المحاضرة 2

عندما يحتوي الغاز على مكثفات غازية أي على نسبة من المركبات الثقيلة، يتم حساب الكثافة من خلال العلاقة المترابطة بين الكثافة الظاهرية المصغرة ومعامل الانضغاط الحرج الوسطي:

$$\rho_{(t,p)} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{i=n} X_{iMi}\right)\rho_r}{\sum_{i=1}^{i=n} X_i V_{cri}} \qquad (2\text{-}32)$$

يتم حساب الكثافة الظاهرية ρ_r من خلال العلاقة التي أوجدها العالم (Veksa):

$$\rho_r = 1.20 + (5.563 - 11.03\bar{z}_{cr})(1 - T_r)^{0.8\bar{z}_{cr}+0.31} \qquad (2\text{-}33)$$

حيث أن:

$\bar{z}_{cr}$. معامل الانضغاط الحرج الوسطي ويحسب على الشكل:

$$\bar{z}_{cr} = \sum_{i=1}^{i=n} X_i z_{cri} \qquad (2\text{-}34)$$

z_{cri} . معامل الانضغاط الحرج للمركب في i وتعطى قيمه بجداول خاصة أو يمكن حسابه من خلال العلاقة التي توصل إليها العالم (Gana):

$$z_{cri} = 0.2918 - 0.0928\omega_i \qquad (2\text{-}35)$$

أما الحجم المولي الحرج فيمكن الحصول عليه من خلال العلاقة:

$$V_{cri} = \frac{z_{cri} . R . T_{cri}}{P_{cri}} \qquad (2\text{-}36)$$

يمكن تلخيص خطوات تحديد الكثافة في حال تواجد المركبات الثقيلة كما يلي:

$$P_{cr.c7+} \rightarrow T_{cr.c7+} \rightarrow \frac{T_{cr.c7+}}{T_{b0}} \rightarrow \omega_{c7+} \rightarrow$$
$$z_{cr.c7+} \rightarrow \bar{z}_{cr} \rightarrow V_{cr.c7+} \rightarrow \bar{V}_{cr} \rightarrow \bar{P}_{cr} \rightarrow$$
$$\bar{T}_{cr} \rightarrow P_r \rightarrow T_r \rightarrow \rho_r \rightarrow \sum X_{iMi} \rightarrow \rho_{(p,t)}$$

مثال 2-2: يطلب تحديد كثافة المزيج (غاز–كوندسات) اعتماداً على القيم المصغرة للضغط والحرارة مستخدماً علاقة الكثافة المصغرة مع معامل انضغاط الغاز الحرج علماً أن التركيب بالنسبة المولية عند الضغط $P = 7Mpa$ ودرجة الحرارة $T = 399.8k^\circ$ كما هو مبين أدناه:

$$\rho_{c7+} = 0.8838 \quad , \quad M_{c7+} = 295$$

المركب	x_i	$x_i P_{cri}$	$x_i T_{cri}$	$x_i V_{cri}$	$x_i z_{cri}$	$x_i M_i$
CH_4	0.22006	10.08	41.90	21.90	0.0640	3.52
C_2H_6	0.02130	1.03	6.51	3.15	0.0061	0.64
C_3H_8	0.01270	0.54	4.70	2.54	0.0035	0.56
i-C_4H_{10}	0.01240	0.46	5.04	3.26	0.0035	0.72
n-C_4H_{10}	0.00815	0.47	3.47	2.08	0.0022	0.47

i-C_5H_{10}	0.00770	0.25	3.55	2.37	0.0021	0.56
n-C_5H_{10}	0.00446	0.15	2.10	1.39	0.0012	0.32
C_6H_{14}	0.00783	0.23	4.00	2.88	0.0021	0.67
C_7H_{16}+	0.70523	9.41	546.00	705.23	0.1480	208.00
N_2	0.00017	0.06	0.02	0.01	0.0001	0
المجموع	1.00000	22.68	617.29	744.81	0.2328	215.47

الحل: اعتماداً على العلاقتين (2-20) و(2-21) نجد:

$$P_{cr.c7+} = 0.1\left(\frac{3750}{295}\right)\left(\frac{0.8838}{0.8}\right) = 1.335\,\text{Mpa}$$

$$T_{cr.c7+} = \left(353.5 + 22.35.295^{\frac{1}{2}}\right)\left(\frac{0.8838}{0.8}\right)^{\frac{1}{2}} = 775\,\text{k}$$

وحسب العلاقة (2-16):

$$\frac{T_{cr.c7+}}{T_{b0}} = 2.1898 - 0.1735\left(\frac{775}{100}\right) + 0.006854\left(\frac{775}{100}\right)^2 = 1.26$$

$$\omega_{c7+} = \frac{3}{7}\left[\frac{\mathbf{lg}13.35}{(1.26-1)}\right] - 1 = 0.855$$

$$z_{cr.c7+} = 0.2918 - 0.0928\times 0.855 = 0.21$$

$$V_{cr.c7+} = \frac{0.21\times 82.057\times 775}{13.35} = 1000\,\text{CM}^3/\text{mol}$$

$$T_r = 399.8/617.29 = 0.647$$

$$\rho_r = 1.20 + (5.563 - 11.03\times 0.2328)(1-0.647)^{0.8.0.2328+0.31} = 2.99$$

$$\rho_{(p,t)} = 215.46\times 2.99/744.81 = 0.863\,\text{gr/cm}^3 = 0.863\times 10^3\,\text{kg/M}^3$$

2-4- لزوجة الغازات Gases Viscosity:

اللزوجة هي صفة للسوائل والغازات، حيث تبدي مقاومة لحركة (انزلاق) الجزيئات بالنسبة لبعضها البعض. كما هو معروف وحسب قانون نيوتن، فإن قوى الاحتكاك الداخلي التي تظهر عند تحرك طبقة من السائل أو الغاز بالنسبة لطبقة أخرى تتناسب مع تدرج السرعة بالنسبة للمسافة ومع مساحة سطح التماس بين هاتين الطبقتين. وهذا ما يعبر عنه رياضياً بالشكل:

$$F = \mu.S.\frac{dw}{dx} \qquad (2\text{-}37)$$

حيث أن: μ . معامل اللزوجة الديناميكية Pa.s .

S . مساحة سطح التماس M^2.

$\frac{dw}{dx}$. تدرج السرعة بالاتجاه العمودي على سطح التماس $\frac{MS^{-1}}{M}$.

أثناء الحسابات كثيراً ما تستخدم اللزوجة التحريكية، وهي حاصل قسمة اللزوجة الديناميكية على كثافة الغاز في شروط الضغط والحرارة.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \qquad (2\text{-}38)$$

تتعلق لزوجة الغاز الطبيعي بقيم الضغط والحرارة وبتركيب الغاز. ويتم تحديدها إما حسابياً أو بيانياً.

حسابياً، يمكن تحديد قيمة لزوجة الغازات الطبيعية غير معروفة التركيب باستخدام علاقة الارتباط بين الكثافة المصغرة واللزوجة عند الضغوط الأقل من 5 Mpa.

$$\left[(\mu-\mu_0)\varepsilon+10^{-4}\right]^{\frac{1}{4}} = 0.10230+0.023364\rho_r+0.058533\rho_r^2- \\ -0.040758\rho_r^3+0.0093324\rho_r^4 \qquad (2\text{-}39)$$

تستخدم هذه العلاقة من أجل قيم الكثافة $0.1 \le \rho_r \le 3.0$.

حيث أن: μ , μ_0 . اللزوجة الديناميكية للغازات الطبيعية (mpa.s) عند قيم الضغط P و $P_0 = 0.1013Mpa$ وبدرجة الحرارة tc° .

$$\varepsilon = T_{cr}^{\frac{1}{6}} / M^{\frac{1}{2}} . P_{cr}^{2/3} \qquad (2\text{-}40)$$

من أجل الضغوط الأكبر من 5 Mpa، يتم حساب اللزوجة من العلاقة:

$$(\mu-\mu_0)\varepsilon = 10.8\times10^{-5}\left(e^{1.439\rho_r} - e^{-1.111\rho_r^{1.858}}\right) \qquad (2\text{-}41)$$

يمكن حساب μ_0 من العلاقة:

$$\mu_0 = 0.0101t^{\frac{1}{8}} - 5.76\times10^{-3} M_{mix}^{\frac{1}{2}} \qquad (2\text{-}42)$$

أو من العلاقة:

$$\mu_0 = 0.0101t^{\frac{1}{8}} - 1.07\times10^{-3} \rho_{mix}^{\frac{1}{2}} \qquad (2\text{-}43)$$

إن قيمة الخطأ المرتكب أثناء الحساب باستخدام العلاقتين (2-42) و(2-43) لا تتجاوز 5% وذلك ضمن الشروط: $12 \le M_{mix} \le 100$ و $283 \le T \le 477\,k^\circ$.

يمكن تلخيص ترتيب حساب لزوجة الغازات على الشكل التالي:

$$\rho_{mix} \to P_{cr} \to P_r \to T_{cr} \to T_r \to z \to \omega_{mix} \to \\ z_{cr} \to z_r \to \rho_r \to M_{mix} \to \varepsilon \to \mu_0 \to \mu_{p,t}$$

عندما يحتوي الغاز الطبيعي على الآزوت بنسبة أكبر من 5%، فإنه من الضروري أخذ تأثيره على قيمة اللزوجة بالاعتبار:

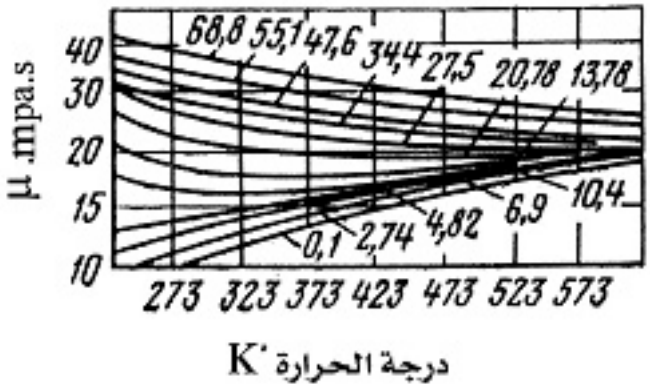
$$\mu_{mix} = y_a . \mu_a + (1-y_a)\mu_y \qquad (2\text{-}44)$$

حيث أن:

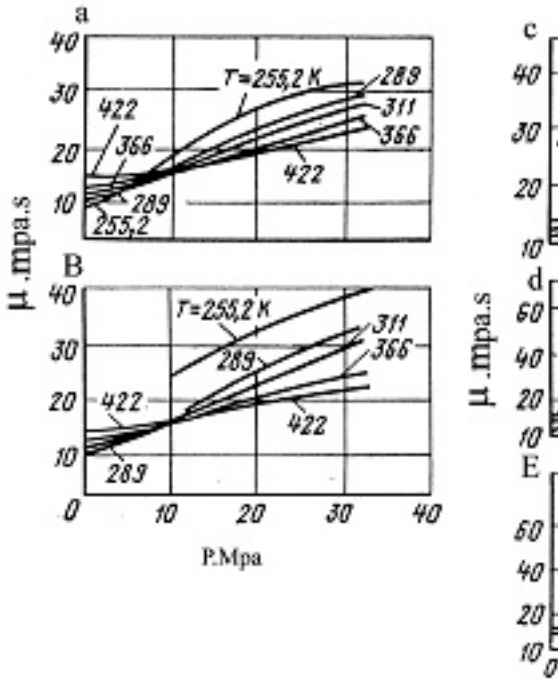
y_a . النسبة المولية للآزوت في المزيج الغازي.

μ_y . اللزوجة الديناميكية للمركبات العضوية في المزيج.

تبين الأشكال (2-4) و(2-5) قيم اللزوجة الديناميكية للميتان وللغازات الطبيعية مختلفة الكثافة النسبية وللآزوت بالعلاقة من درجة الحرارة والضغط.



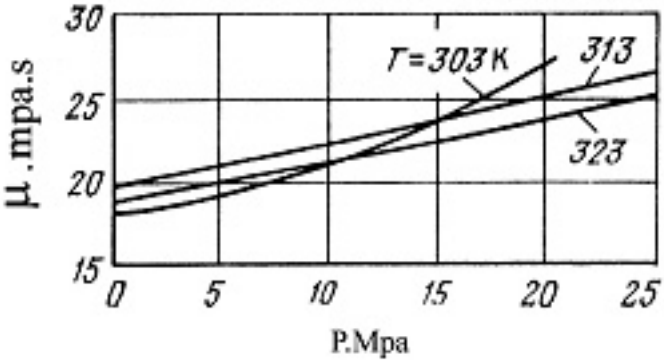
الشكل (2-4) لزوجة غاز الميتان بالعلاقة مع الضغط ودرجة الحرارة.



الشكل (2-5) اللزوجة الديناميكية للغازات الطبيعية مختلفة الكثافة النسبية بالعلاقة مع الضغط ودرجة الحرارة.

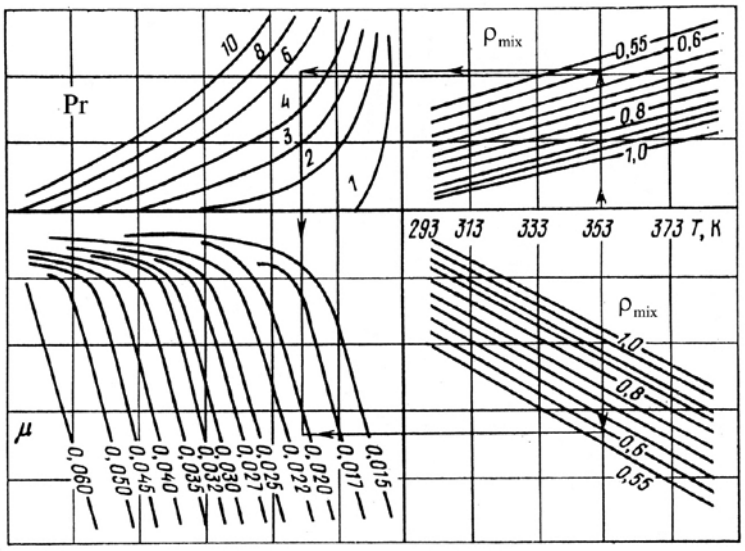
قيم الكثافة:

a – 0.6 , B – 0.7 , C – 0.8 , d – 0.9 , E – 1.0



الشكل (2-6) اللزوجة الديناميكية لغاز الآزوت بالعلاقة مع الضغط ودرجة الحرارة.

يمكن تحديد لزوجة المزيج الغازي مجهول التركيب بيانياً من خلال المخطط المرسوم من قبل العالم (EbraGemov) وذلك بمعرفة الكثافة النسبية ρ_{mix}. الشكل (2-7).



الشكل (2-7) مخطط EbraGemov لتحديد لزوجة الغازات الطبيعية

بالنسبة للمكثفات الغازية يمكن تحديد لزوجتها بشكل تقريبي من العلاقة التجريبية التي وضعها العلماء موتاليبون وشوبانا:

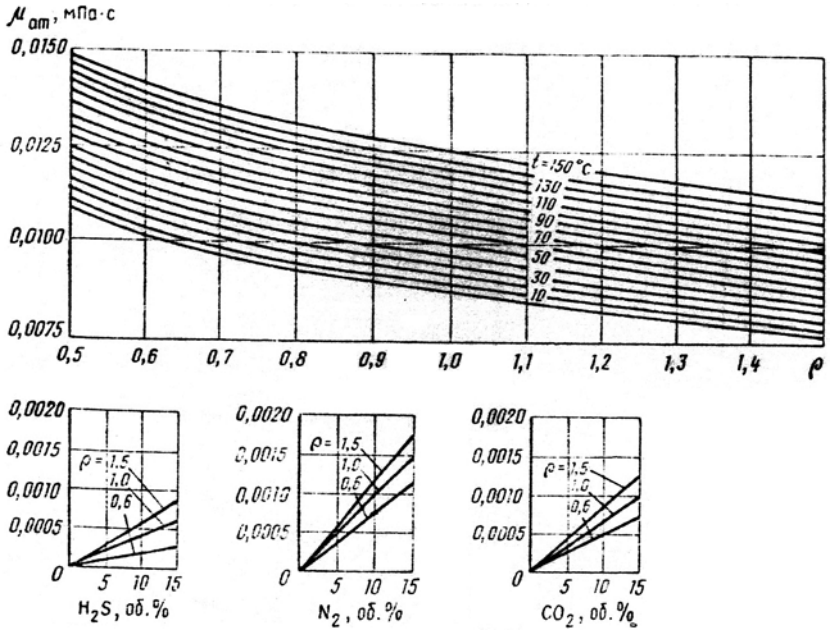
$$\mu_k = \left(\frac{100}{t}\right)^{\frac{3}{4}} \left(0.34 + 4.10^{-4}\,\frac{P}{P_0}\right) \qquad (2\text{-}45)$$

وذلك عند الشروط:

$$30 \le t \le 200\,C^{\circ}$$
$$0.1 \le P \le 50\,Mpa$$

وهناك طريقة بيانية أخرى لتحديد لزوجة الغازات، حيث يتم العمل وفق هذه الطريقة على مرحلتين:

تُحدد قيمة اللزوجة عند درجة الحرارة المطلوبة والضغط الجوي μ_{at} ومن ثم تحول إلى شروط الضغط المطلوب. الشكل (2-8) يبين علاقة μ_{at} مع الكثافة النسبية عند درجات حرارة مختلفة. إن قيم اللزوجة الحصول عليها بحاجة إلى تصحيح في حال وجود مركبات لاعضوية N_2, CO_2, H_2S وذلك من المخططات الموجودة على الشكل (2-8).



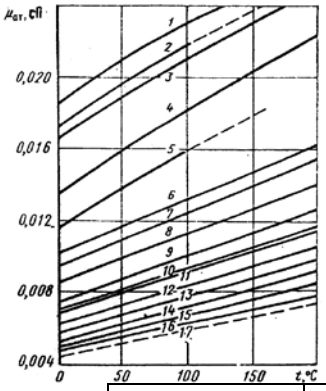
الشكل (2-8) لزوجة الغازات الهيدروكربونية بالعلاقة مع الكثافة النسبية وعوامل التصحيح للمركبات اللاعضوية.

يمكن حساب قيمة μ_{at} عند معرفة تركيب الغاز من العلاقة:

$$\mu_{a+} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_i X_i \sqrt{M_i}}{\sum_{i=1}^{n} X_i \sqrt{M_i}} \qquad (2\text{-}46)$$

X_i , M_i , μ_i . النسبة المولية أو الحجمية والكتلة المولية واللزوجة للمركب i في المزيج.

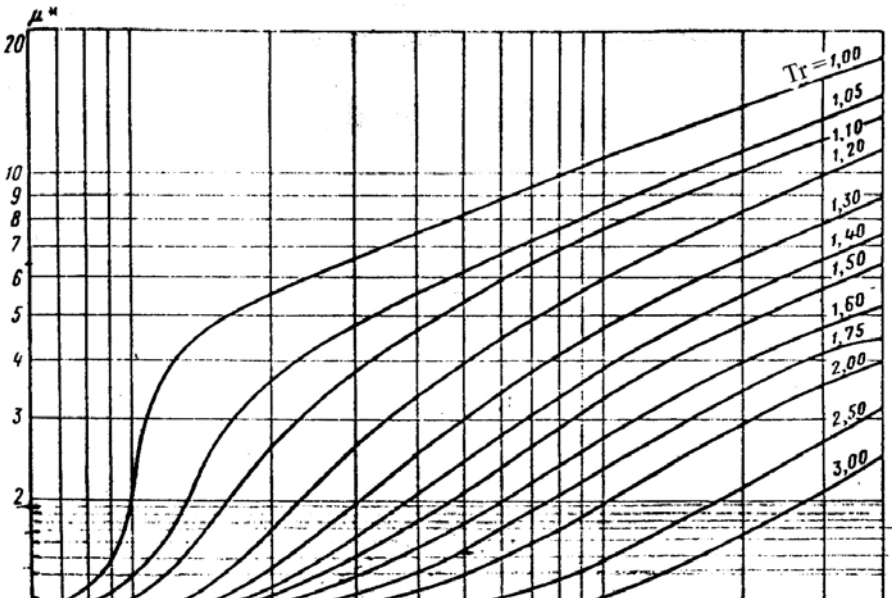
تحدد μ_i للمركبات للغازات من الشكل (2-9).



الشكل (2-9) لزوجة الغازات بالعلاقة مع درجة الحرارة عند الضغط الجوي

1− هيليوم	2− هواء	3− آزوت	CO_2 −4	H_2S −5
CH_4 −6	C_2H_4 −7	C_2H_8 −8	C_3H_8 −9	i C_4H_{10} −10
n-C_4H_{10} −11	n-C_5H_{12} −12	n-C_6H_{14} −13	n-C_7H_{16} −14	n-C_8H_{18} −15
n-C_9H_{20} −16	n-$C_{10}H_{22}$ −17			

بعد تحديد قيمة اللزوجة عند الضغط الجوي ودرجة الحرارة t يتم حساب القيم الحرجة والمصغرة للضغط والحرارة، ومن ثم تحدد قيمة μ^* التي تمثل النسبة $\mu^* = \frac{\mu}{\mu_{at}}$ من الشكل (2-10).



الشكل (2-10) قيم النسبة μ^* بالعلاقة مع القيم المصغرة للضغط والحرارة.

2-5- السعة الحرارية للغازات:

تعرف السعة الحرارية للغاز بأنها نسبة كمية الحرارة المعطاة للغاز إلى تغيير درجة حرارته. وغالباً ما يستخدم مفهوم السعة الحرارية النوعية، التي يُعبر عنها بنسبة السعة الحرارية إلى كمية الغاز (الكتلية أو المولية) وتقدر بالواحدات:

$$j/kg\,.C^\circ \quad , \quad k.cal/kg\,.C^\circ \quad , \quad k.cal/g\,.C^\circ$$

نستخدم في الحسابات العملية السعة الحرارية الكتلية أو المولية عند ضغط ثابت C_p أي:

$$C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_p \qquad (2\text{-}47)$$

وتحدد قيمتها بالعلاقة:

$$C_p = C_p^\circ + \Delta C_p \ldots \qquad (2\text{-}48)$$

حيث أن: C_p° – السعة الحرارية عند الضغط الجوي ودرجة الحرارة t.

ΔC_p – عامل تصحيح يأخذ بالاعتبار تأثير تغير الضغط.

يمكن حساب قيمة C_p° للمزيج الغازي المكون من عدة مركبات بالعلاقة:

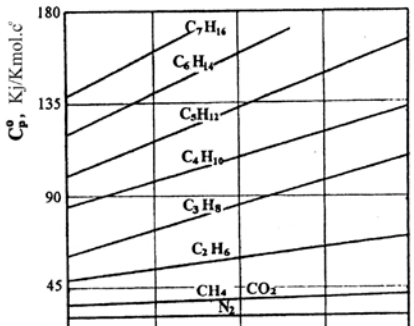
$$C_{p\,mix}^\circ = \sum_{i=1}^{n} y_i \,.\, C_{pi}^\circ \qquad (2\text{-}49)$$

y_i – النسبة المولية للمركب i في المزيج.

أما قيمة C_{pi}° فيمكن حسابها رياضياً بالعلاقة:

$$C_{pi}^\circ = 0.523(8.36 + 0.00892\,t)\,M_i^{3/4} \;\; kj/(k\,mol.k) \qquad (2\text{-}50)$$

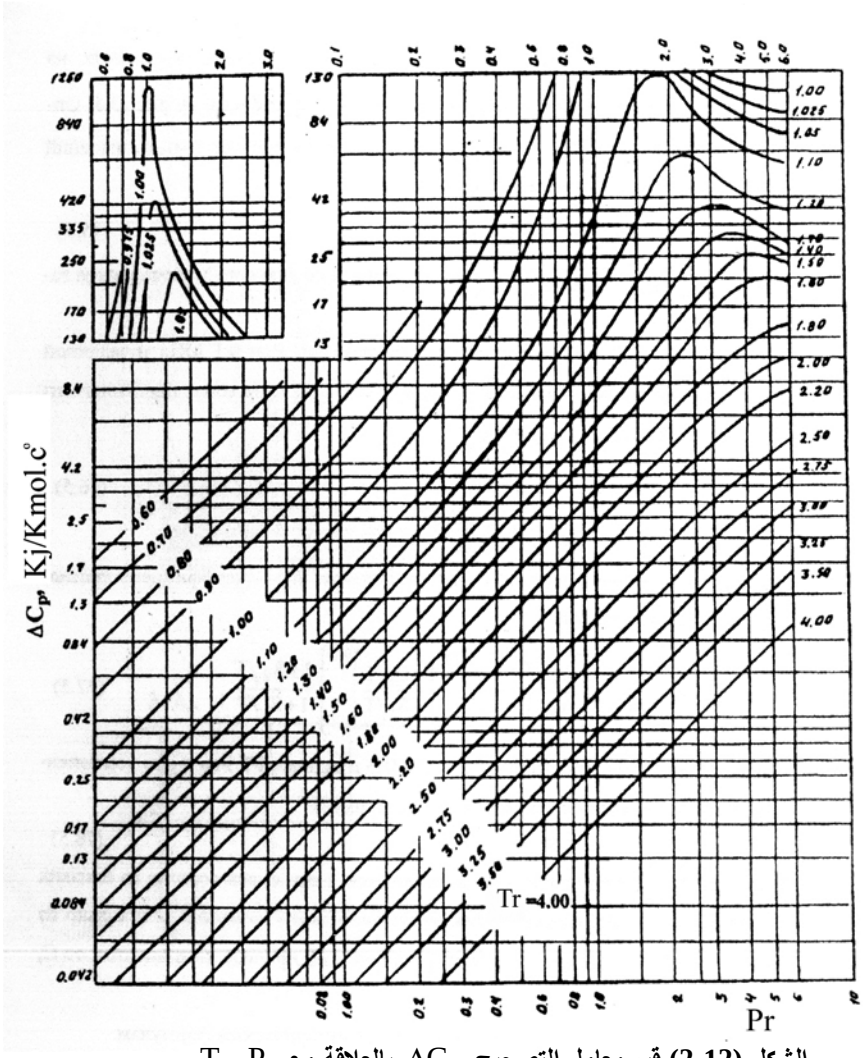
أو بيانياً من الشكل (2-11):



الشكل (2-11) السعة الحرارية
المولية للغازات الهيدروكربونية
بالعلاقة مع درجة الحرارة عند الضغط الجوي.

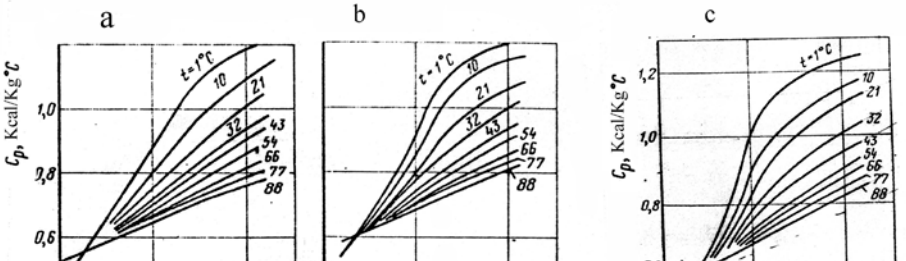
عندما يحتوي المزيج الغازي على مركبات غير هيدروكربونية (N_2, CO_2, H_2S) فيمكن اعتبار قيمة سعتها الحرارية المولية مساوية لنصف السعة المولية للمركبات الهيدروكربونية المشابهة لها بالكتلة المولية. فمثلاً السعة الحرارية المولية لغاز البروبان والمحسوبة من العلاقة (4-50) تساوي ضعف السعة الحرارية المولية لغاز CO_2 المساوي له بالكتلة المولية.

تحدد قيمة معامل التصحيح ΔC_p بالعلاقة مع القيم المصغرة للضغط والحرارة T_r, P_r من خلال الشكل (2-12).



الشكل (2-12) قيم معامل التصحيح ΔC_p بالعلاقة مع T_r, P_r

عند عدم معرفة تركيب المزيج الغازي، فإن السعة الحرارية تُحدد بالعلاقة مع الكثافة من أجل قيم الضغط والحرارة المطلوبة. الشكل (2-13).



الشكل (2-13) علاقة السعة الحرارية للغاز الطبيعي بدرجة الحرارة والضغط

$a : \rho = 0.6 \quad , \quad b : \rho = 0.65 \quad , \quad c : \rho = 0.7$

وضع العلماء الاختصاصيون العديد من العلاقات الرياضية لحساب السعة الحرارية وأشهرها علاقة ناغارييفا:

$$C_p = \left(3.15 - 0.02203T - 0.149 \times 10^{-4}.T^2 + \frac{0.238\,M.P^{1.124}}{(T/100)^{5.08}} \right) \qquad (2\text{-}51)$$

2-6- انفلات الغاز (معامل جول وتومسن):

خلال عمليات إنتاج الغاز الطبيعي يجري الغاز عبر تضيقات (اختناقات) في مقاطع التجهيزات (فالات . صمامات...إلخ)، مما يؤدي إلى تغيرات في الضغط، ويرافق ذلك تغيرات في درجة الحرارة، يسبب ضياع قسم من الطاقة للتغلب على قوى التجاذب بين جزيئات الغاز دون أن يحدث تبادل حرارة أو عمل مع الوسط الخارجي.

إن تغير درجة حرارة الغاز عند انخفاض قيمة الضغط بمقدار واحد ضغط جوي يسمى بمعامل جول وتومسن أو معامل التمدد الاديباتي، ويتعلق هذا المعامل بقيم الضغط والحرارة وتركيب الغاز، حيث تتغير قيمته في مجال واسع.

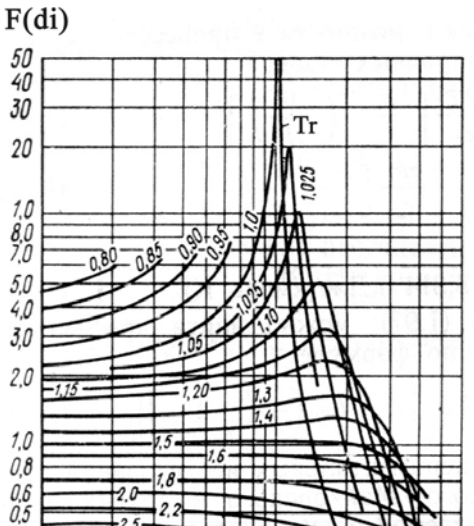
تحسب قيمة معامل جول وتومسن للغاز الطبيعي بالعلاقة التالية:

$$di = \frac{T_{cr}.F(di)}{P_{cr}.C_p} \qquad (2\text{-}52)$$

حيث أن:

C_p – السعة الحرارة $k\,cal/k\,mol.C^\circ$.

$F(di)$ – معامل تحدد قيمته من الشكل (2-14).



الشكل (2-14) قيمة المعامل $F(di)$ بالعلاقة مع القيم المصغرة للضغط والحرارة.

يمكن حساب قيمة $F(di)$ رياضياً من العلاقة:

$$F(di) = 1.44\left[V_r - T_r\left(\frac{\partial V_r}{\partial T_r}\right)_{P_r}\right] \qquad (2\text{-}53)$$

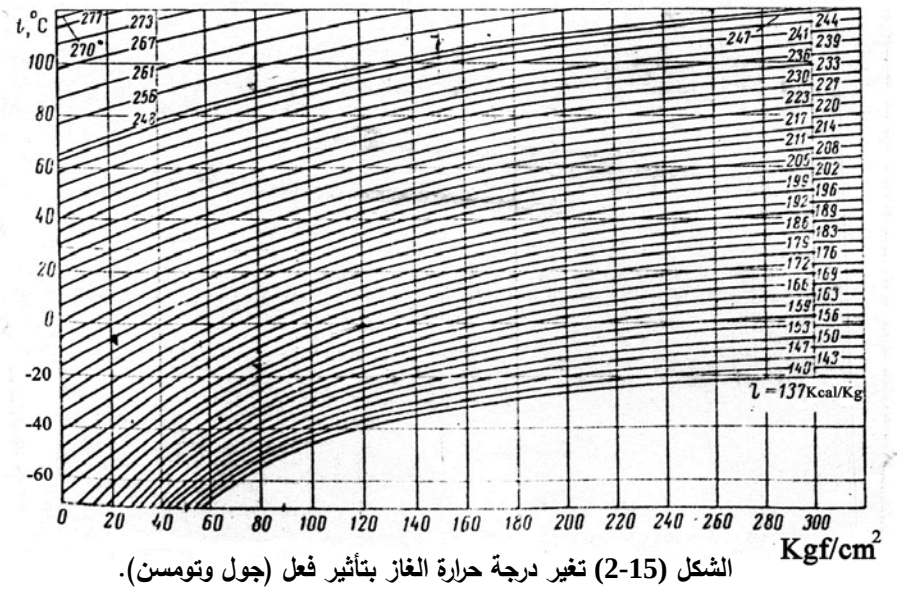
ومن أجل قيم الضغط والحرارة المصغرة الواقعة ضمن المجالات: $\begin{matrix} 0.8 \le P_r \le 3.5 \\ 1.6 \le T_r \le 2.1 \end{matrix}$ فإنه من الممكن وبدقة كافية تحديد $F(di)$ بالعلاقة:

$$F(di) = 2.343 \times T_r^{-2.04} - 0.071(P_r - 0.8) \qquad (2\text{-}54)$$

V_r – الحجم المصغر للغاز ويساوي $\frac{V}{V_{cr}}$.

عملياً، من المهم تحديد درجة حرارة الغاز بعد الانفلات، ويتم ذلك باستخدام المنحنيات الخاصة والموضحة بالشكل (2-15) حسب الخطوات التالية:

- تحديد النقطة التي تمثل الشروط الأولية (P_1, T_1) قبل الانفلات.
- رسم خط منحني مساير للمنحنيات الموجودة حتى يتقاطع مع قيمة الضغط بعد الانفلات P_2.
- نسقط نقطة التقاطع على محور درجة الحرارة فنحصل على درجة حرارة الغاز بعد الانفلات.



الشكل (2-15) تغير درجة حرارة الغاز بتأثير فعل (جول وتومسن).

إن استخدام الشكل (2-15) من أجل تحديد درجة الحرارة بعد انفلات الغاز يتطلب معرفة قيمة الانتالبية، لذلك ومن أجل السهولة فقد وضع الباحثون علاقات تجريبية تعطي نتائج مرضية من الناحية العملية، وأكثرها استخداماً، علاقة شيركوفسكي:

$$\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}=\frac{3.57\times P_r^{0.25}}{\overline{C_p}\,T_{r_1}}\times \left[0.005\times10^{-3}\ln\frac{P_1}{P_2}+0.29\times10^{-7}(P_1^2-P_2^2)-2.09\times10^{-7}(P_1-P_2)\right] \qquad (2\text{-}58)$$

حيث أن: $P_r=\frac{(P_1+P_2)}{2P_{cr}}\ ,\ T_{r_1}=\frac{T_1}{T_{cr}}\ ,\ \overline{C_p}=C_p(\overline{P_r},T_{r_1})$

أظهرت القياسات العملية أن القيمة الوسطية لمعامل جول وتومسن بالنسبة للغازات الطبيعية هي بحدود k°/Mpa (2-4) وذلك بالعلاقة مع تركيب الغاز ومقدار انخفاض الضغط ودرجة الحرارة الابتدائية.

مسألة:

احسب السعة الحرارية المولية وقيمة مفعول جول وتومسن لمكمن غاز كوندسات من أجل القيم التالية للضغط والحرارة:

$$P=156\ ,\ 80\ ,\ 60\ ,\ 40\ ,\ 20\ ,\ 10\ \ kgf/cm^2$$

$$t=50\ \ ,\ 10\ \ ,\ -20\ \ C^\circ$$

علماً أن تركيب الغاز الحجمي بالنسبة المئوية على الشكل التالي:

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2
92.5	4.0	1.1	0.52	0.26	0.12	2

الحل:

من أجل قيم الضغط والحرارة $t=50\ C^\circ\ ,\quad P=156\ \ kgf/cm^2$

$$M_{mix}=\sum X_iM_i=19.88$$

$$\bar{\rho}=\frac{M_{mix}}{M_a}=\frac{17.56}{29}$$

$$P_{cr}=47.2\,kgf/cm^2 \qquad T_{cr}=197\,k^\circ$$

$$P_r=3.3 \qquad T_r=1.64$$

بتطبيق العلاقة (2-51) نجد:

$$C_p=3.15+0.022\times323-0.149\times10^{-4}\times323^2+ +\frac{0.238\times17.56\times156^{1.124}}{(323/100)^{5.08}}=11.88$$

لحساب معامل جول وتومسون نطبق العلاقة (2-54):

$$F(d_i)=3.15+0.022\times1.64^{-2.04}-0.071(3.3-0.8)=0.72$$

$$d_i = \frac{0.72 \times 197}{11.88 \times 47.2} = 0.253\ C^\circ / kgf = 2.53 k / M.p.a$$

يقوم الطالب بإجراء بقية الحسابات من أجل القيم الأخرى للضغط والحرارة.

مسألة:

عُرِّض غاز أحد المكامن الغازية لانخفاض ضغط والمطلوب:

1- أحسب درجة الحرارة t_2 بعد الانفلات.

2- القيمة الوسطية لمعامل جول وتومسن.

إذا علمت أن:

$$P_1 = 8 Mpa \quad , \quad T_1 = 318.3 k^\circ \quad , \quad P_2 = 6,4,3,2,1 Mpa$$

والتركيب الحجمي بالنسبة المئوية على النحو التالي:

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_6H_{14}	CO_2
82.76	9.68	3.23	1.29	0.42	0.14	2.48

الحل:

$$M_{mix} = 19.88 \quad , \quad P_{cr} = 4.67 Mpa \quad , \quad T_{cr} = 208.5 k^\circ$$

$$\overline{P} = \frac{(8+6)}{2} = 7 Mpa \quad , \quad \overline{P_r} = \frac{7}{4.67} = 1.5$$

$$C_p = 3.15 + 0.022 \times 318.3 - 0.149 \times 10^{-4} \times 318.3^2 +$$

$$+ \frac{0.238 \times 19.88 \times 70^{1.124}}{(318.3/100)^{5.08}} = 10.2$$

$$\frac{1}{318.3} - \frac{1}{T_2} = \frac{3.57 \times 1.5^{0.25}}{10.2 \times 1.53} \times$$

$$\left[0.005 \times 10^{-3} \times 2.3 \ln \frac{80}{60} + 0.29 \times 10^{-7} (80^2 - 60^2) - 209 \times 10^{-7} (80 - 60) \right]$$

$$= -1 / 11750$$

$$T_2 = 318.3 \times 11750 / 12068 = 310 k^\circ = 37 C^\circ$$

$$\Delta T_p = t_1 - t_2 = 45.3 - 37 = 8.3 C^\circ$$

$$\overline{d_i} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{8.3}{(8-6)} = 4.15 C^\circ / Mpa$$