

იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების შესწავლის გზები

(მეთოდური მასალა)

მაგდა მეცხვარიშვილი¹; იამზე კალანდაძე²; კახა გორგაძე³; მანანა ბერიძე⁴

¹საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა კანდიდატი, სსიპ ქ. თბილისის 21-ე საჯარო სკოლა; m.metskhvarishvili@gtu.ge, <https://orcid.org/0000-0002-1318-529X>

²სსიპ ქ. თბილისის 21-ე საჯარო სკოლა; ²საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, პედაგოგიკის მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი, i.kalandadze@gtu.ge

³საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ფიზიკის მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი, k.gorgadze@gtu.ge

⁴საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სსიპ ქ. თბილისის 35-ე საჯარო სკოლა, ფიზიკის მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი, m.beridze@gtu.ge

აბსტრაქტი

სტატიაში წარმოდგენილია მენდელეევ-კლავირონის განტოლების მიღების ხერხები. თერმოდინამიკა მაკროსისტემას განიხილავს როგორც მთლიანს და აღწერს მის თვისებებს არა ნივთიერების მიკროსტრუქტურის საფუძველზე, არამედ ექსპერიმენტზე დაყრდნობით ამყარებს კავშირს ნივთიერების მაკროსკოპულ პარამეტრებს შორის. ეს მეთოდი გამოირჩევა სიმარტივით, მაგრამ მას აქვს ნაკლი, რომელიც იმაში მდგომარეობს, რომ მოვლენათა თერმოდინამიკურ განხილვაში არ ხდება მისი შინაგანი მექანიზმის ახსნა. მაგალითად, ექსპერიმენტულად შეიძლება მივიღოთ კავშირი იდეალური აირის წნევასა და მოცულობას შორის მუდმივი ტემპერატურის დროს $pV = const$, მაგრამ თუ რატომ არის ეს ასე, ამის ახსნა შეიძლება მხოლოდ მოლეკულური ფიზიკის მეთოდებით.

საკვანძო სიტყვები: იდეალური აირი, წნევა, მოცულობა, ტემპერატურა.

აირები ადვილად იკუმშება და ფართოვდება. ამის დასადასტურებლად შევადართო ცხრილში წარმოდგენილი ზოგიერთი მყარი, თხევადი და აირადი ნივთიერებების თერმული გაფართოება [1]. აირებს აქვთ გაფართოების ყველაზე დიდი კოეფიციენტი. ეს იმას ნიშნავს, რომ ტემპერატურის ცვლილებით აირები ადვილად იკუმშებიან და ფართოვდებიან. აირების უმეტესობა ერთიდაიგივე სიჩქარით ფართოვდება ან აქვთ ერთნაირი β . ჩნდება კითხვა: რატომ იქცევიან აირები ერთნაირად, მაშინ, როდესაც სითხეებს და მყარ სხეულებს აქვთ ერთმანეთისგან შესამჩნევად განსხვავებული გაფართოების სიჩქარე. ამის მიზეზი აირის ატომებს და მოლეკულებს შორის დიდი მანძილია, რის გამოც მათ შორის ურთიერთქმედების ძალა შესაძლებელია უგულებელვყოთ, გარდა იმ შემთხვევისა, როდესაც ისინი ერთმანეთს ეჯახებიან. აირის ატომები და მოლეკულები ძალიან სწრაფად მოძრაობენ და გაფართოება დიდი სიჩქარით მიმდინარეობს, ამიტომ ისინი იკავებენ არსებულ მოცულობას სრულად. ამის საპირისპიროდ სითხეებსა და მყარ სხეულებში ატომები და მოლეკულები ერთმანეთთან მჭიდროდ არიან განლაგებულები და მათ შორის მიზიდულობის ძალებიც საგრძნობლად დიდია. მყარ მდგომარეობაში ნივთიერება ინარჩუნებს ზომას და ფორმას, რადგან მისი შემადგენელი ნაწილაკები მკაცრად განსაზღვრულ ადგილებზეა განლაგებულნი, ისინი ირხევიან წონასწორობის მახლობლად და იშვიათ შემთხვევაში ტოვებენ ამ მდგომარეობას. თხევად მდგომარეობაში მყოფი ნივთიერება ფორმას ვერ ინარჩუნებს, მაგრამ ინარჩუნებს მოცულობას - სითხეები პრაქტიკულად უკუმშვადია. სითხეში მოლეკულა თავისუფლად ვერ გადაადგილდება. ის მეზობელი მოლეკულების მიზიდულობით ერთ ადილას არის „ჩაჭერილი“ და ამ მდებარეობის მახლობლად ირხევა. თუმცა, სითხის ატომს შეუძლია დატოვოს საკუთარი ადგილმდებარეობა და სხვა მდებარეობაში გადახტეს (მის ადგილს სხვა ატომი დაიკავებს), სადაც ის კვლავ მეზობელი ატომების გარემოცვაში აღმოჩნდება. თუ სითხე უძრავია გადახტომა ყველა მიმართულებით ერთნაირი სიხშირით მიმდინარეობს. გადახტომათა რიცხვი 1 წმ-ში დაახლოებით 10^{12} -ია. თუ სითხეზე გარე ძალები მოქმედებენ, მაშინ გადახტომა უპირატესად მისი მოქმედების მიმართულებით ხდება, რაც გავლენას თითქმის არ ახდენს გადახტომათა რიცხვზე. ამ გადახტომების გამო სითხეს ახასიათებს დენადობა და ის ვერ ინარჩუნებს ფორმას და იღებს იმ ჭურჭლის ფორმას, რომელშიცაა მოთავსებული [2].

აირი ადვილად კუმშვადია, ღებულობს ჭურჭლის ფორმას - სრულად ავსებს ჭურჭლის მოცულობას. აირზე შესრულებული ნებისმიერი ზემოქმედება მკაფიოდ დაიმზირება და ადვილად შეისწავლება. აირი იდეალურია მდგომარეობის ცვლილების შესასწავლად. სწავლის პროცესი გაადვილდება თუ შევისწავლით ჯერ იდეალურ აირს, ხოლო შემდეგ რეალური აირის მდგომარეობას.

ნივთიერება	წირითი გაფართოების კოეფიციენტი α (1/°C) $\times 10^{-6}$	მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი β (1/°C) $\times 10^{-6}$
მყარი ნივთიერება		
ალუმინი	25	75
თითბერი	19	56
სპილენძი	17	51
ოქრო	14	42
რკინა ან ფოლადი	12	35
ინვარი (ნიკელის და რკინის შენადნობი)	0.9	2.7
ტყვია	29	87
ვერცხლი	18	54
შუშა (ჩვეულებრივი)	9	27
შუშა (Pyrex)	3	9
კვარცი	0.4	1
ბეტონი, აგური	~12	~36
მარმარილო (საშუალო)	2.5	7.5
სითხეები		
ეთერი		1650
ეთილის სპირტი		1100
ბენზინი		950
გლიცერინი		500
ვერცხლისწყალი		180
წყალი		210
აირები		
ჰაერი და სხვა აირების უმეტესობა ატმოსფერულ წნევაზე		3400

აირის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები მეტად მცირეა. ასევე შეიძლება ითქვას, რომ მოლეკულის მოცულობა საერთო მოცულობასთან (რომელიც განისაზღვრება იმ ჭურჭლის მოცულობით, რომელშიც იმყოფება აირი) შედარებით ძალზე მცირეა. იდეალურ აირს უახლოვდება ინერტული აირები (ჰელიუმი, არგონი, ნეონი და სხვ.) დაბალი წნევის პირობებში. აირს, რომლის მოლეკულების საკუთარი მოცულობა და ურთიერთქმედების ძალები უგულებელყოფილია (გარდა იმ შემთხვევისა, როდესაც მოლეკულები ერთმანეთს ეჯახება და მათ შორის განზიდვის ძალები აღიძვრება) იდეალური აირი ეწოდება. აირი მით უფრო ახლოსაა იდეალურთან, რაც უფრო გაიშვიათებულია ის [3].

ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც ახასიათებს სისტემის მდგომარეობას პარამეტრი ეწოდება. აირი ხასიათდება ერთი მექანიკური (მასა m) და სამი თერმოდინამიკული პარამეტრით, ესენია: P წნევა, V მოცულობა, T ტემპერატურა. ამ პარამეტრებს შორის კავშირი მენდელეევ-კლაპეირონის ფორმულით (1) მყარდება და იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება ეწოდება.

$$\frac{PV}{T} = const, \quad \text{თუ } m = const \quad (1)$$

შესაძლებელია ამ განტოლების ორი, ერთმანეთისგან მკვეთრად განსხვავებული და საერთოს არ მქონე გზით მიღება, ხოლო სუფთა ექსპერიმენტული ვითარება მეტად არწმუნებს მკითხველს მის ჭეშმარიტებაში [4].

განვიხილოთ მენდელეევ-კლაპეირონის განტოლების მიღების პირველი მეთოდი, რომელსაც დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს. აირისათვის P წნევა ასე ვთქვათ ყველაზე პირადი პარამეტრია, დანარჩენ ორს T ტემპერატურას და V მოცულობას ჩვენ ვმართავთ. ვათბობთ იმ ტემპერატურამდე, რომელიც ჩვენ გვსურს, კვუმშავთ იმ მოცულობამდე, რომელშიც გვსურს მისი მოთავსება. ხოლო, აირის წნევა განისაზღვრება მისი მოლეკულების ჭურჭლის კედლებთან შეჯახებათა რიცხვით:

$$p = nkT \quad (2)$$

n მოლეკულების კონცენტრაციაა, k – ბოლცმანის მუდმივაა.

ეს ფორმულა მკაფიოდ გვიჩვენებს, რომ აირის წნევა აირის მოლეკულების კონცენტრაციისა და ტემპერატურის ფუნქციაა, მაგრამ, პრაქტიკული თვალსაზრისით, ის აბსოლუტურად გამოუსადეგარია. ვერ შევძლებთ ვერც წნევის და ვერც ტემპერატურის განსაზღვრას, რადგან მასში შედის მოლეკულების კონცენტრაცია, რომლის განსაზღვრაც შეუძლებელია ლაბორატორიულ პირობებში.

კონცენტრაცია გამოვსახოთ აირის მოლეკულების N საერთო რიცხვის ფარდობით მის მიერ დაკავებულ V მოცულობასთან

$$n = \frac{N}{V} \quad (3)$$

თუმცა აქაც არ გვაქვს დიდი შეღავათი, რადგან არც N -ის განსაზღვრაა შესაძლებელი. ერთმანეთს გავუტოლოთ ν ნივთიერების რაოდენობის გამომსახველი ორი ფორმულა:

$$\nu = \frac{m}{M} \quad \text{და} \quad \nu = \frac{N}{N_A}$$

სადაც, m და M შესაბამისად არის აირის მასა და მოლური მასა, ხოლო N_A - ავოგადროს რიცხვი. განვსაზღვროთ N .

$$\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}, \quad N = N_A \frac{m}{M}$$

ჩავსვათ (3)-ში მივიღებთ:

$$n = N_A \frac{m}{MV}$$

მიღებული გამოსახულება ჩავსვათ (2)-ში:

$$p = N_A \frac{mkT}{MV}$$

გავითვალისწინოთ, რომ $N_A k = R = 8.31$ არის აირის უნივერსალური მუდმივა, მივიღებთ მენდელეევი-კლაპეირონის განტოლებას:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT \quad (4)$$

ეს განტოლება აღწერს იდეალური აირის ერთ მდგომარეობას განსაზღვრული მასის, წნევის, მოცულობის და ტემპერატურის პირობებში.

აქ სანტერესო და პრაქტიკულად გამოსაყენებელია თერმოდინამიკულ პარამეტრებს შორის კავშირის დამყარება აირის ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას მუდმივი მასის პირობებში:

პირველი მდგომარეობა:

$$p_1 V_1 = \frac{m}{M} R T_1$$

მეორე მდგომარეობა:

$$p_2 V_2 = \frac{m}{M} R T_2$$

გავყოთ ეს განტოლებები ერთმანეთზე, მივიღებთ:

$$\frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

ან

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

ანუ

$$\frac{pV}{T} = const \quad (5)$$

ეს განტოლება ამ სახით მიიღო კლაპეირონი.

იგივე განტოლება გამოვიყვანოთ მეორე გზით კლაპეირონის მიერ ჩატარებული ცდის მიხედვით. ცდისეულად სამივე პარამეტრის ერთდროული ცვლილება შეუძლებელი აღმოჩნდა და კლაპეირონი იძულებული გახდა აირის ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადაყვანა განეხორციელებინა შუალედური მდგომარეობის გამოყენებით. ამას დასჭირდა ორი იზოპროცესის გამოყენება. ჯერ აირი გადაიყვანა შუალედურ მდგომარეობაში მუდმივი წნევის პირობებში (იზობარული პროცესი), ამასთან, აირი მან გააცხელა საბოლოო ტემპერატურამდე.

ამგვარად, შუალედურ მდგომარეობაში აირს გააჩნია საწყისი p_1 წნევა, საბოლოო T_2 ტემპერატურა და რაღაც შუალედური V' მოცულობა. ეს გადასვლა აღიწერება განტოლებით:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V'}{T_2} \quad (p = const). \quad (6)$$

შუალედურიდან საბოლოო მდგომარეობაში აირი კლაპეირონმა გადაიყვანა იზოთერმული პროცესით, მუდმივი ტემპერატურის პირობებში (რადგან აირი უკვე საბოლოო ტემპერატურამდე იყო გაცხელებული)

$$p_1 V' = p_2 V_2, \quad (T = const). \quad (7)$$

(6)-დან გამოვსახოთ V' და ჩავსვათ (7)-ში

$$p_1 \frac{V_1 T_2}{T_1} = p_2 V_2,$$

საიდანაც საბოლოოდ მივიღებთ:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

მივიღეთ (5) განტოლება.

კლაპეირონის განტოლების მიღება სქემატურად ასე შეიძლება გამოვსახოთ:

მენდელეევი (5) განტოლება გამოსახა ნივთიერების რაოდენობით, როგორც ეს (4)-შია ნაჩვენები.

$$p_1, V_1, T_1 \xrightarrow{p=const} p_1, V', T_2 \xrightarrow{T=const} p_2, V_2, T_2$$

დიდმა ჰოლანდიელმა მეცნიერმა ვან-დერ-ვაალსმა განავრცო კლაპეირონის და მენდელეევის განტოლება რეალურ აირებზე და შეიტანა ორი უმნიშვნელოვანესი შესწორება.

რეალური აირი კლაპეირონის განტოლებას ექვემდებარება მხოლოდ მისი სიმკვრივის ძალიან მცირე მნიშვნელობების დროს. სიმკვრივის მატებით მისი ქცევა მკვეთრად იცვლება. მაღალ წნევაზე აირის მოლეკულების საერთო მოცულობა უკვე მნიშვნელოვანი ხდება და მისი უგულებელყოფა აღარ შეიძლება. გარდა ამისა, მაღალ წნევაზე მოლეკულები უახლოვდებიან ერთმანეთს და მათ შორის ურთიერთქმედება აღარ არის უმნიშვნელო.

შესწორება წნევაზე: აირის მოლეკულა აირის სიღრმეში განიცდის ყოველმხრივ მიზიდვას სხვა მოლეკულებისაგან და მასზე მოქმედი ძალთა ტოლქმედი ნულის ტოლია. ჭურჭლის კედლებთან ახლოს მყოფ მოლეკულაზე მოქმედებს აირისკენ მიმართული მიზიდვის ტოლქმედი ძალა. ამის გამო, განსაზღვრული წნევა არსებულ წნევაზე ნაკლები იქნება. შესწორება წნევაზე p^* დამოკიდებულია მოლეკულების კედელთან შეჯახების რიცხვზე და მოლეკულების კონცენტრაციაზე - ანუ, ზოგადად მის სიმკვრივეზე. $p^* = a/V^2$, a - მუდმივაა, V - აირის მოცულობა.

მაშასადამე ჭეშმარიტი წნევა იქნება

$$p + p^* = p + a/V^2,$$

სადაც p განსაზღვრული წნევაა.

შესწორება მოცულობაზე: ის გარემოება, რომ მოლეკულებს სასრული ზომა გააჩნია, მიუთითებს იმაზე, რომ მოლეკულების სამოდრაო სივრცე ნაკლებია, ვიდრე ჭურჭლის

მოცულობა. მოლეკულას გააჩნია ზემოქმედების სივრცე მის გარშემო და ამის გამო შესწორება მოცულობაზე b უნდა იყოს მოლეკულების საერთო მოცულობაზე დაახლოებით 4-ჯერ მეტი.

მაშასადამე აირის ჭეშმარიტი მოცულობა იქნება

$$V - b$$

რეალური აირის მდგომარეობის განტოლება - ვან-დერ-ვაალსის განტოლება ასეთი სახით ჩაიწერება:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = \frac{m}{M}RT.$$

ლიტერატურა:

1. <https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/13-2-thermal-expansion-of-solids-and-liquids/>
2. ქ. ტატიშვილი. ფიზიკა. მე-11 კლასი. მოსწავლის წიგნი. გამომცემლობა დიოგენე. 2012, 191 გვ.
3. თ. ბჟალავა, თ. ფალავა, მ. მეცხვარიშვილი. ზოგადი ფიზიკის მოკლე კურსი. საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. 2016, 142 გვ.
4. ა. გიგინეიშვილი, გ. კუკულაძე. ზოგადი ფიზიკა. I ტომი. საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. 2011, 372 გვ.

Ways of learning of ideal gas state equation (methodological material)

Magda Metskhvarishvili¹; Iamze kalandadze²; Kakha Gorgadze³; Manana Beridze⁴

¹Georgian Technical University, PhD, Candidate of Physical and Mathematical Sciences.

<https://orcid.org/0000-0002-1318-529X>

²Georgian Technical University, PhD, Pedagogical Sciences

³Georgian Technical University PhD, Science of Physics

⁴Georgian Technical University PhD, Science of Physics

Abstract

The article presents methods of obtaining the Mendeleev-Clapeyron equation. Thermodynamics considers the macrosystem as a whole and describes its properties not on the basis of the microstructure of the substance, but on the basis of the experiment establishes a connection between the macroscopic parameters of the substance. This method is distinguished by its simplicity, but it has a drawback, which is that its internal mechanism is not explained in the thermodynamic discussion of events. For example, one can experimentally obtain a relationship between the pressure and volume of an ideal gas at constant temperature $pV=\text{const}$, but why this is so can only be explained by the methods of molecular physics.

Key words: ideal gas, pressure, volume, temperature.