

ავთანდილ შურღაია

ფიზიკა ამოცანებში (გაგრძელება)

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია

სითხის აორთქლება: ნახევარსფეროს ფორმის R რადიუსის მქონე ჭურჭელი პირამდე სავსეა სითხით, რომლის სიმკვრივეა ρ . რამდენი დრო დასჭირდება ამ სითხის მთლიანად აორთქლებას, თუ ზედაპირის ფართობის ერთეულიდან ერთ წამში ამოფრქვეული მოლეკულების რიცხვი მოცემულ ტემპერატურაზე არის n , ხოლო სითხის მოლური მასა - μ ?

აორთქლების პროცესში ჭურჭლის ფორმიდან გამომდინარე ვასკვნით, რომ სითხის ზედაპირის ფართობი დროის მიხედვით მცირდება. იმისთვის, რომ გავიგოთ სითხის მთლიანად აორთქლების დრო, საჭიროა ვიცოდეთ სიჩქარე, რომლითაც მცირდება ზედაპირის ფართობი. განვიხილოთ სითხის ძალიან თხელი ფენა, რომლის სისქეა d , ხოლო ზედაპირის ფართობი - S . მაშინ ამ ფენიდან t დროში ამოფრქვეული მოლეკულების რიცხვი N იქნება

$$N = nSt,$$

ხოლო აორთქლებული სითხის მასა

$$\Delta m = \frac{N}{N_A} \mu = \frac{nSt}{N_A} \mu.$$

სითხის ფენის სისქე ტოლია

$$d = \frac{\Delta V}{S} = \frac{\Delta m}{\rho S} = \frac{nt}{\rho N_A} \mu.$$

სითხის ზედაპირის შემცირების სიჩქარე ტოლი იქნება სიჩქარის, რომლითაც მოლეკულა გაივლის სითხის მოცემულ ფენას და იგი ტოლია

$$v = \frac{n\mu}{\rho N_A}.$$

როგორც ვხედავთ, ეს სიჩქარე დამოკიდებულია სითხის მახასიათებლებზე, რომლებიც მოცემული სითხისთვის მუდმივია და, მაშასადამე, მიღებული სიჩქარეც მუდმივი სიდიდეა. ამიტომ, რადგან სითხის მთლიანად აორთქლებისას მოლეკულა გაივლის ნახევარსფეროს რადიუსის ტოლ მანძილს, აორთქლების დრო ტოლია

$$\tau = \frac{R}{v} = \frac{R\rho N_A}{n\mu}.$$

მოლეკულის საშუალო განარბენი: შეაფასეთ მოლეკულის თავისუფალი განარბენის საშუალო სიგრძე (ორ მომდევნო დაჯახებას შორის მანძილი) ნორმალურ პირობებში ($p = 10^5$ პა, $T = 273K$). განსაზღვრეთ აგრეთვე დროის შუალედი მოლეკულის ორ მომდევნო დაჯახებას შორის. მოლეკულის დიამეტრი $d = 3 \cdot 10^{-10}$ მ.

მოლეკულები იმყოფებიან მუდმივ ქაოსურ მოძრაობაში, რომლის დროსაც ისინი განუწყვეტლივ ეჯახებიან ერთმანეთს. თუ მოლეკულის სითბური მოძრაობის საშუალო სიჩქარეა v , ხოლო მოლეკულის თავისუფალი განარბენის საშუალო სიგრძე - λ , მაშინ ეს უკანასკნელი შეიძლება ასე გამოვთვალოთ:

$$\lambda = \frac{vt}{N}, \quad (1)$$

სადაც N არის მოლეკულების დაჯახებათა რიცხვი (მოლეკულების ის რაოდენობა, რომელსაც ეჯახება რომელიმე ერთი მოლეკულა) t დროში. მოლეკულების ამ რაოდენობის შესაფასებლად წარმოვიდგინოთ ცილინდრი, რომლის განივკვეთის რადიუსი ორჯერ მეტია მოლეკულის d დიამეტრზე. ამიტომ დაჯახება მოხდება მხოლოდ იმ მოლეკულებთან, რომელთა ცენტრები ცილინდრის შიგნით არის. ცილინდრის სიმაღლედ ავიღოთ მოლეკულის მიერ t დროში გავლილი მანძილი. აქ უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ცილინდრში მოლეკულები მოძრაობენ ყველა მიმართულებით, ამიტომ ცილინდრის სიმაღლედ ავიღოთ მოლეკულის მიერ მოძრაობის ფარდობითი სიჩქარით $v_{\text{ფ}}$ გავლილი მანძილი. ასეთი ცილინდრის მოცულობა იქნება $\pi d^2 v_{\text{ფ}} t$, ხოლო ცილინდრში მოლეკულების რაოდენობა $N = \pi d^2 v_{\text{ფ}} t n$ (აქ n არის მოლეკულების კონცენტრაცია). თუ N -ის ამ მნიშვნელობას ჩავსვამთ (1) ფორმულაში, განარბენის საშუალო სიგრძისთვის მივიღებთ

$$\lambda = \frac{v}{\pi d^2 v_{\text{ფ}} n}.$$

ფარდობითი მოძრაობის საშუალო სიჩქარე შეიძლება გამოანგარიშებულ იქნეს შემთხვევითი სიდიდეების შეკრების წესის გამოყენებით (მოლეკულის მოძრაობის სიჩქარე მათემატიკურად შემთხვევითი სიდიდეა). ამ წესის მიხედვით,

$$v_{\text{ფ}} = \sqrt{v^2 + v^2} = \sqrt{2}v.$$

ამრიგად,

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}.$$

მოლეკულების კონცენტრაცია გამოვსახოთ იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების $p = nkT$ გამოყენებით აირის წნევითა და ტემპერატურით. მივიღებთ:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi d^2 P}}$$

როგორც ვხედავთ, მოცემული ტემპერატურისთვის განარბენის საშუალო სიგრძე წნევის უკუპროპორციულია. რიცხვითი მნიშვნელობების ჩასმით მივიღებთ:

$$\lambda = 9 \cdot 10^{-8} \text{მ.}$$

მოლეკულების ორ მომდევნო დაჯახებას შორის დროის შუალედი ტოლი იქნება

$$\tau = \frac{\lambda}{v},$$

სადაც, მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლების თანახმად,

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

მოლეკულის მასა m გამოვსახოთ მოლური მასით: $m = \mu/N_A$. საძიებელი დროის შუალედისთვის საბოლოოდ მივიღებთ:

$$\tau = \lambda \sqrt{\frac{\mu}{3kTN_A}} = 1.4 \cdot 10^{-10} \text{წმ.}$$

ნივთიერების რაოდენობა: დახურულ ჭურჭელში მოთავსებულია m მასის ოზონი O_3 . გარკვეული ხნის შემდეგ მისი 25% გარდაიქმნა მოლეკულურ მდგომარეობაში მყოფ ჟანგბადად. დაადგინეთ, როგორ შეიცვალა ნივთიერების რაოდენობა დროის ამ მომენტისთვის.

ოზონის გარდაქმნისას ჭურჭელში მოთავსებული აირის მასა არ იცვლება, მაგრამ შეიცვლება ნივთიერების მოლური მასა. ოზონის გარდაქმნა მოლეკულურ ჟანგბადად მიმდინარეობს შემდეგი კანონზომიერებით: $2O_3 = 3O_2$, რაც მოასწავებს იმას, რომ ჟანგბადად გარდაქმნილი ოზონის მოლური მასა 1.5-ჯერ შემცირდა. აღვნიშნოთ ოზონისა და მოლეკულური ჟანგბადის მოლური მასები M_1 -ით და M_2 -ით, ხოლო ნივთიერების რაოდენობა ოზონის გარდაქმნამდე და გარდაქმნის შემდეგ - ν_1 -ით და ν_2 -ით. მაშინ ნივთიერების რაოდენობის ცვლილება ჭურჭელში ტოლი იქნება

$$k = \frac{\nu_2}{\nu_1},$$

რომელშიც, ნივთიერების რაოდენობის განმარტებისა და ამოცანის პირობის თანახმად,

$$v_1 = \frac{m}{M_1}, v_2 = \frac{0.75m}{M_1} + \frac{0.25m}{M_2}.$$

თუ ჩავსვამთ ამ გამოსახულებებს k ფორმულაში, მივიღებთ:

$$k = \frac{0.75M_2 + 0.25M_1}{M_2} = \frac{0.75M_2 + 0.25 \cdot 1.5M_2}{M_2} = 1.125.$$

ამრიგად ნივთიერების რაოდენობა ჭურჭელში გაიზარდა 1.125-ჯერ.

აირის წნევის ცვლილება ჭურჭელში: ჭურჭელში მოთავსებულია აზოტი, რომლის ტემპერატურაა $T = 300\text{K}$. როგორ შეიცვლება წნევა ჭურჭელში, თუ აირს გავაცხელებთ $T = 900\text{K}$ -მდე და აზოტის მოლეკულების $\gamma = 30\%$ დისოცირდება ატომებად?

თუ აზოტის მოლეკულების დისოციაციამდე მოლეკულების რაოდენობას აღვნიშნავთ N_1 -ით, მაშინ დისოციაციის შემდეგ მოლეკულებისა და ატომების რიცხვი $N_2 = N_1 - \gamma N_1 + 2\gamma N_1 = N_1 + \gamma N_1$. აღვნიშნოთ კონცენტრაცია დისოციაციამდე და დისოციაციის შემდეგ შესაბამისად n_1 -ით და n_2 -ით. მაშინ ჭურჭელში წნევის ცვლილება შეიძლება გამოვსახოთ ფორმულით:

$$k = \frac{p_2}{p_1} = \frac{n_2 T_2}{n_1 T_1} = 3 \frac{N_1 + \gamma N_1}{N_1} = 3.9.$$

ამრიგად, წნევა ჭურჭელში გაიზარდება 3.9-ჯერ.

აირების ნარევის სიმკვრივე: დახურულ ჭურჭელში მოთავსებულია ჰელიუმისა და აზოტის ნარევი ნორმალურ პირობებში ($p = 10^5 \text{პა}$, $T = 273\text{K}$). იპოვეთ ნარევის სიმკვრივე, თუ ჰელიუმი აწარმოებს ორჯერ მეტ პარციალურ წნევას, ვიდრე აზოტი. ჰელიუმის მოლური მასაა $\mu_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{კგ მოლ}^{-1}$, ხოლო აზოტისა - $\mu_2 = 28 \cdot 10^{-3} \text{კგ მოლ}^{-1}$.

თუ ჰელიუმისა და აზოტის მასებს აღვნიშნავთ შესაბამისად m_1 -ით და m_2 -ით, ხოლო ჭურჭლის მოცულობას - V -თი, ნარევის სიმკვრივე იქნება

$$\rho = \frac{m_1 + m_2}{V}.$$

მასები გამოვსახოთ მოლური მასებით:

$$m_i = \frac{N_i}{N_A} \mu_i, i = 1, 2.$$

მაშინ

$$\rho = \frac{n_1\mu_1 + n_2\mu_2}{N_A}$$

აქ $n_i, i = 1, 2$ ჰელიუმისა და აზოტის კონცენტრაციებია შესაბამისად. პირობის თანახმად, ჰელიუმის მიერ წარმოებული პარციალური წნევა ორჯერ აღემატება აზოტის მიერ წარმოებულს, ეს კი ნიშნავს, რომ $n_1 = 2n_2 = 2n/3$, სადაც n არის ნარევის კონცენტრაცია. მაშასადამე

$$\rho = \frac{\mu_1 + 2\mu_2}{3N_A} n = \frac{(2\mu_1 + \mu_2)p}{3N_A kT} = 529 \text{ კგ მ}^{-3}.$$

აირების ნარევის წნევა და მოლური მასა: დახურულ ჭურჭელში, რომლის მოცულობაა $V = 2\text{მ}^3$, მოთავსებულია $m_1 = 32$ კგ ჟანგბადისა და $m_2 = 28$ კგ აზოტის ნარევი $T = 300\text{K}$ ტემპერატურაზე. იპოვეთ ნარევის წნევა P და მოლური მასა μ .

აღვნიშნოთ ნივთიერების რაოდენობა (მოლელების რაოდენობა) ν -თი. მაშინ შეიძლება დავწეროთ

$$\nu = \nu_1 + \nu_2.$$

რადგან $\nu = m/\mu$, მივიღებთ:

$$\frac{m}{\mu} = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}.$$

საიდანაც ნარევის მოლური მასისთვის მივიღებთ $\mu = 30 \cdot 10^{-3} \text{კგ მოლ}^{-1}$. რაც შეეხება წნევას, მისთვის ვიყენებთ ფორმულას

$$P = nkT = \frac{m}{V\mu} N_A kT = 2.5 \cdot 10^6 \text{პა}.$$

ატმოსფეროში წყალბადის შემცველობა: ცნობილია, რომ დედამიწის ატმოსფეროს 78% აზოტია, 21% - ჟანგბადი და 1% - სხვა აირები. ამ უკანასკნელთა შორის არის წყალბადი. ახსენით წყალბადის მაგალითზე მისი ასეთი დაბალი შემცველობის მიზეზი. ახსენით, რატომ არ აქვს მთვარეს ატმოსფერო.

აირის მოლეკულების მოძრაობის საშუალო სიჩქარე, როგორც ვიცით, დამოკიდებულია აირის ტემპერატურაზე და გამოისახება შემდეგი ფორმულით:

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

ჩავთვალოთ, რომ აირები ატმოსფეროში თერმოდინამიკურ წონასწორობაშია. მაშინ მისი შემადგენელი მოლეკულების სიჩქარე შეიძლება შევაფასოთ ზემოთ მოყვანილი ფორმულით. თუ გამოვსახავთ აირის მოლეკულის მასას მისი მოლური მასით $m_0 = \mu/N_A$, მაშინ

$$v = \sqrt{\frac{3kN_A T}{\mu}}.$$

გამოვთვალოთ საშუალო სიჩქარეები აზოტის ($\mu = 28 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ), ჟანგბადის ($\mu = 32 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ) და წყალბადის ($\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლ) მოლეკულებისთვის ნორმალურ პირობებში ($T = 273$ K). მივიღებთ სიჩქარეების შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$v_N \approx 493 \text{ მ/წმ}, v_{O_2} \approx 461 \text{ მ/წმ}, v_{H_2} \approx 1845 \text{ მ/წმ}.$$

წყალბადის მოლეკულების სიჩქარე ერთნაირ პირობებში თითქმის ოთხჯერ მეტია, ვიდრე აზოტისა და ჟანგბადის მოლეკულებისა. თერმოდინამიკური წონასწორობა იმას არ ნიშნავს, რომ ყველა მოლეკულა ერთნაირი საშუალო სიჩქარით მოძრაობს - მოლეკულების ნაწილის სიჩქარე საგრძნობლად მეტია. სიჩქარეების მიღებული მნიშვნელობებიდან ვასკვნით, რომ წყალბადის მოლეკულების სიჩქარე ბევრად მეტი ალბათობით შეიძლება მიუახლოვდეს მეორე კოსმოსურ სიჩქარეს (დედამიწაზე ის ტოლია მიახლოებით 11.2 კმ/წმ-ისა). ამიტომ წყალბადის მოლეკულებს დიდი ალბათობით შეუძლიათ ატმოსფეროს „დატოვება“.

მთვარეზე მეორე კოსმოსური სიჩქარე დაახლოებით 2.4 კმ/წმ-ის ტოლია, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ნებისმიერი აირის მოლეკულებს შეუძლიათ, დიდი ალბათობით დაძლიონ მთვარის მიზიდულობა. ამიტომაც მთვარეს ატმოსფერო არ გააჩნია.