



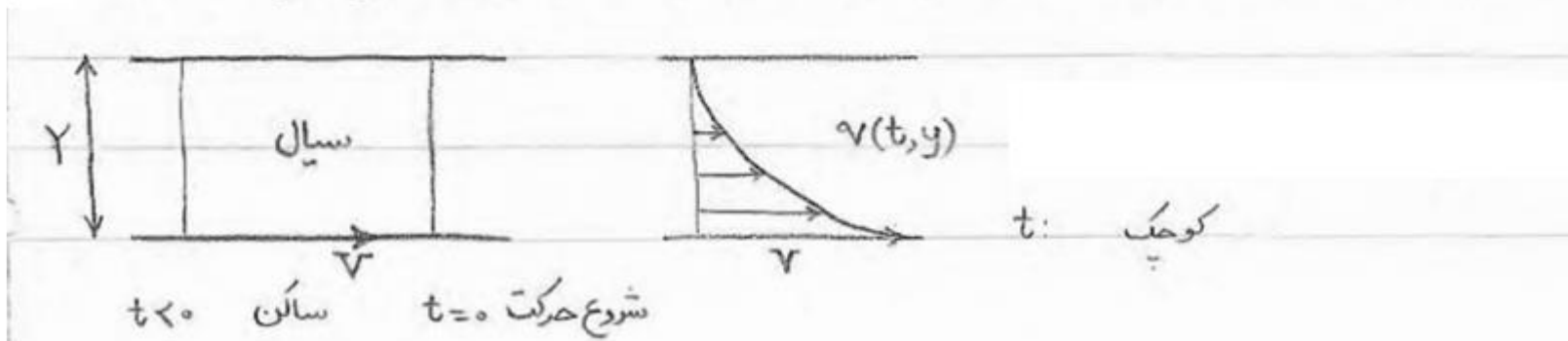
ویسکوزیته نیوتنی،
غیر نیوتنی، ویسکوزیته سینماتیک و ویسکوزیته گازها



قانون ویسکوزیته نیوتن

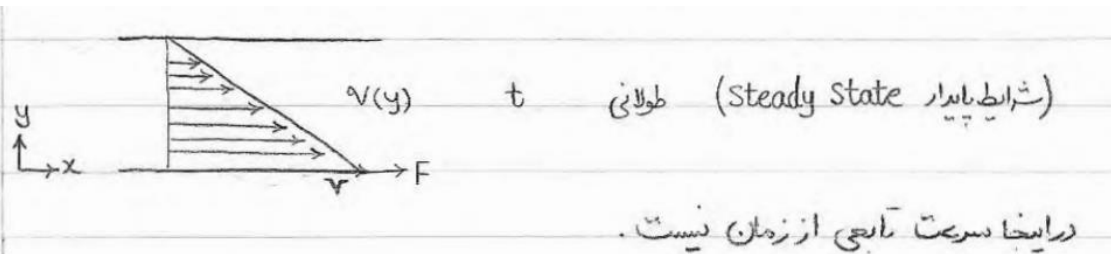
آزمایش: صفحه پاشی را با سرعت V حرکت می دهیم (در زمان صفر) در $t=0$ ، فقط لایه

متصل به صفحه حرکت می کند و بعد دیگر لایه ها. در نتیجه تنش برشی در سیال ایجاد می گردد.



صفحه بالا ساکن باقی بماند و صفحه پایین با سرعت حرکت کند، لایه ای از سیال که در نزدیکی صفحه پایینی قرار دارند شروع به حرکت می کند و حرکت این لایه به تدریج باعث حرکت لایه های بالایی سیال نیز می شود.

قانون ویسکوزیته نیوتن در حالت پایدار



سطح صفحه : A : نیرویی که به صفحه یابنی وارد می شود. F

$$F \propto A \frac{V}{Y} \rightarrow \frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y}$$

μ : ضریب تناسب $\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy}$: فرم ریفرانسیتی

توسط نیروی F ، موئستوم از صفحه جاند به سیال وارد می شود. این انتقال در جهت z انجام

می شود. سرعت از یائین به بالا کم می شود یعنی $\frac{dv_x}{dy} < 0$ است ولی $\tau_{yx} > 0$ است. به

همین دلیل علامت منفی لحاظ می شود. اندیس اول: جهت انتقال موئستوم τ_{yx}
 دوم: جهت سرعت

شار اندازه حرکت τ_{yx} را برحسب lb_f/ft^2 محاسبه کنید، هرگاه بدانیم سرعت صفحه پایینی ویسکوزیته V در شکل قبل برابر 1 ft/s در جهت مثبت x ، فاصله بین دو صفحه، Y برابر 1 ft و 10° و ویسکوزیته سیال، μ ، برابر 0.7 cp است.

حل

چون τ_{yx} برحسب واحدهای انگلیسی خواسته شده است، باید ویسکوزیته را به این دستگاه آحاد تبدیل کنیم. بنابراین، با استفاده از پیوست (و)، مشاهده می شود که:

$$\mu = (0.7 \text{ cp})(2.0886 \times 10^{-5}) = 1.46 \times 10^{-5} \text{ lb}_f \text{ s}/\text{ft}^2$$

توزیع سرعت خطی است، بنابراین:

$$\frac{dv_x}{dy} = \frac{\Delta v_x}{\Delta y} = \frac{-1.0 \text{ ft/s}}{0.1 \text{ ft}} = -1000 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} = -(1.46 \times 10^{-5})(-1000) = 1.46 \times 10^{-2} \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

جدول ۴-۳ ضریب های تبدیل برای کمیت هایی با ابعاد M/Lt یا Ft/L^2 (ویسکوزیته، چگالی ضرب در ضریب نفوذ).

کمیت برحسب این واحدها را در مقدار جدول	ضرب کنید تا به این واحدها تبدیل شود	$\text{pa} \cdot \text{s}$ ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)	$\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}$ (poises)	سانتی پواز	$\text{lb}_m/\text{ft} \cdot \text{s}$	$\text{lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$	$\text{lb}_f \cdot \text{s}/\text{ft}^2$
$\text{pa} \cdot \text{s} = \text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$	→	۱	۱۰	۱۰ ^۲	6.7197×10^{-1}	2.4191×10^2	2.0886×10^{-1}
$\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}$ (پواز)		10^{-1}	۱	۱۰ ^۲	6.7197×10^{-2}	2.4191×10^1	2.0886×10^{-2}
سانتی پواز		10^{-2}	10^{-1}	۱	6.7197×10^{-3}	۲.۴۱۹۱	2.0886×10^{-3}
$\text{lb}_m/\text{ft} \cdot \text{s}$		1.4882	1.4882×10^1	1.4882×10^2	۱	۳۶۰۰	3.1081×10^{-2}
$\text{lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$		2.7328×10^{-2}	2.7328×10^{-3}	2.7328×10^{-4}	2.7778×10^{-3}	۱	8.6336×10^{-6}
$\text{lb}_f \cdot \text{s}/\text{ft}^2$		2.7880×10^1	2.7880×10^2	2.7880×10^3	۳۲.۱۷۴۰	1.1583×10^5	۱



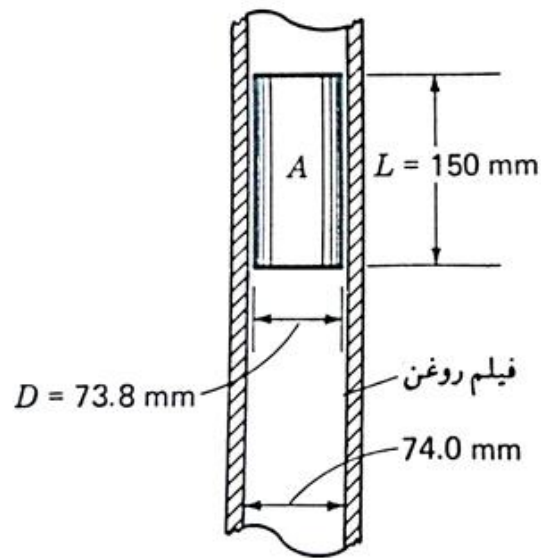
یک پوند 0.454 kg

اموت 12 اینچ

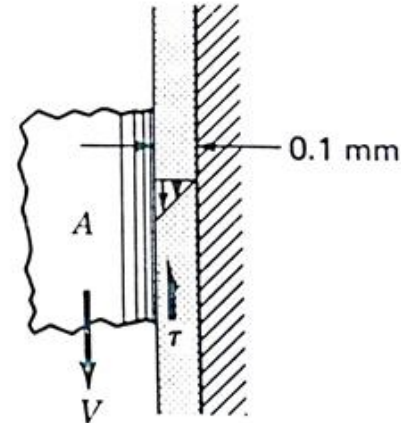
اینچ 2.54 سانتی متر

نسبت گرانشی $\frac{32.174}{8} = 9.81 \text{ m/s}^2$

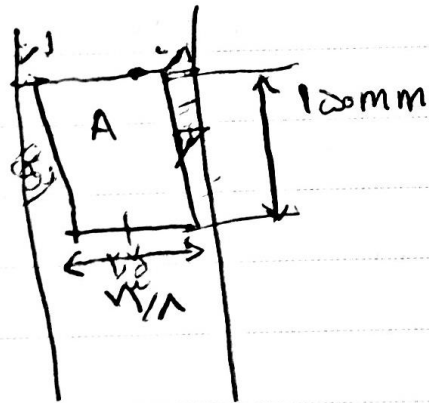
- استوانه جامد **A** به جرم ۲,۵ کیلوگرم در شکل زیر نشان داده شده است، در داخل لوله ای به طرف پایین می لغزد استوانه و لوله کاملاً هم محور بوده و لایه ای از روغن بین سطوح آن وجود دارد. ویسکوزیته روغن 0.007 N.s/m^2 می باشد. سرعت حد استوانه V_T ، یعنی سرعت ثابت نهایی آن چقدر است؟ از اثرات فشار هوا صرف نظر کنید.



استوانه A در یک لوله روغنکاری
شده می لغزد



پروفیل سرعت خطی در فیلیم روغن



$$\frac{\Delta V}{\Delta x} = \frac{V - 0}{0 - 0.1 \text{ m}} = -1000 \text{ V/m}$$

$$T_{yx} = -\mu \frac{\Delta V}{\Delta x} =$$

$$T_{yx} = 1.5 \times 10^{-3} (10000) \text{ V} = 15 \text{ V}$$



$$T(\pi D) L = 15 \text{ V} \times \pi \times 0.0731 \times 0.150 = 2.12 \text{ (9/11)}$$

$$\Rightarrow v_T = 10/0 \text{ m/s}$$

ILIA



یک غلاف استوانه‌ای بر روی محوری استوار شده است. درز بین محور و غلاف محتوی سیال نیوتنی است. محور و غلاف هم محورند. هر گاه غلاف را با نیروی $600N$ در امتداد محور بکشیم، به سرعت $1m/s$ می‌رسد. اگر آن را با نیروی $1500-N$ بکشیم، به چه سرعتی خواهد رسید؟ دمای غلاف ثابت باقی می‌ماند.

حل:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{u}{t} ; \tau = \frac{F}{A}$$

$$F = \mu \frac{A}{t} u = C \cdot u ; C = \text{ثابت}$$

بنابراین:

$$F_1 = Cu_1 \text{ و } F_2 = Cu_2$$

$$u_2 = \frac{F_2}{F_1} \cdot u_1 = \frac{1500}{600} (1) \Rightarrow u_2 = 2.5 m/s$$

Activate
Go to Settir



سیالاتی که از رابطه ویسکوزیته نیوتن تبعیت می کنند ، سیالات نیوتنی نام دارند . گازها سیال

نیوتنی هستند . اما مایعات هگلی سیال نیوتنی نیستند . سرابها ، مواد خمیری و سوسپانسیون ها

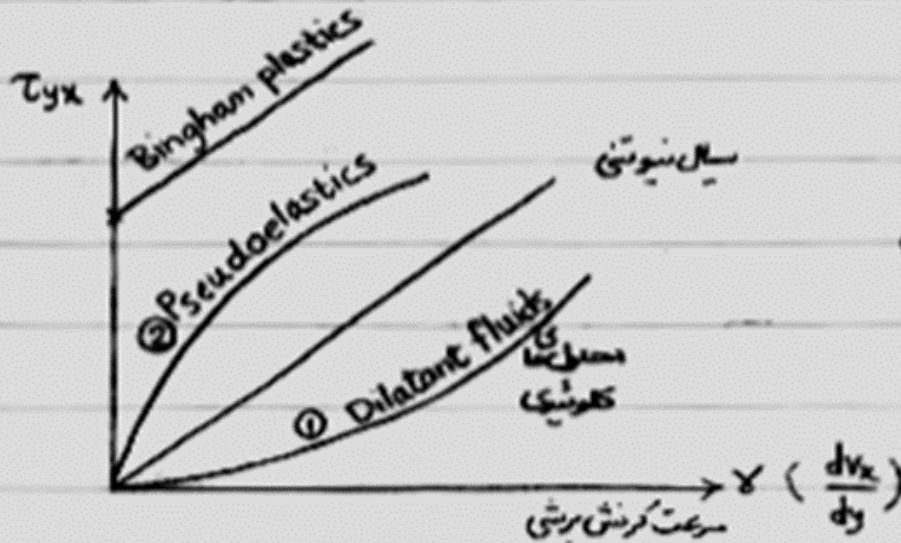
جزء سیالات غیر نیوتنی هستند .

برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی :

Bingham plastics در واقع دارای نوعی

تنش تسلیم هستند و بعد رفتار سیال

نیوتنی دارند .



Pseudoelastics : با افزایش سرعت کرنش برشی ، دشر می شوند .

سیال دیلاتانت

- این سیال غلیظ شونده برشی است؛ یعنی با افزایش اهنگ کرنش، مقاومت آن افزایش می یابد. سوسپانسیون های ذرات نشاسته یا شن در آب نمونه هایی از سیال دیلاتانت هستند.
- مثال ها : شنزار Beach sand, فلدسپار Feldspar, شن های روان Quick Sand, نشاسته در آب Starch in water



شبه پلاستیک

- این سیال رقیق شونده برشی است؛ یعنی با افزایش آهنگ کرنش، مقاومت آن کاهش می‌یابد.
- سیال بسیار رقیق شونده را شبه پلاستیک می‌گویند.
- محلول‌های پلیمری، و سپانسیون‌های کولئیدی، خمیر آب در کاغذ، رنگ لاتکس، پلاسمای خون، شربت‌ها و شیر قند، از سیالات شبه پلاستیک هستند.
- رنگ یکی از رایج‌ترین سیالات شبه پلاستیک است. (رنگ‌ها در هنگام ریختن سفت هستند ولی اگر به شدت به هم زده شوند رقیق خواهند شد)



سیال بینگهام

- نوع دیگری از سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان نیز وجود دارد که به عنوان سیال بینگهام شناخته می شود.
- این نوع سیال برای جاری شدن و جریان یافتن، نیاز به یک مقدار مشخص تنش اولیه هستند.
- در واقع یک آستانه تنش برشی برای آن‌ها تعریف شده که قبل از آنکه میزان تنش برشی به این آستانه برسد، هیچ جریانی دیده نمی شود و بعد از آن، سیال شروع به جریان یافتن می کند. این سیالات را سیالات پلاستیک می نامند.
- سیال بینگهام به نوعی از سیالات پلاستیک گفته می شود که ویسکوزیته آن‌ها ثابت باقی می ماند.
- رفتار این سیال تحت تنش های کمتر از تنش تسلیم رفتار جامد را از خود نشان می دهد و تحت تاثیر تنش های بالاتر از آن رفتار سیال نیوتنی دارد، مانند خمیر دندان و کامپوزیت های سیلیکا-پلیمری.



ویسکوزیته سینماتیک

ویسکوزیته سینماتیک :

$$\eta_{(nu)} = \frac{\mu}{\rho}$$

از واقع نفوذ مومستوم توسط مکانیزم مولکولی نشان می دهد .

$$\eta : \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}}{\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

دینامسیون :

تمام کمیت هایکنه واحد یا دینامسیون $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ دارند ، نوعی (دیفوزیون) ویانوعی نفوذ نشان می دهد .

تفاوت ویسکوزیته سینماتیک و ویسکوزیته

- ویسکوزیته سینماتیک برای اندازه گیری مایعات نیوتنی و ویسکوزیته دینامیکی برای مایعات غیر نیوتنی استفاده می شود.
- به زبان ساده، ویسکوزیته سیال نیوتنی بدون توجه به مقدار برشی که برای دمای ثابت اعمال می شود (مثلاً آب، الکل، روغن معدنی) ثابت می ماند.
- سیالات غیر نیوتنی برعکس سیالات نیوتنی هستند. هنگامی که برش بر روی مایعات غیر نیوتنی اعمال می شود، ویسکوزیته سیال تغییر می کند (مانند سس گوجه فرنگی، چسب، ماسه روان).



$$\mu = 1 \text{ p} : (20^\circ\text{C}) \text{ آب}$$

$$D = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\mu = 0.4 \text{ p} : (80^\circ\text{C}) \text{ آب}$$

$$D = 0.4 \text{ cm}^2/\text{s}$$

با افزایش سیالیت، ویسکوزیته کمتر می شود. ویسکوزیته هم وابسته به دماست.

$$\mu = 0.018 \text{ p} : (20^\circ\text{C}) \text{ هوا}$$

$$D = 15 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$\mu = 0.021 \text{ p} : (80^\circ\text{C}) \text{ هوا}$$

$$D = 20 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

برای گازها، D زیادتر از مایعات است زیرا μ برای گازها کم است. هم چنین رفتار μ و D

مادها برای گازها و مایعات متعکس می کند.



ویسکوزیته‌ی سرشاره‌ها ، بعضی از روغن‌ها و مایعات پلیمری ، μ بین 100 poise - 1

تغییر می‌کند. برای H_2SO_4 (اسید سولفوریک) ، μ بین 1 p - 0.1 تغییر می‌کند.

برای نمک‌های مذاب ، فلزات سنگین ($Pb, Zn, \dots$) ، فلزات واسطه ، آب ، بنزین ، استون

فلزات قلیائی در $20^\circ C$ ، μ بین 0.01 - 0.1 p تغییر می‌کند.

نظریه جنبشی گازها

• فرضیات این نظریه عبارتند از:

۱. گازها از ذرات بسیار کوچکی (مولکول مانند گاز اکسیژن، یا اتم مانند گاز هلیوم) تشکیل شده اند. این ذرات حرکت مستقیم الخط و تصادفی دارند.
۲. در شرایط معمولی، ابعاد مولکول ها در مقایسه با فاصله مولکول ها در گاز بسیار کم است به طوری که بیشتر حجم گاز را فضای خالی تشکیل می دهد. به عبارتی، می توان گازها را متشکل از ذراتی جرم دار بدون حجم در نظر گرفت.
۳. مولکول ها با همدیگر و با جدار ظرف برخورد می کنند. در این برخوردها انرژی جنبشی کم نمی شود ولی ممکن است انرژی از مولکولی به مولکول دیگر منتقل شود. به چنین برخوردی، الاستیک یا کشسان گویند.
- ۴- انرژی جنبشی متوسط یک گاز فقط به دما بستگی دارد و ارتباطی به فشار و ماهیت مولکول ندارد.
۵. نیروی جاذبه بین مولکولهای گاز بسیار ناچیز است و در اغلب موارد از آن صرف نظر می شود.

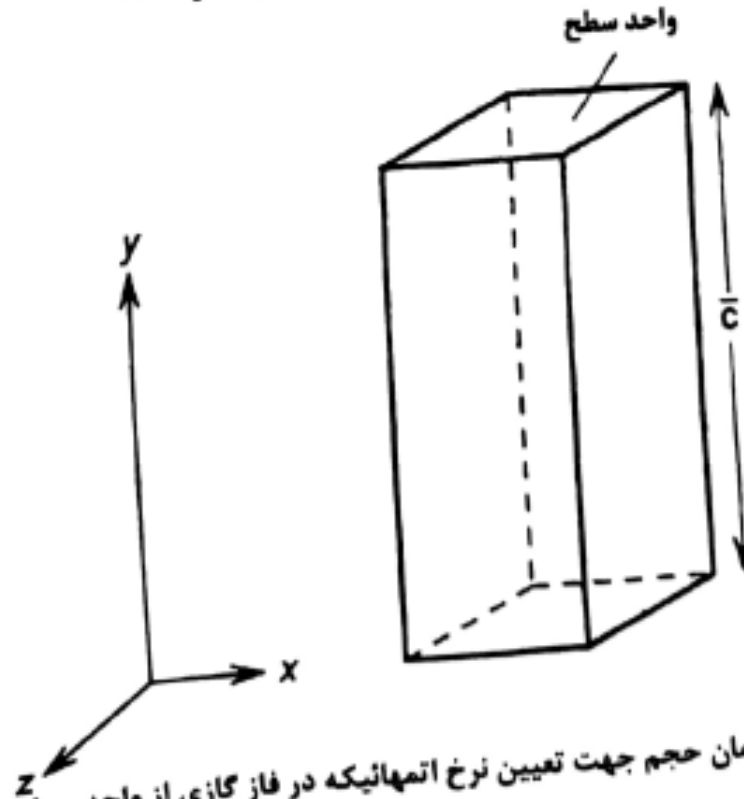


مفروضات محاسبه فاصله ازاد اصلی (میانگین فاصله برخورد) و ویسکوزیته گازها

۱- اتم‌ها صلب‌اند، آنها کره‌های بدون جاذبه با قطر d بوده که دستخوش برخوردهای کاملاً الاستیک با یکدیگر می‌باشند.

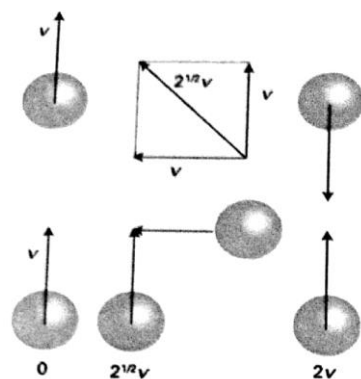
۲- تمام اتم‌ها با یک سرعت که همان سرعت متوسط است، حرکت می‌کنند. $\left(\frac{\lambda RT}{\pi M}\right)^{1/2}$

۳- تمام اتم‌ها در جهاتی موازی محورهای x ، y و z در حال حرکتند، یعنی $\frac{1}{6}$ آنها روی یکی از جهات $+x$ ، $-x$ ، $+y$ ، $-y$ ، $+z$ ، $-z$ در حال حرکتند.

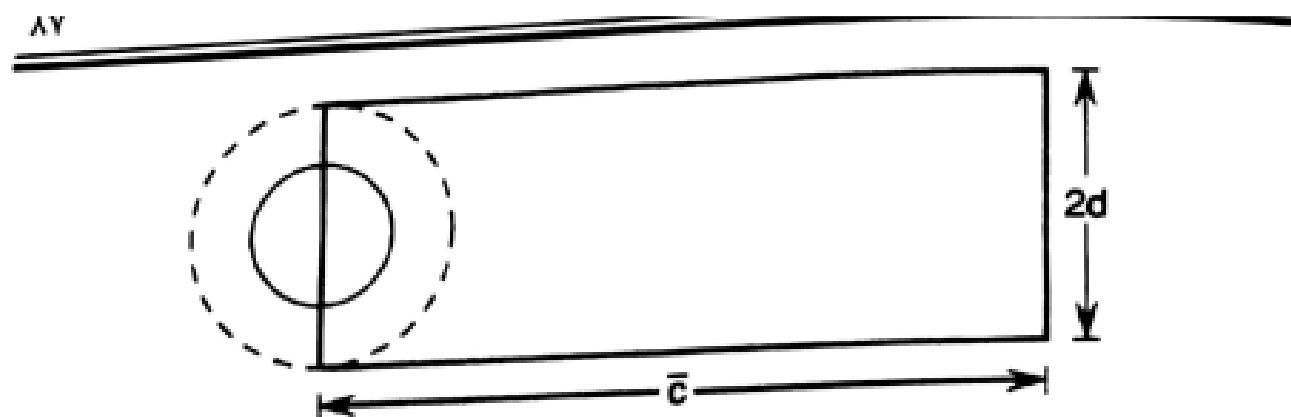


شکل ۲-۲۳ المان حجم جهت تعیین نرخ اتمهائیکه در فاز گازی از واحد سطح عبور می‌کنند

شکل ۲-۲۳ یک حجم منشوری با سطح مقطع واحد و طول $\bar{e}$ نشان می‌دهد. اگر دانسیته گاز n اتم در واحد حجم باشد، منشور شامل $n\bar{e}$ که $\frac{1}{6}$ آنها در جهت y - حرکت می‌کنند. در نتیجه، تعداد اتم‌هایی که از قاعده این حجم در واحد زمان عبور می‌کنند، $\frac{n\bar{e}}{6}$ است. یک برخورد بین دو اتم وقتی اتفاق می‌افتد که فاصله مراکز آنها تا مقدار d کاهش یابد. پس هر اتم گرمای به حجم $\frac{4}{3}\pi d^3$ را به عنوان حریم نسبت به هر اتم دیگر اختیار می‌کند. مطابق شکل ۲-۲۴ یک اتم که با سرعت $\bar{e}$ حرکت می‌کند یک حجم $\pi d^2 \bar{e}$ را در واحد زمان جاروب می‌نماید که در این حجم، $n\pi d^2 \bar{e}$ اتم داریم. حرکت اتم باعث $n\pi d^2 \bar{e}$ برخورد با یکدیگر در واحد زمان می‌شود. این بحث وقتی ساده می‌شود که فرض کنیم که تمام n اتم در حجم جاروب کرده ثابت باشند. اگر بخواهیم ارتباط سرعت‌ها را در نظر داشته باشیم. تعداد برخوردها در ثانیه به صورت $\sqrt{2}n\pi d^2 \bar{e}$ بدست می‌آید و از این رو فاصله متوسط طی شده در برخوردها که به فاصله آزاد اصلی^۱ معروف است بصورت زیر محاسبه می‌شود.



$$\lambda = \frac{\text{فاصله پیموده شده در واحد زمان}}{\text{تعداد برخوردها در واحد زمان}} = \frac{\bar{e}}{\sqrt{2}n\pi d^2 \bar{e}} = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2}$$



شکل ۲-۲۴ حجم در یک فاز گازی در مورد تعداد برخوردهایی که یک اتم با اتم‌های دیگر در واحد زمان تجربه می‌کند.

رابطه بین فاصله آزاد و فشار در گاز کامل

$$pV = nRT$$

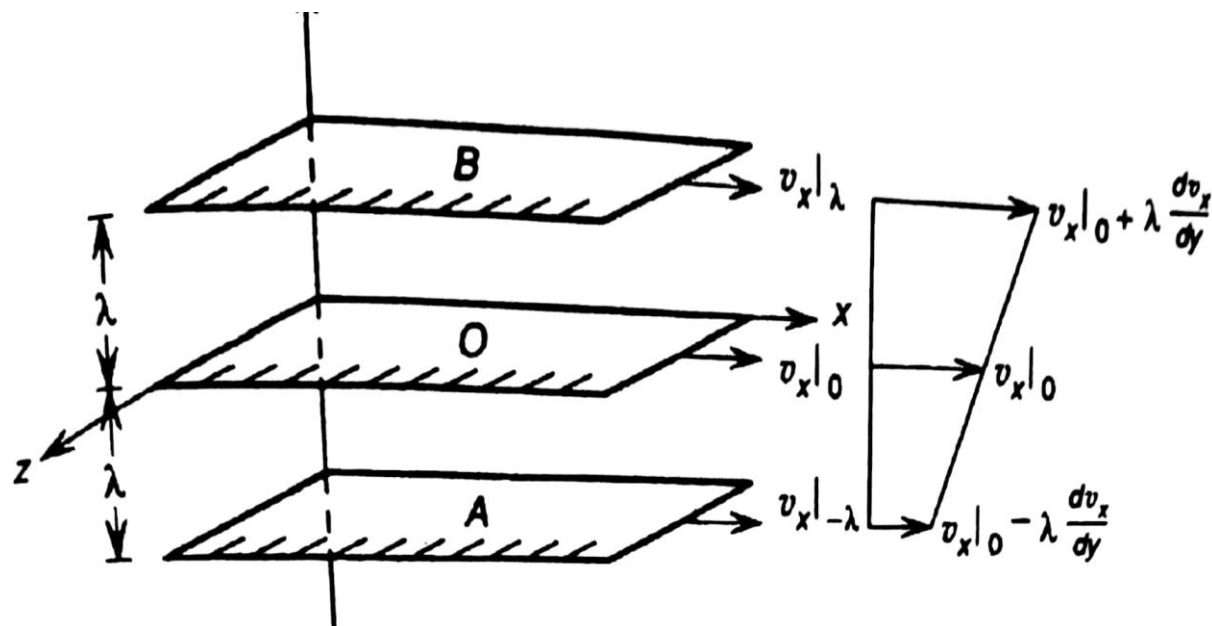
$$pV \frac{n N_A k T}{N} \Rightarrow n = \frac{N}{V} = \frac{p}{kT}$$

تعداد ذرات
بر واحد حجم

$$\sqrt{2} n n d^2 \bar{c} = \sqrt{2} \frac{p}{kT} n d^2 \bar{c}$$

فرکانس برخورد

ویسکوزیته گازها با استفاده از نظریه جنبشی



یک جریان آرام و در جهت x در نظریه جنبشی که گواهی آن سرعت

آن نسبت به y خطی است، در شکل بالا جریان توسط

صفحاتی از اتم‌ها که بر فاصله آزاد اصلی از یکدیگر موقوف

شده‌اند.

تعداد اتم هایی که از واحد سطح A در واحد زمان به طور عمودی

به صفحه O می ریزد برابر $\frac{1}{6} n \bar{c}$ است ($\bar{c}$ سرعت متوسط) و از

آنجا که هر مولکول دارای یک سطح مؤمنقوم در جهت X در

صفحه A ($|v_x|$) دارد سرعت انتقال مؤمنقوم به واحد

سطح صفحه O در جهت Y به صورت $\frac{1}{6} n \bar{c} |v_x|$ است

به طور مشابه، سرعت انتقال موجتیم به واحد سطح صفح ۵ در

حجت ۶ - ناشی از پیش اتم های صفح ۵ به صورت

$$\frac{1}{4} n \bar{c} m v_x \Big|_{\lambda}$$

همین تغییرات موجتیم در واحد سطح جوابر است با

$$\frac{1}{4} n \bar{c} m v_x \Big|_{\lambda} - \frac{1}{4} n \bar{c} m v_x \Big|_{\lambda} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{4} n \bar{c} m (v_x|_0 - \lambda \frac{dv_x}{dy}) - \frac{1}{4} n \bar{c} m (v_x|_0 + \lambda \frac{dv_x}{dy})$$

$$= -\frac{1}{4} n \bar{c} m \lambda \frac{dv_x}{dy}$$

$$\tau_{yx} = -\frac{1}{3} n \bar{c} m \lambda \frac{dv_x}{dy}$$

فرمول نهایی ویسکوزیته گاز بر اساس نظریه جنبشی

ویسکوزیته گاز را بر حسب (g/cm.s)poise

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{\pi m k T}}{\pi d^2}$$

$$\eta = \frac{2/6693 \times 10^{-5} \sqrt{MT}}{d^2}$$

بر حسب گرم

M = وزن اتمی

T : بر حسب کلوین

d : بر حسب آنگستروم ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)

انحراف از نظریه جنبشی

- داده های مربوط به گازهای مختلف نشان می دهد که μ سریعتر از $\sqrt{T}$ افزایش می یابد. بنابراین برای توصیف بهتر وابستگی دمایی μ باید مدل کره صلب را با مدلی تعویض کنیم که نیروهای جاذبه و دافعه را دقیق تر نشان دهد.



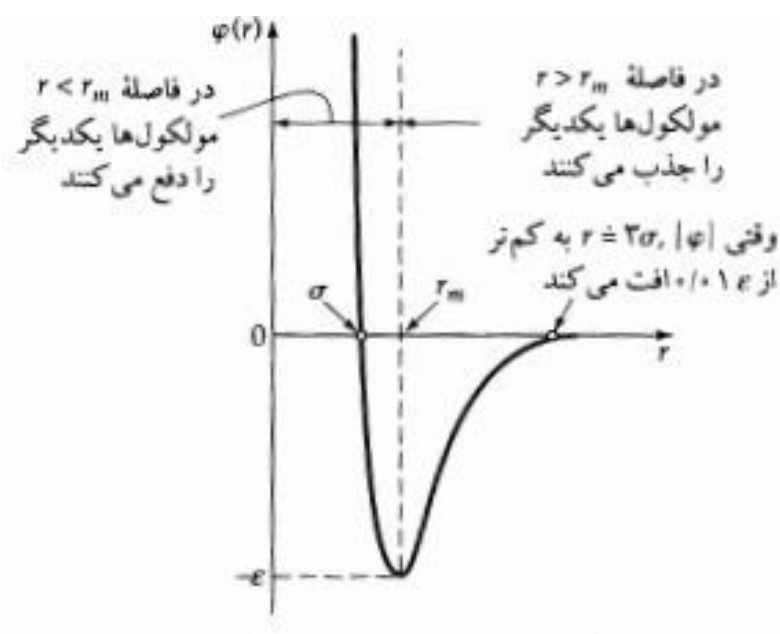
نظریه چابمن

یکی از نظریه‌های دقیق سینتیک گازهای تک‌اتمی با چگالی پایین در اوایل قرن بیستم، توسط چابمن در انگلستان، و به صورت مستقل از او، توسط انسکوگ در سوئد پی‌ریزی شد. نظریه چابمن-انسکوگ عبارت‌هایی برای خواص انتقال، برحسب انرژی پتانسیل بین مولکولی $\phi(r)$ ، ارائه می‌دهد؛ r فاصله بین یک جفت مولکول است که باهم برخورد می‌کنند. بنابراین نیروی بین مولکولی از رابطه $F(r) = -d\phi/dr$ به دست می‌آید. صورت تابعی دقیق $\phi(r)$ معلوم نیست؛ اما یک رابطه تجربی رضایت‌بخش برای مولکول‌های غیرقطبی پتانسیل لندارد-جونز است:

$$\phi(r) = \epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$



که در آن σ قطر مشخصه مولکول‌هاست که غالباً قطر برخورد نامیده می‌شود و ϵ انرژی مشخصه است که عملاً انرژی جاذبه ماکزیمم بین یک جفت مولکول است. این تابع که در شکل زیر نشان داده شده است، ویژگی‌های مشخصه نیروهای بین مولکولی را نمایش می‌دهد: جاذبه ضعیف در فواصل زیاد و دافعه قوی در فواصل کم. مقدار پارامترهای σ و ϵ را برای بسیاری از مواد می‌دانیم!



ویسکوزیته یک گاز تک‌اتمی با وزن مولکولی M را می‌توان برحسب پارامترهای لند-جونز، به صورت زیر نوشت:

$$\mu = \frac{5}{16} \frac{\sqrt{\pi m K T}}{\pi \sigma^2 \Omega_\mu} \quad \text{یا} \quad \mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{M T}}{\sigma^2 \Omega_\mu} \quad (14-4.1)$$

در صورت دوم این معادله، اگر $T [=] \text{K}$ و $\sigma [=] \text{\AA}$ ، آنگاه $\mu [=] \text{g/cm} \cdot \text{s}$. کمیت بدون بُعد Ω_μ تابعی با تغییرات آهسته از دمای بدون بُعد $K T / \epsilon$ ، از مرتبه بزرگی واحد است که در جدول ۲.۵ گفته شده است. این تابع را «انتگرال برخورد برای ویسکوزیته» می‌نامند، زیرا جزئیات مسیرهایی را که مولکول‌ها در حین برخورد دوتایی دنبال می‌کنند، به حساب می‌آورد. اگر گاز از کره‌های صلبی به قطر σ (به جای مولکول‌های حقیقی با نیروهای جاذبه و دافعه) تشکیل شده بود، آنگاه Ω_μ دقیقاً برابر واحد می‌شد. بنابراین تابع Ω_μ را می‌توان به صورت تابع توصیف‌کننده انحراف از رفتار کره صلب تعبیر کرد.



محاسبه ویسکوزیته گاز خالص با جگالی باین
ویسکوزیته گاز CO_2 را در دماهای ۲۰۰، ۳۰۰، و ۸۰۰ K و فشار ۱ اتمسفر محاسبه کنید.

حل

با استفاده از معادله قبل از جدول ۱.۰، پارامترهای لنارد-جونز برای گاز CO_2 را به دست می آوریم: $\varepsilon/K = ۱۹^\circ\text{K}$ و $\sigma = ۳,۹۹۶\text{\AA}$. وزن مولکولی CO_2 برابر است با ۴۴/۰۱.

با قرار دادن M و σ

$$\mu = ۲,۶۶۹۳ \times ۱۰^{-۵} \frac{\sqrt{۴۴,۰۱T}}{(۳,۹۹۶)^2 \Omega_\mu} = ۱,۱۰۹ \times ۱۰^{-۵} \frac{\sqrt{T}}{\Omega_\mu}$$

که در آن $\mu [=] \text{g/cm} \cdot \text{s}$ و $T [=] \text{K}$. بقیه محاسبات را به صورت جدول نشان می دهیم.

$T(\text{K})$	KT/ε	Ω_μ	$\sqrt{T}$	ویسکوزیته ($\text{g/cm} \cdot \text{s}$)
۲۰۰	۱,۰۵۳	۱,۵۴۸	۱۴,۱۴	$۱,۰۱۳ \times ۱۰^{-۴}$
۳۰۰	۱,۵۸	۱,۲۸۶	۱۷,۳۲	$۱,۴۹۴ \times ۱۰^{-۴}$
۸۰۰	۴,۲۱	۰,۹۵۹۵	۲۸,۲۸	$۳,۲۶۹ \times ۱۰^{-۴}$

جدول ۱.۵ پارامترهای پتانسیل لارند-جوز (۱۲-۶) و خواص بحرانی

		پارامترهای لارند-جوز			خواص بحرانی				
وزن مولکولی		σ	ε/K	Ref.	T_c	p_c	$\bar{V}_c$	$\mu_c \times 10^3$	$k_c \times 10^3$
ماده	M	(Å)	(K)		(K)	(atm)	(cm ³ /g-mole)	(g/cm · s)	(cal/cm · s · K)
عناصر سبک									
H ₂	۲,۰۱۶	۲,۹۱۵	۳۸,۰	(الف)	۳۳,۳	۱۲,۸۰	۶۵,۰	۳۴,۷	-
He	۴,۰۰۳	۲,۵۷۶	۱۰,۲	(الف)	۵,۲۶	۲,۲۶	۵۷,۸	۲۵,۴	-
گازهای نجیب									
Ne	۲۰,۱۸۰	۲,۷۸۹	۳۵,۷	(الف)	۴۴,۵	۲۶,۹	۴۱,۷	۱۵۶	۷۹,۲
Ar	۳۹,۹۴۸	۳,۴۳۲	۱۲۲,۴	(ب)	۱۵۰,۷	۴۸,۰	۷۵,۲	۲۶۴	۷۱,۰
Kr	۸۳,۸۰	۳,۶۷۵	۱۷۰,۰	(ب)	۲۰۹,۴	۵۴,۳	۹۲,۲	۳۹۶	۴۹,۴
Xe	۱۳۱,۲۹	۴,۰۰۹	۲۳۴,۷	(ب)	۲۸۹,۸	۵۸,۰	۱۱۸,۸	۴۹۰	۴۰,۲
گازهای چند اتمی ساده									
هوا	± ۲۸,۹۶۴	۳,۶۱۷	۹۷,۰	(الف)	± ۱۳۲,۴	± ۳۷,۰	± ۸۶,۷	۱۹۳	۹۰,۸
N ₂	۲۸,۰۱۳	۳,۶۶۷	۹۹,۸	(ب)	۱۲۶,۲	۳۳,۵	۹۰,۱	۱۸۰	۸۶,۸
O ₂	۳۱,۹۹۹	۳,۴۳۳	۱۱۳	(الف)	۱۵۴,۴	۴۹,۷	۷۴,۴	۲۵۰	۱۰۵,۳
CO	۲۸,۰۱۰	۳,۵۹۰	۱۱۰	(الف)	۱۳۲,۹	۳۴,۵	۹۳,۱	۱۹۰	۸۶,۵
CO ₂	۴۴,۰۱۰	۳,۹۹۶	۱۹۰	(الف)	۳۰۴,۲	۷۲,۸	۹۴,۱	۳۴۳	۱۲۲
NO	۳۰,۰۰۶	۳,۴۷۰	۱۱۹	(الف)	۱۸۰	۶۴	۵۷	۲۵۸	۱۱۸,۲
N ₂ O	۴۴,۰۱۲	۳,۸۷۹	۲۲۰	(الف)	۳۰۹,۷	۷۱,۷	۹۶,۳	۳۳۲	۱۳۱
SO ₂	۶۴,۰۶۵	۴,۰۲۶	۳۶۳	(ج)	۴۳۰,۷	۷۷,۸	۱۲۲	۴۱۱	۹۸,۶
F ₂	۳۷,۹۹۷	۳,۶۵۳	۱۱۲	(الف)	-	-	-	-	-
Cl ₂	۷۰,۹۰۵	۴,۱۱۵	۳۵۷	(الف)	۴۱۷	۷۶,۱	۱۲۴	۴۲۰	۹۷,۰
Br ₂	۱۵۹,۸۰۸	۴,۲۶۸	۵۲۰	(الف)	۵۸۴	۱۰۲	۱۴۴	-	-
I ₂	۲۵۳,۸۰۹	۴,۹۸۲	۵۵۰	(الف)	۸۰۰	-	-	-	-
هیدروکربن‌ها									
CH ₄	۱۶,۰۴	۳,۷۸۰	۱۵۴	(ب)	۱۹۱,۱	۴۵,۸	۹۸,۷	۱۵۹	۱۵۸
CH ₂ = CH ₂	۲۶,۰۴	۴,۱۱۴	۲۱۲	(د)	۳۰۸,۷	۶۱,۶	۱۱۲,۹	۲۳۷	-



جدول ۲.۵: انتگرال‌های برخورد برای کاربرد همراه با پتانسیل لندارد-جونز (۶-۱۲) برای پیش‌بینی خواص انتقال گازها در چگالی‌های پایین. $\Omega_{D,AB}$

$\Omega_{\mu} = \Omega_k$ (برای ویسکوزیته و رسانش گرمایی)	$\Omega_{D,AB}$ (برای ضریب نفوذ)	$\Omega_{\mu} = \Omega_k$ (برای ویسکوزیته و رسانش گرمایی)	$\Omega_{D,AB}$ (برای ضریب نفوذ)
KT/ϵ یا KT/ϵ_{AB}		KT/ϵ یا KT/ϵ_{AB}	
۰٫۳-	۲٫۸۴-	۲٫۷	۱٫۰۶۹۱
۰٫۳۵	۲٫۶۷۶	۲٫۸	۱٫۰۵۸۳
۰٫۴۰	۲٫۵۳۱	۲٫۹	۱٫۰۴۸۲
۰٫۴۵	۲٫۴۰۱	۳٫۰	۱٫۰۳۸۸
۰٫۵۰	۲٫۲۸۴	۳٫۱	۱٫۰۳۰۰
۰٫۵۵	۲٫۱۷۸	۳٫۲	۱٫۰۲۱۷
۰٫۶۰	۲٫۰۸۴	۳٫۳	۱٫۰۱۳۹
۰٫۶۵	۱٫۹۹۹	۳٫۴	۱٫۰۰۶۶
۰٫۷۰	۱٫۹۲۲	۳٫۵	۰٫۹۹۹۶
۰٫۷۵	۱٫۸۵۳	۳٫۶	۰٫۹۹۳۱
۰٫۸۰	۱٫۷۹۰	۳٫۷	۰٫۹۸۶۸
۰٫۸۵	۱٫۷۳۴	۳٫۸	۰٫۹۸۰۹
۰٫۹۰	۱٫۶۸۲	۳٫۹	۰٫۹۷۵۳
۰٫۹۵	۱٫۶۳۶	۴٫۰	۰٫۹۶۹۹
۱٫۰۰	۱٫۵۹۳	۴٫۱	۰٫۹۶۴۷
۱٫۰۵	۱٫۵۵۴	۴٫۲	۰٫۹۵۹۸
۱٫۱۰	۱٫۵۱۸	۴٫۳	۰٫۹۵۵۱
۱٫۱۵	۱٫۴۸۵	۴٫۴	۰٫۹۵۰۶
۱٫۲۰	۱٫۴۵۵	۴٫۵	۰٫۹۴۶۲
۱٫۲۵	۱٫۴۲۷	۴٫۶	۰٫۹۴۲۰
۱٫۳۰	۱٫۴۰۱	۴٫۷	۰٫۹۳۸۰
۱٫۳۵	۱٫۳۷۷	۴٫۸	۰٫۹۳۴۱
۱٫۴۰	۱٫۳۵۵	۴٫۹	۰٫۹۳۰۴
۱٫۴۵	۱٫۳۳۴	۵٫۰	۰٫۹۲۶۸
۱٫۵۰	۱٫۳۱۵	۶٫۰	۰٫۸۹۶۲
۱٫۵۵	۱٫۲۹۷	۷٫۰	۰٫۸۷۲۷
۱٫۶۰	۱٫۲۸۰	۸٫۰	۰٫۸۵۳۸
۱٫۶۵	۱٫۲۶۴	۹٫۰	۰٫۸۳۸۰
۱٫۷۰	۱٫۲۴۹	۱۰٫۰	۰٫۸۲۴۴
۱٫۷۵	۱٫۲۳۵	۱۲٫۰	۰٫۸۰۱۸
۱٫۸۰	۱٫۲۲۲	۱۴٫۰	۰٫۷۸۳۶
۱٫۸۵	۱٫۲۰۹	۱۶٫۰	۰٫۷۶۸۳
۱٫۹۰	۱٫۱۹۸	۱۸٫۰	۰٫۷۵۵۲
۱٫۹۵	۱٫۱۸۶	۲۰٫۰	۰٫۷۴۳۶
۲٫۰۰	۱٫۱۷۶	۲۵٫۰	۰٫۷۱۹۸
۲٫۱۰	۱٫۱۵۶	۳۰٫۰	۰٫۷۰۱۰
۲٫۲۰	۱٫۱۳۸	۳۵٫۰	۰٫۶۸۵۴
۲٫۳۰	۱٫۱۲۲	۴۰٫۰	۰٫۶۷۲۴
۲٫۴۰	۱٫۱۰۷	۵۰٫۰	۰٫۶۵۱۰
۲٫۵۰	۱٫۰۹۳۳	۷۵٫۰	۰٫۶۱۴۰
۲٫۶۰	۱٫۰۸۰۷	۱۰۰٫۰	۰٫۵۸۸۷

ویسکوزیته مخلوط گاز بر اساس فرمول ویلک

- برای محاسبه ویسکوزیته مخلوط گازی می توان از فرمول تجربی زیر استفاده کرد که بسیار رضایت بخش است

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} \mu_{\alpha}}{\sum_{\beta} x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}}$$

که در آن کمیت‌های بدون بُعد $\Phi_{\alpha\beta}$ عبارت‌اند از:

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/2} \right]^2$$



پیش‌بینی ویسکوزیته مخلوط گازی با چگالی پایین
 ویسکوزیته مخلوط گازی زیر را در فشار ۱ اتمسفر و دمای ۲۹۳ K، با استفاده از داده‌های مربوط به اجزای خالص
 آن در فشار و دمای مشابه، تخمین بزنید:

ویسکوزیته μ_α (g/cm · s)	وزن مولکولی M_α	کسر مولی x_α	گونه α
1462×10^{-7}	44,01	0,133	۱. CO ₂
2031×10^{-7}	32,00	0,039	۲. O ₂
1754×10^{-7}	28,02	0,828	۳. N ₂



• از معادلات زیر استفاده می کنیم

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} \mu_{\alpha}}{\sum_{\beta} x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}}$$

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/2} \right]^2$$

α	β	M_{α}/M_{β}	μ_{α}/μ_{β}	$\Phi_{\alpha\beta}$	$\sum_{\beta=1}^3 x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}$
۱.	۱	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۰,۷۶۳
	۲	۱,۳۷۵	۰,۷۲۰	۰,۷۳۰	
	۳	۱,۵۷۱	۰,۸۳۴	۰,۷۲۷	
۲.	۱	۰,۷۲۷	۱,۳۸۹	۱,۳۹۴	۱,۰۵۷
	۲	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	
	۳	۱,۱۴۲	۱,۱۵۸	۱,۰۰۶	
۳.	۱	۰,۶۳۷	۱,۲۰۰	۱,۳۷۰	۱,۰۴۹
	۲	۰,۸۷۶	۰,۸۶۴	۰,۹۹۳	
	۳	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	

سپس از معادله زیر استفاده می کنیم

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} \mu_{\alpha}}{\sum_{\beta} x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}}$$

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{(0,1333)(1462)(10^{-7})}{0,763} + \frac{(0,039)(2031)(10^{-7})}{1,057} + \frac{(0,828)(1754)(10^{-7})}{1,049} \\ &= 1714 \times 10^{-7} \text{ g/cm} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

مقدار مشاهده شده^{۱۲} برابر است با: $1793 \times 10^{-7} \text{ g/cm} \cdot \text{s}$.

ویسکوزیته مخلوط گاز در چگالی پایین. داده‌های زیر^۱ برای ویسکوزیته‌های مخلوط‌های هیدروژن و فرئون-۱۲ (دی‌کلرودی‌فلوئورومتان) در دمای 25°C و فشار ۱ اتمسفر مفروض است:

$$10^6 \mu \text{ (پوناز): } \text{H}_2 : 88.4.$$

$$10^6 \mu \text{ (پوناز): دی‌کلرودی‌فلوئورومتان } 124.0$$

ویسکوزیته‌های مخلوط کسر مولی هیدروژن و ۰/۱۵ و ۰/۴۵ را به دست آورید؟

$$\Phi_{11} = \Phi_{22} = 1.0$$

$$\begin{aligned} \Phi_{12} &= \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{2.016}{120.92} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{88.4}{124.0} \right)^{1/2} \left(\frac{120.92}{2.016} \right)^{1/4} \right]^2 \\ &= 3.934 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{21} &= \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{120.92}{2.016} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{124.0}{88.4} \right)^{1/2} \left(\frac{2.016}{120.92} \right)^{1/4} \right]^2 \\ &= 0.0920 \end{aligned}$$