლებმა კრისტალიზატორიდან. ეს კი უწყვეტი პროცესის შექმნის გზებს სახავს. უფრო იაფი ენერჯიის შემთხვევაში ლითონის სადნობმა პლაზმურმა ლუმელებმა დიდი გავრცელება უნდა ჰპოვონ.

მკრელიც და შემდღელებელიც. პლაზმის ჰავლი საკმაოდ ფართოდ დაინერგა ლითონთა დამუშავების საქმეშიც. ლაპარაკია არა მარტო ჭრასა და შედღელებაზე, არამედ დაღუღებასა, დანაფენებით დაფარვასა და სფეროიდიული ნაწილაკების მქონე ფხვნილების მიღებაზე.

პლაზმის თხელი ჰავლის მეშვეობით ხერხდება ის, რაც უანგბად-აცეტილენის ალშიც კი შეუძლებლად იყო მიჩნეული, კერძოდ, ფერადი ლითონებისა და შენადნობების, მაღალლეგირებული ძნელდნობადი ფოლადებისა და თვით არაელექტროგამტარი მასალების დამუშავებაც კი. ამ ოპერაციების ჩატარება მანამდე ფლუსების გამოყენებით ან მექანიკური მეთოდებით რთულად და ნაკლები მწარმოებლობით იყო შესაძლებელი.

პლაზმის მაღალტემპერატურიანი ალი პირველად ლითონთა შედღელების საქმეში გამოიყენეს. ბევრ სხვა დადებით თვისებასთან ერთად, მნიშვნელოვანი გამოდგა ის ფაქტორიც, რომ ჭრის პროცესი არიჟანგებად და ფეთქებადუსაფრთხო ატმოსფეროში ტარდება. ეს საგრძნობლად აუმჯობესებს შედღელების ხარისხს.

ელექტრორკალის სტაბილიზაცია სანთურაში არა აირით, არამედ წყლის ნაკადით ხდება. ხელსაწყო სიმძლავრე საშუალოდ 50 კვტ აღწევს. დადებითი ელექტროდი — ანოდი მოძრავია (50 ბრ/წთ); პლაზმის ჰავლის ცენტრში 29000° ტემპერატურაა აღნუსხული. პლაზმის  $\frac{2}{3}$  წყალბადია,  $\frac{1}{3}$  — უანგბადი. პირველი მათგანის მომეტებული რაოდენობა და დიდი თბოშეცულობა აპარატის საკმაო მწარმოებლობას განაპირობებს.

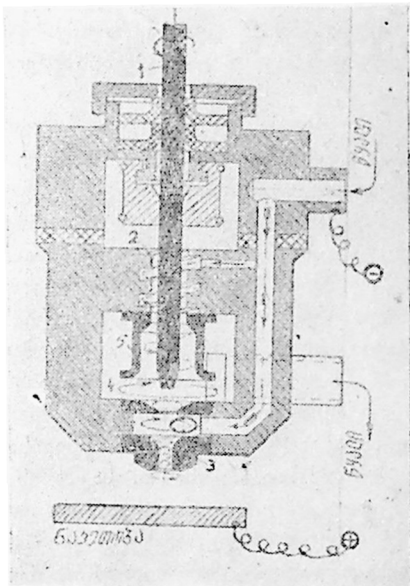
პლაზმური ხელსაწყო წარმატებით გამოიყენება აგრეთვე კერამიკული მასალების, ძნელდნობადი ლითონებისა (ვოლფრამი, მოლიბდენი, ტიტანი) და მათი ნერთების (კარბიდები, ბორიდები, ნიტრიდები, სილიციდები) თხელი დანაფარების მისაღებადაც. ასეთი დანაფარები აუცილებელია ისეთი დეტალებისთვის, რომელთაც მაღალი ტემპერატურის, სიჩქარეებისა და წნევების, აგრეთვე აგრესიული გარემოს ძნელ პირობებში უხდებთ მუშაობა.

საინტერესოა აღინიშნოს, რომ დანაფარის ძირითად მასალასთან შეჭიდულების სიმტკიცე აღემატება კიდევ თვით დანაფარის სიმტკიცეს. ამჟამად ხმარებაშია აპარატები, რომლებსაც შეუძლიათ საათში 4-დან 10 კგ-მდე ვოლფრამი გააფრქვიონ.



კარგი შედეგები გამოიღო აგრეთვე პლაზმის გამოყენებამ ამა თუ იმ ნაკეთობაზე ლითონის განსაზღვრული ფენის დასადუღებლად. საჭირო მასალა პლაზმაში ფხენილის ან მავთულის სახით შეჰყავთ. იგი სახარჯი ელექტროდის როლს ასრულებს. პლაზმა საშუალებას გვაძლევს იმდენად მოხერხებულად ვარეგულიროთ როგორც ძირითადი, ისე დასადუღებელი ლითონის ლღობის პროცესი, რომ ერთ-ერთი მათგანი მყარი ფაზის სახით შეიძლება გვექონდეს. მართვის სიზუსტეზე წარმოდგენას გვაძლევს ის ფაქტი, რომ ძირითადი ლითონი მხოლოდ ჟანგის ფენის სიღრმეზე შეიძლება გავადნოთ. ეს კი საჭიროა იმისათვის, რომ დასადუღებელი მასალა რაც შეიძლება მცირედ იყოს მიჩეული ფუძის მასალასთან. ცხადია, რომ სხვა არსებული მეთოდებით პროცესის ასე ზუსტად რეგულირება შეუძლებელია.

პლაზმის ჰავლის გამოყენება ეფექტური აღმოჩნდა ლითონთა საჭრელადაც. ჩვეულებრივი ჟანგბად-აცეტილენის ალით ჰრის შემთხვევაში ლითონის ფურცელზე უსათუოდ რჩება უსწორმასწორო ხორკლიანი ნაწიბურები, რომლის გასუფთავება-გასწორება საკმაოდ დროსა და ენერგიას მოითხოვს. პლაზმური „დანა“ კი ასეთ ნაწიბურებს არ ტოვებს — მოჭრილი ნაპირი სავსებით სუფთაა და შრომატევად მექანიკურ დამუშავებას აღარ საჭიროებს.



ლითონის საჭრელი პლაზმოტრონის თავი

ელექტრორკალი მუდმივი დენის ტრანსფორმატორის მეშვეობით მიიღება; არგონისა და აზოტის პლაზმის ტემპერატურა  $17000^{\circ}$  აღწევს, ნაცვლად  $3000^{\circ}$ -სა ჟანგბად-აცეტილენის ალით ჰრის დროს, რაც პროცესის მაღალი მწარმოებლობის ერთ-ერთი მთავარი პირობაა.

პლაზმის დიდ უპირატესობად უნდა ჩაითვალოს ისეთი შენადნობების ჰრის შესაძლებლობა (უჟანგავი და მაღალრეგულირებუ-

ლი ფოლადები, ძნელდნობადი ლითონები — ვოლფრამი, ტიტანი და სხვ., ფერადი ლითონები — ალუმინისა და სპილენძის ჩათვლით), რომელთა დამუშავება ჩვეულებრივი მეთოდით მანამდე არ ხერხდებოდა.

აგრესიულ გარემოსა და მაღალ ტემპერატურაზე მიმდინარე ზოგიერთი პროცესისათვის აუცილებელი აღმოჩნდა სპეციალური ფილტრების დამზადება ძნელდნობადი ლითონებისა და მათი ნაერთებისაგან. ფხვნილის ნაწილაკებს სფეროიდული ფორმა უნდა ჰქონდეთ. მათი მიღება მხოლოდ პლაზმური ტექნოლოგიის განვითარების შემდეგ გახდა შესაძლებელი.

საჭირო ლითონის მავთული შეჰყავთ პლაზმაში. გამლღვალი ნაწილაკები, წარიტაცებიან რა გავარვარებული აირის მიერ, ზედაპირული დაქიმულობის ძალების გავლენით სფერულ ფორმას იძენენ.

ვოლფრამის ფხვნილის ნაწილაკების ზომა 60—400 მიკრონის ფარგლებშია, ხოლო სხვა ლითონები კიდევ უფრო წვრილ ფხვნილს იძლევა — მიკრონის მეთადამდე განზომილებით.

პროცესის პირობები იხეთნაირად შეიძლება შეირჩეს, რომ ნაწილაკები შიგნიდან ღრუ ფორმისა იყოს.

პლაზმის ჰაელი, როგორც მაღალი ტემპერატურის მოსახერხებელი წყარო, ფართოდ დაინერგა აგრეთვე ძნელდნობადი დამცველი შრეების დასადუღებლად მაღალი ტემპერატურის პირობებში მომუშავე ნაკეთობებზე. საკმარისია დავასახელოთ რაკეტული ტექნიკა. რაკეტის გულს წარმოადგენს საქშენი, სადაც არა მარტო მაღალი ტემპერატურის, წნევისა და აგრესიული გარემოს ძნელი პირობებია შექმნილი. საქშენის კედლებმა სითბოს უზღვავი რაოდენობაც უნდა გაატარონ დროის მცირე მონაკვეთში (ორბიტაზე გასვლა სულ რაღაც 3—4 წუთში ხდება!). ასეთ პირობებში სამუშაოდ არა მარტო ვოლფრამი, ნიობიუმი, მოლიბდენი, ტანტალი და სხვა ძნელდნობადი ლითონები გამოიყენება. გაცილებით უფრო გამოსადეგი აღმოჩნდა მათი ნაერთები — კარბიდები, ქანგეულები, ნიტრიდები, ბორიდები, სილიციდები.

პლაზმა არა მარტო ამ ნაერთების დნობის შესაძლებლობას სახავს, არამედ საპასუხისმგებლო ნაკეთობის თხელი დამცველი ფენით დაფარვის საშუალებასაც გვაძლევს. რაც მთავარია, დაფარვა ხდება ზუსტად და მაღალი მწარმოებლობით.

აღსანიშნავია, რომ მცირენახშირბადიანი ან უქანგავი ფოლადის, ალუმინისა და სხვათა დანაფარის შეჭიდებადობის სიმტკიცე გაცილებით მეტია, ვიდრე თვით ამ შრეს აქვს.

სუფთა ლითონების მიღება ელექტრონული დაყუმბარების მეთოდით. უკანასკნელი 15 წლის კვლევათა და საწარმოო გამოცდილების საფუძველზე, ტექნიკურად განვითარებულ ქვეყნებში ფეხს იკიდებს ე. წ. ელექტრონულ-სხივური დნობის მეთოდი. განსაკუთრებულ როლს აქ თამაშობს მაღალი სისუფთავის ლითონების მიღების საკიროება. ეს ფაქტორი კი უპირატესად მნიშვნელოვანია თანამედროვე ტექნიკისათვის. ელექტრონებით დაყუმბარების ხერხი წარმატებით ეჭიბრება რკალური დნობას და შეცხოების მეთოდს.

რაც შეეხება საკითხს — რომელი ლითონის გამოდნობა სჯობია ამ მეთოდით, ჯერ გადაწყვეტილი არ არის. ფიქრობენ, რომ ლეგირებული ფოლადებისა და მხურვალმტკიცე შენადნობებისათვის ჯერჯერობით ისევ ვაკუუმ-ინდუქციური და რკალური დნობა რჩება ძალაში. ისეთი ძნელდნობადი ლითონების სუფთა სახით მისაღებად კი, როგორცაა ჰაფნიუმი, ნიობიუმი, მოლიბდენი, ტანტალი, ვოლფრამი და ზოგიერთი სხვა, ელექტრონულ-სხივურ დნობას ეძლევა უპირატესობა. თეორიულად, მაგალითად, მოლიბდენისაგან შესაძლებელი უნდა იყოს ყველა მინარევის მოცილება, გარდა რენიუმის, ტანტალისა და ვოლფრამის მცირე კვალისა; ნიობიუმი კი რენიუმსა და ტანტალს ამ შემთხვევაშიაც „ვერ ელევა“.

რაც შეეხება აქროლადი კომპონენტების შეყვანას შენადნობებში, ალბათ საკირო იქნება ელექტრონულ-სხივური დნობისა და რკალური ღუმელის ერთმანეთთან შეხამება.

ელექტრონულ-სხივური დასეტყვით უკვე 1962 წელს სამრეწველო მასშტაბით საკმაოდ დიდი დიამეტრისა (500—1500 მმ) და ორ მეტრამდე სიგრძის ზოდებს ადნობდნენ.

იმის მიხედვით, თუ რა თვისებათა მქონე მასალა უნდა დამუშავდეს — მაღალლეგირებული მხურვალმედვეგი შენადნობი, უჟანგავი ფოლადი, ნიკელისა და ტიტანის შენადნობი, თუ სუფთა ძნელდნობადი ლითონები, ღუმელებიც სხვადასხვა კონსტრუქციისაა.

კომპაქტური ნამზადის გადასადნობად, მაგალითად, ისეთივე კონსტრუქციის დანადგარია გამოყენებული, როგორც რკალის ღუმელია სახარჯი ელექტროდით. შეცვლილია მხოლოდ გახურების წყარო. თხევად აბაზანაში მულმივი დონეა შენარჩუნებული; აბაზანა თავსდება სპილენძის კრისტალიზატორში, რომელიც წყლით ცივდება. დნობა ერთი ან ორი წრიული კათოდით ხდება. ანეთ ღუმელებში არა მარტო ლითონებს, არამედ დენის არგამტარ მასალებსაც ადნობენ (ჟანგეულები, კერამიკა და სხვ.), მაგრამ ამ შემთხვევაში შეუძლებელი ხდება ელექტრონების ნაკადის ფოკუსირება, რაც ართულებს დანადგარის კონსტრუქციას.

ბევრ დადებით თვისებასთან ერთად, აღნიშნულ სქემას ნაკლოვანებებიც აღმოაჩნდა. კათოდსა და ლითონს შორის მცირე მანძილის გამო, დნობის პროცესი ელექტრომაგნიტურ ველში მიმდინარეობს, რაც გარკვეულ უხერხულობას იწვევს. მართალია, წრიული ამაჩქარებელი ანოდის შემთხვევაში დაშორება იზრდება და კათოდი აღარ ჭუჭყიანდება ლითონის ორთქლით, მაგრამ ეს ზრდის სამუშაო პროცესის ხანგრძლიობას.

რგოლური კათოდის ნაკლოვანება აცილებულია ე. წ. აირის ელექტროდის მქონე ელექტრონულ-სხივურ სატყორცნში, მაგრამ ეს უკანასკნელი მცირე წარმადობისაა.

ამ დანადგარში დიფრაგმები წვრილი მილით არის შეცვლილი, რომელიც წყლით ცივდება. ამ შემთხვევაში აირის დაჭერა ხდება და ისინი კათოდამდე აღარ აღწევენ. ეს 3—5-ჯერ ზრდის კათოდის მუშაობის ხანგრძლიობას.

დნობა სახარჯი ელექტროდის გარეშე. სახარჯი ელექტროდის მომზადების რთული ტექნოლოგიის გამო, უფრო მხებერხებულად ითვლება დაუმუშავებელი (დაუწნეხავი) კაზმის გამოყენება, რომელიც თხევად აბაზანაში ჩაიტვირთება.

თვითეულ სატყორცნს დამოუკიდებელი კვება აქვს. უპირატესობა ისეთ კონსტრუქციას ეძლევა, როდესაც კაზმის ცენტრში თავმოყრა ხერხდება. ასეთი დანადგარი ადვილად გადაკეთდება სახარჯი ელექტროდით მუშაობისათვის.

ელექტრონული დასეტყვა ლითონის გახურების იდეალურ საშუალებად უნდა მივიჩნიოთ, კერძოდ, მისი გარნისაჟში დნობისათვის. პროცესი ტარდება სპილენძის ტიგელში, რომელიც თავის მხრივ წყლით ცივდება. გარნისაჟი გამორიცხავს სადნობი ლითონის გაჭუჭყიანებას ტიგელის მასალისაგან. აბაზანაში ერთდროულად ხდება ლითონის გასუფთავება (დეგაზაცია), რაფინირება და ლეგირება. ბოლოს იგი ჩაისხმება კოკილში ან ყალიბში.

გარნისაჟიან აბაზანას ბევრი დადებითი თვისება აღმოაჩნდა. იგი დიდხანს ძლებს გამლდვალ მდგომარეობაში, დნობისათვის შეიძლება ნებისმიერი ფორმის კალაპოტის გამოყენება, ენერგია საჭიროების მიხედვით არა მარტო აბაზანაში, არამედ ჩამოსასხმელ ტუჩზე და კოკილშიც მიიყვანება და სხვ.

ყოველივე ეს განაპირობებს ისეთი ლითონების სხმულების მიღებას, რომელთა დნობის ტემპერატურა 3000° ზევით არის. აღსანიშნავია ისიც, რომ ტანტალის, ნიობიუმის, ვოლფრამისა და მოლიბდენის სხმულები უფრო მაღალხარისხოვანი და წვრილკრისტალური სტრუქტურით მიიღება.

## მალაიი ზემოკაზუჩაების ახალი „პროჟესნიები“

როდესაც გრაფიტი აღმასად იქცევა. ადამიანი-სათვის ცნობილ მინერალებს შორის აღმასი ყველაზე უფრო ძვირფასია. თანამედროვე ტექნიკის წინსვლა ბევრ შემთხვევაში ძლიერ შეფერხდებოდა „სალი სხეულების მეფის“ აღმასის გარეშე. იმ მცირე რაოდენობიდან, რასაც ბუნება გვითმობს (მსოფლიო მოპოვება ~ 5 ტ დონეზეა), 80% მრეწველობას ხმარდება. ამტკიცებენ. რომ ამერიკის შეერთებული შტატების სამრეწველო პოტენციალი ორჯერ შემცირდებოდა, აღმასები რომ არ იყოს. ამიტომ არის, რომ იგი ინგლისიდან 34 მლნ დოლარის ღირებულების აღმასებს ყიდულობს ყოველწლიურად.

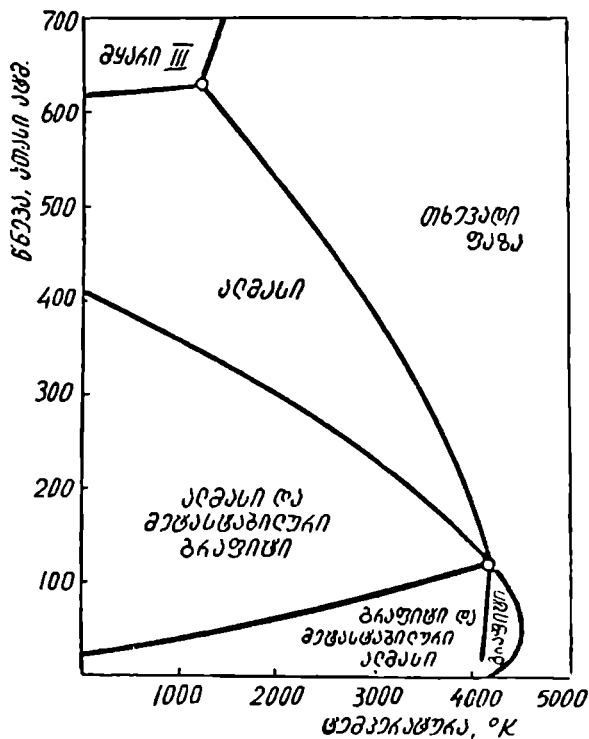
აღმასის ბურღებით იჭრება ადამიანი მიწის ქერქში, ამუშავებს სალ შენადნობებსა და სხვა მასალებს. ვინ მოთვლის, ტექნიკის რამდენი დარგის წინსვლაა მისგან გაპირობებული. საკვირველია, მაგრამ ფაქტია: რაც უფრო დაძაბულ პირობებშია ჩაყენებული აღმასის ინსტრუმენტი, მით უფრო ეფექტურად მუშაობს იგი! მცირდება მასალის ხარჯი, უკეთესდება დამუშავების ხარისხი და სხვ.

გასაგებია მეცნიერთა სწრაფვა — დაუფლებოდნენ აღმასების ბელოვნური გზით მიღების საიდუმლოებას. მაგრამ ათეული წლების დაძაბული შრომა უშედეგო იყო, ვინაიდან ძნელი გამოდგა ისეთი პირობების შექმნა ლაბორატორიაში, როგორც აღმასების ბუნებრივ ლაბორატორიაში — ქვესკნელში არსებობს.

სპეციალური თეორიაც კი შეიქმნა გრაფიტის აღმასად გარდაქმნის შეუძლებლობის შესახებ. მაგრამ ამ ათიოდე წლის წინათ უკვე სამრეწველო დანადგარი ამუშავდა, რომელშიც 127000 ატმ წნევაზე და 2400° ტემპერატურაზე ლითონის კატალიზატორის თანაობით ჩვეულებრივი გრაფიტის (ნახშირბადის) ატომები აღმასის სტრუქტურას იძენდნენ.

ამჟამად შექმნილია დანადგარები, სადაც ლითონური კატალიზატორი უკვე ზედმეტია. ამის საშუალება მოგვცა წნევის 200 000

ატმ-მდე გაზრდამ (ასეთი წნევა მიწის წიაღში ალბათ 500 კმ სიღრმეზე არსებობს) და მაღალი (5000°C) ტემპერატურების სამრეწველო მასშტაბით დაუფლებამ.



ნახშირბადის ფაზათა წონასწორობის დიაგრამა.  
 მყარი ნივთიერება III ნეარაუდევია, როგორც ლითონური მდგომარეობა, 15—20%-ით უფრო მკვირივი, ვიდრე ალმასია

კვლევათა შედეგად დადგინდა ალმასის, გრაფიტისა და თხევადი ნახშირბადის წონასწორობის სამმაგი წერტილი; გარკვეულია გრაფიტის დნობის ტემპერატურა და სხვ.

სინთეზური ალმასების წარმოება ფართოდ არის გაშლილი ჩვენშიც. მათი გამოყენება დიდ ეფექტს იძლევა ლითონდამმუშავებელ ქარხნებსა და სხვა საწარმოში.

აღსანიშნავია ხელოვნური აღმასისაგან დამზადებული სამუშაო იარაღის ისეთი ძვირფასი მასალების საჭრელად და დასამუშავებლად გამოყენება, როგორცაა სალი და მყიფე ნახევარგამტარები. ამ მხრივ აღმასებისაგან ნამდვილ ტექნიკურ რევოლუციას უნდა ველოდოთ: სამუშაო, რომელსაც უწინ 4 საათი სჭირდებოდა, ახლა 40 წამში ხორციელდება. ამასთან ერთად უკეთესდება დამუშავების ხარისხი, საგრძნობლად მცირდება დანაკარგები და სხვ.

ხელოვნური აღმასების მიღების პრობლემის გადაწყვეტა შეუძლებელი იქნებოდა მაღალი ტემპერატურებისა და წნევების დაუფლების გარეშე.

მონოკრისტალების მიღება. მაღალი სიხშირის პლაზმური სანთურის გამოყენების ერთ-ერთი მთავარი სფეროა კორუნდის ჭგუფის ძვირფასი ქვების მიღება.

მათი უმრავლესობა, მუქი-წითელი ლალი იქნება ის, ლურჯი საფირონი, ყვითელი ტოპაზი, იისფერი ამეტისტი, მწვანე ზურმუხტი, თუ ზეთისხილისფერი ქრიზოლიტი, იგივე კორუნდია — სუფთა  $Al_2O_3$ . ფერების ამდენ ნაირსახეობას კი ამა თუ იმ ლითონის ჟანგეულის უმნიშვნელო მინარევი განაპირობებს. ლალისათვის ასეთია ქრომის ჟანგი, საფირონისათვის — რკინისა და ტიტანის ჟანგეულები და სხვ.

ლალი თავის მნიშვნელობით ზოგჯერ აღმასსაც ედრება. ამიტომ არის, რომ ინდოეთსა, ბირმასა და ინდონეზიაში მას წმინდა ქვად თვლიან. მნიშვნელოვანია იგი ტექნიკისათვისაც — განსაკუთრებით გამძლე ფილიერებისა და ლაზერების დასამზადებლად.

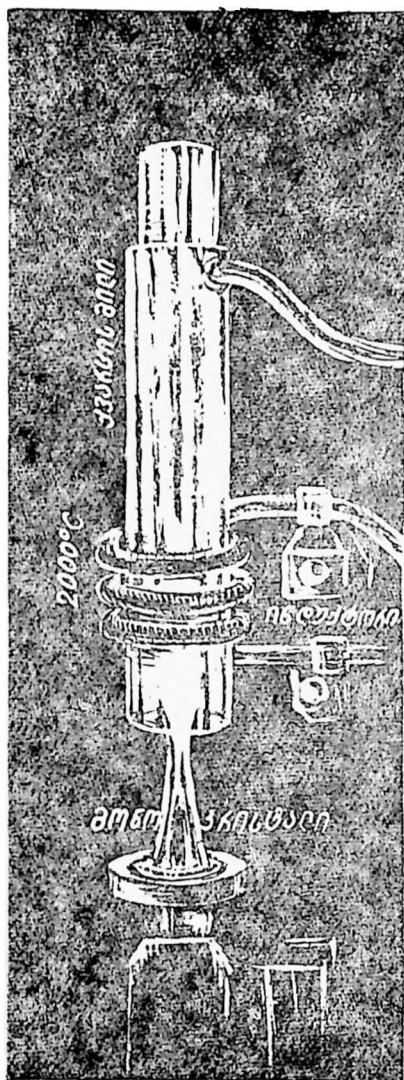
მეცნიერები დიდი ხანია ოცნებობენ ძვირფასი ქვების ხელოვნური გზით დამზადებაზე. მაგრამ ვერ მოინახა ტიგელი, რომელიც; მაღალ ტემპერატურაზე კორუნდს არ გააჟუჟყიანებდა (იგი 2050°-ზე ღლევა).

ბოლოს ეს საკითხი ჰკუამახვილურად გადაჭრა ფრანგმა ვერნეილმა 1902 წელს უტიგელო ლღობის მეთოდით. პლაზმის ჰავლში გამლღვალი წვეთი ეცემა ღეროს და იქვე მყარდება. მონოკრისტალის მისაღებად მას შემოალღობენ ხოლმე.

ვერნეილის მეთოდი ჩვენთან გააუმჯობესა პოპოვმა. ლალი და საფირონი ახლა სამრეწველო მასშტაბით მიიღება.

უფრო პრაქტიკულად ითვლება ამ მიზნით ლითონურ კამერაში მიღებული პლაზმის გამოყენება. ასეთი დანადგარი დიდი სიმძლავრის შეიძლება იყოს. მილის კედლის გასწვრივ მიეწოდება არონის ჰავლი, რომელიც წარიტაცებს კორუნდის ფხვნილს ისე, რომ იგი არ გაიფანტოს. აირის ჰავლი თითქოს კუმშავს ფხვნილის ნაკადს და უნარჩუნებს მას გარკვეულ მიმართულებას. სიჩქარეები

ისეა განაწილებული, რომ განმუხტვის ზონაში ფხვნილის ნაწილაკები მხოლოდ შემოდღევა გარშემო. მთლიანი ღლიობა კი თვით კრისტალზე ხდება; იგი საშუალოდ 10—15 მმ-ით იზრდება საათში.



პროცესის კონტროლის მოხერხებულობისათვის. გრძელფოკუსიანი ღინით კრისტალი პროექტირდება სპეციალურ ეკრანზე. ეს საშუალებას გვაძლევს დისტანციურად ვარეგულიროთ რეჟიმი.

წვის თბური მახასიათებლების გაუმჯობესების მიზნით არგონს მცირე რაოდენობით ჰაერსაც ურევენ.

აფეთქება — მშენებელი. აფეთქება იგივე წვის რეაქციაა, მაგრამ ისეთი, რომელიც ზებგერიითი სიჩქარით, თითქმის მყისეულად მიმდინარეობს. ხოლო რაც უფრო სწრაფია წვის პროცესი, მით უფრო ნაკლებად ასწრებს აირი სითბოს გადაცემას გარემოსადმი და. მაშასადამე, მით მეტი ენერგია ხმარდება თვით რეაქციის პროდუქტების ტემპერატურის გაზრდას. ამიტომ არის, რომ აფეთქების დროს, რომელიც წამის მეათასედ და მემილიონედ ნაწილს არ აჭარბებს, 5000°-მდე ტემპერატურა ვითარდება. ჩვეულებრივად კი იქ, სადაც

ძვირფასი ქვების—ლალის, კორუნდის, საფირონისა და სხვა მონოკრისტალების მიღება პლაზმის ქველში



მაღალი ტემპერატურებია, დიდი წნევებიცაა: აფეთქების შემთხვევაში ასეთი 5000 ატმ აღწევს ხოლმე.

ბევრი, ალბათ, დარწმუნებულია, რომ აფეთქებადი ნივთიერების ეფექტურობა მის დიდ ენერგიაზეა დამყარებული; სრულებითაც არა! ტროტილის აფეთქებისას, მაგალითად, რვაჯერ ნაკლები ენერგია გამოიყოფა. ვიდრე იმავე წონის ნახშირის დაწვის დროს. მაგრამ საქმე ის არის. რომ პირველ შემთხვევაში ენერგია ათეულ მილიონჯერ უფრო სწრაფად გამოიყოფა, ვიდრე წვის რეაქციის დროს, მაშასადამე, სიმძლავრეც გაცილებით მეტი ვითარდება. არ შეიძლება არსებობდეს მანქანა, რომელსაც შესწევდეს უნარი ასეთი შრომატევადი მუშაობა შეასრულოს დროის ისეთ მცირე მონაკვეთში, როგორც ეს აფეთქებით ხდება.

აფეთქების მეღვარე ძალა უწინაც იპყრობდა ადამიანის ყურადღებას და არა მარტო სამხედრო მიზნებით — ნგრევისა და განადგურებისათვის. ჯერ კიდევ ოთხასიოდე წლის წინათ, ძდინარე ნემანის ფარვატერი სწორედ აფეთქებით გაწმინდეს. მას შემდეგ აფეთქება ბევრ უაღრესად შრომატევად საქმეს ასრულებს — მაგარი ქანების მონგრევა, გვირაბების, არხების, შახტების, ფაბრიკა-ქარხნების მშენებლობა, ათეული მეტრის სისქის ქანის მოხსნა სასარგებლო წიაღისეულის ფენისაგან, უდიდესი ხელოვნური წყალსატევების შექმნა, ნავთის ჰაბურღილების ტორპედირება — მძვინვარე ხანძრის ჩასაქრობად, არქტიკულ ყინულებში გემების ქარავნისათვის გზის გაკაფვა, სეისმური დაზვერვა და სხვა მრავალი.

ამჟამად ამფეთქებლები ისე დახელოვნდნენ, რომ შეუძლიათ აფეთქების ძალას მისცენ ნებისმიერი მიმართულება, ათეული და ასეული ათასობით კუბური მეტრი ქანი მყინველად გადაადგილონ საჭირო მანძილზე, წინასწარ ივარაუდონ მისი დამსხვრევის ხარისხი<sup>11</sup>.

ქარხნის მილი, მაგალითად, შეიძლება ისე აფეთქდეს, რომ იგი ისარივით სწორად გაწვეს ახლომდებარე შენობებს შორის და არ

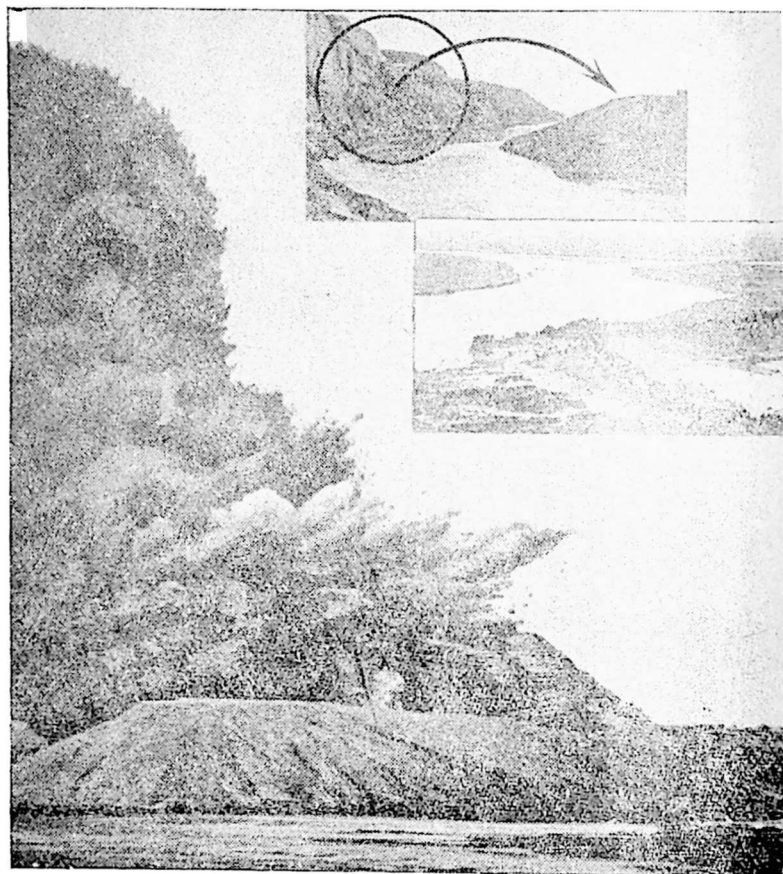
---

<sup>11</sup> როდესაც ეს წიგნი იწერებოდა, ყაზახეთიდან მოვიდა ცნობა უნიკალური აფეთქების წარმატებით ჩატარების შესახებ ალათაუს მთებში. 2500 ტ ტროტილისა და ამონიტის მძლავრმა აფეთქებამ ზუსტად გათვლილი მიმართულებით გადაისროლა ორნახევარი მილიონი მმ მთის ქანი-გრანიტი. წამზე ნაკლებ დროში ხეობა გადაიღობა 70 მ სიმაღლისა და 400 მ სიგანის კაშხალით, რომელმაც მომავალი ასი წლის მანძილზე ქ. ალმა-ათა უნდა დაიკვას ლეარკოფების საშიში შემოტევებისაგან.

მანამდე მსოფლიოში უდიდესად ითვლებოდა რიპლ-როკის რაიონში (კანადა) 1200 ტ ამონიტის აფეთქება.

დაზიანო. არაფერი, ან ბოთლივით გაიბეროს ქვედა ნაწილში და იქვე ჩაიშალოს.

აფეთქება დიდად ამცირებს სამუშაოს შრომატევადობას. ერთ ამფეთქებელს თანამემწეებით სამ დღეში შეუძლია ჩაატაროს ყვე-



აფეთქება თერგზე. 160 ტ ამონიტმა სამ საფეხურად (მცირე დაყოვნებებით) ააფეთქა და 70 ათასამდე მ<sup>3</sup> შთის ქანი გადაისროლა მეორე ნაპირზე. მდინარის კალაპოტი გადაღობილია. თერგს ახალი მიმართულება მიეცა

ლა სამუშაო, რაც 20 მ სიღრმისა და 100×30 მ<sup>2</sup> ფართობის მქონე ქვაბულის ასაფეთქებლად არის საკმარისი.

აფეთქების ახალი პროფესიეზი. ამფეთქი ნივთიერების სულ ცოტა რაოდენობაა საჭირო იმისათვის, რომ ნატეხებად ვაქციოთ ფოლადის ესა თუ ის ნაკეთობა. მაგრამ აფეთქებას თურმე მათი შეერთება-შედუღებაც შესძლება. და მერე როგორ! რამდენიმე მიკროწამში შეიძლება შედუღდეს არა მარტო ერთგვაროვანი, არამედ ნაირგვარი თვისების მქონე ლითონებიც.

ორი ლითონის ზედაპირის ერთმანეთთან შეხება ჩვეულებრივ პირობებში მათ შეერთებას არ იწვევს. ამას ხელს უშლის მათზე ჟანგის თხელი ფენისა და სხვა მინარევების არსებობა, აგრეთვე კონტაქტის წერტილების (ატომების მასშტაბით) სიმცირე. მაგრამ ცნობილია, რომ კონტაქტის წერტილების რაოდენობის გაზრდა შეიძლება წნევით, რაც აფეთქების დროს ვითარდება.



ლითონთა ფურცლების შედუღება აფეთქებით

შესაძლებელი ფურცლები მცირე დაშორებით და რამდენიმე გრადუსიანი კუთხით თავსდება ერთმანეთთან. ზედა მხარე იფარება ჯერ რეზინის ან პლასტმასის ამორტიზატორით, ხოლო შექდეგ — ამფეთქი ნივთიერების მუხტით და დეტონატორით. აფეთქებას შედეგად ფურცლები დიდი სიჩქარით ეხეთქებიან ერთმანეთს. ეს შეჯახება თუმცა მყისიერად ხდება, მაგრამ დროს ამ მცირე მონაკვეთშიც არის გარკვეული თანამიმდევარი საფეხურები. კონტაქტის წერტილების დიდი სიჩქარით (ასეული მეტრი წამში) გადაადგილების გამო ხდება ზედაპირზე აღსორბირებული ქუქყისა და ჟანგის ფენის გამოქრევა. ამავე დროს წარმოიშვება ტალღებიც, რაც 4—5-ჯერ კიდევ უფრო ზრდის კონტაქტის ფართს. მინარევებისა და ჟანგისაგან განთავისუფლებულ ზედაპირზე ატომთა შორის ძალები გამოვლინდება. შემდეგ საფეხურზე ზედაპირი მცირდება. ყოველივე ეს იდეალურ პირობებს ქმნის ფურცლების შეკავშირება-შედუღებისათვის. დიდი სისწრაფის გამო, ლითონების ურთიერთ-დიფუზიის პროცესი გამორიცხულია.

ამჟამად ბევრი მეტალურგიული ქარხანა გადასულია აფეთქებით შედუღების მეთოდზე.

კიდევ უფრო ეფექტური გამოდგა შედუღება ვაკუუმში. ამ დროს შესადუღებელ ფურცლებს შორის მინარევები თითქმის სულ არ რჩება. ეს გამორიცხავს აფეთქების შედეგად შეკუმშული გახურებული ჰაერის რეაგირების საშიშროებას ლითონის ზედაირულ შრესთან. აღარც ფურცლების მოძრაობას ხვდება აირდინამიკური წინააღმდეგობა და ისინი შეიძლება პარალელურად განვალაგოთ. დაშორება მათ შორის კი უნდა შევინარჩუნოთ, რათა ამფეთქი ნივთიერების მქონე ფურცელმა საჭირო სიჩქარე განავითაროს.

არის ცდები, რომ ლითონთან მოახდინონ კერამიკული არმატურის შედუღება.

შესაძლებელი გამოდგა შედუღებისა და ტვიფრვის შეთავსება, კერძოდ, ამობურცულობათა მქონე პლაკირებული მილების მიღების შემთხვევაში, როდესაც ძირითადი ნაკეთობის მეორე ლითონის თანაბარი თხელი ფენით დაფარვაა საჭირო. ამისათვის ორივე მასალის მილები იდგმება ერთმანეთში. გათვლილი მუხტის აფეთქება (შიგნიდან) ერთდროულად ტვიფრავს და შეადუღებს კიდევ ორივე ლითონის ფენას.

საინტერესოა, რომ თხელი ფურცლების ტვიფრვა ბოლო დროს დაიწყეს უბრალო შაშხანის გასროლით სითხეში, რომელშიც ტვიფრია მოთავსებული.

აფეთქების ენერგიას წარმატებით იყენებენ ლითონური და ლითონ-კერამიკული ფხვნილების დაწნევისას რთული ფორმის დეტალებად. ამ მხრივ გარკვეული ინტერესის მქონეა ნაკეთობების მიღება ზესალი ლითონებისა და შენადნობებისაგან.

ჭერჭერობით, მაგალითად, არ არსებობს მეთოდი, რომელიც საშუალებას მოგვცემდა დაგვემზადებინა მილი ისეთი სალი ლითონისაგან, როგორც ვოლფრამია. ამჟამად ამას უკვე აღწევენ ვოლფრამის ფხვნილის აფეთქებით საჭირო ფორმის სპეციალურ მოწყობილობაში. ამ მეთოდის გამოყენება ნავარაუდევია სხვა ნაკეთობათა დასამზადებლადაც ძლიერ სალი ლითონისაგან.

ფეთქადი ნივთიერების გამოყენება მექანიკური დამუშავების ისეთ ძველ სახეობაშიც აღმოჩნდა ეფექტური, როგორც მოქლონვაა, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც ძნელად მისადგომი ადგილების „ბრმად“ დამუშავებაა აუცილებელი.

ვინაიდან აფეთქება ლითონთა შედუღებისა და შეერთებისათვის გამოდგა, გასაკვირველი აღარ უნდა იყოს, რომ მან უფრო „პირდაპირი დანიშნულებით“ — ლითონთა ჭრისა და გახვრეტისათვის ჰპოვოს გამოყენება.

შესაძლებელია, კერძოდ, ლითონთა სქელი ფურცლების მყისეული გაჭრა. ამისათვის ამფეთქი ნივთიერების მუხტს ღარის ფო-

რმას აძლევენ; შიგნიდან ეს ღარი ლითონის ფენით იფარება. აფეთქების მთავარი დარტყმა რადიუსის მიმართულებით, ცენტრისაკენ ვითარდება. ღრმულში მყოფი ლითონის ფენა მყისიერად წვრილ თასმად იქცევა, რომელიც დიდი ძალითა და აჩქარებით (7 კმ/წმ) იჭრება დასამუშავებელი ლითონის მასაში და მყისიერად ჰრის მას. აფეთქებით ხერხდება ნაირგვარი ფორმის ნასვრეტების გახვრეტა ლითონის სქელკედლიან ნაკეთობაში, ფოლადის ლიანდაგებში და სხვ. ამისათვის სპეციალურ პუანსონებსაც იყენებენ, რომელნიც ამფეთქი ნივთიერების მუხტით (ანეთის როლს ჩვეულებრივად შაშხანის პილზი ასრულებს) იძენენ სპირო აჩქარებას.

აფეთქებით შეიძლება ლურსმნების, ღეროების, ომპოზოების ჩაჭედება მაგარ მასალაში — ბეტონის ფუნდამენტებსა და კედლებში, ბიმეტალური პროფილების, წნელებისა და სხვა ნაკეთობათა დიდი წნევის ქვეშ გამოწნევა, სხმულების შემოჭრა და მოჭრა, ლიანდაგების მოღუნვა და სხვ.

დიდი მნიშვნელობა აქვს იმ გარემოებას, რომ აფეთქებისათვის სპირო მოწყობილობა მარტივი და მცირე ზომისაა. ამასთანავე იგი პრაქტიკულად განუსაზღვრელი სიმძლავრის განვითარების საშუალებას იძლევა, ადვილად გადასატანია და ნებისმიერი ზომის ნაკეთობის დასამუშავებლად შეიძლება გამოვიყენოთ.

აფეთქება გამოირიცხავს დიდი და რთული დანადგარების გამოყენებას ისეთ შრომატევად პროცესებში, როგორცაა სხმულების შემოჭრა, ჩამოსხმული დეტალების გასუფთავება, დიდი ზომის ლითონის ნაშადის დაჭრა, ბრძმედიდან გამყარებული ლითონის გამოსაშვები ნასვრეტების გახსნა და სხვ.

ა ფ ე თ ქ ე ბ ი ს ფ ა ქ ი ზ ი პ რ ო ფ ე ს ი ე ბ ი. ლითონების მოქლონვისა და ჩამოსხმის პროცესები თავის დროზე შედუღებამ შეცვალა მაგრამ ზოგჯერ შედუღებული ნაკერიც არ გამოდის ხარისხიანი. ვითარდება მანვე შინაგანი დაძაბულობა, რაც ნაკეთობის დეფორმაციის მიზეზი ხდება. ნაკერის სისქის გაძლიერება ან თერმული დამუშავება — განსაკუთრებით ალუმინის შენადნობების შემთხვევაში — ტექნიკურ ღიძნელებთან არის დაკავშირებული და არასასურველია.

გამორკვა, რომ აფეთქების დამანგრეველი ძალა თურმე ლითონთა ფაქიზი ნაკეთობების განმტკიცებისათვისაც შეიძლება გამოვიყენოთ. ამისათვის აფეთქების ძალის ორად გაყოფა გახდა საჭირო — ზუსტად ერთნაირი ზომის სადეტონაციო ზონარი თავსდება ნაკერის ორივე მხარეს. აფეთქება — და შენადნული ნაკერი შემკვრივებულია ძირითადი ლითონის სიმტკიცემდე. შინაგანი დაძაბულობა ამ დროს თითქმის შეიძვერ მცირდება.

აფეთქება სხვა მხრივაც ეხმარება წარმოებას. საპასუხისმგებლო ნაკეთობის ბევრი დეტალი მიდის ხოლმე წუნში თვალთ უჩინარი მიკრობზარების წარმოქმნის გამო. შედუღება ან მეორედ ჩამოსხმა უმრავლეს შემთხვევაში საქმეს ვერ შველის, განსაკუთრებით როდესაც ძნელად მისაწვდომი და სამუშაოდ მოუხერხებელი ადგილების გამოკეთებაა აუცილებელი.

გამოირკვა, რომ ლოკალური აფეთქებით შესაძლებელი ხდება ამ მიკრობზარების მოსპობა, რაც გაცილებით ეფექტური და საიმედოა, ვიდრე სხვა რომელიმე ხერხი.

აფეთქება და მეცნიერების პროგრესი. აფეთქების ტალღები არაერთგვაროვნად ვრცელდება სხვადასხვა არეში და განსაკუთრებულად აირეკლება მათი გამყოფი ზედაპირიდან.

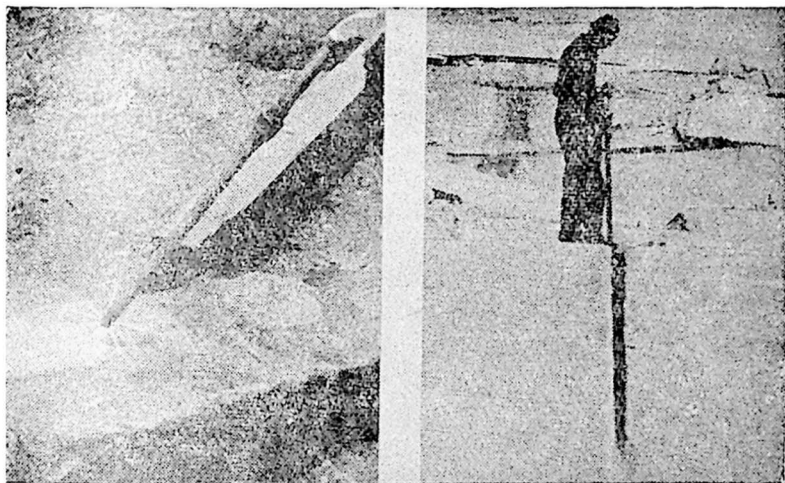
ამ მოვლენას ემყარება, კერძოდ, სეისმური დაზვერვის გავრცელებული მეთოდი, რომლის მეშვეობითაც ხერხდება მიწის წიაღში ღრმად მდებარე ქანების შესწავლა და სასარგებლო წიაღისეულის გამოვლინება.

ბოლო წლებში მეცნიერებმა დაადგინეს აგრეთვე ის საინტერესო და მოულოდნელი ცვლილებები, რასაც თურმე აფეთქება იწვევს ნივთიერების ატომის ელექტრონულ სტრუქტურაში. იმედოვნებენ, რომ შესაძლებელია აფეთქების პროცესის ისე წარმართვა, რომ ელექტრონები „ჩაიჭედონ“ ატომგულეებში. ეს კი ძვირფასი თვისებების მქონე ახალ ნივთიერებათა მიღების პერსპექტივებს ქმნის.

არ შეიძლება არ აღინიშნოს აგრეთვე ის დიდი იმედი, რასაც კერძოდ თერმოატომგულური ფიზიკა ამყარებს აფეთქებაზე. ამჟამად მიმდინარეობს ცდები სინხროფაზოტრონში ზემალაღი დაძაბულობის მაგნიტური ველების ამ ხერხით მისაღებად. იგულისხმება მაგნიტური ხაზების მოკიშვა აფეთქების მეშვეობით, რის შედეგადაც ხდება მაგნიტური ველის დაძაბულობისა და ენერჯიის ძლიერი მყისეული ზრდა. ეს იწვევს ასაჩქარებელი პროტონების ორბიტების შეკუმშვას. ნაწილაკებს შეეძინებათ უდიდესი, ათას მილიარდ ელექტრონვოლტამდე ენერჯია დენის ძალის ასევე დიდი მნიშვნელობის დროს.

ასეთი ახალი ტიპის ამაჩქარებელი, ე. წ. აფეთქების მაგნიტური გენერატორი გაცილებით უფრო მცირე ზომისა და ღირებულების უნდა იყოს (საქმე ენება მილიარდი მანეთების დაზოგვა), ვიდრე თვით სინხროფაზოტრონი. დადგენილია, რომ ამ დროს განვითარებული მაგნიტური ძალის წნევა (25 მლნ ატმ) ათჯერ აჭარბებს იმ კოლოსალურ წნევას, რაც ჩვენი პლანეტის გულში არსებობს.

პლაზმა სამთო საქმეში. პლაზმის ფართო შესაძლებლობანი არ შეიძლებოდა სამთო საქმეშიც არ გამოეყენებიათ. კვარცის შემცველი მაგარი ქანების — გრანიტების, ტეშენიტის, დიორიტისა და სხვ. დასამუშავებლად ჩვენთან უკვე იწერება ხარკოვის საავიაციო ინსტიტუტის მიერ შემუშავებული თერმული მნგრევი ხელსაწყო („ტ-3“). საწვავად მასში გამოყენებულია ბენზინი, დამუშავებლად — 7 ატმ-მდე შეკუმშული ჰაერი. ხელსაწყოდან გამოტყორცნილი ჰაერის ტემპერატურა 1800°-ის ფარგლებშია. იგი იწვევს ქვის ზედაპირული ფენის მყიფე რღვევას — ხდება ამ ფენის ატკეჩა.



მაგარი ქანების ზედაპირის დამუშავება გაეარვარებული აირის ჰაელით

მაგარი ქანების ბლოკებია მოჭრა თერმული მკრელით

სამთო ქანების ზედაპირის ამგვარი დამუშავება 7-ჯერ ზრდის ეფექტურობას და 2,2-ჯერ ამცირებს თვითღირებულებას.

იმავე ხელსაწყოს პრინციპზე შემუშავებულია თერმული მკრელი, რომლის მეოხებითაც მაგარი ქანებში შეიძლება 1,5 მ-მდე სიღრმის კრილი გაკეთდეს ან მოიჭრას ბლოკები უშუალოდ მასივიდან.

მაღალი ტემპერატურის მქონე პლაზმის გამოყენება (მაგალითად, აზოტ-წყალბადის ნარევის გატარება ელექტროგანმუხტვის რკალში) თითქოს უფრო ეფექტური უნდა იყოს, მაგრამ ასეთი მაღალი ტემპერატურა ქანის დნობას და აორთქლებას იწვევს, ეს კი ძვირი პროცესია.

ლ ა ზ ე რ ი. ოპტიკური ქვანტური გენერატორი ანუ ლაზერი<sup>12</sup> ტექნიკური აზრის დიდ მიღწევად ითვლება. ტექნიკის ისტორიამ არ იცის მეორე ისეთი აღმოჩენა, რომლის დამუშავება და პრაქტიკაში დანერგვა ისე სწრაფად განხორციელებულიყოს, როგორც ეს ლაზერის შემთხვევაში მოხდა.

ლაზერის იდეის საწყისებიც ა. ეინშტეინიდან მომდინარეობს. ატომი შეიძლება იყოს უმცირესი ენერგიით („ქვედა“, „ძირითადი“ მდგომარეობა) და ნამეტი ენერგიით („ზედა“, „აგზნებული“ მდგომარეობა). შესაბამისი სიხშირის სინათლეს შეუძლია ატომის როგორც „ზედა“, ისე „ქვედა“ მდგომარეობაში გადაყვანა.

მაგრამ ა. ეინშტეინმა გვიჩვენა, რომ არის მესამე პროცესიც. სინათლის სხივი აგზნებული ატომიდან იწვევს ისეთივე სინათლის გამოსხივებას და იმავე მიმართულებით, რაც მოქმედი სინათლის ნაკადია და აძლიერებს მას.

ლაზერის მოქმედების პრინციპი ემყარება ორ ბრტყელ პარალელურ სარკეებს შორის მოთავსებული აქტიური ნივთიერების ატომების აღგზნებას და შემდეგ მათ მყისიერად, შვავის მაგვარად განმუხტვას. აქტიურ ნივთიერებად უმრავლეს შემთხვევაში ლალის კრისტალია გამოყენებული, რომელიც ქრომის იონებით (1:1000) არის გამდიდრებული. იმპულსური ნათურის ჩართვისას ლალის ატომები აღიგზნებიან და განსაზღვრულ ენერგეტიკულ დონეზე გროვდებიან.

შეიძლება ისეთი პირობების შექმნა, როდესაც აგზნებული ატომები ნიაღვარივით, სწრაფად გადადიან უფრო დაბალ ენერგეტიკულ დონეზე. ეს იწვევს ენერგიის ასევე სწრაფ, მყისიერ გამონათვისუფლებას და გარკვეული სიხშირის გამოსხივებას. წამის მეათასედ დროში მთელი დაგროვილი ენერგია ვიწრო ინტენსიურ სხივად გადაიქცევა.

მაშასადამე, ლაზერის დამახასიათებელი თვისებაა დიდი ოდენობის თბური ენერგიის კონცენტრირება მცირე ფართზე. ეს ენერგია პრინციპში 1 მიკრონის (მილიმეტრის მეათასედის) სისქის სხივში შეიძლება იყოს თავმოყრილი. მიუხედავად ასეთი მცირე განზომილებისა, მას ზღაპრული სიმძლავრე აქვს —  $10^8$  ვტ/სმ<sup>2</sup>, ე. ი. 200 ათასჯერ მეტი, ვიდრე მზის სხივების ფოკუსირების დროს. მას შეუძლია მყის ააორთქლოს ძნელდნობადი ლითონის 1 მმ<sup>3</sup> მოცულობა, გახვრიტოს ნებისმიერი მასალის თხელი ფურცელი და სხვ. ოპტიკური სისტემის მეშვეობით, ლაზერის სხივი აღვილად

<sup>12</sup> დასახელება წარმოდგება ინგლისური წინადადების შემდგენელი სიტყვების პირველი ასოებიდან: „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ (სინათლის გაძლიერება სტიმულირებული გამოსხივებით).



შეიძლება გადაეხაროთ სასურველი მიმართულებით. ეს საშუალებას გვაძლევს ნაკეთობის ისეთ აღვილებსაც მივწვდეთ, რომელთა დამუშავება სხვა ხერხით გამორიცხულია.

გამოსხივების დიდი ოდენობა და იმპულსური ხასიათი, რაც ლაზერს სითბოს სხვა წყაროებისაგან ანსხვავებს, მყარ მასალებში არაჩვეულებრივ ეფექტებს იწვევს. ამან განაპირობა ის შესაძლებლობანი, რაც ლაზერის უნიკალურ თვისებებს ახალი ტექნიკის სხვადასხვა დარგში გამოუნახეს. საკმარისია დავასახელოთ თუნდაც შორეული კოსმოსური კავშირი და მთვარის ლოკაცია, დიდი და მცირე მანძილების ზუსტი გაზომვა, ლითონების დნობა, კრა და შედუღება, ქიმიური რეაქციების დაჩქარება და სხვა მრავალი. ასე გასინჯეთ, თვით საექიმო საქმეშიც კი წარმატებით ინერგება იგი.

განსაკუთრებით მნიშვნელოვნად უნდა ჩაითვალოს უარესად მცირე განზომილების მქონე ნაკეთობათა დამუშავება. შეიძლება ითქვას, რომ ამ მიმართულებით ლაზერმა ნამდვილი გადატრიალება მოახდინა ელექტრონიკაში და ზუსტ მექანიკაში: მიკრო და ზემინიატურული ნახევარგამტარი დეტალების დამზადება, კრა და შედუღება, ალმასის, კორუნდისა და ლალის კრისტალების გახვრეტა და სხვა მეტად სათუთი და ძნელი სამუშაოები ამჟამად ლაზერით სრულდება. მთავარი კი მაინც ის არის, რომ ნაკეთობის დამუშავების ხარისხი და სიზუსტე მეტად მაღალია. ეს თითქმის გამორიცხავს საწარმოო წუნს, მინიმუმამდე ამცირებს ძვირფასი მასალების ხარჯსა და რამდენჯერმე ზრდის მწარმოებლობას. მნიშვნელოვანია ისიც, რომ ენერგია მოკლე იმპულსებით ეწოდება, რის გამოც ლითონის სტრუქტურის შეცვლა არ ხდება.

ლაზერის შესაძლებლობაზე წარმოდგენას გვაძლევს თუნდაც ის ფაქტი, რომ თმის ლეროს სისქის მავთულში მას ადვილად შეუძლია ნახვრეტების გაკეთება (მუშაობა, ცხადია, მიკროსკოპის მოშველებით სრულდება). აღანიშნავია ისიც, რომ ლაზერით ისეთი მასალების გახვრეტაც შეიძლება, რომლებიც მექანიკურ დამუშავებას ვერ იტანენ.

ლაზერის სხივის მყარ ტანში შედწევადობის უნარი გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ელექტრონების კონისა. ეს თვისებაც დადებითი ეფექტით იქნა გამოყენებული—მიკრონული გამტარების შედუღება ძლიერ თხელ დანაფარებთან ხდება ისე, რომ მისი კერამიკული საფუძველი არ ზიანდება.

ამავე დროს ლაზერის სხივს სხვა უნიკალური თვისებაც აქვს — გამკვირვალე არეში მას შეუძლია ენერგიის დანაკარგის გარეშე გააღწიოს. მაშასადამე, ელექტრონული მილაკის დეტალების შედუღება შეიძლება მინის გარსაცმშიც.

ლაზერმა ყურადღება მიიქცია იმ მხრივაც, რომ მისთვის არ არსებობს შეუთავსებელი ლითონები. ოქრო, მაგალითად, ადვილად შედუღდება კაუბადთან და გერმანიუმთანაც კი, ალუმინი—ნიკელთან, ტანტალი — სპილენძთან, ტიტანი — მოლიბდენთან, და ბოლოს ყველა მათგანი — ერთ ნაკეთობად. არც ერთი სხვა მეთოდი არ გვაძლევს ამის საშუალებას.

აღსანიშნავია ერთი მნიშვნელოვანი გარემოებაც: შედუღება ისე სწრაფად ხდება, რომ შესაძლებელი ლითონის ზედაპირი ვერ ასწრებს დაჟანგვას, ამიტომ პროცესი ვაკუუმის კამერას ან რაიმე სპეციალური ატმოსფეროს შექმნას არ თხოულობს.

მაგრამ ლაზერი არა მარტო ლითონებისა და სხვა მყარი სხეულების შედუღებისათვის აღმოჩნდა ვარგისი. კიდევ უფრო საკვირველად უნდა ჩაითვალოს ლაზერის ვიწრო სხივის გამოყენება ცოცხალი ქსოვილების ურთიერთ დასაკავშირებლად. წარმატებით სრულდება, მაგალითად, თვალის ბადურის გარსთან მიკერების მეტად სათუთი და რთული ოპერაცია. იგი სავსებით უმტკივნეულოა და თუმცა რამდენიმე საფეხურად მიმდინარეობს, მაგრამ თვითეული მათგანის ჩატარებას სულ რაღაც წამის მეთათსედი დრო სჭირდება.

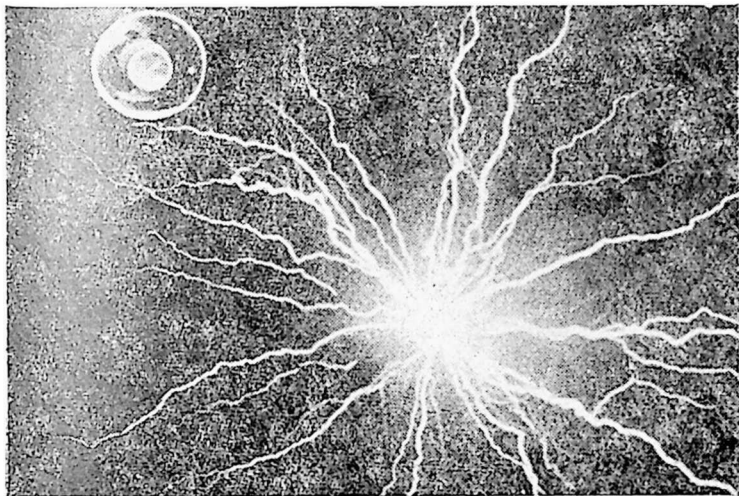
ლაზერით შეიძლება არა მარტო ცოცხალ უჯრედზე, არამედ მის ცალკე ელემენტებზედაც ვიმოქმედოთ ისე, რომ მეზობელი ჯანმრთელი უჯრედი არ დავაზიანოთ.

მოსალოდნელია, რომ ლაზერს მომავალში გამოყენების სხვა ახალი სფეროებიც გამოენახება. ამჟამად მუშაობა მისი იმპულსური სიმძლავრისა და გარდაქმნის კოეფიციენტის გაზრდის მიმართულებით მიმდინარეობს. არსებული ლაზერები მიცემული ელექტროენერგიის მხოლოდ 2% გარდაქმნიან გამომავალი სხივის სინათლის ენერჯიად. მაგრამ უკვე გამოცდილია ნახევარგამტარული დიოდური ლაზერები გალიუმის, ინდიუმისა და ზოგიერთი სხვა ელემენტის საფუძველზე, რომელთა მქკ 85% აღწევს. ასეთ ლაზერებს ელექტროენერჯია არა სინათლის გარეშე წყაროდან, არამედ უშუალოდ ელექტროდენის მეოხებით მიეწოდება.

პ ლ ა ზ მ ა — ს კ ა ლ ჯ ე ლ ი. პლაზმის ქაველით რომ ძნელდნობადი ლითონების ქრა და შედუღება შეიძლება, ეს გასაგებია. მაგრამ პლაზმას სხვა, სავსებით მოულოდნელი „პროფესიაც“ აღმოაჩნდა. მისი წვრილი, პირთხელი ენა უებარი საშუალება გამოდგა ცოცხალ ქსოვილზე ქირურგიული ოპერაციის ჩასატარებლად. მაგრამ ამ შემთხვევაში არა მარტო ქსოვილის გაჭრის სიადვილე იქცევა ყურადღებას. ცნობილია, რომ ქირურგიული ოპერაციის მიმდინარეობისას ექიმებს დროის 85% სისხლძარღვთა შეხ-

ვევასა და სისხლდენის შეჩერების ღონისძიებებზე ეხარჯებათ. პლაზმური სკალპელით მუშაობის შემთხვევაში კი სისხლძარღვთა უმრავლესობის დაცობა თავისთავად ხდება, ვინაიდან მაღალი ტემპერატურის მოქმედების შედეგად სისხლი ადვილად დედდება. ცხადია აგრეთვე, რომ მაღალი ტემპერატურის პირობები კრილობის სტერილიზაციის საჭიროებასაც გამოიწვევს.

ელვა წყალქვეშ. ფიზიკის კურსიდან ბევრს ალბათ ახსოვს, რომ წყლით სავსე კასრში შაშხანით გასროლა კასრის გასკდომას იწვევს. მიზეზიც ნათელია: ისეთ არაეუმშვად გარემოში, როგორც წყალია, პატარა ტყვიის მყისეული გავლა იმდენად დიდ წნევას ქმნის, რომ კასრის სამაგრი გვარგვები ვერ უძლებენ და სკდებიან.



ელექტროგანმუხტვა წყალქვეშ

დაახლოებით იმავე პრინციპს ემყარება მაღალი ჰინვის იმპულსური განმუხტვები წყალში. ვითარდება მძლავრი ჰიდრაულიური დარტყმები; შემდეგ ელექტროგანმუხტვის ადგილას წარმოიქმნება სიღრუე, რომელიც ასევე მყისეულად ივსება წყლით. ხდება მეორე, ე. წ. კავიტაციური დარტყმა, რომელიც უძლიერეს წნევას ანვითარებს — ათეულ ათას ატმოსფერომდე. მაგრამ გამოირკვა, რომ ეს წნევა მოქმედებს არა ჰურკლის კედლებზე, არამედ მხოლოდ სითხეში მყოფ ნაწილაკებზე.

ამ მოვლენაზე დაყრდნობით შემუშავებულია მარტივი ხელსაწყოები, რომელთა მეშვეობით შესაძლებელია სითხეში მოთავსებული ქანების დამსხვრევა-დაწვრილმანება მიკრონზე მცირე განზომილების მქონე ფხვნილად, მთის ქანების ბურღვა, ბეტონის დატეპნა და სხვ.

ელექტროჰიდრაულიკური ეფექტის გამოყენება, რომელიც ლენინგრადელი ინჟინრის ლ. იუტკინის მიერ არის მოწოდებული, ბევრ სამუშაო პროცესში აღმოჩნდა შესაძლებელი. ამას ხელს უწყობს ენერჯის მცირე ხარჯი — 1 კვტ ენერჯიას სითხეში მყისეულად ათეული და ასეული ათასი კვტ სიმძლავრის განვითარება შეუძლია.

აღუღებენ აგურებსაც. არალითონური მასალების — ბეტონის, ცეცხლგამძლე აგურის, მინისა და სხვ. ურთიერთ მყარი შეერთება ბევრგან არის საჭირო. განსაკუთრებით ძნელ პირობებში უხდება მუშაობა ცეცხლგამძლე ამონაგიან დანადგარებს — როგორ მჭიდროდაც არ უნდა იყოს ამონაგის ცალკეული ნაწილები ერთმანეთთან მორგებული, მათ შორის მაინც რჩება მცირე არე, რომელშიც ადვილად ატანს გამლვალ მასა ან აირი და აზიანებს კედელს. სპეციალური ცემენტის ან სხვა ხაზავის ხმარებაც ვერ შევლის საქმეს! არა და აგურებს ხომ ვერ შეადუღებენ, როგორც ლითონს? სცადეს ესეც, მაგრამ უშედეგოდ — აგურის მასალის არაერთგვაროვნების გამო, მის ყოველ ნაწილს განსხვავებული გაფართოების კოეფიციენტი აქვს და გადახურების შემთხვევაში ადვილად სკდება. აცეტილენის გამოყენებამ და ლითონის ელექტროდით შედუღებამაც არ გამოიღო შედეგი. თუმცა პლაზმა მაღალ ტემპერატურას იძლევა, მაგრამ სითბოს რაოდენობა ცოტაა — ხდება ადგილობრივი გადახურება.

ელექტროკალით შედუღებამ, მართალია, გაამართლა იმედი — ნაკერი მტკიცე გამოვიდა, მაგრამ მასში რჩება ელექტროდის მასალა — ლითონი. სცადეს აგრეთვე ნახშირის ელექტროდებით შედუღება, მაგრამ ნაკერი არ გამოვიდა ხარისხოვანი. ბოლოს გამოიჩინა, რომ საჭიროა შედუღების სიღრმეში წარმოება. ამისათვის ბითუმი ელექტროდის ნაცვლად აიღეს მილი, რომელშიც შეიბერება ჟანგბადისა და წყალბადის ნარევი ან სხვა საწვავი აირი; აირის დანიშნულებაა არა მარტო სადნობი მასის შებერვა, არამედ რკალის გაკიმვაც, ნაღნობი მასის უფრო ღრმად გადაადგილება. ასე განხორციელდა წარმოების მუშაკთა ოცნება — მოინახა ცეცხლგამძლე აგურების შედუღების მეთოდი.

შედუღების ამგვარი ხერხი არა მარტო აგურების, არამედ ცეცხლგამძლე ნაკეთობათა შესადუღებლადაც გავრცელდა.

## პლაზმა და მომავლის ენერგეტიკა

ენერგიის წყაროები დედამიწაზე. მთავარი წყარო ყოველგვარი ენერგიისა დედამიწაზე მილიარდი წლები მანძილზე იყო და იქნება მზე, ამიტომ ცხადია, რომ ენერგიის პრობლემაზე მსჯელობის დროს მთავარი ყურადღება ჩვენი მნათობის უფასო და უღირს ენერგიას ექცევა.

მართალია, მზის საერთო გამოსხივების მხოლოდ მცირედი, ორმილიარდედი ნაწილი თუ აღწევს ჩვენამდე, მაგრამ საბოლოო ჯამში ესეც საზღაპროდ დიდი ენერგიაა. თვითეულ კვადრატულ მეტრ ფართობზე დღედაღამეში 1—1,5 კვტ ენერგია მოდის, რაც მთელი დედამიწისათვის  $10^{14}$  კვტ შეადგენს. მარტო საქართველო მილიონნახევარი მანეთის ღირებულების ენერგიას მაინც იღებს ყოველდღიურად „ოქროს წვიმის“ სახით. მაგრამ ამ უსაზღვრო და იაფი ენერგიის წყაროს უშუალოდ სითბოს სახით გამოყენება ან ელექტროენერგიად გარდაქმნა დიდი მასშტაბით ტექნიკურად ჯერჯერობით გადაუწყვეტელ პრობლემად ითვლება. მართალია, ფოტოსინთეზის მეშვეობით მცენარეულობა იმდენ ენერგიას აგროვებს, რომ იგი ასეულჯერ აქარბებს მსოფლიოს ელექტროსადგურების ახლანდელ სიმძლავრეს, მაგრამ აქაც მზის სხივების 2%-ზე ნაკლებია გამოყენებული, რაც, შეიძლება ითქვას, წვეთია ზღვაში.

კაცობრიობას კარგახანია არ ასვენებს კითხვა — ნუთუ ასე უმიზნოდ უნდა იკარგებოდეს ესოდენ სახარბიელო წყარო ენერგიისა? ეს გარემოება მით უფრო დასაანანია, რომ მზე თურმე არა მარტო დედამიწის ზედაპირამდე მოღწევადი სხივების სახით გვთავაზობს თავის ენერგიას. ამ ცოტახნის წინათ გამოიჩინა, რომ მზის ენერგია გროვდება ტროპოსფეროშიც, 150—250 კმ სიმაღლეზე, სადაც ჟანგბადის მოლეკულების დაშლა ხდება ატომებად. ამ ატომების უკუშეერთებას 118 კვალ ენერგიის გამონთავისუფლება შეუძლია ჟანგბადის ყოველ მოლზე; ეს კი სულ ცოტა 50 კმ სისქის ჰაერის ფენისთვის  $10^{14}$  კვალ მოგვეცემდა, რაც მილიონობით ტონა

ნახშირის დაწვით მიღებული სითბოს ტოლფასია. თუმცა ამგვარად წარმოქმნილი ატომების საერთო რაოდენობა დიდია, მაგრამ მათი კონცენტრაციის სიმცირის გამო ერთეულ მოცულობაში ენერგიის ამ სახის გამოყენებას ჯერჯერობით რეალური საფუძველი არა აქვს. იგივე ითქმის ენერგიის ისეთი იაფი და უშრეტო წყაროების შესახებაც, როგორცაა დედამიწის შიგა ფენების სითბო, ქარისა და ზღვის ტალღების ენერგია. მათი გამოყენება თითქოს ხელმისაწვდომი უნდა იყოს, მაგრამ პრაქტიკული სიძნელეები ყოველი მათგანის შემთხვევაში ჯერჯერობით ისევ გადაუღაბავ ზღუდვად გვევლინება.

საკმარისად დიდია, მაგალითად, ქარის ენერგიაც — 110 მლრდ კვტ-მდე, მაგრამ დედამიწის ფართობის ერთეულზე არც ეს არის ბევრი და ამიტომ მასზე დაყრდნობა, მით უმეტეს ქარის არათანაბრობის მიზეზით, დიდი მასშტაბით უპერსპექტივო ჩანს.

დაუშვებლად მცირედაა გამოყენებული მდინარეთა ენერგიაც — მილიარდი კვტ-დან მხოლოდ 40 მლნ კვტ (სსრკ — 400 მლნ კვტ-დან 20 მლნ კვტ).

ათჯერ ნაკლები, მაგრამ მაინც საგრძნობი ენერგიაა ნავარაუდები ზღვებისა და ოკეანეების მიმოქცევაში. რამდენჯერმე იყო კიდევ განზრახული სათანადო ელექტროსადგურების მშენებლობა, მაგრამ ტექნიკური სიძნელეების გამო შეწყდა. ამჟამად ეს სიძნელეები რამდენადმე დაძლეულია და ორი ქვეყანა — სსრკ და საფრანგეთი წარმატებით ახორციელებენ ასეთი სადგურების მშენებლობას.

შეიძლებოდა გვეფიქრა იმ მოვლენის გამოყენებაც, რომ ოკეანის ღრმა ფენების ტემპერატურა 10—20°-ით ნაკლებია, ვიდრე ზედაპირისა. მაგრამ გამოირკვა, რომ ამ ეფექტის გამოყენების მქკ 1—2% არ აღემატება.

რაც შეეხება წიაღისეულ საწვავს, მისი მარაგი ულვევი არ არის, ხოლო დანახარჯი დაუბრუნებელ დანაკარგად გვევლინება. ამიტომ კაცობრიობა ყოველთვის ერთგვარ საფრთხეში გრძნობდა თავს მისი გამოლევის შიშით.

რამდენ ხანს ეყოფა წიაღისეული საწვავი კაცობრიობას? ქვანახშირის მარაგის ახლო მომავალში ამოწურვის საკითხი პირველად ჟიულ ვერნმა დააყენა თავის ცნობილ რომანში. მაგრამ დიადი ფანტასტის შიში ამ შემთხვევაში არ გამართლდა. საქმე იმაშია, რომ, ჯერ ერთი, ქვანახშირის მარაგი მიწის წიაღში რამდენჯერმე მეტი აღმოჩნდა, ვიდრე ჟიულ ვერნის დროს ეგონათ და, მეორეს მხრივ, გამოინახა მისი შემცველი სხვა ბუნებრივი საწვავი — ნავთობი და აირი.

ნახშირის მსოფლიო მარაგი, მეცნიერთა აზრით, 50—60 ტრი-

ლიონ ტონას აღწევს, რაც არა ერთი ათასი წელი უნდა ეყოს კაცობრიობას. მისმა ხარჯმა საგრძნობლადაც რომ იმატოს.

საინტერესოა, რომ რუსეთში ეს მარაგი 1923 წ. 231 მილიარდი ტონით იყო განსაზღვრული, 1936 წლიათვის ეს რიცხვი შეიღწერ, ხოლო ოცი წლის შემდეგ თითქმის ორმოცჯერ გადიდა და 8670 მილიარდ ტონას მიაღწია; ეკვი არ არის, რომ სინამდვილეში ზისი რაოდენობა გაცილებით მეტია — მეცნიერები 15 ტრილიონ ტონასაც კი ასახელებენ! მოხმარების ახლანდელი ტემპების შემთხვევაში იგი ალბათ 25 ათას წელზე მეტ ხანს გვეყოფა, მაგრამ წლითიწლობით ძნელდება მისი ამოღება.

მიწის, ზღვებისა და მცირე სიღრმის ოკეანეთა ქვეშ 210 მლრდ ტონამდე ნავთობია ნაგულისხმები. საბჭოთა მეცნიერების აზრით კი ნავთობის მარაგი 775 მლრდ ტონასაც აჭარბებს, რაც 1400 წლით უზრუნველყოფს ჩვენს მზარდ მოთხოვნილებას. მსოფლიო მარაგი 2,5 ტრილიონ ტონაზე მეტია.

განგაშს იწვევს ბუნებრივი აირის მოპოვების ტემპების ზრდა. მართალია. მიწის წიაღში ნაეარაუღვევი 160 ტრილიონი მ<sup>3</sup> აირი, 1962 წლის მოპოვების მიხედვით. 270 წელს მაინც უნდა გვეყოს. მაგრამ ეს რიცხვი შემცირებულად ითვლება. აირი არის კარის, ნარენცისა და სხვა ზღვების ქვეშაც და მიწის წიაღში არა მარტო შეიღ, არამედ 10—12 კმ-მდეც. აირი გახსნილია მიწისქვეშა წყლებსა და ქვანახშირში. მარტო საბჭოთა კავშირზე 1400 ტრლ მ<sup>3</sup> აირის მარაგი მოდის.

მაშასადამე, წიაღისეული საწვავის მარაგი კაცობრიობას არა მარტო გასათბობად, არამედ როგორც ქიმიური ნედლეული — სხვადასხვა საქირო პროდუქტების მისაღებად — ასეული და შეიძლება რამდენიმე ათასი წელიც ეყოს.

მაგრამ როდესაც კაცობრიობის ენერგიით უზრუნველყოფაზეა ლაპარაკი. იგულისხმება იაფი და ხელმისაწვდომი ენერჯის წყაროს გამოძებნის შესაძლებლობა. საწვავის მოპოვება კი დღითი-დღე ძნელდება, რაც გეომეტრიულად ზრდის ხარჯებს. ესეც რომ არ იყოს, რა არის თუნდაც რამდენიმე ათასი წელი კაცობრიობის ისტორიისათვის?

მართალია, აღამიანმა გაბედული ნაბიჯი გადადგა წინ ატომ-გულური ენერჯის დამორჩილების საქმეში. ხოლო შესაფერისი ნედლეულის — ურანისა და თორიუმის — მარაგი, ბუნებაში მათი მცირედ გავრცელების მიუხედავად, ენერგეტიკულ გამოსახულებაში აღემატება კიდევ ნახშირისას, მაგრამ ესეც არ წყვეტს პრინციპულ ამოცანას კაცობრიობის განთავისუფლების შესახებ ენერგეტიკუ-

ლი შიმშილის საშიშროებისაგან მომავალში, მით უმეტეს, რომ ატომგულური ნედლეული მეტად არათანაბრადაა განაწილებული, დედამიწაზე. ამასთანავე ურან-235-ის რადიოაქტიურ დაშლას თანსდევს შხამოვანი ნარჩენების დაგროვება, რომელთა სრული უვნებლყოფა არც ისე ადვილია.

შეიძლება თუ არა მზის „ჩამოყვანა“ დედამიწაზე? მაშ რით უნდა დააკმაყოფილოს მომავალში კაცობრიობამ თავისი მზარდი მოთხოვნილება ენერჯის წყაროებზე? ხომ არ არის იგი წინასწარ განწირული ამ მხრივ? ასე დაისვა საკითხი მზის „ჩამოყვანისა“ დედამიწაზე, იმ პროცესების ჩვენთვის ხელსაყრელი მასშტაბით განხორციელების შესახებ, რაც ბუნებრივ პირობებში მზესა და სხვა ვარსკვლავებზე მჭვინვარებს ზემალაღი ტემპერატურებისა და წნევების შემწეობით.

ამ პროცესების ბუნებას ფიზიკოსებმა უფრო ადრე მიაკვლიეს, ვიდრე ატომგულური ენერჯის დაუფლება მოხერხდებოდა, მაგრამ მათი განხორციელება გაცილებით თავსამტკრვეი გამოდგა, ვიდრე მძიმე ატომგულების დაშლის ჯაჭვური რეაქცია.

თავის დაუღალავ ძიებაში ადამიანმა თითქოს მიაგნო ენერჯის დაუშრეტელ წყაროს. ასეთი აღმოჩნდა წყალი, ის უბრალო წყალი, რომელიც ასე ულევია დედამიწის ზედაპირზე და სიცოცხლის პირველ პირობად ითვლება.

მაგრამ რა შუაშია აქ წყალი? — იკითხავეთ თქვენ. წყალი, როგორც ვიცით, ორი მარტივი ელემენტის — ჟანგბადისა და წყალბადის ქიმიური ნაერთია. ორივე განსაკუთრებული თერმოქიმიური თვისებებით ხასიათდება, კერძოდ იმ სიტბოთი, რომელსაც პირველი სხვა ელემენტებთან შეერთებისას, ხოლო მეორე — თავისი დაჟანგვის დროს გამოყოფს. პირველი რეაქცია (დაჟანგვისა) არის ენერჯის მიღების საუკეთესო ქიმიური წყარო, ხოლო მეორე (აღდგენის) რეაქცია — ენერჯის ქიმიურად შებოჭვის საუკეთესო საშუალება.

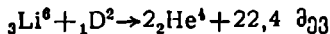
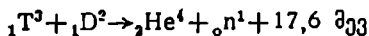
მაგრამ როდესაც თერმოატომგულურ რეაქციებსა და ენერჯით კაცობრიობის უზრუნველყოფაზე ვლაპარაკობთ, მხედველობაში გვაქვს წყალბადის სხვა თვისებები. ფიზიკოსებმა დაამტკიცეს, რომ წყალბადის ატომგულების შერწყმის შედეგად შეიძლება მოველოდეთ თერმოატომგულური რეაქციის განხორციელებას, ვინაიდან მძიმე ატომგულების სინთეზი, როგორც გათვლებმა აჩვენეს, ისეთ უსაზღვრო მაღალ ტემპერატურას მოითხოვს, რომელიც ბუნებაში ალბათ არც არსებობს.

მართალია, რეაქცია უფრო მიზანშეწონილია განხორციელდეს არა უბრალო წყალბადით, არამედ მისი მძიმე იზოტოპით — დეი-



თერიუმით<sup>13</sup>, რომელიც წყალში შედარებით მცირე რაოდენობითაა, მაგრამ სამაგიეროდ ბუნებაში წყლის ფართოდ გავრცელების გამო დეითერიუმის საერთო რაოდენობაც დიდია. ამასთანავე თუ გავითვალისწინებთ, რომ დეითერიუმის ყოველი კილოგრამი 1 000 ტონა ქვანახშირის ტოლფასია, ადვილი მისახვედრია, რომ „საწვავის“ ამ სახეობაში მოცემული ენერჯის მარაგს შეუძლია საიმედოდ უზრუნველყოს კაცობრიობა მომავალში.

მაქსიმალური თბური ეფექტი აქვს რეაქციებს, რომელთა საბოლოო პროდუქტია ჰელიუმის ატომის ბირთვები, ვინაიდან მათი კავშირის ენერჯია უდიდესია სხვა მსუბუქი ელემენტების ბირთვებთან შედარებით. ასეთი რეაქციების მაგალითებია:



მაგრამ რამდენადაც გრანდიოზული და წარმტაცია პერსპექტივები, იმდენად დიდია თერმოატომგულური პროცესის ჩვენი ნებით მართვის სიძნელე. საკმარისია აღვნიშნოთ თუნდაც ის, რომ ასეთი რეაქციის დაწყებისა და მიმდინარეობისათვის საჭიროა ზემადალი ტემპერატურა არანაკლებ რამდენიმე ასეული მილიონი გრადუსისა. შედარებისათვის შეიძლება გავიხსენოთ, რომ ხიროსიმაზე ჩამოგდებული ატომური ქურჯის აფეთქებისას ცეცხლოვანი ბირთვის შუაგულში ტემპერატურა „სულ რაღაც“ 60 მილიონ გრადუსს არ აღემატებოდა.

რისთვის არის საჭირო ასეთი დიდი ტემპერატურა?

თერმოატომგულური სინთეზის განსახორციელებლად აუცილებელია ატომთა გულების ურთიერთშეჯახება; მაგრამ ისინი დადებითად არიან დამუხტულნი და ერთმანეთს განიზიდავენ. ტემპერატურის აწევის შედეგად კი ამ ნაწილაკების სიჩქარე იმდენად იზრდება, რომ ელექტრონები შეიძლება მოწყდნენ კიდევაც თავიანთ ორბიტებს. წარმოიქმნება ნივთიერების განსაკუთრებული მეოთხე მდგომარეობა — იონიზებული ელექტრონებისა და ატომგულისაგან შემდგარი აირი, რომელსაც ჩვენ ზევით პლაზმა ვუწოდეთ. მაღალტემპერატურიანი პლაზმა არის თავისუფალი ატომგულებისა

<sup>13</sup> ბუნებაში წყალბადის სამი სახესხვაობა (იზოტოპი) გვაქვს: საკუთრივ წყალბადი — ერთი პროტონით ატომგულში, „მძიმე“ წყალბადი, დეითერიუმი, რომლის ატომგულში პროტონთან ერთად ნეიტრონიცა და ამიტომ თითქმის ორჯერ მძიმეა წყალბადზე; „ზემძიმე“ წყალბადი—ტრიტიუმი პროტონითა და ორი ნეიტრონით ატომგულში.

პრესაში გამოქვეყნდა ცნობა, რომ თითქოს მიგნებულა წყალბადის მეოთხე იზოტოპიც.

და ელექტრონების ნარევი. თუ ტემპერატურა ათეულ და ასეულ მილიონ გრადუსს აღემატება, როგორც ეს ჩვენი მზისა და სხვა ვარსკვლავების შიდა არეებში გვაქვს, მსუბუქი ატომგულები ძრაობის ისეთ მაღალ სიჩქარეს იძენენ, რომ შესაძლებელია მათი ურთიერთგანზიდვის ძალების გადალახვა და ისეთი შეჯახება, რომელიც მათს შერწყმას (სინთეზს) გამოიწვევს. ამ დროს მასის ნაწილი ენერგიად იქცევა.

გათვლები გვიჩვენებს, რომ 30 გ ჰელიუმის წარმოქმნას, მაგალითად, წყალბადის მეშვეობით იმდენივე ენერგიის მოცემა შეუძლია, რამდენსაც „დნეპრპესი“ გამოიმუშავებს მთელი წლის განმავლობაში.

თერმოატომგულური ენერგიის მოთოკვა სამარადისოდ გადაჭრიდა ენერგიის პრობლემას კაცობრიობისათვის. მომავალი ელექტროსადგურების ძირითადი საწვავი იქნებოდა წყალბადის მძიმე იზოტოპი — დეიტერიუმი, რომლის შეცულობა ზღვებსა და ოკეანეებში, როგორც ზევითაც აღვნიშნეთ, თუმცა მცირეა (ჩვეულებრივი წყალბადის 5000 ატომზე დეიტერიუმის მხოლოდ ერთი ატომი მოდის), მაგრამ წყლის მთელი მასა იმდენად დიდია<sup>14</sup>, რომ, მცირე პროცენტის მიუხედავად, დეიტერიუმის საერთო რაოდენობა 25 მლრდ ტონას აღწევს. წარმოსადგენადაც კი ძნელია, რა უსაზღვრო ენერგიის მოცემა შეუძლია მას კაცობრიობისათვის. საკმარისია ვთქვათ, რომ კაცობრიობამ ენერგიის მოხმარების ტემპები ახლანდელთან შედარებით თუნდაც ასჯერ რომ გაზარდოს, ამ საწვავის მარაგი მილიარდი წლების მანძილზე მაინც უზრუნველყოფს მას!

დიდი მნიშვნელობა აქვს იმ ფაქტსაც, რომ თერმოატომგულურ რეაქტორებში არავითარი მავნე ნარჩენები არ გამოიყოფა. ხოლო 1 კგ დეიტერიუმის, როგორც საწვავის, ღირებულება უკვე ამჟამად მისი ექვივალენტური რაოდენობის (1000 ტ) ქვანახშირის ფასის 1%-საც კი არ შეადგენს!

ზემოხსენებულის საფუძველზე გასაგებია, თუ რატომ დაეთმო ასეთი მომეტებული ყურადღება კაცობრიობის მომავლის ამ უმნიშვნელოვანეს პრობლემას.

მაგრამ მთავარი ღირთულე, რომელიც ადამიანს ამ ზღაპრული ძალის მოთოკვის საქმეში ელობება, არის არა ზემოაღნიშნული ტემპერატურის შექმნის, არამედ მისი შენარჩუნების სიძნელე. მართლაც და რაში უნდა შეიძლებოდეს მილიონ გრადუსამდე გავარკვარებული

<sup>14</sup> წყალი დედამიწის ზედაპირის 71 % ფარავს. თუ წარმოვიდგინოთ, რომ წყლის მთელი მასა თანაბრად არის განაწილებული ზედაპირზე, წარმოქმნილი უქიდეგანო ოკეანის სიღრმე თითქმის სამი კილომეტრი იქნება.

პლაზმის დაყოვნება დიდი ხნით? ასეთი ტემპერატურა ხომ მყისვე აირად აქცევს ყოველგვარ ნივთიერებას?

სულ სხვა პირობებია შექმნილი მზეზე, სადაც გარემო არესთან შედარებით მცირე თბოგაცვლის სიჩქარისა და ძლიერი შემკავებელი გრავიტაციული ძალების მეოხებით გამუდმებით გვაქვს ზემალალი ტემპერატურა და წნევა. ამიტომ იქ მსუბუქი ელემენტების შერწყმის თერმოკატომგულური რეაქციები თვითნებურად და განუწყვეტლივ მიმდინარეობენ.

ხელოვნურად კი, როგორც ვიცით, მხოლოდ უმართავი მყისეული თბური რეაქციის ჩატარება ხერხდება წყალბადისა და ლითიუმის იზოტოპების მონაწილეობით („წყალბადის ბომბი“); პროცესი წამის მემილიონედზე უფრო სწრაფად მიმდინარეობს.

ულტრამალალი ტემპერატურების მქონე პლაზმისათვის შესაფერისი „სათავსო“ გამოძებნის პრობლემა აღმოჩნდა უძნელესი, რომელთანაც კი მეცნიერებს ოდესმე ჰქონიათ საქმე. ამიტომ ბევრი მას სექტიკურადაც კი უყურებს ბოლო ხანებში. ასეთი „სათავსო“ შექმნა განზრახული იყო თვით პლაზმის მიერ ან გარედან შექმნილი მაგნიტური ველის საშუალებით. ეს უკანასკნელი თავისი ძალით ძლიერ მარწუხებში აქცევს და კუმშავს წარმოქმნილ პლაზმას და ნებას არ აძლევს შეეხოს დანადგარის კედლებს. მაგრამ პლაზმის შენარჩუნება მაინც ვერ ხერხდება მისი, ასე ვთქვათ, უაღრესად „მოუსვენარი“ ხასიათის გამო. მოუთოკავი არამდგრადი პროცესების განვითარების გამო, დიდ მიღწევად ითვლება, თუ დანადგარში მოხერხდა პლაზმის „თასმის“ თუნდაც სეკუნდის მეთასედის განმავლობაში შენარჩუნება ისე, რომ იგი არ გაცივდეს და არ ჩაქრეს.

მაგრამ იქნებ უსაფუძვლოა ოცნება ესოდენ იაფი და უსაზღვრო ენერგიის გამონახვის შესახებ? იქნებ ზედმეტს მოვითხოვთ ჩვენი ისედაც კეთილმოყოფელი წყლისაგან და არ ვკმაყოფილდებით იმით, რომ მან შექმნა სიცოცხლე დედამიწაზე, განაპირობა მალაორგანიზებულ არსებთა განვითარება და ისედაც მრავალ სიკეთეს გვანიჭებს? ამას მომავალი გვიჩვენებს.

ამოცანის სიძნელე უთუოდ შეესაბამება იმ დიად მიზანს, რომელიც თერმოკატომგულური სინთეზის რეაქციის ჩაყენებას გულისხმობს ადამიანის მშვიდობიანი შრომის სამსახურში.

ბოლო დროს ფიზიკოსებში სულ უფრო და უფრო იკიდებს ფეხს ჰიპოთეზა მატერიის ენერგიად გარდაქმნის ახალი გზის შესახებ. საქმე ეხება განსაკუთრებული ფუნდამენტალური ნაწილაკების — ე. წ. კვარკების არსებობას. კვარკი იგულისხმება, როგორც

ძირითადი ელემენტალური ნაწილაკების — პროტონების, ნეიტრონების, ანტინაწილაკების, მეზონების წარმოქმნის საფუძველი.

დიდი მასის გამო კვარკის გარდაქმნა ენერგიის უზომო რაოდენობით გამოყოფას უნდა იწვევდეს. პროტონის წარმოქმნის დროს, მაგალითად, კვარკის მასის 97% გამოსხივებად იქცევა. მაშასადამე, მასის დეფექტი ამ შემთხვევაში 140-ჯერ მეტია, ვიდრე ატომგულური რეაქციის დროს.

აღნიშნული გარემოებით ცდილობენ ახსნან ის მძლავრი ენერგეტიკული პროცესები, რაც ზევარსკვლავებსა და გალაქტიკის გულში შეიმჩნევა.

როგორც უკვე გვქონდა აღნიშნული, თერმოატომგულური რეაქციის შეწყვეტის შემდეგ ვარსკვლავი იწყებს შეკუმშვას. ამ პროცესის პირველ საფეხურზე ელექტრონები ჩაიჭედებიან პროტონებში. ატომგული იშლება. ვიღებთ ე. წ. ნეიტრონულ ვარსკვლავს. მაგრამ შეკუმშვის პროცესი ამით არ მთავრდება. შემდგომ საფეხურებზე უფრო და უფრო მკვრივი ფუნდამენტალური ნაწილაკები — ჰიპერონები, ბარიონები, კვარკები წარმოიქმნება.

ბარიონების კვარკებად გარდაქმნას კინეტიკური ენერგიის დიდი რაოდენობით შთანთქმა ახლავს თან. ვარსკვლავი კიდევ უფრო იკუმშება და მკვრივდება. მაგრამ ამავე დროს ზოგიერთ სივრცეში ბარიონების სიმკვრივე შეიძლება მცირე აღმოჩნდეს. ვითარდება უკუპროცესი — კვარკების ბარიონებად გარდაქმნა. ამას კი ენერგიის ისეთი დიდი რაოდენობით გამოყოფა მოსდევს, რომ ვარსკვლავი შეიძლება აფეთქდეს.

ნამდვილად რომ ამოუწურავია მატერია და მისი შესაძლებლობანი.

მაგნიტურჰიდროდინამიკური გენერატორი დაბალტემპერატურიანი პლაზმის, განსაკუთრებით კი 2—3 ათასი გრადუსის მქონე აირის გამოყენება ელექტროენერგიის მიღების თვალსაზრისით ყველაზე უფრო სავარაუდოა მაგნიტურჰიდროდინამიკურ გენერატორში.

უარყოფითი ელექტრონების ნაკადი, რომელიც პლაზმაში წარმოიქმნება, მეტად სახარბიელო პერსპექტივებს სახავს მათი ერთი მიმართულებით წარმართვისათვის, ე. ი. ელექტროდენის უშუალოდ მიღებისათვის. მაგნიტურჰიდროდინამიკური გენერატორის მუშაობის პრინციპი იმაში მდგომარეობს, რომ ჩვეულებრივი გენერატორის ხვია შეიცვალოს დამუხტული ნაწილაკების ნაკადით, რომლებიც მაგნიტურ ველში გადიან. ამ ნაწილაკების განმუხტვა ელექტროდებზე ხდება, რომლებიც ისეთივე როლს ასრულებენ, როგორც გენერატორში — ჯაგრისები.

გამოთვლები გვიჩვენებს, რომ მაგნიტურჰიდროდინამიკურ გენერატორში მარგი ქმედების კოეფიციენტი ორჯერ მეტი შეიძლება იყოს, ვიდრე თბოელექტროსადგურის გენერატორებს აქვთ ამაჟამად.

მაგრამ როგორ მოვახერხოთ ეს? პლაზმას, ე. ი. გავარჯარებულ აირს ატარებენ ორ ელექტრომაგნიტს შორის. სხვადასხვა მუხტის მქონე იონები შესაბამისი ელექტროდებისაკენ მიემართებიან. წარმოიქმნება ელექტროდენი. მაშასადამე, აღარ არის საჭირო, რომ მაგნიტურ ველში ღუზა (ლითონის ჩარჩო) ტრიალებდეს, როგორც ეს ჩვეულებრივ ელექტროგენერატორში ხდება. გამორიცხულია მოძრავი და მოხახუნე ნაწილების, მექანიკური გარდამქმნელების არსებობით გამოწვეული უხერხულობანი.

ფიქრობენ, რომ უახლოეს ათწლეულში პლაზმის ქავლი შეცვლის ორთქლისა და აირის მძიმე და რთულ დანადგარებს.

პ ლ ა ზ მ ი ს ს ა ნ ა თ ი. ვინაიდან პლაზმა გავარჯარებული ნივთიერების ნაკადს წარმოადგენს, ამიტომ ძლიერადაც ანათებს<sup>15</sup>. მისი ალისათვის თვალის გასწორება შექვევარტლული მინის მეოხებითაც კი შეუძლებელია. ამისათვის მხოლოდ სპეციალური, ძლიერ ბნელი მინა თუ გამოდგება.

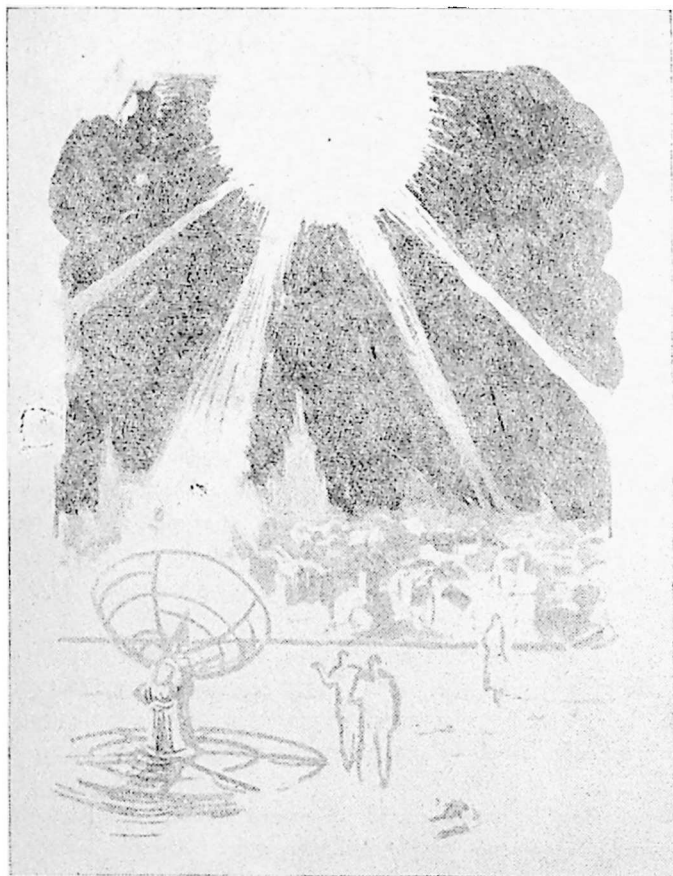
პლაზმური სანთურის სიკაშკაშე რამდენჯერმე აღემატება რომელიმე აქამდე ცნობილი სინათლის წყაროს სიკაშკაშეს. აღნიშნულის საფუძველზე გამოცდილი იყო 11000°-იანი სანთურები (მზის ზედაპირის ტემპერატურა ხომ ორჯერ ნაკლებია). მიღებული შედეგების საფუძველზე გამომგონებლები ვარაუდობენ, რომ აეროსტატზე დაკიდებულ ასეთ ათიოდე სანთურას დიდი ქალაქის განათებაც შეეძლება. შესაფერისი პლაზმური გენერატორის მქკ 90%-ს აღწევს.

პლაზმის ნივთიერებად იყენებენ არგონს, რომელიც ჯერ ფოროვან ანოდში გაედინება; ამის შემდეგ, გაივლის რა ანოდსა და კათოდს შორის ანთებულ ელექტრორკალს, გავარჯარებული აირი ნახევარმეტრიანი ალის სახით გამოდის გარეთ, რა დროსაც ძლიერად ანათებს.

მიმდინარეობს ცდები, რომ მაღალი სიხშირის სადგურების მიერ გამოიმუშავებული ელექტრომაგნიტური სხივები პარაბოლოიდური სარკეების მეშვეობით მიმართონ 20—30 კმ სიმაღლეზე. მა-

<sup>15</sup> გავარჯარებული ნივთიერების გამოსხივება გაპირობებულია იმ გარემოებით, რომ ავზნებული, უფრო მაღალი ენერგიის მქონე ატომის შეჯახება ნაკლები ენერგიის მქონე ატომთან ელექტრონის დაბალ ორბიტაზე ჩამოსვლას იწვევს, რა დროსაც გამოასხივებს სინათლის ქვანტს.

თი გადაკვეთის ადგილზე უნდა მოხდეს ჰაერის მოლეკულების გავარვარება იმ ზომამდე, რომ მის გამოსხივებას შეეძლოს დიდი ქალაქის განათება. მეთოდის დადებით მხარედ უნდა ჩაითვალოს ისიც, რომ ალში წარმოიქმნება აზოტის უანგეულები, რომლებიც წვიმისა და ქარის მეშვეობით აზოტოვანი სასუქის სახით ჩამოვადედამიწაზე და გაანოყიერებს მას.



„ღამის მზე“

მიუხედავად ტექნიკური შესაძლებლობისა, ამ მიმართულებით არსებული პროექტების პრაქტიკული განხორციელება არც ისე ახლო მომავლის საქმეა.

ზემოსენებულთან დაკავშირებით, საჭიროდ მიგვაჩნია ერთ გარემოებას გავუსვათ ხაზი.

ჩვენ მიჩვეული ვართ, რომ გავარეარებული სხეულები ძლიერ კაშკაშებენ და ბევრ სითბოს ასხივებენ. მაგრამ ყოველთვის ეს ასე არ არის. გახურებული წყალბადი რომ ისეთივე ინტენსივობით ასხივებდეს სითბოს, როგორც რომელიმე გავარეარებული მყარი სხეული, მაშინ თერმობატომგულური რეაქციის განხორციელებაზე ფიქრიც კი ზედმეტი იქნებოდა. მილიონ გრადუსამდე გახურებული წყალბადის გამოსხივება მყისიულად ააორთქლებდა ნებისმიერ მასალას და არავითარი ტექნიკური საშუალებებით არ შეგვეძლებოდა მათი გაცივება და გადარჩენა.

საბედნიეროდ, გავარეარებული წყალბადი გამკვირვალეა და რამდენჯერაც ის მყარ სხეულზე უფრო გამკვირვალეა, იმდენად ნაკლები გამოსხივებით ხასიათდება.

რეაქტორის ცხელი ზონის 1 მ<sup>2</sup> ფართი 50 მლნ გრადუსზე და წყალბადის პლაზმის სიმკვრივისაა ისეთივე ინტენსივობით ასხივებს, როგორც მყარი სხეული, რომლის ტემპერატურა უდრის 5000°. სითბოს ეს რაოდენობაც, ცხადია, ცოტა არ არის და მის შემცირებაზე კონსტრუქტორებმა ალბათ ბევრი უნდა იფიქრონ, მაგრამ ცხელი ზონა, ალბათ, შედარებით მცირედ მანათობლად მოგვეჩვენებოდა, ვინაიდან ენერჯის ნაკადი მისგან უმთავრესად ულტრაიისფერი და რენტგენის გამოსხივებისაგან შედგება.

პ ლ ა ზ მ ა და ფ ო ტ ო ნ უ რ ი ძ რ ა ვ ა. შორეული ვარსკვლავებისაგან მოგზაურობაზე ფიქრი თუმცა ჯერ კიდევ ნაადრევია, მაგრამ მეცნიერები მაინც ცდილობენ მოსინჯონ მომავლის შესაძლებლობანი.

ასეთი მოგზაურობის პირველი პირობაა უდიდესი სისწრაფე, რომელიც სინათლის სიჩქარეს უნდა უახლოვდებოდეს. ეს კი მხოლოდ იმ რეაქტული ძალით არის ნავარაუდევია, რომელიც ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ქვანტების — ფოტონების მძლავრმა ნაკადებმა შეიძლება განავითარონ.

ფოტონური ძრავას იდეა გერმანელ მეცნიერს ეუგენ ზენგერს ეკუთვნის. პირველ ვარიანტში ფოტონების ნაკადის მიღება ელექტრონისა და მისი ანტინაწილაკის — პოზიტრონის შეერთების შედეგად იყო ნავარაუდევია. ჰიპოთეტურ სარკეს მიღებული გამოსხივება საჭირო მიმართულებით უნდა გაეტყორცნა. მაგრამ ანტინაწილაკების როგორც მიღება, ისე შენახვა ჯერ კიდევ ფანტასტიკის მიჯნაზეა.

მეორე ვარიანტით ფოტონების წყაროდ ნაგულისხმევია 150 000°-იანი პლაზმა, მიღებული ატომგულური ენერჯის წყალო-

ბით. პლაზმის დაკავება (შეკუმშვა) მაგნიტური ველით შეიძლება მოხდეს. იდეალურ სარკიდ, რომელიც პლაზმის უწესრიგო გამოსხივებას პარალელურ სხივებად არეკლავს, ნაგულისხმევია სუფთა ელექტრონების ნაკადი. ეს უკანასკნელი როგორც რენტგენის რბილ გამოსხივებას, ისე ულტრაიისფერ და ხილულ სინათლეს თითქმის მთლიანად აირეკლავს (ამ შემთხვევაში ენერჯის მხოლოდ მცირე, მემილიონედი ნაწილი თუ შთაინთქმება უქმად). 150 000°-იანი პლაზმის გამოსხივების უდიდესი ნაწილი კი სწორედ ამ დიაპაზონშია. მაგრამ ასეთი „სარკისათვის“ ელექტრონების კონცენტრაცია იმდენად დიდი გამოდის, რომ მათი ელექტროსტატიკური განზიდვის ძალები წყალბადის ბომბის აფეთქების დროს განვითარებულ წნევას აღემატება (100 000 მლნ ატმ.). ფიქრობენ, რომ ასეთი „სარკის“ შექმნა ელექტრონების ცვლადი, გამდინარე ნაკადით შეიძლება მოხერხდეს. მაგრამ ყოველივე ეს ჭერჭერობით თეორიული ვარაუდის საზღვარს არ სცილდება.



## მაღალი ზემოქარაბების გაზომვის ხერხები

მაღალი ტემპერატურების გაზომვის სიზუსტე. ქიმიური და მეტალურგიული პროცესების ინტენსიფიკაცია და ტექნიკის ახალი დარგების აღმოცენება-განვითარება მაღალი ტემპერატურების საიმედო გაზომვასა და ზუსტ რეგულირებას მოითხოვს. გადაუჭარბებლად შეიძლება ითქვას, რომ გაზომვის სიზუსტეს — განსაკუთრებით მაღალი ტემპერატურების ბუნების შეცნობისა და მის შესაძლებლობათა დაუფლების საქმეში არა ნაკლები მნიშვნელობა აქვს, ვიდრე ასეთი ტემპერატურების მიღების ტექნიკას.

ტემპერატურის გაზომვა შეიძლება უშუალოდ — გამზომი ხელსაწყოთა მგრძობიარე ელემენტის თბური კონტაქტით სხეულთან, და არაპირდაპირი გზით. პირველის მაგალითია სხვადასხვა ტიპის თერმომეტრები (500—600°-ის ფარგლებში სამუშაოდ) და თერმოწყვილი, მეორესი კი ე. წ. „გამოსხივების პირომეტრები“ — ოპტიკური, რადიაციული, ფერადი და ფოტოელექტრული. ეს ხელსაწყოები გავარვარებული სხეულის სხივური ენერჯის გაზომვას ემყარება.

განსაკუთრებით ხაზგასასმელია ის მნიშვნელოვანი გარემოება, რომ ოპტიკური მეთოდებით ტემპერატურის გაზომვა გახურებულ სხეულთან უშუალოდ შეხების გარეშე ხდება, რაც ამ მეთოდების დადებით თვისებად უნდა ჩაითვალოს.

ზომიერად მაღალი ტემპერატურული სკალის დასადგენად — ოქროს გამყარების ტემპერატურის ფარგლებში (1200°-მდე) შესაძლებელია აირიანი თერმომეტრების ხმარებაც, მაგრამ სამრეწველო პრაქტიკისათვის მათი გამოყენება არ გამოდგამოსახერხებელი.

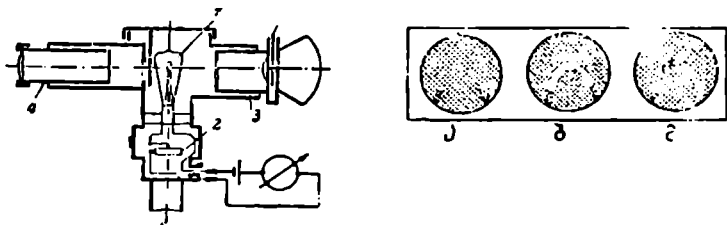
მაღალი ტემპერატურის გაზომვის მეთოდებიც იმ თეორიულ დამოკიდებულებას ემყარება, რომელიც გასაზომად არჩეულ პარამეტრსა და ტემპერატურას შორის არსებობს (პლანკის გამოსხივების ფორმულა, ვინისა და სტეფან-ბოლცმანის კანონები, ლოპლერის ეფექტი და სხვ.).

ობტიკური, ფოტოელექტრული და სპექტრალური მეთოდებით შეიძლება 5000°-ზე უფრო მაღალი ტემპერატურა გავზომოთ, ზოგჯერ 50000°-მდეც კი, მაგრამ ამასთანავე უნდა დავსძინოთ. რომ საკმარისად მოიკოვლებს გაზომვის სიზუსტე.

სპეციალური, მეტად საინტერესო მეთოდისა და აპარატურა არსებობს იმ თბური ნაკადების გააზომად, რასაც სხეული წარმოშობს მაღალ ტემპერატურაზე დიდი სიჩქარით მოძრავე აირის ნაკადში, ე. ი. იმ პირობისათვის, რაც დედამიწის ატმოსფეროში მყარი ტანის გატყორცვის დროს შეიქმნება ხოლმე.

ობტიკური პირომეტრები. მათი ტემპერატურული გამოსხივების კანონები მხოლოდ აბსოლუტურად შავი სხეულისათვის არის ზუსტად დადგენილი. სხვა სხეულების გამოსხივების პარამეტრები მცირედ თუ ბევრად განსხვავებულია მათგან.

გამოსხივების ინტენსივობის აბსოლუტური სიდიდის გაზომვა ძნელია. ამიტომ ობტიკურ პირომეტრებში გამოსაკვლევი სხეულის სიკაშკაშეს ადარებენ სპეციალური ძაფის სიკაშკაშეს. ეს უკანასკნელი წინასწარ არის დაგრაღულირებული აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების შესაბამისად.



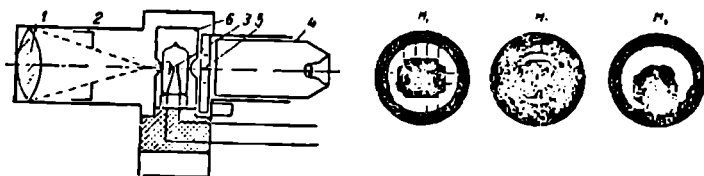
ობტიკური პირომეტრის სქემა. 1—ვარვარის ფოტომეტრული ნათურა; 2—რეტატი; 3—ოქულარი; 4—ობიექტივი; 5—წითელი სინათლის ფილტრი

პრაქტიკაში უფრო გავრცელებულია ობტიკური პირომეტრები. აღნიშნულ ხელსაწყოში გამოსაკვლევი სხეულის სიკაშკაშე უტოლდება ფოტომეტრული ვარვარის ნათურის ძაფის სიკაშკაშეს. უკანასკნელის რეგულირება ხდება რეტოტატით, რომელიც პირომეტრის ტელესკოპის სახელურშია მოთავსებული.

რადიაციული პირომეტრები. ამ ხელსაწყოთა მუშაობის პრინციპი გამოსხივების მთლიანი სიმძლავრის აღქმას ემყარება სითბოს მგრძნობი ელემენტებით, მაგალითად, თერმოზატარეით. პირომეტრის ტელესკოპი გაზომვის ობიექტს ისე უთავსდება, რომ მისი გამოსხივება პლატინის შავათი დაფარულ ფირფიტაზე („3“) შეიკრიბოს. მასზე ერთმანეთთან თანმიმდევრულად შეერ-

თებული თერმოწყვილების მუშა ბოლოებია მირჩილული. ჯამური თერმო-ემძ, როგორც გასაზომი ტემპერატურის ფუნქცია, მილივოლტმეტრის სკალაზე აღიქმება. ნახაზზე  $H_2$ -მდგომარეობა გვიჩვენებს, რომ ტელესკოპი შორს არის ობიექტისაგან, ხოლო  $H_3$ -ტელესკოპი ალმაცერადაა მიმართული. ფოტოელექტრული პირომეტრების მუშაობის პრინციპი აგრეთვე გამოსხივების პარამეტრების ტემპერატურასთან დამოკიდებულებას ემყარება. გამოსხივების აღქმა აქ ფოტოელემენტის მეოხებით ხდება.

მართალია, ოპტიკური ხერხით საკმაოდ მაღალი ტემპერატურები იზომება, მაგრამ მოიკოკლებს გაზომვის სიზუსტე — მეთოდს ბევრი ნაკლოვანი მხარე გააჩნია: იზომება სხეულის ზედაპირის ტემპერატურა და არა მთელი მასის გავარჯარების ხარისხი; შეუძლებელი ხდება გამოსხივებასა და ატმოსფეროს გაქუქვიანებაზე შესწორებათა ზუსტი აღრიცხვა; ამას ზედ ერთვის დახურულ აპარატში გაზომვის სიძნელე, განსაკუთრებით თუ პროცესი გაიშვიათების ან დამცველი გარემოს პირობებში მიმდინარეობს, და სხვ.



რადიაციული პირომეტრის სქემა. 1—ობიექტივი; 2—ღიაფრაგმა; 3—პლათინის ფურცელი; 4—ოკულარი. 5—წითელი მინა

უფრო სრულყოფილად ითვლება ლითონის თერმოწყვილი, რომელიც სინჯის მოცულობაში სასურველი წერტილის ტემპერატურის უშუალოდ გაზომვის შესაძლებლობას იძლევა.

თერმოწყვილები. თერმოელექტრული პირომეტრი, რომელსაც ჩვეულებრივად თერმოწყვილს უწოდებენ, ტემპერატურის გასაზომ საკმაოდ სრულყოფილ ხელსაწყოდ ითვლება.

მისი მოქმედება იმ მოვლენას ემყარება, რომ ორი სხვადასხვა მავთულის შედუღებული ბოლოს გახურების შედეგად მავთულში აღიძვრება ელექტრომამოძრავებელი ძალა, ე. წ. თერმო-ემძ. პრაქტიკული მიზნებისათვის შერჩეულია ლითონთა წყვილები, რომელთა თერმო-ემძ ტემპერატურის პირდაპირ პროპორციულად იცვლება. გაზომვის მოხერხებულობის გამო, თერმოწყვილები ფართოდ არის გავრცელებული პრაქტიკაში.

ამჟამად ყველაზე საიმედო და ზუსტ ხელსაწყოდ 1300°-მდე სამუშაოდ მიღებულია თერმოწყვილები, რომელთა ერთი ელექ-

ტროლია პლატინა, ხოლო მეორე — მისივე შენადნობი როდიუმთან — Pt — (Pt + 10% Rh). იგი ჯერ კიდევ 1887 წელს არის შემოღებული ლე-შატელიეს მიერ და ახლაც იმდენად საიმედოდ ითვლება, რომ საერთაშორისო სკალის სტანდარტული ტემპერატურების დასადგენად არის განკუთვნილი 630,5°-დან 1063°-მდე ფარგლებში. ხანმოკლე ტექნიკური გაზომვები კი 1600°-მდეც შეიძლება ვაწარმოთ. თუ ორივე ელექტროდი პლატინა-როდიუმის შენადნობისაგან იქნება დამზადებული (5 და 20% Rh), გაზომვის ზღვარი 1800° შეიძლება იყოს. იმავე ტემპერატურამდე შეიძლება 6 და 30% Rh შემცველი პლატინის შენადნობების გამოყენება. მის დიდ უპირატესობად ითვლება ის, რომ თერმო-ემპ სიდიდე თითქმის არ არის დამოკიდებული ცივი ბოლოების ტემპერატურისაგან, რადგან 200°-მდე ეს სიდიდე უმნიშვნელოა.

მაღალი ტემპერატურის ტექნიკას კი ეს ფარგლები არ აკმაყოფილებს.

საკმაო კვლევების შედეგად გამონახული იყო ორ ათეულამდე თერმოწყვილი, რომელთა ელექტროდების ლღობის ტემპერატურა 2000°-ზე მაღალია. პრაქტიკული მიზნებისათვის მათგან მხოლოდ რამდენიმე შეიძლება გამოდგეს.

ძნელდნობადი ლითონები

ლითონი	ღლობის ტემპერატურა, °C	მაქსიმალური სამუშაო ტემპერატურა, °C	ლითონი	ღლობის ტემპერატურა, °C	მაქსიმალური სამუშაო ტემპერატურა, °C
W	3410	2560	Hf	2222	1700
Re	3180	2380	Rh	1966	1670
Ta	2996	2400	Cr	1890	1895
Os	2700	2110	Zr	1855	1500
Mo	2625	1910	Th	1827	1200
Ru	2500	1900	Pt	1775	1600
Jr	2454	1980	V	1735	1440
Nb	2514	2230	Ti	1668	1110

საქმე რთულდება არა მარტო იმით, რომ მაღალი ლღობის ტემპერატურის მქონე ლითონთა რიცხვი მცირეა. საჭიროა, რომ თერმოწყვილის მასალა შემდეგ პირობებს მაინც აკმაყოფილებდეს:

1. თერმო-ემპ სიდიდე მაქსიმალურად გასაზომ ტემპერატურაზე მაღალი უნდა იყოს.

2. ეს სიდიდე ტემპერატურის მიხედვით უნდა იცვლებოდეს გარკვეული კანონზომიერებით — ნახტომების, მაქსიმუმებისა და მინიმუმების გარეშე. მრუდი უნდა იყოს კარგად აღწარმოებადი.

ვოლფრამ-ტანტალის წყვილს, მაგალითად, დიდი თერმო-ემპ აქვს, მაგრამ 2000°-ზე ზევით მრუდი დაღმა ეშვება.

3. გახურება-გაცივება არ უნდა იწვევდეს თერმოწყვილის ფიზიკური თვისებებისა და ქიმიური შედგენილობის ცვლილებებს.

4. თერმოწყვილის ელექტროდი არ უნდა ურთიერთქმედებდეს იმ გარემოსა და მასალასთან, რომელსაც ეხება. ცნობილია, მაგალითად, რომ პლატინა სილიკატებთან წარმოქმნის სილიციდებს, რაც არასასურველია.

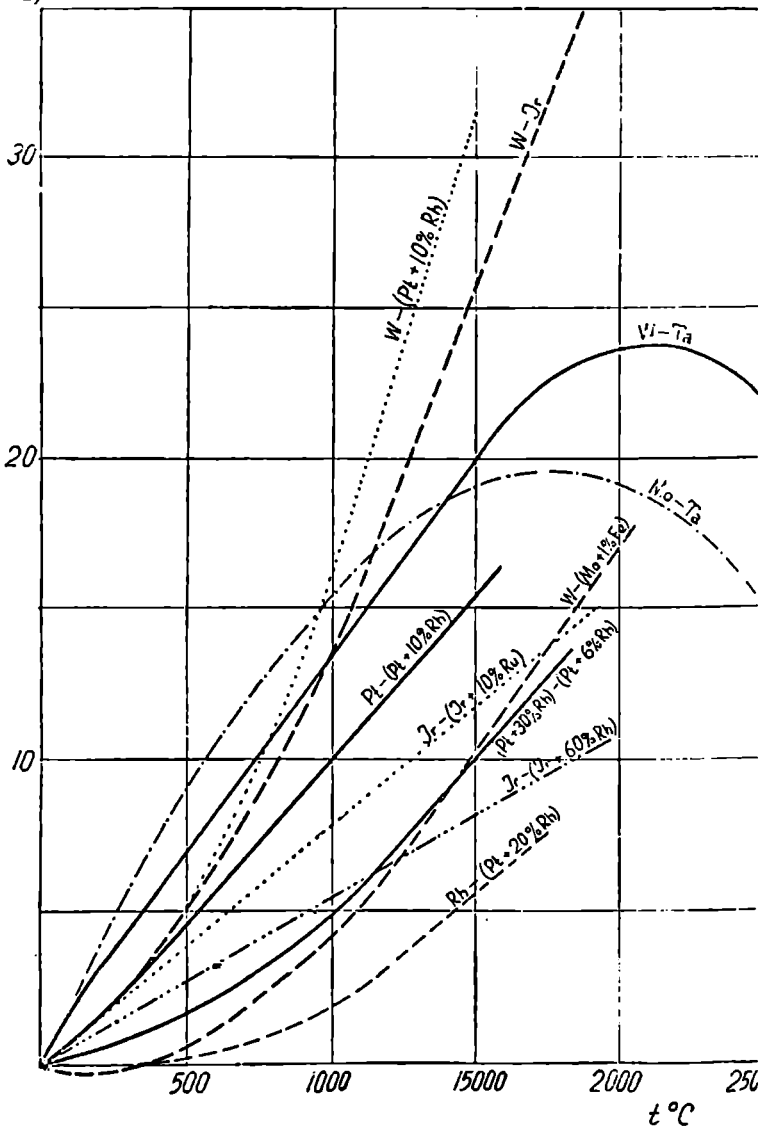
აღნიშნულ პირობებს სრულად არც ერთი მასალა არ აკმაყოფილებს, მხოლოდ ზოგიერთები თუ ჩაითვლება ასე თუ ისე პერსპექტიულად.

ვოლფრამ-ირიდიუმის თერმოწყვილები, მაგალითად, 2100°-მდე  $\pm 6^\circ$ -ზე ნაკლებ ცდომილებას იძლევა. მისი თერმო-ემპ ამ დროს 41,5 მვ აღწევს; მაგრამ ხელსაწყოს ძირითადი ნაკლია ელექტროდის მასალის სიმყიფე და ინერტული ატმოსფეროს საჭიროება. ტემპერატურის იმავე ფარგლებსათვის საიმედოდ ითვლება ირიდიუმისა და როდიუმ-ირიდიუმის (40% Ir) თერმოწყვილიც, რომელიც კარგად დგას როგორც ვაკუუმში, ისე ჰაერზე, მაგრამ დიდი ფასი და თერმო-ემპ მცირე სიდიდე (მხოლოდ 8 მვ. 2100°-ზე) აფერხებს მის გამოყენებას.

კარგი შედეგია მიღებული მოლიბდენ-რენიუმისა (1900°) და ვოლფრამ-რენიუმის (2700°) თერმოწყვილების გამოცდით. მაღალი თერმო-ემპ და ვაკუუმში, აღმდგენელ ან ინერტულ ატმოსფეროში გამოყენების შესაძლებლობა გვაფიქრებინებს ორივე ამ თერმოწყვილის და განსაკუთრებით კი ვოლფრამ-რენიუმის წყვილის პერსპექტიულობაზე.

ჩვენთან უკვე გამოიშვება, მაგალითად, 50—500 მიკრონის დიამეტრის მქონე ვოლფრამ-რენიუმის მავთულები — „ვრ-20“, „ვრ-10“ და „ვრ-5“ (რიცხვები რენიუმის პროცენტის მაჩვენებელია). გამოცდამ აჩვენა, რომ 2000°-ის ფარგლებში „ვრ-20“ და „ვრ-5“-საგან დამზადებულ თერმოწყვილებს ორჯერ მეტი გრძნობიერება აქვს, ვიდრე „ვრ-10“ და „ვრ-20“-საგან დამზადებულებს. პლასტიკურობით კი ეს უკანასკნელი გამოირჩევა.

თერმოელექტრული პირომეტრების უფრო ფართოდ გავრცელებას საკმაოდ უშლის ხელს ისეთი, ერთიან შეხედვით თითქოს უბრალო გარემოება, როგორიცაა მაღალი ტემპერატურების გამძლე დამკველი ჩალითებისა და საიზოლაციო მასალების უქონლობა. სინამდვილეში ეს პრობლემა არანაკლები სიძნელის აღმოჩნდა, ვიდრე თვით თერმოწყვილების მასალის გამოძებნის ამოცანა.



მაღალ ტემპერატურებზე სამუშაოდ ნაყარადევი თერმოელექტრული პირმეტრების მახასიათებლები

ტემპერატურისადმი მედეგობის გარდა, თერმოწყვილის ჩალი-  
თას სხვა განსაკუთრებული მოთხოვნაც წაეყენება — იგი აირშეულ-  
წევი უნდა იყოს. ეს მოთხოვნა იმით არის გაპირობებული, რომ  
ყველა ნივთიერება და, მაშასადამე, თერმოწყვილის მასალაც მა-  
ლალ ტემპერატურებზე მომეტებულ ქიმიურ აქტივობას იჩენს ამა  
თუ იმ გარემოსადმი. ვაკუუმისა და ინერტული ატმოსფეროს შექ-  
მნა კი სარეაქციო არეში ყოველთვის არ ხერხდება (თუმცა ამ დრო-  
საც არ არის გამორიცხული ელექტროდის მასალის სუბლიმაცია  
ან რეკრისტალიზაცია). ყოველივე ეს საკმაოდ ცვლის ელექტრო-  
დის შედგენილობას და მის თვისებებს, მათ შორის თერმო-ემპ-ის  
სიდიდესაც. ამან განაპირობა თერმოწყვილის საიმედო იზოლაციის  
აუცილებლობა.

აღსანიშნავია, რომ მაღალტემპერატურული ფოლადისაგან დამზა-  
დებული ლითონის მილიც კი უკვე  $1100^{\circ}\text{C}$ -ს ზევით აირშეულწევადი  
ხდება. რაც შეეხება სილიციუმის კარბიდსა და გრაფიტს, ორივე  
მათგანი გახურების დროს აღმდგენელ აირებს გამოყოფს. ასეთ-  
გარემოში კი ზოგიერთი ლითონი, კერძოდ პლატინა და პლატინა-  
როდიუმის შენადნობები, საკმაოდ იცვლის თავის მახასიათებლებს.

კეთილშობილი ლითონებისაგან დამზადებული ელექტროდები  
სათვის  $1300\text{—}1400^{\circ}\text{C}$ -ის ფარგლებში შესაძლებელია კვარცისა და  
ფაიფურის მიღების გამოყენება, მაგრამ ეს ძვირია. ამ მხრივ უფ-  
რო პერსპექტიული ჩანს კორუნდისაგან (ალუმინის ქანგისაგან)  
დამზადებული ჩალითები, მაგრამ ისიც მხოლოდ  $1900^{\circ}\text{C}$ -მდეა ვარ-  
ჯისი, რადგან გარკვეული დროის შემდეგ აირშეულწევადი და, მაშა-  
სადამე, უვარგისი ხდება.

პლაზმის ტემპერატურის გაზომვის შესახებ.  
გაცხოველებული კვლევების მიუხედავად, ამჟამად ჯერ კიდევ არ  
არსებობს პლაზმის ტემპერატურის ამა თუ იმ სიზუსტით დადგე-  
ნის საიმედო მეთოდები. ტემპერატურის უშუალოდ, კონტაქტური  
მეთოდით გაზომვა, ამისათვის საჭირო მასალების უქონლობის გა-  
მო, გამორიცხულია. გარდა ამისა ეს შესაძლებელიც რომ იყოს, მაგ-  
ნიტური ველის არსებობის გამო, გაზომვის შედეგების დაზუსტება  
მეტად ძნელი იქნებოდა.

შედარებით უფრო მოსახერხებელია ოპტიკური მეთოდების  
გამოყენება, მაგრამ სრულიად იონიზებული პლაზმის შემთხვევაში,  
მინარეების თანობის გარეშე, ამ მეთოდების ეფექტურობაც საკ-  
მაოდ შემცირებულია. აღნიშნულის გამო, პლაზმის ტემპერატურის  
დადგენა მიზანშეწონილია ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელი რამ-  
დენიმე მეთოდით — სპექტროგრაფული, მიკროტალღების გამოსხი-  
ვების, ელექტრონების კონცენტრაციისა და სხვ.

## მასალები მაღალ ზემოქაჩეობაზე საფუძვლად

მხურვალმედეგი მასალების პრობლემა. როგორც უკვე იყო აღნიშნული, მაღალი ტემპერატურების უფრო ფართოდ დანერგვას პრაქტიკაში უმთავრესად შესაბამისი მასალების უქონლობა ელობება წინ.

ცნობილია, სითბური მანქანის მქვ მით უფრო დიდია, რაც მეტია სხვაობა გამახურებლისა და მაცივრის ტემპერატურებს შორის. ამ მხრივ გაცილებით მიზანშეწონილია პირველი მათგანის ტემპერატურის გაზრდა. სწორედ აქ, მხურვალმედეგი მასალების გამოანახვის საქმეში წააწყდნენ კონსტრუქტორები დიდ სიძნელეებს.

პერიოდულ სისტემაში მხოლოდ ორ ათეულამდე ელემენტს აქვს 1600°-ზე უფრო მაღალი ლღობის ტემპერატურა. მართალია, მათთან შესაძლებელია უფრო ძნელდნობადი შენადნობებისა და ქიმიური ნაერთების მიღება, მაგრამ არც ეს არის გამოსავალი. საქმე ის არის, რომ ლითონებს და მათ შორის შენადნობებსაც, საერთოდ ლღობის ტემპერატურამდე გაცილებით ადრე უქვეითდებათ მექანიკური თვისებები, უწინარეს ყოვლისა — სიმტკიცე, ხდებიან პლასტიკური და ადვილად დეფორმირდებიან უმნიშვნელო დატვირთვითაც კი.

ტურბორეაქტიული საავიაციო ძრავას როტორის ფრთები, მაგალითად, ყველაზე უფრო მხურვალმტკიცე შენადნობისაგან მზადდება, მაგრამ ასეთი შენადნობის სიმტკიცე უკვე 600°-ზე კატასტროფულად ეცემა. თუ გავითვალისწინებთ იმას, რომ ფრთები დიდი დატვირთვით მუშაობს (იგი 15000 ბრ/წთ აკეთებს), გასაგები გახდება სიმტკიცის მკვეთრად შემცირების საშიშროება. ასეთ მასალებს კი, სხვა სპეციფიკურ თვისებებთან ერთად, ქიმიური მდებარეობაც მოეთხოვება. ეს გარემოება საკმაოდ ართულებს საქმეს.

რა ძნელდნობადი მასალაც არ უნდა მიიღონ მეტალურგებმა



და ქიმიკოსებმა, სულ მოკლე ხანში კონსტრუქტორების მოთხოვნილებას იგი უკვე აღარ აკმაყოფილებს.

მაღალტემპერატურაში ელექტროწინალობის დუმილები. შენადნობებისაგან დამზადებული გამახურებელი ელემენტები მხოლოდ 1300°-მდე სამუშაოდ არის ვარგისი. უფრო მაღალი ტემპერატურების მიხედვით კი სუფთა ძნელდნობად ლითონებს — ვოლფრამს (2500°-მდე), მოლიბდენსა (1700°) და ტანტალს (2200°) იყენებენ<sup>16</sup>. მაგრამ ჰაერის გარემოში სამივე მათგანი ინტენსიურად იჟანგება და ორთქლდება კიდევ. ამიტომ მათი მუშაობა მხოლოდ ინერტული ან თვითეული მათგანისათვის სპეციალურად შერჩეული აირის გარემოშია შესაძლებელი. ცალკეულ შემთხვევებში სხვა ტექნიკური პირობების დაცვა სავალდებულო. მოლიბდენის მავთული ან ფირი, მაგალითად, შედარებით დიდი კვების უნდა იყოს, ვინაიდან მისი სისქის უმნიშვნელოდ მოკლების შემთხვევაშიც კი დენის სიმკვრივე იმდენად იზრდება, რომ ადგილობრივ გადახურებას და გადნობას იწვევს. უკვე 1800°-ზე ეს ლითონი ძლიერ ორთქლდება, ამიტომ მას ვაკუუმში ვერ ვამუშავებთ.

მოლიბდენი და ვოლფრამი, როგორც ცხრილიდანაც ჩანს, მშრალი წყალბადის ატმოსფეროში მედეგია ლობის ტემპერატურამდე, მაგრამ თუ წყალბადი ნოტიოა, მედეგობა მხოლოდ 1400°-მდეა სავარაუდო. ტანტალი კი ამ პირობებში უკვე 450°-ზე იწყებს ძლიერ დაჟანგვას.

გამახურებელი ელემენტების კონტაქტები საჭიროა წყლით ცივდებოდეს და არ ეხებოდეს კერამიკას.

საინტერესოა აღინიშნოს, რომ შენადნობებისაგან განსხვავებით, მოლიბდენის, ვოლფრამისა და ტანტალის ელექტროწინალობა 1000°-მდე გახურებისას ხუთჯერ იზრდება, ხოლო 2000°-ზე — 7—12-ჯერ.

ვაკუუმის ელექტროლუმენებისათვის ძვირფასი მასალა აღმოჩნდა გრაფიტი. ისიც კარგი სითბო- და ელექტროგამტარობით ხასიათდება, ადვილი დასამუშავებელია და სხვ., მაგრამ 2200°-ზე ინტენსიურად იწყებს აორთქლებას; ეს აჭუჭყიანებს პროდუქტს და მკვეთრად ამცირებს გამახურებლის მუშაობის ხანგრძლიობას.

ბოლო წლებში მიზანშეწონილად ჩაითვალა ვაკუუმის დუმილებისათვის ზოგიერთი ლითონის ძნელდნობადი ნაერთების — კარბიდების, სილიციდების და სხვ. გამოყენება. ეს ნაერთები ლობის

<sup>16</sup> იგივე თვისებები, რაც ტანტალს, აქვს ნიობიუმსაც, მაგრამ მაღალი ფასი ზღუდავს მისი გამოყენების შესაძლებლობას.

მაღალი ტემპერატურით, საკმარისი სიმტკიცით (დაწნეხა და შეცხოების შემდეგ) და მკაფიოდ გამონატული ლითონური თვისებებით გამოირჩევიან.

1400°-მდე სამუშაოდ, მაგალითად, საკმაოდ გავრცელებულია „კარბორუნდი 1“ (სილიტის ტიპისა), რომლის შედგენილობაში სილიციუმის კარბიდის გარდა (94,4% SiC) შედის აგრეთვე 3,6% SiO<sub>2</sub>; 0,3% — ნახშირბადი და სილიციუმი; 0,6% — რკინა და (CaO + MgO); 0,2% — ალუმინი.

მაღალ ტემპერატურებზე სამუშაოდ განკუთვნილი გამახურებელი ელემენტების მედეგობა სხვადასხვა გარემოში და ლუშელის ამონაგთან კონტაქტის დროს

სამუშაო გარემო	გამახურებელი ელემენტის მასალა		
	მოლიბდენი	ვოლფრამი	ტანტალი
ჰერი ან უანგბადის შემცველი აირები	500°-ზე იწყებს დაჟანგვას		
მშრალი წყალბადი	მედეგია ლღობის ტემპერატურამდე	400°-ზე წარმოქმნის ჰიდრიდის ზედაპირულ წრეს. მედეგია ლღობის ტემპერატურამდე.	
ინერტული აირი	მედეგია ლღობის ტემპერატურამდე		
ვაკუუმი (10 <sup>-4</sup> მმ Hg სუ.)	1800° — ძლიერი აორთქლება	2400° — ძლიერი აორთქლება	2200° — ძლიერი აორთქლება
გრადიტთან	კარბიდების ექვრგილი წარმოქმნა		
კორუნდთან	მ ე დ ე გ ი ა 1900°-მ დ ე		
მაგნეზიტთან ან სილიმანიტთან	მ ე დ ე გ ი ა 1600°-მ დ ე		
თორიუმის უანგთან	1500°-მდე	2200°-მდე	1900°-მდე
ბერილიუმის უანგთან		2000°-მდე	1600°-მდე
მაგნიუმის უანგთან	1800°-მდე		1800°-მდე
ციროკონიუმის უანგთან	1500°-მდე		1600°-მდე

უფრო მაღალ ტემპერატურებზე სამუშაოდ (1600°) პრაქტიკაში გავრცელდა მოლიბდენის დისილიციდი — MoSi<sub>2</sub>. მისგან დამზადებული ნაკეთობა ჩვეულებრივ პირობებში მყიფე და ნაკლებად სალია, მაღალ ტემპერატურებზე კი პლასტიკურობის თვისებას იძენს. ეს საშუალებას გვაძლევს გამახურებელ ელემენტს ჩვენთვის სასურველი ფორმა მივცეთ.

მოლიბდენის დისილიციდს კარგი სითბოგამტარობა აქვს. აღსანიშნავია აგრეთვე თერმული შედეგობა ტემპერატურის მკვეთრი ცვლილების დროს და მდგრადობა ისეთი გამლღვალი ლითონების მიმართ, რომლებიც მტკიცე სილიციდებს არ წარმოქმნიან. ტყვიასთან, კალასთან, ნატრიუმთან იგი  $1000^{\circ}$ -ზედაც არ რეაგირება. უხსნადია მჟავებში, თვით ფთორწყალბადმჟავა და თეზაფიც კი არ მოქმედებს მასზე. მაგრამ უნდა გვახსოვდეს ისიც, რომ იგი ადვილად იხსნება აზოტმჟავასა და ფთორწყალბადმჟავას ნარევეში. აქტიურად მოქმედებს აგრეთვე გამლღვალი ალუმინი, რკინა, სპილენძი, ქრომი და პლატინა.

მოლიბდენის დისილიციდი  $1700^{\circ}$ -მდე საკმაოდ მედეგია და ენგვისადმი. ეს უნდა მიეწეროს მის ზედაპირზე მკვრივი, მტკიცე და ძირითად მასალასთან კარგად შეჭიდული მინისებრი სილიციუმის ორქანვის წარმოქმნას, რომელიც ენგბადისათვის შეუღწევადია და ამიტომ კოროზიულად მედეგი.

განსაკუთრებით ხაზგასასმელია მოლიბდენის დისილიციდის რამდენჯერმე უფრო დიდი ელექტროგადატვირთვების ატანის უნარი ( $60$  ვტ/სმ<sup>2</sup>), ვიდრე ამ მიზნით გამოყენებულ სხვა რომელიმე მასალას აქვს. ეს კარგი თვისებაა, მაგრამ მხედველობაში მისაღებაა ისიც, რომ მოლიბდენის დისილიციდიდან დაშვადებული ლუმელის მუშაობა საკმაოდ დიდ დენება მოითხოვს — ასეულ და ზოგჯერ ათასზე მეტ ამპერსაც.

ბოლო დროს პრაქტიკაში ინერგება კიდევ უფრო მედეგი მასალა — ცირკონიუმის დიბორიდი —  $ZrB_2$ . მისი ლლობის ტემპერატურა  $3040^{\circ}$ -ია, ე. ი. ათასი გრადუსით აღემატება მოლიბდენის დისილიციდის ლლობის ტემპერატურას. ეს საშუალებას გვაძლევს ელექტრონიკის დომენის სამუშაო ტემპერატურა თითქმის  $2000^{\circ}$ -მდე გავზარდოთ.

მსურველ მედეგი კერამიკული მასალები. ლითონებსა და შენადნობებთან ერთად ტექნიკა ფართოდ იყენებს ძნელდნობად კერამიკულ მასალებსაც. ამ მხრივ განსაკუთრებით გარდამავალ ლითონთა ბორიდები, კარბიდები, ნიტრიდები, ქანგეულები და სილიციდები გამოირჩევიან. როგორც თანდართული ცხრილიდანაც ჩანს, ბევრი მათგანის ლლობის ტემპერატურა  $2000^{\circ}$ -ს აღემატება, ტანტალის კარბიდისათვის კი  $3880^{\circ}$  აღწევს.

მიუხედავად არალითონების მაღალი შემცველობისა, ეს ნაერთები მკაფიოდ გამოსახული ლითონურა თვისებებით ხასიათდებიან — აქვთ კარგი ელექტრო- და სითბოგამტარობა, მაღალი სიმტკიცე, სისალე და სხვ.

დრეკადობის მოდულის სიდიდე და კარგი ხენჯმედეგობის უნარი ამ ნაერთების ქიმიური კავშირის სიმტკიცეზე შეტყველებს. ხენჯმედეგობით განსაკუთრებით გამოირჩევა მოლიბდენისა და ვოლფრამის სილიციდები, სილიციუმის ნიტრიდი, ქრომი-ა და ტიტანის ბორიდები, ქრომის, ტიტანისა და ცირკონიუმის კარბიდები და სხვ. გამონაკლისს წარმოადგენს მოლიბდენისა და ვოლფრამის კარბიდები, რაც მათი ქანგეულების ადვილად აქროლადობის თვისებას უნდა მიეწეროს.

კერამიკული მასალებიდან მრეწველობასა და ტექნიკაში უფრო მეტი გამოყენება კარბიდებს აქვთ. მათი უმრავლესობა მაღალი სისაღით, ცვეთაგამძლეობით და ხენჯმედეგობით ხასიათდება. ამიტომ არის, რომ სალი შენადნობები 90%-ით სწორედ კარბიდებისაგან შედგება. სიმყიფის შესამცირებლად და სიმტკიცისა და სიბლანტის გაზრდის მიზნით მათ ლითონის ფხვნილსაც უმატებენ.

ყველაზე მეტი ხენჯმედეგობა ტიტანისა და ცირკონიუმის კარბიდებსა და ნიტრიდებს აღმოაჩნდათ. მათი ეს თვისება იმ გარემოებით არის ახსნილი, რომ ფუძეა და ქანგეულის ფენას შორის გარდამავალი ფსევდომორფული შრე წარმოიქმნება, რომელიც დაბალი ქანგეულის მყარ ხსნარს წარმოადგენს კარბიდსა და ნიტრიდში.

მხურვალმედეგ მასალად პრაქტიკა ფართოდ იყენებს რთულ ბორიდებს ან ბორიდების შენადნობებს სილიციუმთან და ლითონთა სილიციდებთან. გახურებისას ასეთი ნაკეთობის ზედაპირზე ბოროსილიკატური მინის შრე წარმოიქმნება, რომელიც შენადნობს კარგად იცავს დაქანგვისაგან. ბორის შენადნობებს მაღალი მედეგობა აქვთ ფთორის ნაერთებისა და გამლღვალი ლითონების — ალუმინის, სპილენძის, კალის მიმართ. მაღალი თერმული მედეგობით გამოირჩევა ცირკონიუმის ბორიდის საფუძველზე დამზადებული შენადნობი, რომელიც „ბოროლიტი 1“-ის სახელით არის ცნობილი. აღნიშნულის გამო, ბორიდების შენადნობები კარგ მასალად ითვლება ელექტროლუმენების გამახურებელი ელემენტების, მეტალურგიული და მინის სახარში ღუმელების ამონაგის, თერმოსწყვილის ჩალითებისა და ქიმიური აპარატურის დეტალების დასამზადებლად.

უკანასკნელ წლებში გამოყენებას პოულობს ძნელდნობად ლითონთა სილიციდებიც; მათ შორის განსაკუთრებით გამოირჩევა მაღალტემპერატურიან ტექნოლოგიაში ფართოდ გავრცელებული მოლიბდენის დისილიციდი, რომელსაც ზემოთ უკვე შევხვით.

კერამიკული მასალის მედეგობის ხარისხზე დიდი გავლენა აქვს გამოსავალი მასალების სისუფთავეს და დამუშავების ხერხს.

ძნელდნობადი მასალები

ფაზა	რა ტემპერატურამდე მდებარეობს (სლ.)	თვისებები	გამოყენება
CaB <sub>6</sub>	2230	მცირე კუთრი წონა, მხურვალმტკიცობა, მაღალი თერმოდინამიკა.	მსუბუქი მხურვალმტკიცე შენადნობები, ელექტრონულ ხელსაწყოთა კათოდები, თერმოელექტროდები.
BaB <sub>6</sub>	2270	კარგი თერმოემისიური თვისებები.	კათოდები ელექტრონიკაში.
TiB <sub>2</sub>	2980	მხურვალმტკიცობა, ხენკმედეგობა, მაღალი სისალე, ცვეთამედეგობა, მედეგობა გამლვეალ ლითონებში.	მხურვალმტკიცე და ლითონურამიკული სალი შენადნობები, თერმოელექტროდები, თერმოფილის ჩალითები, გამხურვალმტკიცე ტიგლები, კერამეტიკა დანაფარები.
ZrB <sub>2</sub>	3040	მედეგობა გამლვეალ შენადნობებსა და წიღებში, ხენკმედეგობა, მხურვალმტკიცობა.	თერმოფილის ჩალითები, ტიგლები, მილსადენები გამლვეალ ლითონებისათვის.
V <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	2400	მაღალი მხურვალმედეგობა.	მხურვალმტკიცე შენადნობები.
HfB <sub>2</sub>	3250		
Nb <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	3000		
TaB <sub>2</sub>	3100		
CrB <sub>2</sub>	2200	მაღალი ცვეთამედეგობა.	ცვეთამედეგ დასაღველები შენადნობები.
Mo <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	2100	მედეგობა გამლვეალ ლითონებში, თერმოემდეგობა, სითბოგამტარობა.	ტიგლები და ბოყეები პრეციპიტული მეტალურგისათვის, მხურვალმტკიცე შენადნობები.
W <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	2300		
Be <sub>2</sub> C	2100	მხურვალმტკიცობა, ატომკულორი თვისებები.	მხურვალმტკიცე შენადნობები (კერამეტიკი) აირის ტურბინის ფრთების, როტორებისა და მაღალტემპერატურაზე მომუშავე სხვა ნაკეთობებისათვის; ელექტრონიკის ნათურების ელექტროდები; წყალქვეშ ფილადების საკრელი ელექტროდები; თერმოფილის ჩალითები; მეტალურგული ლემელების არმატურა; ტიგლები ატომკულორი ენერგეტიკისათვის (თბომცველების დასამზადებლად); ცვეთისა და კოროზიისადმი მედეგი დანაფარები.
TiC	3140	მაღალი სისალე, ცვეთამედეგობა, მხურვალმედეგობა, ელექტროგამტარობა, აორთქლების მცირე სიჩქარე, აღმდგენელი ვარემოსა და გამლვეალ ლითონებისადმი მედეგობა.	მხურვალმტკიცე შენადნობები (კერამეტიკი) აირის ტურბინის ფრთების, როტორებისა და მაღალტემპერატურაზე მომუშავე სხვა ნაკეთობებისათვის; ელექტრონიკის ნათურების ელექტროდები; წყალქვეშ ფილადების საკრელი ელექტროდები; თერმოფილის ჩალითები; მეტალურგული ლემელების არმატურა; ტიგლები ატომკულორი ენერგეტიკისათვის (თბომცველების დასამზადებლად); ცვეთისა და კოროზიისადმი მედეგი დანაფარები.

ფაზა	რა ტემპერატურამდე მდებარეობს (ლ. °C)	თვისებები	გამოყენება
ZrC	3530	მხურვალმტკიცობა, მედეგობა და ანაგვისა და თერმული დარტყმებისადმი; ნეიტრონების შთანთქმის მცირე განიკვეთი	მხურვალმტკიცე შენადნობები; ატომგულური ენერგეტიკა; ტრელები, ძილები.
NbC TaC	3480 3680	მაღალი სისალე და ცვეთადობა, მედეგობა გამლღვალე ლითონებისადმი; დამაკმაყოფილებელი სიმტკიცე მაღალ ტემპერატურაზე, მცირე ორთქლის დრეკადობა, გამოსხივების კარგი თვისებები.	გამახურებელი ელემენტები, ამორთქლებლები, ლითონსადნობი ტრელების ამონაგა; დანათარები.
Be <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	2220	ძნელდნობადობა	სპეციალური ცეცხლგამძლე მასალები
AlN	2400	თერმომედეგობა; მედეგობა ალუმინის ლობილების მიმართ; თერმული გაფართოების მცირე კოეფიციენტი.	ნახეარგამტარი შენადნობები; ცეცხლგამძლე მასალები ნობების ლობისათვის.
TiN	3205	მხურვალმედეგობა, სისალე, ცვეთადობა, მედეგობა გამლღვალე ლითონების მიმართ	სპეციალური ცეცხლგამძლები, მხურვალმტკიცე ტიტანის შენადნობები, აბრაზივები, დანათარები ტიტანზე, ტიტანის აზოტირება.
ZrN	2980	მაღალი ელექტროგამტარობა, მედეგობა ელექტრორკალში	თორიუმის კათოდების გამტარი ელემენტები
NbN	2300	მაღალი ელექტროგამტარობა, ზეგამტარობა (15° K), მხურვალმედეგობა	დეტექტორული მოწყობილობა, ბოლომეტრები, ელექტრონული მილაკები გამოსხივების გადასაცემად
MoSi <sub>2</sub>	2030	მაღალი მედეგობა და ანაგვისადმი და სხვა ქიმიური რეაქტივებისადმი; მაღალი თერმომედეგობა; მედეგობა გამლღვალე ჭლორიდებში, ანტიემისიური თვისებები	მხურვალმედეგი შენადნობები აირის ტურბინის, რეაქტიული ძრავის საწვავი კამერის, საქმენების, შეტალურგიული ლემელების ნაწილების, ცხელი ტვირებისა და სხვ. დასამზადებლად. ჩალითები თერმოწყვილებისათვის; მაღალტემპერატურაიანი ელექტროწინალობის ლემელების გამახურებელი ელემენტები; ხეწყმედეგი დანათარები მოლიბდენის ნაკეთობათათვის

ფაზა	რა ტემპერატურამდე შედგა (ლდ., °C)	თვისებები	გამოყენება
B <sub>4</sub> C	2200	მაღალი აბრაზიული თვისებები, სისალე, ცვეთადობა, მხურვალ-მედეგობა, ნეიტრონების შთანთქმის დიდი განიკვეთი, მაღალი ელექტროწინალობა, ქიმიური მედეგობა, ხახვარგამტარული თვისებები, მედეგობა ელექტრორკალში	სალი მასალების დამუშავება; მხურვალმეტრიცე და მხურვალმედეგი შენადნობები: მკრელი ინსტრუმენტები; ქიმიური კუჩქელი; ნეიტრონების შთანთქმელები, კერმეტიები ატომგულურ ტექნიკაში; ხახვარგამტარი ამნთები იგხიტრონებისათვის.
β-SiC	2650	მაღალი ელექტროწინალობა, თერმომედეგობა, ნახვარგამტარული თვისებები, ქიმიური მედეგობა მჟავეების, ტუტეების, ლითონთა ლობილებისა და ორთქლის მიმართ; მაღალი სისალე, აბრაზიულობა, თერმომედეგობა, ხენჯმედეგობა	პირი ზომის არაწრფივი უინერციო წინალობები, იგხიტრონული ამნთები, მჟავე ხსნარების გადამქაჩავი ტუმბოები, აპარატურა ცხელი აირებისათვის, დეტალები აგრესიულ გარემოში მომუშავე დანადგარებისათვის, ფოლადების განჯანჯავა, მხურვალმეტრიცე შენადნობები.
BN	3000	მაღალი ელექტროწინალობა, ნახვარგამტარული თვისებები, მაღალი სისალე, მხურვალმეტრიცობა; დაზეთის თვისება	ალმასის შემცველი; მხურვალმეტრიცე შენადნობები; ტიგელები პრეციზიული მეტალურგიისათვის; დიელექტრიკი; მაღალტემპერატურაინი ნახვარგამტარი მასალების დამზადება; ცეცხლგამძლე ამონაგი ალუმინის საელექტროლიზო აბანისათვის; მაღალტემპერატურაინი ინდექციური ვაკუუმის დუმელების თერმოინოლატია; ცეცხლმედეგი საგოზი მასალა.
პიროგრაფიტი	3870	მაღალი მხურვალმედეგობა, სიმტრიცე, კოროზიული მედეგობა	რაიერული ტექნიკა; ლითონებისა და კრამიის სადნობი ტიგელები; ნახვარგამტარი.

გრ ა ფ ი ტ ი. გრაფიტი ერთ-ერთი უაღრესად ძნელდნობადი ნივთიერებაა (3800—3900°), ამიტომ ვოლფრამთან ერთად ყველაზე უფრო პერსპექტიულ მასალად ითვლება მაღალ (>1700°) ტემპერატურებზე სამუშაოდ. იგი შედარებით მსუბუქი, კარგი ელექტროდა სითბოგამტარი, თბური გაფართოების დაბალი კოეფიციენტის

მქონე და ამიტომ თერმული დარტყმებისადმი მედეგი მასალაა. გამოირჩევა დრეკადობის მოდულის მცირე მნიშვნელობით, აქვს დამაკმაყოფილებელი სიმტკიცე. საინტერესოა, რომ ეს უკანასკნელი თვისება  $2700^{\circ}$ -მდე გახურებისას შემცირების ნაცვლად იზრდება. თუ მხედველობაში მივიღებთ იმასაც, რომ გრაფიტი ადვილად მუშავდება, შედარებით იაფი და ხელმისაწვდომია, გასაგები გახდება მისი გამოყენების ფართო პერსპექტივები ახალი ტექნიკისათვის.

საკმარისია დავაახელოთ მრეწველობის ისეთი წამყვანი დარგები, როგორც ელექტროქიმიურ და თერმოქიმიურ წარმოებათა ტექნოლოგია — ალუმინის, მაგნიუმის, ნატრიუმის, ქლორის, ნაირგვარი ფეროშენადნობებისა და სხვა მნიშვნელოვანი პროდუქტების მიღება. ასეთ წარმოებათა განვითარება გრაფიტის ელექტროდების გარეშე შეუძლებელი იქნებოდა.

თბური ნეიტრონების შთანთქმის მცირე ეფექტური განიკვეთის გამო ( $0,0045$  ბარნი), გრაფიტი უმნიშვნელოვანეაი საკონსტრუქციო მასალა გახდა ატომგულური რეაქტორების უმრავლესი ტიპებისათვის. იგი იხმარება როგორც ნეიტრონების შემნელებელი — პეტეროგენულ რეაქტორებში, ხოლო ამრეკლი და ნაირგვარი საკონსტრუქციო დეტალების მასალა — რეაქტორების სხვა სისტემებში.

გრაფიტი ბუნებრივი მინერალია, ცვალებადი ფორმისა და სიდიდის კრისტალებით. ნახშირბადის გარდა, იგი  $10-20\%$ -მდე სხვადასხვა მინარევებსაც შეიცავს. ხელოვნურად მიღებული გრაფიტი კი გაცილებით უფრო ერთგვაროვანი და სუფთაა. სამრეწველო ხარისხის გრაფიტი ნახშირბადის შემცველი შემესების — ნავთობის კოქსისა და შემკვრელის — ქვანახშირის ფისის დაწნებით მზადდება. შემდეგ სპეციალურ ლუმელში ხდება მისი მთლიანი დანახშირება ( $>1500^{\circ}$ ). საბოლოო მაკარბონიზებული დამუშავება მიმდინარეობს ელექტროლუმელში  $\sim 2750^{\circ}$ -ზე, რაც რამდენიმე დღე-ღამე გრძელდება შემდგომი ნელი და ხანგრძლივი გაცივებით. ეს განაპირობებს ნახშირბადოვანი ნივთიერების გრაფიტიზაციას, რა დროსაც მცირე კრისტალები თითქმის ორჯერ მსხვილდება. მიიღება თანაბარმარცვლიანი სტრუქტურის გრაფიტი, რომელმაც ესოდენ ფართო გავრცელება ჰპოვა პრაქტიკაში.

მაგრამ ბევრი დადებითი თვისებების მიუხედავად, გრაფიტი მაინც არ შეიძლება იდეალურ მასალად ვიგუღვოთ მაღალ ტემპერატურებზე სამუშაოდ. მას ნაკლოვანი მხარეებიც გააჩნია. მათგან მთავარია ჰაერზე გახურებისას ადვილად დაქანავის უნარი; მაღალ ტემპერატურებზე კი ( $>2200^{\circ}$ ) იგი საგრძნობლადაც ორთქლდება. ამას ზედ ერთვის აბრაზიული ცვეთა ცხელი აირების ატმონფერო-



ში. ყოველივე ეს ხელს უშლის მაღალ ტემპერატურებზე გრაფიტის სუფთა სახით გამოყენებას. საჭირო ხდება მისი ზედაპირის წინასწარ დამუშავება მედეგი დამცველი ფენის შექმნით. ასეთად, უწინარეს ყოვლისა, კარბიდის შრე უნდა ვიგულისხმოთ. ამინათვის გრაფიტის ზედაპირის რომელიმე ძნელდნობადი ლითონით, სილიციუმით ან ბორიდით თერმოლიფუზიურ გაჯერებას მიმართავენ— ამ ელემენტების ჰალოგენიდების, კარბონილების ან ორგანული ნაერთების აირად ფაზაში. გამოყენებულია აგრეთვე თხევადი ლითონით შესველების ან ფხვნილის გაფრქვევის მეთოდი.

რაკეტის ძრავას გრაფიტის საქშენი, მაგალითად, ვოლფრამის ფხვნილით იფარება პლაზმის ჰავლში. წარმოიქმნება ვოლფრამის კარბიდის ფენა, რომელიც საქშენს მაღალი ტემპერატურისა და დიდი სიჩქარით მოძრავი ნამწვი აირების ეროზიული მოქმედებისაგან იცავს. პლაზმა უზრუნველყოფს დანაფარის საჭირო სიმკვრივეს და ძლიერ შექიფლობას ფუძესთან. უკეთესი შედეგია მიღებული, თუ ვოლფრამი არა უშუალოდ გრაფიტზე, არამედ ტანტალის ან რენიუმის ქვეშრეზე იქნება დაფენილი.

მიმართავენ სილიციუმის კარბიდით დაფარვასაც ელექტრული განმუხტვის რკალში ან ზედაპირული შრის ბორით გაჯერებას.

რთული ფორმის გრაფიტის ნაკეთობათათვის უფრო მისაღები ჩანს რამდენიმე ფენის მქონე ლითონკერამიკული დანაფარები. ასეთად გამოყენებულია, კერძოდ, მოლიბდენის 0,075 მმ-იანი და ალუმინის ქანჯის 0,125 მმ-იანი სამ-სამი ფენა, რომლებიც ერთმანეთს ენაცვლებიან. არეკვლის თვისების გაზრდის მიზნით, საბოლოოდ მასზე ქრომის ასევე თხელი ფენაა დადებული. სილიციურებული გრაფიტის ამგვარად დაცული ნაკეთობა 2200°-ზე უფრო მაღალ ტემპერატურებსაც კი ადვილად იტანს.

გარკვეული ინტერესის მქონე გამოდგა გრაფიტზე ბორის სილიციდის ფხვნილის პლაზმური სანთურით დადნობა. ბორის და სილიციუმის ქანგეულების 0,1 მმ-იანი ფენა კარგად არის შექიფული ფუძესთან და თერმული დარტყმებისადმი მაღალი წინაღობით გამოირჩევა.

**კერამეტი.** მსურვალმედგ მასალებს შორის განსაკუთრებული ყურადღების ღირსი აღმოჩნდა ლითონკერამიკული მასალები, რომელთაც შემოკლებით კერამეტებს უწოდებენ. კერამეტი რომელიმე ძნელდნობადი კერამიკული ნაერთისა და ლითონური შემკვრელის ნარევის წარმოადგენს. ორივე შემადგენელი ქიმიურად სუფთა წვრილდისპერსულა, (10 მკ-მდე) ფხვნილის სახით აიღება; ნარევი ჯერ საჭირო ფორმის ნაკეთობად იწნეხება. შემდეგ მას შეაცხობენ მაღალ ტემპერატურასა და წნევაზე (30—140 ატმ).

შეცხოვის ტემპერატურა შემკვრელად აღებული ლითონის ლღობის ტემპერატურის სიდიდით განისაზღვრება. თუ თხევადი ლითონი კერამიკის ნაწილაკებს არ ასველებს, ლითონის გადნობა საჭიროდ აღარ ითვლება.

შეცხოვა წყალბადის აღმდგენელ ატმოსფეროში, ან ინერტული აირის — არგონისა და აზოტის გარემოში ხდება.

შეკავშირების ხასიათის მიხედვით, კერამეტებს პირობითად სამ ჯგუფად ყოფენ:

1. მექანიკური ნარევები. კავშირი ნაწილაკებს შორის მექანიკური შეჭიდულობის ძალებით ხორციელდება. კომპონენტები ურთიერთ არ რეაგირებენ ( $\text{Si—BeO}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Mo—ThO}_2$ , და სხვ.).

2. კომპონენტები შეცხოვისას ქიმიურად რეაგირებენ. ლითონისა და კერამიკის შეერთების ადგილებში რთული ქანგეულები — შპინელები წარმოიქმნება ( $\text{Cr—Al}_2\text{O}_3$  და სხვ.).

3. მყარი ხსნარები ან ქიმიური ნაერთები ( $\text{Co—TiC}$ ;  $\text{Ni—TiC}$ ;  $\text{Be—MgO}$ ;  $\text{Zr—Al}_2\text{O}_3$  და სხვ.).

ალუმინის ქანგის შემცველი კერამეტების ნაკლად უნდა ჩაითვალოს სიმყიფე, ამიტომ მათი გამოყენება ისეთ კონსტრუქციებშია დასაშვები, რომლებიც მექანიკურ დარტყმებს არ განიცდიან. გამოირიცხულია აგრეთვე გამლღვალ ალუმინთან კონტაქტი.

ნახშირბადის შემცველ ატმოსფეროში დაყოვნება ალუმინის ქანგისა და ბორიდების შემცველი კერამეტების სიმყიფეს ამცირებს.

მ ხ უ რ ვ ა ლ მ ე დ ე გ ი დ ა ნ ა ფ ა რ ე ბ ი. თანამედროვე აირიანი ტურბინების, ძრავების, რაკეტებისა და სხვა მსგავსი დანადგარების სამუშაოთა პარამეტრები ძირითადად მათი სააპაუზისმგებლო ნაწილების მხურვალმედეგობით არის ლიმიტირებული. როგორც უკვე იყო აღნიშნული, ძნელდნობადი ლითონებისა და ფოლადების გამოყენება ამ მიზნით საკმაოდ შეზღუდულია; ამიტომ ყოველი მათგანი აუცილებლად დამცველი ღონისძიებების გატარებას მოითხოვს.

მაღალ ტემპერატურებსა და მექანიკურ დატვირთვებს ამ შემთხვევაში ემატება წვის პროდუქტებში მყოფი მეტად აგრესიული ნივთიერებების — გოგირდისა და ტყვიის ნაერთების, ვანადიუმის ხუთქანგისა და სხვ. მოქმედება. წვის კამერის ზედაპირი ძლიერად ზიანდება დიდი სიჩქარით მოძრავი ცხელი აირების, ალისა და წვრილი ნაწილაკების განუწყვეტელი ნაკადისგანაც.

პრაქტიკამ აჩვენა, რომ ლითონური ნაწილების დაცვა მაღალი ტემპერატურისა და აგრესიული გარემოს პირობებში მხურვალმეტკიცე დაფარვით არის შესაძლებელი. მხურვალმეტკიცე დაფა-

რვის დანიშნულებაა კოროზიისა და დაჟანგვისადმი წინააღმდეგობის გაზრდა, ეროზიული გაცვეთის თავიდან აშორება და ძირითადი ლითონის ნაწილების გადახურებისაგან დაცვა.

დაფარვა შეიძლება როგორც ლითონებით, ისე კერამიკული მასალით. პირველ შემთხვევაში ძირითადად მოჭრომვასა და მონიკლებას მიმართავენ, მაგრამ ასეთ ნაკეთობათა სამუშაო ტემპერატურა დაბალია — 400—600°. ფოლადისა და თუჩის ნაკეთობის ზედაპირის ალუმინით დაფარვის (ამ პროცესს ალიტირება ეწოდება) ან სილიციუმით გაჭერების შემთხვევაში სამუშაო ტემპერატურის ზღვარი 1000° შეიძლება იყოს. თანამედროვე ტექნიკას კი ეს დიდი ხანია აღარ აკმაყოფილებს.

რაკეტის საქშენის კრიტიკულ კვეთში, მაგალითად, 2700°-ზე უფრო მაღალი ტემპერატურა და აირის დიდი სიჩქარე გვაქვს. კოროზიის გარესამოსიც კი 1300°-მდე და მეტად არის გახურებული. ძრავას საკონსტრუქციო მასალები — ნიობიუმი, მოლიბდენი, ტანტალი და ვოლფრამი, როგორც ზევითაც ვნახეთ, ასეთ პირობებში არ შეიძლება მედეგი იყვნენ. საჭიროა მათი დაფარვა დამცველი შრით.

დაფარვა ხდება დიფუზური და გალვანური ხერხით ან პლაზმური გაფრქვევით.

პირველ შემთხვევაში გამოყენებულია ტანტალისა და ნიობიუმის ალუმინიდები —  $TaAl_3$  და  $NbAl_3$  ან მოლიბდენის დისილიციდი —  $MoSi_2$ . აღნიშნული ნაერთები ძირითად ლითონთან ქიმიურ ნაერთებს წარმოქმნიან და მტკიცედ არიან მასთან შეჭიდული. მიღებული ზედაპირული შრე არაფოროვანია და 1800°-მდე ყველაზე უფრო საიმედო დამცველად ითვლება განსაკუთრებით მრავალჯერადი ამუშავების ძრავასათვის.

ალუმინიდის დანაფარი ნიობიუმისა და 1% ცირკონიუმის შენადნობისათვის 1370° უძლებს, ტანტალისა და 10% ვოლფრამის შენადნობის შემთხვევაში კი — 1650°.

სილიციდით დაფარვა ტანტალისა და ნიობიუმის შენადნობებს 1800°-მდე იცავს.

როდიუმის, პლატინის ან ქრომთუთიაბორიდის ზედაპირული ფენის მისაღებად გალვანურ დაფარვას მიმართავენ. დანაფარი 1650°-მდეა მედეგი. იგი არაფოროვანია და მექანიკურად არის დაკავშირებული ძირითად ლითონთან, მაგრამ თბური გაფართოების მაღალი კოეფიციენტი აქვს და არადაამაკმაყოფილებლად მუშაობს აირის დიდი სიჩქარეების პირობებში.

ალუმინის, ქრომისა და ცირკონიუმის ჟანგის გაფრქვევა პლაზმური მეთოდით ხდება. დანაფარი 1650°-მდეა მედეგი. იგი მექანი-

ლითონ-კერამიკული მხურვალმედეგი დანაფარები

დანაფარები	დაფარვის მეთოდი	ფენის სისქე, მმ	მხურვალმედეგობა	
			ხანგრძლივობა	ტემპერატურა, °C
Ni+MgO	პლაზმური გაფრქვევა	0,3—0,7	რამდენიმე წუთი ხანგრძლივად	2000 1500
MoSi <sub>3</sub> MoSi <sub>3</sub> +B	პლაზმური გაფრქვევა აორთქლება ვაკუუმში	0,1—0,2 0,025—0,75	500 სთ 100 სთ 30 სთ	1315 1650 1850
გრაფიტის დაფარვა Mo + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ის ფენებით	თვითეული ფენის პლაზმური გაფრქვევა	საერთო-0,075 Mo—0,075 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> —0,125 (თვითეული ფენა)	40 წმ ხანგრძლივად	3000 2200

კურალ არის შექიდილი ძირითად მასასთან. მაგრამ ფორიანობასა და გაფართოების მაღალ კოეფიციენტს დანაფარის დასკდომა შეუძლია გამოიწვიოს.

კერამიკულ მასალებთან ერთად, საკმაოდ გავრცელებულია აგრეთვე ლითონკერამიკული მასალებით დაფარვაც. ასეთი დანაფარის დანიშნულებაა ლითონებისა და გრაფიტის ნაკეთობათა დაეანგვისაგან დაცვა და ცვეთაგამძლეობის უნარის გაზრდა.

დანაფარის შრე სათანადოდ შემზადებული ხსნარის პულვერიზაციული გაფრქვევით და შემდგომი შეცხოებით, აირის პლაზმის ჭავლით ან ვაკუუმში აორთქლებით ხდება.

თანამედროვე ტექნიკის ისეთი მოწინავე დარგების განვითარება, როგორც თვითმფრინავებისა და რაკეტების მშენებლობა, ენერგეტიკა ან მაღალტემპერატურული ტექნოლოგიის სხვა დარგებია, ბევრად არის დამოკიდებული მხურვალმედეგი დამცველი დანაფარების ხარისხისაგან.

მხურვალმედეგ ძნელდნობად დანაფარებს შეუძლიათ გაახანგრძლივონ მაღალი ტემპერატურისა და აგრესიული გარემოს პირობებში მომუშავე მეტალურგიული აგრეგატებისა და ქიმიური აპარატების მუშაობა. პრაქტიკაში ფართოდ ინერგება იმ მანქანებისა და ნაკეთობათა დეტალების ბორიდებითა და კარბიდებით დაფარვა, რომლებიც ძლიერ აბრაზიულ ცვეთას განიცდიან.

ძვირფასი ელექტროფიზიკური თვისებების მქონე ძნელდნობადი ნაერთების გამოყენებას ვრცელი პერსპექტივები აღმოაჩნდა ელექტრო- და რადიოტექნიკაში, ატომგულურ ენერგეტიკაში და ახალი ტექნიკის სხვა მნიშვნელოვან დარგებში.

## ს ა რ ჩ ე ვ ი

წ ი ნ ა ს ი ტ ყ ე ა ო ბ ა	გვ. 5
უჩეულო სამყარო	7
ტემპერატურა და ტემპერატურული სკალა	16
ბუნების მაღალტემპერატურიანი ლაბორატორიები	29
პლაზმა ჩენს გარშემო	45
მაღალი ტემპერატურები ძირითად ქიმიურ მრეწველობაში	64
მაღალი ტემპერატურები და ორგანული ქიმია	78
პლაზმა — მეტალურგი	85
მაღალი ტემპერატურების ახალი „პროფესიები“	95
პლაზმა და მომავლის ენერგეტიკა	111
მაღალი ტემპერატურების გაზომვის ხერხები	123
მასალები მაღალ ტემპერატურებზე სამუშაოდ	130

**Аполлон Шалвович Авалиани**

**ВЫСОКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ**

დაიბეჭდა საქართველოს სსრ მეცნიერებათა აკადემიის  
სარედ-საგამომც. საბჭოს დადგენილებით

•

გამომცემლობის რედაქტორი ი. ვოლოკოვა  
მხატვარი ვ. ავალიანი  
ტექნორედაქტორი ე. ბოკერია  
კორექტორი ლ. გელოვანი

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 15.12.1966; ქალაქის ზომა 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>;  
ნაბეჭდი თაბახი 9.0; სააღრიცხვო-საგამომცემლო თაბახი 8.16;  
უფ 02460; ტირაჟი 1000; შეკვეთა 1192;  
ფასი 69 კაპ.

---

გამომცემლობა „მეცნიერება“, თბილისი 60, კუტუზოვის ქ. № 15  
Издательство «Мецниереба», Тбилиси 60, ул. Кутузова № 15

---

გამომცემლობა „მეცნიერების“ სტამბა, თბილისი 60, კუტუზოვის ქ. № 15  
Типография Издательства «Мецниереба», Тбилиси 60, ул. Кутузова, 15