



جلسه سوم

ویسکوزیته مایعات، ویسکوزیته تجربی، ویسکوزیته سر باره،
ویسکوزیته سوسپانسیون

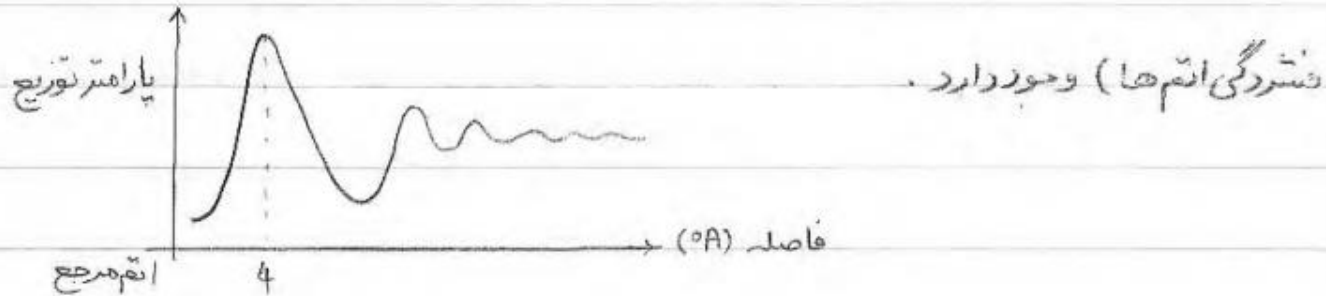


ویسکوزیته مایعات

برای مایعات رابطی کلی وجود ندارد. ساختار مایعات ساختاری بین گازها و جامدات

است. در جامدات هم نظم در فاصله نزدیک (Short range ordering) و هم نظم در فواصل

دور (long range ordering) وجود دارد. اما در مایعات در فاصله نزدیک تا حدودی نظم (یا



گازها هم کاملاً بی نظم هستند.

۵.۱ نظریه مولکولی ویسکوزیته مایعات

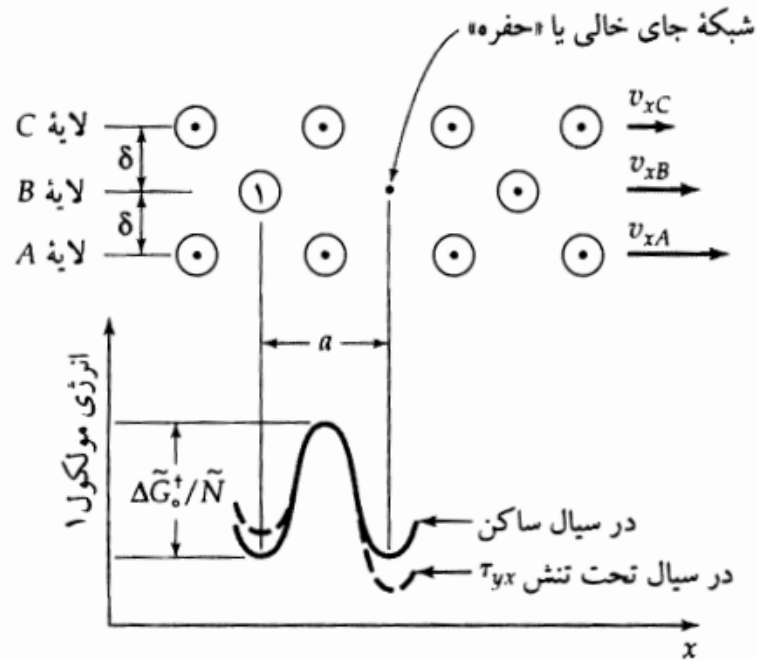
یکی از نظریه‌های دقیق سینتیک خواص انتقال مایعات تک‌اتمی را کرک‌وود و همکارانش پی‌ریزی کردند.^۱ اما این نظریه به نتایجی منتهی نمی‌شود که کاربرد آسان داشته باشند. نظریه‌ای قدیمی‌تر که توسط آیرینگ^۲ و همکارانش پی‌ریزی شده است، اگرچه مبنای نظری سست‌تری دارد، تصویری کیفی از مکانیسم انتقال اندازه حرکت در مایعات ارائه می‌دهد و تخمین ویسکوزیته از روی سایر خواص فیزیکی را، ممکن می‌کند. این نظریه را اجمالاً بررسی می‌کنیم. در مایع خالص در حال سکون، هر مولکول مدام در حرکت است. اما به علت فشردگی، این حرکت عمدتاً به ارتعاش هر مولکول در داخل «قفسی» محدود می‌شود که توسط نزدیک‌ترین همسایگان آن مولکول تشکیل شده است. این قفس توسط یک سد انرژی به ارتفاع $\Delta G^\ddagger / \bar{N}$ نشان داده می‌شود که در آن ΔG^\ddagger انرژی آزاد فعال سازی مولی، برای گریز از قفس در سیال ساکن است (شکل ۱-۵.۱ را ببینید). طبق نظر آیرینگ، مایع در حال سکون به طور پیوسته تجدید آرایش می‌یابد و در آن هر بار یک مولکول از «قفس» خود به «حفره» مجاور می‌گریزد و به این ترتیب مولکول‌ها با جهش‌هایی به مسافت a و بسامد ν در مولکول، در هر یک از امتدادهای مختصات، حرکت می‌کنند. بسامد این حرکت از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\nu = \frac{KT}{h} \exp(-\Delta G^\ddagger / RT) \quad (1-5.1)$$



که در آن K و h ثابت‌های بولتزمن و پلانک، \tilde{N} عدد آووگادرو، و $R = \tilde{N}K$ ثابت گاز است (پیوست (و) را ببینید). در سیالی که با گرادیان سرعت dv_x/dy ، درامتداد x جریان دارد، بسامد تجدید آرایش مولکولی افزایش می‌یابد. این اثر را می‌توان با توجه به تغییر شکل سد انرژی پتانسیل، تحت تنش اعمالی τ_{yx} (شکل ۱-۵.۱) توضیح داد؛ داریم:

$$-\Delta\tilde{G}^\ddagger = -\Delta\tilde{G}_0^\ddagger \pm \left(\frac{a}{\delta}\right) \left(\frac{\tau_{yx}\tilde{V}}{2}\right) \quad (2-5.1)$$



شکل ۱-۵.۱ تصویر فرایند گریز در جریان مایع. مولکول ۱ باید از «گلوگاه» بگذرد تا به جای خالی برسد.

که در آن \tilde{V} حجم یک مول مایع و $\pm(a/\delta)(\tau_{yx}\tilde{V}/2)$ تقریبی از کار انجام شده روی مولکول‌ها در حین حرکت آنها به طرف بالای سد انرژی است، که با تنش برشی اعمالی (علامت به اضافه)، یا برخلاف تنش برشی اعمالی (علامت منهای)، در حرکت است. اکنون ν_+ را به صورت بسامد جهش‌های روبه جلو و ν_- را به عنوان بسامد جهش‌های روبه عقب تعریف می‌کنیم. از معادله‌های (۱-۵.۱) و (۲-۵.۱)، نتیجه می‌شود که:

$$\nu_{\pm} = \frac{KT}{h} \exp(-\Delta\tilde{G}_0^{\ddagger}/RT) \exp(\pm a\tau_{yx}\tilde{V}/2\delta RT) \quad (3-5.1)$$



سرعت خالص لغزش به جلوی مولکول‌های لایه A ، نسبت به مولکول‌های لایه B (شکل ۱-۵.۱) درست برابر مسافت پیموده شده در هر جهش (a) ضرب در بسامد خالص جهش‌های روبه جلو ($\nu_+ - \nu_-$) است، در نتیجه:

$$v_{xA} - v_{xB} = a(\nu_+ - \nu_-) \quad (۴-۵.۱)$$

در فاصله بسیار کوچک δ بین لایه‌های A و B می‌توان توزیع سرعت را خطی فرض کرد، به طوری که:

$$-\frac{dv_x}{dy} = \left(\frac{a}{\delta}\right) (\nu_+ - \nu_-) \quad (۵-۵.۱)$$

سرانجام، با ترکیب معادله‌های (۱-۵.۳ و ۵)، نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} -\frac{dv_x}{dy} &= \left(\frac{a}{\delta}\right) \left(\frac{KT}{h} \exp(-\Delta\tilde{G}_*^+/RT)\right) \left(\exp(+a\tau_{yx}\tilde{V}/2\delta RT) - \exp(-a\tau_{yx}\tilde{V}/2\delta RT)\right) \\ &= \left(\frac{a}{\delta}\right) \left(\frac{KT}{h} \exp(-\Delta\tilde{G}_*^+/RT)\right) \left(2 \sinh \frac{a\tau_{yx}\tilde{V}}{2\delta RT}\right) \end{aligned} \quad (۶-۵.۱)$$



اما وضعیت معمول آن است که $a\tau_{yx}\tilde{V}/2\delta RT \ll 1$. بنابراین می‌توانیم از سری تیلر (بخش ج. ۲) $\sinh x = x + (1/3!)x^3 + (1/5!)x^5 + \dots$ استفاده کنیم و فقط یک جمله را نگه داریم. پس معادله (۶-۵.۱) صورتی نظیر معادله زیر پیدا می‌کند

$$\mu = \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \frac{\tilde{N}h}{\tilde{V}} \exp(\Delta\tilde{G}_*^+/RT) \quad (7-5.1)$$



عامل δ/a را می‌توان برابر واحد گرفت. این ساده‌سازی سبب کاهش دقت نمی‌شود، زیرا $\Delta\tilde{G}_0^\ddagger$ معمولاً به روش تجربی تعیین می‌شود تا معادله‌ها با داده‌های تجربی ویسکوزیته توافق پیدا کنند. معلوم شده که انرژی آزاد فعال‌سازی، $\Delta\tilde{G}_0^\ddagger$ ، که از طریق برازش معادله (۷-۵.۱) با داده‌های تجربی روی نمودار ویسکوزیته برحسب دما تعیین شده‌باشد، برای سیالی مفروض تقریباً ثابت است و به‌سادگی به انرژی داخلی تبخیر در نقطه جوش متعارفی مربوط می‌شود؛ داریم:^۳

$$\Delta\tilde{G}_0^\ddagger \approx 0,408\Delta\tilde{U}_{\text{vap}} \quad (۸-۵.۱)$$



با استفاده از این رابطه تجربی و قرار دادن $\delta/a = 1$ ، معادله (۷-۵.۱) چنین نوشته می‌شود:

$$\mu = \frac{\tilde{N}h}{\tilde{V}} \exp\left(\frac{0.408 \Delta \tilde{U}_{\text{vap}}}{RT}\right) \quad (9-5.1)$$

با استفاده از قاعده تروتون می‌توان انرژی تبخیر در نقطه جوش متعارفی را تخمین زد:

$$\Delta \tilde{U}_{\text{vap}} \approx \Delta \tilde{H}_{\text{vap}} - RT_b \cong 9.4 RT_b \quad (10-5.1)$$

با این تقریب، معادله (۹-۵.۱) چنین نوشته می‌شود:

$$\mu = \frac{\tilde{N}h}{\tilde{V}} \exp\left(\frac{3.78 T_b}{T}\right) \quad (11-5.1)$$



ویسکوزیته بنزن مایع C_6H_6 را در $20^\circ C$ ($293,2K$) تخمین بزنید.

$$\tilde{V} = 89,0 \text{ cm}^3/\text{g-mole} \quad T_b = 80,1^\circ C$$



$$\mu = \frac{(6,023 \times 10^{23})(6,624 \times 10^{-24})}{(19,0)} \exp\left(\frac{3,8 \times (273,2 + 10,1)}{293,2}\right)$$

$$= 4,5 \times 10^{-7} \text{ g/cm} \cdot \text{s} \quad 4,5 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad 0,45 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$



اندازه گیری ویسکوزیته به صورت تجربی

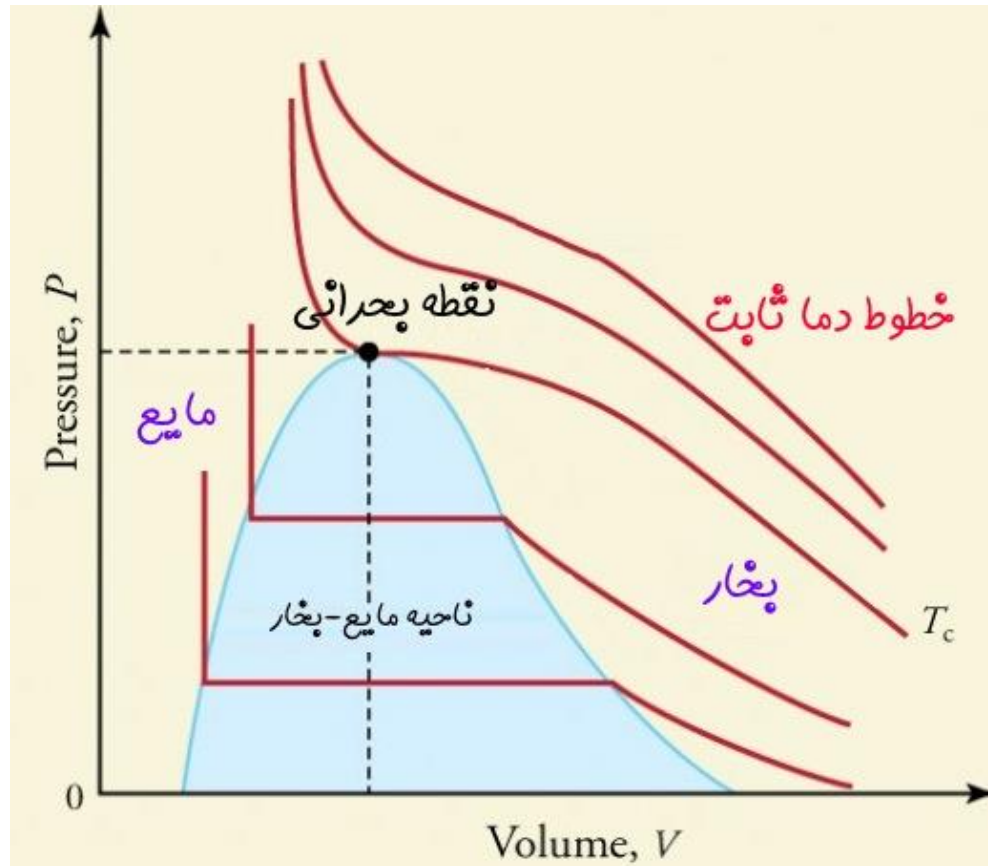
در هندبوک‌های گوناگون علوم و مهندسی، داده‌های فراوانی در مورد ویسکوزیته مایعات و گازهای خالص یافت می‌شود.^۱ در نبود داده‌های تجربی و فرصت کافی برای به دست آوردن آن‌ها، می‌توان با استفاده از روش‌های تجربی و به کارگیری داده‌های دیگری که از ماده مورد نظر در دست است، ویسکوزیته آن را تخمین زد. در این جا یک رابطه همبستگی حالت‌های متناظر را ارائه می‌دهیم که انجام این قبیل تخمین‌ها را ساده می‌کند و روندهای کلی ویسکوزیته با دما و فشار را، برای سیالات عادی نشان می‌دهد. از اصل حالت‌های متناظر، که مبنای محکم علمی دارد^۲ برای برقراری رابطه همبستگی بین معادله حالت و داده‌های ترمودینامیکی استفاده گسترده‌ای می‌شود.

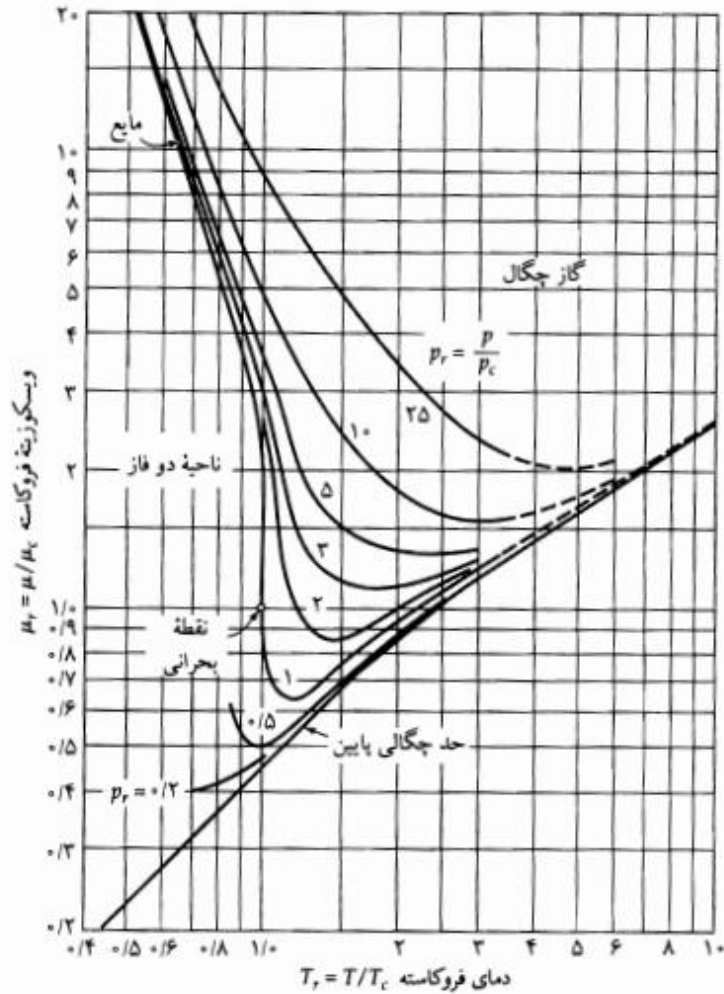
نمودار شکل ۱-۳-۱ چشم‌اندازی کلی از وابستگی فشار و دما را نشان می‌دهد. ویسکوزیته فروکاسته $\mu_r = \mu/\mu_c$ بر حسب دمای فروکاسته $T_r = T/T_c$ ، به ازای مقادیر مختلف فشار فروکاسته $p_r = p/p_c$ ترسیم شده است. کمیت «فروکاسته» کمیتی است که با تقسیم شدن بر کمیت متناظر در نقطه بحرانی، بدون بُعد شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با کم‌تر شدن فشار، ویسکوزیته گاز به مقداری حدی می‌رسد (حد چگالی پایین)؛ برای اغلب گازها، این حد در فشاری نزدیک به ۱ اتمسفر حاصل می‌شود. ویسکوزیته گاز در چگالی پایین، با افزایش دما افزایش می‌یابد، حال آن‌که ویسکوزیته مایع با افزایش دما، کاهش می‌یابد.



نقاط بحرانی

زمانی که در نقطه‌ای بالاتر از نقطه بحرانی قرار داریم، میعان گاز رخ نمی‌دهد. در این نواحی می‌توان فشار یک گاز موجود درون یک محفظه بسته را افزایش داد تا چگالی آن بالا رود ولی هرگز به حالت مایع تبدیل نخواهد شد.





شکل ۱-۳.۱ ویسکوزیته فروکاسته $\mu_r = \mu/\mu_c$ به صورت تابعی از دمای فروکاسته، به ازای مقادیر مختلف فشار فروکاسته.

مقادیر تجربی ویسکوزیته بحرانی را می‌توان به یکی از روش‌های زیر تخمین زد: (۱) اگر مقدار ویسکوزیته در فشار و دمای فروکاسته مفروض، ترجیحاً در شرایطی نزدیک به شرایط موردنظر، معلوم باشد، آنگاه می‌توان μ_c را از رابطه $\mu_c = \mu/\mu_r$ به دست آورد؛ (۲) اگر داده‌های بحرانی p - V - T در دسترس باشند، آنگاه می‌توان μ_c را با

استفاده از روابط تجربی زیر تخمین زد:

$$\mu_c = 61/6 (MT_c)^{1/2} (\bar{V}_c)^{-2/3} \quad , \quad \mu_c = 7/70 M^{1/2} p_c^{2/3} T_c^{-1/6} \quad (\text{ب، الف، ۱-۳.۱})$$

در این روابط μ_c برحسب میکروپوناز، p_c برحسب اتمسفر، T_c برحسب K، و \bar{V}_c برحسب $\text{cm}^3/\text{g-mole}$ است. مقادیر ویسکوزیته بحرانی^۳ که با استفاده از روش (۱) محاسبه شده‌اند، در پیوست (ه) به صورت جدول آمده است.



جدول ۱ - پیوست ه

وزن مولکولی ماده		پارامترهای لشار-جوزن			خواص بحرانی ^{۳۰}				
		σ (Å)	ε/K (K)	Ref.	T_c (K)	p_c (atm)	\bar{V}_c (cm ³ /g-mole)	$\mu_c \times 10^6$ (g/cm · s)	$k_c \times 10^6$ (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	۲۶,۰۴	۴,۱۱۴	۲۱۲	(د)	۳۰۸,۷	۶۱,۶	۱۱۲,۹	۲۳۷	-



تخمین ویسکوزیته از روی خواص بحرانی
مطلوب است تخمین ویسکوزیته N_2 در دمای 5°C و فشار 854 اتمسفر، هرگاه بدانیم
 $T_c = 126,2 \text{ K}$ و $p_c = 35,5 \text{ atm}$ ، $M = 28,0 \text{ g/g-mole}$.

با استفاده از معادله (۱-۳.۱) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned}\mu_c &= 7,70(28,0)^{1/2}(33,5)^{2/2}(126,2)^{-1,6} \\ &= 189 \text{ یوناز} = 189 \times 10^{-6} \text{ میکرویوناز} \quad (3-3.1)\end{aligned}$$

دما و فشار فروکاسته عبارت‌اند از:

$$T_r = \frac{273,2 + 50}{126,2} = 2,56; \quad p_r = \frac{854}{33,5} = 25,5 \quad (4-3.1 \text{ الف، ب})$$

از شکل ۱-۳.۱، نتیجه می‌شود: $\mu_r = \mu/\mu_c = 2,39$. بنابراین مقدار پیش‌بینی شده برای ویسکوزیته برابر است با:

$$\mu = \mu_c(\mu/\mu_c) = (189 \times 10^{-6})(2,39) = 452 \times 10^{-6} \text{ یوناز} \quad (5-3.1)$$



تخمین ویسکوزیته گاز چگال. ویسکوزیته نیتروژن در 68°F و 1000 psig را با استفاده از شکل ۱-۳.۱ تخمین بزنید!

جدول ۱ - پیوست ه

ماده	وزن مولکولی M	پارامترهای لنارد-جوزنز			خواص بحرانی ^{۲۰}				
		σ (\AA)	ϵ/K (K)	Ref.	T_c (K)	p_c (atm)	\bar{V}_c ($\text{cm}^3/\text{g-mole}$)	$\mu_c \times 10^6$ ($\text{g/cm} \cdot \text{s}$)	$k_c \times 10^6$ ($\text{cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$)
عناصر سبک									
H _۲	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 _۲	۲۸,۰۱۳	۳,۶۶۷	۹۹,۸	(ب)	۱۲۶,۲	۳۳,۵	۹۰,۱	۱۸۰	۸۶,۸
O _۲	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 _۲	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 _۲ O	۴۴,۰۱۲	۳,۸۷۹	۲۲۰	(الف)	۳۰۹,۷	۷۱,۷	۹۶,۳	۳۳۲	۱۳۱
SO _۲	۶۴,۰۶۵	۴,۰۲۶	۳۶۳	(ج)	۴۳۰,۷	۷۷,۸	۱۲۲	۴۱۱	۹۸,۶
F _۲	۳۷,۹۹۷	۳,۶۵۳	۱۱۲	(الف)	-	-	-	-	-
Cl _۲	۷۰,۹۰۵	۴,۱۱۵	۳۵۷	(الف)	۴۱۷	۷۶,۱	۱۲۴	۴۲۰	۹۷,۰
Br _۲	۱۵۹,۸۰۸	۴,۲۶۸	۵۲۰	(الف)	۵۸۴	۱۰۲	۱۴۴	-	-
I _۲	۲۵۳,۸۰۹	۴,۹۸۲	۵۵۰	(الف)	۸۰۰	-	-	-	-
هیدروکربنها									
CH _۴	۱۶,۰۴	۳,۷۸۰	۱۵۴	(ب)	۱۹۱,۱	۴۵,۸	۹۸,۷	۱۵۹	۱۵۸
CH _۲ ≡ CH	۲۶,۰۴	۴,۱۱۴	۲۱۲	(د)	۳۰۸,۷	۶۱,۶	۱۱۲,۹	۲۳۷	-



- $PSIA = PSIG + \text{فشار اتمسفر}$

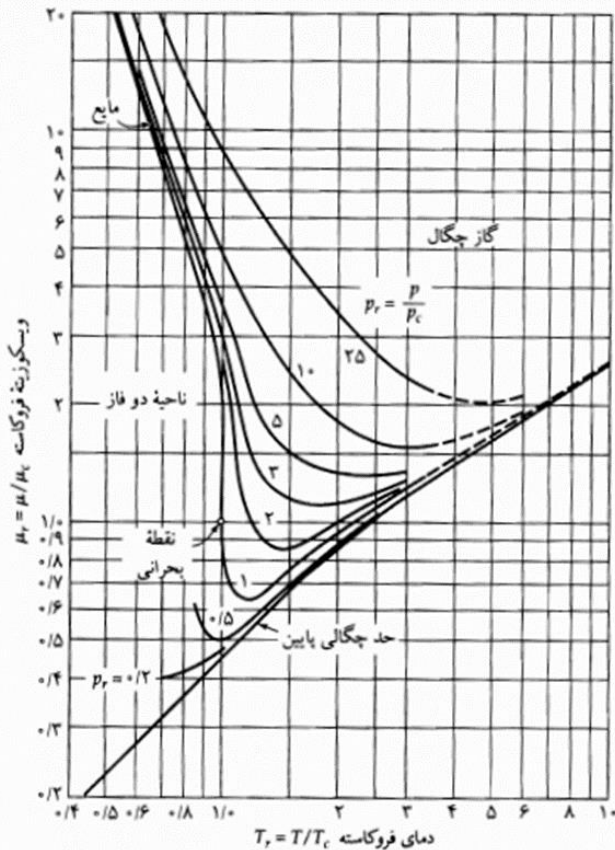
پوند بر اینچ مربع (psi)	تور (Torr)	اتمسفر (atm)	اتمسفر فنی (at)	بار (bar)	پاسکال (Pa)	
$10^{-6} \times 145.04$	$10^{-3} \times 7.5006$	$10^{-6} \times 9.8692$	$10^{-5} \times 1.0197$	10^{-5}	N/m^2 1 \equiv	Pa 1
14.504	750.06	0.98692	1.0197	dyn/cm^2 $10^6 \equiv$	100,000	bar 1
14.223	735.56	0.96784	kgf/cm^2 1 \equiv	0.980665	98,066.5	at 1
14.696	760	atm 1 \equiv	1.0332	1.01325	101,325	atm 1
$10^{-3} \times 19.337$	Torr; 1 \equiv \approx 1 mmHg	$10^{-3} \times 1.3158$	$10^{-3} \times 1.3595$	$10^{-3} \times 1.3332$	133.322	torr 1
lbf/in^2 1 \equiv	51.715	$10^{-3} \times 68.046$	$10^{-3} \times 70.307$	$10^{-3} \times 68.948$	6,894.76	psi 1



$T_c = 126.2 \text{ K}$, $p_c = 33.5 \text{ atm}$, and $\mu_c = 180 \times 10^{-6} \text{ g/cm}\cdot\text{s}$

$$p_r = p/p_c = (1000 + 14.7)/33.5 \times 14.7 = 2.06$$

$$T_r = T/T_c = (273.15 + (68 - 32)/1.8)/126.2 = 2.32$$



شکل ۱-۳-۱ ویسکوزیته فروکاسته
 $\mu_r = \mu/\mu_c$ به صورت تابعی از دمای
 فروکاسته، به ازای مقادیر مختلف فشار فروکاسته.



$$\mu_r = 1.15.$$

از روی نمودار داریم

$$\mu = \mu_r \mu_c = 1.15 \times 180 \times 10^{-6} = 2.07 \times 10^{-4} \text{ g/cm}\cdot\text{s}$$



ویسکوزیته سر باره

سر باره ها، جذاب جاتی هستند که فازهای اکسیدی دارند.

اکسیدها سه دسته اند: اکسیدهای اسیدی - اکسیدهای قلیائی - اکسیدهای آفوترو

اکسیدهای اسیدی معروف: SiO_2 - P_2O_5 - As_2O_3

اکسیدهای قلیائی معروف: آهک (CaO) ، MgO ، Na_2O . این اکسیدها دهنده

یون اکسید هستند . اما اکسیدهای اسیدی گیرنده یون اکسید هستند . (کپیکس O^{-2} →)

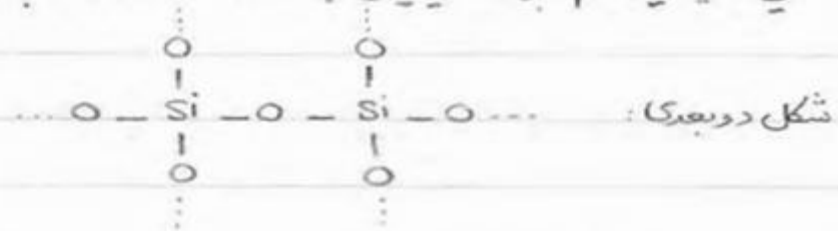
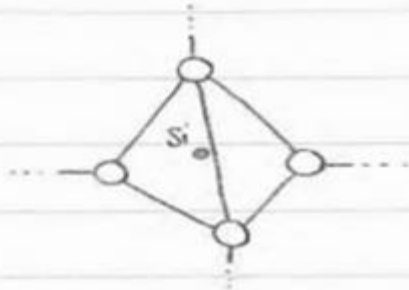


آفوتروهای معروف: PbO ، Al_2O_3 . بنا به محیطی که در آن قرار می گیرند رفتار اسیدی

سرپاره‌ها، سیالیت خیلی کمی دارند. SiO_2 : $\mu = 1.5 \times 10^5 \text{ Poise } (T=1940^\circ\text{C})$

سیلیس

این سیالیت کم برای سیلیس به ساختار آن مربوط می‌شود:



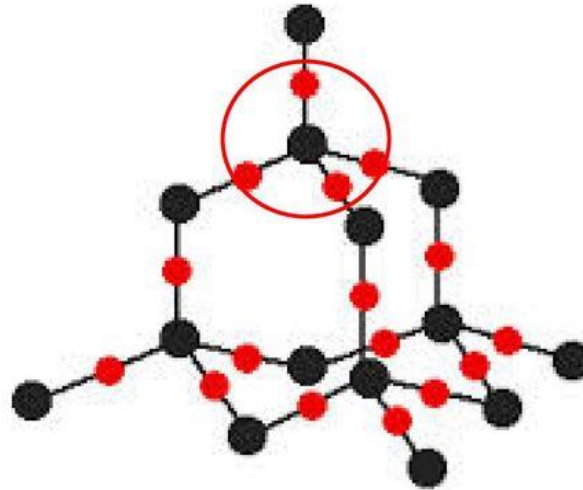
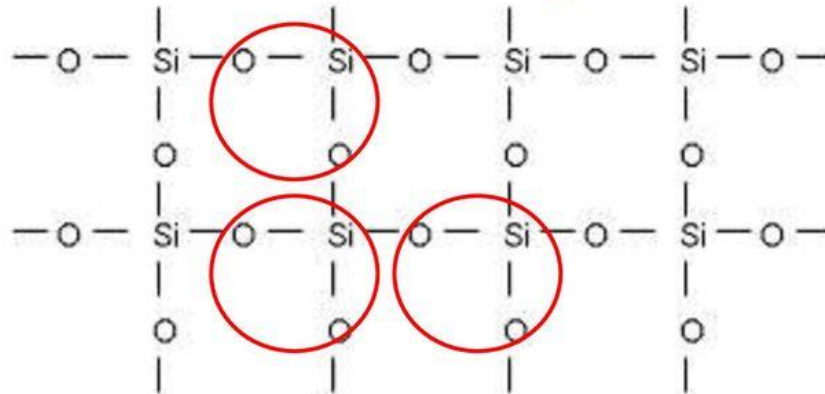
در فواصل نزدیک نظم زیاد است. هم چنین پیوندهای بین Si و O نیز خیلی مستحکم است

و برای اینکه یک اتم بتواند حرکت کند، کل شبکه می‌خواهد حرکت کند این مطلب برای SiO_2

خاص است.

Silicon dioxide (SiO₂)

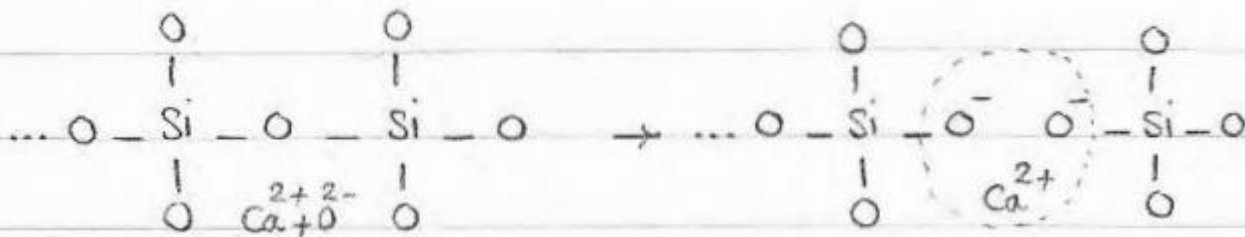
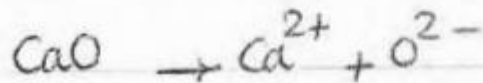
- SiO₂ repeating unit as every oxygen links in with a second Si atom
- Structurally think tetrahedral, SiO₄



وقتی CaO وارد شبکه ی SiO_2 می شود، سیالیت زیاد می شود و هر چه مقدار CaO بیشتر

← شود، سیالیت هم زیاد می شود. زیرا CaO وقتی اضافه می شود، تجزیه

می شود. (بدلیل اختلاف شعاع اتمی و هم چنین بار بیشتر نسبت به Si-O)



ویسکوزیته سوسپانسیون

- تا اینجا در مورد سیالاتی بحث کردیم که از یک فاز همگن تشکیل شده اند. اکنون می خواهیم سیستم های سوسپانسیون را نیز به اجمال بررسی کنیم.
- غالباً می توان سوسپانسیون را با یک سیستم تک فاز فرضی جایگزین کرد، سپس این سیستم را می توان با استفاده از ویسکوزیته نیوتن با دو تغییر توصیف کرد.
 - (۱) به جای ویسکوزیته از ویسکوزیته موثر استفاده کنیم
 - (۲) از مولفه های سرعت و تنش متوسط استفاده کنیم



سوسپانسیون رقیق

نخستین سهم مهم در پی‌ریزی نظریه ویسکوزیته سوسپانسیون‌های کره‌ها از آن انشتین است.^۲ او سوسپانسیونی

را که از کره‌های صلب در نظر گرفت چنان رقیق بود که در آن حرکت یک کره در جریان سیال درهمسایگی هر کره دیگر تأثیر نمی‌گذاشت. در این صورت کافی بود که فقط حرکت سیال را دور یک کره تحلیل کند و آثار ناشی از کره‌های مختلف را باهم جمع کند. معادله انشتین چنین است:

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_0} = 1 + \frac{5}{2} \phi$$

که در آن μ_0 ویسکوزیته محیط سوسپانسیون و ϕ کسر حجمی کره‌هاست.



- مایع سوسپانسونی داریم که ویسکوزیته موثر آن برابر $1/0.05$ poise هست. درصد کسر حجمی ذرات معلق در محیط سوسپانسیون چقدر باید باشد تا ویسکوزیته محیط سوسپانسیون 1 poise باشد؟



سوسپانسیون غلیظ

برای سوسپانسیون‌های غلیظ ذرات کروی (یعنی ϕ بزرگ‌تر از حدود 0.5) برهم‌کنش‌های ذرات درخور اعتنا می‌شود. چندین عبارت نیمه‌تجربی مطرح شده‌است که یکی از ساده‌ترین آن‌ها معادلهٔ مونی است:^۷

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_0} = \exp\left(\frac{\frac{5}{4}\phi}{1 - (\phi/\phi_0)}\right)$$

که در آن ϕ_0 ثابتی تجربی، بین حدود 0.74 و 0.52 است

