

ლალი კალანდაძე, ნუგზარ ღომიძე,
მანანა ჩიხლაძე, ომარ კეთილაძე

მოლეკულური ფიზიკა

ბათუმი

2016

რედაქტორი:

ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი, ბსუ-ს
პროფესორი ჟუჟუნა დიასამიძე.

რეცენზენტები:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორი
ა. გერასიმოვი.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორი
ჯ. ხუბუა.

დამტკიცებულია ბსუ-ს ფიზიკა-მათემატიკისა და
კომპიუტერულ მეცნიერებათა ფაკულტეტის საბჭოს
სხდომაზე (ოქმი№6, 25.02.2016)

სახელმძღვანელოდ აღიარებულია ბსუ-ს აკადემიური
საბჭოს მიერ (დადგენილება №19, 25.03.2016).

ISBN 978-9941-434-38-9

რ ე ც ე ნ ს ი ა

დ. კვლანდაძის, ნ. ღომბის, მ. ჩიხლაძის და ო. კეთილადის სახელმძღვანელო „მოლექულური ფიზიკა“ შედგენილია ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელობის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ფიზიკა-მათემატიკის და კომპიუტერულ მეცნიერებათა ფაკულტეტის ზოგადი ფიზიკის პროგრამის შესაბამისად. ნაშრომს გააჩნია სათანადო შინაარსობრივი და მეთოდური დონე. საპროგრამო საკითხთა ფიზიკური არსი განმტკიცებულია ცდისეული, გრაფიკული და ცხრილური მონაცემებით, თეორიულ საკითხებთან შესაბამისობაში კარგად არის შერწყმული პრაქტიკული ამოცანები, რაც სტუდენტებს გაუადვილებს მასალის ათვისებას და გამოუმუშავებს საჭირო ჩვევებს დამოუკიდებელი ასროვნებისა და მუშაობისთვის.

სახელმძღვანელო შეიძლება გამოყენებული იქნას სხვა უმაღლესი ტექნიკური სახწავლებლების სტუდენტებისთვის, იგი ასევე სახარტაველო იქნება შესაბამისი საკითხებით დაინტერესებული სპეციალისტებისთვის.

რ ე ც ე ნ ს ე ტ ე ბ ა :

1. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორი
2. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორი


ა. გვარჯიმიოვი.
გ. ხუბუა

ხელმოწერებს ვადასტურებ ფიზიკის დეპარტამენტის უფროსი, პროფესორი



ა. ჭიჭინაიშვილი

ყველა უფლება დაცულია. ამ წიგნის არც ერთი ნაწილი (იქნება ეს ტექსტი, ფოტო, ილუსტრაცია თუ სხვა) არანაირი ფორმით და საშუალებით (იქნება ეს ელექტრონული თუ მექანიკური), არ შეიძლება გამოყენებული იქნას გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე. საავტორო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით.

ს ა რ ჩ ე ვ ი

თავი I. კინეტიკური თეორიის საკითხები

§1. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის დეკლარაცია -----	7
§2. მოლეკულური ურთიერთქმედების ძალები და კოტინციური ენერგია-----	12
§3. ნივთიერების აბრეგატული მდგომარეობა -----	16
§4. ტემპერატურა, თერმოდინამიკის ნულივანი კანონი -----	18
§5. წონასწორული და არაწონასწორული პროცესები -----	22
§6. იდეალური აირის მოლეკულურ - კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება-----	25
§7. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების შედეგები -----	30
§8. იზოპროცესები იდეალურ აირში -----	34
§9. ატმოსფერული წნევა. ბარომეტრული ფორმულა. ბოლცმანის განაწილება -----	39
§10. მოლეკულათა განაწილება სიჩქარეების მიხედვით -----	41
ამოცანები -----	50

თავი II. თერმოდინამიკა

§11. შინაგანი ენერგია, თერმოდინამიკის პირველი კანონი -----	54
§12. იდეალური აირის შინაგანი ენერგია -----	57
§13. იდეალური აირის მუშაობა იზოპროცესებისას --	62
§14. სითბო, კუთრი და მოლური სითბოტევადობა -	67
§15. იდეალური აირის მოლური სითბოტევადობა, მაიერის ფორმულა -----	73
§16. ადიაბატური პროცესი, გვირის გავრცელების ადიაბატური გუნება-----	77
§17. პოლიტროპული პროცესი -----	83
§18. რეალური აირის შინაგანი ენერგია ვან-დერ-ვაალსის განტოლება -----	86
§19. ჯოულ- ტომსონის ეფექტი -----	90
§20. სითბური ძრავები -----	93
§21. კარნოს ციკლი -----	97
§22. ენტროპია, თერმოდინამიკის II და III კანონები	101
ამოცანები -----	109

თავი III. კრისტალური მდგომარეობა

§23. კრისტალური მყარი სხეულები და მათი კლასიფიკაცია ----- 113

§24. კრისტალური მყარი სხეულების ტიპები ----- 116

§25. დეფექტები კრისტალებში ----- 119

§26. კრისტალთა სითბური გაფართოება ----- 122

§27. კრისტალთა სითბოტემპალობა ----- 127

ამოცანები ----- 127

თავი IV. ფაზური წონასწორობა და ბარდაქმნები

§28. ფაზა. ფაზათა წონასწორობის პირობები ----- 129

§29. დნობა და კრისტალიზაცია ----- 132

§30. აორთქლება და კონდენსაცია ----- 139

§31. წვის და აფეთქების პროცესი. წვის კუთრი სითბო ----- 144

§32. სითხისა და ნაჯერი ორთქლის წონასწორობა ----- 152

§33. კლავპირონ-კლაუზიუსის განტოლება ----- 153

§34. რეალური აირის ცდისეული იზოთერმები კრიტიკული მდგომარეობა ----- 156

§35. ტენიანობა ----- 158

§36. ვან-დერ-ვაალსის იზოთერმები. გადაჯერებული ორთქლი და გადახურებული სითხე ----- 160

ამოცანები ----- 150

თავი V. გადატანითი მოვლენები

§37. მოლეკულათა თავისუფალი განარბენი ----- 162

§38. დიფუზია აირებში ----- 166

§39. შინაბანი ხახუნი აირებში ----- 172

§40. სითბოს გადაცემის გზები ----- 174

§41. აირთა სითბოგამტარობა ----- 182

ამოცანები ----- 186

ლიტერატურა

1. ლ. კალანდაძე, ნ. ღომიძე, მ. ჩიხლაძე, თ. კეთილაძე. მექანიკა ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტი 2015.
2. მ. მირიანაშვილი. ზოგადი ფიზიკის კურსი II. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 1966.
3. **Дж. Б. Мерион.** Физика и физический мир. М, "Мир", 1975.
4. დ. ღონდაძე. ზოგადი ფიზიკის კურსი. I ნაწ. თბილისი, "განათლება", 1976.
5. **Орир Дж.** Физика, Том 1. М, "Мир", 1981.
6. Советский энциклопедический словарь, «Советская энциклопедия», М, 1981.
7. Физический энциклопедический словарь, гл. редактор Прохоров А.М. «Советская энциклопедия», М, 1984.
8. **Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др.** М.: Сов. Энциклопедия, 1984. **mk**
9. **mk**
10. **Х. Кухлинг.** Справочник по физике. М, "Мир", 1985.
11. **Джанколи Д.** Физика, Том 1, М, "Мир", 1989.
Савельев И.В. Курс физики, Том 1. М, "Наука", 1989.
12. **М.Н. Чихладзе, Г.Г. Чихладзе.** Курс общей физики, часть I. Технический университет, Тбилиси, 2002.
13. ა. გიგინეიშვილი, გ. კუკულაძე. ზოგადი ფიზიკის კურსი. I ტ. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2007.
14. თ. კეთილაძე, მ. ჩიხლაძე ზოგადი ფიზიკის ამოცანათა კრებული. I ნაწ. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი, 2008.
15. მ. ჩიხლაძე, თ. კეთილაძე. ზოგადი ფიზიკის კურსი. I ნაწ. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი, 2009.
16. **Онищенко О. Г., Коробко Б. А., Ващенко К. М.** Структура, кинематика и динамика механизмов. ПолтНТУ, 2010.
17. ნ. ღომიძე, ნ. ღომიძე. ფიზიკა. ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტი 2013.

18. ვ. სანაძე. კრისტალოფიზიკის საფუძვლები. „განათლება“, 1976.
19. С. Э. Фриш, А.В. Тиморева. Курс общей физики, том I. Физматгиз. 1961.
20. მ. ჯიბლაძე. შესავალი ფიზიკაში. ნაწ. II. თბილისი 2013.
21. Б. М. Яворский, А.А. Пинский Основы физики, том I . Физматгиз. 1961. М, "Наука", 1969.
22. Г. И. Заманова Р. Р. Шафеев, Механика и молекулярная физика: учебное пособие. Директ-Медиа • 2015
23. Леонтович М. А. Введение в термодинамику. Статистическая физика. М. 1983.
24. Матвеев А. И. Молекулярная физика. М. 1981.

თავი I. კინეტიკური თეორიის საკითხები

§1. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის დეზულებები

ფიზიკის, როგორც მეცნიერების, დანიშნულებაა სხეულის და სხეულთა ჯგუფის (სისტემის) აღნაგობის, თვისებების და მასში მიმდინარე პროცესების შესწავლა. ამ მიზანით სარგებლობენ კვლევის ორი მეთოდით. ესენია: *მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია* (შემოკ. – *კინეტიკური თეორია*) და *თერმოდინამიკა*. ისინი დასმულ ამოცანას განსხვავებული კუთხით უდგება.

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია შეისწავლის სისტემის იმ თვისებებს, რომლებიც დაიმზირება ექსპერიმენტით და წარმოადგენს სისტემის შემადგენელი ნაწილაკების ურთიერთქმედების შედეგს. რადგან სისტემა შედგება კოლოსალური რაოდენობის ნაწილაკებისგან, შეუძლებელია თითოეული მათგანის მოძრაობის დინამიკის განხილვა. ამიტომ იგი იყენებს სტატისტიკურ მეთოდს და ამოცანის გადაწყვეტისას სარგებლობს ამ ნაწილაკთა ურთიერთქმედებისა და მოძრაობის მახასიათებელ სიდიდეთა საშუალო მნიშვნელობებით¹.

თერმოდინამიკა სიტემის კვლევისას, კინეტიკური თეორიისგან განსხვავებით, არ განიხილავს მის მიკროსტრუქტურას. იგი შეისწავლის სისტემის, როგორც ერთი მთლიანის, თვისებებს მასში მიმდინარე მაკროსკოპული პროცესების მიხედვით. კვლევისთვის სარგებლობს ისეთი პარამეტრებით, რომელთა უშუალო გაზომვაც შესაძლებელია (წნევა, ტემპერატურა, სიმკვრივე, სითბოს რაოდენობა და სხვა).

ორივე მეთოდს გააჩნია თავისი უპირატესობა და ნაკლიც, თუმცა ერთდროული გამოყენებისას კარგად ავსებს ერთმანეთს და გვაძლევს სრულ სურათს სისტემის მდგომარეობისა და მასში მიმდინარე პროცესების შესახებ.

¹ ამ თვალსაზრისით აღნიშნულ მეთოდს სტატისტიკურ ფიზიკასაც უწოდებენ.

კინეტიკური თეორია დაფუძნებულია სამ დებულებაზე, რომლებიც დამტკიცებულია ექსპერიმენტით:

1. ნებისმიერი ნივთიერება შედგება უმცირესი ნაწილაკებისგან (ატომი, მოლეკულა, იონი).
2. ნაწილაკები განუწყვეტლივ, უწესრიგოდ – ქაოსურად მოძრაობს
3. ნაწილაკები მიზიდვა-განზიდვის ძალებით ურთიერთქმედებს.

ატომი (ბერძ. – განუყოფელი) წარმოადგენს ქიმიური ელემენტის (მარტივი ნივთიერების) უმცირესს ნაწილაკს, რომელსაც მისი ყველა ქიმიური თვისება გააჩნია. *მოლეკულა* კი რთული ნივთიერების უმცირესი ნაწილაკია, გააჩნია მისი ყველა ქიმიური თვისება. ის ატომებისგან შემდგარი მდგრადი სისტემაა. მაგ. წყალბადის H_2 და ჟანგბადის O_2 მოლეკულები ორატომიანია, წყლის H_2O და ნახშირბადის ორჟანგის CO_2 მოლეკულები - სამატომიანი და ა.შ. ხშირად ინერტული აირების ატომებს ერთატომიან მოლეკულებს უწოდებენ. ამიტომ იქ, სადაც დაკონკრეტება საჭირო არაა „მოლეკულის“ ტერმინით ვისარგებლებთ. *იონი* ეწოდება ისეთ ატომს (მოლეკულას), რომლის ელექტრონეიტრალობა დარღვეულია-დაკარგული ან შექენილი აქვს ერთი ან რამოდენიმე ელექტრონი. მათ შესაბამისად დადებით ან უარყოფით იონს უწოდებენ.

ატომთა და მოლეკულათა მასის სიმცირის გამო, გამოთვლების გამარტივების მიზნით, მასის ერთეულად შემოდებულია *მასის ატომური ერთეული (მ.ა.ე.)*.

მ.ა.ე. წარმოადგენს ნახშირბადის ატომის² C_6^{12} მასის $1/12$ ნაწილს. $1\text{მ.ა.ე.} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ კგ.

ასევე სარგებლობენ *ატომური (მოლეკულური) მასით* – A . იგი ფარდობითი სიდიდეა და გვიჩვენებს მოცემული ატომი (მოლეკულა) რამდენ მ.ა.ე.-ს შეიცავს, ანუ რამდენჯერ მეტია მოცემული ელემენტის ატომის მასა m_0 ნახშირბადის ატომის მასის m_c -ს $1/12$ ნაწილზე:

² ელემენტის სიმბოლო X_Z^A , Z ელემენტის რიგითი ნომერია, A -ატომური მასა (მასური რიცხვი).

$$A = \frac{m_0}{\frac{1}{12} \cdot m_C}$$

ელემენტთა ატომური მასები მითითებულია მენდელეევის პერიოდულ სისტემაში. მაგალითად უმსუბუქესი ელემენტის წყალბადის H_1^1 ატომური მასა 1-ის ტოლია, ჟანგბადის O_8^{16} 16-ის. შესაბამისად, H_2O -ს მოლეკულური მასა იქნება $2 \cdot 1 + 16 = 18$, ე.ი. წყლის მოლეკულა 18-ჯერ მძიმეა C_6^{12} -ის $1/12$ ნაწილზე.

ერთეულთა საერთაშორისო სისტემაში (SI) ერთ-ერთ ძირითად ერთეულად მიღებულია **მოლი (მოლ)**

➤ **მოლი** ნივთიერების ის რაოდენობაა, რომელიც იმდენივე ატომს (მოლეკულას) შეიცავს, რასაც 0,012კგ (12გ) ნახშირბადი.

ერთ მოლში არსებულ ატომთა რაოდენობას $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ მოლ⁻¹ **ავოგადროს რიცხვი** ეწოდება, ხოლო მასას **მოლური მასა** M . განმარტების თანახმად $M = m_0 N_A$, $m_0 = A \cdot (\text{მ.ა.ე.})$. შესაბამისად,

$$M = A \cdot (N_A \cdot \text{მ.ა.ე.}) = A \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მოლ, ე.ი.}$$

➤ **ნივთიერების მოლური მასა** რიცხობრივად მისი მოლეკულური მასის 10^{-3} -ზე ნამრავლის ტოლია.

(მაგ. წყლის მოლური მასაა $M_{H_2O} = 18 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ).

თუ m მასის ნივთიერებაში მოლეკულათა რაოდენობას N -ით ავლნიშნავთ, მაშინ ადგილი ექნება თანაფარდობას

$$v = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}, \quad (1.1)$$

v მოცემულ ნივთიერებაში მოლეკების რიცხვია.

დავუშვათ სისტემა შედგება რამოდენიმე ნივთიერების ნარევისგან, რომელთა მასებია m_1, m_2, \dots ,

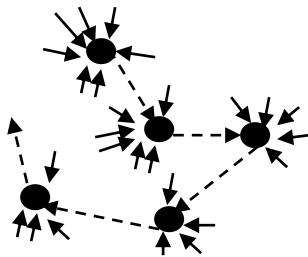
შესაბამისად მოლური მასებია M_1, M_2, \dots , მაშინ სისტემის მოლეკულის რიცხვი იქნება:

$$v = v_1 + v_2 + \dots = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots \quad (1.2)$$

სოლო ნარევის მოლური მასა:

$$M = \frac{m_1 + m_2 + \dots}{v_1 + v_2 + \dots} \quad (1.3)$$

კინეტიკური თეორიის დებულებათა ერთ-ერთი დამამტკიცებელი მოვლენაა **ბროუნის** (ინგლისელი ბიოლოგი) **მოძრაობა**. იგი წარმოადგენს სითხეებში ან აირებში შეტივტივებულ მცირე ზომის ნაწილაკის (ე.წ. ბროუნის ნაწილაკი) ქაოსურ მოძრაობას³. მასზე დაკვირვება შესაძლებელია მიკროსკოპის საშუალებით. ეს მოვლენა ასე შეიძლება აიხსნას: სითხის (აირის) მოლეკულებს უწესრიგო მოძრაობის გამო გააჩნია განსხვავებული სიჩქარეები, რომლებიც განუწყვეტლივ იცვლება ურთიერთქმედებისას. ამიტომ ბროუნის ნაწილაკზე მათი შეჯახებისას გადაცემული ჯამური იმპულსი განსხვავებულია ნულისგან და ნაწილაკიც მოძრაობს შესაბამისი მიმართულებით. დროის მომდევნო მომენტში, შემოაღნიშნული მიზეზის გამო, ბროუნის



ნახაზი 1.1

ნაწილაკზე გადაცემული ჯამური იმპულსი შეიძლება სრულიად განსხვავებული სიდიდისა და მიმართულების აღმოჩნდეს, რის გამოც ნაწილაკი შეიცვლის მოძრაობის მიმართულებას და ა.შ. (ნახ. 1.1). რაც ადასტურებს როგორც მოლეკულათა არსებობის, ასევე მათი ქაოსური მოძრაობის ფაქტსაც. შევნიშნოთ,

რომ, თუ ნაწილაკი დიდი ზომისაა, მას დაეჯახება მოლეკულათა ძალიან დიდი რაოდენობა, რის გამოც მათი

³ შეტივტივებული – ნიშნავს, რომ სიმძიმის ძალა არ მოქმედებს მის მოძრაობაზე. ასეთ ნაწილაკებს ბროუნის ნაწილაკებსაც უწოდებენ.

მოქმედება გასაშუალოვდება, დააკომპენსირებს ერთ-მანეთს და გადაცემული ჯამური იმპულსი გაუტოლდება ნულს და ნაწილაკი დარჩება უძრავი.

კინეტიკური თეორიის კიდევ ერთი დადასტურებაა **დიფუზიის** მოვლენა, რომელიც წარმოადგენს მასის გადატანის – ნივთიერებათა შერევის პროცესს, გამოწვეულს სხვადასხვა უბანში სიმკვრივეთა განსხვავებით და მოლეკულათა ქაოსური მოძრაობით. ეს მოვლენა თეორიულად შესწავლილი იქნა უდიდესი გერმანელი ფიზიკოსის **ალბერტ აინშტაინის** მიერ. მანვე დაახლოებით შეაფასა მოლეკულათა მასები და ზომები. აღმოჩნდა, რომ მათი დიამეტრი საშუალოდ რამოდენიმე **ანგსტრემის** A^0 რიგისაა. ($1A^0 = 10^{-10}m$). ატომთა ზომის სიმცირეს მიუთითებს ის ფაქტი, რომ ნორმალური ატმოსფერული წნევის პირობებში ($p = 1,013 \cdot 10^5$ პა) 0^0C -ზე ნებისმიერი აირის $1m^3$ მოცულობა შეიცავს მოლეკულათა ფანტასტიკურად დიდ რაოდენობას:

$$N_L = 2,7 \cdot 10^{25} m^{-3}.$$

ამ რიცხვს **ლოშიდტის რიცხვი** ეწოდება, ავსტრიელი ფიზიკოსის **ლოშიდტის** საპატივცემლოდ, რომელმაც პირველმა მოახერხა მისი დათვლა.

დიფუზიას განვიხილავთ გადატანითი მოვლენების შესწავლისას.

ამოცანა 1.1. რამდენ მოლეკულას შეიცავს და რამდენი მოლია $90g$ წყალში.

ამოხსნა: $M_{H_2O} = 18 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ,

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{0,09}{18 \cdot 10^{-3}} = 5. \text{ მეორეს მხრივ}$$

$$\nu = \frac{N}{N_A}, \quad N = \nu N_A = 5 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} = 3,01 \cdot 10^{24}.$$

ამოცანა 1.2. ნაკეთობაზე, რომლის ზედაპირის ფართობია $S=20სმ^2$, დაფენილია $d=1$ მკმ სისქის ვერცხლის ფენა. ვერცხლის რამდენი ატომია ფენაში ($M=108 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ; $\rho=10,5 \cdot 10^3$ კგ/მ³)?

ამოხსნა: ვერცხლის ფენის მოცულობა იქნება:
 $V=sd=20 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-6}=2 \cdot 10^{-9} \text{მ}^3$. სიმკვრივის განმარტების
 თანახმად $\rho=m/V$, საიდანაც $m=\rho V=10,5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-9}=2,1 \cdot 10^{-5} \text{კგ}$.

$$(1.1)\text{-დან } N = \frac{m \cdot N_A}{M} = \frac{2,1 \cdot 10^{-5} \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{108 \cdot 10^{-3}} = 1,2 \cdot 10^{20}.$$

ამოცანა 1.3. გამოვთვალოთ 12გ ჰელიუმის და 50გ ნეონის ნარევის მოლური რიცხვი და და მოლური მასა.

ამოხსნა: (1.2)-ის და (1.3)-ის თანახმად

$$\nu = \frac{m_{\text{He}}}{M_{\text{He}}} + \frac{m_{\text{Ne}}}{M_{\text{Ne}}} = \frac{12}{4} + \frac{50}{20} = 5,5 \text{მოლ}.$$

$$M = \frac{m}{\nu} = \frac{m}{\nu_{\text{He}} + \nu_{\text{Ne}}} = \frac{12 + 50}{5,5} \cdot 10^{-3} \approx 11,3 \cdot 10^{-3} \text{კგ/მოლ}$$

ამოცანა 1.4. აირთა ნარევის შედგენლობაა: 50% წყალბადი, 30% აზოტი, 20% ჰელიუმი. გამოვთვალოთ ნარევის მოლური მასა.

ამოხსნა: ამოცანის პირობის და (1.2)-ის თანახმად

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{m_{\text{H}_2}}{M_{\text{H}_2}} + \frac{m_{\text{N}_2}}{M_{\text{N}_2}} + \frac{m_{\text{He}}}{M_{\text{He}}} = \frac{0,5m}{M_{\text{H}_2}} + \frac{0,3m}{M_{\text{N}_2}} + \frac{0,2m}{M_{\text{He}}} = \\ &= \frac{0,5m}{2 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,3m}{28 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,2m}{4 \cdot 10^{-3}} = \frac{8,7m}{28 \cdot 10^{-3}} \end{aligned}$$

$$\text{ე.ი. } M = \frac{m}{\nu} = \frac{28 \cdot 10^{-3}}{8,7m} \cdot m \approx 3,22 \cdot 10^{-3} \text{კგ/მოლ}$$

§2. მოლეკულური ურთიერთქმედების ძალები და კოტენციური ენერგია

მიუხედავად იმისა, რომ მოლეკულა მთლიანობაში ელექტრონეიტრალურია, ნებისმიერი ნივთიერების მოლეკულების ურთიერთქმედებას ელექტრული ხასიათი აქვს. კერძოდ, ორი მოლეკულის მიახლოებისას თავს იჩენს მოლეკულებში შემავალ ატომბირთვთა დადებითი მუხტებისა და ელექტრონულ ღრუბლთა უარყოფითი მუხტების ურთიერთქმედება, (რაც გამოიხატება

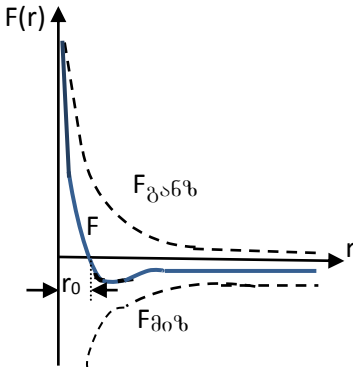
ერთნიშნა მუხტთა განზიდვასა და საპირისპირო ნიშნის მუხტთა მიზიდვაში, რის გამოც მოლეკულებში ხდება მუხტთა წანაცვლება-პოლარიზაცია). თუ მოლეკულათა ცენტრებს შორის მანძილი 10^{-9} მ-ს უტოლდება უპირატესობა ენიჭება ელექტრული მიზიდვის ძალებს ერთი მოლეკულის ბირთვისა და მეორის ელექტრონულ ღრუბელს შორის. ეს ძალები იზრდება მოლეკულათა შემდგომი მიახლოებისას

$$F_{\text{მიზ}}(r) = -\frac{a}{r^7} \quad (2.1)$$

როდესაც მანძილი 10^{-10} მ რიგის ხდება უკვე დომინირებს განზიდვის ძალები, რაც გამოწვეულია მოლეკულების ელექტრონული ღრუბლების ურთიერთადაფარვით და მოლეკულების დადებითი მუხტის მქონე ბირთვების ურთიერთქმედებით:

$$F_{\text{განზ}}(r) = \frac{b}{r^{13}} \quad (2.2)$$

(მიზიდვის ძალებს იღებენ „-“ ნიშნით, განზიდვისას „+“-ით). a და b კოეფიციენტები დამოკიდებულია ურთიერთმოქმედი მოლეკულების აღნაგობაზე. მიზიდვა-განზიდვის ძალებს შორის განსხვავება გარდა ნიშნისა გამოისატება მოლეკულებს შორის მანძილის ხარისხის



ნახაზი 2.1

მაჩვენებელში. (2.1)-ის და (2.2)-ის შედარებით ჩანს, რომ მანძილის ცვლილებაზე უფრო მკვეთრად რეაგირებს განზიდვის ძალები ამიტომ ისინი თავს ამჟღავნებს მოლეკულათა უშუალოდ შეხების მომენტიდან.

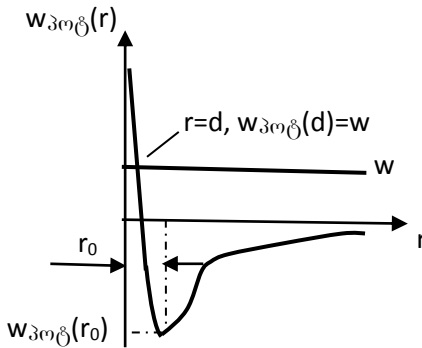
ცხადია ძალთა ასეთი დაყოფა პირობითია და

სინამდვილეში თითოეული მოლეკულა განიცდის მათ ერთდროულ მოქმედებას:

$$F(r) = -\frac{a}{r^7} + \frac{b}{r^{13}} \quad (2.3)$$

ამ ტოლქმედის სიდიდე და ნიშანი დამოკიდებულია მოლეკულათა აღნაგობაზე და ურთიერთ დაშორებაზე. ზემოთქმულიდან გამომდინარე იგი მიზიდვითაა დიდ მანძილზე, ხოლო ახლო მანძილზე განზიდვითი.

ნახ.2.1-ზე წყვეტილი წირით ნაჩვენებია $F_{ბოზ}(r)$ და $F_{განზ}(r)$ დამოკიდებულება ორ მოლეკულას ცენტრებს შორის მანძილზე, ხოლო უწყვეტი წირით



ნახაზი 2.2

ტოლქმედის. როცა $r > r_0$ ჭარბობს მიზიდვის, ხოლო $r < r_0$ დროს განზიდვის ძალა. $r = r_0$ -ის შემთხვევაში ძალები ერთმანეთს აწონასწორებს-ტოლქმედი ნულის ტოლია. ე.ი მოლეკულებს შორის

r_0 დაშორება შეესაბამება მდგრად წონასწორულ მდგომარეობას.

ეს მიდგომა საშუალებას იძლევა ავხსნათ მყარი სხეულების დეფორმაციისას დრეკადობის ძალის წარმოქმნის მექანიზმი. სხეულის გაჭიმვისას იზრდება რა მოლეკულებს შორის მანძილი ($r > r_0$) მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალთა ტოლქმედი მიზიდვითაა და ცდილობს სხეულის ნაწილაკები დააბრუნოს საწყის მდგომარეობაში. შეკუმშვისას ($r < r_0$) კი ტოლქმედი განზიდვითია, ეწინააღმდეგება შემდგომ შეკუმშვას და ცდილობს მოლეკულათა ისევ საწყის მდგომარეობაში დაბრუნებას.

განვიხილოთ ორი მოლეკულისგან შემდგარი სისტემის მოლეკულათა ურთიერთქმედების პოტენციური

ენერჯის დამოკიდებულება მოლეკულებს შორის მანძილზე (ნახ. 2.2). დავუშვათ, რომ ურთიერთქმედების (r_0, ∞) არეში, სადაც დომინირებს მიზიდვის ძალები, მათი მოქმედებით მოლეკულებს შორის r მანძილი შემცირდა $\Delta r < 0$ სიდიდით. ცხადია ტოლქმედი $F(r) < 0$ ასრულებს დადებით მუშაობას, რის გამოც ურთიერთქმედების პოტენციური ენერჯის შემცირების ხარჯზე ($A = -\Delta w_{პოტ}(r)$) იზრდება მათი კინეტიკური ენერჯია. თუ გავითვალისწინებთ, რომ როცა $r \rightarrow \infty$ $w_{პოტ}(\infty) \rightarrow 0$, ვღებულობთ, რომ მოლეკულათა მიზიდვის არეში $w_{პოტ}(r) < 0$. $(0, r)$ არეში Δr მანძილით ($\Delta r < 0$) მოლეკულების დაახლოებისას სისტემა, განზიდვის ძალთა დასაძლევად, ასრულებს უარყოფით მუშაობას. ამიტომ კინეტიკური ენერჯის შემცირების ხარჯზე პოტენციური ენერჯია იზრდება და დადებითი ხდება. როდესაც მოლეკულათა კინეტიკური ენერჯია მთლიანად დაიხარჯება განზიდვის ძალთა დაძლევაზე პოტენციური ენერჯია გახდება მაქსიმალური და გაუტოლდება სისტემის სრულ w -ენერჯიას. ეს უკანასკნელი, სისტემის ჩაკეტილობის გამო, მუდმივია და გრაფიკზე ნახვენებია r -ის პარალელური წრფის სახით. ამ დროს მოლეკულები მაქსიმალურად დაახლოებული აღმოჩნდება ერთმანეთთან. გრაფიკზე ამ მანძილს შეესაბამება w -ს შესაბამისი წრფის გადაკვეთა $w_{პოტ}(r)$ -ის მრუდთან. გადაკვეთის წერტილის აბსცისა $r=d$, d -ს მოლეკულის *ეფექტურ დიამეტრს* უწოდებენ. იგი განსაზღვრავს იმ არის წირით ზომას, სადაც მეორე მოლეკულას შეღწევა არ შეუძლია. d -ს მნიშვნელობა დამოკიდებულია მოლეკულის აღნაგობასა და ტემპერატურაზე. იგი მით მცირეა, რაც მეტია ნივთიერების ტემპერატურა, ანუ რაც დიდია მოლეკულათა საშუალო კინეტიკური ენერჯია. პოტენციური ენერჯის მრუდის ასიმპტრიულობა აიხსნება მიზიდვა-განზიდვის ძალთა ერთობლივი მოქმედებით და მათი განსხვავებული დამოკიდებულებით მოლეკულებს შორის მანძილზე. როცა $r=r_0$ სისტემა მდგრად წონასწორულ მდგომარეობაშია, რასაც შეესაბამება პოტენციური ენერჯის მინიმუმი.

§3. ნივთიერების აბრეგატული მდგომარეობა

ერთიდაიგივე ნივთიერების სხვადასხვა მდგომარეობას ტემპერატურისა და წნევის განსაზღვრულ ინტერვალში ნივთიერების **აგრეგატული მდგომარეობა** ეწოდება. ტრადიციულად გამოყოფენ სამ აგრეგატულ მდგომარეობას. ესენია: **მყარი, თხევადი, აირადი**. ამ ფორმებს განაპირობებს მოლეკულური ურთიერთქმედების მიზიდვა-განზიდვის ძალები, ტემპერატურა და წნევა. მოლეკულური ურთიერთქმედების ძალთა ერთობლივი მოქმედება ცდილობს მოლეკულებს მიუჩინოს ფიქსირებული მდებარეობა, რასაც ეწინააღმდეგება მოლეკულათა ქაოსური მოძრაობა. ანუ ნივთიერების აგრეგატულ მდგომარეობას განსაზღვრავს მოლეკულათა ურთიერთქმედების პოტენციური ენერჯია და ქაოსური-სითბური მოძრაობის კინეტიკური ენერჯია. კერძოდ, როცა

1. $W_{\text{პოტ}} > (W_{\text{კინ}})_{\text{საშ}}$ ნივთიერება იმყოფება მყარ მდგომარეობაში. ამ დროს ურთიერთქმედების ძალები საკმაოდ დიდია, რის გამოც მოლეკულათა განლაგება ერთმანეთის მიმართ პრაქტიკულად არ იცვლება. მათ შეუძლია მხოლოდ რხევითი მოძრაობა თავისი მდებარეობის მახლობლობაში, რის გამოც მყარ სხეულებს გააჩნია საკუთარი ფორმა და მოცულობა. თუ ამასთან მოლეკულების განლაგება ემორჩილება მკაცრ გეომეტრიულ კანონზომიერებას, ანუ ახასიათებს განლაგების გარკვეული პერიოდულობა, მაშინ მათ **კრისტალურ** ნივთიერებას უწოდებენ, ხოლო თუ მოლეკულები განლაგებულია ყოველგვარი წესრიგის გარეშე – **ამორფულს**. ხშირად მყარ მდგომარეობად მხოლოდ კრისტალურს თვლიან, ხოლო ამორფულს – თხევადად. იგი მთელი რიგი თვისებებით მართლაც წააგავს სითხეს.

2. $W_{\text{პოტ}} \approx (W_{\text{კინ}})_{\text{საშ}}$ ნივთიერება იმყოფება თხევად მდგომარეობაში. მოლეკულათა შორის ურთიერთ-ქმედების ძალები მყართან შედარებით საკმაოდ სუსტია, რის გამოც მოლეკულები მოძრაობენ ქაოსურად, თუმცა ურთიერთქმედება იმდენად

ძლიერია, რომ მათი ქაოსური მოძრაობა ვერ ცვლის საშუალო მანძილს მოლექულებს შორის, ამიტომ სითხეებს გააჩნია მხოლოდ საკუთარი მოცულობა, ფორმას კი ჭურჭლისას ღებულობს.

3. $W_{\text{პოტ}} \ll (W_{\text{კინ}})_{\text{საშ}}$ ნივთიერება იმყოფება აირად მდგომარეობაში მოლექულებს შორის ურთიერთქმედება იმდენად სუსტია, რომ ქაოსური მოძრაობის გამო, ისინი თავისუფლად შორდება ერთმანეთს და მთლიანად ავსებს იმ ჭურჭელს, რომელშიც მოთავსებულია, ე.ი. აირებს არ გააჩნია საკუთარი ფორმა და მოცულობა.

შეგნიშნოთ, რომ თანამედროვე მეცნიერებას გაცილებით ზუსტი და ამომწურავი ცნობები გააჩნია აირებისა და კრისტალური სხეულების ფიზიკური თვისებების შესახებ ვიდრე სითხეების შემთხვევაში, რაც დაკავშირებულია სითხეების აღნაგობის თავისებურებებით.

მეოთხე აგრეგატულ მდგომარეობას ხშირად მიაკუთნებენ პლაზმას. **პლაზმა** ნაწილობრივ ან მთლიანად იონიზირებული აირია, რომელშიდაც დადებით და უარყოფით მუხტთა მოცულობითი სიმკვრივე პრაქტიკულად ტოლია. ამ მდგომარეობაში აირები გადადის ფიქსირებული წნევის პირობებში ტემპერატურის გაზრდით. ყველა იონიზირებული აირი არაა პლაზმა. პლაზმას ახასიათებს შემდეგი ძირითადი თვისება: მასში მუხტთა სიმკვრივე იმდენად დიდია, რომ თითოეული მუხტი ურთიერთქმედებს მის მახლობლობაში არსებულ მუხტთან სისტემასთან. ამ საკითხის უკეთ გარკვევისთვის შემოვიღოთ **დების რადიუსის** ცნება: ეს მოცემული მუხტიდან ის მანძილია, რომელზედაც მოქმედებს მოცემული მუხტის ელექტრული ველი უარყოფითი და დადებითი მუხტებისგან შემდგარ ნეიტრალურ გარემოში (ელექტროლიტები, პლაზმა). ამ რადიუსით შემოსაზღვრულ სფეროს, რომლის ცენტრშიც მოცემული მუხტი მდებარეობს **მოქმედების სფერო** ეწოდება. მის გარეთ მუხტის ველს ეკრანირებას უკეთებს

პოლარიზებული გარემო. მათემატიკურად პლაზმის არსებობის პირობა ასე ჩაიწერება:

$$nr_{\text{ფ}}^3 \gg 1$$

სადაც n მუხტთა კონცენტრაციაა. ამასთან დებაის რადიუსის სიდიდე ნაკლები უნდა იყოს პლაზმის მახასიათებელ ზომებზე. ამ მოთხოვნის დაკმაყოფილებისას შესაძლებელია პლაზმის ზედაპირული ეფექტების უგულვებელყოფა.

§4. ტემპერატურა. თერმოდინამიკის ნულეზანი კანონი

შემოვიღოთ *თერმოდინამიკური სისტემის* ცნება: იგი ეწოდება დიდი რაოდენობის ნაწილაკებისგან შემდგარ ისეთ ფიზიკურ სისტემას, რომელსაც შეუძლია გარემოსთან ენერჯისა და ნივთიერების გაცვლა. როცა გარემოსთან გაცვლითი პროცესები მიმდინარეობს სისტემა არაიზოლირებულია-ღიაა, წინააღმდეგ შემთხვევაში იზოლირებულია. თუ მოვახდენთ სისტემის იზოლაციას, მისი შემადგენელი ნაწილაკები ურთიერთქმედებისა და ქაოსური მოძრაობის შედეგად სისტემას ადრე თუ გვიან გადაიყვანს ისეთ მდგომარეობაში, როდესაც ამ ნაწილაკთა საშუალო კინეტიკური ენერჯია გახდება მუდმივი, რაც ფიზიკურად ნიშნავს, რომ მთელ სისტემაში დამყარდება ერთნაირი, უცვლელი ტემპერატურა. პრაქტიკაში ტემპერატურის ცნება სხეულთა მთბარობის შესაფასებლად იხმარება. მაგ. ვამბობთ, რომ გამდნარ ფოლადს მაღალი ტემპერატურა აქვს, ყინულს დაბალი და ა.შ. ფიზიკაში კი

➤ **ტემპერატურა ნაწილაკთა ქაოსური მოძრაობის ინტენსივობის (საშუალო კინეტიკური ენერჯის) ზომაა.**

თუ უცვლელი გარე პირობების დროს სისტემის ტემპერატურა არ იცვლება სისტემა იმყოფება *წონასწორულ მდგომარეობაში*. ამ შემთხვევაში ასევე უცვლელია სისტემის მახასიათებელი ყველა სხვა თერმოდინამიკური პარამეტრიც - წნევა, სიმკვრივე, შინაგანი ენერჯია და ა.შ., თუმცა სისტემის წონასწორობის შეფასებისთვის უპირატესობა ენიჭება ტემპერატურას. ტემპერატურა

ერთნაირია წონასწორული სისტემის ყველა უბანში, დამოუკიდებლად იმისა ერთფაზიანია - ჰომოგენურია იგი, თუ მრავალფაზიანი -ჰეტეროგენური (მაგ. აირი-სითხე, სითხე-მყარი, აირი-სითხე-მყარი) მაშინ, როდესაც სხვა პარამეტრები (მაგ. წნევა) სხვადასხვა ფაზისთვის უცვლელი, მაგრამ ერთმანეთისგან განსხვავებული იქნება.

თუ სისტემის ყველა უბანში ტემპერატურა გათანაბრებული არ არის, მაშინ იგი არაწონასწორულ მდგომარეობაშია, ამ დროს ჩვენ ვერ მივუთითებთ ტემპერატურის, წნევის და სხვა პარამეტრის განსაზღვრულ მნიშვნელობებს.

ტემპერატურის რაოდენობრივი შეფასებისას გამოიყენება სხვადასხვა ტემპერატურული სკალები. ევროპასა და აზიის ქვეყნებში სარგებლობენ **ცელსიუსის ტემპერატურული სკალით**, სადაც ფიქსირებულ წერტილად მიღებულია ნორმალური წნევის პირობებში (10^5 პა) **გამოხდილი წყლის გაყინვის** – 0°C და **დუდილის** – 100°C ტემპერატურები. ამ ინტერვალის $1/100$ ნაწილს **გრადუსი** (1°C) ეწოდება.

აშშ-სა და ლათინური ამერიკის ქვეყნებში უპირატესად გამოიყენება **ფარენგეიტის ტემპერატურული სკალა**, სადაც წყლის გაყინვას შეესაბამება 32°F , ხოლო დუდილს – 212°F . ამ ინტერვალის $1/180$ ნაწილი ერთი **ფარენგეიტია** (1°F), ე.ი. ფარენგეიტის სკალის დანაყოფის ფასი ტოლია: $1\text{F} = 100/180 = 5/9^{\circ}\text{C}$. ამ სკალის t_F ტემპერატურის გადაყვანა ცელსიუსის სკალის t_C ტემპერატურაზე ხორციელდება შემდეგი თანაფარდობით:

$$t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32^{\circ}\text{F}). \quad (4.1)$$

შესაბამისად, ცელსიუსის ტემპერატურის ფარენგეიტის ტემპერატურაში გადაყვანა კი –

$$t_F = \frac{9}{5}t_C + 32^{\circ}\text{F}. \quad (4.2)$$

ფიზიკაში უპირატესობას ანიჭებენ **აბსოლუტურ ტემპერატურას**. მის შესაბამის სკალას **კელვინის ტემპერატურულ სკალას** უწოდებენ. ამ სკალის ერთეულია 1 **კელვინი** კელ. ან (K). იგი მიღებულია ერთეულთა საერთაშორისო სისტემის (SI) ძირითად ერთეულად.

აბსოლუტური ტემპერატურა განისაზღვრება როგორც აირის მოლეკულის სითბური (ქაოსური) მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერჯიის პროპორციული სიდიდე:

$$T = \frac{2}{3k} w_{\text{საშ}} = \frac{2}{3k} \cdot \frac{m_0 v_{\text{საშ}}^2}{2}, \quad (4.3)$$

სადაც k კოეფიციენტს ენერჯიის ერთეული გადაჰყავს ტემპერატურის ერთეულში. მას **ბოლცმანის მუდმივა** ეწოდება და იგი ცდისეულად იქნა განსაზღვრული $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ ჯ/კელ. (4.3) შეიძლება გამოვიყენოთ ნივთიერების თხევადი და მყარი მდგომარეობისთვისაც. მაშინ ქაოსური მოძრაობის კინეტიკური ენერჯიის ნაცვლად უნდა ავიღოთ მოლეკულათა სრული ენერჯიის საშუალო მნიშვნელობა, ოღონდ იმ შემთხვევაში, თუ მოლეკულის მოძრაობა ემორჩილება კლასიკური ფიზიკის კანონებს. კელვინის სკალაზე ათვლა იწყება აბსოლუტური ნულით $0^0 K = -273,16^0 C$ ($0^0 K = -459,67^0 F$). ტემპერატურის აბსოლუტური ნული ტემპერატურის ის მინიმალური ზღვარია, რომელიც შეიძლება ჰქონდეს სხეულს. კლასიკური ფიზიკის თანახმად ამ ტემპერატურაზე მოლეკულათა ქაოსური მოძრაობა წყდება. ქვანტური მექანიკის თანახმად კი აბსოლუტური ნულის დროსაც მოლეკულას გააჩნია მინიმალური ენერჯია ე.წ. ნულოვანი ენერჯია. ნივთიერების გადაციება აბსოლუტურ ნულამდე ტექნიკურად მეტად რთულია. ამჟამად მიღწეულია აბსოლუტური ნულისგან მეტილიონედი კელვინით განსხვავებული ტემპერატურა. საინტერესოა, რომ 1983 წელს ანტარქტიდაში დაფიქსირდა დედამიწაზე ოდესმე არსებული ტემპერატურის ყველაზე დაბალი ნიშნული 184 კელ (-

89,16⁰C). კოსმოსის ყველაზე „ცარიელ“ ნაწილების ტემპერატურაა 2,73კელ (-270,43⁰C). ცელსიუსის და კელვინის სკალის დანაყოფის ფასი ერთმანეთის ტოლია 1⁰K = 1⁰C, ამიტომ კავშირი აბსოლუტურ და ცელსიუსის ტემპერატურებს შორის მოიცემა ფორმულით:

$$T(K) = t^{\circ}C + 273^{\circ}. \quad (4.4)$$

უფრო ზუსტად $T(K) = t^{\circ}C + 273^{\circ},16$

(4.3)-ის თანახმად, კლასიკურ ფიზიკაში აბსოლუტური ტემპერატურა არ შეიძლება იყოს უარყოფითი⁴.

ვთქვათ გვაქვს ერთმანეთისგან სითბურად იზოლირებული წონასწორულ მდგომარეობაში მყოფი A და B სისტემა, $T_A = const$, $T_B = const$. დავუშვათ, $T_A > T_B$,

მაშინ ერთმანეთთან კონტაქტის დროს მათი წონასწორობა დაირღვევა. A -სისტემა დაიწყებს გაცივებას, ხოლო B – გათბობას. ეს პროცესი გაგრძელდება მათი ტემპერატურების გატოლებამდე $T'_A = T'_B$, ანუ მანამ სისტემები არ აღმოჩნდება ერთმანეთის მიმართ სითბურ წონასწორობაში. მრავალი ექსპერიმენტის საფუძველზე დადგენილი იქნა, რომ

- თუ ორი სისტემა ცალ-ცალკე იმყოფება მესამე სისტემასთან სითბურ წონასწორობაში, მაშინ ისინი ერთმანეთის მიმართ სითბურ წონასწორობაშია - **თერმოდინამიკის ნულოვანი კანონი**.

ე.ი. თუ გვაქვს A, B, C სისტემები და $T_A = T_C, T_B = T_C$, მაშინ $T_A = T_B$. ამ კანონის უცნაური ნუმერაცია გამოიწვია იმან, რომ მეცნიერები თერმოდინამიკის I და II კანონების აღმოჩენის შემდეგ მივიდნენ იმ დასკვნამდე, რომ ეს კანონი რიგით მათ წინ უნდა მოეთავსებინათ.

⁴ ქვანტურ ფიზიკაში აბსოლუტური ტემპერატურის ცნება უფრო გაფართოებულია. არაწონასწორულ მდგომარეობაში ქვანტურ სისტემას შეესაბამება უარყოფითი აბსოლუტური ტემპერატურა.

ამოცანა 4.1. ტემპერატურის რა მნიშვნელობები შეესაბამება ცელსიუსის და კელვინის სკალებზე 95⁰F-ს.
ამოხსნა: (4.1)-ის თანახმად

$$t^{\circ}C = \frac{5}{9}(t_F - 32^{\circ}F) = \frac{5}{9}(95 - 32^{\circ}F) = 35^{\circ}C,$$

ხოლო (4.4)-დან $T(K) = 35 + 273 = 308K.$

ამოცანა 4.2. - 10⁰C ჩაწერეთ ფარენგეიტის და კელვინის ტემპერატურებით.

ამოხსნა: (4.2)-ის გამოყენებით გვაქვს:

$$t_F = \frac{9}{5}t_C + 32^{\circ}F = \frac{9}{5}(-10) + 32 = 14^{\circ}F,$$

ხოლო კელვინის სკალით, (4.4)-ის თანახმად,
 $T = -10 + 273 = 263K.$

გ5. წონასწორული და არაწონასწორული პროცესები

თუ სისტემის მახასიათებელი თერმოდინამიკური პარამეტრები მაგ. ტემპერატურა, მის სხვადასხვა ნაწილში სხვადასხვაა, ანუ მისთვის ერთი გარკვეული მნიშვნელობის მინიჭება შეუძლებელია, მაშინ სისტემა იმყოფება **არაწონასწორულ მდგომარეობაში**. ასეთი სისტემის იზოლაციისას მასში განვითარდება ისეთი ცვლილებები – პროცესები, რომ საბოლოოდ მისი პარამეტრები მიიღებს გარკვეულ მნიშვნელობებს და, თუ არა გარეშე ზემოქმედება, ისინი დარჩება უცვლელი რაგინდ დიდი დროის განმავლობაში, ე.ი. სისტემა აღმოჩნდება **წონასწორულ მდგომარეობაში**.

სისტემის გადასვლის პროცესს არაწონასწორული მდგომარეობიდან წონასწორულში **რელაქსაცია** ეწოდება, ხოლო შესაბამის დროს – რელაქსაციის დრო. **რელაქსაციის დრო** ეწოდება იმ დროის ინტერვალს, რომლის განმავლობაშიც იზოლირებული სისტემის რაიმე A პარამეტრის გადახრის სიდიდე $\Delta A = |A - A_0|$ მისი წონასწორული მნიშვნელობის A₀-ის მიმართ $e = 2,71 -$ ჯერ (ნეპერის რიცხვი) მცირდება:

$$\frac{\Delta A}{A_0} = \frac{1}{e} \quad (5.1)$$

სხვადასხვა თერმოდინამიკური პარამეტრისთვის რელაქსაციის დრო განსხვავებულია. სისტემის რელაქსაციის დროდ იღებენ მათგან უდიდესს. სისტემის გადასვლა ერთი მდგომარეობიდან მეორეში ყოველთვის დაკავშირებულია პარამეტრების ცვლილებასთან, ამიტომ რეალურად პროცესები არაწონასწორულია. მაგრამ,

➤ *თუ პროცესი ისე მიმდინარეობს რომ ნებისმიერი ეტაპისთვის თითოეული პარამეტრი ასწრებს გათანაბრებას მთელ მოცულობაში, მაშინ პროცესი წონასწორულად ითვლება.*

ე.ი. წონასწორული პროცესი წარმოადგენს წონასწორულ მდგომარეობათა უწყვეტ ჯაჭვს. თუ ეს მოთხოვნა რომელიმე ეტაპზე დაირღვა, მაშინ მთლიანობაში პროცესი არაწონასწორულია. განმარტებიდან გამომდინარე იდეალურად წონასწორული შეიძლება იყოს მხოლოდ უსასრულოდ ნელა მიმდინარე პროცესი. იმ შემთხვევაში თუ რეალური პროცესი საკმაოდ ნელა მიმდინარეობს შესაძლებელია მისი წონასწორულ (უფრო ზუსტად კვაზი წონასწორულ) პროცესად ჩათვლა. წონასწორული პროცესისას შესაძლებელია მის თერმოდინამიკურ პარამეტრებს შორის კავშირის დადგენა და პროცესის აღწერა როგორც ანალიტიკურად- განტოლების სახით, ასევე გრაფიკულადაც.

თუ სისტემაში არ მოქმედებს დისიპატიური ძალები, მაშინ შესაძლებელია წონასწორული პროცესი წარვმართოთ უკუმიმართულებით, რომლის დროსაც სისტემა გაივლის ყველა იმ მდგომარეობას, რომელიც მან უკვე გაიარა, მხოლოდ შებრუნებული მიმდევრობით. ასეთ შემთხვევაში პროცესს *შექცევადი წონასწორული პროცესი* ეწოდება.

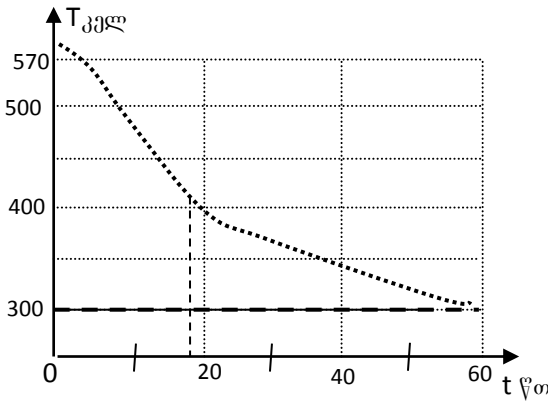
შექცევადი წონასწორული პროცესი სისტემაში შეიძლება განვითარდეს როგორც პირდაპირი, ასევე უკუმიმართულებით და სისტემა ისე დაბრუნდეს პირვანდელ მდგომარეობაში, რომ მასში და გარემოში არ დარჩეს რაიმე ცვლილება. შექცევადი პროცესები

რეალური პროცესების იდეალიზაციაა. მათი განხილვა მნიშვნელოვანია ორი მიზეზის გამო:

1. ბუნებასა და ტექნიკაში მრავალი პროცესი შექცევადია.
2. შექცევადი პროცესები გაცილებით ეკონომიურია, გააჩნიათ მაქსიმალური მქკ, რაც საშუალებას იძლევა ვიპოვოთ რეალური ძრავების მქკ-ს გაზრდის გზები.

თერმოდინამიკის ყველა რაოდენობრივი შედეგი ზუსტად მიესადაგება წონასწორულ შექცევად პროცესებს. ჩვენ შემდგომში მხოლოდ ასეთ პროცესებს განვიხილავთ.

ამოცანა 5.1. სისტემის წონასწორულ მდგომარეობას შეესაბამება 300კელ. ამჟამად სისტემის ტემპერატურაა 570კელ და მიმდინარეობს მისი ნელი გაციება გრაფიკზე



მოცემული მრუდის მიხედვით. გამოთვალეთ სისტემის ის ტემპერატურა, რომლისთვისაც შეიძლება ჩაითვალოს, რომ იგი დაუბრუნდა თავის წონასწორულ

მდგომარეობას. იპოვეთ რელაქსაციის დრო.

ამოხსნა: (5.1)-ის თანახმად $\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{1}{e}$, ანუ $\frac{\Delta T}{300} = \frac{1}{e}$

$\Delta T = 300/2,71 \approx 110$ კელ. ზემოთქმულის თანახმად, როდესაც სისტემა გაცივდება $300+110=410$ კელ-მდე, ითვლება რომ ის გადავიდა წონასწორობაში. გრაფიკის შესაბამისად რელაქსაციის დროის ხანგრძლივობაა ≈ 18 წთ.

§6. იდეალური აირის მოლეკულურ - კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება

წონასწორობაში მყოფი სისტემის მახასიათებელი პარამეტრები გარკვეული კანონზომიერებითაა დაკავშირებული ერთმანეთთან. ერთ-ერთის ცვლილებას თან სდევს სხვა პარამეტრების შესაბამისი ცვლილება. ამ კავშირის ანალიტიკურ ფორმას სისტემის მდგომარეობის განტოლება ეწოდება. მოცემული m მასის აირის მდგომარეობა განისაზღვრება სამი პარამეტრით: წნევით – p , მოცულობით – V , აბსოლუტური ტემპერატურით – T . მათი ფუნქციონალური დამოკიდებულება $F(p,V,T) = 0$ წარმოადგენს აირის მდგომარეობის განტოლებას⁵.

ჩვენ განვიხილავთ აირის გამარტივებულ მოდელს - იდეალურ აირს, რომელიც აკმაყოფილებს ორ მოთხოვნას:

1. აირის მოლეკულათა ჯამური მოცულობა გაცილებით მცირეა აირის მიერ დაკავებულ მოცულობაზე.
2. ორი მოლეკულის ურთიერთქმედების რადიუსი გაცილებით ნაკლებია მათ შორის საშუალო მანძილზე.

ე.ი.

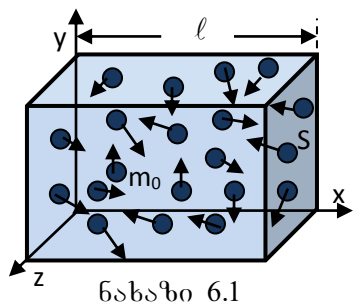
- **იდეალური აირი ეწოდება აირის ისეთ მოდელს, სადაც მოლეკულები წარმოდგენილია როგორც ნივთიერი წერტილები და მათ შორის ურთიერთქმედება (გარდა შეჯახების მომენტისა) უგულებელყოფილია.**

ამ მოთხოვნებს რეალური აირები სრულად აკმაყოფილებს დიდი გაიშვიათების (დაბალი წნევის) და მაღალი ტემპერატურის პირობებში. შევნიშნოთ, რომ აირის ტემპერატურა მაღალია, თუ იგი გაცილებით აღემატება მისი კონდენსაციის – გათხევადების ტემპერატურას, მაგ. ჰაერი ნორმალურ პირობებში ($p = 1,013 \cdot 10^5$ პა, $T = 273K$). მაღალი სიზუსტით შეიძლება

⁵ თხევად და მყარ მდგომარეობაში მყოფი სისტემის თერმოდინამიკურ პარამეტრთა რაოდენობა გაცილებით მეტია, მათ შორის კავშირი და მდგომარეობის განტოლების ჩაწერა ძალიან ძნელია.

ჩვეულებრივ იდეალურ აირთა ნარევედ⁶. იდეალური აირის განმარტებიდან გამომდინარე, მისი წნევა ტოლია ჭურჭლის კედლის ფართით ერთეულზე მოლეკულების შეჯახების შედეგად წარმოებული საშუალო ნორმალური ძალის სიდიდის: $p = \frac{F}{S}$, ხოლო მოცულობა – მის მიერ დაკავებული ჭურჭლის მოცულობის.

კინეტიკური თეორიის გამოყენებით გამოვთვალოთ წონასწორობაში მყოფი ($T = const$) იდეალური აირის წნევა. სიმარტივისთვის დავუშვათ, რომ იგი იმყოფება მართკუთხა პარალელეპიპედის ფორმის ჭურჭელში (ნახ.



6.1). ცხადია, მოლეკულათა შეჯახებას კედლებზე აბსოლუტურად დრეკადი ხასიათი აქვს. წინააღმდეგ შემთხვევაში აირის მოლეკულათა კინეტიკური ენერგია განუწყვეტლივ შეიცვლილებოდა, შესაბამისად შეიცვლებოდა ტემპერატურაც და მდგომარეობა

არაწონასწორული იქნებოდა.

ჭურჭლის მარჯვენა S ფართის კედელზე მოლეკულის შეჯახებისას შეიცვლება მისი იმპულსის მხოლოდ p_x მდგენელი

$$\Delta p_x = -m_0 v_x - (+m_0 v_x) = -2m_0 v_x$$

სიდიდით. იმპულსის მუდმივობის კანონის თანახმად, კედლის იმპულსის შესაბამისი ცვლილება იქნება $+2m_0 v_x$. ამ მოლეკულის შემდგომი დაჯახება განხორციელდება მოპირდაპირე კედლიდან არეკვლისა და უკან დაბრუნების შემდეგ $\Delta t = 2l/v_x$ დროითი ინტერვალით.

⁶ აზოტი, რომელიც ჰაერის ძირითადი კომპონენტია (~78%) თხევადდება 77K (-196°C) ტემპერატურაზე და $p = 3,35 \cdot 10^5$ პა წნევის დროს.

ნიუტონის II კანონის თანახმად ამ მოლეკულის მხრიდან კედელზე მოქმედი საშუალო ძალა იქნება

$$f_x = \frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2m_0 v_x}{\Delta t} = \frac{m_0 v_x^2}{\ell}.$$

მოლეკულა მოძრაობისას შეიძლება შეეჯახოს სხვა კედლებსაც, მაგრამ ამ დროს იმპულსის p_x მდგენელი არ იცვლება, იგი შეიძლება შეიცვალოს მხოლოდ სხვა მოლეკულებთან შეჯახებისას, მაგრამ ეს ცვლილება გადაეცემა მეორე მოლეკულას, ამიტომ, როდესაც ჩვენ შევკრიბავთ ყველა მოლეკულის იმპულსის ცვლილებებს, ეს თავისთავად იქნება გათვალისწინებული. ასე რომ, თუ ჭურჭელში N რაოდენობის მოლეკულაა, მათ მიერ კედელზე წარმოებული საშუალო წნევის ძალა, იქნება:

$$F_x = \sum_{i=1}^N f_x = \frac{m_0}{\ell} \sum_{i=1}^N v_{xi}^2$$

თუ ამ განტოლებას გავამრავლებთ და გავყოფთ N -ზე, მივიღებთ:

$$F_x = N \frac{m_0}{\ell} v_{xbs}^2, \quad (6.1)$$

აქ $v_{xbs}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N v_{xi}^2}{N}$, სიჩქარის v_x მდგენელის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობაა.

პითაგორას თეორემის თანახმად $v_{bs}^2 = v_{xbs}^2 + v_{ybs}^2 + v_{zbs}^2$. სიდიდეს $v_{bs} = \sqrt{v_{bs}^2}$ - საშუალო კვადრატული სიჩქარე ეწოდება. რადგან აირი წონასწორობაშია, მოლეკულათა მოძრაობისას ყველა მიმართულება თანასწორუფლებიანია, ამიტომ

$$v_{xbs}^2 = v_{ybs}^2 = v_{zbs}^2 = \frac{v_{bs}^2}{3},$$

რის გამოც (6.1) შემდეგ სახეს მიიღებს: $F_x = \frac{1}{3} N \frac{m_0 v_{bs}^2}{\ell}$,

ხოლო ჭურჭლის კედელზე წარმოებული წნევა ანუ იდეალური აირის წნევა იქნება:

$$p = \frac{F_x}{S} = \frac{1}{3} N \frac{m_0 v_{\text{საშ}}^2}{\ell S} = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_{\text{საშ}}^2,$$

სადაც $V = \ell S$ ჭურჭლის მოცულობაა, ხოლო

$$n = \frac{N}{V} \quad (6.2)$$

აირის კონცენტრაციაა, ანუ მოლეკულათა რაოდენობა მოცულობის ერთეულში. ე.ი.,

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_{\text{საშ}}^2. \quad (6.3)$$

ცხადია მოლეკულის მასის და მისი კონცენტრაციის ნამრავლი მოცულობის ერთეულის მასაა-სიმკვრივეა

$\rho = n m_0$, ამიტომ

$$p = \frac{1}{3} \rho v_{\text{საშ}}^2 \quad (6.4)$$

$\frac{m_0 v_{\text{საშ}}^2}{2} = w_{\text{საშ}}$ მოლეკულის ქაოსური მოძრაობის

საშუალო კინეტიკური ენერჯიაა, რისი გათვალისწინებითაც (6.3) მიიღებს სახეს:

$$p = \frac{2}{3} n w_{\text{საშ}}. \quad (6.5)$$

თუ (6.5)-ში შევიტანთ (4.3)-ს, გვექნება:

$$p = n k T, \quad (6.6)$$

➤ იდეალური აირის წნევა დამოკიდებულია აირის აბსოლუტურ ტემპერატურასა და კონცენტრაციაზე.

(6.6) *იდეალური აირის მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლებაა.* ამ განტოლების სისწორე მრავალი ექსპერიმენტითაა შემოწმებული. ჩვენ ის მივიღეთ თეორიულად აირის მოლეკულური აღნაგობის გათვალისწინებით, რაც კიდევ ერთხელ ადასტურებს მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის სამართლიანობას.

(6.2)-ის გამოყენებით (6.6) ასე ჩაიწერება:

$$pV = N k T. \quad (6.7)$$

(6.7) იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებაა, რადგან იგი ამყარებს კავშირს მოცემული მასის (მოლეკულათა რაოდენობის) იდეალური აირის p , V , T პარამეტრებს შორის.

ამოცანა 6.1. გამოვთვალოთ 2 მოლი ჟანგბადის მოლეკულათა სრული კინეტიკური ენერგია, თუ ტემპერატურაა 27°C .

ამოხსნა: (4.3)-ის თანახმად ერთი მოლეკულის საშუალო კინეტიკური ენერგია

$$w_{\text{საშ}} = \frac{3kT}{2} = \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2} = 6,21 \cdot 10^{-21} \text{ჯ.}$$

ენერგიის შეკრებადობიდან გამომდინარე $W_{\text{კ}} = Nw_{\text{საშ}}$,

სადაც $N = \nu N_A = 2 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \approx 1,2 \cdot 10^{24}$, მაშინ

$$W_{\text{კ}} = 1,2 \cdot 10^{24} \cdot 6,21 \cdot 10^{-21} \approx 7,5 \text{კჯ}$$

ამოცანა 6.2. ღია კოსმოსში ტემპერატურაა $3,4\text{K}$, ხოლო ნივთიერების (წყალბადის) კონცენტრაცია 1 ატომი 1სმ^3 -ში. ვიპოვოთ ატომთა საშუალო კვადრატული სიჩქარე ($m_0 = 1,66 \cdot 10^{-27}$ კგ).

$$\text{ამოხსნა: } \rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 1}{10^{-6}} = 1,66 \cdot 10^{-21} \text{კგ/მ}^3.$$

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{10^{-6}} = 10^6 \text{მ}^{-3},$$

ხოლო წნევა (6.6)-ის თანახმად იქნება

$$p = 10^6 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3,4 = 4,7 \cdot 10^{-17} \text{პა.}$$

(6.4)-დან

$$v_{\text{საშ,კვ}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 4,7 \cdot 10^{-17}}{1,66 \cdot 10^{-21}}} = 2,9 \cdot 10^2 \text{მ/წმ.}$$

ამოცანა 6.3. გამოვთვალოთ აზოტის მოლეკულების კონცენტრაცია და ტემპერატურა, თუ მისი წნევაა $0,1\text{მგპა}$, საშუალო კვადრატული სიჩქარეა 800მ/წმ ($M_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ).

ამოხსნა: (6.3)-ის თანახმად $p = \frac{1}{3} n \frac{M}{N_A} v_{\text{საშ}}^2$, საიდანაც

$$n = \frac{3pN_A}{Mv_{\text{საშ}}^2} \quad n = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{28 \cdot 10^{-3} \cdot 64 \cdot 10^4} \approx 10^{25} \text{მ}^{-3}. \quad (6.6)\text{-დან}$$

$$T = \frac{p}{nk} = \frac{10^5}{10^{25} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} = 725 \text{კელ.}$$

§7. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების შედეგები

ჩავწეროთ იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება (6.7) სხვადასხვა სახით. ვისარგებლოთ მოლეკულის რიცხვის (1.1) განმარტებით. მივიღებთ:

$pV = \nu N_A kT$, სადაც ავოგადროს რიცხვისა და ბოლცმანის მუდმივას ნამრავლს $N_A k = 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} = 8,31 \text{ჯ/მოლ.K}$ აირთა უნივერსალური მუდმივას უწოდებენ. აღინიშნება R -ით.

$R = 8,31 \text{ჯ/მოლ.K}$. მაშასადამე, გვექნება

$$pV = \nu RT \quad (7.1)$$

ან

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (7.2)$$

თუ პროცესის მიმდინარეობისას იდეალური აირის მასა არ იცვლება, (არ ხდება აირის ჩატუმბვა, ან გაჟონვა), მაშინ (7.2)-ის თანახმად

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R = \text{const}. \quad (7.3)$$

დაეუშვათ მოცემული მასის აირში პროცესის რაიმე ორ ეტაპზე თერმოდინამიკური პარამეტრები იყო (p_1, V_1, T_1) და (p_2, V_2, T_2) , მაშინ (7.3)-დან გამომდინარე, ადგილი აქვს დამოკიდებულებას:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (7.4)$$

(6.7), (7.1), (7.2) და (7.3) წარმოადგენს იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების სხვადასხვა ინტერპრეტაციას, მათ ხშირად **კლაპეირონის განტოლებას** (რუსულ ლიტერატურაში **კლაპეირონ - მენდელეევის განტოლებას**) უწოდებენ, ფრანგი ფიზიკოსის კლაპეირონის იდეალური აირის ექსპერიმენტულ კვლევებში დამსახურების გამო.

(7.3)-ში სიმკვრივის ფორმულის $\rho = m/V$ გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\rho = \frac{Mp}{RT}, \quad (7.5)$$

➤ **იდეალური აირის სიმკვრივე პირდაპირპროპორციულია წნევისა და უკუპროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურის.**

დავუშვათ, გვაქვს იდეალურ აირთა ნარევი, რომლის კომპონენტთა მოლეკულების რაოდენობაა N_1, N_2, \dots , მაშინ (6.7)-ის თანახმად

$$pV = (N_1 + N_2 + \dots)kT = N_1kT + N_2kT + \dots = p_1V + p_2V + \dots = (p_1 + p_2 + \dots)V$$

საიდანაც

$$p = p_1 + p_2 + \dots = \sum_i p_i. \quad (7.6)$$

p_1, p_2, \dots თითოეული აირის პარციალური (ლათ. ნაწილობრივი) წნევაა. **პარციალური წნევა** ეწოდება იმ წნევას, რომელსაც შექმნიდა ცალკეული აირი, მხოლოდ ის რომ ყოფილიყო ჭურჭელში. (7.6) **დალტონის კანონის** სახელწოდებითაა ცნობილი:

➤ **აირთა ნარევის წნევა შემადგენელ კომპონენტთა პარციალური წნევების ჯამის ტოლია.**

მაგ. ატმოსფერული წნევა წარმოადგენს ჰაერის კომპონენტების აზოტის, ჟანგბადის, არგონის და სხვა კომპონენტთა პარციალური წნევების ჯამს.

ჩავწეროთ (6.7) ორი იდეალური აირისთვის

$$p_1V_1 = N_1kT_1 \quad \text{და} \quad p_2V_2 = N_2kT_2, \quad \text{დავუშვათ}$$

$p_1 = p_2$, $V_1 = V_2$, $T_1 = T_2$ - ს, მაშინ $N_1 = N_2$. ეს შედეგი

წარმოადგენს *ავოგადროს კანონს*:

➤ *თუ იდეალურ აირებს გააჩნია ერთნაირი წნევა, მოცულობა და ტემპერატურა, მაშინ მათი მოლეკულების რაოდენობაც ერთნაირია.*

გამოვთვალოთ რა მოცულობას დაიკავეს 1 მოლი იდეალური აირი ნორმალურ პირობებში (7.1)-დან

$$V = \frac{\nu RT}{p} = \frac{1 \cdot 8,31 \cdot 273}{1,013 \cdot 10^5} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ მ}^3.$$

მას ტრადიციულად ლიტრებში გამოსახავენ $V = 22,4$ ლ ($\text{ლ} = 10^{-3} \text{მ}^3$), ე.ი.

➤ *ნებისმიერი იდეალური აირის ერთი მოლი ნორმალურ პირობებში იკავებს 22,4 ლ მოცულობას.*

ამოცანა 7.1. ბალონში იმყოფება 300 კელ ტემპერატურის აირი. რამდენჯერ შეიცვლება აირის წნევა, თუ მისი 20% გამოუშვეს გარეთ, ხოლო ტემპერატურა აწიეს 100 კელ-ით.

ამოხსნა: ჩავწეროთ (7.2) აირის ორი მდგომარეობისთვის

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} RT_1 \quad ; \quad p_2 V = \frac{0,8m_1}{M} R(T_1 + 100). \quad \text{მათი}$$

შეფარდებით ვღებულობთ:

$$\frac{p_2}{p_1} = 0,8 \frac{(T_1 + 100)}{T_1} \quad \frac{p_2}{p_1} = 0,8 \frac{400}{300} \quad \frac{p_2}{p_1} = 1,07$$

გაიზარდა 1,07-ჯერ.

ამოცანა 7.2. ჰაერის რა მასაა 600 მ³ მოცულობის შენობაში 0°C-ზე. როგორ შეიცვლება ჰაერის მასა ტემპერატურის 25°C-მდე გაზრდისას, თუ ატმოსფერული წნევა ნორმალურია $p = 1,013 \cdot 10^5$ პა.

ამოხსნა: (7.2)-დან $m = \frac{MpV}{RT}$ (1),

$M = 29 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ, $T_1 = 273 + 0 = 273K$,

$$m_1 = \frac{29 \cdot 10^{-3} \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 10^2}{8,31 \cdot 273} = 775 \text{ კგ.}$$

$T_2 = 273 + 25 = 298K$. (1)-დან

$m_2 = 708$ კგ. შენობას დატოვებს $\Delta m = 775 - 708 = 67$ კგ ჰაერი.

ამოცანა 7.3. რა რაოდენობის ბალონები დაგვჭირდება 1500მ^3 მოცულობის აეროსტატის გასაფრთხილებად 320 კელ ტემპერატურისა და 10^5 პა წნევის პირობებში? თითოეული ბალონის მოცულობაა $3,4 \cdot 10^{-2} \text{მ}^3$, მათში ჰელიუმის წნევაა $8 \cdot 10^6$ პა, ხოლო ტემპერატურაა 300 კელ.

ამოხსნა: (7.4)-ის თანახმად $V_1 = \frac{P_2 V_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}$.

$$V_1 = \frac{10^5 \cdot 1500}{320} \cdot \frac{300}{8 \cdot 10^6} = 17\text{მ}^3. \text{ ბალონთა რაოდენობაა}$$

$$N = \frac{V_1}{V_0} = \frac{17}{3,4 \cdot 10^{-2}} = 500 \text{ (} V_0 \text{-ერთი ბალონის მოცულობა)}$$

ამოცანა 7.4. ბალონში მოთავსებული ჟანგბადის და არგონის ნარევის წნევაა $1,1 \cdot 10^6$ პა. იპოვეთ თითოეულის პარციალური წნევა, თუ არგონი ნარევის მასის 20% -ია. ($M_{Ar} = 40 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ,

$M_{O_2} = 32 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ).

ამოხსნა: გამოვთვალოთ ნარევის მოლური მასა, (1.1)-ის თანახმად $M = m/\nu$, სადაც მოლური რიცხვი

$$\nu = \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{m_{Ar}}{M_{Ar}} = \frac{0,8m}{M_{O_2}} + \frac{0,2m}{M_{Ar}} = \frac{0,8m}{32 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,2m}{40 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,3m}{10 \cdot 10^{-3}}$$

$$\text{მაშინ } M = \frac{m}{0,3m} 10 \cdot 10^{-3} \approx 33,3 \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მოლ. (7.2)}$$

ჩავწეროთ ნარევისა და თითოეული კომპონენტისთვის:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (1) \quad p_{O_2} V = \frac{0,8m}{M_{O_2}} RT \quad (2)$$

$$p_{Ar} V = \frac{0,2m}{M_{Ar}} RT \quad (3)$$

(2)-ის და (3)-ის (1)-თან შეფარდებით ვღებულობთ:

$$\frac{p_{O_2}}{p} = \frac{0,8 \cdot M}{M_{O_2}} \approx 0,832; \quad \frac{p_{Ar}}{p} = \frac{0,2 \cdot M}{M_{Ar}} \approx 0,166, \text{ შესაბამისად}$$

$p_{O_2} \approx 9,15 \cdot 10^5 \text{ პა}, \quad p_{Ar} \approx 1,82 \cdot 10^5 \text{ პა},$ მართლაც, დალტონის კანონის თანახმად, $p = p_{O_2} + p_{Ar}.$

§8. იზოპროცესები იდეალურ აირში

იზოპროცესები ეწოდება ისეთ პროცესებს, რომლებიც შეიძლება განვითარდეს უცვლელი მასის მქონე სისტემაში მისი ერთ-ერთი პარამეტრის მუდმივობის პირობებში. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებიდან $F(m, p, V, T) = 0$ გამომდინარე, ჩვენ განვიხილავთ იდეალურ აირში სამ იზოპროცესს, ესენია: 1. იზოთერმული ($T = \text{const}$); 2. იზობარული; ($p = \text{const}$); 3. იზოქორული ($V = \text{const}$). ისინი მრავალი ექსპერიმენტით შესწავლილი იქნა ბოილის, გეი-ლუსაკის და შარლის მიერ და მათ შედეგებს ტრადიციულად მათსავე კანონებს უწოდებენ. ამ კანონებს ჩვენ თეორიულად მივიღებთ კლაპეირონის (7.4) განტოლების გამოყენებით.

1. **იზოთერმული** პროცესისას $T_1 = T_2 = \text{const}$, მაშინ (7.4)-დან გვექნება:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2} \quad (8.1)$$

➤ **მოცემული მასის იდეალური აირის წნევა იზოთერმული პროცესის დროს მოცულობის უკუპროპორციულია – ბოილის კანონი.**

შესაბამის გრაფიკს ნახ. 8.1-ზე *იზოთერმა* ეწოდება.

2. *იზობარული* პროცესისას $p_1 = p_2 = \text{const}$, მაშინ (7.4)-დან გვექნება:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (8.2)$$

- *მოცემული მასის იდეალური აირის მოცულობა იზობარული პროცესის დროს აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია – გეი-ლუსაკის კანონი.*

შესაბამის გრაფიკს ნახაზ 8.2-ზე *იზობარა* ეწოდება.

3. *იზოქორული* პროცესისას $V_1 = V_2 = \text{const}$, მაშინ (7.4)-დან გვექნება:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (8.3)$$

- *მოცემული მასის იდეალური აირის წნევა იზოქორული პროცესის დროს აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია – შარლის კანონი.*

შესაბამის გრაფიკს ნახ. 8.3-ზე *იზოქორა* ეწოდება.

როგორც აღვნიშნეთ, დაბალი ტემპერატურის და მაღალი წნევის პირობებში თავს იჩენს აირის მოლეკულათა ურთიერთქმედება, რის გამოც აირის მიმართ იდეალური აირის მოდელის და მისი კანონების გამოყენება არასწორია, ამიტომ გრაფიკებზე შესაბამისი უბნები წყვეტილი წირითაა ნაჩვენები.

პრაქტიკაში ხშირად იყენებენ აირის *იზოთერმული კუმულაციის კოეფიციენტს*. იგი გვიჩვენებს პროცესისას აირზე გარე წნევის ყოველმხრივ თანაბრად 1ატმ-ით (10^5 პა) იზოთერმულად გაზრდისას აირის მოცულობის ფარდობით შემცირებას:

$$\delta = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_T \quad (8.4)$$

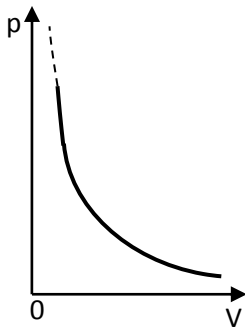
იზოთერმული პროცესისას, (8.1)-ის თანახმად,

$d(pV)=0$, საიდანაც $\frac{dV}{dp} = -\frac{V}{p}$, შევიტანოთ (8.4)-ში და

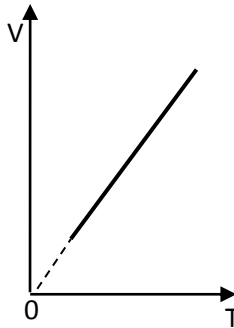
მივიღებთ:

$$\delta = \frac{1}{p},$$

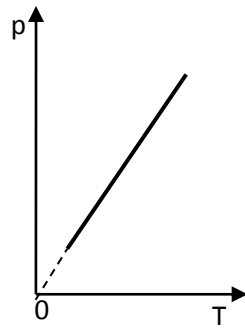
➤ იდეალური აირის იზოთერმული კუმშვადობის კოეფიციენტი წნევის უკუპროპორციულია, ანუ, მოცემულ ტემპერატურაზე რაც მეტია აირის წნევა, მით ძნელად კუმშვადია იგი.



ნახაზი 8.1



ნახაზი 8.2



ნახაზი 8.3

ამოცანა 8.1. 0,25მ³ მოცულობის ჭურჭელში აირის წნევაა 4.10⁵პა. 07,5მ³ მოცულობის ჭურჭელში კი 8.10⁵პა. რა წნევა დამყარდება მათი წვრილი მილით შეერთების შემდეგ, თუ ორივე ჭურჭელში ტემპერატურა ერთნაირია?

ამოხსნა: დაღტონის კანონის თანახმად დამყარებული წნევა

$$p = p_1^* + p_2^* \quad (1),$$

სადაც p_1^* , p_2^* გაერთიანებულ ჭურჭელში აირთა პარციალური წნევებია.

რადგან ჭურჭელთა შეერთებისას აირთა გაფართოება იზოთერმულად მიმდინარეობს, ამიტომ (8.1)-ის თანახმად ადგილი აქვს ტოლობებს:

$$p_1 V_1 = p_1^* (V_1 + V_2) \quad \text{და} \quad p_2 V_2 = p_2^* (V_1 + V_2)$$

საიდანაძე
$$p_1^* = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot p_1 \quad (2)$$

და
$$p_2^* = \frac{V_2}{V_1 + V_2} \cdot p_2 \quad (3)$$

(1)-ში ჩასმით ვღებულობთ:

$$p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2} \quad (4)$$

$$p = \frac{4 \cdot 0,25 + 8 \cdot 0,75}{0,25 + 0,75} \cdot 10^5 = 7 \cdot 10^5 \text{ პა.}$$

ამოცანა 8.2. ავტომობილის საბურავში 10°C -ის დროს დამატებითი წნევაა 200 კპა . ავტომობილის მოძრაობისას საბურავის ტემპერატურა 40°C -მდე გაიზარდა. განსაზღვრეთ ამ ტემპერატურაზე წნევა საბურავში, თუ ატმოსფერული წნევაა $1,01 \cdot 10^5 \text{ პა}$.

ამოხსნა: საბურავის მოცულობა პრაქტიკულად არ

იცვლება, ე.ი. $V_1 = V_2$, და (8.3)-ის თანახმად, $p_2 = \frac{p_1}{T_1} T_2$,

$$p_1 = 2 \cdot 10^5 + 1,01 \cdot 10^5 = 3,01 \cdot 10^5 \text{ პა,}$$

$$T_1 = 283 \text{ K}, T_2 = 313 \text{ K}, p_2 = \frac{3,01 \cdot 10^5}{283} \cdot 313 = 3,33 \cdot 10^5 \text{ პა,} \quad \text{ე.ი.}$$

დამატებითი წნევის მნიშვნელობა

$$\Delta p = p_2 - p_{\text{ატმ}} = 2,32 \cdot 10^5 \text{ პა,} \quad 15\% \text{-ით მეტია საწყისზე.}$$

ამოცანა 8.3. ჰორიზონტალურად მდებარე დახშული ცილინდრის შუაში მყოფება $2 \cdot 10^{-2} \text{ მ}^2$ ფართობის 120 კგ მასის დგუში. ჰაერის წნევა დგუშის ორივე მხარეს 10^5 პა -ის ტოლია. რამდენით გადაადგილდება დგუში ცილინდრის ვერტიკალურ მდგომარეობაში გადაყვანისას და რა წნევა დამყარდება დგუშის ორივე მხარეს. ტემპერატურა მუდმივია, ხოლო ცილინდრის სიგრძეა 1 მ .

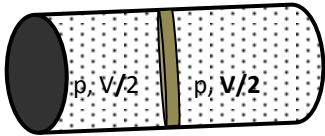
ამოხსნა: ცილინდრის ვერტიკალურ მდგომარეობაში გადაყვანისას მის ზედა ნაწილში ჰაერი

იზოთერმულად ფართოვდება, ხოლო ქვედა ნაწილში იკუმშება. ამიტომ ბოილ-მარიოტის კანონის თანახმად:

$$pV/2 = p_1(V/2 + \Delta V), \quad pV/2 = p_2(V/2 - \Delta V). \text{ ანუ}$$

$$p\ell/2 = p_1(\ell/2 + \Delta\ell), \quad (1)$$

$$p\ell/2 = p_2(\ell/2 - \Delta\ell) \quad (V = \ell S) \quad (2) \text{ სადაც}$$



$$p_2 = p_1 + mg/S \quad (3). \quad (1)\text{-დან}$$

$$p_1 = \frac{p\ell}{2(\ell/2 + \Delta\ell)} \quad (4)$$

შევიტანოთ (3)-ში

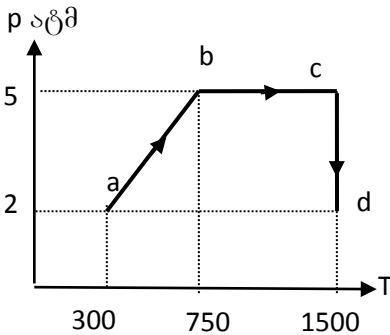
$$p_2 = \frac{p\ell}{2(\ell/2 + \Delta\ell)} + \frac{mg}{S} \quad (5)$$

თუ p_2 -ს შევიტანოთ (2)-ში და ამოვხსნით $\Delta\ell$ -ს მიმართ $\Delta\ell = 0,14\text{მ}$. $\Delta\ell$ -ის მნიშვნელობის გათვალისწინებით (4) და (5) დან ვღებულობთ:

$$p_1 = 0,78 \cdot 10^5 \text{ პა}, \quad p_2 = 1,38 \cdot 10^5 \text{ პა}.$$

ამოცანა 8.4. 10ლ მოცულობის იდეალური აირის წნევაა 2ატმ, ტემპერატურა 27°C. იგი იზოქორულად გაათბეს 450°C-ით, ხოლო შემდეგ იზობარულად 1227°C-მდე. ბოლოს იზოთერმული პროცესით აღადგინეს

პირვანდელი წნევა. გამოვთვალოთ თითოეული ეტაპის ბოლოს (p, V, T) პარამეტრები. ავაგოთ (p, T) , (V, T) , (p, V) დიაგრამები.



ამოხსნა: საწყის ა

მდგომარეობას შეესაბამება $p_a = 2\text{ატმ}$, $V_a = 10\text{ლ}$, $T_a = 300\text{კელ}$. $a \rightarrow b$ პროცესი იზოქორულია,

ე.ი. $V_b = 10\text{ლ}$, $T_b = 300 + 450 = 750\text{კელ}$,

$$\frac{P_a}{T_a} = \frac{P_b}{T_b} \text{ საიდანაც } P_b = \frac{P_a}{T_a} T_b = \frac{2}{300} 750 = 5 \text{ ატმ.}$$

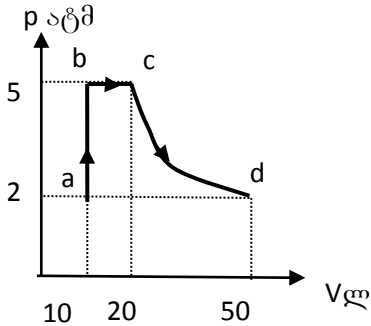
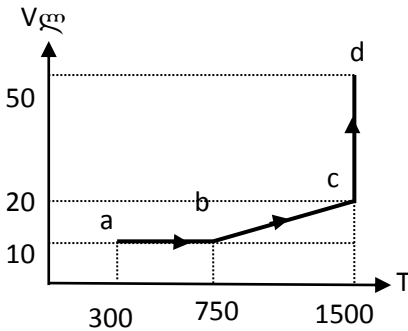
b→c პროცესი იზობარულია, ე.ი. $p_c = 5 \text{ ატმ}$,
 $T_c = 1227 + 273 = 1500 \text{ კელ}$,

$$\frac{V_b}{T_b} = \frac{V_c}{T_c} \text{ საიდანაც } V_c = \frac{V_b}{T_b} T_c = \frac{10}{750} 1500 = 20 \text{ ლ.}$$

c→d პროცესი იზოთერმულია, ე.ი. $T_d = 1500 \text{ კელ}$, $p_d = 2 \text{ ატმ}$,

$$\frac{P_d}{p_c} = \frac{V_c}{V_d} \text{ საიდანაც } V_d = \frac{p_c}{p_d} V_c = \frac{5}{2} 20 = 50 \text{ ლ.}$$

a(2 ატმ, 10 ლ, 300 კელ), b(5 ატმ, 10 ლ, 750 კელ), c(5 ატმ, 20 ლ, 1500 კელ), d(2 ატმ, 50 ლ, 1500 კელ).



§9. ატმოსფერული წნევა. ბარომეტრული შორეულა. პოლცმანის განაწილება

ატმოსფეროს (ბერძ. ორთქლის ბურთი) – უწოდებენ აირთა იმ ნარევს, რომელიც დედამიწის გრავიტაციის გამო გარს ერტყმის დედამიწას და მასთან ერთად გადაადგილდება კოსმოსში. მისი მასაა $\approx 5,19 \cdot 10^{15}$ გ. დედამიწის ზედაპირის მახლობლობაში ატმოსფეროს შემადგენლობა ასეთია: აზოტი – 78,1%, ჟანგბადი – 21%, არგონი – 0,9%. დანარჩენ უმნიშვნელო ნაწილს ქმნის ნახშირორჟანგი, წყალბადი, ჰელიუმი და ა.შ. ეს თანაფარდობა მცირედ იცვლება დედამიწის ზედაპირიდან ~ 100 კმ სიმაღლეზე (ჰომოსფერო), (ატმოსფეროს იმ ნაწილს

სადაც ეს თანაფარდობა დაცულია *ჰაერს* უწოდებენ) შემდეგ ირღვევა, თანდათან მატულობს მსუბუქ აირთა ჰელიუმისა და წყალბადის წილი, ხოლო 3000კმ-ის ზევით იწყება კოსმოსი.

დედამიწის გრავიტაციის გამო ჰაერის ზედა ფენები აწეება ქვედა ფენებს რაც საბოლოოდ ქმნის ატმოსფერულ წნევას. ჩვენი მიზანია მივიღოთ ატმოსფერული წნევის დედამიწის ზედაპირიდან სიმაღლეზე დამოკიდებულების კანონი, რისთვისაც დაეუშვათ ორი გამარტივება:

1. ატმოსფერო განვიხილოთ, როგორც დედამიწის სტაციონარულ (დროში უცვლელ) გრავიტაციულ ძალთა ველში მყოფ იდეალურ აირთა ნარევი (§7),
2. ატმოსფეროს ტემპერატურა არ არის დამოკიდებული სიმაღლეზე, $T = \text{const}$, ე.ი. ატმოსფერო წონასწორულ მდგომარეობაშია.

დედამიწის ზედაპირიდან h სიმაღლეზე ატმოსფერული წნევა p განპირობებულია მის ზემოთ მყოფი ჰაერის ფენის წონით, რის გამოც სიმაღლის ზრდასთან ერთად $h + dh$, ატმოსფერული წნევა $p + dp$ კლებულობს ($dp < 0$) (ნახ. 9.1), კერძოდ, წნევის განმარტების თანახმად წნევის ცვლილება იქნება:

$$dp = -\frac{dF_n}{S} = -\frac{dmg}{S} = -\rho g \frac{dV}{S} = -\rho g \frac{Sdh}{S} = -\rho g dh.$$

$$(7.5)\text{-ის ჩასმით ვღებულობთ } dp = -\frac{Mp}{RT} g dh,$$

$M = 29 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ – ჰაერის საშუალო მოლური მასაა, იგი მიღებულია ჰაერის შემადგენლი კომპონენტების პროცენტული წილის გათვალისწინებით. ზემოთ მოყვანილი დაშვებებიდან გამომდინარე ატმოსფერული წნევა მხოლოდ დედამიწის ზედაპირიდან დაშორების $-h$ -ის ფუნქციაა. მოვახდინოთ ცვლადთა განცალკევა:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} dh. \quad (9.1)$$

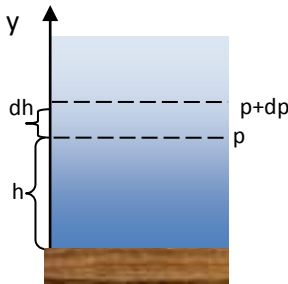
ინტეგრირების შედეგად მივიღებთ:

$$\ln p = -\frac{Mgh}{RT} + \ln C, \text{ საიდანაც } p(h) = Ce^{-\frac{Mg}{RT}h}.$$

დავადგინოთ C მუდმივას ფიზიკური არსი, ჩავწეროთ (9.1) დედამიწის ზედაპირისათვის. ე.ი. $h=0$, მაშინ $C = p(0)$ - ჰაერის წნევაა დედამიწის ზედაპირზე. მაშასადამე,

$$p(h) = p(0)e^{-\frac{Mg}{RT}h}. \quad (9.2)$$

წარმოადგენს **ბარომეტრულ ფორმულას**. იგი გვიჩვენებს აირის წნევის



ნახაზი 9.1.

დამოკიდებულებას სიმაღლეზე სიმძიმის ძალთა კელში, რომლის თანახმადაც ატმოსფერული წნევა დედამიწის ზედაპირიდან სიმაღლის ზრდასთან ერთად ექსპონენციალური კანონით (e^{-a}) კლებულობს. (7.5)-ის

გამოყენებით ბარომეტრული ფორმულა შეგვიძლია ჩავწეროთ აირის სიმკვრივისთვისაც:

$$\rho(h) = \rho(0)e^{-\frac{Mg}{RT}h} \quad (9.2')$$

(9.2) და (9.2') იზოთერმული ატმოსფეროსთვის არის მიღებული, რეალურად ტემპერატურა სიმაღლის ზრდასთან ერთად საკმაოდ რთულად იცვლება. მაგ. ჰაერის უახლოეს ფენაში - ტროპოსფეროში (0-11)კმ, ტემპერატურა (-50⁰ -60⁰)C-მდე ეცემა. თუ (9.2)-ში შევიტანთ შესწორებას ტემპერატურასთან დაკავშირებით, მაშინ შესაძლებელია თვითმფრინავის ბორტზე გაზომილი წნევის მნიშვნელობის მიხედვით ზუსტად განვსაზღვროთ ფრენის სიმაღლე. ამ პრინციპზე მუშაობს საავიაციო **ალტიმეტრი** - მფრინავი აპარატების ფრენის სიმაღლის

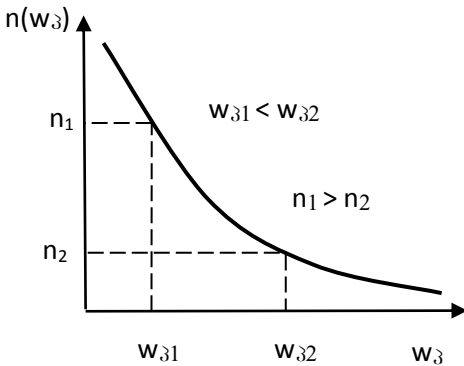
მზომი ხელსაწყო, რომლის სკალაზეც წნევის ნაცვლად მოცემულია შესაბამისი სიმაღლის მნიშვნელობები.

(9.2)-ით შეიძლება გამოვთვალოთ ჰაერის თითოეული კომპონენტის მიერ წარმოებული პარციალური წნევა, რისთვისაც ხარისხის მაჩვენებლის თანამამრავლი $\frac{M}{R}$ ასე გადავწეროთ: $\frac{M}{R} = \frac{M}{N_A k} = \frac{m_0}{k}$ და შევიტანოთ (9.2)-ში (6.6)-თან ერთად

$$n(h)kT = n(0)kT e^{-\frac{m_0 g h}{kT}} \quad \text{ანუ} \quad n(h) = n(0) e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}. \quad (9.3)$$

როგორც მოსალოდნელი იყო, აირის წნევა, სიმკვრივე და კონცენტრაცია სიმაღლის ზრდასთან ერთად ერთნაირი კანონზომიერებით მცირდება, ეს შემცირება მით უფრო მკვეთრია, რაც დაბალია ტემპერატურა. ამას განაპირობებს ორი ფაქტორის ერთდროული მოქმედება:

1. გრავიტაციის ძალები ცდილობს აირის მოლეკულები განათავსოს დედამიწის ზედაპირთან რაც შეიძლება ახლო ფენებში,
2. მოლეკულები კი, ქაოსური მოძრაობის გამო, ესწრაფვის თანაბარ განაწილებას სივრცეში.



ნახაზი 9.2.

რაც უფრო მძიმეა მოლეკულა და დაბალია ტემპერატურა, მით უფრო დომინირებს პირველი ფაქტორი, ხოლო მსუბუქი მოლეკულისა და მაღალი ტემპერატურის დროს – მეორე.

აირის მოლეკულის პოტენციური ენერგია დედამიწის სიმიმის ძალთა ველში

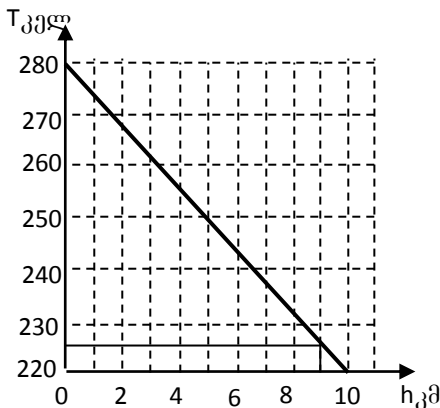
ტოლია $w_3 = m_0gh$, შევიტანოთ (9.3)-ში და მივიღებთ

$$n(w_3) = n(0)e^{-\frac{w_3}{kT}}. \quad (9.4)$$

იგი წარმოადგენს მოლეკულათა განაწილებას პოტენციური ენერჯის მიხედვით (ნახ.9.2). ავსტრიელმა ფიზიკოსმა **ლუდვიგ ბოლცმანმა** აჩვენა, რომ (9.4) შეიძლება გამოვიყენოთ ნებისმიერ სტაციონარულ პოტენციურ ველში მოთავსებული, ერთი ტიპის კლასიკური ნაწილაკებისგან შემდგარი, სითბურ წონასწორობაში მყოფი სისტემებისთვის. (9.4)-ს **ბოლცმანის განაწილების კანონსაც** უწოდებენ, რომლის თანახმადაც

➤ **წონასწორობაში მყოფი კლასიკური სისტემის ნაწილაკები ცდილობს დაიკაოს უდაბლესი ენერგეტიკული მდგომარეობა.**

ამოცანა 9.1. რამდენით შეიცვლება 10^5 პა ატმოსფერული წნევა 9კმ სიმაღლეზე, თუ ტემპერატურის ცვლილება ტროპოსფეროში მოცემულია გრაფიკზე.



ამოხსნა:

გრაფიკიდან
გამომდინარე $h=9$ კმ
სიმაღლეზე
ტემპერატურა
225კელ-ია. მაშინ,
(9.2)-ის თანახმად

$$\begin{aligned} p(h) &= 10^5 e^{-\frac{29 \cdot 10^3 \cdot 9,8}{8,31 \cdot 225} \cdot 9000} = \\ &= 10^5 e^{-0,33} = 0,72 \cdot 10^5 \text{ პა} \\ \text{წნევა მცირდება} \\ \Delta p &= |p(9\text{კმ}) - p(0)| = \\ &= 0,28 \cdot 10^5 \text{ პა.} \end{aligned}$$

(გ-ს დამოკიდებულება h-ზე სიმცირის გამო უგულებელყოფილია.)

ამოცანა 9.2. გამოთვალეთ დედამიწის ზედაპირიდან ერთსადიმავე სიმაღლეზე ჰაერის კონცენტრაციის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ზაფხულის ($t=32^{\circ}\text{C}$) და ზამთრის ($t=-23^{\circ}\text{C}$) პირობებში.

ამოხსნა: (9.3)-ის გამოყენებით გვექნება:

$$\frac{n_1}{n_2} = e^{-\frac{T_2}{T_1}} = e^{-\frac{250}{305}} = e^{-0,82} = 0,44$$

ე.ი. მოცემულ სიმაღლეზე ზამთარში ჰაერის კონცენტრაცია მეტია ზაფხულთან შედარებით.

ამოცანა 9.3. ვერტმფრენის კაბინაში ბარომეტრი აჩვენებს 90 კპა წნევას. ასაფრენ მოედანზე წნევა 105 კპა-ია, ტემპერატურაა 27°C და იცვლება სიმაღლის მიხედვით. რა სიმაღლეზე მიფრინავს ვერტმფრენი? ფრენის რა სიმაღლეს დააფიქსირებს მფრინავი, თუ ჩათვლის რომ ტემპერატურა უცვლელია. რა ცდომილება დაუშვა მფრინავმა სიმაღლის განსაზღვრაში, თუ სინამდვილეში ტემპერატურა საფრენ სივრცეში 2°K -ით დაეცა?

ამოხსნა: (9.2)-დან
$$h = \frac{RT}{Mg} \ln \frac{p_0}{p} \quad (1)$$

$$h = \frac{8,31 \cdot 300}{29 \cdot 10^{-3} \cdot 10} \ln \frac{105}{90} = 1462 \text{ მ.}$$

ტემპერატურის შემცირებისას წნევის უცვლელობა გამოწვეულია ვერტმფრენის ქვემოთ დაშვებით. კერძოდ, (1)-ის თანახმად,

$$\Delta h = \frac{R\Delta T}{Mg} \ln \frac{p_0}{p} = \frac{8,31 \cdot 2}{29 \cdot 10^{-3} \cdot 10} \ln \frac{105}{90} = 9 \text{ მ.}$$

ამოცანა 9.4. M მოლური მასის იდეალური აირი იმყოფება ერთგვაროვან სიმძიმის ძალის ველში ($g=\text{const}$). ჩავწერთ აირის წნევის დამოკიდებულება სიმაღლეზე, თუ ტემპერატურასა და სიმაღლეს შორის ფუნქციონალურ დამოკიდებულებას ააქვს სახე: $T = 1 - ah$ ($a > 0$). ამასთან თუ $h=0$, $p=p_0$.

ამოხსნა:

(9.1) მოცემულ შემთხვევაში მიიღებს სახეს:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT_0} \frac{dh}{1-ah} \quad \text{რიმლის ინტეგრირება გვაძლევს:}$$

$$\ln p = \frac{Mg}{aRT_0} \ln(1-ah) + \ln C. \quad \text{შემოვიღოთ აღნიშვნა:}$$

$$n = \frac{Mg}{aRT_0}, \quad \text{მაშინ} \quad p(h) = C(1-ah)^n. \quad \text{ამოცანის პირობის}$$

$$\text{გათვალისწინებით } C=p_0. \quad \text{ე.ი. } p(h) = p_0(1-ah)^n.$$

§10. მოლეკულათა განაწილება სიჩქარეების მიხედვით

აირში მოლეკულათა ქაოსური მოძრაობის გამო, მიმდინარეობს მათი ურთიერთშეჯახებათა უწყვეტი პროცესი, რასაც თან სდევს მოლეკულათა სიჩქარეების განუწყვეტლივი ცვლილება $(0, \infty)$ არეში. თუ აირი წონასწორულ მდგომარეობაშია ($T = \text{const}$), მაშინ, მიუხედავად ცალკეულ მოლეკულათა სიჩქარეების ცვლილებისა, მოლეკულათა რიცხვი სიჩქარის ნებისმიერ $[u, u + du]$ ინტერვალში რჩება უცვლელი, ანუ სიჩქარეთა მიხედვით მოლეკულების განაწილების ფუნქცია სრულიად განსაზღვრულია და დროში მუდმივია.

ინგლისელმა ფიზიკოსმა **ჯეიმს კლერკ მაქსველმა** თეორიულად მიიღო წონასწორობაში მყოფი იდეალური აირის მოლეკულათა სიჩქარეების მიხედვით განაწილების ფუნქცია:

$$f(u) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} u^2 e^{-\frac{m_0 u^2}{2kT}}. \quad (10.1)$$

მისი გრაფიკი მოცემულია ნახ. 10.1-ზე.

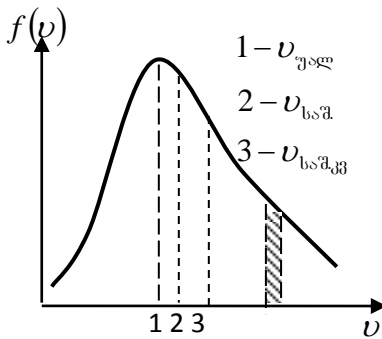
$f(u)du$ - წარმოადგენს ალბათობას იმისა, რომ მოლეკულის სიჩქარე იარსებებს $[u, u + du]$ ინტერვალში. ნახ. 10.1-ზე მას შეესაბამება დაშტრიხული ფართი. თუ მოლეკულათა საერთო რაოდენობას ავლნიშნავთ N -ით, ხოლო სიჩქარეთა მოცემულ ინტერვალში dN_u -ით, მაშინ ადგილი ექნება ტოლობას

$$f(v)dv = \frac{dN_v}{N} \quad (10.2)$$

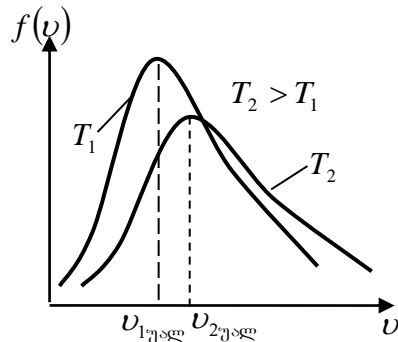
ამასთან $\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$, რადგან იგი ალბათობაა იმისა, რომ მოლეკულის სიჩქარეს ექნება რაიმე მნიშვნელობა $(0, \infty)$ არეში. გრაფიკულად მას შეესაბამება $f(v)$ მრუდის მიერ შემოსაზღვრული ფართობი.

მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიაში გამოიყენება უაღბათესი სიჩქარის ცნება:

- უაღბათესი სიჩქარე – სუალ ეწოდება იმ სიჩქარეს, რომელიც გააჩნია მოცემული ტემპერატურის აირის მოლეკულათა უმრავლესობას.



ნახაზი 10.1.



ნახაზი 10.2.

რადგან სიჩქარის ამ სიდიდისთვის $f(v)$ აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას, ვისარგებლოთ ფუნქციის ექსტრემუმის განსაზღვრის პირობით $\left. \frac{df(v)}{dv} \right|_{v=v_{\text{უალ}}} = 0$, და

მივიღოთ უაღბათესი სიჩქარის ფორმულა. (10.1)-ის თანახმად $2v - v^2 \frac{m_0 v}{kT} = 0$, საიდანაც $v_1 = 0$ შეესაბამება

ფუნქციის მინიმუმი, ხოლო $v_2 = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$ მაქსიმუმი⁷.

უაღბათესი სიჩქარის არსის თანახმად $v_2 = v_{\text{უაღ}}$, ე.ი.

$$v_{\text{უაღ}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = 1,41 \sqrt{\frac{kT}{m_0}}. \quad (10.3)$$

$f(v)$ ფუნქციის გამოყენებით შესაძლებელია მოცემული ტემპერატურისთვის აირის მოლეკულათა საშუალო სიჩქარის განსაზღვრაც, რისთვისაც გამოვიყენებთ რაიმე სიდიდის საშუალო მნიშვნელობის პოვნის ზოგად წესს: სიდიდის თითოეულ მნიშვნელობას გავამრავლებთ მისი განსორციელების ალბათობაზე (ჩვენს შემთხვევაში dN_v / N) და მიღებულ შედეგებს შევკრიბავთ. სიჩქარის მნიშვნელობათა უწყვეტი სპექტრის გამო (0, ∞) ჯამს შევცვლით ინტეგრალით

$$v_{\text{საშ}} = \int_0^{\infty} v \frac{dN_v}{N} = \int_0^{\infty} v f(v) dv. \quad (10.4)$$

ამ სიდიდეს გამოყვანის გარეშე მოვიყვანთ:

$$v_{\text{საშ}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = 1,6 \sqrt{\frac{kT}{m_0}}. \quad (10.5)$$

$v_{\text{საშ}}$ – ს ფიზიკური არსი მდგომარეობს შემდეგში:

- *წონასწორობაში მყოფი აირის ყველა მოლეკულის სიჩქარე რომ გაუტოლდეს ამ ტემპერატურისთვის აირის მოლეკულათა საშუალო სიჩქარის მნიშვნელობას, აირი ისევ წონასწორობაში დარჩება - მისი ტემპერატურა არ შეიცვლება.*

ზემოთ მოყვანილი წესით შეიძლება გამოვთვალოთ მოლეკულათა საშუალო კვადრატული სიჩქარე $\sqrt{v_{\text{საშ}}^2}$, რისთვისაც საჭიროა ამოიხსნას ინტეგრალი

⁷ შესამოწმებლად საჭიროა გამოვთვალოთ II რიგის წარმოებული $f''(v)$, $f''(v_1) > 0$ (მინიმუმი), $f''(v_2) < 0$ (მაქსიმუმი).

$$\nu_{\text{საშ}}^2 = \int_0^{\infty} \nu^2 f(\nu) d\nu \quad (10.6)$$

რის შედეგადაც მიიღება:

$$\nu_{\text{საშ,კვ}} = \sqrt{\nu_{\text{საშ}}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = 1,73 \sqrt{\frac{kT}{m_0}} \quad (10.7)$$

(იგივე შედეგს მივიღებდით კინეტიკურ თეორიაზე დაყრდნობით, თუ (6.4) და (6.6) განტოლებებს გავუტოლებდით ერთმანეთს). რადგან $\nu_{\text{საშ}}$ გამოითვლება სიჩქარეების აბსოლუტურ მნიშვნელობათა გასაშუალოებით, ხოლო $\nu_{\text{საშ,კვ}}$ მიიღება სიჩქარეთა კვადრატების საშუალო მნიშვნელობის ამოფესვით, ისინი ერთმანეთის ტოლი არ არის (იხ. ამოცანა 10.2).

(10.3), (10.5), (10.7)-ის შედარება გვაძლევს

$$\nu_{\text{უალ}} : \nu_{\text{საშ}} : \nu_{\text{საშ,კვ}} = 1 : 1,13 : 1,22.$$

თუ (10.1)-ს შევიტანთ (10.2)-ში, შეიძლება გამოვთვალოთ იმ მოლეკულათა რაოდენობა, რომელთა სიჩქარე იმყოფება განსაზღვრულ $[\nu, \nu + d\nu]$ ინტერვალში

$$dN_{\nu} = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \nu^2 e^{-\frac{m_0 \nu^2}{2kT}} N d\nu \quad (10.8)$$

საიდანაც ჩანს, რომ მოლეკულას შეიძლება გააჩნდეს ნებისმიერი სიჩქარე. თუმცა მოლეკულათა დიდი უმრავლესობის სიჩქარე მცირეთი განსხვავდება $\nu_{\text{საშ}}$ -გან. მაგ. იმ მოლეკულათა რიცხვი, რომელთა სიჩქარეც მოცემულ ტემპერატურაზე 9-ჯერ აღემატება $\nu_{\text{საშ}}$ -ს, დაახლოებით სრული რაოდენობის 1,1%-ია. რაც უფრო მაღალია ტემპერატურა, მით უფრო მეტია მოცემული აირის $\nu_{\text{უალ}}, \nu_{\text{საშ}}, \nu_{\text{საშ,კვ}}$ და შესაბამისი $f(\nu)$ ფუნქციის გრაფიკიც წანაცვლებულია მარჯვნივ (ნახ. 10.2).

გასული საუკუნის ოციან წლებში ჩატარებული იქნა მრავალი გამოკვლევები აირის მოლეკულათა

⁸ (10.4) და (10.5) ინტეგრალთა ამოხსნისთვის საჭიროა სპეციალური ცხრილების გამოყენება.

სიჩქარეების მიხედვით განაწილებაზე. ნაჩვენები იქნა, რომ მაქსველის თეორიული შედეგი ($f(v)$ ფუნქცია) კარგი სიზუსტით ემთხვევა ცდის შედეგებს რეალური აირებისთვის თუ მათი წნევა ძალიან მაღალი არაა.

ამოცანა 10.1. გამოვთვალოთ ჰაერის მოლეკულათა (N_2, O_2) საშუალო კვადრატული სიჩქარე 0°C -ზე.

ამოხსნა: §1-ის თანახმად $m_0 = A$ (მაე),

$$m_0(N_2) = 28 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} = 4,7 \cdot 10^{-26} \text{ კგ,}$$

$$m_0(O_2) = 32 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} = 5,3 \cdot 10^{-26} \text{ კგ.}$$

ვისარგებლოთ (10.7)-ით

$$v_{\text{საშ.კვ}}(N_2) = 1,73 \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{4,7 \cdot 10^{-26}}} \approx 490 \text{ მ/წმ,}$$

$$v_{\text{საშ.კვ}}(O_2) = 1,73 \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{5,3 \cdot 10^{-26}}} \approx 460 \text{ მ/წმ.}$$

ამოცანა 10.2. 21 მოლეკულიდან ორის სიჩქარეა 8მ/წმ, 7-ის 10მ/წმ, ექვსის 15მ/წმ, ხუთის 16მ/წმ, ერთის 17მ/წმ. გამოვთვალოთ სიჩქარის საშუალო, საშუალო კვადრატული და უაღბათესი მნიშვნელობები.

ამოხსნა: §10-ის თანახმად მოცემული სისტემა არ შეიძლება განვიხილოთ როგორც წონასწორობაში მყოფი იდეალური აირი. ამიტომ იგი არ ემორჩილება მაქსველის მოლეკულათა სიჩქარეების მიხედვით განაწილების კანონს. ამიტომ უნდა ვისარგებლოთ საშუალო სიდიდის გამოსათვლელი ფორმულით:

$$v_{\text{საშ}} = (2 \cdot 8 + 7 \cdot 10 + 6 \cdot 15 + 5 \cdot 16 + 1 \cdot 17) / 21 = 13 \text{ მ/წმ}$$

$$v_{\text{საშ.კვ}} = \sqrt{(2 \cdot 8^2 + 7 \cdot 10^2 + 6 \cdot 15^2 + 5 \cdot 16^2 + 17^2) / 21} \approx 13,4 \text{ მ/წმ}$$

ამოცანის პირობიდან გამომდინარე $v_{\text{უაღ}} = 10 \text{ მ/წმ-ს}$, რადგან ეს სიჩქარე გააჩნია მოლეკულათა უმრავლესობას-7-ს.

ს მ ო ც ა ნ ე ბ ო:

1. რამდენ მოლეკულას შეიცავს და რამდენი მოლია 160გ მეთანში (CH_4)? (პასუხი: $6,023 \cdot 10^{24}$; 10)
2. რამდენ მოლს და რამდენ მოლეკულას შეიცავს 5ლ ტევადობის ჭურჭელში მოთავსებული ჰელიუმის აირი, თუ მისი სიმკვრივეა $0,25 \text{ გ/სმ}^3$? (პასუხი: 312,5; $1,9 \cdot 10^{26}$)
3. ნაკეთობაზე, რომლის ზედაპირის ფართობია $S=500 \text{ სმ}^2$, დაფენილია 10 მოლი ნიკელი. იპოვეთ ნიკელის ფენის სისქე. ($M=59 \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მოლ}$; $\rho=8,8 \cdot 10^3 \text{ კგ/მ}^3$)? (პასუხი: 1,34მმ)
4. გამოთვალეთ 8გ ჰელიუმის, 10გ ნეონის და 80გ ჟანგბადის ნარევის მოლეკულების რაოდენობა და მოლური მასა. (პასუხი: 5; $19,6 \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მოლ}$)
5. ჰაერის შემადგენლობა დაახლოებით ასეთია: აზოტი – 78,1%, ჟანგბადი – 21%, არგონი – 0,9%. გამოთვალეთ ნარევის მოლური მასა. (პასუხი: $\approx 29 \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მოლ}$)
6. ჩაწერეთ 16°F ცელსიუსის და კელვინის ტემპერატურებით. (პასუხი: -10°C ; 263კელ)
7. აზოტის წნევაა $0,11 \text{ მგპა}$, სიმკვრივე კი $1,35 \text{ კგ/მ}^3$. გამოთვალეთ მისი მოლეკულების საშუალო კვადრატული სიჩქარე. (პასუხი: $\approx 494 \text{ მ/წმ}$)
8. 40 ნაწილაკის სიჩქარეა 80 მ/წმ , 60 ნაწილაკის 84 მ/წმ -ია, ხოლო 20 ნაწილაკის 90 მ/წმ . გამოთვალეთ ნაწილაკთა საშუალო და საშუალო კვადრატული სიჩქარე (პასუხი: $\approx 83,66 \text{ მ/წმ}$; $\approx 83,73 \text{ მ/წმ}$)
9. გამოთვალეთ აზოტის მოლეკულათა საშუალო კვადრატული სიჩქარე, რომელიც მოთავსებულია 8 მ^3 მოცულობაში $2,1 \text{ ატმ}$ წნევის ქვეშ, თუ მოლეკულების რაოდენობა 1300-ია. (პასუხი: $\approx 370 \text{ მ/წმ}$)
10. რამდენჯერ მეტია არგონის აირის მოლეკულის საშუალო კვადრატული სიჩქარე მასში მყოფი 10^{-4} გ მასის მტერის ნაწილაკის საშუალო კვადრატულ სიჩქარეზე? (პასუხი: $1,2 \cdot 10^9$ -ჯერ)
11. გამოთვალეთ ჟანგბადის მოლეკულების კონცენტრაცია და ტემპერატურა, თუ მისი წნევაა $0,2 \text{ მგპა}$, საშუალო კვადრატული სიჩქარეა 700 მ/წმ ($M_{N_2} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მოლ}$). (პასუხი: $2,3 \cdot 10^{25} \text{ მ}^{-3}$; 630კელ)

12. ბალონში მოთავსებული აირთა ნარევის შედგენლობაა: 50% წყალბადი, 30% აზოტი, 20% ჰელიუმი, ხოლო წნევაა $2 \cdot 10^6$ პა. იპოვეთ თითოეულის პარციალური წნევა. (პასუხი: $1,61 \cdot 10^6$ პა; $0,07 \cdot 10^6$ პა; $0,32 \cdot 10^6$ პა.)

13. 2100 მ^3 მოცულობის აეროსტატის ჰელიუმით შესავსებად გამოიყენეს $5 \cdot 10^{-2} \text{ მ}^3$ მოცულობის ჰელიუმის ბალონები. თითოეულში ტემპერატურა იყო 27°C , ხოლო წნევა $7,5 \cdot 10^6$ პა. აეროსტატს წამში მიეწოდებოდა 38 გ ჰელიუმი. იპოვეთ გავსების დრო და იქნა გამოყენებული ბალონის რაოდენობა, თუ აეროსტატში საბოლოო წნევაა 100 კპა , ტემპერატურა 7°C . (პასუხი: 2სთ და 38წთ; 600)

14. 200 მ^3 მოცულობის აეროსტატი წონასწორობაშია რაღაც სიმაღლეზე, სადაც ჰაერის წნევაა 730 მმ ვწყ , სვ., ტემპერატურა -10°C . რა მასის ბალასტი უნდა გადმოვაგდოთ, რომ მან აიწიოს ისეთ სიმაღლეზე, სადაც წნევაა 690 მმ ვწყ . სვ., ხოლო ტემპერატურა -13°C . (პასუხი: 14კგ)

15. 20ლ აირი იმყოფება ნორმალურ პირობებში. წნევის 3-ჯერ გაზრდისას მისი ტემპერატურა გახდა 27°C . რა მოცულობა დაიკავა აირმა? (პასუხი: 7,4ლ).

16. 10 ლიტრი იდეალური აირის წნევაა $2,7 \text{ ატმ}$, ტემპერატურა -3°C . ტემპერატურის 50°C -ით გაზრდისას წნევა გახდა 4 ატმ . როგორ შეიცვალა აირის მოცულობა? (პასუხი: შემცირდა 2ლ-ით)

17. ტიხრით გაყოფილი ჭურჭლის ერთი ნაწილის მოცულობა 3-ჯერ ნაკლებია მეორეზე. I ნაწილში წნევა 8 ატმ-ია , II ნაწილში 4 ატმ . რა წნევა დამყარდება ტიხარის მოხსნის შემდეგ, თუ ტემპერატურა ორივე ნაწილში ერთნაირია? (პასუხი: 5ატმ)

18. იდეალური აირის იზობარული გათბობისას 27°C -დან 127°C -მდე მოცულობა 3ლ-ით გაიზარდა. გამოთვალეთ საწყისი მოცულობა. (პასუხი: 9ლ).

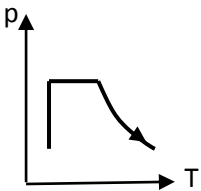
19. 20ლ მოცულობის და 27°C ტემპერატურის იდეალური აირის წნევაა 4 ატმ . იგი იზოთერმულად გააფართოვეს 40ლ-მდე. შემდეგ იზობარულად გააფართოვეს 60ლ-მდე.

იპოვეთ საბოლოო წნევა და ტემპერატურა. (პასუხი: 2ატმ; 450K)

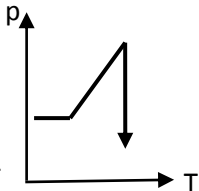
20. აეროსტატს, რომლის მოცულობაა 480მ^3 , ავსებენ 127°C ტემპერატურის აირით. რამდენ ხანს გაგრძელდება გავსება, თუ მასში წუთში უშვებენ 400გ აირს და აეროსტატში უნდა დამყარდეს $8,31 \cdot 10^4$ პა წნევა. ჰელიუმის მოლური მასაა $4 \cdot 10^{-3}$ კგ.მოლ $^{-1}$. (პასუხი: 2სთ)

21. აირის ტუმბოებს შეუძლია შექმნას 10^{-12} პა წნევა. რამდენი მოლეკულა იქნება ამ დროს 1სმ^3 მოცულობის აირში 273კელ ტემპერატურაზე? (პასუხი: 260)

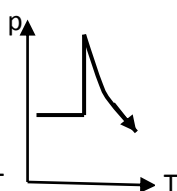
22. მოცემული მასის იდეალური აირი იზობარულად გააფართოვეს, შემდეგ იზოქორულად გაათბეს და ბოლოს იზოთერმულად გააფართოვეს. რომელი ნახაზი შეესაბამება ამ მიმდევრობას?



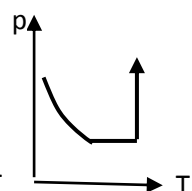
ნახ. 1



ნახ.2

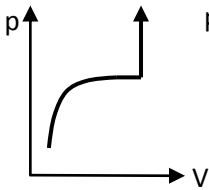


ნახ.3

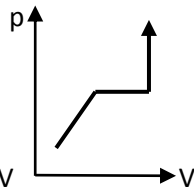


ნახ.4

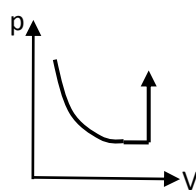
23. მოცემული მასის იდეალურ აირში იზოპროცესები განვითარდა იზოთერმული, იზობარული და იზოქორული თანმიმდევრობით. რომელი ნახაზი შეესაბამება აღნიშნულ მიმდევრობას?



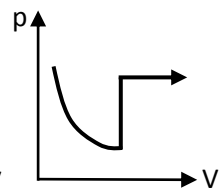
ნახ.1



ნახ.2



ნახ. 3



ნახ.4

24. ვერტიკალურ მდგომარეობაში მყოფი საცობით დახურული ბალონი საესეა ჰაერით ნორმალურ პირობებში. საცობის ზედაპირის ფართობია 20სმ^2 , მასა

30კგ. რა ტემპერატურამდე უნდა გავათბოთ ჰაერი ბალონში, რომ საცობი ამოვარდეს? ხახუნი უგულვებელყოფილია. (პასუხი: 682,5K)

25. 40ლ ტევადობის ბალონში მოთავსებულია 300 K ტემპერატურის წყალბადი. წყალბადის ნაწილის დახარჯვის შემდეგ, წნევა $0,5 \cdot 10^6$ პა-ით დაეცა. განსაზღვრეთ დახარჯული წყალბადის მასა. (პასუხი: 1,6კგ)

26. დედამიწის ზედაპირზე ატმოსფერული წნევის საშუალო მნიშვნელობაა 10^5 პა. იპოვეთ ატმოსფეროს მასა. $R_{დედ}=6380$ კმ-ს. (პასუხი: $5,1 \cdot 10^{18}$ კგ)

27. ჩათვალეთ, რომ მზეს გააჩნია სფეროსებური ფორმა და ერთნაირი სიმკვრივე. მისი მასაა $2 \cdot 10^{30}$ კგ, რადიუსი- $6,962 \cdot 10^8$ მ და ცენტრში წნევაა $1,35 \cdot 10^{14}$ პა. გამოთვალეთ მზის ცენტრის ტემპერატურა, თუ მზე წარმოადგენს წყალბადიდან შემდგარ სისტემას. (პასუხი: $1,16 \cdot 10^7$ K)

28. მფრინავი თვლის, რომ თვითმფრინავი უცვლელ სიმაღლეზე მიფრინავს, რადგან ბარომეტრი ერთსა და იმავე 60 კპა წნევას აფიქსირებს. რა შეცდომას დაუშვებს მფრინავი სიმაღლის განსაზღვრისას, თუ ჰაერის ტემპერატურა 2 K-ით შეიცვალა? ჩათვალეთ, რომ ტემპერატურა არა დამოკიდებული სიმაღლეზე, ხოლო წნევა დედამიწის ზედაპირზე 102 კპა-ია. (პასუხი: 30მ)

29. ატმოსფერო დედამიწის ზედაპირზე იმყოფება ნორმალურ მდგომარეობაში. გამოთვალეთ ატმოსფერული წნევა დედამიწის ზედაპირიდან 5 კმ სიმაღლეზე დახ სახტაში 55 კმ სიღრმეზე. ტემპერატურა არაა სიმაღლეზე დამოკიდებული. (პასუხი: 0,54 ატმ; 1,9 ატმ)

30. M მოლური მასის იდეალური აირი იმყოფება ერთგვაროვან სიმძიმის ძალის ველში. ჩაწერეთ აირის ტემპერატურის დამოკიდებულება სიმაღლეზე, თუ აირის სიმკვრივე მუდმივია. (პასუხი: $dT/dh = -Mg/R$)

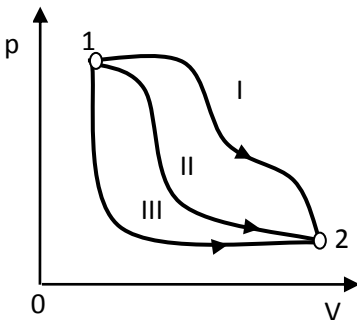
თავი II. თერმოდინამიკა

§11. შინაგანი ენერჯია. თერმოდინამიკის პირველი კანონი

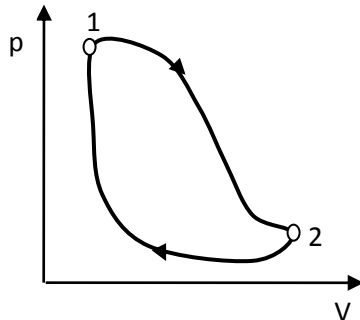
თერმოდინამიკაში ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ფიზიკური სიდიდეა სისტემის შინაგანი ენერჯია. იგი არ არის პირდაპირ დაკავშირებული სისტემის მექანიკურ ენერჯიასთან, რომელიც ტოლია სისტემის, როგორც ერთი მთლიანის, მოძრაობის კინეტიკური ენერჯიისა და გარეშე ძალთა ველში პოტენციურ ენერჯიათა ჯამის.

➤ **შინაგანი ენერჯია წარმოადგენს სისტემის შემადგენელ ნაწილაკთა ქაოსური მოძრაობის კინეტიკურ და მათი ურთიერთქმედების პოტენციურ ენერჯიათა ჯამს.**

შინაგანი ენერჯია ადიტიური (კრებადი) სიდიდეა, ის სისტემის შემადგენელ ნაწილთა შინაგანი ენერჯიების ჯამია. ამასთანავე, იგი სისტემის მდგომარეობის ფუნქციაა, რაც იმას ნიშნავს, რომ **სისტემის მოცემულ მდგომარეობას შეესაბამება შინაგანი ენერჯიის ერთადერთი განსაზღვრული მნიშვნელობა.** ეს მნიშვნელობა არ არის დამოკიდებული იმ პროცესთა ტიპზე და მიმდინარეობაზე, რომლითაც სისტემა



ნახაზი 11.1.



ნახაზი 11.2.

აღმოჩნდა აღნიშნულ მდგომარეობაში.

დავუშვათ სისტემას შეუძლია 1 მდგომარეობიდან 2- ში გადასვლა სხვადასხვა (I, II, III) გზით (ნახ. 11.1),

მაშინ მისი შინაგანი ენერჯის ცვლილება, გადასვლის გზების (პროცესების), დამოუკიდებლად ამ მდგომარეობათა შესაბამისი შინაგანი ენერჯების სხვაობის ტოლია:
 $\Delta U = U_2 - U_1.$

თუ პროცესი ციკლურია (შეკრულია) $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ (ნახ. 11.2), ანუ სისტემა ბრუნდება პირვანდელ მდგომარეობაში, შინაგანი ენერჯის ცვლილება ისევე, როგორც მდგომარეობის ნებისმიერი სხვა ფუნქციის ცვლილება, ნულის ტოლია $\Delta U = U_1 - U_1 = 0.$

შინაგანი ენერჯის შეცვლა შესაძლებელია ორი გზით – სითბოგადაცემით და მუშაობის შესრულებით.

- **სითბოგადაცემა ეწოდება ენერჯის გადაცემის ისეთ პროცესს, რომელიც დაკავშირებულია ტემპერატურულ სხვაობასთან სისტემასა და გარეშე სხეულებს შორის.**

მუშაობის ცნებას თერმოდინამიკაში უფრო განვსაზოგადებთ, კერძოდ

- **მუშაობა ეწოდება ენერჯის გადაცემის ნებისმიერ შესაძლებლობას, რომელიც არ არის დაკავშირებული სისტემისა და გარე სხეულებს შორის ტემპერატურის სხვაობასთან.**

გადაცემული სითბოს რაოდენობრივ ზომად შემოღებულია ფიზიკური სიდიდე **სითბოს რაოდენობა** – Q . ზემოთქმულიდან გამომდინარე

$$\Delta U = Q + A', \quad (11.1)$$

აქ A' გარე ძალების მიერ სისტემაზე შესრულებული მუშაობაა. ქმედება-უკუქმედების ძალების ტოლობიდან გამომდინარე ეს მუშაობა შევცვალოთ სისტემის მიერ გარე ძალების დაძლევაზე შესრულებული მუშაობით $A' = -A$. მაშინ (11.1) ასე ჩაიწერება:

$$Q = \Delta U + A. \quad (11.2)$$

იგი წარმოადგენს **თერმოდინამიკის პირველ კანონს**:

- **სისტემაზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა ხმარდება სისტემის შინაგანი ენერჯის შეცვლას და სისტემის მიერ გარე ძალების წინააღმდეგ მუშაობას.**

ეს კანონი, ფაქტიურად, ენერჯის მუდმივობის კანონის ფორმულირებაა. საინტერესოა შევნიშნოთ, რომ იგი მხოლოდ XIX საუკუნეში ჩამოაყალიბეს, რადგან მაშინ იქნა დადგენილი, რომ სითბოს გადაცემა იგივე ენერჯის გადაცემის პროცესია. ე.ი. სითბოს რაოდენობის ერთეული, ისევე, როგორც ენერჯისა, ჯოულია.

სითბოს რაოდენობა ალგებრული სიდიდეა. თუ სისტემა ღებულობს სითბოს $Q > 0$, თუ გასცემს $Q < 0$. სისტემაზე სითბოს გადაცემა ჯერ კიდევ არ ნიშნავს, რომ იგი თბება ($\Delta U > 0$), შესაძლებელია ცივდებოდეს ($\Delta U < 0$). ეს მაშინ ხდება, როდესაც სისტემა მუშაობას ასრულებს როგორც გადაცემული სითბოს, ასევე შინაგანი ენერჯის ხარჯზე, ანუ $A > Q$. თუ სისტემა იზოლირებულია ე.ი. მასზე არ ხდება ენერჯის მიწოდება არანაირი გზით ($Q = 0, A' = 0$), მაშინ (11.1)-ის თანახმად, $\Delta U = 0$, ე.ი. მისი შინაგანი ენერჯია არ იცვლება.

თუ იზოლირებული სისტემის ნაწილებს განსხვავებული ტემპერატურა გააჩნია, მაშინ მოხდება სითბოს გადაცემა მაღალი ტემპერატურის არიდან დაბალში. ამასთანავე, ენერჯის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარე,

- *იზოლირებული სისტემის შემადგენელ ნაწილებს მიერ გაცემული და მიღებული სითბოს რაოდენობათა ალგებრული ჯამი ნულია.*

ცხადია, სითბოს გადაცემის პროცესი გაგრძელდება მანამ, სანამ მთელ არეში ტემპერატურა არ გათანაბრდება, ანუ სისტემა არ გადავა წონასწორულ მდგომარეობაში.

როგორც ექსპერიმენტით, ასევე თეორიულად დადგენილია, რომ

- *სისტემის მიერ (ან მასზე) შესრულებული მუშაობა და გაცემული (მიღებული) სითბოს რაოდენობა დამოკიდებულია იმ პროცესზე (გზაზე), რომლითაც სისტემა გადადის ერთი მდგომარეობიდან მეორეში.*

ამიტომ მუშაობა და სითბოს რაოდენობა არ არის სისტემის მდგომარეობის ფუნქცია, არ შეიძლება საუბარი მათ მარაგზე ან ცვლილებაზე.

ელემენტარულ პროცესთა განხილვისას (11.2)-ის ნაცვლად ვისარგებლებთ ფორმულით

$$dQ = dU + dA. \quad (11.3)$$

უნდა გვახსოვდეს, რომ აქ მხოლოდ dU არის სრული დიფერენციალი, dA და dQ არასრული დიფერენციალებია, ისინი აღნიშნავს უსასრულოდ მცირე მუშაობასა და სითბოს რაოდენობას.

ამოცანა 11.1. გამოთვალეთ სისტემაზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა, თუ მან შეასრულა 8კჯ მუშაობა და ამასთანავე მისი შინაგანი ენერგია 2კჯ -ით შემცირდა.

ამოხსნა: $\Delta U = -2\text{კჯ}$, (11.2)-ის თანახმად, $Q = -2 + 8 = 6\text{კჯ}$.

ამოცანა 11.2. სითბოს რა რაოდენობა მიიღო სისტემამ, თუ მან შეასრულა $8,4 \cdot 10^5$ ჯ მუშაობა და ამასთან მისი შინაგანი ენერგია გაიზარდა $4,2 \cdot 10^5$ ჯ-ით.

ამოხსნა: (11.2)-ის თანახმად $Q = 4,2 \cdot 10^5 + 8,4 \cdot 10^5 = 12,6 \cdot 10^5$ ჯ.

§12. იდეალური აირის შინაგანი ენერგია

იდეალური აირის ერთატომიან m_0 მასის მოლეკულას შეუძლია მხოლოდ გადატანითი მოძრაობის შესრულება, რის გამოც მას გააჩნია ამ მოძრაობის

შესაბამისი კინეტიკური ენერგია $\frac{m_0 v^2}{2}$. თუ მოლეკულა

ორ ან მეტ ატომიანი, მაშინ ამ ენერგიას ემატება მოლეკულის ბრუნვითი მოძრაობისა და შემადგენელი ატომების რხევითი მოძრაობის (თუ მოლეკულა ხისტია არ არის) ენერგიებიც. მაგ. განვიხილოთ განტელის ფორმის ორატომიანი მოლეკულა (ნახ.12.1). მეორე მოლეკულასთან შეჯახებამ შეიძლება გამოიწვიოს მისი ბრუნვა ატომთა

შემაერთებელი წრფის მართობული ორი დამოუკიდებელი ღერძის მიმართ ამ ბრუნვათა სათანადო კინეტიკური ენერგიები იქნება $\frac{I_1\omega_1^2}{2}$ და $\frac{I_2\omega_2^2}{2}$ (შემაერთებელი ღერძის მიმართ ბრუნვითი ენერგია უმნიშვნელოა, რადგან ამ ღერძის მიმართ მოლეკულის ინერციის მომენტი ძალიან მცირეა).

თუ მოლეკულის ატომებს შორის კავშირი ხისტი არ არის, ატომებს შეუძლია რხევითი მოძრაობის შესრულება წონასწორული მდებარეობის მახლობლობაში, რის გამოც მოლეკულის ენერგიას ემატება რხევითი მოძრაობის კინეტიკური და პოტენციური ენერგიებიც.

თუ გვაქვს სამი ან მეტი ატომისგან შემდგარი არაწრფივი მოლეკულა, მაშინ მისი ბრუნვითი მოძრაობა განიხილება სამი ურთიერთმართობული ღერძის მიმართ, ხოლო ატომთა რხევითი მოძრაობის ენერგიის ჩაწერა კი საკმაოდ რთულდება მოლეკულაში ატომთა რიცხვის ზრდასთან ერთად.

შემოვიტანოთ თავისუფლების ხარისხის კიდევ ერთი განმარტება: ***თავისუფლების ხარისხი წარმოადგენს იმ დამოუკიდებელ შესაძლებლობათა რიცხვს, რომლითაც შეიძლება სისტემის ენერგიის შეცვლა***⁹.

აქედან გამომდინარე, ერთატომიან მოლეკულას გააჩნია სამი თავისუფლების ხარისხი, რადგან მას შეუძლია შეასრულოს მოძრაობა სამი დამოუკიდებელი მიმართულებით (x, y, z ღერძთა მიმართ). ორატომიან სისტემის მოლეკულას კი ხუთი თავისუფლების ხარისხი, აქედან სამი დაკავშირებულია მისი, როგორც ერთიანი სისტემის გადატანით მოძრაობასთან სივრცეში და კიდევ ორი დაკავშირებულია ბრუნვითი მოძრაობის კინეტიკურ ენერგიასთან. თუ ორატომიანი მოლეკულა დრეკადია, აღნიშნულ ხუთს ემატება კიდევ ორი თავისუფლების

⁹ თავისუფლების ხარისხი შეიძლება განიმარტოს, როგორც იმ დამოუკიდებელ შესაძლებლობათა რიცხვი, რომლითაც ცალსახად განისაზღვრება სისტემის მდგომარეობა (იხ. ლიტ. 1. §35). ეს განმარტება იდენტურია ჩვენი განმარტების.

ხარისხი რხევითი მოძრაობის კინეტიკური და პოტენციური ენერგიების გამო. აბსოლუტურად მყარ სხეულს, როგორც ერთიან სისტემას, გააჩნია ექვსი თავისუფლების ხარისხი, სამი დაკავშირებულია გადატანით, სამიც ბრუნვით მოძრაობასთან.

XIX საუკუნის ფიზიკოსთა ერთ-ერთ მნიშვნელოვან აღმოჩენად სამართლიანად ითვლება **კლაუზიუსის და მაქსველის ენერჯიის თანაბრად განაწილების კანონი**, რომლის თანახმადაც

➤ **მოლეკულის თითოეულ აქტიურ თავისუფლების ხარისხს შეესაბამება საშუალოდ $\frac{1}{2}kT$ ენერჯია.**

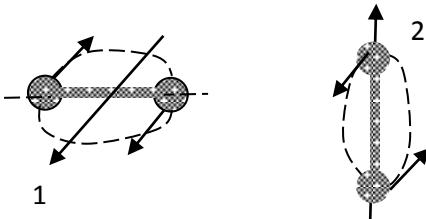
ე.ი., მოლეკულის საშუალო ენერჯია განისაზღვრება ფორმულით

$$w_{საშ} = i \frac{kT}{2}, \quad (12.1)$$

სადაც

$$i = i_{გად} + i_{ბრ} + i_{რხ} \quad (12.2)$$

მოლეკულის თავისუფლების ხარისხია. ზემოაღნიშნული შედეგები თვალსაჩინოებისთვის მოცემულია ცხრილ 12.1-ში.



ნახაზი 12.1.

ჩვენ არ შევხვით სამ და მეტ ატომიან დრეკად მოლეკულებს, რადგან მათ შემთხვევაში თავისუფლების ხარისხის განსაზღვრა გაცილებით

რთულია და გადის ჩვენი კურსის ფარგლებიდან.

(12.1)-ის თანახმად მოლეკულის ენერჯია პირდაპირპროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურის. თუ აბსოლუტური ტემპერატურა მისწრაფის ნულისკენ, მაშინ მოლეკულის ენერჯიაც უახლოვდება ნულს. როგორც თანამედროვე ქვანტურმა ფიზიკამ დაადგინა,

მოლეკულის ენერგია შეიძლება იყოს რაგინდ მცირე, მაგრამ მაინც ნულისგან განსხვავებული სიდიდე, შესაბამისად $T > 0$, ანუ აბსოლუტური ნული ფიზიკურად მიუღწეველია.

იდეალური აირის განმარტებიდან გამომდინარე (§6), მოლეკულათა ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგია ნულის ტოლია, რის გამოც მისი შინაგანი ენერგია წარმოადგენს ცალკეულ მოლეკულათა კინეტიკური ენერგიების ჯამს. თუ იდეალურ აირში N რაოდენობის მოლეკულაა, მაშინ მისი შინაგანი ენერგია, შეკრებადობიდან გამომდინარე, იქნება

$$U = Nw_{\text{საშ}} = Ni \frac{kT}{2}. \quad (12.3)$$

მოლური რიცხვის გამოყენებით $\nu = N/N_A$ მიიღება

$$U = i\nu \frac{N_A kT}{2} = i\nu \frac{RT}{2}. \quad (12.4)$$

➤ მოცემული მასის იდეალური აირის შინაგანი ენერგია მხოლოდ ტემპერატურის ფუნქციაა.

ცხრილი 12.1.

მოლეკულა	ატომთა შორისი კავშირი	თავისუფლების ხარისხი			მოლეკულის საშუალო ენერგია $w_{\text{საშ}}$
		იგად	იბრ	ირხ	
ერთატომიანი	–	3	–	–	$3 \cdot kT/2$
ორატომიანი	ხისტი	3	2	–	$5 \cdot kT/2$
	ღრეკადი	3	2	2	$7 \cdot kT/2$
სამი და მეტ ატომიანი (არაწრფივი)	ხისტი	3	3	–	$6 \cdot kT/2$

ცხადია, მოცემულ ტემპერატურაზე მრავალატომიანი აირის შინაგანი ენერგია აღემატება იგივე მოლური რაოდენობის მქონე ერთატომიანი აირის შინაგან ენერგიას, რადგან ერთატომიანსგან განსხვავებით მრავალატომიანი აირის ენერგიას განაპირობებს მოლეკულათა როგორც გადატანითი, ასევე ბრუნვითი და რხევითი მოძრაობების ენერგიები.

რეალური აირის შინაგანი ენერგიაც დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, მაგრამ, იდეალურისგან განსხვავებით, მისი მოლეკულების ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგია ნულისგან განსხვავდება, ამიტომ შინაგანი ენერგიაც გარკვეულწილად დამოკიდებულია წნევისა და მოცულობაზე. სითხეებისა და მყარი სხეულების შინაგანი ენერგიის გამოთვლა გაცილებით რთულია. ნებისმიერ მდგომარეობაში მყოფი ნივთიერების შინაგანი ენერგია ტემპერატურაზეა დამოკიდებული, ამიტომ მას სითბურ ენერგიასაც უწოდებენ.

ამოცანა 12.1. რა ტემპერატურა უნდა გააჩნდეს ჰელიუმის (He) აირს, თუ მისი მოლეკულის ენერგია ტოლია 27°C ტემპერატურის მქონე წყალბადის აირის მოლეკულის (H_2) საშუალო ენერგიის.

ამოხსნა: $T_1 = 273 + 27 = 300\text{K}$ ტემპერატურაზე წყალბადის მოლეკულას გააჩნია $i_1 = 5$ აქტიური თავისუფლების ხარისხი, ე.ი. (11.1)-ის თანახმად,

$$w_{\text{H}_2} = \frac{5}{2} kT_1. \text{ ჰელიუმი ერთატომიანი აირია } i_2 = 3, \text{ ე.ი.}$$

$$w_{\text{He}} = \frac{3}{2} kT_2, \text{ ანუ } \frac{5}{2} kT_1 = \frac{3}{2} kT_2, T_2 = \frac{5}{3} T_1 = 500\text{K}.$$

ამოცანა 12.2. გამოვთვალოთ 727°C ტემპერატურის 96 ჟანგბადის აირის შინაგანი ენერგია (ატომებს შორის კავშირი დრეკადია).

ამოხსნა: (12.4)-ში (1.1)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ: $U = i \frac{m}{M} \cdot \frac{RT}{2}$, რადგან ჟანგბადის მოლეკულა

ორატომიანია, ხოლო მათ შორის კავშირი დრეკადია, ამიტომ $i=7$ და $U = 7 \cdot \frac{96}{32} \cdot \frac{8,31 \cdot 1000}{2} = 87 \text{ კჯ}$.

§13. იდეალური აირის მუშაობა იზოთერმული პროცესებისას

განვიხილოთ ცილინდრულ ჭურჭელში მოთავსებული იდეალური აირი, რომელიც გარემოდან გამოყოფილია დეგუმის საშუალებით (ნახ. 13.1). გამოვთვალოთ მუშაობა, რომელსაც შეასრულებს იდეალური აირი წონასწორული ან კვაზიწონასწორული¹⁰ გაფართოებისას. წნევის ძალა $F = pS$, რომლითაც p წნევის მქონე აირი მოქმედებს S ფართობის დეგუმზე. ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად, ეს ძალა სიდიდით ტოლი და მიმართულებით საპირისპიროა იმ F' ძალის, რომლითაც დეგუმი მოქმედებს აირზე. F' გამოწვეულია გარე წნევითა და ხახუნით. უსასრულოდ მცირე dh მანძილით დეგუმის წანაცვლებისას აირის მიერ შესრულებული ელემენტარული მუშაობა იქნება

$$dA = Fdh = pSdh = pdV, \quad (13.1)$$

სადაც $dV = Sdh$ – აირის მოცულობის ელემენტარული ცვლილებაა. თუ $dV > 0$, აირი ფართოვდება და ასრულებს დადებით მუშაობას, ხოლო თუ $dV < 0$, აირს კუმშავენ და მისი მუშაობა უარყოფითია. მოცულობის სასრულო ცვლილებისას V_1 -დან V_2 -მდე აირის მუშაობა გამოითვლება ფორმულით:

$$A = \int_{h_1}^{h_2} Fdh = \int_{h_1}^{h_2} pSdh = \int_{V_1}^{V_2} pdV. \quad (13.2)$$

რადგან მუშაობა არ არის სისტემის მდგომარეობის ფუნქცია, იგი დამოკიდებულია პროცესის ტიპზე (§11), რის გამოც მოცემული აირის მოცულობის ერთიდაიგივე

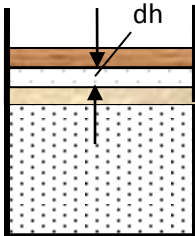
¹⁰ე.ი., როდესაც გაფართოების პროცესი მიმდინარეობს იმდენად ნელა, რომ ტემპერატურა და წნევა მთელ მოცულობაში ახწრებს გათანაბრებას, ანუ შესაძლებელია ნებისმიერ მომენტში მათი მნიშვნელობის გაზომვა.

სიდიდით ცვლილებისას, იმისდამხედვით, პროცესი *იზოთერმულია* ($T = const$), *იზობარული* ($p = const$), თუ *იზოქორული* ($V = const$) შესრულებული მუშაობა განსხვავებული იქნება.

იზოთერმული პროცესის განხორციელებისთვის საჭიროა აირის მუდმივი კონტაქტი *თერმოსტატთან* – სითბურ რეზერვუართან, რომელიც მთელი პროცესის მანძილზე აწარმოებს სითბოცვლას აირთან, რითაც ინარჩუნებს მის მუდმივ ტემპერატურას (გაფართოებისას აწვდის, შეკუმშვისას ართმევს სითბოს). როგორც §12-ში ვაჩვენეთ, იდეალური აირის შინაგანი ენერგია მხოლოდ ტემპერატურის ფუნქციაა

$$\left(U = i\nu \frac{RT}{2} \right),$$

რის გამოც იზოთერმული პროცესის შემთხვევაში იგი არ იცვლება $\Delta U = 0$. მაშინ (11.2)-ის თანახმად, $Q = A$, ანუ



ნახაზი 13.1.

➤ *იზოთერმული პროცესისას სისტემაზე გადაცემული სითბო მთლიანად ხმარდება სისტემის მიერ მუშაობის შესრულებას.* თუ (7.1) განტოლებიდან

განვსაზღვრავთ p -ს და შევიტანთ (13.2)-ში, მივიღებთ:

$$A = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (13.3)$$

იზოთერმული პროცესის pV -დიაგრამაზე (ნახ. 13.2) (13.3)-ს შეესაბამება დაშტრიხული ფართი.

განვიხილოთ იზობარული პროცესი. (13.2)-ის თანახმად

$$A = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1) = p\Delta V. \quad (13.4)$$

იზობარული პროცესისას იდეალური აირის მუშაობა, (7.1)-ის გათვალისწინებით, შეიძლება ასე წარმოვადგინოთ:

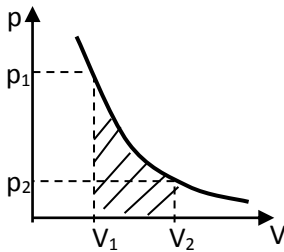
$$A = p\Delta V = \nu R\Delta T . \quad (13.5)$$

იზობარული პროცესის pV -დიაგრამაზე (ნახ. 13.3) ნაჩვენებია ამ მუშაობის შესაბამისი ფართი.

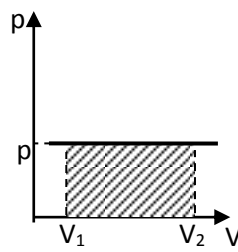
იზობარული პროცესისას $T \neq const$, შესაბამისად, $\Delta U \neq 0$, ამიტომ იზოთერმულიგან განსხვავებით,

➤ *იზობარული პროცესის დროს სისტემაზე მიწოდებული სითბოს ნაწილი ხმარდება მუშაობას, ნაწილი კი შინაგანი ენერგიის ცვლილებას.*

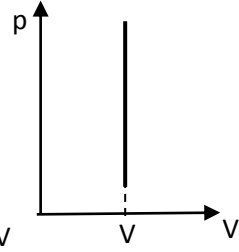
ანუ მოცემულ აირზე ერთიდაიგივე რაოდენობის სითბოს მიწოდებისას იზოთერმული პროცესის დროს მოცემული აირი მეტ მუშაობას ასრულებს, ვიდრე იზობარული



ნახაზი 13.2.



ნახაზი 13.3.



ნახაზი 13.4.

პროცესისას.

დავუშვათ რომ ერთი მოლი ($\nu=1$) აირი ტემპერატურის ერთი კელვინით გაზრდისას ($\Delta T=1$ კელ) იზობარულად ფართოვდება, მაშინ (13.5)-ის თანახმად $R=A$, ანუ

➤ *აირის უნივერსალური მუდმივა იმ მუშაობის ტოლია, რომელსაც ასრულებს ერთი მოლი იდეალური აირი იზობარულად ერთი კელვინით გათბობისას.*

იზოქორული პროცესისას ($dV=0$) და (13.2)-ის თანახმად აირი მუშაობას არ ასრულებს $A=0$ (ნახ. 13.4), ამიტომ $Q=\Delta U$.

➤ *იზოქორული პროცესისას სისტემაზე მიწოდებული სითბო მთლიანად ხმარდება შინაგანი ენერჯიის გაზრდას.*

შევნიშნოთ, რომ (13.2) სამართლიანია მუშაობის გამოსათვლელად რეალური აირების, თხევადი და მყარი სხეულების მოცულობის ცვლილებისას, თუმცა მისი ამოხსნა გაცილებით რთულია მოლეკულური ურთიერთქმედების ძალთა არსებობის გამო.

ამოცანა 13.1. V_0 მოცულობის იდეალური აირი გაფართოვდა $p=\alpha V$ ($\alpha=\text{const}$), რის შედეგადაც მოცულობა გაიზარდა η -ჯერ. გამოთვალეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა

ამოხსნა: (13.2)-ის თანახმად

$$A = \int_{V_0}^{\eta V_0} \alpha V dV = \frac{\alpha V^2}{2} \Big|_{V_0}^{\eta V_0} = \frac{\alpha V_0^2}{2} (\eta^2 - 1)$$

ამოცანა 13.2. რა მუშაობას ასრულებს 4 მოლი აირი, რომლის ტემპერატურაა 27°C , მისი მოცულობის ორჯერ გაზრდისას იზოთერმული პროცესის დროს?

ამოხსნა: (13.3)-ის თანახმად აირის მიერ შესრულებული მუშაობა

$$A = \nu RT \ln \frac{2V_1}{V_1} = \nu RT \ln 2 = 4 \cdot 8,31 \cdot 300 \cdot \ln 2 = 6980 \text{ჯ.}$$

ამოცანა 13.3. 5 მოლი ჰელიუმი იზობარულად გაათბეს 100 კელ-ით. გამოთვალეთ აირის შინაგანი ენერჯიის ცვლილება, მის მიერ შესრულებული მუშაობა და გადაცემული სითბოს რაოდენობა.

ამოხსნა: (12.4)-ის თანახმად

$$\Delta U = i \nu \frac{R\Delta T}{2} = 3 \cdot 5 \cdot \frac{8,31 \cdot 100}{2} = 6,23 \text{კჯ.} \quad (i = 3). \quad (13.5)\text{-დან}$$

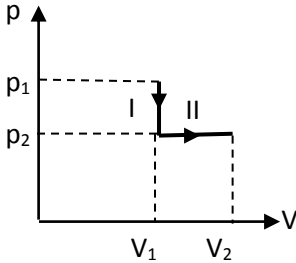
$$A = \nu R\Delta T = 5 \cdot 8,31 \cdot 100 = 4,16 \text{კჯ.}$$

ვინაიდან პროცესი იზობარულია

$$Q=6,23+4,16=10,39 \text{ კჯ.}$$

ამოცანა 13.4. $p_1 = 2,4 \cdot 10^5$ პა წნევისა და $T_1 = 400K$

ტემპერატურის 20ლ იდეალური აირი ჯერ იზოქორულად გააცივებს $T_2 = 300K$ -მდე და შემდეგ იზობარულად გააფართოვებს 30ლ-მდე. ააგეთ pV - დიაგრამა და გამოთვალეთ შესრულებული მუშაობა.



ამოხსნა: I პროცესი

იზოქორულია

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad \text{საიდანაც}$$

$p_2 = p_1 T_2 / T_1 = 1,8 \cdot 10^5$ პა, ამ დროს მუშაობა არ სრულდება $A_I = 0$. II პროცესი იზობარულია $p = p_2$

$$\text{და } A_{II} = p_2 (V_2 - V_1) = 1,8 \cdot 10^5 \cdot (3 - 2) 10^{-2} = 1,8 \text{ კჯ.}$$

ამოცანა 13.5. 4ლ მოცულობის იდეალური აირის წნევაა $5 \cdot 10^5$ პა, ტემპერატურა $127^\circ C$. ის ჯერ იზობარულად გააფართოვებს 6ლ-მდე, შემდეგ კი იზოთერმულად 12ლ-მდე. ბოლოს კი იზოქორულად აღადგინებს საწყისი წნევა. იპოვეთ თითოეული ეტაპის ბოლოს (p, V, T) პარამეტრები, აირის მიერ შესრულებული მუშაობა, ააგეთ (V, p) დიაგრამა.

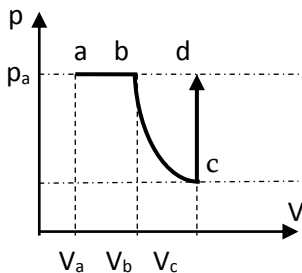
ამოხსნა: a მდგომარეობაში სისტემის პარამეტრებია $p_a = 5 \cdot 10^5$ პა, $V_a = 4$ ლ, $T_a = 127 + 273 = 400$ კელ. დავადგინოთ მოლეკლის რაოდენობა $p_a V_a = \nu R T_a$ განტოლებიდან

$$\nu = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 400} = 0,6 \text{ მოლ.} \quad a \rightarrow b \quad \text{იზობარულად}$$

გადასვლის გამო

$$\frac{V_a}{T_a} = \frac{V_b}{T_b} \text{ საიდანაც } T_b = 600 \text{ კელ.}$$

ე.ი b მდგომარეობაში



$p_b=5 \cdot 10^5$ პა, $V_b=6$ ლ, $T_b=600$ კელ, ხოლო აირის მიერ შესრულებული მუშაობა $A_{ab}=p\Delta V=5 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 10^{-3}=3 \cdot 10^2$ ჯ.

$$b \rightarrow c \text{ იზოთერმულად გადასვლის გამო } \frac{p_b}{p_c} = \frac{V_c}{V_b}.$$

საიდანაც $p_c=2,5 \cdot 10^5$ პა. ე.ი c-ში აირის პარამეტრებია: $p_c=2,5 \cdot 10^5$ პა, $V_c=12$ ლ, $T_c=600$ კელ. ხოლო აირის მიერ შესრულებული მუშაობა

$$A_{bc} = \nu RT_b \ln \frac{V_c}{V_b} = 0,6 \cdot 8,31 \cdot 600 \ln \frac{12}{6} = 2,01 \cdot 10^3 \text{ ჯ}.$$

$$c \rightarrow d \text{ იზოქორულად გადასვლის გამო } \frac{p_c}{T_c} = \frac{p_d}{T_d}$$

საიდანაც $T_d=1200$ კელ. ე.ი d მდგომარეობაში აირის პარამეტრებია: $p_d=5 \cdot 10^5$ პა, $V_d=12$ ლ, $T_d=1200$ კელ. ხოლო $A_{cd}=0$.

§14. სითბო. კუთრი და მოლური სითბოტევადობა

მუშაობისგან განსხვავებით გაცილებით რთული იყო სითბოს რაოდენობის ანუ უბრალოდ სითბოს არსის გარკვევა. მე-19-ე საუკუნის დასაწყისამდე სითბო განიხილებოდა როგორც უწონო ნივთიერება, რომელსაც შეეძლო შეეღწია ნებისმიერ სხეულში და გაეზარდა, ხოლო გამოსვლისას შეემცირებინა მისი ტემპერატურა. ამ პერიოდში წარმოიქმნა ტერმინები „სითბოს რაოდენობა“, „სითბოტევადობა“, ხოლო სითბოს საზომ ერთეულად შემოიღეს კალორია (კალ).

➤ **კალორია სითბოს ის რაოდენობაა, რომელიც საჭიროა 1 გ გამოხდილი წყლის 1°C-ით გასათბობად, ნორმალური ატმოსფერული წნევის ($1,013 \cdot 10^5$ პა) პირობებში.**

დიდი რაოდენობის სითბოს შემთხვევაში გამოიყენება კილოკალორია (კკალ) $1 \text{ კკალ} = 10^3 \text{ კალ}$.

XVIII საუკუნეში მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის განვითარებამ დაამტკიცა მოსაზრება იმის შესახებ, რომ ერთი სხეულიდან მეორეზე სითბო გადაცემა წარმოადგენს

ენერჯის გადაცემის ერთ-ერთ ფორმას. დადგინდა, რომ სითბოს ერთეული ექვივალენტურია მექანიკური ენერჯის გარკვეული რაოდენობის. კერძოდ კალორიასა და ჯოულს შორის არსებობს შემდეგი თანაფარდობა: $1\text{კალ}=4,2\text{ჯ}$ (უფრო ზუსტად $1\text{კალ}=4,182\text{ჯ}$). მაგალითისთვის განვიხილოთ გაზქურაზე წყლის გათბობის პროცესი. რადგან მოლეკულათა კინეტიკური ენერჯია ტემპერატურის ფუნქციაა, ამიტომ ბუნებრივი აირის მოლეკულათა საშუალო კინეტიკური ენერჯია ბევრად აღემატება ჭურჭლის (წყლის) მოლეკულათა საშუალო კინეტიკურ ენერჯიას. ამის გამო ჭურჭლის მოლეკულები აირის მოლეკულებიდან დებულობს კინეტიკურ ენერჯიას, თავის მხრივ ჭურჭლის მოლეკულები, წყლის მოლეკულების დაჯახებისას, გადასცემს მათ თავისი კინეტიკური ენერჯის ნაწილს, რის შედეგადაც წყალი თბება.

სითბოს რაოდენობა, რომელიც საჭიროა მოცემულ აგრეგატულ მდგომარეობაში სხეულის გასათბობად, დამოკიდებულია რამდენი გრადუსით უნდა გათბეს სხეული, ე.ი საბოლოო და საწყის ტემპერატურათა სხვაობაზე, სხეულის მასაზე და მის შემადგენელ ნივთიერების თვისებებზე. ზემოთქმულიდან გამომდინარე სითბოს აღნიშნული რაოდენობა გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta T. \quad (14.1)$$

რადგან $\Delta t = \Delta T$, (14.1) ასეც ჩაიწერება: $Q = cm\Delta T$.

c – მოცემული ნივთიერების მახასიათებელი სიდიდეა და მას კუთრი სითბოტევადობა ეწოდება.

➤ *კუთრი სითბოტევადობა სითბოს ის რაოდენობაა, რომელიც საჭიროა 1კგ წნევის დროს 1კგ ნივთიერების 1-ით გასათბობად (ივულისხმება, რომ ნივთიერების მდგომარეობა არ იცვლილება).*

მისი მნიშვნელობა სუსტადაა დამოკიდებული ტემპერატურასა და წნევაზე, რის გამოც საკმაოდ დიდ ტემპერატურულ ინტერვალში შეიძლება ჩავთვალოთ მუდმივად. ცხრილ 14.1-ში მოცემულია ზოგიერთი ნივთიერების კუთრი სითბოტევადობის მნიშვნელობები.

სხეულის გაციებისას გამოყოფილი სითბოც $Q < 0$ ცხადია ასევე (14.1)-ით გამოითვლება. სითხეებსა და მყარ სხეულებში ყველაზე დიდი კუთრი სითბოტევადობა გააჩნია წყალს – $c \approx 4,2 \cdot 10^3 \text{ჯ/კგ}^\circ\text{C}$, ე.ი. 1კგ გამოხდილი წყლის 1°C -ით გასათბობად საჭიროა $4,2 \cdot 10^3 \text{ჯ}$ სითბო. მაგ. ოქროს კუთრი სითბოტევადობა $c \approx 0,13 \cdot 10^3 \text{ჯ/კგ}^\circ\text{C}$. ასე, რომ ის სითბო, რომელიც საჭიროა მოცემული მასის წყლის გარკვეული ტემპერატურით გასათბობად, საკმარისი იქნება ≈ 32 ჯერ მეტი მასის ოქროს იმავე ტემპერატურით გასათბობად. ცხადია რა სითბოსაც შთანთქმავს სხეული გათბობისას იგივე რაოდენობას გამოჰყოფს გაცივებისას. ამიტომ სამხრეთის ზღვების მახლობელ ტერიტორიებზე ზამთარი საკმაოდ თბილია.

cm -ს - სხეულის კუთრი სითბოტევადობის და მასის ნამრავლს ამ სხეულის სითბოტევადობას უწოდებენ. მისი ერთეულია $\text{ჯ/}^\circ\text{C}$. ცხადია იგი მოცემული სხეულის 1^0 -ით გასათბობად საჭირო სითბოს ტოლია.

(14.1)-ში გავითვალისწინოთ მოლური რიცხვის $\nu = m/M$ მნიშვნელობა, მივიღებთ:

$$Q = cM\nu\Delta T = C\nu\Delta T. \quad (14.2)$$

$C = cM$ – *მოლური სითბოტევადობა*, ანუ ერთი მოლი ნივთიერების 1^0 -ით გასათბობად საჭირო სითბო.

სითბო ყოველთვის გადაეცემა ცხელი სხეულიდან უფრო ცივს და თუ სხეულთა სისტემა ჩაკეტილია სითბოს გადაცემის პროცესი შეწყდება მაშინ, როდესაც ყველა სხეული მიიღებს ერთნაირ ტემპერატურას. ანუ სრულდება *სითბური ბალანსის განტოლება*:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots = 0. \quad (14.3)$$

რომლის თანახმადაც

- ჩაკეტილი სისტემის სხეულთა მიერ გაცემული და მიღებული სითბოს რაოდენობათა ალგებრული ჯამი ნულის ტოლია.

ცხრილი 14.1

ნივთიერება	c ჯ/კგ $^{\circ}C$	ნივთიერება	c ჯ/კგ $^{\circ}C$
ალუმინი	$0,9 \cdot 10^3$	ხე	$1,7 \cdot 10^3$
სპილენძი	$0,39 \cdot 10^3$	ყინული	$2,1 \cdot 10^3$
მინა	$0,84 \cdot 10^3$	ზეთი	$2,2 \cdot 10^3$
რკინა, ფოლადი	$0,45 \cdot 10^3$	წყალი	$4,2 \cdot 10^3$
ტყვია	$0,13 \cdot 10^3$	გერცხლისწყალი	$0,9 \cdot 10^3$
თითბერი	$0,8 \cdot 10^3$	წყლის ორთქლი	$2,0 \cdot 10^3$
გერცხლი	$0,23 \cdot 10^3$	ადამიანის სხეული	$3,5 \cdot 10^3$

ამოცანა 14.1. რა ტემპერატურამდე გათბება $5^{\circ}C$ მქონე 10ლ წყალი 2,5კგ მასის თითბერის ჭურჭელში, თუ მასში ჩაუშვებს $100^{\circ}C$ ტემპერატურის მქონე ფოლადის ნაჭერი, თუ სითბური დანაკარგები 10%-ია. ფოლადის სითბოტევადობაა 2,88ჯ/გრად.

ამოხსნა: რადგან სითბოცვლაში მონაწილეობს სამი სხეული, ამიტომ სითბური ბალანსის განტოლების თანახმად:

$$Q_1 + Q_2 + 0,9Q_3 = 0. \quad \text{ე.ი}$$

$$c_1 \rho_1 V_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_1) + 0,9 c_3 m_3 (t - t_3) = 0$$

$$4,2 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-2} (t - 5) + 0,8 \cdot 10^3 \cdot 2,5 (t - 5) +$$

$$+ 0,9 \cdot 3,2 \cdot 10^3 (t - 100) = 0$$

$$42 \cdot (t - 5) + 2(t - 5) + 2,88 \cdot (t - 100) = 0,$$

$$21 \cdot (t - 5) + (t - 5) + 1,44 \cdot (t - 100) = 0, \quad t = 10,8^{\circ}C.$$

ამოცანა 14.2. გამოყოფილი სითბოს რა ნაწილი მიიღო 1კგ მასის ფოლადის სხეულმა, თუ მას 2მ სიმაღლიდან ეცემა 230კგ მასის ურო? სხეულის ტემპერატურა 5კელ-ით გაიზარდა.

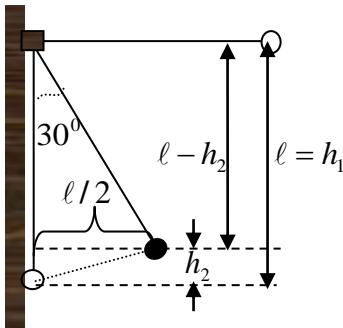
ამოხსნა: ფოლადის სხეულზე დავარდნისას უროს მიერ გამოყოფილი სითბური ენერჯიაა $|Q| = mgh = 230 \cdot 10 \cdot 2 = 4,6 \cdot 10^3$ ჯ, ხოლო სხეულის მიერ შექმნილი სითბო იქნება:

$$Q_1 = cm_1 \Delta T = 0,45 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 5 = 2,3 \cdot 10^3 \text{ ჯ}$$

მაშინ $\frac{Q_1}{|Q|} = \frac{2,3 \cdot 10^3}{4,6 \cdot 10^3} = 0,5$, ე.ი. სხეულმა მიიღო

გამყოფილი სითბოს 50%.

ამოცანა 14.3. 2მ სიგრძის ძაფზე დაკიდებული ფოლადის ბურთულა გადახარეს წონასწორობის მდებარეობიდან 90° -ით და გაუშვეს ხელი. კედელთან შეჯახების შემდეგ ბურთულა გადაიხარა 30° -ით. რამდენი გრადუსით გათბა ბურთულა, თუ მისი მექანიკური ენერჯის 80% გარდაიქმნა სითბოში.



ამოხსნა: ამოცანის პირობის თანახმად $0,8|\Delta W| = Q$, ანუ

$$0,8|mgh_2 - mgh_1| = cm\Delta t$$

$$0,8g|l - h_2| = c\Delta t \quad (1)$$

ნახაზიდან

$$l - h_2 = l \cos 30^\circ = \sqrt{3} \approx 1,73$$

(1)-ში გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$0,8 \cdot 10 \cdot 1,73 = 0,8 \cdot 450 \Delta t \quad \text{საიდანაც } \Delta t \approx 0,04^\circ$$

ამოცანა 14.4. რამდენი გრადუსით გათბება 10გ ფოლადის ღურსმანი 0,45კგ მასის უროს მიმდევრობით 20-ჯერ დარტყმის შედეგად, თუ დარტყმის მომენტში უროს სიჩქარეა 0,8მ/წმ, ხოლო უკუგდებისას 0,2მ/წმ და გამოყოფილი სითბო მთლიანად შთაინთქმება ღურსმნის მიერ.

ამოხსნა: ენერჯის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარე: $\Delta W_{\text{თბ}} + Q = 0$, სადაც

$$\Delta W_{\text{სტ}} = n \left(\frac{Mv_2^2}{2} - \frac{Mv_1^2}{2} \right) \quad n=20\text{-ჯერ უროს დარტყმისას}$$

მისი კინეტიკური ენერჯის ცვლილებაა. ე.ი.

$$n \left(\frac{Mv_2^2}{2} - \frac{Mv_1^2}{2} \right) + cm\Delta t = 0, \text{ საიდანაც } \Delta t = -\frac{nM}{2cm} (v_2^2 - v_1^2),$$

$$\Delta t = -\frac{20 \cdot 0,45}{2 \cdot 450 \cdot 0,01} (0,2^2 - 0,8^2) = 0,6^{\circ}C.$$

ამოცანა 14.5. რა დრო დაჭირდება 1,5კგ სიმძლავრის გამათბობლით 0,5კგ მასის ალუმინის ჭურჭელში 1ლ 20°C წყლის ადუღებას, თუ სითბური დანაკარგები გამოყოფილი სითბოს 40%-ია.

ამოხსნა: სითბური ბალანსის განტოლების თანახმად: $Q_1 + Q_2 + 0,6Q_3 = 0$, სადაც $Q_3 = -0,6Pt$ P სიმძლავრის გამათბობლის მიერ t დროში გამოყოფილი სასარგებლო სითბოს რაოდენობაა, ე.ი.

$$c_1 \rho_1 V_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_1) - 0,6Pt = 0. \text{ საიდანაც}$$

$$t = \frac{(t - t_1)(c_1 \rho_1 V_1 + c_2 m_2)}{0,6P} =$$

$$= \frac{(100 - 20)(4,2 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} + 0,9 \cdot 10^3 \cdot 0,5)}{0,6 \cdot 1,5 \cdot 10^3} = 413,3^{\circ}\text{მ}.$$

ამოცანა 14.6. ტყვიის ნაღმი, რომელიც მიფრინავდა ჰორიზონტალურად 400მ/წმ სიჩქარით 800მ სიმაღლეზე ეჯახება დაბრკოლებას და ვარდება ვერტიკალურად ქვემოთ მიწაზე. განსაზღვრეთ ნაღმის ტემპერატურის ცვლილება, თუ პირველი დაჯახებისას მის გათბობაზე დაიხარჯა მექანიკური ენერჯის 39%, ხოლო მიწაზე დაცემისას-40%. ნაღმის საწყისი ტემპერატურაა 270კელ.

ამოხსნა: პირველი და მეორე დაჯახებების შემთხვევაში ამოცანის პირობის თანახმად შეგვიძლია

$$\text{ჩავწეროთ: } 0,39 \left(\frac{mv^2}{2} \right) = cm(T_1 - T_0) \quad (1)$$

$$0,4mgh = cm(T_2 - T_1) \quad (2)$$

(1)-დან

$$T_1 = T_0 + \frac{1}{c} 0,39 \left(\frac{v^2}{2} \right) = 270 + \frac{1}{130} 0,39 \left(\frac{400^2}{2} \right) \approx 510 \text{ კელ.}$$

(2)-დან $T_2 = T_1 + \frac{1}{c} 0,4gh = 534 \text{ კელ.}$

ნაღმის ტემპერატურის ცვლილება იქნება:

$$\Delta T = (T_2 - T_0) = 534 - 270 = 264 \text{ კელ.}$$

§15. იდეალური აირის მოლური სითბოტევადობა. მაიერის შორმულა

ზოგადად მოლური და კუთრი სითბოტევადობის მნიშვნელობა დამოკიდებულია იმაზე, თუ რა პირობებში ხდება სითბოს გადაცემა. თუ პროცესი მიმდინარეობს მუდმივი წნევის ქვეშ, მაშინ C_p -ს უწოდებენ **მოლურ სითბოტევადობას მუდმივი წნევის დროს** და აღნიშნავენ C_p -თი, ხოლო, თუ სითბო გადაცემის დროს არ იცვლება ნივთიერების მოცულობა, მაშინ გვექნება **მოლური სითბოტევადობა მუდმივი მოცულობის დროს** - C_v . C_p -სა და C_v -ს შორის განსხვავება ნივთიერების მყარი ან თხევადი მდგომარეობისთვის უმნიშვნელოა $C_p \approx C_v$ (იხ. §27), ამიტომ ასეთ შემთხვევაში მოლურ სითბოტევადობას უინდექსოდ გამოვიყენებთ. აირადი მდგომარეობის შემთხვევაში კი მათ შორის განსხვავება საკმაოდ დიდია.

გამოვიყვანოთ იდეალური აირის მოლური სითბოტევადობის ფორმულები იზობარული და იზოქორული პროცესებისთვის (იზოთერმული პროცესისას სითბოტევადობა მიისწრაფის უსასრულობისკენ). (14.2) აირებში ელემენტარული იზობარული და იზოქორული პროცესებისთვის ასე ჩაიწერება:

$$dQ_p = C_p \nu dT. \quad (15.1)$$

$$dQ_v = C_v \nu dT. \quad (15.2)$$

რადგან მოცემული იდეალური აირის შინაგანი ენერგია მხოლოდ ტემპერატურის ფუნქციაა, ამიტომ დამოუკიდებლად იმისა $p = const$, თუ $V = const$, U -ს ცვლილება ორივე შემთხვევაში ერთნაირი იქნება

$$dU_p = dU_v = dU,$$

თერმოდინამიკის I კანონი $dQ = dU + dA$ აღნიშნული პროცესებისთვის ასე ჩაიწერება:

$$dQ_p = dU + dA_p, \quad (15.3)$$

$$dQ_v = dU + dA_v = dU. \quad (15.4)$$

(15.2)-ის და (15.4)-ის გატოლებით გვექნება:

$$dU = C_v \nu dT. \quad (15.5)$$

(15.3)-ში (15.1), (15.2) და (15.5)-ის გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$\nu C_p dT = \nu C_v dT + \nu R dT.$$

(νdT)-ზე შეკვეცის შედეგად მივიღებთ:

$$C_p = C_v + R. \quad (15.6)$$

(15.6)-ს *მაიერის ფორმულას* უწოდებენ. იგი ამყარებს კავშირს იდეალური აირის მოლურ სითბოტევადობებს შორის, რომლის თანახმადაც მოცემული იდეალური აირის C_p მეტია C_v -ზე $R = 8,31$ ჯ/მოლ·K სიდიდით. ეს თეორიული შედეგი კარგად შეესაბამება ცდისეულ შედეგებს. (15.4)-ის თანახმად,

$$dU = i \frac{\nu R dT}{2}, \quad (15.7)$$

ვინაიდან $dQ_v = dU$, ამიტომ $dQ_v = i \nu \frac{R dT}{2}$.

შევიტანოთ (15.2)-ში, მივიღებთ

$$C_v = \frac{i}{2} R. \quad (15.8)$$

შესაბამისად, (15.6) ასე ჩაიწერება:

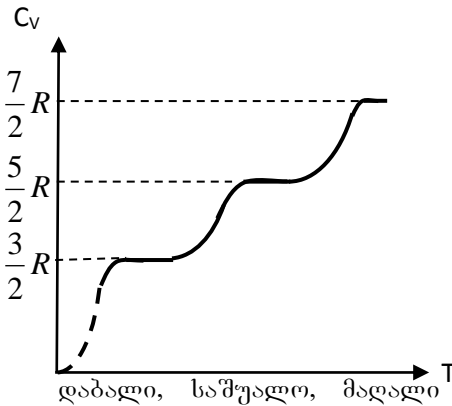
$$C_p = \frac{i+2}{2} R. \quad (15.9)$$

(15.8)-ისა და (15.9)-ის თანახმად აირის სითბოტევადობები დამოკიდებულია მოლეკულის თავისუფლების ხარისხზე $-i$ ანუ, ზოგადად, რამდენი ატომია მოლეკულაში და როგორია მათი ბმის ტიპი. ცხრილ 15.1-ში მოცემულია C_p, C_v -ს მნიშვნელობები, სადაც

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (15.10)$$

შემოტანილია ზოგიერთი ფორმულის კომპაქტური ჩაწერისთვის, იგი ასევე იდეალური აირის ერთ-ერთი მახასიათებელი სიდიდეა. γ -ს და C_p -ს ექსპერიმენტით განსაზღვრა გაცილებით მარტივია, ვიდრე C_v -სი. ამიტომ, ჩვეულებრივად, ზომავენ γ -ს და C_p -ს, ხოლო შემდეგ ანგარიშობენ C_v -ს. ჰაერისთვის $\gamma = 1,4$.

კლასიკურ ფიზიკაში გამარტივების მიზნით



ნახაზი 15.1

მოცემული მოლეკულის თავისუფლების ხარისხს განიხილავენ როგორც მუდმივ სიდიდეს, რის გამოც C_p და C_v სიდიდეებიც თეორიულად მუდმივია. რეალურად დაბალ ტემპერატურაზე დაიმზირება მხოლოდ

მოლეკულის გადატანითი მოძრაობა, ტემპერატურის ზრდისას თავს იჩენს ბრუნვითი, ხოლო შემდგომი გაზრდისას რხევითი მოძრაობაც. ამგვარად თავისუფლების ხარისხი და შესაბამისად მოლური

სითბოტევადობა ტემპერატურაზეა დამოკიდებული. ნახ.15.1-ზე ნაჩვენებია ორატომიანი აირის მოლური სითბოტევადობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. მრუდის წყვეტილი უბანი შეესაბამება გამყარებულ აირს.

მაშასადამე, მოცემული იდეალური აირის შინაგანი ენერგია მხოლოდ ტემპერატურის ფუნქციაა:

$$U(T) = \nu C_V T \quad (15.11)$$

მოგვიანებით ვაჩვენებთ, რომ რეალური აირის შინაგანი ენერგია სხვა პარამეტრებზეცაა დამოკიდებული.

ცხრილი 15.1.

იდეალური აირის ტიპი	მოლეკულაში ატომთა ბმის ტიპი	i	C_V	C_p	γ
ერთატომიანი	–	3	$3R/2$	$5R/2$	$5/3$
ორატომიანი	ხისტი	5	$5R/2$	$7R/2$	$7/5$
	დრეკადი	7	$7R/2$	$9R/2$	$9/7$
სამ- და მეტ-ატომიანი	ხისტი	6	$6R/2$	$8R/2$	$8/6$

ამოცანა 15.1. გამოვთვალოთ რამდენით შეიცვლება 200გ ნახშირორჟანგის (CO_2) აირის შინაგანი ენერგია, მისი ტემპერატურის $100^{\circ}C$ -ით გათბობისას (ატომებს შორის კავშირი ხისტია).

ამოხსნა: (15.11)-ის თანახმად

$$\Delta U(T) = \nu C_V \Delta T = \frac{m}{M} C_V \Delta T \quad \text{ე.ი.}$$

$$\Delta U(T) = \frac{200}{44} 6R/2 \cdot 100 \approx 11,3 \text{კჯ.}$$

ამოცანა 15.2. 3,2კჯ სითბოს გადაცემის შედეგად ერთი მოლი იდეალური აირი იზობარულად გაათბეს

144 კელ-ით. გამოთვალეთ მისი შინაგანი ენერჯიის ცვლილება და C_p/C_v თანაფარდობა.

ამოხსნა: (15.1)-ის თანახმად $Q_p = C_p \Delta T$ საიდანაც

$$C_p = Q_p / \Delta T = 3,2 \cdot 10^3 / 144 = 22,22 \text{ ჯ/კელ.მოლ.}$$

მაიერის ფორმულიდან

$$C_v = C_p - R = 22,22 - 8,31 = 13,91 \text{ ჯ/კელ.მოლ. ხოლო}$$

$$\Delta U = C_v \Delta T = 13,91 \cdot 144 = 2 \text{ კჯ. შესაბამისად } C_p/C_v = 1,6$$

ამოცანა 15.3. 10ლ მოცულობის ბალონში იმყოფება ჰელიუმის და წყალბადის აირთა ნარევი. ნარევის მასის 20%-ია ჰელიუმი. გამოვთვალოთ აირთა ნარევის სრული ენერჯია, თუ წნევაა $4,5 \cdot 10^5$ პა.

ამოხსნა: ჩავწეროთ ჰელიუმისა და წყალბადის მოლელების რაოდენობა:

$$\nu_1 = \frac{m_1}{M_1} = \frac{0,2m}{4 \cdot 10^{-3}}; \nu_2 = \frac{m_2}{M_2} = \frac{0,8m}{2 \cdot 10^{-3}} \quad (1)$$

ამიტომ ნარევიში მოლელების რაოდენობა იქნება:

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} = \frac{0,2m}{4 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,8m}{2 \cdot 10^{-3}} = 0,45 \frac{m}{10^{-3}} \quad (2)$$

(15.7)-ის თანახმად ნარევის სრული ენერჯია

$$U = i \frac{\nu RT}{2} = i_1 \frac{\nu_1 RT}{2} + i_2 \frac{\nu_2 RT}{2} = \frac{1}{2} (i_1 \nu_1 + i_2 \nu_2) RT \quad (3)$$

(7.1)-ის გამოყენებით ვღებულობთ:

$$U = \frac{1}{2\nu} (i_1 \nu_1 + i_2 \nu_2) pV \quad (4)$$

(4)-ში (1) და (2)-ის გათვალისწინებით გვექნება, რომ სრული ენერჯია

$$U = \frac{10^{-3}}{2 \cdot 0,45m} \left(3 \frac{0,2m}{4 \cdot 10^{-3}} + 5 \frac{0,8m}{2 \cdot 10^{-3}} \right) 4,5 \cdot 10^5 \cdot 10^{-2} = 1,075 \cdot 10^4 \text{ ჯ.}$$

**§16. ადიაბატური პროცესი. გბერის
ბავრცელების ადიაბატური გუნება**
პროცესს, რომელიც სისტემაში მიმდინარეობს
გარემოსთან სითბოცვლის გარეშე, ადიაბატური (ბერძ.
არაგარდამავალი) ეწოდება.

განვიხილოთ ეს პროცესი იდეალურ აირში.
დაუშვათ, წნევის ქვეშ მყოფი იდეალური აირი იმდენად
სწრაფად ფართოვდება, რომ ვერ ასწრებს სითბოცვლას
ჭურჭლის კედლებთან (გარემოსთან), მაგრამ
იმავედროულად გაფართოების ნებისმიერ ეტაპზე
ტემპერატურა თანაბრდება მთელ მოცულობაში, ე.ი.
მიმდინარეობს წონასწორული ადიაბატური პროცესი.
თერმოდინამიკის I კანონიდან გამომდინარე

$$dQ = dU + dA, (dQ = 0) \quad (16.1)$$

$$dU + pdV = 0. \quad (16.2)$$

(16.2) ჩავწეროთ V, T ცვლადების მიმართ. შევიტანოთ
მასში (15.5) და იდეალური აირის მდგომარეობის (7.1)
განტოლებიდან წნევის მნიშვნელობა $p = \nu RT / V$,
მივიღებთ:

$$\nu C_V dT + \nu RT \frac{dV}{V} = 0.$$

შევაკვეცოთ ν -ზე და მოვახდინოთ ცვლადთა განცალკეება

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} = 0,$$

რომლის ინტეგრირებით გვექნება:

$$\ln T + \frac{R}{C_V} \ln V = 0. \quad (16.3)$$

R/C_V ფარდობა გარდავქმნათ (15.6) და (15.10)

ფორმულების გამოყენებით: $\frac{R}{C_V} = \frac{C_p - C_V}{C_V} = \gamma - 1$,

შევიტანოთ (16.3)-ში და მოვახდინოთ პოტენცირება
 $TV^{\gamma-1} = const$, ანუ

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}. \quad (16.4)$$

(16.4) გვიჩვენებს ადიაბატური პროცესის დროს იდეალური აირის მოცულობისა და ტემპერატურის ურთიერთდამოკიდებულებას.

მარტივად შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ $pV = \nu RT$ განტოლების გამოყენებით შეიძლება ადიაბატური პროცესის ამსახველი კიდევ ორი განტოლების ჩაწერა (p, T) და (p, V) ცვლადებისთვის

$$T^\gamma p^{1-\gamma} = const, \quad pV^\gamma = const^{11}, \text{ ეს იგივეა, რაც}$$

$$T_1^\gamma p_1^{1-\gamma} = T_2^\gamma p_2^{1-\gamma}, \quad (16.5)$$

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (16.6)$$

(16.6)-ს *პუასონის განტოლება* ეწოდება.

(16.1)-ის თანახმად, $dA = -dU$, ანუ

➤ *ადიაბატური გაფართოებისას აირი მუშაობას ასრულებს შინაგანი ენერგიის ხარჯზე, რის შედეგადაც იგი ცივდება.*

ამ თვალსაზრისით საინტერესოა შემდეგი მოვლენა: როგორც ცნობილია, ჰაერის ქვედა ფენა გამდიდრებულია წყლის ორთქლით (ტენიანია), ამასთანავე იგი საკმაოდ თბება დედამიწის ზედაპირის მახლობლობაში, ფართოვდება და მცირე სიმკვრივის გამო, ცივი ჰაერის მიერ იდევნება ატმოსფეროს ზედა ფენებში. რადგან ზედა ფენებში წნევა დაბალია იგი სწრაფად -ადიაბატურად ფართოვდება და ცივდება. თუ ტემპერატურა დაეცა ნამის წერტილამდე (კონდენსაციის ტემპერატურამდე), წარმოიქმნება ღრუბელი, რომელიც შეიცავს წყლის უმცირეს წვეთებს. თუ ატმოსფერო სუფთაა-არ შეიცავს მტვრის ნაწილაკებს (მათ შუადკლიათ შეასრულონ კრისტალიზაციის ცენტრების როლი) შესაძლებელია წყლის წვეთების გადაციება ანუ დარჩენა თხევად მდგომარეობაში 0°C-ზე ქვემოთ (მაგ. დაფიქსირებულია ატმოსფეროში -30°C-ზე წყლის წვეთების არსებობა). ასეთ ღრუბელში თვითმფრინავის შეჭრისას წვეთები ეხება თვითმფრინავის ზედაპირს და

¹¹ ცხადია, განტოლებებში მუდმივების მნიშვნელობები განსხვავებულია.

მყისიერად გადაიქცევა ყინულის სქელ ფენად, რომელმაც შეიძლება თვითმფრინავის გადატვირთვა და შესაბამისად ფრენის რეჟიმის დარღვევა გამოიწვიოს, ამიტომ თვითმფრინავს უზრუნველყოფენ შემოყინვისგან დამცავი საშუალებებით.

შევადართო ერთმანეთს იზოთერმას $pV = const$ და ადიაბატას $pV^\gamma = const$ ფორმულები. იზოთერმული პროცესისას $p \sim 1/V$, ადიაბატურის შემთხვევაში $p \sim 1/V^\gamma$. რადგან $\gamma > 1$, ადიაბატური გაფართოებისას წნევა უფრო სწრაფად კლებულობს, ვიდრე იზოთერმულის შემთხვევაში, რაც შემდეგნაირად შეიძლება აიხსნას: $p = nkT$ -ს თანახმად, ადიაბატური გაფართოებისას წნევა ვარდება როგორც კონცენტრაციის, ასევე ტემპერატურის შემცირების გამო. იზოთერმული ($T = const$) გაფართოებისას კი წნევის შემცირებას მხოლოდ კონცენტრაციის შემცირება იწვევს.

ნახ. 16.1-ზე მოცემულია ერთნაირი საწყისი პირობებისთვის იდეალური აირის იზოთერმასა და ადიაბატას მრუდები.

გამოვთვალოთ იდეალური აირის მუშაობა ადიაბატური გაფართოებისას. (16.6) გადავწეროთ შემდეგი სახით $p_1 V_1^\gamma = p V^\gamma$, საიდანაც

$p = p_1 V_1^\gamma V^{-\gamma}$. შევიტანოთ (13.2)-ში

$$A = p_1 V_1^\gamma \int_{V_1}^{V_2} V^{-\gamma} dV = \frac{p_1 V_1^\gamma}{1-\gamma} V^{1-\gamma} \Big|_{V_1}^{V_2},$$

მარტივი გარდაქმნებით ვღებულობთ:

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right). \quad (16.7)$$

მას გრაფიკულად შეესაბამება ნახ. 16.1-ზე დაშტრიხული ფართი.

თუ ვისარგებლებთ იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებით $p_1 V_1 = \nu RT_1$, მაშინ (16.7) ასეც შეიძლება ჩავწეროთ:

$$A = \nu \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right). \quad (16.8)$$

(γ - ს ხშირად ადიაბატურ მუდმივასაც უწოდებენ).

რადგან ბგერის გავრცელებისას ჰაერის ფენათა შეკუმშვა-გაფართოება ძალიან სწრაფად მიმდინარეობს, ხოლო ჰაერი ცუდი სითბოგამტარია, ამიტომ სითბოს გადაცემა შეკუმშული ფენიდან მეზობელ გაფართოებულ ფენაზე პრაქტიკულად შეუძლებელია. ანუ **ჰაერში ბგერის გავრცელების პროცესი ადიაბატურია.**

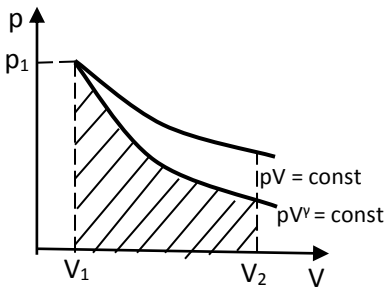
გამოვიყვანოთ ჰაერში ბგერის გავრცელების სინქარის გამოსათვლელი ფორმულა. ვისარგებლოთ სხეულის კუმშვისას მოცულობის ფარდობითი ცვლილების ფორმულით¹².

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{1}{B} \Delta p. \quad \text{ჩავწეროთ}$$

ადიაბატური პროცესისთვის ჰაერის მოცულობითი დრეკადობის კოეფიციენტი ასეთი სახით:

$$B_{\text{ადიაბ}} = -V \frac{dp}{dV}.$$

($\frac{dp}{dV}$ - წნევის ცვლილება მოცულობის ცვლილების პროცესზე (იზოთერმული, იზობარული, ადიაბატური)



დამოკიდებული, ამიტომ B -ც პროცესის ტიპის მიხედვით სხვადასხვა იქნება). რადგან ჰაერს განვიხილავთ, როგორც იდეალურ აირთა ნარევეს, ამიტომ ვისარგებლოთ

¹² იხ. ლიტ. 1. §23.

(16.6)-ით. მისი დიფერენცირებით მივიღებთ:

$$V^\gamma dp + p\gamma V^{\gamma-1} dV = 0 \Rightarrow V \frac{dp}{dV} + \gamma p = 0 \quad \text{და} \quad B_{\text{სიბრტყ.}} = \gamma p, \quad \text{ე.ი.}$$

$$v_{\text{ბბ}} = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}. \quad (16.9)$$

იგი გამოყენების თვალსაზრისით უფრო მოსახერხებელია, ვიდრე $v = \sqrt{B/\rho}$ ¹³.

(16.9)-ის საშუალებით გამოვთვალოთ ნორმალურ პირობებში ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში ($\rho = 1,29$ კგ/მ³):

$$v_{\text{ბბ}} = \sqrt{1,4 \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,29}} = 331 \text{ მ/წმ.}$$

მიღებული მნიშვნელობა კარგად ემთხვევა ექსპერიმენტალურ შედეგს და ადასტურებს ატმოსფეროში ბგერის გავრცელების პროცესის ადიაბატურ ხასიათს.

ამოცანა 16.1. 300K ტემპერატურის ერთატომიანი იდეალური აირის მოცულობა ადიაბატური გაფართოებისას ხუთჯერ იზრდება. გამოთვალეთ ტემპერატურის ცვლილება.

ამოხსნა: (16.4)-ის თანახმად, $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$,

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{1}{5}\right)^{\frac{5}{3}-1}, \quad T_2 = 300 \cdot 0,35 = 105 \text{ K}, \quad \Delta T = |T_2 - T_1| = 195 \text{ K}.$$

ამოცანა 16.2. განვიხილოთ ჰაერი, როგორც იდეალურ აირთა ნარევი და ვაჩვენოთ ბგერის სიჩქარის აბსოლუტურ ტემპერატურაზე დამოკიდებულება.

ამოხსნა: (16.9)-ში (7.5)-ის ჩასმით ვღებულობთ:

¹³ იხ. ლიტ. 1. §54.

$$v_{\text{ზ}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} = \sqrt{1,4 \frac{8,31}{29 \cdot 10^{-3}} \cdot T} = 20,03\sqrt{T}.$$

ე.ი ჰაერის ტემპერატურის ზრდისას მასში ბგერის გავრცელების სიჩქარე მატულობს.

ამოცანა 16.3. ერთატომიანი იდეალური აირის წნევა კვაზიწონასწორულად გაფართოებისას ორჯერ მცირდება. გამოთვალოთ მოცულობის ფარდობითი ცვლილება, თუ პროცესი 1. იზოთერმულია, 2. ადიაბატური.

ამოხსნა:

1. იზოთერმული პროცესის დროს $p_1V_1 = p_2V_2$,

$$\text{საიდანაც } \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} = 2.$$

2. ადიაბატური პროცესის შემთხვევაში (16.6)-დან

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/\gamma} = 2^{3/5} = 1,52.$$

ამოცანა 16.4. 10 მოლი, 420 კელ. ტემპერატურის ჰელიუმის ადიაბატური გაფართოებისას მოცულობა 3-ჯერ გაიზარდა. გამოთვალოთ გადაცემული სითბოს რაოდენობა, აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება და მის მიერ შესრულებული მუშაობა. ($\sqrt[3]{9} = 2,1$)

ამოხსნა: ადიაბატური პროცესის განმარტებიდან გამომდინარე $Q=0$.

$$(16.4)\text{-ის თანახმად, } \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}, \quad \frac{T_1}{T_2} = (3)^{5/3-1},$$

$$T_2 = \frac{420}{2,1} = 200 \text{ კელ. } \Delta U = i \frac{R\Delta T}{2}$$

$$\Delta U = 3 \frac{R(200-420)}{2} = -3300R \approx -27 \text{ კჯ. რადგან პროცესი}$$

ადიაბატურია $A = -\Delta U$, საიდანაც $A = 3300R \approx 27 \text{ კჯ.}$

§17. პოლიტროპული პროცესი

სისტემებში მიმდინარე პროცესები რეალურად საკმაოდ რთულია. მაგ., აირში მიმდინარე პროცესი შეიძლება ზუსტად არ მიეკუთვნებოდეს არც ერთ ზემოთ განხილულ პროცესს – იზოთერმულს, იზობარულს, იზოქორულს თუ ადიაბატურს. სხვანაირად რომ ვთქვათ, ცვლილებას განიცდის მოცემული აირის ყველა პარამეტრი (p, V, T) , ამავდროულად, აირი იძენს ან კარგავს სითბოს. ასეთ პროცესებს *პოლიტროპულს* (ბერძ. მრავალი მიმართულების) უწოდებენ.

➤ *პოლიტროპული პროცესისას უცვლელი რჩება სისტემის სითბოტევადობა*

$$C = \frac{1}{\nu} \frac{dQ}{dT} = \text{const} \quad (17.1)$$

მივიღოთ იდეალური აირისთვის პოლიტროპული განტოლება. ჩავეწეროთ თერმოდინამიკის I კანონი ელემენტალური პროცესისთვის $dQ = dU + dA$ და შევიტანოთ მასში შესაბამისი მნიშვნელობები:

$$\nu C dT = \nu C_V dT + p dV. \quad (17.2)$$

იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების $pV = \nu RT$ -ს გადიფერენციალებით ვღებულობთ:

$$p dV + V dp = \nu R dT. \quad (17.3)$$

(17.2) და (17.3)-დან dT -ს გამორიცხვით გვექნება:

$$\frac{\nu C - \nu C_V}{\nu R} = \frac{p dV}{p dV + V dp},$$

$$(C - (C_V + R)) p dV + (C - C_V) V dp = 0,$$

$$(C - C_p) p dV + (C - C_V) V dp = 0,$$

ცვლადთა განცალკევებით მივიღებთ:

$$\frac{C - C_p}{C - C_V} \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0.$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა:

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v} \quad (17.4)$$

გვექნება: $n \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0$, რომლის ინტეგრირებით მიიღება

პოლიტროპული პროცესის განტოლება:

$$pV^n = const, \quad (17.5)$$

სადაც n -ს *პოლიტროპიის მაჩვენებელი* ეწოდება.

იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების ($pV/T = const$) გამოყენებით პოლიტროპიის განტოლება შეიძლება (p, T) და (V, T) პარამეტრებითაც ჩაიწეროს:

$$pT^{\frac{n}{1-n}} = const, \quad VT^{\frac{1}{1-n}} = const.$$

(17.5) განტოლებიდან მიიღება ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი პროცესის შესაბამისი განტოლება. კერძოდ, როდესაც $n=1$ – *იზოთერმული*, $n=0$ – *იზობარული*, $n \rightarrow \infty$ – *იზოქორული* და $n=\gamma$ – *ადიაბატური*, (იზოქორული პროცესის მისაღებად (17.5)-დან ამოვიღებთ

n -ური ხარისხის ფესვს: $p^n V = const$. როდესაც $n \rightarrow \infty$,

მაშინ $p^n \rightarrow 1$ და $V = const$). (17.4)-დან

$$C = \frac{nC_v - C_p}{n-1}. \quad (17.6)$$

(17.6) წარმოადგენს იდეალური აირის მოლურ სითბოტევადობას პოლიტროპული პროცესის დროს. მოვახდინოთ C -ს შეფასება სხვადასხვა პროცესთა დროს:

1. იზოთერმული პროცესის შემთხვევაში $n=1$ და $C \rightarrow \infty$. მართლაც, იზოთერმული პროცესისას $dT=0$, ხოლო $dQ \neq 0$. მაშინ, (17.1)-ის თანახმად, იზოთერმული პროცესის დროს სისტემის სითბოტევადობა უსასრულოდ დიდია.

2. იზობარული პროცესისას $n = 0$ და $C = C_p$.
3. იზოქორული პროცესისას $n \rightarrow \infty$ და $C = C_v$.
4. ადიაბატური პროცესის შემთხვევაში

$$n = \gamma = \frac{C_p}{C_v}, \quad \text{ამიტომ} \quad C = 0. \text{ მართლაც,}$$

ადიაბატური პროცესის დროს $dQ = 0$, ხოლო $dT \neq 0$. მაშინ, (17.1)-ის თანახმად, $C = 0$. ეს შედეგი ზოგადია: **ადიაბატური პროცესის დროს ნებისმიერი სისტემის სითბოტევადობა ნულის ტოლია.**

n -ის განსაზღვრა, ჩვეულებრივად, ცდების საფუძველზე ხდება. მისი მნიშვნელობით შეიძლება ვიმსჯელოთ, თუ რომელ იდეალურ პროცესს უახლოვდება აირში მიმდინარე რეალური პროცესი.

პოლიტროპული პროცესის დროს იდეალური აირის მიერ შესრულებული მუშაობა გარე ძალის დაძლევაზე იგივე მათემატიკური გზით მიიღება, როგორც ადიაბატური პროცესისას, კერძოდ:

$$A = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right). \quad (17.7)$$

$$A = \nu \frac{RT_1}{n-1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right). \quad (17.8)$$

ტექნიკურ თერმოდინამიკაში სითბური ძრავების მუშაობას სწორედ პოლიტროპული პროცესის სახით განიხილავენ.

§18. რეალური აირის შინაგანი ენერჯია. ვან-დერ-ვაალსის განტოლება

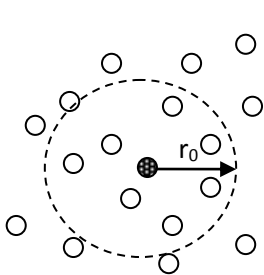
რეალური აირების შემთხვევაში საჭიროა გაავითვალისწინოთ, როგორც მოლეკულათა ურთიერთქმედება, ასევე მათი გეომეტრიული ზომები. რის გამოც მათი შინაგანი ენერჯია, იდეალური აირისგან განსხვავებით, შეიცავს არა მარტო მოლეკულათა

ქაოსური მოძრაობის კინეტიკურ ენერგიას, არამედ მათი ურთიერთქმედების პოტენციურ ენერგიასაც.

რადგან მოლეკულათა შორის ურთიერთქმედების ძალები მანძილის ზრდით სწრაფად მცირდება, ამიტომ შესაძლებელია აირის რომელიმე მოლეკულის ირგვლივ შემოვხაზოთ ისეთი r_0 რადიუსის სფერო (ნახ. 18.1), რომ მოცემული მოლეკულა ურთიერთქმედებდეს მხოლოდ ამ სფეროს შიგნით მყოფ მოლეკულებთან. ამ სფეროს **ქმედების სფერო** ეწოდება. გამარტივების მიზნით მოვითხოვოთ, რომ იმისადა დამოუკიდებლად, თუ სფეროს რომელ წერტილში მოხედება სხვა მოლეკულა მოცემულ მოლეკულასთან ურთიერთქმედების ენერგია w_3 იყოს ერთიდაიგივე. ამასთანავე დავუშვათ, რომ V მოცულობაში N რაოდენობის მოლეკულა თანაბრადაა განაწილებული ე.ი ადგილი აქვს პროპორციას:

$$\frac{V_0}{V} = \frac{n_0}{N-1}, \text{ საიდანაც } n_0 = \frac{V_0}{V}(N-1), \text{ ქმედების სფეროში}$$

მოხვედრილ მოლეკულათა რიცხვია,



ნახაზი 18.1

ხოლო $V_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3$ ქმედების სფეროს

მოცულობაა. ამ სფეროში მოხვედრილ მოლეკულათა პოტენციური ენერგია იქნება: $n_0 w_3$, ხოლო მთლიანი აირის მოლეკულათა პოტენციური ენერგია:

$$W_3 = \frac{1}{2} N n_0 w_3 = \frac{1}{2} w_3 \frac{V_0}{V} N(N-1). \quad 1/2$$

თანამამრავლი შემოტანილია იმიტომ, რომ უიმისოდ ყოველი მოლეკულა ჩაითვლებოდა ორჯერ- ერთხელ როგორც ქმედების სფეროს შემქმნელი და მეორედ როგორც მოხვედრილი სხვა მოლეკულის ქმედების სფეროში. შემოვიღოთ

აღნიშვნა
$$a = -\frac{1}{2} w_3 V_0 N(N-1). \text{ რადგან } w_3 < 0$$

(მოლეკულათა ურთიერთქმედება მიზიდვის ხასიათისაა) ამიტომ $a > 0$. საბოლოოდ მივიღებთ:

$$W_3 = -\frac{a}{V}. \quad (18.1)$$

ანუ რეალური აირის პოტენციური ენერჯია მოცულობის უკუპროპორციულია. რეალური აირის გაფართოებისას მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების (მიზიდვის) ძალები შეასრულებს მუშაობას $dA = -dW_3 = p' dV$. (18.1)-

ის გათვალისწინებით ვღებულობთ: $p' dV = \frac{a}{V^2} dV$, ანუ

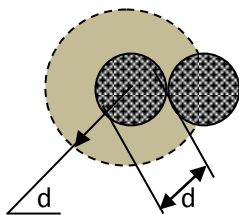
$$p' = \frac{a}{V^2} \quad (18.2)$$

იგი წარმოადგენს აირის მოლეკულების ურთიერთქმედებით გამოწვეულ დამატებით წნევას. მას **შინაგან წნევასაც** უწოდებენ.

ვისარგებლოთ (15.11)-ით და ჩავწერთ რეალური აირის შინაგანი ენერჯიის ფორმულა:

$$U = \nu C_V T - \frac{a}{V} \quad (18.3)$$

რადგან რეალური აირის მოლეკულებს გააჩნია საკუთარი მოცულობა გავარკვიოთ V მოცულობის ჭურჭლის რა ნაწილში განთავსდება ისინი. დავეუშვათ, რომ მოლეკულები წარმოადგენს d დიამეტრის აბსოლუტურად მყარ სფეროს, მაშინ, ცხადია, ორი მოლეკულის ცენტრი ვერ დაუახლოვდება ერთმანეთს d -ზე მცირე მანძილით. ასე, რომ მოლეკულებს რეალურად მოძრაობა შეუძლია ჭურჭლის V მოცულობაზე ნაკლებ მოცულობაში. მოლეკულათა მიერ „აუთვისებელი-შეუღწევადი“ b



ნახაზი 18.2

მოცულობის სიდიდე დამოკიდებულია მოლეკულათა ზომებსა და რაოდენობაზე. მართლაც განვიხილოთ ორი ასეთი მოლეკულა. რადგან მათ ცენტრებს შორის მანძილი არ შეიძლება იყოს d -ზე ნაკლები, ამიტომ მათგან არცერთის ცენტრი არ მოხვდება ისეთი d რადიუსის სფეროს შიგნით, რომლის ცენტრშიც მეორე

მოლეკულა იმყოფება (ნახ.18.2). ე.ი. განხილული წყვილისთვის „შეუღწევადი“ მოცულობაა $\frac{4}{3}\pi d^3$. თუ

აირში მოლეკულათა რაოდენობაა N , მოლეკულათა წყვილთა რიცხვი იქნება $N/2$, და მთელი აირში მოლეკულებისთვის „შეუღწევადი“ მოცულობა ტოლი აღმოჩნდება $b = \frac{N}{2} \cdot \frac{4}{3}\pi d^3 = 4NV_1$, სადაც

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \frac{\pi d^3}{6} \text{ ერთი მოლეკულის მოცულობაა.}$$

ე.ი., აირში “შეუღწევადი” მოცულობა მოლეკულათა ჯამური მოცულობის – NV_1 -ის გაოთხეკვებული სიდიდის ტოლია. მაშასადამე აირის მოლეკულებს შეუძლია განთავსდეს $(V-b)$ მოცულობაში, ანუ ისეთი მდგომარეობაა, რომ აირის მოცულობაა არა V , არამედ $(V-b)$.

ზემოთქმულის თანახმად იდეალური აირის (7.1) განტოლებაში თუ გავითვალისწინებთ წნევის და მოცულობის შესაბამის შესწორებებს მივიღებთ **რეალური აირის მდგომარეობის განტოლებას**:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = \nu RT \quad (18.4)$$

ეს განტოლება პირველმა მიიღო ჰოლანდიელმა ფიზიკოსმა **იან ვან-დერ-ვაალსმა** და მას ვან-დერ-ვაალსის განტოლებას უწოდებენ. a და b კოეფიციენტთა მნიშვნელობები დამოკიდებულია აირთა თვისებებსა და მოლეკულის რაოდენობაზე. ცხრილებში ჩვეულებრივ მოცემულია მათი მნიშვნელობები $\nu = 1$ მოლი აირისთვის a_1 და b_1 , ხოლო ν მოლის შემთხვევაში $a = \nu^2 a_1, b = \nu b_1$.

თუ შესაძლებელია აირის მოლეკულათა ურთიერთქმედების და ზომების უგულებელყოფა, ე.ი.

ადგილი აქვს უტოლობებს $\frac{a}{V^2} \ll p$ და $b \ll V$, მაშინ

(18.4)-დან მიიღება იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება. შევნიშნოთ, რომ ვან-დერ-ვაალსის განტოლებაც მიახლოებითია. მისი გამოყენებით მიღებული შედეგები ცდისეულ შედეგებს კარგად თანხვდება თვისობრივად და არა რაოდენობრივად.

ამოცანა 18.1. გამოვთვალოთ 0,5ლ/მოლ კუთრი მოცულობის ჟანგბადის წნევა 0⁰C-ზე ვან-დერ-ვაალსისა და კლაპეირონის განტოლებათა საშუალებით, თუ

$$a_1 = 0,146 \text{ მ}^4 / \text{მოლ}^2 \text{ და } b_1 = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ მ}^3 / \text{მოლ}.$$

ამოხსნა: ამოცანის პირობის თანახმად $v=1$, $V=0,5 \text{ ლ}=5 \cdot 10^{-4} \text{ მ}^3$. (7.1)-დან

$$p = \frac{\nu RT}{V} \quad p = \frac{1 \cdot 8,31 \cdot 273}{0,5} = 4,53726 \cdot 10^3 \text{ პა}. \quad (1)$$

$$(18.4)\text{-დან } p = \frac{\nu RT}{(V-b)} - \frac{a}{V^2}$$

$$p = \frac{1 \cdot 8,31 \cdot 273}{(0,5 - 0,000032)} - \frac{0,14}{0,5^2} = 4,53699 \cdot 10^3 \text{ პა}. \quad (2)$$

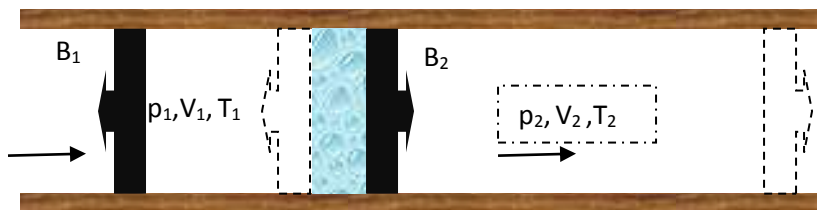
მოცემულ პირობებში ჟანგბადის აირის იდეალურად წარმოდგენისას მიღებული წნევის მნიშვნელობა (1) აღემატება წნევის რეალურ მნიშვნელობას (2), რაც გამოწვეულია მოლეკულათა ურთიერთ მიზიდვის გამო ჭურჭლის კედლებზე წარმოებულ წნევის ძალის შემცირებით.

§19. ჯოულ- ტომსონის ეფექტი

ჯოულ- ტომსონის ეფექტი ეწოდება აირის ტემპერატურის ცვლილებას, მისი ნელი გაჟონვისას ფოროვან წინაღობაში, რომელიც მიმდინარეობს გარემოსთან სითბოსცვლის გარეშე-ადიაბატურად.

ჯოულ- ტომსონის ხელსაწყოს სქემა მოცემულია ნახ.19.1-ზე. სითბოგაუმტარი კედლების მქონე მილში B_1 დგუშს ანაცვლებენ ბამბისგან დამზადებულ საცობისკენ

(ფოროვანი წინაღობა), რის გამოც აირი გადის საცობში და p_2 ($p_2 \ll p_1$) გარე წნევის მოქმედებით ანაცვლებს B_2 დგუშს. როდესაც B_1 დგუშში მიაღწევს საცობს მთელი აირი საცობის მარჯვენა მხარეს გაიდევნება და დაიკავებს V_2 მოცულობას ($V_2 \gg V_1$). (საცობში დიდი წინააღმდეგობის გამო, აირის ნაკადის სიჩქარე და შესაბამისად კინეტიკური ენერჯია ძალიან მცირეა და პრაქტიკულად არ იცვლება). რადგან აირის გაფართოება რეალურად მოხდა ვაკუუმში, ამიტომ თერმოდინამიკის I კანონის თანახმად, აირის მიერ შესრულებული მუშაობა და მისი შინაგანი ენერჯიის ცვლილებაც ნულის ტოლია. თუ დავუშვებთ რომ აირი იდეალურია, ანუ გამოვიციხავთ მოლეკულათა ურთიერთქმედებას, მაშინ მისი შინაგანი ენერჯია მოლეკულების კინეტიკურ ენერჯიათა ჯამის ტოლი იქნება. (15.11)-ის თანახმად, $\Delta U = \nu C_V \Delta T = 0$ და $T_2 = T_1$. ანუ აირის ტემპერატურა არ უნდა შეიცვალოს. როგორც ექსპერიმენტმა აჩვენა აირის ტემპერატურა იცვლება. ამ მოვლენას *ჯოულ-ტომსონის ეფექტი* უწოდეს. მაგ. ოთახის ტემპერატურის პირობებში ჰაერის ნაკადის შემთხვევაში წნევის ერთი ატმოსფეროთი ვარდნისას ($p_1 - p_2 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ ნ/მ}^2$) ტემპერატურა შემცირდა $\Delta T = T_2 - T_1 = -0,25^\circ\text{C}$ -ით. იგივე პირობებში ნახშირორჟანგის და



ნახაზი 19.1

წყალბადის აირების შემთხვევაში ΔT სათანადოდ აღმოჩნდა $-1,25^\circ\text{C}$ და $+0,02^\circ\text{C}$ -ის ტოლი. თუ $\Delta T < 0$ ჯოულ-ტომსონის ეფექტს უწოდებენ დადებითს, ხოლო როცა $\Delta T > 0$ უარყოფითს.

ჯოულ-ტომსონის ეფექტი ამტკიცებს აირის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების არსებობას.

მართალია მოცემულ ექსპერიმენტში აირის შინაგანი ენერგია არ იცვლება, მაგრამ აირის გაფართოებისას იზრდება მოლეკულათა ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგია (გავიხსენოთ, რომ ურთიერთქმედების მიზიდულობის ენერგია უარყოფითია) კინეტიკური ენერგიის ხარჯზე. მოლეკულათა მოძრაობა ნელდება და ტემპერატურა ეცემა. რეალურად ეს პროცესი უფრო რთულია, რადგან აირი სრულად იზოლირებული არ არის გარემოდან. აირის ის ნაწილი, რომელიც მოცემულ მომენტში იმყოფება საცობის მარჯვნივ ეწინააღმდეგება საცობის მარცხენა მხრიდან აირის შემდგომ შემოდინებას და ასრულებს გარკვეულ მუშაობას. საცობის მარცხნივ კი გარე ძალები B_1 დგუშზე მოქმედებით ასრულებს მუშაობას აირზე, იზობარულად კუმშავს მას (ნაკადის სტაციონარულობის შენარჩუნებისთვის). ამ ძალათა მუშაობა აირის საბოლოო გამოდევნამდე საცობის მარცხენა მხრიდან ტოლია $p_1(0-V_1)$ -ის. გამოდევნილი აირი კი მარჯვენა მხარეს იზობარული გაფართოებისას ასრულებს $p_2(V_2-0)$ მუშაობას. ამიტომ აირზე შესრულებული სრული მუშაობა იქნება:

$$A' = p_1V_1 - p_2V_2 \quad (19.1)$$

პროცესის ადიაბატურობის გამო, (11.1)-ის თანახმად, ეს მუშაობა მთლიანად ხმარდება შინაგანი ენერგიის ცვლილებას. ანუ

$$\Delta U = A', \quad U_2 - U_1 = p_1V_1 - p_2V_2$$

თუ ცნობილია აირის მდგომარეობის განტოლება და მისი შინაგანი ენერგიის ფორმულა შესაძლებელია ΔT -ს განსაზღვრა. ΔT -ს სიდიდე და ნიშანი განისაზღვრება აირისა და გარე ძალების მუშაობათა დამოკიდებულებით, ასევე აირის თვისებებით, კერძოდ მოლეკულათა ზომებით და მათი ურთიერთქმედებით.

გაფართოების პირობებისგან დამოკიდებულებით მოცემული აირი შეიძლება გაცივდეს ან გათბეს. ტემპერატურას, რომლის დროსაც მოცემული წნევის პირობებში $\Delta T = 0$ *ინვერსიის ტემპერატურა* ეწოდება. ამ ტემპერატურის ზევით წნევის შემცირება იწვევს აირის

ტემპერატურის გაზრდას (უარყოფითი ეფექტი), ხოლო ქვევით შემცირებას (დადებითი ეფექტი).

წნევის დიდი ვარდნისას აირის ტემპერატურა შეიძლება მკვეთრად შეიცვალოს. მაგ. $p_1 = 200$ ატმ-დან $p_2 = 1$ ატმ-მდე წნევის ვარდნით შესაძლებელია 17°C ჰაერის გაციება -18°C -მდე.

ჯოულ-ტომსონის ეფექტით დადასტურდა აირის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალების არსებობა. პრაქტიკაში ეს ეფექტი გამოიყენება აირების გასაცივებლად და გასათხევადებლად.

§20. სითბური ძრავები

თერმოდინამიკის I კანონი იგივე ენერჯიის მუდმივობის კანონია, რომლის თანახმადაც ჩაკეტილ სისტემაში ნებისმიერი პროცესის წარმართვის აუცილებელი მაგრამ არასაკმარისი პირობაა სისტემის ენერჯიის შენახვა. მართლაც, შეგვიძლია ჩამოვთვალოთ უამრავი პროცესი, რომლებსაც ეს კანონი არ კრძალავს, მაგრამ ბუნებაში არ ხდება. მაგ., თუ გვაქვს ცხელი და ცივი სხეულებისგან შემდგარი ჩაკეტილი სისტემა, სითბო გადაცემა ყოველთვის ხდება ცხელიდან ცივზე და არა პირიქით. თუმცა სისტემის ენერჯია ამ შემთხვევაშიც შეინახებოდა და თერმოდინამიკის I კანონი არ დაირღვეოდა.

XIX საუკუნის მეცნიერები პროცესთა მიმდინარეობის შესაძლებლობის შესწავლისას მივიდნენ ახალ აღმოჩენამდე, რომელსაც თერმოდინამიკის II კანონი ეწოდა. ამ კანონის ფორმულირებაში არსებითი როლი ითამაშა სითბური ძრავების (მანქანების) შექმნამ.

➤ **სითბური ძრავა ეწოდება ყოველგვარ მოწყობილობას, რომელიც სითბური ენერჯიის ხარჯზე ასრულებს მექანიკურ მუშაობას და ამ პროცესს პერიოდული ციკლური ხასიათი გააჩნია.**

სითბური ძრავის სამი მთავარი ნაწილია: *გამათბობელი, მუშა სხეული – აირი (სითხე, მყარი) და მაცივარი.*

ნახ. 20.1-ზე მოცემულია სითბური ძრავის სქემა. ძრავის გამათბობელი და მაცივარი წარმოადგენს თერმო-

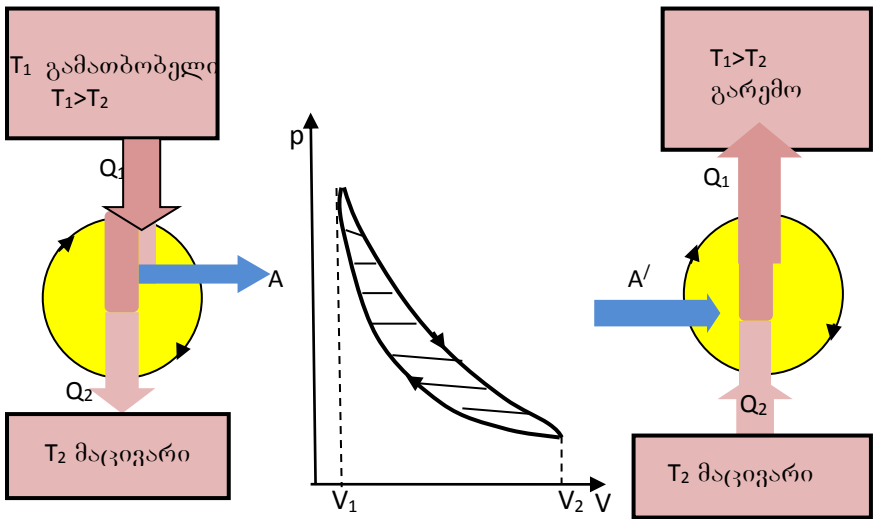
სტატებს, რომლებიც მთელი პროცესის განმავლობაში ინარჩუნებს, შესაბამისად, T_1, T_2 ($T_1 > T_2$) ტემპერატურებს.

სითბური ძრავის მუშაობის პრინციპი ასეთია: მუშა სხეული გამათბობლისგან იღებს სითბოს გარკვეულ Q_1 რაოდენობას, რომლის ნაწილსაც - $|Q_2|$ -ს პროცესის მიმდინარეობისას გადასცემს მაცივარს, ხოლო $Q_1 - |Q_2|^{14}$ ენერჯის ხარჯზე ასრულებს მექანიკურ მუშაობას:

$$A = Q_1 - |Q_2|$$

ავსნათ ძრავის მუშაობისთვის რატომ არის სავალდებულო სითბოს “უსარგებლო კარგვა” $|Q_2|$ -ის სახით. დავუშვათ, პროცესის დასაწყისში აირი გაფართოვდა V_1 -დან V_2 მოცულობამდე (ნახ. 20.2) და (20.1)

შეასრულა გარკვეული მუშაობა. პროცესის განმეორებადობისთვის საჭიროა აირის შეკუმშვა საწყის V_1 მოცულობამდე. იმისთვის, რომ აირის სასარგებლო მუშაობა იყოს ნულისგან განსხვავებული, საჭიროა



¹⁴ ნახაზი 20.1. ცხელ მათბობელს სითბოს რაოდენობა $Q_2 < Q_1$ გადასცემს ცივ მაცივარს. აბსოლუტურ მნიშვნელობას $|Q_2|$ -ს ნახაზი 20.3.

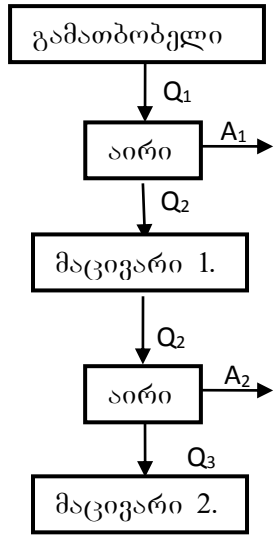
გაფართოებისას მის მიერ შესრულებული მუშაობა აღემატებოდა გარე ძალების მიერ მის შეკუმშვაზე შესრულებულ მუშაობას. ამისთვის კი საჭიროა, რომ აირის ტემპერატურა და, შესაბამისად, წნევა გაფართოებისას მეტი იყოს, ვიდრე შეკუმშვისას. აქედან გამომდინარე, აირის გაფართოების პროცესში საჭიროა Q_1 სითბოს მიწოდება, ხოლო შეკუმშვისას $|Q_2|$ სითბოს წართმევა. მაშასადამე, (20.1) წარმოადგენს ძრავის სასარგებლო მუშაობას ერთი ციკლის განმავლობაში, რომელსაც გრაფიკულად ნახ. 20.2-ზე შეესაბამება დაშტრიხული ფართი.

სითბური ძრავის ეფექტურობას აფასებენ **მარგი ქმედების კოეფიციენტით (მქკ)**. მას განსაზღვრავენ, როგორც სასარგებლო მუშაობის ფარდობას აირზე მიწოდებული სითბოს რაოდენობასთან

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}. \quad (20.2)$$

(20.2)-დან ცხადია, რომ სითბური ძრავის მქკ ყოველთვის ნაკლებია ერთზე ($< 100\%$). ამ შედეგის საფუძველზე

კელვინისა და პლანკის მიერ ფორმულირებული იქნა თერმოდინამიკის II კანონი: **შეუძლებელია ისეთი პერიოდული პროცესი, რომლის დროსაც გამათბობლიდან მიღებული სითბური ენერჯია მთლიანად გარდაიქმნას მუშაობად.** სწორად



ნახაზი 20.4

საქმის, რომ პირველი ძრავის მაცივარი მეორე ძრავის გამათბობლის როლს ასრულებს (ნახ. 20.4).

გამოვთვალთ ასეთი სისტემის მქკ-ის კავშირი თითოეული ძრავის მქკ-ებთან. (20.2)-ის თანახმად

$$\eta_1 = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \quad \text{და} \quad \eta_2 = \frac{Q_2 - |Q_3|}{Q_2}, \quad \text{ხოლო სისტემის}$$

მქკ იქნება: $\eta = \frac{Q_1 - |Q_3|}{Q_1}$. თუ η_1 და η_2 -ის ფორმულების

საშუალებით Q_2 -სა და Q_3 -ს განვსაზღვრავთ Q_1 -ის მიმართ და შევიტანთ სისტემის მქკ-ს ფორმულაში მივიღებთ:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \eta_2 \quad (20.3)$$

თუ განვიხილავთ სითბური ძრავის მოქმედების შებრუნებულ პროცესს, მივიღებთ *მაცივრის ციკლს* (ნახ. 20.3). ამ შემთხვევაში სითბო დაბალი ტემპერატურის არიდან გადაეცემა მაღალ ტემპერატურულ არეს, რაც ხორციელდება გარე ძალების მიერ მუშა სხეულზე გარკვეული A' მუშაობის შესრულებით. ამ შედეგის საფუძველზე *კლაუზიუსის* მიერ მოცემულ იქნა თერმოდინამიკის II კანონის კიდევ ერთი ფორმულირება:

➤ *შეუძლებელია ისეთი პერიოდული პროცესი, რომლის დროსაც სხეულიდან წართმეული სითბო მთლიანად გადაეცემა უფრო ცხელ სხეულს.*

მაცივრის ახასიათებენ გაცივების კოეფიციენტით:

$$\chi = \frac{|Q_2|}{A'}, \quad (20.4)$$

სადაც Q_2 გასაცივებელი სხეულიდან წართმეული სითბოა, ხოლო A' გარე ძალების მუშაობაა მაცივრის მოქმედებაში მოსაყვანად.

ამოცანა 20.1. ავტომობილის საშუალო სიმძლავრე 30კმ მანძილის 90კმ/სთ სიჩქარით დაძლევისას 20ცხ.ძ-აა. გავსაზღვროთ ძრავის მქკ, თუ ბენზინის წვის ხარჯზე გამოიყო $3 \cdot 10^4$ კკალ სითბო.

ამოხსნა: (20.2)-ის თანახმად, $\eta = \frac{Pt}{Q_1}$, სადაც

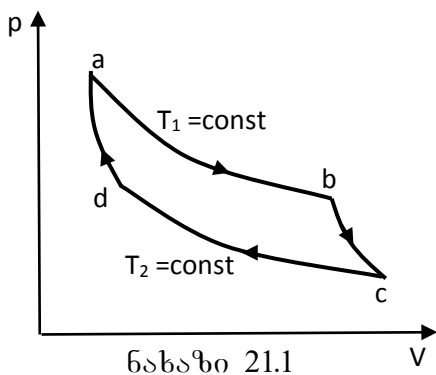
$$t = \frac{S}{v} = \frac{30}{90} \cdot 3600 = 1200 \text{ წმ}, P = 20 \cdot 736 = 15 \text{ კვტ.} \quad (1 \text{ ცხ.ძ.})$$

$$\approx 736 \text{ ვტ.}) \quad Q_1 = 3 \cdot 10^4 \cdot 4,2 = 1,26 \cdot 10^5 \text{ კვწ,} \quad \text{მაშინ}$$

$$\eta = \frac{15 \cdot 1200}{1,26 \cdot 10^5} = 0,14 = 14\% .$$

§21. კარნოს ციკლი

ფრანგმა მეცნიერმა **სადი კარნომ** თეორიულად შექმნა იდეალური სითბური ძრავის მოდელი და აღწერა მისი მუშაობის პროცესი – **კარნოს ციკლი**. თუმცა არცერთი ძრავა არ მუშაობს ამ ციკლის მიხედვით, მაგრამ მისი ცოდნა აადვილებს რეალური ძრავების მუშაობის შესწავლას. კარნოს ციკლი შექცევადია, ანუ წარმოადგენს შექცევადი პროცესების მიმდევრობისგან (§5), ე.ი. გამორიცხულია ხახუნის ძალთა არსებობა. იგი შედგება ორი იზოთერმული და ორი ადიაბატური პროცესისგან.



მუშა სხეულად აღებულია იდეალური აირი, გამათბობლის და მაცივრის როლს ასრულებს ცხელი (გამათბობელი) და ცივი (მაცივარი) თერმოსტატი. ნახ. 21.1-ზე მოცემულია კარნოს ციკლი. დასაწყისში (a მდგომარეობაში) აირი იმყოფება კონტაქტში

T_1 ტემპერატურის მქონე გამათბობელთან, რომლისგანაც განუწყვეტლივ ღებულობს სითბოს Q_1 რაოდენობას, რის ხარჯზეც იზოთერმულად ფართოვდება ab გზით. b მდგომარეობაში აირს აშორებენ გამათბობელს.

იზოლირებული აირი აგრძელებს ადიაბატურ გაფართოებას bc გზაზე, რის შედეგადაც ცივდება T_1 ტემპერატურიდან T_2 ტემპერატურამდე (§16). c მდებარეობაში აირს აკავშირებენ T_2 ტემპერატურის მაცივართან და იწყებენ მის იზოთერმულ შეკუმშვას cd მიმართულებით. ამ პროცესის განმავლობაში აირი Q_2 სითბოს გადასცემს მაცივარს. d მდგომარეობაში აირს აშორებენ მაცივარს და აგრძელებენ მის ადიაბატურ შეკუმშვას da გზაზე, რის შედეგადაც აირი თბება T_1 ტემპერატურამდე და უბრუნდება საწყის მდგომარეობას, ე.ი. სრულდება ერთი ციკლი.

განვიხილოთ კარნოს ციკლი ენერგეტიკული თვალსაზრისით. რადგან ab გზაზე აირი იზოთერმულად ფართოვდება, მის მიერ შესრულებული მუშაობა T_1 ტემპერატურის გამათბობლიდან მიღებული სითბოს Q_1 რაოდენობის ტოლია (§13)

$$Q_1 = A_{ab} = \nu RT_1 \ln \frac{V_b}{V_a}. \quad (21.1)$$

ანალოგიურად, cd გზაზე აირის იზოთერმულად შეკუმშვისას მასზე შესრულებული მუშაობა აირის მიერ T_2 ტემპერატურის მაცივარზე გადაცემული Q_2 სითბოს რაოდენობის ტოლი იქნება

$$|Q_2| = |A'_{cd}| = \nu RT_2 \ln \frac{V_c}{V_d}. \quad (21.2)$$

რადგან bc და da გზებზე პროცესი ადიაბატურია, (16.4)-ის თანახმად შეგვიძლია ჩავწეროთ

$$T_1 V_b^{\gamma-1} = T_2 V_c^{\gamma-1} \quad \text{და} \quad T_1 V_a^{\gamma-1} = T_2 V_d^{\gamma-1}.$$

მათი ურთიერთშეფარდებით მივიღებთ $\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$.

შევიტანოთ (21.2)-ში

$$|Q_2| = \nu RT_2 \ln \frac{V_b}{V_a}. \quad (21.3)$$

(21.3)-ის გაყოფით (21.1)-ზე გვექნება

$$\frac{|Q_2|}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (21.4)$$

ცხადია, კარნოს სითბური ძრავის მქკ ისევე, როგორც ნებისმიერი სითბური ძრავის, შეიძლება გამოვთვალოთ (21.2) ფორმულით, რომელიც (21.4) პროპორციული დამოკიდებულების გამო მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\eta_{\text{კარ}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (21.5)$$

მიღებული შედეგის საფუძველზე კარნომ ჩამოაყალიბა თეორემა:

- *იდეალური სითბური ძრავის მქკ არ არის დამოკიდებული არც ძრავის კონსტრუქციაზე და არც მუშა სხეულის თვისებებზე, იგი განისაზღვრება მხოლოდ თერმოსტატთა (გამათბობელი, მაცივარი) ტემპერატურებით.*

(21.5)-დან გამომდინარეობს, რომ იდეალური სითბური ძრავის მქკ მხოლოდ იმ შემთხვევაში შეიძლება იყოს 100%-ის ტოლი, როცა მაცივრის ტემპერატურა აბსოლუტური ნულის ტოლია. ეს კი შეუძლებელია აბსოლუტური ნულის მიუღწევლობის გამო. ($T_2 > 0, \eta_{\text{კარ}} < 100\%$)

კარნოს თეორიული ციკლის განხილვისას უგულებელყოფილი იყო სითბური დანაკარგები. სინამდვილეში პრაქტიკულად შექმნილ ძრავებში ადგილი აქვს სხვადასხვა ტიპის სითბურ დანაკარგებს (პროცესი შეუქცევადია), რის გამოც რეალური მქკ გაცილებით ნაკლებია თეორიულზე, ჩვეულებრივად იგი თეორიულის 50 – 80%-ს შეადგენს. რამდენადაც კარნოს ციკლი შექცევადია, ამ ციკლით მომუშავე მაცივრისთვისაც მქკ (21.5)-ით გამოითვლება, ხოლო გაცივების კოეფიციენტი (20.4) ღებულობს სახეს:

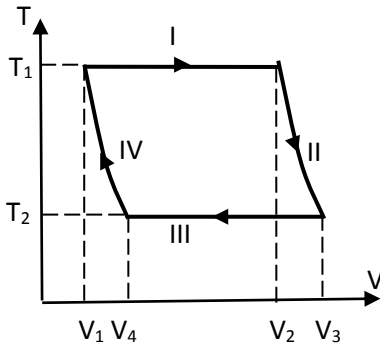
$$\chi = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (21.6)$$

სადაც T_2 გასაცივებელი სხეულის ტემპერატურაა, ხოლო T_1 იმ სხეულის ტემპერატურაა, რომელსაც გადაეცემა გასაცივებელი სხეულიდან წართმეული სითბო. დავამყაროთ კავშირი მაცივარის გაცივების კოეფიციენტსა და მქკ-ს შორის.

(21.5)-დან $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{1-\eta}$, ხოლო (21.6)-დან $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\chi} + 1$ მათი

გატოლებით ვღებულობთ: $\chi = \frac{1}{\eta} - 1$

ამოცანა 21.1. კარნოს ციკლის შესრულებისას აირის მინიმალური მოცულობაა 50ლ.



განვაზღვროთ მაქსიმალური მოცულობა, თუ აირის მოცულობა იზოთერმული გაფართოების დასასრულს 300ლ, იზოთერმული შეკუმშვის დასასრულს კი 65ლ იყო. ააგეთ (V, T) დიაგრამა.

ამოხსნა: ციკლი

შედგება I და III იზოთერმისა და II და IV ადიაბატისაგან. (16.4)-ის თანახმად,

$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$ (II უბანი) $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$ (IV უბანი)

მათი შეფარდებით მივიღებთ:

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \Rightarrow \frac{300}{50} = \frac{V_3}{65}$, საიდანაც $V_3 = 390$ ლ.

ამოცანა 21.2. თბოელექტროსადგურში ორთქლის ძრავები მუშაობს წყვილ-წყვილად. პირველი ძრავის გამათბობლისა და მაცივრის ტემპერატურებია 670°C და 430°C . მეორის 420°C და 280°C . გამოვთვალოთ ნახშირის წვის სიჩქარე, თუ სადგური იძლევა 450 მილიონ ვატ

სიმძლავრეს. ჩავთვალოთ, რომ ძრავათა მქკ კარნოს ძრავის 65%-ს შეადგენს. (1 კგ ნახშირი სრული დაწვისას გამოყოფს $2,7 \cdot 10^7$ ჯ სითბოს).

ამოხსნა: (21,5)-ის თანახმად

$$\eta_{1,კარ} = 1 - \frac{273 + 430}{273 + 670} = 0,25, \quad \eta_{2,კარ} = 1 - \frac{273 + 280}{273 + 420} = 0,20.$$

ამოცანის პირობის თანახმად ძრავათა მქკ იქნება: $\eta_1 = 0,65 \cdot 0,25 = 0,16$, $\eta_2 = 0,65 \cdot 0,20 = 0,13$. მაშინ (20.3)-ის გამოყენებით ვღებულობთ, რომ სისტემის მქკ ტოლია $\eta = 0,16 + 0,13 - 0,16 \cdot 0,13 = 0,27$.

მეორე მხრივ
$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Pt}{mq_{წ3}}, \quad \text{საიდანაც}$$

$$\frac{m}{t} = \frac{P}{\eta q_{წ3}} = \frac{45 \cdot 10^7}{0,27 \cdot 2,7 \cdot 10^7} = 61,7 \frac{\text{კგ}}{\text{წმ}}$$

ამოცანა 21.3. დავამყაროთ კავშირი კარნოს მაცივრის მქკ-სა და გაცივების კოეფიციენტს შორის. რისი ტოლია გაცივების კოეფიციენტი, თუ საყინულე განყოფილების ტემპერატურა -16°C -ის ტოლია, კომპრესორის კი 27°C -ის.

ამოხსნა: (21.5)-დან $T_2 / T_1 = 1 - \eta_{კარ}$ (1)

(21.6) გადავწეროთ შემდეგი სახით $\chi = \frac{T_2 / T_1}{1 - T_2 / T_1}$, (1)-ის

შეტანით ვღებულობთ: $\chi = \frac{1 - \eta_{კარ}}{\eta_{კარ}} = \frac{1}{\eta_{კარ}} - 1$. (2)

(21.5)-ის თანახმად $\eta_{კარ} = 1 - \frac{273 - 16}{273 + 27} = 0,14$. შევიტანოთ

(2)-ში:

$$\chi = 1/0,14 - 1 = 6,1$$

§22. ენთროპია. თერმოდინამიკის II და III კანონები

სისტემის მაკრომდგომარეობას ახასიათებენ ისეთი პარამეტრებით, როგორც არის *სიმკვრივე, წნევა, ტემპერატურა, შინაგანი ენერჯია* და სხვა. სისტემის მაკრომდგომარეობას განსაზღვრავს მისი შემადგენელი ნაწილაკების მიკრომდგომარეობები. ამასთანავე, სისტემის მოცემული მაკრომდგომარეობა შეიძლება განხორციელდეს სხვადასხვა მიკრომდგომარეობებით.

➤ *იმ სხვადასხვა მიკრომდგომარეობათა რიცხვს, რომელიც იძლევა მოცემულ მაკრომდგომარეობას, ამ მდგომარეობის თერმოდინამიკური ალბათობა (სტატისტიკური წონა) ეწოდება და აღინიშნება Ω .*

რაც მეტია სისტემის რაიმე მდგომარეობის თერმოდინამიკური ალბათობა, მით მეტად მოსალოდნელია სისტემის გადასვლა აღნიშნულ მდგომარეობაში. მათემატიკური ალბათობისგან განსხვავებით თერმოდინამიკური ალბათობა $\Omega \geq 1$.

სისტემა აზრობრივად გავყოთ ორ დამოუკიდებელ ქვესისტემად, რომელთა მდგომარეობის შესაბამისი თერმოდინამიკური ალბათობა იყოს Ω_1 და Ω_2 . მაშინ სისტემის, როგორც ერთი მთლიანის, შესაბამისი მდგომარეობის თერმოდინამიკური ალბათობა იქნება

$$\Omega = \Omega_1 \cdot \Omega_2 . \quad (22.1)$$

(22.1)-ის თანახმად, Ω არაკრებადი სიდიდეა, ამიტომ მისი გამოყენება

სისტემის მდგომარეობის დასახასიათებლად ნაკლებად მოსახერხებელია, სამაგიეროდ, კრებადია მისი ლოგარითმი. (22.1)-დან

$$\ln \Omega = \ln \Omega_1 + \ln \Omega_2 .$$

ამ მოსაზრებით მოლეკულურ ფიზიკაში სისტემის მდგომარეობის დასახასიათებლად შემოიღეს $\ln \Omega$ -ს პროპორციული სიდიდე, კერძოდ

$$S = k \ln \Omega , \quad (22.2)$$

რომელსაც *ენტროპია* (ბერძნულად – გარდაქმნა) უწოდეს. პროპორციულობის კოეფიციენტად $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ჯ/კ}$ ბოლცმანის მუდმივა შემოიღეს¹⁵, ე.ი.,

➤ *მოლეკულურ ფიზიკაში ენტროპია განსაზღვრავს სისტემის რაიმე მდგომარეობის განხორციელების შესაძლებლობას.*

აბსოლუტურ ნულზე ნებისმიერი სისტემა იმყოფება ძირითად მდგომარეობაში, რომლის თერმოდინამიკური ალბათობა $\Omega = 1$. მაშინ, (22.2)-ის თანახმად, $S = 0$. ეს მტკიცებულება ცნობილია *ნერსტის თეორემის* სახელწოდებით, მას თერმოდინამიკის III კანონსაც უწოდებენ

➤ *ნებისმიერი სისტემის აბსოლუტური ტემპერატურის ნულისკენ სწრაფვისას, მისი ენტროპიაც ნულისკენ მიისწაფვის.*

$$\lim_{T \rightarrow 0} S \rightarrow 0. \quad (22.3)$$

თერმოდინამიკური ალბათობის განმარტებიდან გამომდინარე, არაწონასწორულ ჩაკეტილ სისტემაში ყოველთვის განვითარდება ისეთი შეუქცევადი პროცესები, რომლებიც მას გადაიყვანს მცირე ალბათობის შესაბამისი მდგომარეობიდან უფრო მაღალი ალბათობის მდგომარეობაში, ე.ი., პროცესი განვითარდება ენტროპიის ზრდის მიმართულებით. როდესაც სისტემა საბოლოოდ გადავა მდგრად წონასწორულ მდგომარეობაში, მისი ენტროპიაც მიაღწევს მაქსიმუმს. ამის შემდეგ სისტემაში შეწყდება ყოველგვარი მიკროპროცესები, რომლებიც გამოიწვევდა მისი ენტროპიის შეცვლას¹⁶. თუ ჩაკეტილი სისტემის მდგომარეობის რომელიმე სასრული ცვლილებისას ენტროპია იზრდება მაშინ სისტემის ეს მდგომარეობა

¹⁵ ამ კოეფიციენტის შემოღებით თავიდან აიცილეს თერმოდინამიკაში ენტროპიით სარგებლობისას დამატებითი კოეფიციენტების შემოტანის საჭიროება.

¹⁶ ძალიან მცირე ალბათობით შესაძლებელია ჩაკეტილი სისტემის შემთხვევითი გადახრები – ფლუქტუაციები წონასწორობის მდებარეობიდან, მაგრამ ისინი უმნიშვნელოა და ხანმოკლე.

მეტასტაბილურია. მეტასტაბილურ მდგომარეობას მიეკუთვნება ზენაჯერი ორთქლი ან სითხე, ასევე გადახურებული და გადაციებული სითხე (იხ. §31). მეტასტაბილურ მდგომარეობაში სისტემა შეიძლება იმყოფებოდეს ნებისმიერად დიდი დროის განმავლობაში, თუ არ გაჩნდა სტაბილურში გადასვლის პირობები. მაგ. სითხის წვეთები ზენაჯერ ორთქლში.

თუ ჩაკეტილ სისტემაში მიმდინარეობს შექცევადი პროცესი, იგი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც წონასწორულ მდგომარეობათა უწყვეტი მიმდევრობა (§5). მაშინ სისტემის ენტროპია, განსაზღვრებიდან გამომდინარე, იქნება მაქსიმალური და უცვლელი $S = S_{\text{აქ}} = \text{const.}$

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, თერმოდინამიკის II კანონი ასე

შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ:

- **ჩაკეტილ სისტემაში მიმდინარე ნებისმიერი პროცესის დროს სისტემის ენტროპია ან იზრდება, ან რჩება უცვლელი**

$$\Delta S \geq 0. \quad (22.4)$$

თერმოდინამიკაში ენტროპია 1865 წელს კლაუზიუსის მიერ იქნა შემოტანილი. იმისთვის, რომ გასაგები გახდეს ამ სიდიდის შემოტანის არსი, დავუბრუნდეთ კარნოს ციკლს, რომელიც წარმოადგენს ჩაკეტილ სისტემაში ორი იზოთერმისა და ორი ადიაბატასგან შემდგარ შექცევად პროცესს. თუ (21.4)-ში გავითვალისწინებთ, რომ $Q_2 < 0$, მაშინ გვექნება

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0. \quad (22.5)$$

კლაუზიუსმა აჩვენა, რომ ნებისმიერი შექცევადი ციკლი შეიძლება კარგი მიახლოებით განვიხილოთ როგორც კარნოს ციკლთა ჯამი

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0. \quad (22.6)$$

უფრო ზუსტად, ნებისმიერი შექცევადი ციკლისთვის, (22.6) მიიღებს სახეს:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0, \text{ (შექცევადი პროცესი)} \quad (22.7)$$

სადაც dQ მუშა სხეულის მიერ მიღებული ან გაცემული ელემენტარული სითბოს რაოდენობაა, T მისი ტემპერატურაა, რომელიც ემთხვევა კონტაქტში მყოფი თერმოსტატის (გამათბობლის ან მაცივრის) ტემპერატურას. სითბოს რაოდენობა (ისევე, როგორც მუშაობა) დამოკიდებულია პროცესის მიმდინარეობის გზაზე მაშინ, როდესაც (22.7)-ის თანახმად, შექცევადი პროცესისთვის dQ/T სიდიდე არ არის დამოკიდებული თუ რა გზით გადადის სისტემა ერთი მდგომარეობიდან მეორეში. კლაუზიუსმა აჩვენა, რომ შექცევადი პროცესის დროს dQ/T სისტემის ენტროპიის ცვლილებაა

$$dS = \frac{dQ}{T}, \text{ (შექცევადი პროცესი)} \quad (22.8)$$

მაშასადამე

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}. \text{ (შექცევადი პროცესი)} \quad (22.9)$$

ენტროპია ისევე, როგორც პოტენციური ენერგია, განისაზღვრება მუდმივი შესაკრების სიზუსტით, მაგრამ პროცესის განხილვისას საინტერესოა არა ენტროპიის სიდიდე, არამედ მისი ცვლილება. ე.ი., ენტროპია სისტემის მდგომარეობის ფუნქციაა და ციკლის შემთხვევაში

$$\oint dS = 0. \quad (22.10)$$

ცხადია, სისტემაში მიმდინარე შექცევადი პროცესის დროს იმ ქვესისტემის ენტროპია, რომელიც გასცემს სითბოს, შემცირდება, სამაგიეროდ გაიზრდება იმ ქვესისტემის ენტროპია, რომელმაც ეს სითბო მიიღო. მაგრამ, ენტროპიის ადიტიურობიდან გამომდინარე, სისტემის სრული ენტროპია უცვლელი დარჩება.

ადიაბატური პროცესის დროს $dQ = 0$, მაშინ (22.8)-ის თანახმად, $S = const$. ამ თვალსაზრისით

შექცევად ადიაბატურ პროცესს *იზოენტროპიულსაც* უწოდებენ.

(22.8) და (22.9) სამართლიანია შექცევადი პროცესებისთვის. კლაუზიუსმა აჩვენა, რომ შეუქცევადი პროცესისთვის

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0.$$

რადგან ენტროპია სისტემის მდგომარეობის ფუნქციაა, (22.10) უნდა რჩებოდეს ძალაში დამოუკიდებლად იმისა, რა ტიპის პროცესებით დაბრუნდა სისტემა საწყის მდგომარეობაში. ამიტომ შეუქცევადი პროცესის შემთხვევაში (22.8)-ის ნაცვლად

ადგილი უნდა ჰქონდეს ტოლობას $dS = \frac{dQ}{T} + \alpha$, სადაც

$\alpha > 0$, ანუ სხვანაირად

$$dS > \frac{dQ}{T}, \text{ (შეუქცევადი პროცესი)} \quad (22.11)$$

სადაც T თერმოსტატის ტემპერატურაა, რადგან შეუქცევადი პროცესისას სისტემას არ გააჩნია განსაზღვრული ტემპერატურა. (22.8)-ისა და (22.11)-ის გაერთიანებით ვღებულობთ

$$dS \geq \frac{dQ}{T}. \quad (22.12)$$

(22.12)-ით შესაძლებელია ენტროპიის დაკავშირება სისტემის სხვა მახასიათებელ მაკროსკოპულ პარამეტრებთან (p, V, C_p, C_v) .

ენტროპიის შემოტანით შესაძლებელი გახდა თერმოდინამიკის II კანონის განზოგადოება და ზუსტი მათემატიკური ფორმულირება:

➤ *ნებისმიერ სისტემასა და მის გარემომცველ სხეულებში მიმდინარე ბუნებრივი (არა შექცევადი) პროცესების დროს ჯამური ენტროპია იზრდება.*

ე.ი., თუ სივრცის რომელიმე ნაწილში ენტროპია შემცირდა, მეორე ნაწილში გაიზრდება ისე, რომ უტოლობა $\Delta S > 0$ ძალაში დარჩება.

ბუნებრივია ისმის კითხვა: როგორ გამოვთვალოთ ენტროპიის ცვლილება სისტემაში მიმდინარე შეუქცევად პროცესის დროს. ასეთ შემთხვევაში ავირჩევთ რაიმე შექცევად პროცესს, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია სისტემის გადაყვანა 1-მდგომარეობიდან 2-ში და (22.9)-ის საშუალებით გამოვთვალოთ ენტროპიის ცვლილებას. რადგან ენტროპია სისტემის მდგომარეობის ფუნქციაა და პროცესის ტიპზე (გზაზე) არ არის დამოკიდებული, ამიტომ მიღებული ΔS ტოლი იქნება მოცემული შეუქცევადი პროცესის დროს ენტროპიის ცვლილების (იხ. ამოცანა 22.3).

ამოცანა 22.1. იდეალური აირის წნევაა $2,5 \cdot 10^5$ პა, მოცულობა 40 ლ, ტემპერატურა 300 კელ. იზოთერმულად გააფართოებისას წნევა 5-ჯერ დაეცა. გამოვთვალოთ ენტროპიის ცვლილება, თუ პროცესი შექცევადია.

ამოხსნა: ვისარგებლოთ (22.9) ფორმულით. პროცესის იზოთერმულობის გამო,

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 dQ = \frac{Q}{T}. \quad (1)$$

$$\S 13\text{-ის თანახმად, } A = Q = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (7.1)\text{-ის}$$

გათვალისწინებით

$$Q = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad \left(\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}; T = const \right)$$

(1)-ში შეტანით ვღებულობთ:

$$\Delta S = \frac{1}{T_1} p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{1}{300} 2,5 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \ln 5 = 53,6 \frac{\text{ჯ}}{\text{K}}$$

რადგან საჭირო სითბოს აირი თერმოსტატიდან (გამათბობლიდან) ღებულობს, გამათბობლის ენტროპიის ცვლილება იქნება $\Delta S_{\text{გამ}} = -53,6 \frac{\text{ჯ}}{\text{K}}$. ასე, რომ მთელი სისტემისთვის

$$\Delta S_{\text{აირი}} + \Delta S_{\text{გამ}} = 0.$$

ამოცანა 22.2. გამოვთვალოთ ერთი მოლი ორატომიანი ხისტი ბმის იდეალური აირის ენტროპიის ცვლილება 500°K ტემპერატურიდან 700°K ტემპერატურამდე ა) *იზობარული*, ბ) *იზოქორული* გათბობისას, თუ პროცესი შექცევადია

ამოხსნა:

ა) შევიტანოთ (15.3) (22.9)-ში, მივიღებთ

$$\Delta S = \nu C_p \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \nu \frac{i+2}{2} R \cdot \ln 1,4 \approx \frac{7}{2} \cdot 8,31 \cdot 0,34 = 9,9 \frac{\%}{\text{K}},$$

ბ) (15.4)-ის შეტანით (22.9)-ში, მივიღებთ

$$\Delta S = \nu C_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \nu \frac{i}{2} R \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{5}{2} \cdot 8,31 \cdot 0,34 = 7,1 \frac{\%}{\text{K}}$$

ამოცანა 22.3. 3 მოლი იდეალური აირის თავისუფალი ადიაბატური გაფართოებისას მოცულობა სამჯერ იზრდება. ვიპოვოთ ენტროპიის ცვლილება.

ამოხსნა: თავისუფალი გაფართოება ნიშნავს, რომ V_1 მოცულობაში მყოფ აირს ონკანის საშუალებით უერთებენ ცარიელ ჭურჭელს (ცარიელი ჭურჭლის მოცულობაა $2V_1$). რადგან აირი თავისუფალი გაფართოებისას არ ასრულებს მუშაობას $A=0$, პროცესის ადიაბატურობის გამო $Q=0$. მაშინ (11.2)-ის თანახმად, $\Delta U=0$, რის გამოც $T_1=T_2=T$. რადგან პროცესი სწრაფად მიმდინარეობს, იგი შეუქცევადია. იმისთვის, რომ შევძლოთ (22.9)-ის გამოყენება, ავირჩიოთ შესაბამისი შექცევადი პროცესი, რომელიც V_1 მოცულობის იდეალურ აირს გადაიყვანს V_2 მოცულობაში მუდმივი ტემპერატურის პირობებში. ცხადია, ასეთი პროცესი იზოთერმულია, რომლისთვისაც (22.9) მიიღებს სახეს (იხ. ამოცანა (22.1)

$$\Delta S = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1} = 3 \cdot 8,31 \cdot 1,1 = 27,4 \frac{\%}{\text{K}}.$$

ს მ ო ტ ა ნ ე მ ბ ო:

1. რა ტემპერატურა გააჩნია აზოტის (N_2) აირს (ატომებს შორის კავშირი დრეკადია), თუ მისი მოლეკულის საშუალო ენერგია ორჯერ აღემატება $147^{\circ}C$ ტემპერატურის მქონე ნეონის აირის (Ne) ატომის საშუალო ენერგიას. (პასუხი: $217^{\circ}C$)
2. გამოთვალეთ რამდენით შეიცვლება $100g$ ჰელიუმის (He) აირის შინაგანი ენერგია, მისი $100^{\circ}C$ -ით გათბობისას? (პასუხი: $31,2კჯ$)
3. გამოთვალეთ $4dm^3$ მოცულობის ერთატომიანი აირის წნევა, თუ მისი შინაგანი ენერგია $300ჯ$ -ია. (პასუხი: $0,5 \cdot 10^5 პა$)
4. რამდენით შეიცვლება ერთატომიანი 20 მოლი აირის შინაგანი ენერგია $50^{\circ}C$ -ით იზობარული გათბობისას? გამოთვალეთ აირის მუშაობა და გადაცემული სითბო. (პასუხი: $12,4კჯ$; $8,3კჯ$; $20,7კჯ$)
5. რამდენით შეიცვლება ორატომიანი (ატომებს შორის კავშირი ხისტია) 10 მოლი აირის შინაგანი ენერგია $100^{\circ}C$ -ით იზოქორული გათბობისას? რა მუშაობა შეასრულა აირმა და რა რაოდენობის სითბო გადაეცა? (პასუხი: $20,8კჯ$; $0კჯ$; $20,8კჯ$)
6. სითბოს რა რაოდენობაა საჭირო და რა მუშაობას შეასრულებს 2 მოლი $27^{\circ}C$ ტემპერატურის ერთატომიანი იდეალური აირი, მოცულობის ორჯერ გაზრდისას. პროცესი: 1. იზოთერმულია. 2. იზობარულია. (პასუხი: $3,5კჯ$, $3,5კჯ$; $12,5კჯ$, $7,5კჯ$)
7. რა მუშაობას შეასრულებს 4 მოლი იდეალური აირი, რომლის საწყისი ტემპერატურაა $127^{\circ}C$, მოცულობის იზოთერმულად 3 -ჯერ გაზრდისას? გამოთვალეთ აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება. (პასუხი: $14,6კჯ$; $14,6კჯ$)
8. 5 მოლი ჰელიუმი იზოქორულად გაათბეს $100კელ$ -ით. გამოთვალეთ გადაცემული სითბოს რაოდენობა, აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება და მის მიერ შესრულებული მუშაობა. (პასუხი: $6232,5ჯ$, $6232,5ჯ$, $0ჯ$)
9. 5 მოლი ჰელიუმი იზობარულად გაათბეს $100კელ$ -ით. გამოთვალეთ აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება, მის

მიერ შესრულებული მუშაობა და გადაცემული სითბოს რაოდენობა (პასუხი: 6232,5ჯ; 4155ჯ; 10387,5ჯ)

10. 10 მოლი 420კელ. ტემპერატურის ჰელიუმის ადიაბატური გაფართოებისას მოცულობა 3-ჯერ გაიზარდა. გამოთვალეთ აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება და მის მიერ შესრულებული მუშაობა, (პასუხი: -27423ჯ; 27432ჯ).

11. რა მუშაობას ასრულებს 8 მოლი იდეალური აირი, რომლის საწყისი ტემპერატურაა 0°C და წნევა 1ატმ, მისი მოცულობის ორჯერ გაზრდისას 1) იზოთერმული, 2) იზობარული პროცესის დროს? (პასუხი: 13კჯ; 18კჯ)

12. გამოთვალეთ მუშაობა 2,5ლ აზოტის იზოთერმულად 1,5ლ-მდე შეკუმშვისას, თუ წნევაა 1ატმ და ტემპერატურა 0°C ? (პასუხი: -127,5ჯ).

13. 16კგ მასის ჟანგბადი გაათბეს იზოქორულად 100°K -ით. გამოთვალეთ გადაცემული სითბოს რაოდენობა, აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება და აირის მიერ შესრულებული მუშაობა. (პასუხი: $1,04 \cdot 10^6$ ჯ; $1,04 \cdot 10^6$ ჯ; 0)

14. ჟანგბადს გადასცეს $2 \cdot 10^4$ ჯ სითბო მუდმივი წნევის პირობებში. გამოთვალეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა და მისი შინაგანი ენერგიის ცვლილება, $i=5$. (პასუხი: $5,7 \cdot 10^3$ ჯ; $14,3 \cdot 10^3$ ჯ;)

15. 2კგ მასის აზოტის ადიაბატური შეკუმშვისას შესრულდა 831ჯ მუშაობა. გაიგეთ აირის საბოლოო ტემპერატურა, თუ მისი საწყისი ტემპერატურაა 20°C , $i=5$. (პასუხი: 853°K)

16. ერთი ლიტრი ორატომიანი იდეალური აირის საწყისი წნევაა 10^5 პა. ადიაბატური გაფართოებისას მისი მოცულობა ორჯერ იზრდება. გამოთვალეთ დამყარებული წნევა და აირის მიერ შესრულებული მუშაობა, თუ $i=5$. (პასუხი: $3,8 \cdot 10^4$ პა; 60ჯ)

17. 20მ სიმაღლიდან 10მ/წმ საწყისი სიჩქარით თავისუფლად ვარდნილი ტყვია ხვდება დამაგრებულ 5-ჯერ მძიმე ვერცხლის ფირფიტას და რჩება მასში. რამდენი გრადუსით გათბება ფირფიტა, თუ მისი და ტყვიის საწყისი ტემპერატურა ერთნაირია. (პასუხი: 1კელ)

18. 4მ სიგრძის ძაფზე დაკიდებული სპილენძის ბურთულა გადახარეს წონასწორობიდან 60° -ით და გაუშვეს ხელი. კედელთან შეჯახების მერე ბურთულა გადაიხარა 30° -ით. რამდენი გრადუსით გათბა ბურთულა, თუ მექანიკური ენერჯის 78% გარდაიქმნა სითბოში. (პასუხი: $\sim 0,04$ კელ)

19. 83,1ლ მოცულობის ჰელიუმის წნევაა 10^5 პა, ტემპერატურა 250კელ. იგი იზოქორულად გაათბეს 300კელ-მდე. შემდეგ იზობარულად ისევ გაათბეს 360კელ-მდე. ბოლოს კი იზოთერმულ პირობებში დააბრუნეს პირვანდელ წნევამდე. ააგეთ $p(T)$ დიაგრამა. გამოთვალეთ აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა და შესრულებული მუშაობა. (პასუხი: 7719ჯ 2234ჯ)

20. სითბური ძრავათა სისტემის მქკ-ია $82,5\%$ -ია. პირველ ძრავასთან, რომლის მქკ 50% -ია, მიერთებულია მეორე სითბური ძრავა ისე, რომ პირველის მაცივარი მეორე ძრავის გამათბობლის როლს ასრულებს. ვიპოვოთ მეორე ძრავის მქკ. (პასუხი: 65%)

21. სამი სითბური ძრავა ($\eta_1 = \eta_2 = \eta_3$), მიმდევრობით მიერთებულია ერთმანეთთან ისე, რომ პირველი ძრავის მაცივარი მეორის გამათბობლის როლს ასრულებს, ხოლო მეორის მაცივარი მესამის გამათბობლია. ვიპოვოთ სისტემის მქკ. (პასუხი: $\eta = (1 - (1 - \eta_1)^3)$)

22. კარნოს ძრავა თითოეულ წამში მოიხმარს 900კკალ სითბოს. მაცივრის ტემპერატურაა 27°C , გამათბობლის 127°C . გამოთვალეთ ძრავას სიმძლავრე. (პასუხი: 945კჯ)

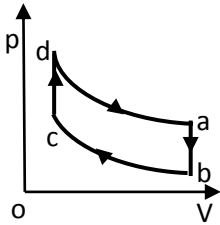
23. კარნოს ძრავის სიმძლავრეა 650კვტ. იგი თითოეულ წამში მოიხმარს 1250კკალ სითბოს. გამოთვალეთ მაცივრის ტემპერატურა, თუ გამათბობლის ტემპერატურაა 590°C . (პასუხი: 483°C)

24. კარნოს მაცივრის გაცივების კოეფიციენტია 5, ხოლო კომპრესორის ტემპერატურაა 25°C . იპოვეთ: საყინულეს ტემპერატურა, კარნოს მაცივრის მქკ. (პასუხი: $-17^{\circ}\text{C}, 14\%$)

25. კარნოს ციკლის შესრულებისას აირის მინიმალური მოცულობაა 50ლ. განსაზღვრეთ მაქსიმალური მოცულობა, თუ აირის მოცულობა იზოთერმული

გაფართოების დასასრულს 300ლ, იზოთერმული შეკუმშვის ბოლოს კი 65ლ იყო. ააგეთ (V, T) დიაგრამა.

26. იდეალური სითბური მანქანის გამათბობლის ტემპერატურაა 117°C , მაცივრის 27°C . ის გამათბობლიდან ყოველ წამში იღებს 60კჯ ენერგიას. გამოთვალეთ სითბოს რა რაოდენობა გადაეცემა მაცივარს ყოველ წამში. (პასუხი: 46კჯ)



27. გრაფიკზე მოცემულია შიგაწვის ძრავის მუშაობის შექცევადი ოტოს ციკლი, რომელიც შედგება ორი ადიაბატისგან და ორი იზოქორისგან. მუშა აირი ერთატომიანი იდეალური აირია. გამოთვალეთ მქკ, თუ შეკუმშვის ხარისხი $V_b/V_c=6$. როგორ

შეიცვლება მქკ თუ გამოვიყენებთ ორატომიან იდეალურ აირს? (პასუხი: 70%; შემცირდება)

28. ძრავის გამათბობლისა და მაცივრის ტემპერატურა შესაბამისად 525°C და 290°C -ის ტოლია, ხოლო მქკ კარნოს შესაბამისი ციკლის ნახევრის ტოლია. ძრავის მიერ გამომუშავებული სიმძლავრე 850კვტ-ია. გამოთვალეთ ძრავის მიერ მოხმარებული სითბური ენერგია ერთი საათის განმავლობაში. (პასუხი: $2 \cdot 10^{10}$ ჯ)

29. გამოთვალეთ 2 მოლი იდეალური აირის მოცულობის 2-ჯერ გაზრდისას ენტროპიის ცვლილება, თუ პროცესი იზოთერმულია და შექცევადი. (პასუხი: 11,63 ჯ/კელ)

30. 2კგ მასის 307°C -ის ტემპერატურამდე გაცხელებული რკინის ნაჭერი ჩააგდეს იმდენად დიდი მოცულობის 17°C -ის წყალში, რომ წყლის ტემპერატურა უმნიშვნელოდ გაიზარდა. გამოთვალეთ ა) რკინის ბ) წყლის, გ) სისტემის რკინა- წყალი ენტროპიის ცვლილება.

(პასუხი: -621 ჯ/კელ; 900ჯ/კელ; 279 ჯ/კელ)

31. 2კგ მასის 7°C -ის წყალი დაასხეს ტბის -3°C ტემპერატურის გაყინულ ზედაპირს. გამოთვალეთ: წყლის ტბის, სისტემის წყალი-ტბის ენტროპიის ცვლილება, თუ ტბის ზედაპირის ტემპერატურა (პასუხი: -4058 ჯ/კელ; 4104ჯ/კელ; 46 ჯ/კელ)

თავი III. კრისტალური მდგომარეობა

§23. კრისტალური მყარი სხეულები და მათი პლასტიციზაცია

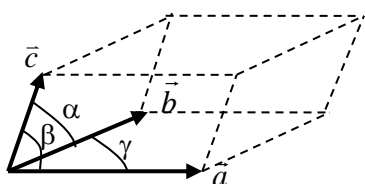
კრისტალური (ბერძ. გამჭვირვალე ყინული) ეწოდება ისეთ მყარ სხეულს, რომელიც ხასიათდება შემადგენელი ნაწილაკების განლაგების მკაცრი გეომეტრიული *კანონზომიერებით* *საკმაოდ დიდ მოცულობაში*, *ანუ ახასიათებს შორეული წესრიგი*. ბუნებაში არსებული მყარი სხეულების დიდი უმრავლესობა კრისტალურია. მაგ. კრისტალურია მყარ მდგომარეობაში თითქმის ყველა მინერალი და ყველა ლითონი. კრისტალთა დამახასიათებელი და სხვებისგან განმასხვავებელი ნიშანია *ანიზოტროპულობა*, ანუ მათი მთელი რიგი თვისებების: მექანიკურის, სითბურის, ელექტრულის, მაგნიტურის, ოპტიკურის დამოკიდებულება მიმართულებაზე.

არსებებს ე.წ. *ამორფული* მყარი სხეულები, რომლთაც ახასიათებთ *ახლო წესრიგი*, ანუ კანონზომიერი განლაგება შეიმჩნევა მხოლოდ მოცემული ნაწილაკის უახლოეს გარემოცვაში (ახლო წესრიგი შეიმჩნევა სითხეებშიც). ამორფულია: მინა, მინისებრი სხეულები, სინთეტიკური პლასტმასები, მცენარეული და ცხოველური ქსოვილები. ასეთ სხეულთა დამახასიათებელი ნიშანია *იზოტროპულობა*, ანუ მათი თვისებები ყველა მიმართულებით ერთნაირია. ასევე იზოტროპულია ნებისმიერი აირი.

კრისტალთა წარმოშობის სამი გზა არსებობს. ესენია: მდნარის (გაღებობილ მდგომარეობაში მყოფი კრისტალის), ხსნარის (გამხსნელი და გახსნილი ნივთიერების ერთობლიობის) გაციების შედეგად და, ბოლოს, უშუალოდ გაზური ფორმიდან კრისტალების მიღება თხევადი მდგომარეობის გავლის გარეშე. ჩვეულებრივ დაკრისტალების მომენტში ნივთიერებაში ერთდროულად წარმოიქმნება კრისტალიზაციის ცენტრების დიდი რიცხვი. ამ ცენტრებიდან მიმდინარეობს მათი შემდგომი დამოუკიდებელი ზრდა. ამიტომ ეს კრისტალიკები ერთმანეთის მიმართ უწესრიგოდ არიან

ორიენტირებული ზრდის პროცესში ისინი ერთმანეთს ერწყმიან და მიიღება **პოლიკრისტალი**, რომელიც, წარმოქმნის მექანიზმიდან გამომდინარე, ერთიანობაში არ ავლენს ანიზოტროპულობას, თუმცა მისი ცალკეული კრისტალიკები ანიზოტროპულია. კრისტალიზაციის სპეციალური პირობების შექმნისას შესაძლებელია ხსნარიდან ან მდნარიდან მიიღონ კრისტალი-**მონოკრისტალი** სწორი გეომეტრული ფორმითა და ანიზოტროპულობით.

კრისტალში შეიძლება გამოვეყნოთ ისეთი უმცირესი სტრუქტურული ელემენტი - **ელემენტარული კრისტალური უჯრედი**, რომლის მრავალჯერადი განმეორებითი გადატანით სივრცის სამი განსხვავებული მიმართულებით მიიღება მთელი კრისტალი. უჯრედი წარმოადგენს პარალელოპიპედს, რომლის გვერდების



ნახაზი 23.1.

სიგრძეები a, b, c მოცემული მიმართულებით კრისტალის პერიოდებია. გარდა ამისა უჯრედს ახასიათებენ იმ α, β, γ კუთხეებით, რომელსაც $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ ვექტორები ადგენს ერთმანეთთან (ნახ. 23.1).

კრისტალურ მესერს გააჩნია სხვადასხვა ტიპის სიმეტრია. კრისტალური მესერის სიმეტრიაში იგულისხმება თვისება შეუთავსლდეს თავისთავს რაიმე სივრცული გადანაცვლებით, მობრუნებით, სარკული არეკვლით და ა.შ. თუ მესერი თავისთავს უთავსდება რაიმე ღერძის მიმართ $2\pi/n$ კუთხით მობრუნებისას, მაშინ ამ ღერძს n -ური რიგის **სიმეტრიის ღერძი** ეწოდება. გარდა ტრივიალური $n=1$ რიგისა არსებობს 2, 3, 4 და 6 რიგის სიმეტრიის ღერძები. სიბრტყეს, რომლის მიმართაც სარკული არეკვლის შემდეგ კრისტალური მესერი უთავსდება თავის თავს **სიმეტრიის სიბრტყე** ეწოდება (არსებობს სიმეტრიის სხვა ფორმებიც, რომელსაც არ განვიხილავთ).

კრისტალურ მესერს გააჩნია სიმეტრიის არა ნებისმიერი, არამედ განსაზღვრული კომბინაციები.

როგორც რუსმა მეცნიერმა **ფიოდოროვმა** აჩვენა შესაძლებელია მხოლოდ სიმეტრიის ელემენტების 230 კომბინაცია - **სივრცობრივი ჯგუფი**, რომელიც სიმეტრიის ნიშნის მიხედვით გადანაწილებულია 32 კლასში. ელემენტალური უჯრედის ფორმის მიხედვით ეს კლასები დაჯგუფებულია შვიდ კრისტალოგრაფიულ სისტემად - **სინგონიად**, რომლებიც სიმეტრიის ზრდის მიხედვით შემდეგნაირად განლაგდება:

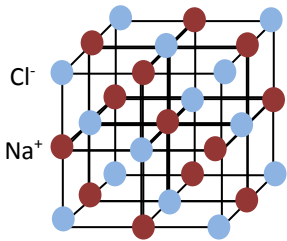
1. **ტრიკლინური სისტემა.** $a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma$.
შესაბამის ელემენტალურ უჯრედს გააჩნია ირიბკუთხა პარალელეპიპედის ფორმა.
2. **მონოკლინური სისტემა.**
 $a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$.
შესაბამის ელემენტალურ უჯრედს გააჩნია მართი პარალელეპიპედის ფორმა, რომლის ფუძე პარალელოგრამია.
3. **რომბული სისტემა.** $a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.
შესაბამის ელემენტალურ უჯრედს გააჩნია მართკუთხა პარალელეპიპედის ფორმა.
4. **ტეტრაგონალური სისტემა.**
 $a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.
შესაბამის ელემენტალურ უჯრედს გააჩნია მართკუთხა პარალელეპიპედის ფორმა, რომლის ფუძე კვადრატია.
5. **რომბოედრული (ტრიგონალური) სისტემა.**
 $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$.
შესაბამის ელემენტალურ უჯრედს გააჩნია დიაგონალის გასწვრივ დეფორმირებული (შეკუმშვით ან გაჭიმვით) კუბის ფორმა.
6. **ჰექსაგონალური სისტემა.**
 $a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$.
შესაბამის ელემენტალურ უჯრედს გააჩნია წესიერი ექვსკუთხა პრიზმის ფორმა.

7. **კუბური სისტემა.** $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.
შესაბამის ელემენტალურ უჯრედს გააჩნია კუბის ფორმა.

§24. კრისტალური მყარი სხეულების ტიპები

კრისტალური მესრის კვანძებში განლაგებული ნაწილაკების თვისებებისა და ერთმანეთთან ურთიერთქმედების ბუნების მიხედვით განასხვავებენ ოთხი ტიპის კრისტალებს: იონურს, ატომურს, ლითონურს და მოლეკულურს.

1. **იონური (ჰეტეროპოლარული) კრისტალები.** ამ კრისტალებში სავალენტო ელექტრონები ერთი ტიპის ატომიდან მიტაცებულია მეორე ტიპის ატომის მიერ, რის გამოც წარმოიქმნება დადებითი და უარყოფითი იონები. მათ შორის კავშირი ხორციელდება ელექტროსტატიკური (კულონური) მიზიდვის



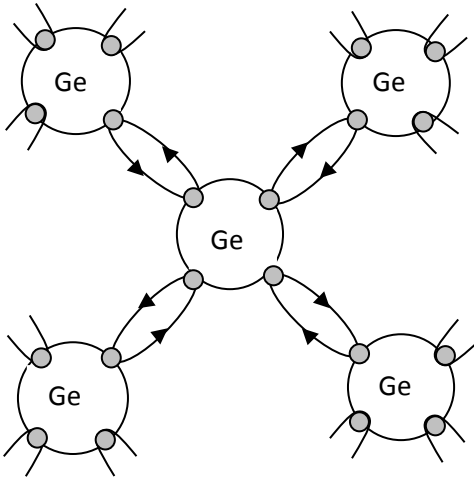
ნახაზი 24.1

ძალებით. ასეთ ქიმიურ ბმას **იონური ბმა** ეწოდება. იგი დამახასიათებელია ლითონისა და არალითონის შენაერთებისთვის. იონური კრისტალის ტიპური მაგალითია სუფრის მარილის (NaCl) კრისტალი (ნახ. 24.1). როგორც ნახაზიდან ჩანს კრისტალთა მესრის კვანძებში

განლაგებულია საპირისპირო ნიშნის იონები. იონური აგებულების ნაერთებს ახასიათებს დნობის მაღალი ტემპერატურა, არააქროლადობა, სიმტკიცე და ზოგიერთის წყალში კარგად ხსნადობა. 2. **ატომური (ჰომოპოლარული, კოვალენტური) კრისტალები.**

კრისტალური მესრის კვანძებში მოთავსებულია ნეიტრალური ატომები. მათ შორის კავშირი ხორციელდება ელექტრული წყვილის საშუალებით, რომელსაც ქმნის ორი მეზობელი ატომის თითო სავალენტო ელექტრონი. ამის გამო ატომურ კავშირს აქვს მიმართული ხასიათი. თუ იონური კავშირისას

თითოეული იონი ზემოქმედებს ყველა მასთან საკმაოდ ახლოს მდებარე იონთან, ატომური კავშირისას ზემოქმედება მიმართულია იმ ატომისკენ, რომელთანაც მოცემულ ატომს გააჩნია ელექტრული წყვილი. ატომური კრისტალების ტიპური წარმომადგენელია ელემენტთა სისტემის მეოთხე ჯგუფის ელემენტები: გერმანიუმი და სილიციუმი.



ნახაზი 24.2.

მათი ოთხი სავალენტო ელექტრონი დაკავშირებულია მეზობელი ოთხი ატომის სავალენტო ელექტრონთან, ანუ ქმნის ელექტრონთა წყვილს (ნახ. 24.2).

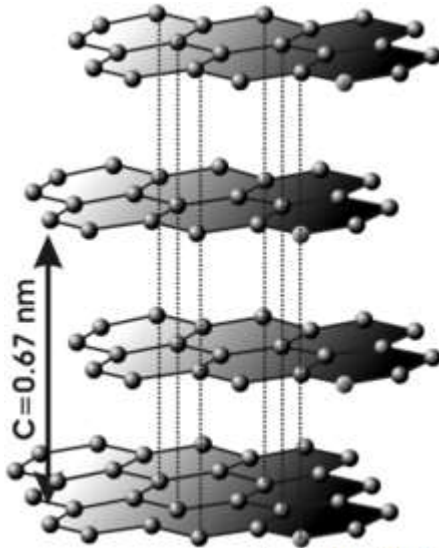
ატომური კრისტალებია გრაფიტი და ალმასი. ორივე ნახშირბადის

ალოტროპიული სახეცვლილებაა (ვაკუუმში 2000⁰C-მდე გახურებისას ალმასი გადადის გრაფიტში). მათი ქიმიური შედგენილობა ერთნაირია, მაგრამ განსხვავდებიან კრისტალური სტრუქტურით, რაც გავლენას ახდენს მათ თვისებებზე.

გრაფიტში თითოეული ნახშირბადის ატომი ატომური ბმით უკავშირდება სამ სხვა ნახშირბადის ატომს, წარმოქმნილ გიგანტურ მოლეკულას შრეობრივი აგებულება აქვს. ნახ. 20.3-ზე მოცემულია გრაფიტის სტრუქტურა, რომელიც წარმოადგენს პექსაგონალურსისტემას¹⁷. შრეებს შორის ბმები სუსტია,

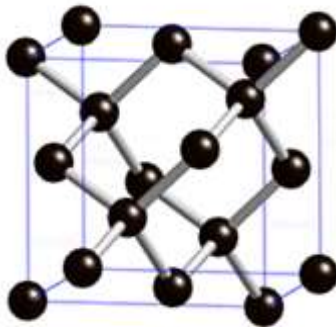
¹⁷ გრაფიტის ამ მოდიფიკაციას α-გრაფიტს უწოდებენ, არსებობს მეორე მოდიფიკაცია β-გრაფიტი რომბოედრული სისტემით.

რის გამოც ადვილია შრეების ერთმანეთის მიმართ გადაადგილება.



ნახაზი 24.3

კოვალენტური ბმის გამო



ნახაზი 24.4

ელექტრონები საკუთარ ბირთვთან სუსტად არის დაკავშირებული. ამიტომ კრისტალური მესრის შექმნისას ისინი წყდება ატომებს- თავისუფლდება და უწესრიგოდ მოძრაობს კვანძებს შორის არეში (მათი მოძრაობა

ალმასში

თითოეული ნახშირბადის ატომი ატომური ბმით უკავშირდება ოთხ სხვა ნახშირბადის ატომს, რის შედეგად მიიღება სამგანზომილებიანი ძალიან მტკიცე გიგანტური მოლეკულა. ნახ. 24.4-ზე მოცემულია ალმასის სტრუქტურა. მას გააჩნია კუბური სისტემა.

როგორც

გრაფიტის ასევე ალმასის ატომებს შორის მრავალი მათ კრისტალებს ძალიან მაღალი დნობის ტემპერატურა აქვს.

ურთიერთქმედების ძალების ბუნება ატომურ კრისტალში ელექტრულია (მაგრამ არაკულონური). ამ ძალთა ბუნების ასხნა შესაძლებელია მხოლოდ ქვანტური მექანიკის კანონებზე დაყრდნობით.

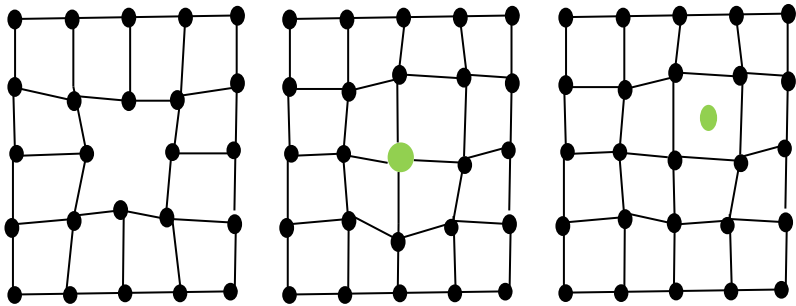
3. **ლითონური კრისტალები.** ლითონების ატომების სავალენტო

კანონზომიერება ანუ ჩნდება **დეფექტები**. დეფექტებს ყოველ შემდეგ ტიპებად:

1.წერტილოვანი დეფექტები. მათ მიეკუთვნება კრისტალური მესრის კვანძში ატომის (იონის) არ არსებობა-ვაკანსია (ნახ.25.1ა). კვანძში მყოფი ატომის ჩანაცვლება უცხო ატომით - მინარევით (ნახ.25.1ბ). კვანძთა შორის არეში ზედმეტი (საკუთარი ან მინარევის) ატომის ჩანერგვა (ნახ.25.1გ). თუ ვაკანსიები წარმოიქმნება ნებისმიერ სტრუქტურებში, ატომთა ჩანერგვა უმეტესად ხდება ისეთი კრისტალებში რომელთაც არ გააჩნია ატომთა მჭიდრო წყობა და ხასიათდება ატომთაშორისი თავისუფალი არეებით (მაგ. ბორი, ნახშირბადი). წერტილოვანი დეფექტები იწვევენ განლაგების კანონზომიერების დარღვევას მესრის რამოდენიმე პერიოდის შესაბამის მანძილზე. ამ დეფექტთა კონცენტრაცია მატულობს კრისტალის ტემპერატურის ზრდასთან ერთად და მაქსიმუმს აღწევს დნობის ტემპერატურის მახლობლობაში.

2.წირითი დეფექტები. ამ დროს დეფექტთა განლაგება ქმნის გარკვეულ წირს, (მაგ. ვაკანსიათა ან ჩანერგილ ატომთა ჯაჭვი).

3.დისლოკაციები. ისინი არღვევს კანონზომიერებას კრისტალური სიბრტყეების



ა.

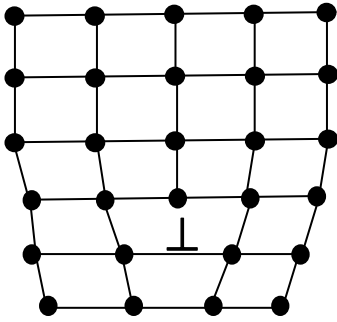
ბ.

გ.

ნახაზი 25.1

განლაგებაში. ძირითადად გვხვდება მათი ორი ტიპი: განაპირა და ხრახნული. **განაპირა დისლოკაცია**

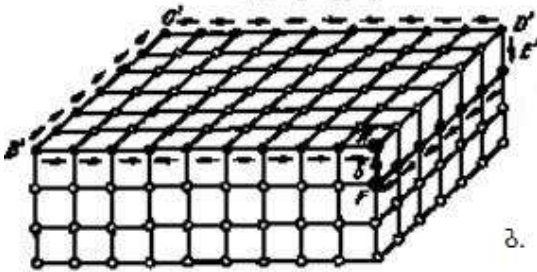
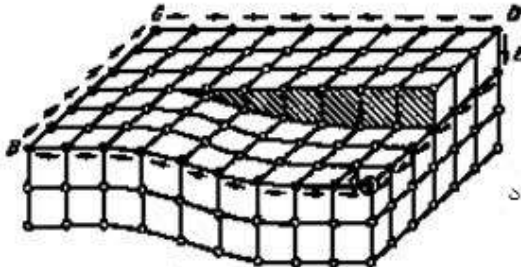
წარმოიშობა კრისტალში



ნახაზი 25.2

ორ მეზობელ კრისტალურ სიბრტყეს შორის ზედმეტი კრისტალური ნახევარსიბრტყის არსებობით (ნახ.25.2). სწორედ მისი კიდე ქმნის ამ დისლოკაციას. დისლოკაციის წირი ნახაზის სიბრტყის მართობულია და აღნიშნულია \perp სიმბოლოთი. **ხრახნული დისლოკაცია** წარმოიქმნება კრისტალის ერთი ნაწილის მეორის მიმართ წანაცვლებით მესრის პერიოდის ტოლ

მანძილზე, რის შედეგადაც წარმოიქმნება საფეხური და ხდება კრისტალის სპირალური ზრდა. ამ ტიპის დისლოკაცია ხშირად წარმოიშობა კრისტალის ზრდისას მდნარიდან. რადგან ენერგეტიკულად ნაკლებად ხელსაყრელია კრისტალის ბრტყელ ზედაპირზე ახალი



ნახაზი 25.3

არსებობის გამო რეალურ კრისტალთა დრეკადობის ზღვარი რამოდენიმე რიგით მცირეა ვიდრე იდეალურში.

ატომის ჩაჭერა, ანუ კრისტალის შემდგომი ზრდა. ამიტომ ატომთა მიერთება ხდება ისე, რომ წარმოიშობა საფეხური და ზრდა მოხდება სპირალურად (ნახ.25.3).

დეფექტები გაელენას ახდენს კრისტალთა ფიზიკურ თვისებებზე მაგ. სიმტკიცეზე. დისლოკაციების

კრისტალებში ადგილი აქვს ატომთა გარკვეული ჯგუფების გადანაცვლებას რაც შესაძლებელია განვიხილოთ, როგორც დისლოკაციათა მოძრაობა. ამ პროცესს ეწინააღმდეგება მინარევთა ატომები. მაგ. რკინაში დისლოკაციათა მოძრაობის შესაფერხებლად (სიმტკიცის გაზრდისთვის) მასში მინარევის სახით შეჰყავთ ნახშირბადი. მიღებული შენაერთი-ფოლადი ხასიათდება სუფთა რკინაზე გაცილებით მეტი სიმტკიცით.

პლასტიკური დეფორმაციისას ირღვევა კრისტალური მესრის წყობა, წარმოიქმნება დეფექტთა დიდი რიცხვი, რომლებიც საბოლოო ჯამში ხელს უშლის დისლოკაციათა გადანაცვლებას. ამით აიხსნება ლითონთა სიმტკიცის ზრდა ცივი წრთობისას.

ჩვენ აღვწერეთ დისლოკაციის უმარტივესი ფორმა. რეალურად არსებობს გაცილებით რთული დისლოკაციები, რომლებსაც ჩვენ არ შეგვხვებით.

§26. კრისტალთა სითბური გაფართოება

ნივთიერებათა დიდი უმრავლესობა გათბობისას ფართოვდება და გაციებისას იკუმშება. ამასთანავე თითოეულის გაფართოება -შეკუმშვის ხარისხი მის შემადგენლობაზეა დამოკიდებული. ცდებით დადგენილია, რომ გათბობისას მყარ სხეულთა სიგრძის ცვლილება Δl პირდაპირპროპორციულია ტემპერატურის ცვლილებისა Δt , თუ ეს უკანასკნელი მცირე ინტერვალს მოიცავს. თუ $0^{\circ} C$ -ზე მყარი სხეულის სიგრძეს ავლნიშნავთ l_0 , მაშინ t ტემპერატურამდე გათბობისას, მისი სიგრძის ცვლილება გამოითვლება ფორმულით:

$$\Delta l = \alpha l_0 t$$

სადაც α **მყარი სხეულის წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი** რიცხობრივად იმ ფარდობითი წაგრძელების ტოლია, რომელიც მიიღება მყარი სხეულის $1^{\circ}C$ -ით გათბობისას. მისი ერთეულია გრად⁻¹ (კელ⁻¹). α მცირედ, თუმცა მაინც დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, მაგრამ პრაქტიკული მიზნებისთვის ის შეიძლება

ჩაკოვალთ მუდმივად. მყარი სხეულების α (10^{-6} - 10^{-5}) გრად⁻¹ რიგისაა.

(26.1)-ის თანახმად, სხეულის სიგრძე t ტემპერატურაზე იქნება:

$$l = l_0 + \Delta l = l_0(1 + \alpha t) \quad (26.2)$$

ანიზოტროპული კრისტალების წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი სხვადასხვა მიმართულებით განსხვავებულია, ამიტომ ასეთი სხეული გათბობისას არა მარტო ფართოვდება, არამედ ფორმასაც იცვლის. ე.ი. თუ კრისტალში ავირჩევთ **ფიზიკურ წრფეს** (მის ნაწილაკებზე გამავალ რაიმე წრფეს) გათბობისას ზოგადად ის გამრუდდება. თუმცა ნებისმიერ კრისტალში არსებობს სამი ისეთი მიმართულება- **კრისტალოგრაფიული ღერძები**, რომელთა გასწვრივაც აღებული ფიზიკური წრფეები გათბობისას წრფივობას ინარჩუნებს. შესაბამისად კრისტალს ახასიათებენ ამ მიმართულებებით წრფივი გაფართოების სამი მთავარი კოეფიციენტით α_1 , α_2 , α_3 . რომბული, ტეტრაგონალური და კუბური სისტემების კრისტალებში ეს მიმართულებები ურთიერთმართობულია. ვთქვათ ამ სისტემების რომელიმე კრისტალიდან ამოჭრილია პარალელეპიპედი, რომლის წიბოები კრისტალოგრაფიული ღერძების პარალელურია. 0° C-ზე მისი წიბოების სიგრძე ავლნიშნოთ l_{01} , l_{02} , l_{03} , მაშინ t -მდე გათბობისას წიბოთა სიგრძეები შესაბამისად გახდება:

$$l_1 = l_{01}(1 + \alpha_1 t), \quad l_2 = l_{02}(1 + \alpha_2 t), \quad l_3 = l_{03}(1 + \alpha_3 t).$$

ხოლო პარალელეპიპედის მოცულობა იქნება:

$$\begin{aligned} V &= l_{01}(1 + \alpha_1 t) \cdot l_{02}(1 + \alpha_2 t) \cdot l_{03}(1 + \alpha_3 t) = \\ &= V_0(1 + \alpha_1 t) \cdot (1 + \alpha_2 t) \cdot (1 + \alpha_3 t). \end{aligned}$$

წევრთა გადამრავლებისას α -თა სიმცირის გამო უგულებელვყოთ მათი ერთმანეთზე ნამრავლი, რის შედეგადაც მივიღებთ:

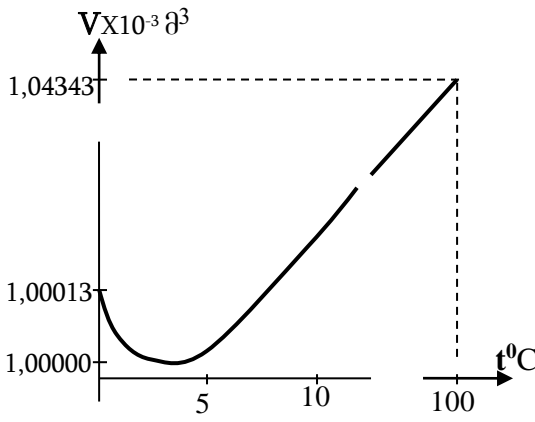
$$V = V_0(1 + (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)t)$$

მეორე მხრივ, (26.2)-ის მსგავსად, შეიძლება ჩავწეროთ:

$$V = V_0(1 + \beta t) \quad (26.3)$$

სადაც $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ მყარი სხეულის მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი. იგი წრფივი გაფართოების სამი მთავარი კოეფიციენტის ჯამის ტოლია. იზოტროპული სხეულის შემთხვევაში $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$, შესაბამისად მისი მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი $\beta = 3\alpha$. მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი გააჩნია სითხეებსაც და აირებსაც. ცხრილ 26.1-ში მოცემულია α და β -ს მნიშვნელობები ზოგიერთი ნივთიერებისთვის¹⁸.

ნივთიერებათა უმრავლესობა ტემპერატურის მატებისას თითქმის მონოტორულად ფართოვდება. გამონაკლისია წყალი. იგი გათბობისას 0°C-დან 4°C-მდე იგი იკუმშება, ხოლო 4°C-ს ზემოთ იქცევა ჩვეულებრივად, ტემპერატურის ზრდით ფართოვდება (იხ. ნახ.26.1, მასზე ნახვენებია 1,00000კგ წყლის მოცულობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე). ე.ი. 4°C-ზე წყალს გააჩნია უმცირესი მოცულობა, ანუ მაქსიმალური სიმკვრივე. ამიტომ ტბებსა და წყალსატევებში ყინულის წარმოქმნა იწყება ზედაპირიდან. როცა ზედაპირზე წყლის ტემპერატურა ეცემა 4°C-ზე ქვემოთ ნაკლები



ნახაზი 26.1

სიმკვრივის გამო იგი რჩება ზემოთ, ხოლო 4°C ტემპერატურის წყალი დიდი სიმკვრივის გამო ეშვება ქვემოთ. ასე, რომ ზედაპირი თანდათან ცივდება და შეიძლება გაიყინოს კიდევ

¹⁸ ცხრილში მოყვანილი კრისტალები იგულისხმება რომ პოლიკრისტალებია და ავლენს იზოტროპულ თვისებებს.

მაშინ, როცა სიღრმეში ტემპერატურაა 4°C .

ტემპერატურის გაზრდით ნივთიერებათა გაფართოება შესაძლებელია ავხსნათ ნახ. 2.2-ზე მოცემულ ორი მოლეკულის ურთიერთქმედების პოტენციური ენერჯიის არასიმეტრიულობით. მრუდის ფორმიდან გამომდინარე რაც მეტია მოლეკულათა ენერჯია (ნივთიერების ტემპერატურა) მით მეტია საშუალო დაშორება მოლეკულებს შორის. მრუდი რომ სიმეტრიული ყოფილიყო სითბურ გაფართოებას ადგილი არ ექნებოდა.

როგორც აღვნიშნეთ¹⁹, მყარი სხეულის დეფორმაცია შესაძლებელია მექანიკური ზემოქმედებით ან გათბობით. დავუბრუნდეთ ამ საკითხს. t ტემპერატურამდე გამთბარი ღერო, რომლის ფარდობითი

წაგრძელებაა $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha t$ მექანიკური ზემოქმედებით

შეგკუმშოთ საწყის l_0 სიგრძემდე. ამისთვის საჭიროა

მასზე მოვდოთ ისეთი ნორმალური ძაბვა $\sigma_n = \frac{F_n}{S}$,

რომელიც სხეულს დრეკადი დეფორმაციის შედეგად

დააბრუნებს საწყის მდგომარეობაში $\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \sigma_n$.

გატოლებით ვღებულობთ:

$$\sigma_n = \alpha Et \quad (26.4)$$

ზოგჯერ σ_n -ს *სითბურ ძაბვას* უწოდებენ. ბოლოებით ხისტად დამაგრებული ღერო გათბობისას ვერ გაფართოვდება, რის გამოც მასში აღიძვრება სითბური ძაბვა, რომელიც (26.4)-ის თანახმად მით მეტი იქნება რაც მაღალია ტემპერატურა. ასეთმა შემთხვევებმა წინასწარი ზომების მიუღებლად შეიძლება გამოიწვიოს არასახარბიელო შედეგები. მაგ. რკინიგზის რელსების განლაგებისას მათ ბოლოებს შორის ტოვებენ საჭირო

¹⁹ლიტ. 1 §23.

ღრქოს, რადგან გათბობისას გაფართოების გამო არ შეეხოს ერთმანეთს და არ მოხდეს დეფორმაცია. ასევე სხვადასხვა მასალისგან დამზადებულ სხეულთა დაკავშირებისას საჭიროა გათვალისწინებული იქნას მათი გაფართოების კოეფიციენტთა განსხვავებული მნიშვნელობები.

ცხრილი 26.1

მყარი სხეულები	$\alpha \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$	$\beta \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$	სითხეები	$\beta \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$
ალუმინი	25	75	ბენზინი	950
თითბერი	19	56	ვერც. წყ.	180
რკინა-ფოლადი	12	35	ეთილ. სპირტი	1100
ტყვია	29	87	გლიცერინი	500
სპილენძი	17	51	წყალი	210
მინა ჩვეულ.	9	27	ჰაერი და აირთა უმეტესობა სატმ წნევისას	3400
კვარცი	0,4	1		
ბეტონი	≈ 12	≈ 3		
აგური		6		

ამოცანა 26.1 t_1 ტემპერატურის ლითონის ღეროს სიგრძე ℓ_1 -ის ტოლია. ჩავწერთ მისი სიგრძის გამოსათვლელი ფორმულა t_2 ტემპერატურზე, თუ წირითი გაფართოების კოეფიციენტი ტემპერატურის ფუნქციაა $\alpha = \alpha_0 + bt$ (α_0 და b მუდმივებია).

ამოხსნა: (26.1)-ის თანახმად $d\ell = \alpha(t)\ell_1 dt$,

$$\Delta\ell = \ell_2 - \ell_1 = \int_{t_1}^{t_2} \ell_1 \alpha(t) dt = \ell_1 \int_{t_1}^{t_2} (\alpha_0 + bt) dt,$$

$$\ell_2 - \ell_1 = \ell_1 \left(\alpha_0 t + \frac{1}{2} bt^2 \right) \Big|_{t_1}^{t_2} = \ell_1 \left(\alpha_0 (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} b (t_2^2 - t_1^2) \right)$$

საიდანაც

$$\ell_2 = \ell_1 \left(1 + \alpha_0 (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} b (t_2^2 - t_1^2) \right) \quad (1)$$

თუ $\alpha = \text{const}$ (ანუ $b = 0$), (1)-დან მივიღებთ
 $\ell_2 = \ell_1 (1 + \alpha_0 (t_2 - t_1))$.

ამოცანა 26.2. გამოვთვალოთ რამდენით გაიზრდება 80სმ რადიუსიანი ფოლადის ბირთვის ზედაპირის ფართობი, თუ იგი გაცხელდა 16⁰C-დან 600⁰C-მდე.

ამოხსნა: $V_2 = V_1 (1 + \beta (t_2 - t_1))$

$$R_2^3 = R_1^3 (1 + \beta (t_2 - t_1)) \quad R_2 = R_1 \sqrt[3]{(1 + \beta (t_2 - t_1))}$$

$$R_2 = 80 \sqrt[3]{(1 + 0,0000035(600 - 16))} = 80 \cdot 1,007 = 80,56 \text{ სმ}$$

$$\Delta S = 4\pi (R_2^2 - R_1^2) = 4 \cdot 3,14 \cdot 89,9 = 1129 \text{ სმ}^2$$

ამოცანა 26.3. ფოლადის ჰორიზონტალური კოჭი 20⁰C ტემპერატურაზე ხისტად მიამაგრეს ფოლადის ორ ვერტიკალურ სვეტთან. რა ძაბვა აღიძვრება კოჭაში თუ ტემპერატურა დავარდება -20⁰C-მდე? გაუძლებს თუ არა კონსტრუქცია? ასეთ დატვირთვას გაუძლებდა თუ არა ბეტონის კონსტრუქცია?

ამოხსნა: ვისარგებლოთ (26.4)-ით. ფოლადის შემთხვევაში $E=2 \cdot 10^{11}$ პა და $\sigma_{\text{ზღ}}=5 \cdot 10^8$ პა, მაშინ $\sigma_n = \alpha E \Delta t = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 40 = 9,6 \cdot 10^7$ პა. ვინაიდან $\sigma_{\text{ზღ}} > \sigma_n$, ფოლადის კონსტრუქცია გაუძლებს ასეთ დატვირთვას.

ბეტონისთვის $E=2 \cdot 10^{10}$ პა და $\sigma_{\text{ზღ}}=2 \cdot 10^6$ პა. მაშასადამე

$$\sigma_n = \alpha E \Delta t = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 40 = 9,6 \cdot 10^6 \text{ პა.} \quad \text{ამ}$$

შემთხვევაში $\sigma_{\text{ზღ}} < \sigma_n$. ე.ი. ბეტონის კონსტრუქცია ვერ გაუძლებს დატვირთვას.

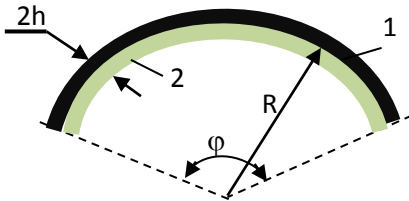
ამოცანა 26.4. თითბერის და ფოლადის ორი ღერო, თითოეული 2სმ სისქის, ერთმანეთთან ბოლოებითაა მიამაგრებული და 20⁰C-ზე ქმნის ბრტყელ

ბიმეტალურ ღეროს. როგორი იქნება ბიმეტალური ღეროს სიმრუდის რადიუსი 100°C-ზე?

ამოხსნა: $\Delta t = 100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 80^\circ\text{C}$ -ით გათბობისას თითბერისა და ფოლადის ღეროთა სიგრძეები გახდება:

$$l_1 = l_0(1 + \alpha_1 \Delta t) \quad (1) \quad l_2 = l_0(1 + \alpha_2 \Delta t). \quad (2)$$

რადგან $\alpha_1 > \alpha_2$ თითბრის ღერო მეტად დაგრძელდება,



რის გამოც ბიმეტალური ღერო მიიღებს R რადიუსიანი რკალის ფორმას.

გეომეტრიიდან ცნობილია, რომ $l = \varphi R$. ე.ი.

$$l_1 = \varphi(R + h/2) \quad (3) \quad l_2 = \varphi(R - h/2) \quad (4)$$

(1)-ის და (2)-ს (3)-სა და (4)-ში გათვალისწინებით და შემდგომში φ -ს გამორიცხვით მივიღებთ:

$$R = h/2 \left[\frac{2 + (\alpha_1 + \alpha_2)\Delta t}{(\alpha_1 - \alpha_2)} \right], \text{ ანუ}$$

$$R = 0,02/2 \left[\frac{2 + (19 + 12)10^{-6} \cdot 80}{(\alpha_1 - \alpha_2)} \right] \approx 2,5\text{მ}$$

§27. კრისტალთა სითბოტევადობა

განვიხილოთ ერთი ტიპის ნაწილაკებისგან შემდგარი კრისტალი - ატომური ან ლითონური. ცხადია, თუ კრისტალი სტაბილურ მდგომარეობაშია კვანძებში მყოფი ნაწილაკები წონასწორობაშია და გააჩნია ურთიერთქმედების მინიმალური პოტენციური ენერჯია. თუ რაიმე მიზეზით (მაგ. სითბური ფლუქტუაციები) ნაწილაკი ამ მდგომარეობიდან გადაიხარა მაშინ აღიძვრება ძალები, რომლებიც ცდილობს მის უკან დაბრუნებას. მცირე გადახრებისას ეს ძალები კვაზიდრეკადულია და ნაწილაკის რხევას ჰარმონიული ხასიათი აქვს.

რადგან ნაწილაკის რხევას სივრცეში ნებისმიერი მიმართულება შეიძლება გააჩნდეს, ამიტომ იგი

წარმოვიდგინოთ სამი ურთიერთმართობულ რხევათა ჯამად და მისი საშუალო ენერჯია ჩავწეროთ ასეთი სახით:

$$w_{\text{საშ}} = w_{0\text{საშ}} + \frac{m_0 v_{\text{საშ}}^2}{2} + \frac{k_1 x^2}{2} + \frac{k_2 y^2}{2} + \frac{k_3 z^2}{2}$$

სადაც m_0 ნაწილაკის მასაა, $w_{0\text{საშ}}$ მისი ენერჯიაა წონასწორულ მდგომარეობაში, ხოლო k_1, k_2, k_3 , კვაზიდრეკადრეკად ძალთა კოეფიციენტებია შესაბამისი მიმართულებებით. ენერჯიის თანაბრად განაწილების კანონის (§10) თანახმად, ნაწილაკის საშუალო ენერჯია ტოლია $i \frac{kT}{2}$, სადაც თავისუფლების ხარისხი $i=6$

(რხევითი მოძრაობის ნებისმიერი მიმართულების გამო 3 მოდის რხევითი მოძრაობის კინეტიკურ ენერჯიაზე და 3 პოტენციურზე). ე.ი.

$$w_{\text{საშ}} = 6 \cdot \frac{kT}{2} = 3kT \quad (27.1)$$

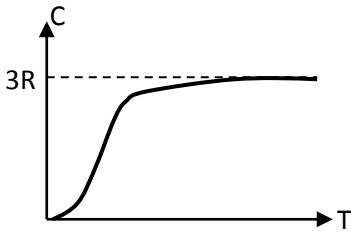
თუ კრისტალი შედგება N რაოდენობის ნაწილაკისგან, მაშინ მისი შინაგანი ენერჯია $U = N \cdot w_{\text{საშ}} = 3NkT = 3\nu N_A kT = 3\nu RT$, ხოლო ერთი მოლი ($\nu=1$) კრისტალის შემთხვევაში იქნება:

$$U = 3RT. \quad (27.2)$$

მყარი სხეულის იზობარულად dT -თი გათბობისას მოცულობის ცვლილება იმდენად უმნიშვნელოა, რომ $dA_p=0$ და თერმოდინამიკის I კანონი იზობარული თუ იზოქორული პროცესისას ერთნაირად ჩაიწერება: $dQ_p = dQ_v = dU$. ამიტომ მყარი სხეულის შემთხვევაში C_p -სა და C_v -ს შორის განსხვავება უმნიშვნელოა, $C_p \approx C_v$. (15.11)-ის თანახმად, მყარი სხეულის მოლური სითბოტევადობა გამოითვლება ფორმულით:

$$C = \frac{dU}{dT} = \frac{d3RT}{dT} = 3R \quad (27.3)$$

მაშასადამე, ქიმიურად მარტივი ნებისმიერი კრისტალის მოლური სითბოტევადობა ერთნაირია და ტოლია $3R$ -ის. ეს შედეგი ცნობილია **დიულონგისა და პტის** კანონის სახელწოდებით.



ნახაზი 27.1

როგორც აღმოჩნდა, კრისტალთა სითბოტევადობა რეალურად

ტემპერატურის ფუნქციაა (ნახ.27.1), კერძოდ აბსოლუტური ნულის მახლობლობაში ყველა კრისტალის სითბოტევადობა T^3 -ს პროპორციულია და მხოლოდ თითოეული ნივთიერებისთვის დამახასიათებელ საკმაოდ მაღალ ტემპერატურაზე სრულდება (27.3) პირობა. უმრავლესი კრისტალებისთვის ეს ტემპერატურა ოთახის ტემპერატურაა.

მყარი სხეულების სითბოტევადობის მკაცრი თეორია შექმნეს **აინშტაინმა** და **დებაიმ**, რომელიც ემყარება ქვანტური ფიზიკის საფუძვლებს.

ა ბ ო ც ა ნ ე ბ ი:

1. 1მ სიგრძის ლითონის ღეროს ტემპერატურის 50⁰-ით გაზრდისას მისმა სიგრძემ 1,45მმ-ით მოიმატა. დაადგინეთ ლითონის სახეობა, თუ წირითი გაფართოების კოეფიციენტი ტემპერატურის ცვლილების მოცემულ არეში მუდმივია. **(პასუხი: ტყვია)**
2. გამოვთვალოთ რამდენით გაიზრდება 50სმ წიბოს მქონე ალუმინის კუბის ზედაპირის ფართობი, თუ იგი გაცხელდა 40⁰C-დან 400⁰C-მდე. **(პასუხი: 0,027მ²)**
3. რა სიგრძე უნდა გააჩნდეს 0⁰C-ზე ფოლადისა და სპილენძის ღეროებს, რომ ნებისმიერ ტემპერატურაზე მათი სიგრძეების სხვაობა შეადგენდეს 10სმ-ს. **(პასუხი: ≈32სმ; ≈22სმ)**
4. რა მოცულობის წყალი გადმოიდგრება ჭიქიდან, რომელიც პირამდე შევსებულია 0,3ლ 10⁰C წყლით, თუ ის გათბა 100⁰C-მდე. (ჭიქის გაფართოება უგულებელყოფილია). **(პასუხი: 0,019ლ)**
5. 70ლ ბენზინის ავზი გავსებულია 20⁰C ტემპერატურის ბენზინით. ავტომობილის მზეზე დაყენების შემდეგ ბენზინის ტემპერატურა გახდა 50⁰C. რა რაოდენობის ბენზინი გადმოიდგრება ავზიდან? **(პასუხი: 2ლ)**
6. 20ლ ბენზინის ავზი გავსებულია 10⁰C ტემპერატურის ბენზინით. ავზის შენობაში მოთავსების შემდეგ ბენზინის ტემპერატურა გახდა 30⁰C. რამდენით შეიცვალა ბენზინიანი ავზის მასა? **(პასუხი: 0,32კგ)**
7. 0⁰C-იანი 2მმ² განიკვეთის ფოლადის მავთული ხისტადაა მიმაგრებული ორ უძრავ საყრდენთან. რა ძალით იმოქმედებს მავთული დამაგრების წერტილებთან, თუ ტემპერატურა გახდება 50⁰C? **(პასუხი: 2506)**
8. 0,45მ რადიუსის მქონე რკინის ცილინდრული ბორბალი ბრუნავს საკუთარი ღერძის მიმართ 32,8რად/წმ კუთხური სიჩქარით. როგორია კუთხური სიჩქარის ფარდობითი ცვლილება ტემპერატურის 20⁰C- დან 80⁰C-მდე გაზრდისას? **(პასუხი: 0,005)**
9. 6მმ სისქის და 2მ სიგრძის სხვადასხვა მეტალის ორი ღერო ერთმანეთთან ბოლოებითაა მიმაგრებული და ქმნის

ბრტყელ ბიმეტალურ ღეროს. 300°C -ით გათბობისას ღერომ შექმნა $9\pi/10$ კუთხის რკალი. გამოთვალეთ მეტალთა წირითი გაფართოების კოეფიციენტებს შორის სხვაობა. (პასუხი: $2,83 \cdot 10^{-5} \text{გრად}^{-1}$)

10. მართკუთხა ფორმის სპილენძის ფირფიტის ზომა 20°C -ზე $60\text{სმ} \times 50\text{სმ}$ -ია. როგორ შეიცვლება მისი ფართობი, თუ მას გავაცხელებთ 600°C -მდე? (პასუხი: $\approx 59,2\text{სმ}^2$)

11. 0°C -ზე ღეროს სიგრძე 1000მმ -ია, 100°C -ზე 1002მმ , ხოლო წითლად ვარვარების ტემპერატურაზე კი $1011,6\text{მმ}$. იპოვეთ ვარვარების ტემპერატურა. (პასუხი: 580°C)

12. ლოკომოტივის ბორბლის დიამეტრი 0°C -ზე 1მ -ის ტოლია. გამოთვალეთ 1სთ -ში მატარებლის მიერ გავლილი მანძილის განსხვავება ზაფხულსა და ზამთარში, თუ შესაბამისი ტემპერატურა 25°C და -25°C -ია. ორივე შემთხვევაში მატარებლის სიჩქარეა 72კმ/სთ . (პასუხი: $135,6\text{მ}$)

13. ფოლადის ბურთულის წონა სითხეში t_1 ტემპერატურაზე P_1^* -ით ნაკლები აღმოჩნდა ჰაერში მის წონაზე. t_2 ტემპერატურაზე კი P_2^* -ით. გამოთვალეთ სითხის მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი თუ იგი ფოლადისთვის α -ს ტოლია. (პასუხი: $135,6\text{მ}$)

თავი IV. შახურთა წონასწორობა და ბარბატმენტო

§28. შახა. შახათა წონასწორობის პირობები

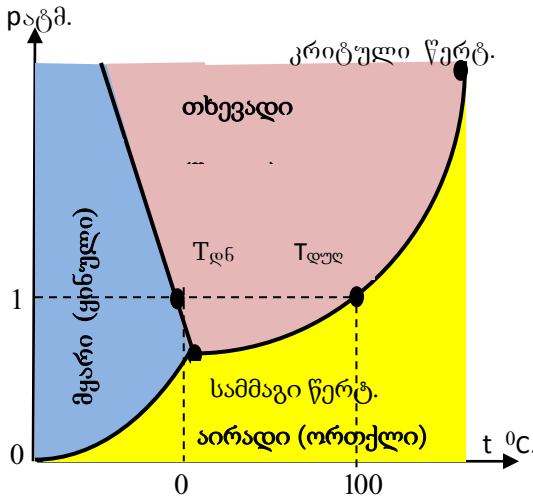
თერმოდინამიკური სისტემის დახასიათებისათვის ერთერთი მნიშვნელოვანი ცნებაა ფაზა.

➤ *ფაზა ეწოდება თერმოდინამიკური სისტემის ერთგვაროვან ნაწილს, რომელიც ხასიათდება ერთნაირი ფიზიკოქიმიური თვისებებით და გააჩნია გამყოფი ზედაპირი სისტემის დანარჩენ ნაწილთან.*

მაგ., დახურულ ჭურჭელში მოთავსებული წყალი და მის ზემოთ არსებული ჰაერისა და წყლის ორთქლის ნარევი ერთიანობაში ქმნის ორფაზიან სისტემას (სითხე-აირი). ერთიდაიგივე ნივთიერების განსხვავებული კრისტალური მოდიფიკაციები ასევე განიხილება როგორც სხვადასხვა

ფაზები. მაგ., ნახშირბადს გააჩნია ორი სხვადასხვა ფაზა გრაფიტისა და ალმასის სახით.

თერმოდინამიკური სისტემის ფაზათა წონასწორობას ასახავენ ფაზური მდგომარეობის დიაგრამით. მის ასაგებად იყენებენ შემდეგ პარამეტრებს: ტემპერატურა,



ნახაზი 28.1

წნევა,
სისტემის
კომპონენტთა
პროცენტული
შემადგენლობა.
განსაზღ

ვრულ
პირობებში
შესაძლებელია
შეხებაში
მყოფი
ერთდაიგივე
ნივთიერების
სხვადასხვა
ფაზა
ერთმანეთისად
მი

წონასწორობაში

ი აღმოჩნდეს. ორი ფაზის წონასწორობა შესაძლებელია მხოლოდ ტემპერატურის გარკვეულ ინტერვალში, ამასთან ტემპერატურის თითოეულ მნიშვნელობას შეესაბამება წნევის სრულიად განსაზღვრული მნიშვნელობა. მაშასადამე (p, T) დიაგრამაზე ორი ფაზის წონასწორობას შეესაბამება $p=f(T)$ წირი. ერთდაიგივე ნივთიერების სამი ფაზა (მყარი, თხევადი და აირადი; თხევადი და ორი მყარი) წონასწორობაში შეიძლება იმყოფებოდეს ტემპერატურისა და წნევის ერთადერთ მნიშვნელობაზე. (p, T) დიაგრამაზე ამ წონასწორობას შეესაბამება წყვილ-წყვილად ფაზათა წონასწორობის წირების გადაკვეთის წერტილი, რომელსაც **სამმაგი წერტილს** უწოდებენ.

ამერიკელმა ფიზიკოსმა *გიბსმა* აჩვენა რომ, თუ სისტემა შედგება k რაოდენობის დამოუკიდებელი კომპონენტისგან, მაშინ წონასწორობაში მყოფ ფაზათა რაოდენობა φ არ შეიძლება 2-ზე მეტით აღემატებოდეს კომპონენტთა რიცხვს (*ფაზათა წესი*):

$$\varphi \leq k + 2 \quad (28.1)$$

ცდებით დადასტურებულია, რომ ერთიდიამავე ნივთიერების სამ ფაზაზე მეტი ფაზის წინასწორობა შეუძლებელია, მართლაც თუ $k=1$, $\varphi \leq 3$.

ერთი ფაზიდან მეორეში ისეთ გადასვლას, რომელსაც თან ახლავს სითბოს გამოყოფა ან შთანთქმა *პირველი გვარის ფაზური გადასვლა* ეწოდება (მაგ. 0° -იან წყლის ყინულად გარდაქმნა და პირიქით). თუ გადასვლა მიმდინარეობს სითბოს გამოყოფის გარეშე მას *მეორე გვარის ფაზურ გადასვლას* უწოდებენ (მაგ. კრისტალის ერთი მოლიფიკაციიდან მეორეში გარდაქმნა).

ჩვეულებრივ ფაზური დიაგრამის კოორდინატთა რიცხვი ერთი ერთეულით ჭარბობს სისტემის კომპონენტთა რიცხვს. ერთკომპონენტიან სისტემის დიაგრამა ორგანზომილებიანია, ორკომპონენტიანის სამგანზომილებიანი და ა.შ. ორ და მეტ კომპონენტიან სისტემებს გრაფიკულად გამოსახავენ ან კვეთაში, ან პროექციებში. ფაზათა წესიდან გამომდინარე ორგანზომილებიან დიაგრამაზე ერთფაზიანი არეები გამოისახება ველებით, რომლებიც ერთმანეთისგან გამოყოფილია წირებით. მათი წერტილების კოორდინატები შეესაბამება ორი ფაზის ერთდროული არსებობის წონასწორულ პირობებს. ამ წირთა გადაკვეთის წერტილი, ე.წ. სამმაგი წერტილი, შეესაბამება სამივე ფაზის ერთდროულ წონასწორულ თანაარსებობას. ნახ.28.1-ზე მოცემულია წყლის (ერთკომპონენტიან სისტემის) ფაზური დიაგრამა (ნახაზის წარმოჩენისთვის მასშტაბები დაცული არაა). სამმაგი წერტილი ($t=0,01^{\circ}\text{C}$, $p=0,006\text{ატმ}$) შეესაბამება სამივე ფაზის წყლის, წყლის ორთქლის და ყინულის ერთდროულ

წონასწორულ თანაარსებობას. *კრიტიკული წერტილი*²⁰ ($t=374^{\circ}\text{C}$, $p= 218\text{ატმ}$) შეესაბამება სისტემის ისეთ მდგომარეობას, როდესაც „გამყოფი საზღვარი“ წყალსა და მის ორთქლს შორის იშლება-მიიღება ერთგვაროვანი გარემო.

§29. დნობა და კრისტალიზაცია

ნივთიერების ფაზური მდგომარეობის შეცვლას, ანუ მის გადასვლას მყარიდან თხევადში, თხევადიდან აირადში (ან პირიქით) თან სდევს სითბოს გარკვეული რაოდენობის შთანთქმა (გამოყოფა).

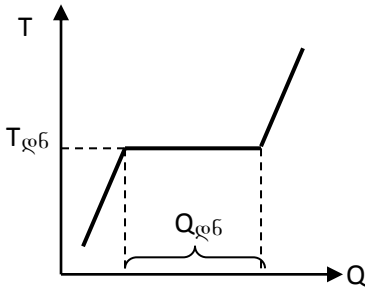
კრისტალური ნივთიერების გათბობისას იზრდება კრისტალური მესრის კვანძებში მოთავსებულ ნაწილაკთა (მოლეკულათა და ატომთა) რხევის სიხშირე და ამპლიტუდა. საბოლოოდ აუცილებლად დგება ისეთი მომენტი, როდესაც ნაწილაკთა კანონზომიერი განლაგების შენარჩუნება შეუძლებელი ხდება, კრისტალური მესერი იწყებს რღვევას და კრისტალი დნება. როგორც კი დნობა იწყება ტემპერატურის ზრდა წყდება მანამ სანამ დნობა არ დასრულდება. დნობის პროცესში მიწოდებული ენერგია არ ცვლის ნაწილაკთა კინეტიკურ ენერგიას, იგი მთლიანად ხმარდება მათი ურთიერთკავშირების რღვევას და დაშორებას. ტემპერატურას, რომელზედაც დნობა მიმდინარეობს, **დნობის ტემპერატურა** ეწოდება. მისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია ნივთიერების გვარობასა და წნევაზე. სითბოს შემდგომი მიწოდებით მდნარი ჩვეულებრივ ცხელდება. ნახ. 29.1-ზე მოცემულია კრისტალზე სითბოს მიწოდებისას მისი ტემპერატურის ცვლილების მრუდი. გრაფიკის ჰორიზონტალური უბანი შეესაბამება დნობის სითბოს. **დნობის სითბო** სითბოს ის რაოდენობაა, რომელიც საჭიროა მუდმივი წნევის პირობებში დნობის ტემპერატურაზე მიყვანილი კრისტალური ნივთიერების იმავე ტემპერატურის მდნარად გადაქცევისთვის (ე.ი. კრისტალური ნივთიერების დნობა იზობარულ - იზოთერმული პროცესია). დნობის სითბო გამოითვლება ფორმულით:

²⁰ ამ საკითხს დავუბრუნდებით §34-ში.

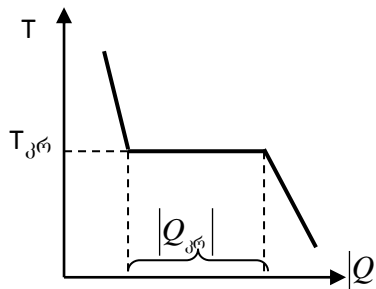
$$Q_{დნ} = q_{დნ} m, \quad (29.1)$$

სადაც $q_{დნ}$ 1კგ ნივთიერების დნობის სითბოს ტოლია, მისი სიდიდე დამოკიდებულია ნივთიერების თვისებებზე და **დნობის კუთრი სითბოს** უწოდებენ. ცხრილ 29.1-ში მოცემულია ზოგიერთი ნივთიერების დნობის ტემპერატურა და დნობის კუთრი სითბო.

შებრუნებული პროცესი - მდნარის გადაქცევა კრისტალად, შესაძლებელია მდნარის გაცივებით ანუ სითბოს წართმევით. გამოკრისტალება ასევე ხდება ფიქსირებულ ტემპერატურაზე - **კრისტალიზაციის ტემპერატურაზე** (ნახ.29.2). ეს პროცესი ასე შეიძლება წარმოვიდგინოთ: ვინაიდან სითხეებში არსებობს



ნახაზი 29.1

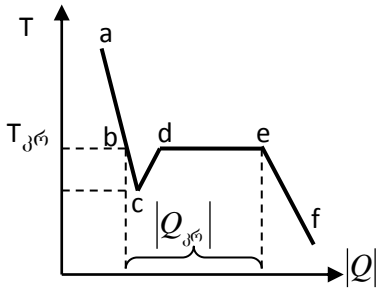


ნახაზი 29.2

ნაწილაკთა განლაგების ახლო წესრიგი, ანუ ნაწილაკთა კანონზომიერი განლაგება მცირე ზომის არეებში, ამიტომ სითბური ენერჯიის წართმევისას (გაციებისას) მოწესრიგებულ ჯგუფებათა მდგრადობა, რაოდენობა და ზომები მატულობს, ყალიბდება ე.წ. კრისტალიზაციის ცენტრები, წარმოიქმნება ცალკეული კრისტალიკები. გარკვეულ ტემპერატურაზე ეს კრისტალიკები უახლოვდება ერთმანეთს, შეერწყმება და წარმოიქმნება პოლიკრისტალური სხეული. ენერჯიის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარე მოცემული კრისტალის დნობის და კრისტალიზაციის სითბო ერთმანეთის ტოლია. გამოკრისტალების პროცესში სისტემის ტემპერატურა არ იცვლება. იგი შემცირებას იწყებს მხოლოდ გამოკრისტალების შემდეგ. ენერჯიის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარე მოცემული

კრისტალის დნობის და კრისტალიზაციის სითბო ერთმანეთის ტოლია $|Q_{კრ}| = Q_{დნ}$, ასევე ერთმანეთს ემთხვევა დნობის და კრისტალიზაციის ტემპერატურები $T_{დნ} = T_{კრ}$.

თუ დავიწყოთ ერთგვაროვანი მდნარის



ნახაზი 29.3

არ იწვევს და თხევადი მდგომარეობა გრძელდება c წერტილამდე, რომლის შესაბამისი ტემპერატურაც შედარებით დაბალია. ე.ი bc უბანზე შენარჩუნებულია თხევადი მდგომარეობა და მას სითხის **გადაციებულ მდგომარეობას** უწოდებენ. თუ c მდგომარეობაში სითხეში გაჩნდა კრისტალიზაციის ცენტრები დაიწება დაკრისტალება, გამოიყოფა კრისტალიზაციის სითბო, რის გამოც ტემპერატურა აიწევს და მიაღწევს bde ჰორიზონტალური წრფის შესაბამის ტემპერატურას. ამის შემდეგ პროცესი ef წრფის მიმართულებით განვითარდება.

მაქსიმალურად სუფთა გაციებას აღმოჩნდება, რომ მისი გამოკრისტალების ტემპერატურული მრუდი (ნახ. 29.3) სინამდვილეში განსხვავებული იქნება ნახ.29.2-ზე მოცემული თეორიული მრუდიდან. როგორც ნახაზიდან ჩანს b წერტილში, რომელიც კრისტალიზაციის ტემპერატურას შეესაბამება მდნარი გამოკრისტალებას

ცხრილი 29.1

ნივთიერება	$t_{დნ}$ °C	q _{დნ} კჯ/კგ	ნივთიერება	$t_{დნ}$ °C	q _{დნ} კჯ/კგ
ალუმინი	660	397	ნიკელი	1453	303
ბისმუტი	271,3	52,2	ლქრო	1063	65,7
ვოლფრამი	3380	192	რკინა	1535	277

ვერცხლი	960,8	104,5	სპილენძი	1083	205
თუთია	419,5	111	ტყვია	327	25
კალა	231,9	59,6	ყინული	0	333,7

სითხის გადაციების ხარისხს განსაზღვრავს მისი სიწმინდე. მასში არ უნდა იყოს ჩანართები (მტვრის ან სხვა კრისტალური ნაწილაკები, განსაკუთრებით მოცემული მდნარის), რადგან ისინი დაბალი ტემპერატურის პირობებში ხდებიან კრისტალიზაციის ცენტრები.

დნობის პროცესთან შედარებით აორთქლების პროცესი ნაწილაკთა მეტ ურთიერთდაშორებასთანაა დაკავშირებული, ამიტომ მოცემული ნივთიერებისთვის $q_{აორთ} > q_{დნ}$. მაგ. ყინულისთვის (კრისტალური წყლისთვის)

$$q_{დნ} = 3,33 \cdot 10^5 \text{ ჯ/კგ}, \quad \text{ხოლო} \quad \text{წყლისთვის}$$

$$q_{აორთ} = 22,6 \cdot 10^5 \text{ ჯ/კგ}. \quad \text{დნობისა და აორთქლების პროცესი პირველი გვარის ფაზურ გადასვლას მიეკუთვნება.}$$

ამოცანა 29.1. რა სიჩქარით დაეჯახა ტყვია წინაღობას, თუ დაჯახების შედეგად მისი 2/5 გადნა. ტყვიის ტემპერატურა დაჯახების მომენტში 127°C-ია. ჩათვალოთ, რომ მისი მექანიკური ენერჯიის 80% ტყვიის გათბობაზე დაიხარჯა.

ამოხსნა: ამოცანის პირობის შესაბამისად ჩავწეროთ სითბური ბალანსის განტოლება:

$$0,8 \frac{mv^2}{2} = cm(t_{დნ} - t) + \frac{2m}{5} \cdot q_{დნ}, \quad \text{საიდანაც}$$

$$v = \sqrt{2,5 \left(c(t_{დნ} - t) + \frac{2}{5} \cdot q_{დნ} \right)} =$$

$$= \sqrt{2,5 \cdot \left(130 \cdot 200 + \frac{2 \cdot 2,5 \cdot 10^4}{5} \right)} = 300 \text{ მ/წმ}$$

ამოცანა 29.2. 350მ/წმ სიჩქარით მოძრავი ტყვია ეჯახება დაბრკოლებას და გამოდის 200მ/წმ სიჩქარით. ტყვიის რა ნაწილი გადნა დაბრკოლების გავლისას, თუ საწყისი ტემპერატურა იყო 127°C და გამოყოფილი სითბოს 80% მოხმარდა ტყვიას?

ამოხსნა: ენერჯიის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარე: $0,8|ΔW| = Q + Q_{გ6},$

$$\text{ანუ } 0,8 \left| \frac{(m - m_1)v_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \right| = cm(t_{გ6} - t) + q_{გ6}m_1, \text{ სადა } c$$

m_1 გამდნარი ტყვიის მასაა.

შემოვიღოთ აღნიშვნა $m_1/m=x,$ მაშინ

$$0,8 \left| \frac{(1-x)v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right| = c(t_{გ6} - t) + q_{გ6}x$$

$$x = \frac{0,4(v_1^2 - v_2^2) - c(t_{გ6} - t)}{q_{გ6} - 0,4v_2^2}$$

$$x = \frac{0,4(350^2 - 200^2) - 130(327 - 127)}{25000 - 0,4 \cdot 200^2} = 0,8 \quad \text{ე.ი.} \quad \text{გაძნა}$$

ტყვიის 80%.

ამოცანა 29.3. 300ჯ/კელ სითბოტყვეალობის კალორიმეტრში ასხია 2კგ წყალი. მასში ჩაუშვეს 0,4კგ -10°C ტემპერატურის ყინული. დავადგინოთ მიღებული ნარევის შემადგენლობა.

ამოხსნა: შევამოწმოთ შესაძლებელია თუ არა ყინულის მთლიანად გაძნობა. გამოვთვალოთ სითბოს რა რაოდენობა გამოიყოფა სისტემის 0°C-მდე გაციებისას $|Q_1| = |C(t - t_1) + c_1m_1(t - t_1)| = 300 \cdot 8 = 4200 \cdot 2 \cdot 8 = 69600 \text{ჯ.}$

გამოვთვალოთ სითბოს რა რაოდენობაა საჭირო ყინულის გასაძნობად

$$Q_2 = c_2m_2(t_{გ6} - t_2) + q_{გ6}m_2 = 2100 \cdot 0,4 \cdot 10 + 333700 \cdot 0,4 = \\ = 8400 + 133480 = 141840 \text{ჯ}$$

რადგან $|Q_1| < Q_2$ ამიტომ შესაძლებელია მხოლოდ ყინულის ნაწილის გადნობა. ე.ი. სითბური ბალანსის განტოლება ასე დაიწერება:

$$|C(t-t_1) + c_1 m_1 (t-t_1)| = c_2 m_2 (t_{\text{ღ6}} - t_2) + q_{\text{ღ6}} m_x, \quad \text{საიდანაც}$$

გამდნარი ყინულის რაოდენობა m_x ტოლია:

$$m_x = \frac{|C(t-t_1) + c_1 m_1 (t-t_1)| - c_2 m_2 (t_{\text{ღ6}} - t_2)}{q_{\text{ღ6}}} =$$

$$= \frac{69600 - 8400}{333700} \approx 0,18 \text{ კგ}$$

სისტემაში დამყარდა 0°C ტემპერატურა, რის შედეგადაც მივიღეთ $2+0,18=2,18$ კგ წყალი და $0,4-0,18=0,22$ კგ ყინული.

ამოცანა 29.4. კარნოს მაცივარი სითბოს შთანთქავს -17°C -ის საყინულიდან და გადასცემს 25°C -იან ოთახს. ა) რა მუშაობა უნდა შესრულოს მაცივარმა $0,5$ კგ 25°C -იანი წყლის -17°C -იან ყინულად გადაქცევისვის? ბ) თუ კომპრესორის გამოსასვლელზე სიმძლავრე 200 ვტ-ია, რა მინიმალური დრო იქნება საჭირო $0,5$ კგ 25°C -იანი წყლის 0°C -იან ყინულად გადაქცევისთვის?

ამოხსნა:

ა) კარნოს მაცივრის მქკ, (21.5)-ის თანახმად, იქნება:

$$\eta_{\text{კარ}} = 1 - \frac{-17 + 273}{25 + 273} = 0,14.$$

(20.3)-დან მაცივრის მიერ შესასრულებელი მუშაობა

$$A' = \frac{|Q_2|}{\chi} \quad (1)$$

χ გაცივების კოეფიციენტის გამოთვლისათვის ვისარგებლოთ (21.6)-ით $\chi = \frac{-17 + 273}{25 + 17} = 6,1$. 25°C -იანი

წყლის -17°C -იან ყინულად გადაქცევისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა ტოლია:

$$|Q_2| = \left| \left(c_{\text{ვყ}} (t_{\text{ღ6}} - t_1) - q_{\text{ღ6}} + c_{\text{ყ}} (t_2 - t_{\text{ღ6}}) \right) m \right| =$$

$$= \left| \left(4200(0^0 - 25^0) - 333,7 \cdot 10^3 + 2100(-17^0 - 0^0) \right) 0,5 \right| = \quad (1)\text{-ში}$$

$$= 237 \text{ კჯ}$$

(1)-ში გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$A' = \frac{237}{6,1} = 38,9 \text{ კჯ.}$$

ბ) მქკ-ის განმარტებიდან გამომდინარე:

$$\eta_{\text{კარ}} = \frac{Q}{W_{\text{ელ}}} \frac{\left| \left(c(t_{\text{ღ6}} - t_1) - q_{\text{ღ6}} \right) m \right|}{Pt}, \text{ საიდანაც}$$

$$t = \frac{\left| \left(c(t_{\text{ღ6}} - t_1) - q_{\text{ღ6}} \right) m \right|}{P \eta_{\text{კარ}}} = \frac{\left| \left(4200(0^0 - 25^0) - 333,7 \cdot 10^3 \right) 0,5 \right|}{200 \cdot 0,14} =$$

$$= 7834 \text{ წმ} = 2,2 \text{ სთ.}$$

ამოცანა 29.5. 1კგ მასის 0°C-ის ტემპერატურის ყინული ჩააგდეს იმდენად დიდი მოცულობის 10°C-ის წყალში, რომ წყლის ტემპერატურა უმნიშვნელოდ შემცირდა. გამოთვალეთ ა) ყინულის ბ) წყლის, გ) სისტემის ყინული- წყალი ენტროპიის ცვლილება.

ამოხსნა: ცხადია სისტემაში მიმდინარე პროცესი შეუქცევადია, მაგრამ თითოეული კომპონენტის ენტროპიის ცვლილება ზუსტად იგივეა, რაც შექცევადი პროცესისას, ამიტომ ვისარგებლებთ (22.9) ფორმულით.

ა) რადგან 0°C ყინული დნება და მიღებული წყალი თბება 10°C-მდე მისი ენტროპიის ცვლილება გამოითვლება ფორმულით:

$$\Delta S_{\text{ყობ}} = \int \frac{dQ_{\text{ღ6}}}{T_{\text{ღ6}}} + \int_{273}^{283} \frac{dQ}{T} = \frac{1}{273} m q_{\text{ღ6}} + c m \int_{273}^{283} \frac{dT}{T} =$$

$$= \frac{1}{273} m q_{\text{ღ6}} + c m \ln T \Big|_{273}^{283}$$

მნიშვნელობათა შეტანით ვღებულობთ:

$$\Delta S_{\text{ჯინ}} = \frac{1}{273} 333,7 \cdot 10^3 + 4200 \cdot \ln \frac{283}{273} = 1386,1 \text{ჯ/კელ}$$

ბ) წყლის ტემპერატურა არ შეცვლილა, თუმცა გასცა სითბური ენერჯია:

$$Q = -mq_{\text{ღ6}} - cm(T - T_{\text{ღ6}}) = -(333,7 \cdot 10^3 + 4200 \cdot 10) = -375700 \text{ჯ}$$

შესაბამისად $\Delta S_{\text{წყ}} = \frac{Q}{T} = -\frac{375700}{283} = -1327,6 \text{ჯ/კელ}$.

გ) სისტემის ენთალპი- წყალი ენტროპიის ცვლილება ტოლი იქნება:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{ჯინ}} + \Delta S_{\text{წყ}} = 1386,1 - 1327,6 = 58,5 \text{ჯ/კელ}$$

მართლაც, სისტემის ენტროპია გაიზარდა, რაც მიუთითებს პროცესის შეუქცევადობაზე.

§30. აორთქლება და კონდენსაცია

აორთქლებას ზოგადად უწოდებენ ნივთიერების გადასვლას თხევადი ან მყარი აგრეგატული მდგომარეობიდან აირადში. ჩვეულებრივ კი აორთქლებაში გულისხმობენ სითხის ზედაპირიდან მოლეკულათა გადასვლას აირად მდგომარეობაში (ორთქლში), ხოლო იგივე პროცესს მყარი სხეულების შემთხვევაში **სუბლიმაცია**.

სუბლიმაცია ახასიათებს ნებისმიერ მყარ სხეულს, მაგრამ საკმაოდ განსხვავებული ინტენსივობით. ზოგიერთის, მაგ. ნახშირორჟანგის კრისტალის შემთხვევაში იგი თვალშისაცემია, ხოლო უმრავლეს მყარი სხეულისთვის პრაქტიკულად შეუძნეველი.

სითხეთა აორთქლების პროცესი შეიძლება აიხსნას მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის თვალსაზრისით. სითხის მოლეკულებს მოცემულ ტემპერატურაზე სიჩქარეთა ფართო სპექტრი გააჩნია, რომელიც საკმაოდ კარგად ემორჩილება მაქსველის განაწილების კანონს. აირებისგან განსხვავებით, სითხის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები საკმაოდ დიდია, რის გამოც მოლეკულები კარგად „იჭერს“ ერთმანეთს. თუ მოლეკულის სიჩქარე (კინეტიკური ენერჯია) იმდენად

დიდია, რომ მას შეუძლია თავი დააღწიოს სითხეს (სხვა მოლეკულებთან ურთიერთქმედების ძალებს), იგი ტოვებს მას და გადადის აირად მდგომარეობაში. რადგან სითხეს ტოვებს მაღალი ენერგიის მოლეკულები, სითხეში დარჩენილ მოლეკულათა საშუალო ენერგია მცირდება და სითხის ტემპერატურა ეცემა, ე.ი. აორთქლებას თან სდევს სითხის გაცივება. აორთქლების პროცესში სითხის ტემპერატურის შესანარჩუნებლად საჭიროა მასზე განუწყვეტილვ სითბოს გადაცემა.

სითბოს იმ რაოდენობას, რომელიც საჭიროა 1კგ სითხის იმავე ტემპერატურის ორთქლად გადასაქცევად $Q_{\text{ორთ}}$ – ს *ორთქლადქცევის კუთრი სითბო* ეწოდება. m მასის სითხის ორთქლადქცევის სითბო გამოითვლება ფორმულით

$$Q_{\text{ორთ}} = q_{\text{ორთ}} m, \quad (30.1)$$

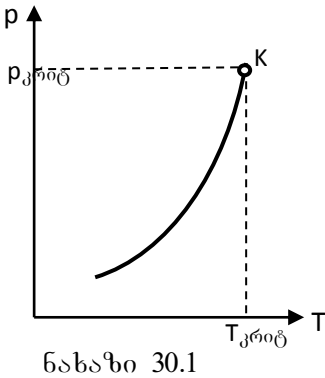
სითხის გადასვლა აირად მდგომარეობაში – აორთქლება ნებისმიერ ტემპერატურაზე მიმდინარეობს, ამასთანავე ტემპერატურის ზრდით აორთქლების ინტენსივობა მატულობს.

აორთქლების პროცესის შესასწავლად განვიხილოთ დახშული ჭურჭელი, რომელიც ნაწილობრივ შევსებულია წყლით ან რაიმე სითხით და ამოტუმბულია ჰაერი. მაღალი კინეტიკური ენერგიის მოლეკულები ტოვებს რა სითხის ზედაპირს, გადადის აირად მდგომარეობაში – წარმოქმნის ორთქლს. ორთქლის კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად იზრდება იმის ალბათობა, რომ ორთქლის მოლეკულები შეიძლება შეეხოს სითხის ზედაპირს და „ჩაჭერილ“ იქნას მისი მოლეკულების მიერ, ანუ გადავიდეს თხევად მდგომარეობაში. ამ პროცესს *კონდენსაცია* ეწოდება. (აირადიდან მყარში გადასვლას *დესუბლიმაცია* ეწოდება)

ენერგიის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარე ორთქლის კონდენსაციისას (დესუბლიმაციისას) გამოიყოფა სითბოს იგივე რაოდენობა რაც დაიხარჯა მის აორთქლებაზე და $Q_{\text{ორთ}} = |Q_{\text{კონ}}|$ $q_{\text{ორთ}} = |q_{\text{კონ}}|$.

მაშასადამე დახშულ ჭურჭელში აორთქლებასთან ერთად მიმდინარეობს საპირისპირო პროცესი – კონდენსაცია, რომლის ინტენსივობა ორთქლის წნევის ზრდასთან ერთად მატულობს. რის შედეგადაც მოცემული ტემპერატურის აირში ორთქლის წნევის განსაზღვრულ მნიშვნელობაზე დამყარდება **ღინამიკური წონასწორობა** სითხესა და ორთქლს შორის, ანუ აორთქლებული მოლეკულების რაოდენობა უტოლდება იმავე დროში კონდენსირებული მოლეკულების რაოდენობას. ასეთ ორთქლს **ნაჯერი** ეწოდება, ხოლო მის წნევას – **ნაჯერი ორთქლის წნევა (დრეკადობა)**.

ტემპერატურის ზრდით გაცილებით სწრაფად იზრდება იმ მოლეკულათა რიცხვი, რომელთა კინეტიკური ენერჯია საკმარისია სითხის ზედაპირის დასატოვებლად, ვიდრე იმ მოლეკულათა, რომლებიც სითხის ზედაპირთან შეხებისას ჩაიჭირება-კონდენსირდება, ამიტომ წონასწორობა ირღვევა – აორთქლებულ მოლეკულათა რიცხვი აჭარბებს კონდენსირებულთა რიცხვს. ეს პროცესი გაგრძელდება, სანამ ორთქლის წნევის ზრდა არ გამოიწვევს კონდენსაციის ინტენსივობის გაზრდას და წონასწორობის აღდგენას. მაშასადამე



➤ **ნაჯერი ორთქლის წნევა ტემპერატურის ზრდით მატულობს.**

ეს დამოკიდებულება ნაჩვენებია ნახ. 30.1-ზე. (T_{კრიტ}-ის და p_{კრიტ}-ის ფიზიკურ არსს §34 აუხსნით).

ნაჯერი ორთქლის წნევა არ არის დამოკიდებული მის მოცულობაზე. მართლაც, თუ ნაჯერი ორთქლის მოცულობას გავზრდით, მისი წნევა შემცირდება, მაგრამ ამასთანავე, წონასწორობის დარღვევის გამო გაიზრდება აორთქლებულ მოლეკულათა რაოდენობა და ეს პროცესი გაგრძელდება, სანამ არ აღდგება ორთქლის პირველადი

– ნაჯერი წნევა. ანალოგიურად მოცულობის შემცირებისას წნევის ზრდა კომპენსირდება ორთქლიდან სითხეში გადასული მოლეკულების ხარჯზე²¹.

ყოველდღიურ ცხოვრებაში აორთქლება მიმდინარეობს არა ვაკუუმში, არამედ ჰაერში, რომლის მოლეკულებიც ორთქლის მოლეკულებთან შეჯახების გამო მცირედ ასანგრძლივებს დინამიკური წონასწორობის დადგომის მომენტს, თუმცა მოცემულ ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის წნევა რჩება იგივე, რაც ვაკუუმის შემთხვევაში.

ცხრილი 30.1.

$t^{\circ}\text{C}$	0	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
$p \times 10^3 \text{ პა}$	0,61	1,23	1,71	2,33	3,17	4,24	7,37	12,3	19,9	31,2	47,3	70,1	101

სითხის გათბობისას ჭურჭლის კედლებზე წარმოიქმნება პატარა ბუშტები, რომელიც შედგება ჰაერისა და სითხის ნაჯერი ორთქლისგან. ტემპერატურის ზრდასთან ერთად იზრდება ბუშტში არსებული ნაჯერი ორთქლის წნევა, ბუშტი იბერება (იზრდება არქიმედეს ძალა) წყდება კედელს, ამოდის ზემოთ. თუ ბუშტში ორთქლის წნევა უტოლდება ატმოსფერულ წნევას, ზედაპირზე იგი სკდება. ამ დროს სითხის მთელი მოცულობიდან და ზედაპირიდან იწყება ინტენსიური აორთქლების პროცესი, რასაც **ღულილს** უწოდებენ. ღულილი და აორთქლება ორთქლწარმოქმნის ფორმებია, ისინი პირველი გვარის ფაზურ გადასვლას მიეკუთვნება. მაგრამ აორთქლებისგან განსხვავებით ღულილი მიმდინარეობს მხოლოდ განსაზღვრულ ტემპერატურაზე

²¹ თუ ჭურჭელი თავლიაა, ან დიდი მოცულობა გააჩნია, სითხე შეიძლება მთლიანად აორთქლდეს წონასწორობის დამყარებამდე.

და წნევაზე. ტემპერატურას, რომელზეც სითხე დუღს მუდმივი წნევის პირობებში **დუღილის ტემპერატურა** ეწოდება. სუფთა ნივთიერების დუღილის ტემპერატურა ნორმალური წნევის პირობებში (760 მმ ვერც.წყ.) მის ერთ-ერთ ძირითად მახასიათებლად ითვლება. მაგ. გამოსხილი წყლისთვის ეს ტემპერატურაა 100°C . დედამიწის უმაღლეს მწვერვალზე ჯომოლუნგმაზე (ევერესტზე 8848მ) წნევა საშუალოდ ნორმალური წნევის მესამედია (234 მმ ვერც.წყლ.) და წყალი 70°C -ზე დუღს. ცხრილ 30.1-ში მოცემულია წყლის დუღილის ტემპერატურის დამოკიდებულება ატმოსფერულ წნევაზე.

ამოცანა 30.1. რა თანაფარდობა იყო 0°C ცინულის და 100°C წყლის ორთქლის მასებს შორის, თუ მათი ურთიერთშერევისას დამყარდა 40°C ტემპერატურა. გარემოსთან სითბოცვლა უგულებელყოფილია.

$$\text{ამოხსნა: } Q_1 + Q_2 = 0, \quad (1) \quad \text{სადაც}$$

$Q_1 = q_{\text{ღ6}} m_1 + c m_1 (t - t_1)$ ცინულის დნობისა და მიღებული წყლის 40°C -მდე გათბობისთვის საჭირო სითბოა.

$Q_2 = -q_{\text{აორთ}} m_2 + c m_2 (t - t_2)$ ორთქლის კონდენსაციისა და წარმოქმნილი წყლის 40°C -მდე გაციებისას გამოყოფილი სითბოა. (1)-ის თანახმად,

$$q_{\text{ღ6}} m_1 + c m_1 (t - t_1) - q_{\text{აორთ}} m_2 + c m_2 (t - t_2) = 0,$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{q_{\text{აორთ}} - c(t_2 - t)}{q_{\text{ღ6}} + c(t - t_1)} = \frac{22,6 \cdot 10^5 + 4,2 \cdot 10^3 \cdot 60}{3,33 \cdot 10^5 + 4,2 \cdot 10^3 \cdot 40} \approx 5$$

ამოცანა 30.2. ქვაბში ჩასხმული 60°C ტემპერატურის წყალი დადგეს ელექტროქურაზე. 10°წთ -ის შემდეგ წყალი ადუღდა. რა დროის შემდეგ აორთქლდება წყლის ნახევარი?

ამოხსნა: ელექტროქურიდან წყლის ასადუღებლად საჭირო სითბოს რაოდენობა

$$Pt_1 = cm\Delta T \quad (1)$$

მთელი ადუღებული წყლის ნახევრის ასაორთქლებლად საჭირო სითბოს რაოდენობა იგივე სიმძლავრის ელექტროქურის პირობებში

$$Pt_2 = q_{\text{აორთ}} \cdot \frac{m}{2} \quad (2)$$

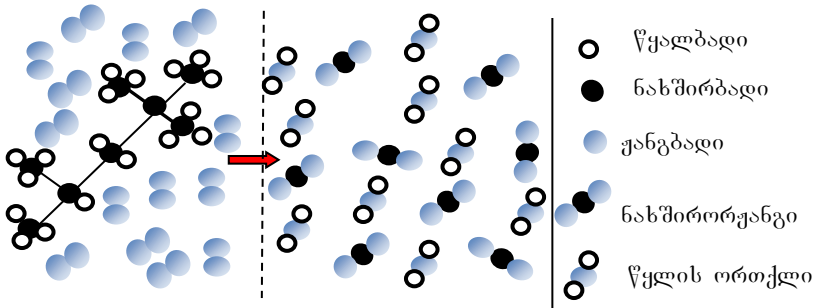
შევაფარდოთ (1) და(2) განტოლებები:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{2c\Delta T}{q_{\text{აორთ}}}, \quad \text{საიდანაც}$$

$$t_2 = \frac{q_{\text{აორთ}} \cdot t_1}{2c\Delta T} = \frac{2,26 \cdot 10^6 \cdot 10}{2 \cdot 4,2 \cdot 10^3 \cdot 40} \approx 67 \text{წთ.}$$

§ 31. წვის და აფეთქების პროცესი. წვის კუთრი სითბო

საწვავი წარმოადგენს იმ ნივთიერებებს, რომლის მოლეკულების ჟანგბადის მოლეკულებთან ურთიერთქმედებისას ან ერთმანეთთან შეხებისას მიმდინარეობს ეგზოთერმული რეაქცია და გამოიყოფა



ნახაზი31.1

დიდი რაოდენობის სითბო. ამ რეაქციებს მიეკუთვნება წვის და აფეთქების რეაქციები.

საწვავის წვისთვის საჭიროა ტემპერატურა გავზარდოთ ისეთ მნიშვნელობამდე (**ააღების ტემპერატურამდე**), რომ საწვავის მოლეკულა შეუერთდეს ჟანგბადის მოლეკულას. მაგ. ხის ან ნავთის წვისას ნახშირბადის ატომები წყდება საწვავის მოლეკულებს და უერთდება ჟანგბადს. ხის წვისთვის (ცეცხლის

წაკიდებისთვის) ტემპერატურა 600⁰C მაინც უნდა იყოს, ბენზინის აალებისთვის 200⁰C სავსებით საკმარისია. საწვავისთვის წვის ტემპერატურის მინიჭების შემდეგ, იწყება რა წვა, გამოყოფილი სითბო თავად უზრუნველყოფს წვის პროცესის შენარჩუნებას. ხის, ნახშირის ან ნავთის წვისას ჟანგბადთან შეერთების რეაქცია ზედაპირიდან იწყება, რადგან მხოლოდ ზედაპირის ნახშირბადს აქვს საშუალება ჰაერის ჟანგბადთან ურთიერთქმედებისა (მართლაც, თუ ნაწილობრივ დამწვარ ხის ნაჭერს გარე შავ ფენას მოვაცლით მის შიგნით ვნახავთ ხის დაუმწვარ ნაწილს). ამ მიზეზის გამო წვის პროცესი ნელა მიმდინარეობს.

განვიხილოთ ბენზინის წვის პროცესი. ნახ. 31.1-ზე ნაჩვენებია ბენზინის ერთი მოლეკულის (შედგება ნახშირბადის 8 და წყალბადის 18 ატომისგან) წვის სქემა. ჟანგბადის მოლეკულებთან ურთიერთქმედებისას მიიღება ნახშირორჟანგისა და წყლის ორთქლის მოლეკულები, რომელთა საშუალო ენერგია გაცილებით მეტია ბენზინისა და ჰაერის მოლეკულების ენერგიაზე. ე.ი. საწვავის მოლეკულის ატომების ურთიერთქმედების პოტენციური (ქიმიური) ენერგია გადავიდა წვის შედეგად წარმოქმნილი მოლეკულების კინეტიკურ ენერგიაში, რაც სითბოს გვაძლევს.

წვის შეწყვეტისთვის საჭიროა საწვავს შეეუზღუდოთ ჟანგბადი (დავაყაროთ სილა, შევფუთოთ,.....) ან ტემპერატურა დავცეთ აალების ტემპერატურაზე ქვემოთ (დავასხათ წყალი,.....).

საწვავის ეფექტურობას ახასითებენ წვის კუთრი სითბოთი. წვის კუთრი სითბო ეწოდება სითბოს იმ რაოდენობას, რომელიც გამოიყოფა მოცემული ნივთიერების ერთეულოვანი მასის სრული დაწვისას:

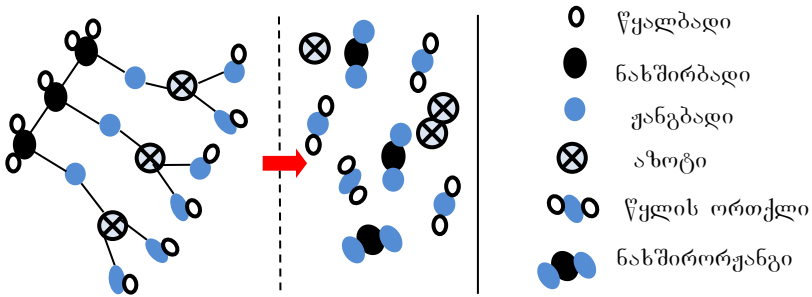
$$q_{\text{წვ}} = \frac{Q_{\text{წვ}}}{m} \quad (31.1)$$

მისი ერთეულია ჯ/კგ. ხშირად გამოიყენება კკალ/კგ, (1კკალ=4,2კჯ). ცხრილ 31.1-ში მოცემულია ზოგიერთი ნივთიერების წვის კუთრი სითბო. სითბურ ძრავებში საწვავის წვისას გამოყოფილი სითბოს მხოლოდ ნაწილი

ხმარდება სასარგებლო მუშაობის შესრულებას (§20), ამიტომ მათი მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მქკ) ასეც შეიძლება ჩაეწეროს:

$$\eta = \frac{A_{\text{სახ}}}{Q_{\text{წ3}}} = \frac{A_{\text{სახ}}}{q_{\text{წ3}} m} \quad (31.2)$$

არსებობს ისეთი საწვავებიც, რომლებიც ერთმანეთთან შეხებისას ჟანგბადის მიწოდების და წინასწარი გახურების გარეშე გამოყოფს დიდი რაოდენობის სითბოს.



ნახაზი 31.2

მაგ. წყალბადის და ქლორის, წყალბადის და ჟანგბადის აირების ნარევი. ამ შემთხვევებში რეაქცია მთელ მოცულობაში მიმდინარეობს, ენერგია მყისიერად გამოიყოფა -ხდება აფეთქება. აფეთქებისას ხშირად მოლეკულები ნაწილებად იშლება. ნახ. 31.2 მოცემულია ნიტროგლიცერინის აფეთქების რეაქციის სქემა. ნიტროგლიცერინის მოლეკულა (შედგება ნახშირბადის 3, აზოტის 3, ჟანგბადის 9 და წყალბადის 11 ატომისგან) შეიცავს ყველა იმ ატომს, რომელიც აუცილებელია ქიმიური რეაქციისთვის და მისი წვა ჰაერის ჟანგბადის გარეშე მიმდინარეობს. მისი დაშლისას მიიღება წყლის ორთქლის, აზოტის და ნახშირორჟანგის აირის მოლეკულები. მაღალი ტემპერატურის გამო აირთა ნარევეში დაიშორება ცალკეული ატომებიც.

ზოგადად აფეთქების პროცესი ნივთიერებაში შემდგენიარად მიმდინარეობს: ნივთიერების ერთი ნაწილი აალებსას ხურდება ქიმიური რეაქციის შედეგად გამოყოფილი სითბოს ხარჯზე. ეს სითბო ვრცელდება

მომდევნო უბნებში და იწვევს მათ აალებას. ამრიგად, რეაქცია ნივთიერებაში სითბოს გავრცელების სიჩქარით

ცხრილი 31.1

საწვავი	q _წ კჯ/კმ	საწვავი	q _წ კჯ/კმ
ბენზინი	4,6·10 ⁴	დენთი	0,4·10 ⁴
დიზელის საწვ.	4,2·10 ⁴	ტორფი	(1,4-2,1)·10 ⁴
სპირტი 96%	3,0·10 ⁴	მშრალი ხე	(1,44-1,74)·10 ⁴
ნავთი	3,5·10 ⁴	ქვანახშირი	(1,5-2,7)·10 ⁴
მაზუთი	4,1·10 ⁴	ხის ნახშირი	2,3·10 ⁴
მცენ. ზეთი	(39-4,8)·10 ⁴	კოქსი	(2,8-3,1)·10 ⁴
სკიპიდარი	4,4·10 ⁴	ანტრაციტი	(3,3-3,4)·10 ⁴
წყალბადი	14,2·10 ⁴	ბუნ. აირი	(3,5-4,3)·10 ⁴

მიმდინარეობს და ძალიან სწრაფად ~ (20-30)მ/წმ, ფაქტიურად მყისიერად მოიცავს მთელ ნივთიერებას და ხდება აფეთქება.

აფეთქებას ხშირად ახლავს ე.წ. **დარტყმითი ტალღა**. მისი წარმოშობის მექანიზმი ასეთია: აფეთქების უბანში წნევა მკვეთრად იზრდება და გადაცემა მეზობელ უბნებს ~10³მ/წმ სიჩქარით. რომლებშიდაც წნევის გაზრდას თან ახლავს ტემპერატურის გაზრდა, რაც აფეთქების მიზეზი ხდება. აფეთქების ამ პროცესს **დეტონაციას** უწოდებენ. იგი ფაქტიურად მყისიერია.

ამოცანა 31.1. ნავთქურა 1წთ-ში 10გ ნავთს წვავს. რა დრო დაჭირდება 800გ ალუმინის კალორიმეტრში 2კგ -10⁰С-იანი ყინულიდან 10⁰С-იანი წყლის მიღებას, თუ სასარგებლოდ დაიხარჯა ნავთის დაწვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის 40%.

ამოხსნა: ალწერილი პროცესის განსახორციელებლად ნავთქურის მიერ გამოყოფილი სრული სითბოს რაოდენობა იქნება: $Q = q_{\text{წ}} M$. ამ სითბოს რაოდენობის 40% ხმარება -10⁰С-იანი ყინულის დნობის ტემპერატურამდე (0⁰С) მიყვანას, 0⁰С-იანი ყინულის იმავე ტემპერატურის წყლად გადაქცევას, წყლის 10⁰С-მდე გათბობას და კალორიმეტრის გათბობას -10⁰С- დან 10⁰С-მდე;

$$0,4q_{\text{ვ3}} M = c_{\text{კ}} m_1 (t_2 - t_1) + c_{\text{ყ}} m_2 (t_{\text{გ6}} - t_1) + q_{\text{გ6}} m_2 + c_{\text{ვ3}} m_2 (t_2 - t_{\text{გ6}}), \text{ საიდანაც}$$

$$M = \frac{c_{\text{კ}} m_1 (t_2 - t_1) + c_{\text{ყ}} m_2 (t_{\text{გ6}} - t_1) + q_{\text{გ6}} m_2 + c_{\text{ვ3}} m_2 (t_2 - t_{\text{გ6}})}{0,4q_{\text{ვ3}}}$$

$$M = \frac{(0,9 \cdot 0,8 \cdot 20 + 2,1 \cdot 2 \cdot 10 + 333,7 \cdot 2 + 4,2 \cdot 2 \cdot 10)10^3}{0,4 \cdot 35 \cdot 10^5} =$$

$$= 0,577 \text{ კგ.}$$

თუ ნავთქურა 1წთ-ში 10გ ნავთს მოიხმარს, მაშინ 0,577კგ

$$\text{ნავთს დახარჯავს } t_1 = \frac{M \cdot t}{m} = \frac{577 \cdot 1}{10} = 57,7 \text{ წთ - ში.}$$

ამოცანა 312. 8კგ მასის ჭურვი გასროლისას დაიწვა 1კგ დენთი, რომლის წვისას გამოყოფილი ენერჯის 60% გადავიდა ჭურვის კინეტიკური ენერჯიაში. გამოთვალეთ ჭურვის ასვლის სიმაღლე, ფრენის ხანგრძლივობა და ფრენის სიშორე, თუ გასროლის მომენტში ღულა ჰორიზონტთან ადგენდა 34° კუთხეს.

ამოხსნა: ამოცანის პირობის თანახმად

$$W_{\text{გ6}} = 0,6Q_{\text{ვ3}}, \quad \text{ე.ი.} \quad \frac{m v_0^2}{2} = 0,6q_{\text{ვ3}} M, \quad \text{საიდანაც}$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{1,2q_{\text{ვ3}} M}{m}} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 35 \cdot 10^5 \cdot 1,6}{8}} = 9,2 \cdot 10^2 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}} \quad \text{საწყისი}$$

სიჩქარის მდგენელები იქნება²²,

$$v_{0x} = 9,2 \cdot 10^2 \cdot \cos 34^\circ = 7,6 \cdot 10^2 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}};$$

$$v_{0y} = 9,2 \cdot 10^2 \cdot \sin 34^\circ = 5,2 \cdot 10^2 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}.$$

²²ლიტ. 1. §20.

ჭურვის ასვლის სიმაღლე იქნება

$$H = \frac{v_{0y}^2}{2g} = \frac{2,7 \cdot 10^5}{2 \cdot 9,8} = 1,4 \cdot 10^4 \text{ მ;}$$

ზემოთ მოძრაობის

ხანგრძლივობა იქნება,

$$t' = \frac{v_{0y}}{g} = \frac{5,2 \cdot 10^3}{9,8} = 5,3 \cdot 10^2 \text{ წმ,}$$

სოლო ფრენის ხანგრძლივობა $t_{\text{ფრ}} = 2t' = 1,06 \cdot 10^3 \text{ წმ.}$
 შესაბამისად ფრენის სიშორე იქნება:

$$L = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha = \frac{8,5 \cdot 10^5}{9,8} \cdot \sin 68^\circ = 8,1 \cdot 10^4 \text{ მ.}$$

**§32. სითხისა და ნაჯერი ორთქლის
 წონასწორობა**

განვიხილოთ აირად მდგომარეობაში მყოფი ნივთიერების მუდმივი ტემპერატურის პირობებში შეკუმშვის პროცესი (ნახ.32.1). გარკვეულ მოცულობამდე შეკუმშვისას აირის წნევა იზრდება მანამ ის არ მიაღწევს მოცემული ტემპერატურის შესაბამის ნაჯერი ორთქლის წნევის სიდიდეს. ამ მომენტიდან იწყება კონდენსირება - სისტემა ორ ფაზიანი ხდება (აირი-სითხე). შემდგომი შეკუმშვა მიმდინარეობს მუდმივი წნევის პირობებში $p = p_{\text{ნაჯ}} = \text{const}$ (pV-დიაგრამის ჰორიზონტალური უბანი). კონდენსაციის დამთავრების შემდეგ მთელი აირი გათხევადებულია და სისტემა ერთფაზიანია. შემდგომ მოცულობის მცირედი შემცირებაც კი სითხის ძნელად კუმშვადობის გამო წნევის ინტენსიურ ზრდას იწვევს. (აირს, რომელიც მოცემული ტემპერატურის პირობებში შეკუმშვისას კონდენსირება, *ორთქლი* ვუწოდოთ.) მაშასადამე ($V_{\text{სითხ}}$; $V_{\text{აირ}}$) არეში აღებულ მოცულობას იკავებს სითხე და ორთქლი:

$$V = V'_{\text{სითხ}} + V'_{\text{ორთ}} = v_{\text{სითხ}} m_{\text{სითხ}} + v_{\text{ორთ}} m_{\text{ორთ}} \quad (32.1)$$

სადაც $v_{\text{სითხ}} = V_{\text{სითხ}}/m$ და $v_{\text{ორთ}} = V_{\text{აირ}}/m$ ($m = m_{\text{სითხ}} + m_{\text{ორთ}}$) შესაბამისად სითხისა და ორთქლის კუთრი მოცულობაა, რომლებიც ნაჯერი ორთქლის შემთხვევაში მუდმივია. მათი მნიშვნელობები შევიტანოთ (32.1)-ში:

$$V = \frac{m_{\text{სითხე}}}{m_{\text{სითხე}} + m_{\text{ორთქი}}} V_{\text{სითხე}} + \frac{m_{\text{ორთქი}}}{m_{\text{სითხე}} + m_{\text{ორთქი}}} V_{\text{ორთქი}}$$

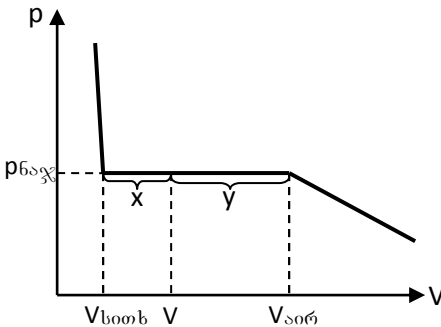
და შემოვიღოთ აღნიშვნა $z = m_{\text{სითხე}} / m_{\text{ორთქი}}$ მაშინ

$$V = \frac{z}{z+1} V_{\text{სითხე}} + \frac{1}{z+1} V_{\text{ორთქი}}, \text{ საიდანაც}$$

$$z(V - V_{\text{სითხე}}) = V_{\text{ორთქი}} - V, \text{ ანუ}$$

$$\frac{m_{\text{სითხე}}}{m_{\text{ორთქი}}} = \frac{V_{\text{ორთქი}} - V}{V - V_{\text{სითხე}}} = \frac{y}{x} \quad (32.2)$$

მაშასადამე სითხისა და ნაჯერი ორთქლის მასათა თანაფარდობა ორფაზიან სისტემაში ტოლია იზოთერმის ჰორიზონტალური მონაკვეთის იმ ნაწილთა თანაფარდობის, რომლითაც ის გაყოფილია მოცემული მდგომარეობის შესაბამისი წერტილით.



ნახაზი 32.1

არა მარტო ორთქლისა და სითხის წონასწორულ მდგომარეობას შეესაბამება pV-დიაგრამის ჰორიზონტალური უბანი, არამედ ნებისმიერ ორფაზიან სისტემას (მაგ. მდნარი-კრისტალი, კრისტალის ორი მოდიფიკაცია). სათანადოდ უბნის

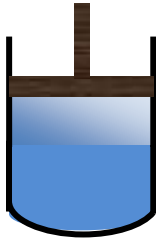
ბოლოები V_1 და V_2 იქნება პირველი და მეორე ფაზის მოცულობები და (32.2) მიიღებს სახეს:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{V_1 - V}{V - V_2} = \frac{y}{x}$$

სადაც m_1 და m_2 ნივთიერების პირველი და მეორე ფაზების მასაა მოცემული მდგომარეობისთვის.

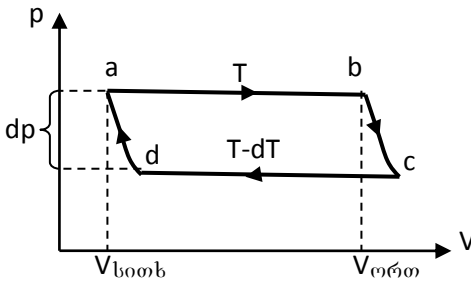
§33. კლავირონ-კლავიზის განტოლება

კლასიკური-კლასიკური
განტოლები
ცვლილები



ნახაზი 33.1

ასახავს ნაჯერი ორთქლის წნევის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე, როდესაც სითხე გადადის აირად მდგომარეობაში. დაეუშვათ ცილინდრში, დგუშის ქვეშ, იმყოფება სითხე და მისი ნაჯერი ორთქლი (ნახ.33.1). ამასთან დგუშს შეუძლია თავისუფლად გადაადგილება. განვიხილოთ კარნოს შექცევადი ციკლი (ნახ.33.2). ვთქვათ დასაწყისში ნაჯერი ორთქლის ტემპერატურაა $T_1=T$, ხოლო წნევა p . მოვახდინოთ ორთქლის



ნახაზი 33.2

იზოთერმული გაფართოება. რადგან ტემპერატურა არ იცვლება, არ შეიცვლება p -ს მნიშვნელობაც, ანუ მოხდება m მასის სითხის დამატებითი აორთქლება. მაშასადამე გაფართოების

პროცესში ორთქლის მასა იზრდება. პროცესი იზობარულია (ab უბანი) და იგი განხორციელდა გაფართოების პროცესში სისტემაზე $Q_1 = q_{ორთ} m$ სითბოს მიწოდებით. ორთქლის მოცულობის ნაზრდი ტოლია: $\Delta V = m(v_{ორთ} - v_{სითხე})$. ამ იზობარული გაფართოებისას შესრულებული მუშაობა იქნება:

$$A_1 = p \Delta V = pm(v_{ორთ} - v_{სითხე})$$

შემდეგ, მოცულობის ადიაბატურად უსასრულოდ მცირე გაზრდით (bc უბანი), ტემპერატურა შემცირდება dT -ით, ხოლო წნევა dp -ით. ასე, რომ c მდგომარეობაში ნაჯერი ორთქლის ტემპერატურაა $T_2 = (T - dT)$, ხოლო წნევა ($p - dp$).

შეკუმშვით ორთქლი იზობარულად ΔV სიდიდით (cd უბანი). შესრულებული მუშაობაა:

$$A_2 = - (p-dp)\Delta V = (p-dp)\Delta m(v_{\text{ორთ}} - v_{\text{სითხ}})$$

საბოლოოდ ადიაბატური შეკუმშვით (da უბანი) სისტემა დავაბრუნოთ პირვანდელ მდგომარეობაში.

გამოვთვალოთ ციკლის მარჯი ქმედების

კოეფიციენტი $\eta = \frac{A}{Q_1}$, სადაც $A = A_1 - A_2$ სასარგებლო

მუშაობაა (უგულებელყოფილია bc და da უბანზე შესრულებული უსასრულოდ მცირე მუშაობები). ე.

$$\eta = \frac{pm(v_{\text{ორთ}} - v_{\text{სითხ}}) - (p-dp)m(v_{\text{ორთ}} - v_{\text{სითხ}})}{Q_1}.$$

გამარტივებით ვღებულობთ:

$$\eta = \frac{(v_{\text{ორთ}} - v_{\text{სითხ}})dp}{q_{\text{ორთ}}}, \quad (33.1).$$

მეორე მხრივ კარნოს ციკლის შექცევადობის გამო

$$\eta = \frac{T - (T - dT)}{T} \quad (33.2).$$

გავუტოლოთ (33.1) და (33.2) ერთმანეთს და განვსაზღვროთ ნაჯერი ორთქლის წნევის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{1}{T} \cdot \frac{q_{\text{ორთ}}}{v_{\text{ორთ}} - v_{\text{სითხ}}} \quad (33.3).$$

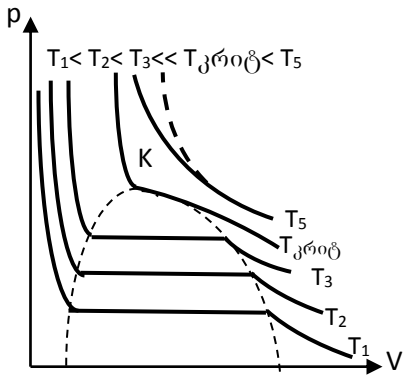
რაც **კლაპეირონ-კლაუზიუსის განტოლებაა**. იგი არაა დამოკიდებული სითხის გვარობაზე და გვიჩვენებს აორთქლების (ან სუბლიმაციის) დროს ნაჯერი ორთქლის წნევის ცვლილებას ტემპერატურის მიხედვით. იგი ორთქლსა და სითხეს შორის ფაზური წონასწორობის (p,T) დიაგრამაზე შესაბამისი წირის დიფერენციალური განტოლებაა. მისი ამოხსნისთვის საჭიროა ვიცოდეთ როგორ იცვლება p და T-ს ცვლილებით $q_{\text{ორთ}}$, $v_{\text{ორთ}}$, $v_{\text{სითხ}}$ სიდიდეები, რაც საკმაოდ რთული ამოცანაა, ამიტომ ამ დამოკიდებულებას ადგენენ ცდების

საშუალებით და შემდეგ ხსნიან კლაპეირონ-კლაუზიუსის განტოლებას.

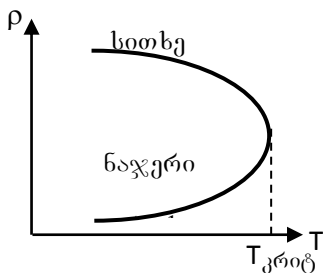
(33.3) გამოიყენება არამარტო სუფთა ნივთიერებებისთვის არამედ ხსნარებისა და მათი ცალკეული კომპონენტებისთვისაც. უკანასკნელ შემთხვევაში მიიღება კავშირი რომელიმე კომპონენტის ნაჯერი ორთქლის პარციალურ წნევასა და ტემპერატურას შორის, განტოლებაში ჩაისმება მოცემული კომპონენტის ორთქლადქცევის კუთრი სითბოს და კუთრი მოცულობის მნიშვნელობები.

§34. რეალური აირის ცდისეული იზოთერმები.
კრიტიკული მდგომარეობა

განვიხილოთ სხვადასხვა ტემპერატურზე აირის იზოთერმული შეკუმშვის (p,V) დიაგრამები (ნახ. 34.1). ტემპერატურის ზრდა იწვევს იზოთერმის ზემოთ აწევას და ფორმის შეცვლას. ორივე მხრიდან თანდათან მცირდება დიაგრამის ჰორიზონტალური ნაწილი, ანუ აირი გათხევადებას იწყებს უფრო მცირე მოცულობისას და ამთავრებს უფრო დიდი მოცულობის დროს. გარკვეულ $T_{კრიტ}$ ტემპერატურაზე ჰორიზონტალური ნაწილი გადაგვარდება K წერტილში, ე.ი აირის სითხედ გადასვლა მოხდება ერთბაშად. K-ში სისტემის მდგომარეობას **კრიტიკული მდგომარეობა** ეწოდება, შესაბამის $T_{კრიტ}$, $V_{კრიტ}$, $p_{კრიტ}$ კრიტიკული სიდიდეები. K იზოთერმის გადაღუნვის წერტილია. უფრო მაღალ ტემპერატურზე იზოთერმას არავითარი ჰორიზონტალური უბანი არ აქვს, ამიტომ არ შეიძლება საუბარი აირის გათხევადებაზე. კარგავს აზრს ნაჯერი ორთქლის ცნება, ამიტომ ნახ.34.1ზე ნაჯერი ორთქლის წნევის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკი მთავრდება K კრიტიკულ წერტილში. თუ შევაერთებთ ჰორიზონტალური უბანთა განაპირა წერტილებს მიიღება ენის მსგავსი მრუდი, რომლის წვეროც K წერტილშია. ამ მრუდის მიერ შემოსაზღვრულ არეში სისტემა ორფაზიანია. $T_{კრიტ}$ -ზე მაღალი ტემპერატურის შემთხვევაში ვერავითარი წნევით ვერ მივაღწევთ აირის



ნახაზი 34.1



ნახაზი 34.2

გათხევადებას. წნევის ზრდით აირი სულ უფრო მკვრივი ხდება, თანდათანობით იძენს სითხის თვისებებს, თუმცა სითხედ მაინც არ გადაიქცევა. სისტემა ერთფაზიანი - ერთგვაროვანი რჩება. მაშასადამე ტემპერატურის ზრდისას ($T \rightarrow T_{\text{კრიტ}}$) მცირდება განსხვავება ნაჯერი ორთქლის და სითხის სიმკვრივეებს შორის. კრიტიკულ ტემპერატურაზე ეს განსხვავება მთლიანად ისპობა (ნახ.34.2) და მასთან ერთად ისპობა განსხვავება სითხესა და აირს შორის.

განვიხილოთ $T_{\text{კრიტ}}$ -ზე უფრო მაღალი ტემპერატურის იზოთერმა (ნახ.34.1, T_5). იგი ერთი შეხედვით პრინციპში აღარ განსხვავდება იდეალური აირის იზოთერმისაგან, თუმცა განსხვავება ძლიერი შეკუმშვისას (მაღალი წნევისას) იგრძნობა. იზოთერმაზე დატანილი წყვეტილი წირი წარმოადგენს იმავე ტემპერატურაზე იდეალური აირის იზოთერმის ნაწილს (დაბალი წნევის დროს იდეალური და რეალური აირების იზოთერმების მრუდები თანხვედრილია), როგორც ვხედავთ, მაღალი წნევის პირობებში მოცემულ ტემპერატურაზე რეალური აირი იდეალურთან შედარებით მცირე მოცულობას იკავებს. რაც აიხსნება იმით, რომ წნევის ზრდისას მოლეკულები უახლოვდება ერთმანეთს, რის გამოც იზრდება ურთიერთმიზიდვის

ძალები და შესაბამისად ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგია.

თუ დახშულ ჭურჭელში დავაკვირდებით რაიმე სითხის (მაგ. ეთერის) გაცხელების პროცესს, მანამ სანამ ტემპერატურა ნაკლებია $T_{კრიტ-ზე}$ სიმკვრივეთა განსხვავების გამო სინათლის სხივი ერთი ფაზიდან მეორეში გადასვლისას განიცდის გარდატეხას და სითხესა და მის ორთქლს შორის დაიმზირება გამყოფი ზედაპირი. $T_{კრიტ-ზე}$ (მოცემულ შემთხვევისთვის ≈ 424 კელ) გამყოფი საზღვარი ქრება (სიმკვრივეთა გათანაბრების გამო სინათლის სხივი არ გარდატეხება).

იმისთვის, რომ არ მოგვიხდეს ტერმინების *აირის* და *ორთქლის* არევა, უნდა გვახსოვდეს, რომ, თუ აირადი მდგომარეობის ტემპერატურა კრიტიკულზე დაბალია, ანუ შესაძლებელია მისი გადაყვანა თხევად მდგომარეობაში, მას *ორთქლს* უწოდებენ, წინააღმდეგ შემთხვევაში – *აირს*.

ცხრილ 34.1-ში მოცემულია ზოგიერთი აირის კრიტიკული ტემპერატურა და შესაბამისი წნევა.

ცხრილი 34.1.

ნივთიერება	H_2O+ ორთქლი	CO_2	O_2	N_2	H_2	He
$T_{კრიტ}$ (კელ)	647	304	155	126	33,1	5,1
$p_{კრიტ} \times 10^5$ პა	213,6	71,3	49	32,8	12,5	2,3

§35. ტენიანობა

ჰაერში ყოველთვის არის წყლის ორთქლის გარკვეული რაოდენობა, რაც განპირობებულია დედამიწის ზედაპირზე წყლის რეზერვუარების – ოკეანების, ზღვების, ტბების და ა.შ. არსებობით. წყლის ორთქლის შემცველობას ახასიათებენ ფარდობითი ტენიანობით.

- *ფარდობითი ტენიანობა ტოლია ჰაერში წყლის ორთქლის წნევის (პარციალური წნევის) p ფარდობისა იმავე ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის წნევასთან $p_{ნაჯ}$.*

ჩვეულებრივად მას პროცენტებში გამოსახავენ

$$\varphi = \frac{P}{P_{\text{ნაჯ}}} \cdot 100\% . \quad (35.1)$$

ჰაერი გაჯერებულია წყლის ორთქლით, როდესაც $p = p_{\text{ნაჯ}}$ ($r = 100\%$). შესაძლებელია გადაჯერებული მდგომარეობაც ($\varphi > 100\%$). ასეთი სიტუაცია შეიძლება წარმოიქმნას ტემპერატურის მკვეთრი ვარდნისას, მაგ. თუ ზაფხულის დღეს 40°C -ზე ორთქლის წნევაა $p = 4,46 \cdot 10^3 \text{პა}$ ($\varphi = 60\%$), ღამით კი ტემპერატურა დაეცა 30°C -მდე, ცხრილი 30.1-ის თანახმად, ორთქლი აღმოჩნდება გადაჯერებულ მდგომარეობაში $\varphi = \frac{4,46}{4,24} \cdot 100\% = 105\%$.

ჰაერი ვეღარ შეინარჩუნებს წყლის ზედმეტ რაოდენობას და მოხდება მისი კონდენსაცია – გამოიყოფა *ნამის* სახით. იგივე პროცესი მიმდინარეობს *ღრუბლის*, *ნისლის*, *წვიმის* წარმოქმნისას.

➤ *ტემპერატურას, რომელზეც ფარდობითი ტენიანობა 100%-ია, ნამის წერტილი ეწოდება.*

ფარდობითი ტენიანობა შეიძლება შემდეგნაირადაც გამოვსახოთ:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_{\text{ნაჯ}}} \cdot 100\% \quad (35.2)$$

სადაც ρ მოცემულ ტემპერატურაზე ჰაერში წყლის ორთქლის სიმკვრივეა, ხოლო $\rho_{\text{ნაჯ}}$ წყლის ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივეა იმავე ტემპერატურაზე.

ცოცხალი ორგანიზმები განსაკუთრებით მგრძობიარეა ტენიანობის მიმართ. ადამიანის ჯანმრთელობასა და კომფორტაბელურობისთვის $\varphi = (40 - 50)\%$ ითვლება ოპტიმალურ სიდიდედ.

ამოცანა 35.1. $0,25\text{მ}^3$ მოცულობის ჭურჭელში ჰაერის ტენიანობაა 40% . $0,75\text{მ}^3$ მოცულობის ჭურჭელში კი 60% . რა ტენიანობა დამყარდება მათი წვრილი მილით შეერთების შემდეგ, თუ ორივე ჭურჭელში ტემპერატურა ერთნაირია.

ამოხსნა: რადგან ამოცანა თვისობრივად ამოცანა 8.1-ის იდენტურია ვისარგებლოთ მისი შედეგით, რომ ჭურჭელთა შეერთების შედეგად წყლის ორთქლის დამყარებული წნევა იქნება:

$$p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2} \quad (1)$$

სადაც, (35.1)-ის გამო, $p_1 = 0,4 \cdot p_{\text{ნაჯ}}$ და $p_2 = 0,6 \cdot p_{\text{ნაჯ}}$ (ცხადია ტემპერატურის მუდმივობის გამო ნაჯერი ორთქლის წნევა უცვლელია). შევიტანოთ (1)-ში, მივიღებთ:

$$p = \frac{0,4 \cdot 0,25 + 0,6 \cdot 0,75}{0,25 + 0,75} \cdot p_{\text{ნაჯ}} = (0,1 + 0,45) \cdot p_{\text{ნაჯ}} = 0,55 \cdot p_{\text{ნაჯ}},$$

მაშინ (35.1)-ის თანახმად, $\varphi = \frac{0,55 p_{\text{ნაჯ}}}{P_{\text{ნაჯ}}} \cdot 100\% = 55\%$

ამოცანა 35.2. 40°C -ზე ჰაერის ტენიანობა იყო 50%. მოხდება თუ არა ნამის გამოყოფა ტემპერატურის 30°C -მდე დაცემისას.

ამოხსნა: ვისარგებლოთ ცხრილი 30.1-ით

(35.1)-ის თანახმად $p(40^{\circ}\text{C}) = \frac{17,37 \cdot 50}{100} = 3,69 \cdot 10^3 \text{ პა}$.

$p_{\text{ნაჯ}}(30^{\circ}\text{C}) = 4,24 \cdot 10^3 \text{ პა}$. $p(40^{\circ}\text{C}) < p_{\text{ნაჯ}}(30^{\circ}\text{C})$, ე.ი. ნამი არ წარმოიქმნება.

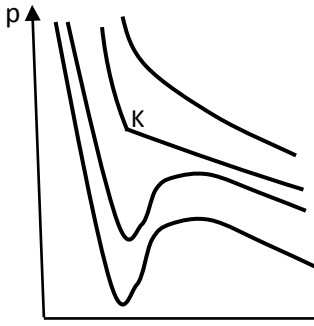
§36. ვან-დერ-ვაალსის იზოთერმები.

ბადაჯერებული ორთქლი და გადახურებული სითხე

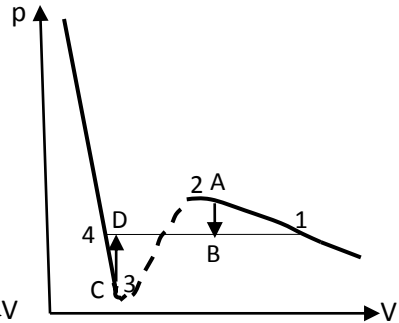
ვან-დერ-ვაალსის მდგომარეობის განტოლება (18.4) რეალური აირების ცდის შედეგებთან არასაკმარისად თანხვედრილია, მაგრამ თვისობრივად თანხვედრა დიდია. იგი საშუალებას იძლევა აიხსნას აირის თხევად

მდგომარეობაში გადასვლასთან დაკავშირებული ზოგიერთი მოვლენა და თვით სითხის თვისებებიც.

თუ ამ განტოლების გამოყენებით ავაგებთ რომელიმე კონკრეტული აირისთვის იზოთერმებს, მას ნახ. 36.1-ზე მოყვანილი მრუდების სახე ექნება. ამ მრუდებისთვის დამახასიათებელია ის, რომ $T < T_{კრიტ}$ ტემპერატურის შესაბამის იზოთერმებს, განსხვავებით ცდისეული იზოთერმებისგან (ნახ.34.1), ჰორიზონტალური ნაწილის ნაცვლად გააჩნია S-ის მსგავსი ტალღური ფორმა. ნახ. 36.2-ზე მოცემულია რეალური აირის ცდისეული და თეორიული (ვან-დერ-ვაალსის) იზოთერმა. ისინი კარგად ეთავსება ერთმანეთს ერთფაზიან არეებში; აირადში (1-წერტილის მარჯვნივ) და თხევადში (4-წერტილის მარცხნივ). ორფაზიან არეში რეალური იზოთერმა ჰორიზონტალური წრფეა, ხოლო ვან-დერ-ვაალსის ტალღური წირია. ექსპერიმენტით 2-3 უბანი



ნახაზი 36.1



ნახაზი 36.2

არ ხორციელდება, რადგან მუდმივი მასისა და ტემპერატურის პირობებში მოცულობისა და წნევის ერთდროული შემცირება ფიზიკურად შეუძლებელია. 1-2 და 3-4 უბანში მოცულობის შემცირება იწვევს წნევის ზრდას, ამიტომ ამ უბანთა შესაბამისი მდგომარეობების განხორციელება პრინციპში შეუძლებელია, მაგრამ ისინი **მეტასტაბილური** (ნაკლებ მდგრადი) იქნება. მაგ. თუ აირში A მდგომარეობაში ყოფნისას მოხვდა რაიმე უცხო ნაწილაკი

პროცესი მყისიერად განვითარდება $A \rightarrow B$ მიმართულებით, წარმოიქმნება ორფაზიანი სისტემა - აირი-სითხე. რის გამოც აირს 1-2 მდგომარეობებში **გადაჯერებულ ორთქლს** უწოდებენ, ხოლო სითხეს 3-4 უბანში **გადახურებულ სითხეს**.

განვიხილოთ რა პირობებშია შესაძლებელი სისტემა აღმოჩნდეს მეტასტაბილურ მდგომარეობაში. მაგ. იმისთვის, რომ ნაჯერმა ორთქლმა დაიწყოს კონდენსაცია საჭიროა მასში არსებობდეს **კონდენსაციის ცენტრები** (მტვრის ნაწილაკები, იონები, სითხის წვეთები), რომლებიც ჩაიჭერს ორთქლის მოლეკულას და მოხდება მისი კონდენსირება. ე.ი. თუ ორთქლი გაწმენდილია კონდენსაციის ცენტრებისგან, მაშინ იგი დარჩება იგივე მდგომარეობაში მოცემული ტემპერატურის შესაბამის ნაჯერ წნევაზე უფრო მაღალი წნევის პირობებშიც. ასევე შესაძლებელია სუფთა არანაჯერი ორთქლი ადიაბატურად გავაფართოოთ. რის შედეგადაც იგი გაცივდება და აღმოჩნდება გადაჯერებული. გადახურებული სითხის მიღება ასევე შესაძლებელია თუ იგი წინასწარ იქნა გაწმენდილი. რადგან სწორედ ჩანართებზე იწყება დუღილი - ინტენსიური ორთქლწარმოქმნა. გასუფთავებული სითხე შეიძლება შევიწინარჩუნოთ მოცემული ტემპერატურის შესაბამის ნაჯერ წნევაზე უფრო დაბალი წნევის პირობებშიც. ეს მდგომარეობა მეტასტაბილურია, რადგან თუ სითხეში შემთხვევით მოხვდა უცხო ნაწილაკი იგი გახდება მისი დუღილის მიზეზი და სისტემა გადავა სტაბილურ ორ ფაზიან მდგომარეობაში.

ა მ ო ტ ა ნ ე ბ ი :

4. რა სიმაღლიდან იყო ნასროლი ტყვია ვერტიკალურად ქვევით, თუ იგი ლუდიდან გამოვარდა 500მ/წმ სიჩქარით და მთლიანად გადნა მიწაზე დაცემის შემდეგ? თუ ტყვიის საწყისი ტემპერატურაა 27°C და მექანიკური ენერჯის 50% დაიხარჯა მის გასათბობად. (პასუხი: 300მ)

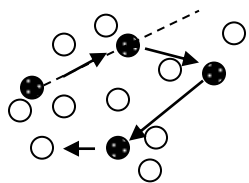
5. რა სიმაღლეზე შეიძლება ავიტანოთ 1კგ მასის სხეული იმ ენერგიის ხარჯზე, რომელიც გამოიყოფა 200გ 0°C წყლის იმავე ტემპერატურის ყინულად გადაქცევისას? **(პასუხი: 680მ)**
6. რამდენი სპირტი დაიხარჯება სპირტქურაზე 2კგ 20°C-იანი წყლის ასაორთქებლად? **(პასუხი: 0,173კგ)**
7. წყალსატევის ზედაპირის ყოველი კვადრატული მეტრი ყოველ საათში კარგავს 336კჯ სითბოს. რა სისქის ყინული წარმოიშეება ერთი დღე-ღამის განმავლობაში, თუ წყლის ტემპერატურა ზედაპირზე არის 0°C. ყინულის სიმკვრივეა $0,9 \cdot 10^3$ კგ/მ³. **(პასუხი: 0,027მ)**
8. კოლბაში იყო 0°C ტემპერატურის წყალი. კოლბიდან ჰაერის ამოქაჩვისას წყლის ნაწილი ორთქლდება, დანარჩენი იყინება. წყლის რა ნაწილი ორთქლდება ამ დროს, თუ გარედან სითბოს ნაკადი არ გვაქვს? წყლის აორთქლების კუთრი სითბოა $2,26 \cdot 10^6$ ჯ/კგ. **(პასუხი: 12%)**
9. სითბურ წონასწორობაში მყოფი ნარევი, რომელიც შედგება წყლისა და 5კგ ყინულისგან, შეუშვეს 100°C ტემპერატურის 0,5კგ ორთქლი. ყინულის რა ნაწილი გადნება ამ დროს? **(პასუხი: 0,8)**
10. მაცივარში წყლის 20°C-დან 0°C-მდე გაცივებას დასჭირდა 20წთ. რა დროა საჭირო რომ ეს წყალი გაიყინოს და გაცივდეს -5°C-მდე? **(პასუხი: 4,8 \cdot 10^3 წმ)**
11. რა სიჩქარით მოძრაობდა ტყვიის ბურთულა, თუ ისეთივე უძრავ ბურთულასთან დაჯახების შემდეგ ორივე ბურთულა მოძრაობს ერთნაირი სიჩქარით და მათი ტემპერატურა გაიზარდა 2,5K-ით? **(პასუხი: 51მ/წმ)**
12. ტყვია მოხვდა ხის კედელს 400მ/წმ სიჩქარით, გახვრიტა იგი და გამოვიდა 100მ/წმ სიჩქარით. ტყვიის ტემპერატურა დაჯახების მომენტში იყო 96°C. ტყვიის რა ნაწილი გადნება, თუ მას გადაეცემა დაჯახების შედეგად გამოყოფილი სითბოს ნახევარი? **(პასუხი: 30%)**
13. 5კგ მასის ურიკა წრფივად და თანაბრად მოძრაობს 10მ/წმ სიჩქარით. ურიკას ზემოდან დაადეს 2კგ მასის აგური, რის გამოც ურიკას სიჩქარე შემცირდა. სითბოს რა რაოდენობა გამოიყოფა ამ დროს? **(პასუხი: 71,5 ჯ)**

14. იპოვეთ ტრაქტორის ძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტი, თუ იგი ავითარებს 110 კვტ სიმძლავრეს და საათში ხარჯავს 28 კგ დიზელის სათბობს. (პასუხი: 34%)
15. 10 კგ მასის ჭურვი გასროლისას ლულიდან გამოიტყორცნება 800 მ/წმ სიჩქარით. 1,5 კგ დენთის წვისას გამოყოფილი ენერჯის რა პროცენტს შეადგენს ჭურვის კინეტიკური ენერჯია? (პასუხი: 53%)
16. ველოსიპედის ძრავა, როდესაც მისი სიჩქარეა 18 კმ/სთ, 60 კმ გზაზე ხარჯავს 0,8 კგ ბენზინს. გამოიანგარიშეთ ძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტი, თუ მისი სიმძლავრეა 735 ვტ. (პასუხი: 24%)
17. ავტომობილის ძრავის სიმძლავრეა 60 კვტ. გამოიანგარიშეთ ბენზინის ხარჯი ერთ საათში, თუ ძრავის მქკ 25%-ია. ბენზინის სიმკვრივე $0,7 \cdot 10^3$ კგ/მ³-ის ტოლია. (პასუხი: 26,8 ლ)
18. განსაზღვრეთ ავტომობილის ძრავის სიმძლავრე, თუ დიზელის საწვავის ხარჯი 100 კმ-ზე 45 ლ-ია. მოძრაობის საშუალო სიჩქარეა 36 კმ/სთ. ძრავის მქკ 20%-ია. საწვავის სიმკვრივე $0,8 \cdot 10^3$ კგ/მ³-ის ტოლია. (პასუხი: 33 კვტ)
19. 3,5X6,0X8,0მ მოცულობის ოთახში ტენიანობაა 80%. რა რაოდენობის წყლის აორთქლებაა შესაძლებელი წყლის ღია ჭურჭლიდან თუ ტემპერატურაა 20°C (წყლის მოლური მასაა $18 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ). (პასუხი: $\approx 0,57$ კგ)
20. 30°C-ის ტემპერატურის 520 მ³ მოცულობის ოთახში ჰაერის ტენიანობაა 90%. რა რაოდენობის წყალი უნდა გამოიყოს ოთახიდან, რომ ტენიანობა 50% გახდეს? (პასუხი: $\approx 6,3$ კგ)

თავი IV. ბადაბანიოი მოვლენებო

§37. მოლეკულათა თავისუფალი განარბენი

აირებსა და სითხეებში მოლეკულები ქაოსური მოძრაობის შედეგად განუწყვეტლივ ეჯახება ერთმანეთს, რის გამოც თითოეულის ტრაექტორია ტეხილ წირს წარმოადგენს. რომლის წრფივი მონაკვეთებიც



ნახაზი 37.1

ტრაექტორიის ის ნაწილია, რომელსაც მოლეკულა შემოწერს ორ მომდევნო შეჯახებას შორის. ამ მონაკვეთთა სიგრძეს λ **თავისუფალი განარბენი**²³ ეწოდება. ცხადია მათი სიდიდე ერთმანეთისგან განსხვავებულია, მაგრამ მოლეკულათა ძალიან დიდი

რაოდენობისა და მათი მოძრაობის სრული ქაოსურობის გამო შეგვიძლია მოლეკულათა მოძრაობა დავახასიათოთ თავისუფალი განარბენის საშუალო სიდიდით - λ საშ. შევაფასოთ ეს სიდიდე.

გამარტივებისთვის დავუშვათ, რომ

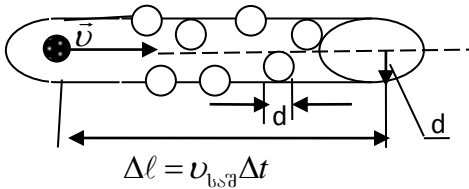
1. აირის მოლეკულები d **ეფექტური დიამეტრი**²⁴ აბსოლუტურად მყარი სფეროებია. ცხადია, ორი მოლეკულის შეჯახება გარდაუვალი იქნება, თუ მათ ცენტრებს შორის მანძილი არ აღემატება d -ს. ყოველი შეჯახების შემდეგ განსახილველი მოლეკულა (გამუქებული) იცვლის მოძრაობის მიმართულებას (ნახ. 37.1). წყვეტილი ხაზით ნაჩვენებია ის ტრაექტორია, რომელზედაც იმოძრაებდა აღნიშნული მოლეკულა შეჯახებების გარეშე.

²³ თავისუფალი განარბენის ტერმინით ჩვენ ხაზს ვუსვამთ იმ გარემოებას, რომ არ ვიხილავთ იმ სუსტ მოლეკულურ ძალებს, რომელთა მოქმედებასაც მოლეკულა განუწყვეტლივ განიცდის.

²⁴ მოლეკულის ჩათვლა სფერულად, იძლევა მხოლოდ მიახლოებით წარმოდგენას მის რეალურ ზომებზე ამიტომ მიღებულია ტერმინები მოლეკულის ეფექტური დიამეტრი, ეფექტური კვეთა.

2. მოლეკულა დაჯახების შემდეგ აგრძელებს მოძრაობას იმ მიმართულებით, რომლითაც ის მოძრაობდა დაჯახებამდე. ამ დაშვებით ავიცილებთ გამოთვლების გართულებას ისე, რომ არ შეიცვლება საბოლოო შედეგი.
3. გარდა განსახილველი მოლეკულისა დანარჩენი მოლეკულები უძრავია.

აღნიშნული დაშვებების საფუძველზე შეიძლება წარმოვიდგინოთ, რომ მოლეკულა Δt დროში გაირბენს $\Delta l = v_{\text{საშ}} \Delta t$ მანძილს და შეეჯახება ყველა იმ მოლეკულას, რომელიც იმყოფება Δl მსახველის



ნახაზი 37.2.

და d რადიუსის იმ ცილინდრული ზედაპირის შიგნით, რომლის ღერძიც ემთხვევა განსახილველი მოლეკულის ტრეპტორიას (ნახ. 37.2). თუ მოლეკულათა

კონცენტრაციაა n , მაშინ Δt დროში მოცემული მოლეკულის სხვა მოლეკულებთან დაჯახებათა საშუალო რიცხვი გამოითვლება ფორმულით:

$$z_{\text{საშ}} = n \Delta V = n \pi d^2 \Delta l = n \pi d^2 v_{\text{საშ}} \Delta t, \quad (37.1)$$

ხოლო საშუალო თავისუფალი განარბენი იქნება:

$$\lambda_{\text{საშ}} = \frac{\Delta l}{z_{\text{საშ}}} = \frac{\Delta l}{n \pi d^2 \Delta l} = \frac{1}{n \pi d^2} \quad (37.2)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ყველა მოლეკულა მოძრაობს, მაშინ საჭიროა (37.1)-სა და (37.2)-ში $v_{\text{საშ}}$ შევცვალოთ ფარდობითი სიჩქარით $v_{\text{ფარ}}$. მოლეკულათა განაწილების მაქსიმალური თეორიულიდან ცნობილია, რომ $v_{\text{ფარ}} = \sqrt{2} v_{\text{საშ}}$. შესაბამისი შესწორებებით გვექნება

$$z_{\text{საშ}} = \sqrt{2} n \pi d^2 v_{\text{საშ}} \Delta t \quad (37.3)$$

$$\lambda_{\text{საშ}} = \frac{1}{\sqrt{2n\pi d^2}} \quad (37.4)$$

(37.4)-ის თანახმად საშუალო თავისუფალი განარბენი დამოკიდებულია მოლეკულათა ეფექტურ დიამეტრსა (იხ. ცხრილი 37.1) და კონცენტრაციაზე. აღნიშნულ დაშვებათა საზღვრებში ვღებულობთ, რომ

➤ *მოლეკულის საშუალო თავისუფალი განარბენი არაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე²⁵.*

რადგან მუდმივი ტემპერატურის პირობებში აირის წნევა მოლეკულათა კონცენტრაციის პირდაპირპროპორციულია (6.6), ამიტომ აირის მოლეკულის საშუალო თავისუფალი განარბენი მუდმივი ტემპერატურის პირობებში აირის წნევის უკუპროპორციულია. ე.ი.

$$\frac{\lambda_{1\text{საშ}}}{\lambda_{2\text{საშ}}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad (37.5)$$

თუ აირი იმდენად გაიშვიათებულია, რომ მოლეკულა უფრო ხშირად ეჯახება ჭურჭლის კედლებს, ვიდრე სხვა მოლეკულებს, მაშინ თავისუფალი განარბენის სიგრძე აზრს კარგავს, რადგან იგი აღემატება ჭურჭლის ზომებს.

ცხრილი 37.1

აირი	He	H ₂	O ₂	H ₂ O	N ₂	CO ₂	SO ₂	Cl ₂
dX10 ⁻¹⁰ მ	2,0	2,5	3,0	3,0	3,0	3,3	3,4	3,7

ამოცანა 37.1. ჩავთვალოთ, რომ ჰაერის შემადგენელ მოლეკულათა ეფექტური დიამეტრები ერთნაირია $d \approx 3 \cdot 10^{-10}$ მ, ხოლო საშუალო სიჩქარე ნორმალურ პირობებში $u_{\text{საშ}} = 400$ მ/წმ. გამოვთვალოთ მო-

²⁵რეალურად მოლეკულის საშუალო თავისუფალი განარბენი ტემპერატურის ზრდით რამდენამდე იზრდება. მაგ. აზოტის შემთხვევაში 300⁰K-ზე იგი 12%-ით მეტია ვიდრე 200⁰K-ზე.

ლექულის საშუალო თავისუფალი განარბენი და დროის ერთეულში დაჯახებათა რიცხვი.

ამოხსნა: §1-ის თანახმად, ნორმალურ პირობებში იდეალური აირის 1 მოლი იკავებს $22,4\text{ლ} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ მ}^3$ მოცულობას, მაშინ ჰაერის, როგორც იდეალური აირის, კონცენტრაცია იქნება

$$n = N_L = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ მ}^{-3}. \quad (37.4)\text{-ის თანახმად}$$

$$\lambda_{\text{საშ}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 2,7 \cdot 10^{25} \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^{-20}} = 9 \cdot 10^{-8} \text{ მ}.$$

$\frac{\lambda}{d} \approx 300$, თავისუფალი განარბენი 300-ჯერ აღემატება მოლეკულის წირით ზომას. (37.3)-დან კი

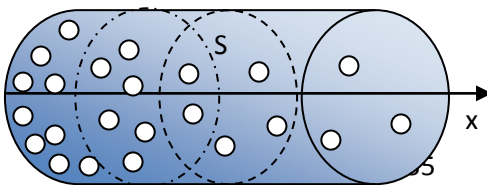
$$z_{\text{საშ}} = \frac{v_{\text{საშ}} \Delta t}{\lambda} = \frac{\sqrt{2} \cdot 400}{9 \cdot 10^{-8}} = 6,3 \cdot 10^9 \text{ წმ}^{-1}$$

ე.ი., ნორმალურ პირობებში ჰაერის მოლეკულის შეჯახებათა რიცხვი 1წმ-ის განმავლობაში რამოდენიმე მილიარდს აღწევს.

§38. დიფუზია აირებში

თუ არაწონასწორულ მდგომარეობაში მყოფ სისტემას მოვაქცევთ იზოლაციაში, მაშინ მასში მოლეკულათა ურთიერთქმედებისა და ქაოსური მოძრაობის გამო განვითარდება ისეთი შეუქცევადი პროცესები, რომლებიც მას გადაიყვანს წონასწორულ მდგომარეობაში. ამ პროცესებს **გადატანით მოვლენებს** უწოდებენ, რადგან ისინი დაკავშირებულია **მასის (დიფუზია), ენერჯიის (სითბოგამტარობა), იმპულსის (შინაგანი ხახუნი)** გადატანასთან.

განვიხილოთ ერთფაზიანი სისტემა კერძოდ, აირის ან აირთა ნარევის ისეთი არაწონასწორული მდგომარეობა, რომელიც გამოწვეულია მასის არათანაბარი განაწილებით. სისტემაში მოლეკულათა



ქაოსური მოძრაობის გამო აღვილი ექნება მათ გადასვლას მალადლი

2 1
 Δx
 ნახაზი 38.1.

კონცენტრაციის უბნიდან დაბალში და პირიქით. თუმცა, ცხადია, პირველი მიმართულებით უფრო მეტი მოლეკულა იმოძრაებს, ვიდრე საპირისპირო მიმართულებით, რაც გამოიწვევს მასის გადატანას მეტი კონცენტრაციის უბნიდან დაბალი კონცენტრაციის უბანში.

ვთქვათ S განივკვეთის ცილინდრულ მილში მოთავსებულია ორკომპონენტიანი აირი (მაგ. სუნამოს მოლეკულები ჰაერში), რომელთაგან ერთ-ერთის (სუნამოს) კონცენტრაცია 2-უბანზე მეტია, ვიდრე 1-უბანში (ნახ. 38.1). გამარტივებისთვის დაუშვათ, რომ

1. მთელ მოცულობაში წნევა და ტემპერატურა გათანაბრებულია-მუდმივია.
2. მოლეკულათა კონცენტრაცია იცვლება მხოლოდ $0x$ ღერძის გასწვრივ. ე.ი. იარსებებს ამ კომპონენტის მოლეკულათა კონცენტრაციის გრადიენტი მიმართული $0x$ ღერძის საპირისპიროდ. მეორე კომპონენტი განვიხილოთ როგორც ფონი (მისი მოლეკულები ნახაზზე ნაჩვენები არაა),

რაიმე Δx არეში, მოლეკულათა ქაოსური მოძრაობის გამო, მათი შეჭრა ორივე მხრიდან მოხდება, მაგრამ, რადგან $n_2 > n_1$, წარმოიქმნება მოლეკულათა ნაკადი $0x$ ღერძის გასწვრივ $2 \rightarrow 1$ მიმართულებით, რომელიც იარსებებს მანამ, სანამ არ მოხდება მთელ მოცულობაში კონცენტრაციის გათანაბრება.

შემოვიღოთ ცნება **დიფუზიური ნაკადის** შესახებ. იგი ეწოდება მოლეკულათა ნაკადის მართობულად აღებულ ერთეულოვან კვეთაში დროის ერთეულში გადატანილ მოლეკულების რაოდენობას:

$$J = \frac{\Delta N}{S \Delta t} \quad (38.1)$$

გერმანელმა ფიზიოლოგმა **ფიკმა** აჩვენა, რომ რაც მეტია მოლეკულათა კონცენტრაციის ცვლილება სიგრძით ერთეულზე მით მეტია დიფუზიური ნაკადი:

$$J = -D \frac{n_2 - n_1}{\Delta x} = -D \frac{\Delta n}{\Delta x} \quad (38.2)$$

მეტი სიზუსტისთვის (38.2)-ს ასე წერენ:

$$J = -D \frac{dn}{dx}. \quad (38.3)$$

„მიუთითებს, რომ მოლეკულათა ნაკადი მიმართულია კონცენტრაციის ზრდის (კონცენტრაციის გრადიენტის) საპირისპიროდ, ანუ მისი შემცირების მიმართულებით. D კოეფიციენტს **დიფუზიის კოეფიციენტი** ეწოდება, იზომება მ²/წმ-ში. იგი იმ დიფუზიური ნაკადის ტოლია, რომელიც წარმოიქმნება კონცენტრაციის ერთეულოვანი გრადიენტის პირობებში. ცხადია, რადგან წნევა სისტემაში გათანაბრებულია, იარსებებს ფონის მოლეკულათა დიფუზია, რომლისთვისაც შეიძლება გამოვიყენოთ (38.3) ფორმულა, ოღონდ დიფუზიის კოეფიციენტის მნიშვნელობა განსხვავებული იქნება.

ჩავწეროთ კავშირი აირში არსებულ სიმკვრივის გრადიენტსა და გადატანილ მასას შორის მოლეკულათა ნაკადის მართობულად აღებულ ერთეულოვან კვეთაში დროის ერთეულში გადატანილი მოლეკულების მასა

იქნება:
$$\frac{\Delta m}{S \Delta t} = \frac{m_0 \Delta N}{S \Delta t} = m_0 J, \quad (m_0 \text{ ერთი მოლეკულის}$$

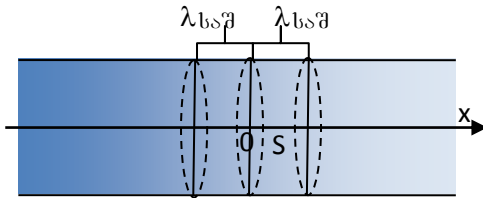
მასაა).

მასში (38.2)-ის გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$\frac{\Delta m}{S \Delta t} = -D m_0 \frac{\Delta n}{\Delta x}. \quad \text{რადგან სიმკვრივე კონცენტრაციასთან}$$

დაკავშირებულია ფორმულით: $\rho = m_0 n$, ამიტომ

$$\frac{\Delta m}{S \Delta t} = -D \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \quad (38.4)$$



ნახაზი 38.2

დავამყაროთ კავშირი დიფუზიის კოეფიციენტსა და მოლეკულის საშუალო განარბენს შორის. მათემატიკური გათვლების გამარტივებისთვის დავუშვათ, რომ ორივე

კომპონენტის მოლეკულებს გააჩნიათ ერთნაირი მასა და ეფექტური განივკვეთი, ან მცირედ განსხვავდებიან ერთმანეთისგან.

მოლეკულათა ქაოსური მოძრაობის გამო სამგანზომილებიან სივრცეში x ღერძის გასწვრივ მოძრავ მოლეკულათა რაოდენობა ტოლია მოლეკულათა სრული რაოდენობის მესამედის, საიდანაც ნახევარი იმოძრავებს x ღერძის მიმართულებით ნახევარი კი საპირისპიროდ (ნახ. 38.2). ასე, რომ მოლეკულათა რიცხვი, რომელიც Δt დროში გაივლის S ფართში იქნება $\Delta N = \frac{1}{6} n_0 S v_{\text{საშ}} \Delta t$, (n_0 კონცენტრაციაა $x=0$ სიბრტყეში), ხოლო დიფუზიური ნაკადი:

$$J = \frac{1}{6} \frac{n_0 S v_{\text{საშ}} \Delta t}{S \Delta t} = \frac{1}{6} n_0 v_{\text{საშ}}$$

ცხადია კონცენტრაცია $x=0$ სიბრტყის მარცხნივ და მარჯვნივ განსხვავებულია. მარჯვნივ მოძრავი მოლეკულები ბოლო შეჯახებას $x=0$ სიბრტყემდე განიცდის $x=-\lambda_{\text{საშ}}$ სიბრტყეში სადაც კონცენტრაცია

ტოლია $n_0 + \left| \frac{dn}{dx} \right| \lambda_{\text{საშ}}$ ასე, რომ $x=0$ სიბრტყეში გამავალი

x ღერძის მიმართულებით დიფუზიური ნაკადი იქნება:

$$J_2 = \frac{1}{6} \left(n_0 + \left| \frac{dn}{dx} \right| \lambda_{\text{საშ}} \right) v_{\text{საშ}}, \quad \text{ხოლო საპირისპირო}$$

მიმართულებით $J_1 = \frac{1}{6} \left(n_0 - \left| \frac{dn}{dx} \right| \lambda_{\text{საშ}} \right) v_{\text{საშ}}$. შესაბამისად

ჯამური ნაკადი:

$$J = J_2 - J_1 = \frac{1}{3} \left| \frac{dn}{dx} \right| \lambda_{\text{საშ}} v_{\text{საშ}} \quad (38.5)$$

(38.3)-თან შედარებით ვღებულობთ დიფუზიის კოეფიციენტის შემდეგ ფორმულას:

$$D = \frac{1}{3} v_{\text{საშ}} \lambda_{\text{საშ}} \quad (38.6)$$

(38.6) მივიღეთ იმ შემთხვევისათვის, როდესაც აირთა ნარევის ორივე კომპონენტის მოლეკულები ერთნაირი იყო მასითა და ეფექტური განიკეთით. თუ ერთკომპონენტიან სისტემაში მასა არათანაბრად არის განაწილებული, მაშინ განხილულ პროცესს *თვითდიფუზიას* უწოდებენ, ანუ ეს ფორმულა სამართლიანია თვითდიფუზიისთვის. იმ შემთხვევაში, თუ აირთა ნარევის კომპონენტთა მოლეკულები განსხვავებულია, მაშინ შესაბამისი გათვლების შედეგად მიიღება დიფუზიის კოეფიციენტის შემდეგი ფორმულა:

$$D = \frac{1}{3} \frac{n_1 \nu_{1\text{საშ}} \lambda_{1\text{საშ}} + n_2 \nu_{2\text{საშ}} \lambda_{2\text{საშ}}}{n_1 + n_2}$$

სადაც n_1 , $\nu_{1\text{საშ}}$, $\lambda_{1\text{საშ}}$ და n_2 , $\nu_{2\text{საშ}}$, $\lambda_{2\text{საშ}}$ კონცენტრაცია, საშუალო სიჩქარე და თავისუფალი განარბენია პირველი და მეორე ტიპის მოლეკულებისათვის.

აირების შემთხვევაში ზოგჯერ უფრო მოსახერხებელია დიფუზიური ნაკადის ჩაწერა არა კონცენტრაციის გრადიენტის, არამედ პარციალური წნევის გრადიენტის გამოყენებით. §6-ის თანახმად აირის კომპონენტის პარციალურ წნევასა და მის კონცენტრაციას შორის კავშირი მოიცემა ფორმულით:

$$p = nkT, \quad \text{საიდანაც} \quad \frac{dn}{dx} = \frac{1}{kT} \frac{dp}{dx}, \quad \text{რომლის (38.3)-ში}$$

შეტანით მივიღებთ:

$$J = -D \frac{1}{kT} \frac{dp}{dx} \quad (38.7)$$

(38.7)-ის თანახმად, აირის თითოეული კომპონენტი დიფუნდირებს მისი მაღალი პარციალური წნევის უბნიდან დაბალში დამოუკიდებლად იმისა, თუ როგორია სხვა კომპონენტთა პარციალურ წნევათა გრადიენტები.

დიფუზიას ადგილი აქვს სითხეებშიც და ფიკის კანონი მათთვისაც გამოიყენება. სითხეებში დიფუზიის კოეფიციენტი ასევე დამოკიდებულია მოლეკულათა თვისებებზე, თუმცა განსხვავებულია (38.6)-დან.

ამოცანა 38.1. გამოვთვალოთ ნორმალურ პირობებში ჰაერში უანგბადის მოლეკულათა დიფუზიის კოეფიციენტი.

ამოხსნა: $m_{O_2} = 32 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} = 5,3 \cdot 10^{-26}$ კგ. (10.5)-ის გამოყენებით

$$v_{\text{საშ}} = 1,6 \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{5,3 \cdot 10^{-26}}} = 430 \text{ მ/წმ.} \quad \text{ამოცანა 37.1-ის}$$

თანახმად,

$$\lambda_{\text{საშ}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 2,7 \cdot 10^{25} \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^{20}} = 9,3 \cdot 10^{-8} \text{ მ}$$

$\lambda = 9,3 \cdot 10^{-8}$ მ, მაშინ (38.5)-ის თანახმად, მივიღებთ დიფუზიის კოეფიციენტის მნიშვნელობას:

$$D = \frac{1}{3} \cdot 430 \cdot 9,3 \cdot 10^{-8} = 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ მ}^2/\text{წმ.}$$

უანგბადის დიფუზია ჰაერში ახლოს არის თვითდიფუზიის მოვლენასთან, რადგან O_2 -ის და N_2 -ის მოლეკულათა ზომები თითქმის ერთნაირია.

ამოცანა 38.2. გამოვთვალოთ აზოტის მოლეკულის თავისუფალი განარბენი და დიფუზიის კოეფიციენტი ჰაერში, რომლის ტემპერატურაა 27°C , ხოლო წნევა 100 კპა.

ამოხსნა: გამოვთვალოთ ჰაერის მოლეკულათა კონცენტრაცია კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლებიდან

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{10^5}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 2,4 \cdot 10^{25} \text{ მ}^{-3}.$$

(37.4)-ში გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$\lambda_{\text{საშ}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 2,4 \cdot 10^{25} \cdot 3,14 \cdot 10,24 \cdot 10^{-20}} = 8,8 \cdot 10^{-8} \text{ მ.}$$

მოლეკულათა საშუალო სიჩქარე, (10.5)-ის თანახმად, იქნება

$$v_{\text{საშ}} = 1,6 \sqrt{\frac{kT}{m_0}} = 1,6 \sqrt{\frac{RT}{M}} = 1,6 \sqrt{\frac{8,31 \cdot 300}{28 \cdot 10^{-3}}} = 480 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}.$$

(38.5)-ში შეტანილ ვლებულობთ:

$$D=1/3 \cdot 8,8 \cdot 10^{-8} \cdot 480=1,4 \cdot 10^{-4} \text{მ}^2/\text{წმ}.$$

ამოცანა 38.3. ერთნაირ პირობებში რომელი აირი დიფუნდირებს უფრო სწრაფად ჰელიუმში თუ აზოტი?

ამოხსნა: (38.7)-ში გავითვალისწინოთ (38.6), (10.5) და (37.4) ფორმულები. მარტივი გარდაქმნით მივიღებთ:

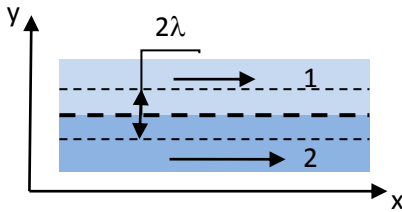
$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{D_2}{D_1} = \sqrt{\frac{m_{01}}{m_{02}}} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2. \text{ ანუ}$$

$$\frac{J_2}{J_1} = \sqrt{\frac{4}{28}} \left(\frac{2}{3,2} \right)^2 = 0,15.$$

§39. შინაგანი ხახუნის აირებში

ჩვენ განვიხილოთ შინაგანი ხახუნის (სიბლანტის) მოვლენა სითხეებსა და აირებში, რომლის არსიც მდგომარეობს შემდეგში: სხვადასხვა სიჩქარით მოძრავ ფენებს შორის წარმოიქმნება შინაგანი ხახუნის ძალები, რომლებსაც გააჩნია ფენის მხების მიმართულება და იწვევს სწრაფი ფენის დამუხრუჭებას, ხოლო ნელი ფენის აჩქარებას.

განვიხილოთ ეს საკითხი აირებში მოლეკულურ - კინეტიკურ თეორიაზე დაყრდნობით. აირის ნაკადში მოლეკულათა ქაოსურ მოძრაობის სიჩქარეს v -ს ემატება მოცემულ ფენაში მოლეკულათა გადატანის



ნახაზი 39.1

სიჩქარე u . როდესაც მოლეკულა, ქაოსური მოძრაობის გამო, აღმოჩნდება ერთი ფენიდან მეორეში გადაიტანს თავის იმპულსს m_0u . იმისგან დამოკიდებულებით

უფრო სწრაფ თუ ნელ ფენაში მოხდა მისი შეჭრა იგი ანელებს ან აჩქარებს ამ ფენის მოძრაობას. აზრობრივად გამოვყოთ ორი პარალელური ფენის შემხებ საზღვარზე S ფართობი (ნახ.

39.1). ჩავთვალოთ, რომ აირი შედგება ერთი ტიპის m_0 მასის მოლეკულებისგან და მათი კონცენტრაცია მუდმივია $n = \text{const}$.

2 ფენის მოლეკულები, რომლებიც S ფართობიდან იმყოფება მოლეკულის საშუალო განარბენის $\lambda_{\text{საშ}}$ ტოლ ან ნაკლებ მანძილზე შეჯახების გარეშე გადავა 1 ფენაში. Δt დროში ასეთ მოლეკულათა რაოდენობაა: $\Delta N_2 = 1/6 \cdot n S v_{\text{საშ}} \Delta t$, ხოლო გადატანილი იმპულსი იქნება: $p_2 = \Delta N_2 \cdot m_0 u_2 = 1/6 \cdot n S v_{\text{საშ}} \Delta t \cdot m_0 u_2$. ასევე 1 ფენიდან 2-ში იმავე დროში გადატანილი იმპულსი იქნება:

$$p_1 = \Delta N_1 \cdot m_0 u_1 = \frac{1}{6} n S v_{\text{საშ}} \Delta t \cdot m_0 u_1. \quad \text{ზემოთქმულიდან}$$

გამომდინარე, S ფართობი გადატანილი იმპულსის სიდიდე იქნება:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{1}{6} n S v_{\text{საშ}} \Delta t \cdot m_0 (u_2 - u_1) \quad (39.1)$$

სადაც $u_2 - u_1$ ტოლია y ღერძის გასწვრივ სიჩქარის გრადიენტის სიდიდის ნამრავლისა ამ ფენებს შორის მანძილზე - $2\lambda_{\text{საშ}}$:

$$(u_2 - u_1) = \left| \frac{\Delta u}{\Delta y} \right| 2\lambda_{\text{საშ}}$$

(39.1)-ში გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$\Delta p = \frac{1}{3} n S v_{\text{საშ}} \Delta t \cdot m_0 \left| \frac{\Delta u}{\Delta y} \right| \lambda_{\text{საშ}} \quad (39.2)$$

საიდანაც უფრო სწრაფი ფენის მხრიდან ნელ ფენაზე მოქმედი ძალის სიდიდე იქნება:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{1}{3} n S v_{\text{საშ}} \cdot m_0 \left| \frac{\Delta u}{\Delta y} \right| \lambda_{\text{საშ}} \quad (39.3)$$

თუ შევადარებთ სიბლანტის ძალის ფორმულას $\left(F = \eta \frac{\Delta u}{\Delta y} S \right)$ მივიღებთ, რომ სიბლანტის კოეფიციენტი მოიცემა ფორმულით:

$$\eta = \frac{1}{3} n v_{\text{საშ}} \cdot m_0 \lambda_{\text{საშ}} = \frac{1}{3} \rho v_{\text{საშ}} \lambda_{\text{საშ}}$$

იგი ახასიათებს აირის მოლეკულურ სტრუქტურას, დამოკიდებულია: აირის სიმკვრივეზე, მოლეკულათა სიჩქარისა და თავისუფალი განარბენის საშუალო სიდიდეებზე.

აირის სიმკვრივე წნევის ზრდით მატულობს $\rho \sim p$, ხოლო მოლეკულათა საშუალო განარბენი წნევის უკუპროპორციულია $\lambda_{\text{საშ}} \sim 1/p$, საშუალო სიჩქარე წნევაზე არაა დამოკიდებული, ამიტომ, (39.4)-ის თანახმად,

➤ **აირთა სიბლანტის კოეფიციენტი წნევაზე არაა დამოკიდებული.**

§40. სითბოს გადაცემის გზები

სითბოს გადაცემა ანუ ენერჯიის გადაცემის პროცესი, რომელიც დაკავშირებულია სისტემის ნაწილების ან სისტემისა და გარე სხეულების ტემპერატურულ განსხვავებასთან, შესაძლებელია განხორციელდეს სამი გზით: **სითბოგამტარობით, კონვექციით და გამოსხივებით.** განვიხილოთ თითოეული ცალ-ცალკე.

როდესაც ლითონის ერთ ბოლოს ცეცხლზე ვათბობთ, საკმაოდ სწრაფად ვგრძნობთ მეორე ბოლოს გაცხელებას, რასაც, ჩვეულებრივად, ლითონის კარგი **სითბოგამტარობით** (თბოგამტარობით) აიხსნება. სითბოგამტარობა მოლეკულათა ურთიერთქმედების შედეგია. კერძოდ, ლითონის იმ ნაწილის მოლეკულები, რომელსაც ვათბობთ, მიღებული ენერჯიის ხარჯზე იწყებს სულ უფრო ინტენსიურ რხევას თავისი წონასწორული მდებარეობის მახლობლობაში, რის შედეგადაც ისინი ეჯახება შედარებით ცივი მეზობელი ნაწილის მოლეკულებს და გადასცემს მათ ენერჯიის გარკვეულ რაოდენობას. ეს მოლეკულები, თავის მხრივ, შეჯახებათა შედეგად მომდევნო ნაწილის მოლეკულებს გადასცემს ენერჯიას და ა.შ. ფაქტიურად, მოლეკულათა ურთიერთშეჯახების ხარჯზე მოხდება სითბოს გადაცემა სხეულის მთელ მოცულობაში. თბოგამტარობას ადგილი

აქვს როგორც მყარ, ასევე თხევად და აირად ნივთიერებებში.

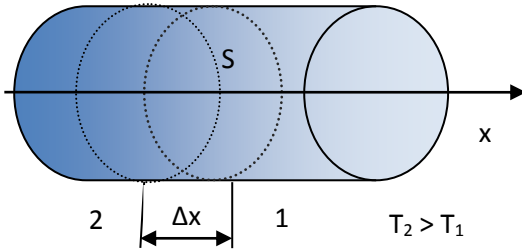
ცდებით დადგენილია, რომ სხეულის ერთი ნაწილიდან მეორეში **ძროის ერთეულში გადაცემული სითბოს რაოდენობა** – სითბოს ნაკადი $\Delta Q / \Delta t$ დამოკიდებულია ტემპერატურულ სხვაობაზე, სხეულის გეომეტრიულ ზომებსა და თვისებებზე. სიმეტრიული ფორმის ერთგვაროვანი სხეულისთვის (ნახ. 40.1) იგი ასე ნაიწვერება:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\chi \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} S = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x} S \quad (40.1)$$

ან ზღვრულ შემთხვევაში

$$\frac{dQ}{dt} = -\chi \frac{dT}{dx} S. \quad (40.2)$$

„-“ მიუთითებს, რომ სითბოს ნაკადი მიმართულია ტემპერატურული გრადიენტის (ტემპერატურის ზრდის) საპირისპიროდ. χ -**სითბოგამტარობის კოეფიციენტი**. მისი



ნახაზი 40.1.

რიცხვითი მნიშვნელობა დამოკიდებულია ნივთიერების გვარობაზე (ცხრილი 40.1). სითბოგამტარობის კოეფიციენტის ერთეულია – ვტ/მ·კელ.

ლითონები, ჩვეულებრივად, კარგი სითბოგამტარებია. ცუდ სითბოგამტარებს **თბოიზოლატორებსაც** უწოდებენ. ცხრილის თანახმად, ჰაერი გაცილებით კარგი თბოიზოლატორია, ვიდრე მინა, ამიტომ ოთახის ფანჯრები, ილუმინატორები, სითბოს შენარჩუნების მიზნით, სასურველია დამზადდეს მინის ორმაგი ჩარჩოთი (მინა – ჰაერი – მინა).

სითბოგამტარობის ფორმულები მათემატიკურად ანალოგიურია დიფუზიის ფორმულების (იხ. §38), მაგრამ

დიფუზიასა და სითბოგამტარობას შორის ძირეული განსხვავებაა, პირველ შემთხვევაში გადაიცემა ნივთიერება, მეორეში – ენერჯია.

კონვექცია ეწოდება სითბოგადაცემის პროცესს გამოწვეულს მოლეკულათა დიდი რიცხვის გადაადგილებით ერთი ადგილიდან მეორეში. სითბოგამტარობისას მოლეკულები ან ირხევა წონასწორობის მდებარეობაში ან გადაინაცვლებს ძალიან მცირე მანძილებზე მაშინ, როდესაც კონვექციის დროს მოლეკულათა გადაადგილება საკმაოდ დიდია. იგი დაიშორება სითხეებსა და აირებში. კონვექცია შეიძლება იყოს იძულებითი და ბუნებრივი. იძულებითი კონვექციის მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ კალორიფერის (ვენტილიატორიანი გამათბობელი) მუშაობისას ვენტილიატორის საშუალებით ბინაში თბილ ჰაერის მოძრაობა. ბუნებრივი კონვექციის გამოვლენაა რადიატორის მახლობლად აღმავალი ჰაერის თბილი ჭავლის არსებობა. ვინაიდან ჰაერი გათბობისას ფართოვდება მისი სიმკვრივე სხვა ფენებთან შედარებით კლებულობს და ადის ზემოთ. ბუნებრივი კონვექციის მასშტაბური გამოვლენაა ოკეანეებში ცივი და ცხელი დინებების არსებობა. ასევე ბუნებრივი კონვექციის მაგალითია ატმოსფეროში ჰაერის ფენათა გადაადგილება (ქარი და სხვა), ამიტომ იგი არსებით როლს თამაშობს ამინდის ჩამოყალიბებაში.

სითბოგამტარობისა და კონვექციისგან განსხვავებით **სითბური გამოსხივება** არ საჭიროებს გადამცემ გარემოს – ნივთიერებას. იგი წარმოადგენს ელექტრომაგნიტური ტალღების ერთ-ერთ ტიპს – **ინფრაწითელ გამოსხივებას**. როგორც ცდებით იქნა დადგენილი, სხეულის მიერ გამოსხივებული სითბური ნაკადი მისი აბსოლუტური ტემპერატურის მეოთხე ხარისხის პროპორციულია, ასევე დამოკიდებულია სხეულის გეარობასა და ზედაპირის S ფართობზე. გამოითვლება ფორმულით:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha \sigma T^4 S, \quad (40.3)$$

სადაც $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ვტ/მ²კ⁴ **სტეფან-ბოლცმანის მუდმივას** სახელწოდებით არის ცნობილი.

ცხრილი 40.1

ნივთიერება	χ კვ/მ.კელ
ვერცხლი	420
ალუმინი	200
მინა (ჩვეულებრივი)	0,84
წყალი	0,56
ადამიანის კანი	0,2
ბოჭკოვანი მინა	0,036
ბამბისეული მინა	0,05
ბუმბული	0,025
პენოპლასტი	0,023
ბეტონი (მასიური)	1,75
აგური (მასიური)	0,67
მშრალი ხე	0,2
გრუნტი	0,4

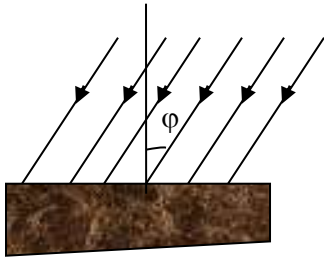
α – ნივთიერების გვარობაზეა დამოკიდებული და იცვლება (0, 1) ფარგლებში: $\alpha \rightarrow 1$ შავი ზედაპირების (შავი ხავერდის, ნახშირის) შემთხვევაში და $\alpha \rightarrow 0$ პრიალა ზედაპირების დროს. ნებისმიერი სხეული ნებისმიერ ტემპერატურაზე ასხივებს სითბურ ენერგიას²⁶.

დაეუშვათ T_1 ტემპერატურის გარემოში მოათავსეს სხეული,

რომლის ტემპერატურაა $T_2 > T_1$. ცხადია მის მიერ

გამოსხივებული სითბოს ნაკადი იქნება $\frac{\Delta Q_{გაშ}}{\Delta t} = \alpha \sigma T_2^4 S$.

ამავდროულად იგი შთანთქავს გარემოს მიერ გამოსხივებულ სითბოს, რომლის შესაბამისი ნაკადი იქნება:



ნახაზი 40.2

$$\frac{\Delta Q_{შთან}}{\Delta t} = -\alpha \sigma T_1^4 S. \text{ ამიტომ}$$

სხეულის მიერ გაცემული სითბოს ნაკადი (ჯამური სითბოს ნაკადი) ასე ჩაიწერება:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta(Q_{გაშ} + Q_{შთან})}{\Delta t} = \alpha \sigma (T_2^4 - T_1^4).$$

(40.4) (α -ს მნიშვნელობა არაა

დამოკიდებული იმაზე გამომსხივებელია თუ მშთანთქმელი სხეული) სხეულისა და გარემოს ჯამური

²⁶ამ საკითხს დეტალურად ოპტიკის კურსში განვიხილავთ.

სითბური ნაკადის მიმართულება განისაზღვრება მათი ტემპერატურული სხვაობით. თუ $T_{\text{სხ}} > T_{\text{გარ}}$, სითბური ნაკადი მიმართულია სხეულიდან გარემოსკენ, რის გამოც სხეული ცივდება და პირიქით. როდესაც $T_{\text{სხ}} = T_{\text{გარ}}$, ჯამური სითბური ნაკადი ნულს უტოლდება.

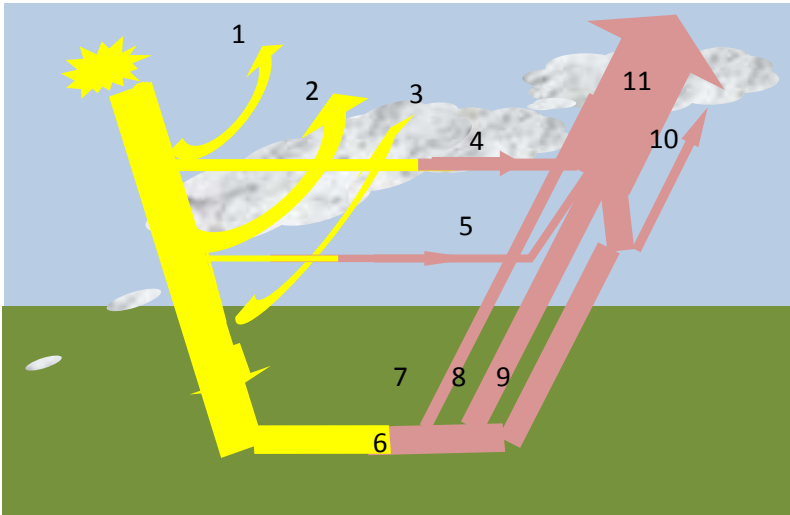
დედამიწის გათბობა ხდება მზის სითბური ენერგიის ხარჯზე. მზის ზედაპირის ტემპერატურა $\approx 6000\text{K}$. იგი ყველა მიმართულებით თანაბრად ასხივებს ენერგიას. დედამიწა მზისგან 150 მლნ კმ-ით არის დაშორებული. მზის სხივები მისადმი მართობულად დედამიწის ატმოსფეროს თითოეულ კვადრატულ მეტრს საშუალოდ ყოველ წამში 1353ჯ სითბოს გადასცემს. ამ რიცხვს-1353ჯ/მ² *მზის მუდმივა* ეწოდება. მზის შიგნით მიმდინარე სხვადასხვა პროცესები (მზის ლაქები, აფეთქებები) იწვევს ამ სიდიდის უმნიშვნელო ცვლილებებს, რომელიც არ აღემატება 0,1%-ს. მზის მიერ გამოსხივებული ენერგიის $\sim 40\%$ შთაინთქმება ატმოსფეროს სხვადასხვა ფენებში. ასე, რომ დედამიწის ზედაპირის თითოეულ კვადრატულ მეტრზე უღრუბლო დღეს საშუალოდ (700-1000)ჯ/მ² სითბოს ნაკადი აღწევს გრძედის, განედის, ზღვის დონიდან სიმაღლის და წელიწადის დროსგან დამოკიდებულებით. ამ ენერგიის შთანთქმა არსებითად დამოკიდებულია იმ კუთხეზე, რომელსაც მზის სხივები ადგენს მოცემულ მომენტში დედამიწის ზედაპირის მართობთან (ნახ. 40.2). მზიან ამინდში სხეულის მიერ დროის ერთეულში შთანთქმული ენერგია დაახლოებით ტოლია

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = 1000\alpha S \cos \varphi \quad (40.5)$$

სადაც φ კუთხეა სხეულის ზედაპირის ნორმალსა და მზის სხივებს შორის. $S \cos \varphi$ „ეფექტური“ ზედაპირის ფართობია. მზის მუდმივას მნიშვნელობა სხვადასხვა პლანეტისთვის განსხვავებული სიდიდეა, რადგან იგი დამოკიდებულია მზისგან პლანეტის დაშორებაზე (იხ. ცხრილი 40.1). დედამიწის ზედაპირამდე მოღწეული მზის

ენერჯის ნაწილი ირეკლება დედამიწის ზედაპირიდან, ნაწილი კი შთაინთქმება.

თოვლს და ყინულს გააჩნია არეკვლის მაღალი უნარი, ხოლო შავ და უსწორმასწორო ზედაპირს გაცილებით ნაკლები. შთანთქმული ენერჯის ნაწილი დედამიწის მიერ ისევ გამოსხივდება (უმეტესად ინფრაწითელი დიაპაზონი) ატმოსფეროში. ატმოსფეროში არსებულ ნახშირორჟანგს, მეთანს, წყლის ორთქლს ახასიათებს ამ გამოსხივების მეტწილად შთანთქმა, რაც იწვევს მათ და შესაბამისად ჰაერის გათბობას-ე.წ. „სათბურის ეფექტი“. რეალურად არსებობს სითბური წონასწორობა დედამიწასა და კოსმოსს შორის: დედამიწა ასხივებს ზუსტად იმდენ ენერჯიას რასაც ღებულობს მზისგან.



ნახაზი 40.3

წინააღმდეგ შემთხვევაში იგი ან გადახურდებოდა ან გაცივდებოდა.

ნახ. 40.3-ზე მოცემულია დედამიწის ენერჯეტიკული ბალანსი. 100%-ს თუ შეუსაბამებთ მზიდან მიღებულ ენერჯიას მაშინ არეკვლაზე მოდის: ატმოსფეროს მიერ 6% (1), ღრუბლებიდან 20% (2), დედამიწის ზედაპირიდან 4% (3). შთანთქმება: ატმოსფეროს მიერ 16% (4), ღრუბლების მიერ 3% (5), 51% ხმელეთისა და ოკეანეთა

მიერ (6). 7% იხარჯება ჰაერის კონვექციასა და მოძრაობაზე (7), 23% გადაიტანება ღრუბლებში არსებული წყლის ორთქლის მიერ (8). 15% შთაინთქმება ჰაერის მიერ (9), 6% სხივდება კოსმოსში დედამიწის ზედაპირიდან (10), მთლიანობაში 64% იფანტება სივრცეში ატმოსფეროსა და ღრუბლების მიერ (11).

ცხრილი 40.2.

პლანეტა	მზიდან დაშორება (x10 ⁹ მ)	მზის მუდმივა (გტ/მ ²)	ტემპერატურა (°C)
მერკური	57	9228	780
ვენერა	108	2586	482
დედამიწა	150	1353	15
მარსი	227	586	-63
იუპიტერი	778	50	-121
სატურნი	1426	15	-180
ნეპტუნი	4497	2	-200
პლუტონი ²⁷ .	5806	1	-230

ამოცანა 40.1. 2სმ კედლის სისქის მჭიდროდ დახურულ სითბოიზოლირებულ 30სმX20სმ X50სმ ზომის პენოპლასტის ყუთში მოთავსებულია 20კგ 0°C-იანი ყინული. რა დროის შემდეგ გადნება ყინული, თუ ყუთის გარეთ ტემპერატურაა 27°C?

ამოხსნა: დნობის ტემპერატურის ყინულის გასადნობად საჭირო სითბო ტოლია:

$$\Delta Q = q_{\text{დნ}} m \quad (1)$$

მეორე მხრივ, ყინულის გასადნობად გარედან მიწოდებული საჭირო სითბოს რაოდენობა, (40.1)-ის თანახმად, ტოლი იქნება:

$$\Delta Q = \chi \frac{\Delta T}{d} S \Delta t \quad (2)$$

(1) და (2)-ის გატოლებით მივიღებთ:

²⁷ ამჟამად მიკუთვნებულია ასტეროიდთა ოჯახს

$$\Delta t = \frac{q_{\text{გ}} md}{\chi S \Delta T} = \frac{3,33 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{0,023 \cdot 2 \cdot 31 \cdot 10^{-2} \cdot 27} \approx 96 \text{ სთ.}$$

$$(\Delta T = 27 \text{ კელ}, S = 2(30 \cdot 20 + 20 \cdot 50 + 30 \cdot 50) 10^{-4} \text{ მ}^2.)$$

ამოცანა 40.2. თუ T_1 ტემპერატურის გარემოში მოათავსებულია სხეული, რომლის ტემპერატურა T_2 ოდნავ აღემატება T_1 -ს, მაშინ, ნიუტონის ფორმულის თანახმად,

სხეული ცივდება სიჩქარით $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k(T_2 - T_1)$ (k -მუდმივაა).

ვაჩვენოთ, რომ ეს დამოკიდებულება სამართლიანია გამოსხივებისთვისაც, თუ $\Delta T = T_2 - T_1$ მცირეა.

ამოხსნა: (40.4) გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha \sigma \left((T_1 + \Delta T)^4 - T_1^4 \right), \quad (1)$$

მოვახდინოთ $(T_1 + \Delta T)^4$ -ის გაშლა ნიუტონის ბინომის²⁸ საფუძველზე:

$$(T_1 + \Delta T)^4 = T_1^4 + 4T_1^3 \Delta T + \frac{4 \cdot 3}{2!} T_1^2 (\Delta T)^2 + \dots$$

რადგან ΔT მცირეა მისი მაღალი ხარისხები გაცილებით ნაკლებია ერთზე და შეგვიძლია უგულებელვყოთ, ამიტომ

$$(T_1 + \Delta T)^4 - T_1^4 = T_1^4 + 4T_1^3 \Delta T - T_1^4 = 4T_1^3 (T_2 - T_1)$$

მიღებული შედეგის (1)-ში გათვალისწინებით გვექნება:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = 4\alpha \sigma T_1^3 (T_2 - T_1) \quad (2)$$

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას $k = 4\alpha \sigma T_1^3$, (2) დაიყვანება ნიუტონის ფორმულაზე.

$$\begin{aligned} (a+b)^n &= a^n + na^{n-1}b + \frac{n(n-1)}{2!} a^{n-2}b^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} a^{n-3}b^3 + \\ &+ \frac{n(n-1)\dots(n-m+1)}{m!} a^{n-m}b^m + \dots + nab^{n-1} + b^n \end{aligned}$$

ამოცანა 40.3. 40სმ^2 ფართობის და $4,5 \cdot 10^{-4}$ კგ მასის ფირფიტა მზისკენ არის მიშვებული. მისი გამოსხივების უნარიანობა 0,85 ტოლია, ხოლო კუთრი

სითბოტევადობაა $0,8 \frac{\text{კკალ}}{\text{კგ} \cdot \text{კელ}}$. 1) რა სიჩქარით იზრდება

მისი ტემპერატურა? 2) გამოვთვალოთ ფირფიტის საბოლოო ტემპერატურა, გარემოს ტემპერატურაა 27°C .

ამოხსნა: 1). (14.1)-ის თანახმად ფირფიტის მიერ დროის ერთეულში შთანთქმული ენერგია იქნება:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{cm\Delta T}{\Delta t}. \text{ გავუტოლოთ (40.5)-ს, მივიღებთ:}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1000\alpha S \cos \varphi}{cm},$$

სადაც $\varphi=0^{\circ}$. რიცხვითი მნიშვნელობების გათვალისწინებით მიიღება ფირფიტის ტემპერატურის ზრდის სიჩქარე:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1000 \cdot 0,85 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{3,36 \cdot 10^3 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}} = 2,25 \frac{\text{კელ}}{\text{წმ}}.$$

2). ფირფიტის ტემპერატურა აღარ შეიცვლება როცა იგი გამოასხივებს ზუსტად იმდენ ენერგიას რასაც დებულობს მზისგან. (40.4)-ის და (40.5)-თან

გატოლებით გვექნება: $1000\alpha S \cos \varphi = \alpha \sigma (T_2^4 - T_1^4),$

საიდანაც
$$T_2^4 = T_1^4 + \frac{1000\alpha S \cos \varphi}{\alpha \sigma} = T_1^4 + \frac{1000 \cos \varphi}{\sigma}.$$

რიცხვითი მნიშვნელობების ჩასმით მივიღებთ, რომ

$$T_2^4 = 81 \cdot 10^8 + \frac{1000}{5,67 \cdot 10^{-8}} = 257 \cdot 10^8 \text{ კელ}^4 \quad \text{და} \quad T_2 = 400 \text{ კელ}$$

§41. აირთა სითბოგამტარობა

განვიხილოთ აირთა სითბოგამტარობა მოლეკულურ კინეტიკური თეორიის თვალსაზრისით. ცხელ უბანში მყოფ აირთა მოლეკულებს გააჩნია რა საშუალო კინეტიკური ენერგიის მაღალი მნიშვნელობა დაბალი ტემპერატურის უბანში შეღწევისას შეჯახების

შედგებად გადაცემს ენერგიის ნაწილს ამ უბნის მოლეკულებს. პირიქით, მოლეკულები დაბალი ტემპერატურის უბნიდან ხვდება რა უფრო ცხელ უბანში დებულობს გარკვეულ კინეტიკურ ენერგიას.

მსგავსად დიფუზიის მოვლენისა, x ღერძის მიმართულებით $x = -\lambda_{\text{საშ}}$ მანძილით დაშორებული მოლეკულების ის რაოდენობა, რომელიც Δt დროში გაივლის S ფართს ტოლია $\Delta N_2 = \frac{1}{6} n_2 S v_{2\text{საშ}} \Delta t$ (n2

კონცენტრაციაა $x = -\lambda_{\text{საშ}}$ სიბრტყეში). მათ მიერ გადატანილი სითბური ენერგია იქნება:

$$Q_2 = \Delta N_2 \cdot w_{\text{საშ}} = \frac{1}{6} n_2 S v_{2\text{საშ}} \Delta t \cdot \frac{i}{2} k T_2$$

ანალოგიურად მიიღება x ღერძის საპირისპიროდ $x = \lambda_{\text{საშ}}$ დაშორებულ მოლეკულათა მიერ S ფართში იმავე დროში გადატანილი სითბური ენერგია:

$$Q_1 = \Delta N_1 \cdot w_{\text{საშ}} = \frac{1}{6} n_1 S v_{1\text{საშ}} \Delta t \cdot \frac{i}{2} k T_1$$

რადგან ენერგიათა გადატანა ხდება ურთიერთსაპირისპირო მიმართულებით, ამიტომ S ფართში გადატანილი ჯამური სითბური ენერგია იქნება:

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \frac{1}{6} \frac{i}{2} k (n_2 v_{2\text{საშ}} T_2 - n_1 v_{1\text{საშ}} T_1) S \Delta t$$

უბნებს შორის ტემპერატურის მცირედ განსხვავებისას $n_2 v_{2\text{საშ}} \approx n_1 v_{1\text{საშ}} \approx n v_{\text{საშ}}$ რადგან $n \sim 1/T$, ხოლო $v_{\text{საშ}} \sim$

$T^{1/2}$; $n v_{\text{საშ}} \sim T^{-1/2}$ ანუ სუსტადაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე (იხ. ცხრილი 41.1). მაშინ ΔQ ასე ჩაიწერება:

$$\Delta Q = \frac{1}{6} \frac{i}{2} k n v_{\text{საშ}} (T_2 - T_1) S \Delta t \quad (41.1)$$

სადაც $T_2 - T_1$ ტოლია x ღერძის გასწვრივ სიგრძით ერთეულზე ტემპერატურის ცვლილების (ტემპერატურის გრადიენტის) ნამრავლისა ამ უბნებს შორის მანძილზე $2\lambda_{\text{საშ}}$:

$$(T_2 - T_1) = \left| \frac{\Delta T}{\Delta x} \right| 2\lambda_{\text{საშ}}$$

(41.1)-ში გათვალისწინებით ვღებულობთ სითბური ნაკადის შემდეგ ფორმულას:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\frac{1}{3} \frac{i}{2} knv_{\text{საშ}} \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \lambda_{\text{საშ}} S \quad (41.2)$$

„-“ განპირობებულია იმით რომ სითბოს გადაცემა ხდება ტემპერატურული გრადიენტის საპირისპიროდ.

(41.2)-ის (40.1)-თან გატოლებით მიიღება სითბოგამტარობის კოეფიციენტის ფორმულა:

$$\chi = \frac{1}{3} \frac{i}{2} knv_{\text{საშ}} \lambda_{\text{საშ}} \quad (41.3)$$

სიბლანტის კოეფიციენტის მსგავსად, §38-ში მოყვანილი მსჯელობის საფუძველზე, შეგვიძლია ვაჩვენოთ, რომ

➤ **აიროთა სითბოგამტარობის კოეფიციენტი წნევაზე არაა დამოკიდებული²⁹.**

χ -ს სიდიდე შეიძლება დავაკავშიროთ აირის მოლურ

სითბოტევადობასთან C_V . მართლაც $C_V = \frac{i}{2} R = \frac{i}{2} k N_A$,

რის გამოც (41.3) ასე ჩაიწერება:

$$\chi = \frac{1}{3} \frac{n}{N_A} v_{\text{საშ}} \lambda_{\text{საშ}} C_V \quad (41.4)$$

ეს უკანასკნელი ასეც შეიძლება გარდავქმნათ:

$$\chi = \frac{1}{3} \frac{\rho}{m_0 N_A} v_{\text{საშ}} \lambda_{\text{საშ}} C_V = \frac{1}{3} \frac{\rho}{M} v_{\text{საშ}} \lambda_{\text{საშ}} C_V = \frac{1}{3} \rho v_{\text{საშ}} \lambda_{\text{საშ}} c_V \quad (41.5)$$

($c_V = C_V / M$ კუთრი სითბოტევადობაა მუდმივი მოცულობის დროს).

ცხრილი 41.1.

აირები	ჯგ/მ.კელ	ჯგ/მ.კელ

²⁹ეს დამოკიდებულება შეინიშნება მხოლოდ ძალიან დაბალი წნევების შემთხვევაში.

	0°C	100°C
ჰაერი	0,024	0,032
ჰელიუმი	0,125	0,171
აზოტი	0,024	0,031
არგონი	0,016	0,021
წყალბადი	0,176	0,218
ჟანგბადი	0,025	0,033
ნახშირორჟანგი	0,014	0,022

დიფუზიის, სიბლანტის და სითბოგამტარობის კოეფიციენტების გამოსათვლელ ფორმულებში ((38.6) (39.4), (41.5)) ყველგან ფიგურირებს თავისუფალი განარბენი, ამიტომ ერთ-ერთი მათგანის ცდისეულად გაზომვის შემთხვევაში, შესაძლებელია $\lambda_{საშ}$ -ს გამოთვლა, ხოლო (37.2)-ის საშუალებით მოლეკულის ეფექტური დიამეტრის განსაზღვრა.

(41.5)-ის შეფარდებით (39.4)-თან ვღებულობთ:

$\chi/\eta = C_V$. იგი მიღებულია მოლეკულურ - კინეტიკურ თეორიაზე დაყრდნობით. რეალურად ეს ფარდობა მიახლოებითია, კერძოდ, ცდების შედეგებიდან გამომდინარე, ერთატომიანი აირის შემთხვევაში C_V უნდა გამრავლდეს 2,5-ზე, ხოლო ორატომიანი აირისთვის 1,9-ზე.

ამოცანა 41.1. ბალონში ჰელიუმის წნევა 10^6 პა-ს ტოლია, ტემპერატურა 0°C . გამოთვალეთ მოლეკულა თავისუფალი განარბენი.

ამოხსნა: (41.5)-ის თანახმად

$$\lambda_{საშ} = \frac{3M\chi}{\rho_{საშ} C_V} \quad (1)$$

გავითვალისწინოთ,

რომ

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \nu_{\text{საშ}} = 1,6 \sqrt{\frac{kT}{m_0}} = 1,6 \sqrt{\frac{kT}{M/N_A}} = 1,6 \sqrt{\frac{RT}{M}} \text{ და}$$

$$C_V = \frac{i}{2} R, \text{ მაშინ (1)-დან მივიღებთ:}$$

$$\lambda_{\text{საშ}} = \frac{6\chi}{1,6ip} \sqrt{\frac{TM}{R}} \quad \text{საიდანაც}$$

$$\lambda_{\text{საშ}} = \frac{6 \cdot 0,125}{1,6 \cdot 3 \cdot 10^6} \sqrt{\frac{273 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{8,31}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ მ.}$$

ა მ თ ც ა ნ ე ბ ი:

1. იპოვეთ ჟანგბადის მოლეკულების თავისუფალი განარბენის საშუალო სიგრძე 0,3პა წნევისა და 150K ტემპერატურის პირობებში. (პასუხი: $\approx 1,8\text{სმ}$)
2. რა წნევის დროს იქნება წყალბადის მოლეკულის თავისუფალი განარბენის საშუალო სიგრძე 0,5მ-ის ტოლი 400 K ტემპერატურის დროს? (პასუხი: $\approx 0,04\text{პა}$)
3. 10ლ მოცულობის ბალონში არის 1კ მასის წყალბადი. განსაზღვრეთ მოლეკულების თავისუფალი განარბენის საშუალო სიგრძე. (პასუხი: $\approx 1,2 \cdot 10^{-7}\text{მ}$)
4. განსაზღვრეთ გაიშვიათებული აზოტის სიმკვრივე, თუ მოლეკულების თავისუფალი განარბენია 2სმ. აზოტის მოლეკულის ეფექტური დიამეტრია $0,3 \cdot 10^{-9}\text{მ}$. (პასუხი: $5,14 \cdot 10^{-6}\text{კგ/მ}^3$)
5. განსაზღვრეთ 1წმ-ში დაჯახებათა საშუალო რიცხვი, რომელსაც განიცდის წყალბადის მოლეკულა ნორმალურ პირობებში. წყალბადის მოლეკულის ეფექტური დიამეტრია $0,25 \cdot 10^{-9}\text{მ}$. (პასუხი: $1,26 \cdot 10^{10}$)
6. 0,7მ სიგრძის წიბოს მქონე კუბის ფორმის ჭურჭლიდან ამოტუმბულია აზოტი $10^{-2}\text{მმ ვწყ. სვ.}$ -ის წნევამდე. შეაფასეთ რამდენჯერ ეჯახება მოლეკულა სხვა მოლეკულებს ორ მოპირდაპირე წახნაგს შორის გადაადგილებისას, თუ ჭურჭელში ტემპერატურაა 0°C .

აზოტის მოლეკულის ეფექტური დიამეტრია $0,3 \cdot 10^{-9}$ მ.
(პასუხი: ≈ 11)

7. წყალბადის ატომების თავისუფალი განარბენის სიგრძე ნორმალურ პირობებშია $2 \cdot 10^{-7}$ მ. განსაზღვრეთ მისი დიფუზიის კოეფიციენტი. (პასუხი: $1,13 \cdot 10^{-5}$ მ²/წმ)

8. 20°C ტემპერატურაზე ჟანგბადის დიფუზიის კოეფიციენტია $1,8 \cdot 10^{-5}$ მ²/წმ. განსაზღვრეთ ჟანგბადის მოლეკულების თავისუფალი განარბენის სიგრძე. (პასუხი: $1,2 \cdot 10^{-7}$ მ)

9. ერთნაირ პირობებში რომელი აირი დიფუნდირებს უფრო სწრაფად წყალბადი თუ ჟანგბადი? (პასუხი: ჟანგბადის დიფუზიური ნაკადი წყალბადის დიფუზიური ნაკადის 17,3%-ს შეადგენს)

10. 100გტ-იანი ელექტრული ნათურის მქკ 10%-ია. გამოთვალეთ ტემპერატურის სხვაობა ნათურის შიგა და გარე ზედაპირებს შორის, თუ იგი წარმოადგენს 3სმ რადიუსის მინის ბალონს, რომლის კედლის სისქე 1მმ-ია. (პასუხი: $9,5^{\circ}\text{C}$)

11. ოთახს ორი ფანჯარა აქვს ($1,7 \times 1,5$)მ. მინის სისქეა 3მმ. გამოთვალეთ სითბური დანაკარგები (სითბოს ნაკადი), თუ მინის შიგა და გარე ზედაპირებთან ტემპერატურაა 20°C და 18°C . (პასუხი: $-2,9$ კვტ)

12. სახლის შიგა მოცულობაა 450მ^3 , თბოიზოლირებული კედლების სისქე 25სმ -ია, საერთო ფართობია 150მ^2 , სითბოგამტარობა პენოპლასტის სითბოგამტარობის ტოლია. იატაკი და ჭერი 6სმ სისქის ხეა, საერთო ფართობით 300მ^2 . სახლს აქვს $0,6\text{სმ}$ სისქის 6 მინის ფანჯარა თითოეული 2მ^2 ფართობის. გამოთვალეთ სითბოს მიწოდების სიჩქარე, რათა სახლში შეინარჩუნოთ 20°C ტემპერატურა, თუ გარეთ -2°C ყინვაა. (პასუხი: 59 კვ/წმ)

13. რა რაოდენობის სითბოს მიწოდებაა საჭირო (იხ. ამოცანა14), სახლში ტემპერატურის 10°C -დან 20°C -მდე 30წთ -ში გასაზრდელად? ჰაერის სიმკვრივეა $1,29\text{კგ/მ}^3$, კუთრი სითბოტევადობაა $0,17\text{კკალ/კგ} \cdot ^{\circ}\text{C}$. (პასუხი: $110,3 \cdot 10^3$ კვ)

14. რა თანხა უნდა გადაიხადოთ ერთი თვის განმავლობაში, რომ სახლში (იხ. ამოცანა14) შეინარჩუნოთ აღწერილი მდგომარეობა, თუ გამათბობელი მუშაობს ბუნებრივ აირზე, რომლის წვის კუთრი სითბოა $4,2 \cdot 10^6$ ჯ/კგ და ერთი კგ საწვავის ღირებულებაა 10 თეთრი? გამათბობლის მქკ-ია 90%.

(პასუხი: ≈ 170 ლარი)

15. 1,5სმ კედლის სისქის მჭიდროდ დახურულ სითბოიზოლირებულ სფერული ფორმის (გარე რადიუსი 20სმ) პენოპლასტის ყუთში მოთავსებულია 10კგ -5°C -იანი ყინული. რა დროის შემდეგ გადნება ყინული, თუ ყუთის გარეთ ტემპერატურაა 17°C ? **(პასუხი: ≈ 73 სთ)**

16. აჩვენეთ იდეალური აირის დიფუზიის კოეფიციენტის დამოკიდებულება აბსოლუტურ ტემპერატურასა და მოლეკულის მასაზე. **(პასუხი: $\sim T^{3/2}$; $\sim m^{-1/2}$)**

17. 1სმ კედლის სისქის მჭიდროდ დახურულ თბოიზოლირებულ 20სმ სიგრძის წიბოს მქონე კუბის ფორმის პენოპლასტის ყუთში მოთავსებულია 10კგ -10°C -იანი ყინული. რა დროის შემდეგ გადნება ყინული, თუ ყუთის გარეთ ტემპერატურაა 27°C ? **(პასუხი: ≈ 75 სთ)**

18. 3სმ კედლის სისქის მჭიდროდ დახურულ თბოიზოლირებულ 40სმ დიამეტრის სფეროს ფორმის პენოპლასტის ყუთში მოთავსებულია 10კგ 0°C -იანი ყინული. რა დროის შემდეგ გადნება ყინული და მიღებული წყლის ტემპერატურა გაუტოლდება გარემოს ტემპერატურას, თუ იგი 20°C -ს ტოლია? **(პასუხი: ≈ 47 დღე-ღამე)**