

Явления на пренос – дифузия, вътрешно триене, топлопроводност

Досега разглеждахме основно равновесни процеси, които се извършват в еднородна среда. В много случаи е важно да разберем процесите, които протичат в нееднородна среда, за да си изясним същността на наблюдаваните около нас реални явления. Всички процеси в нееднородна среда протичат до изравняване на характеристиките, пораждащи нееднородност (ако не поддържа тази нееднородност с външна намеса), т.е. до достигане на равновесно състояние на системата. Нееднородности могат да възникнат поради разлики в налягане, температура, концентрация, скорост на молекулите, плътност на електричния заряд и др. в различни части на тялото (системата), които предизвикват поток на някаква величина от мястото, в което тя има по-голяма стойност, към място, в което стойността ѝ е по-малка. Напр. при загряване на една част от метална пръчка температурата в тази част се повишава и това предизвиква предаване (поток) на количество топлина от по-топлите към по-студените части на пръчката до изравняване на температурата на цялата пръчка.

Ще се запознаем с основните закономерности на три от най-често срещаните явления на пренос в газове – дифузия, вътрешно триене и топлопроводност. Когато нееднородността е създадена само в едно направление (напр. оста X на избраната отправна система) и трите процеса могат да се представят чрез едно общо уравнение:

$$(1) \frac{dL}{dt} = -k \frac{dG}{dx} S,$$

където L е величината, която се пренася през площта S ($\frac{dL}{dt}$ е потокът на тази величина, т.е. количеството, пренесено за единица време), G е величината, която се изравнява в различните части от тялото ($\frac{dG}{dx}$ е градиента на величината G по оста X), а k е константа, различна за различните процеси.

Знакът „-“ показва, че величината L се пренася в посока на намаляване на величината G .

Дифузията е процес, при който се пренася маса (частици) от място, където молекулите са с по-голяма концентрация (по-голяма плътност на газа) към място, в което те са с по-малка концентрация (по-малка плътност). В този случай L е масата на пренесеното вещество m , G е плътността на газа ρ , която се изравнява след процеса, а k се нарича коефициент на дифузия D . Тогава (1) има вида:

$$(2) \frac{dm}{dt} = -D \frac{d\rho}{dx} S$$

и се нарича закон на Фик за свободната дифузия.

Вътрешното триене възниква при движение на слоеве течност или газ с различна скорост един спрямо друг. В този случай става обмен на частици с различни скорости между слоевете – предава се импулс $\vec{p}$ от единия слой на другия до изравняване на скоростите на слоевете (т.е. скоростите $\vec{u}$ на насочено движение на молекулите в тях). Така (1) в случая се трансформира в закона на Нютон за вътрешното триене:

$$(3) \frac{d\vec{p}}{dt} = -\eta \frac{d\vec{u}}{dx} S = \vec{F}.$$

Коефициентът на вътрешно триене η се нарича още вискозитет на течността, а силата $\vec{F}$ – сила на вътрешно триене.

При явлението топлопроводност се предава количество топлина Q между части на газа с различни температури до изравняване на температурата T на целия газ. Уравнението (1) в този случай се изразява чрез закона на Фурие за топлопроводността:

$$(4) \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} S,$$

където λ се нарича коефициент на топлопроводност.

Уравненията (2), (3) и (4) изразяват емпирични закони, получени експериментално. Те могат да бъдат получени и от най-общи съображения, използвайки основните положения на молекулно-кинетичната теория. За да получим стойностите на коефициентите трябва да въведем още една средна величина, свързана с движението на молекулите – среден свободен пробег l . Това е средната стойност на разстоянието, което изминава една молекула между два последователни удара с други молекули от газа. При нормални условия това е доста малка величина $\sim 10^{-7} \text{ m}$.

Най-напред ще разгледаме процеса дифузия. За опростяване на пресмятанията ще разгледаме еднороден газ (всички молекули имат еднакви маси m_i), в който е създадена разлика в концентрация на

молекулите $n(x)$ по оста X (фиг. 1), но температурата в целия обем е една и съща. В такъв случай и средната скорост на молекулите u ще бъде еднаква в целия обем, тъй като тя зависи само от масата на молекулите и температурата на газа. Ще използваме и предположението за равновероятното движение на молекулите по трите оси, както направихме в 16 въпрос при извода на основното уравнение на МКТ. За малък интервал от време dt , през условно избраната площ S могат да преминат молекули, които са претърпели стълкновение на разстояние от нея по-малко от средния свободен пробег l . Това са молекулите в цилиндъра с основа S и височина $l=udt$. Тогава броят на молекулите dN_1 , които могат да преминат през площта S в посока от ляво на дясно за време dt ще бъде:

$$dN_1 = \frac{1}{6} n_1 S u dt,$$

където n_1 е концентрацията на молекулите на място с координата x_1 , а масата dm_1 на газа преминал в тази посока е:

$$dm_1 = m_i dN_1 = \frac{1}{6} \rho_1 S u dt \quad (\rho = \frac{m}{V} = \frac{Nm_i}{V} = nm_i).$$

В посока от дясно наляво съответно ще имаме (n_2 е концентрацията на молекулите на място с координата x_2):

$$dN_2 = \frac{1}{6} n_2 S u dt,$$

$$dm_2 = \frac{1}{6} \rho_2 S u dt.$$

Ако $n_1 > n_2$ ($\rho_1 > \rho_2$), ще имаме пренос на частици по оста X ($dm_1 > dm_2$), а ако $n_1 < n_2$ ($\rho_1 < \rho_2$) – в обратна посока. Масата на пренесените частици по оста X ще бъде:

$$(5) \quad dm = dm_1 - dm_2 = \frac{1}{6} u (\rho_1 - \rho_2) S dt = -\frac{1}{6} u \Delta \rho S dt.$$

Тъй като разстоянието между x_1 и x_2 е много малко ($x_2 - x_1 = \Delta x = 2l \sim 10^{-7} \text{ m}$), можем да запишем:

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta x} = \frac{d\rho}{dx}$$

$$\Delta \rho = \frac{d\rho}{dx} \Delta x = 2l \frac{d\rho}{dx}$$

т.е. можем да изразим промяната $\Delta \rho$ чрез изменението на координатата Δx и производната на ρ по x . Тогава (5) ще стане:

$$dm = -\frac{1}{3} ul \frac{d\rho}{dx} S dt$$

$$(6) \quad \frac{dm}{dt} = -\frac{1}{3} ul \frac{d\rho}{dx} S.$$

Получихме закона на Фик (2) и от сравнението между (2) и (6) можем да получим и коефициента на свободна дифузия D за газове:

$$(7) \quad D = \frac{1}{3} ul.$$

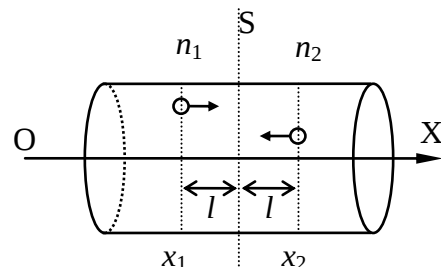
От (7) можем да определим и мерната единица за коефициента на дифузия – $[m^2/s]$.

По подобен начин можем да получим и законите на Нютон за вътрешното триене и на Фурие за топлопроводността. Сравнението съответно с (3) и (4) дава за коефициентите η и λ :

$$\eta = \frac{1}{3} ul \rho = D \rho$$

$$\lambda = \frac{1}{3} ul \rho c_v = \eta c_v,$$

където ρ е плътността на газа, а c_v – специфичният топлинен капацитет на газа при постоянен обем.



фиг. 1