REAL QAZLARIN DROSSELLƏNMƏSİNƏ DAİR

C.Y. NAZİYEV
Azərbaycan Dövlət Neft Akademiyası
370012, Bakı, Azadlıq pr., 20

Klauzius hal tənliyinə tabe olan real qazın axması zamanı adiabatik drossellənməyə baxılıb. Qazın kritik parametrləri, inversiya temperaturu və inversiya əyrisinin maksimal parametrləri təyin edilib.

Qazların və mayelərin drossellənməsi (əzilməsi) məsələsi termodinamikada xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Texnikanın bir çox sahələrində drossellənmədən geniş istifadə edilir: soyuducu maşınlarda, kriogen qurğularında, daxili yanma mühərriklərində, buxar və qaz turbinlərində, reaktiv mühərriklərdə, raket texnikasında, qaz borularında və i.a.

Bu, baxımdan hər bir real qazın drossellənddikdə özünü necə aparmasını həm nəzəri, həm də praktiki cəhətdən öyrənmək vacibdir.

Drossellənmə adiabatik və dönməyən prosesdir [1-3]. Ümumiyyətlə, o zərərli hadisədir. Çünki axma zamanı qaz mexaniki müqavimətdən keçir. Lakin texnikada ondan səmərəli istifadə edirlər.

Drossellənmə zamanı ideal qazın temperaturu dəyişmir. Amma real qaz drossellənddikdə o qıza da bilər, soyuya da bilər və onun temperaturu sabit da qala bilər. Bu qazın təbiətindən və onun başlanğıc parametrlərindən asılıdır.

Ədəbiyyatdan məlumdur ki, Klauzius hal tənliyi belədir [4]

$$\left[p-\frac{a}{T(\upsilon+c)^2}\right](\upsilon-b)=RT\,, \tag{1}$$

burada p – qazın təzyiqi; T – temperaturu; υ - xüsusi həcmi; a,b,c – tənliyin sabitləridir.

Tənlikdən istifadə etmək üçün onu aşağıdakı şəkildə yazmaq əlverişlidir

$$p=\frac{RT}{\upsilon-b}-\frac{a}{T(\upsilon+c)^2}\,. \tag{2}$$

Maddənin kritik (böhran) halının şərtlərindən istifadə edərək Klauzius qazının kritik parametrlərini (p_k, υ_k, T_k) təyin edək.

Kritik şərtə görə

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \upsilon}\right)_T=0;\quad \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \upsilon^2}\right)_T=0\,. \tag{3}$$

(2) tənliyindən $T=const$ halında birinci və ikinci törəmələri alaq

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \upsilon}\right)_T=-\frac{RT}{(\upsilon-b)^2}+\frac{2a}{T(\upsilon+c)^3}=0 \tag{4}$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial \upsilon^2}\right)_T=\frac{2RT}{(\upsilon-b)^3}-\frac{6a}{T(\upsilon+c)^4}=0 \tag{5}$$

(4) asılılığını (5)-ə bölsək alarıq ki,

$$\frac{\upsilon-b}{2}=\frac{\upsilon+c}{3} \tag{6}$$

buradan

$$\upsilon_k=3b+2c. \tag{7}$$

İndi (4) bərabərliyindən T_k-i tapaq

$$T_k^2=\frac{2a(\upsilon_k-b)^2}{R(\upsilon_k+c)^3}=\frac{8a}{27R(b+c)}\,.$$

Onda

$$T_k=\sqrt{\frac{8a}{27R(b+c)}}=\frac{2}{3}\sqrt{\frac{2a}{3R(b+c)}}\,. \tag{8}$$

(2) tənliyindən p_k-ı tapmaq olar

$$p_k=\frac{RT_k}{\upsilon_k-b}-\frac{a}{T_k(\upsilon_k+c)^2}\,. \tag{9}$$

Məlum T_k və υ_k-in qiymətlərini (7) və (8) ifadələrindən (9) tənliyinə qoysaq alarıq

$$p_k=\frac{a}{18(b+c)^2\sqrt{\dfrac{2a}{3R(b+c)}}}\,. \tag{10}$$

İndi, əksinə, *a, b* və *c* sabitlərini kritik parametrlərlə ifadə edək.

Köməkçi düsturlardan istifadə edək. Təyin edə bilərik ki,

$$T_k p_k=\frac{a}{27(b+c)^2}\,, \tag{11}$$

$$\frac{T_k}{p_k}=\frac{8(b+c)}{R}\,. \tag{12}$$

(7), (11) və (12) asılılıqlarından təyin etmək olar

$$c=\frac{3RT_k}{8p_k}-\upsilon_k\,, \tag{13}$$

$$b=\upsilon_k-\frac{RT_k}{4p_k}\,, \tag{14}$$

$$a=\frac{27R^2T_k^3}{64p_k}\,. \tag{15}$$

Universal tənlik üçün çox vacib olan kritik sıxılma əmsalını tapaq

$$z_k = \frac{p_k \upsilon_k}{RT_k} = \frac{3b+2c}{8(b+c)} = \frac{3}{8} - \frac{c}{8(b+c)}. \qquad (15,a)$$

İndi də Klauzius qazının drossellənməsinə baxaq. Axının termodinamikasından məlumdur ki, qaz drosselləndikdə onun temperaturu aşağıdakı qanunla dəyişir

$$dT = \frac{T\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial T}\right)_p - \upsilon}{c_p} dp, \qquad (16)$$

burada c_p – qazın izobar istilik tutumudur, $c_p>0$.

(16) tənliyini təhlil edək. Drossellənmədə həmişə təzyiq düşür, $dp<0$ olur. Deməli, temperaturun keyfiyyətcə dəyişməsi $[T(\partial\upsilon/\partial T)_p-\upsilon]$ kəmiyyətinin işarəsindən asılı olacaq, çünki $c_p>0$. Kəsrin surəti mənfi olsa $dT>0$, deməli drosselləndikdə qaz qızacaq; müsbət olsa $dT<0$, yəni qaz soyuyacaq; əgər surət sıfra bərabər olsa $dT=0$, deməli drossellənmədən sonra qazın temperaturu dəyişməz. Üçüncü halı texnikada bilmək çox vacibdir. Bu hala qazın inversiyası deyilir, temperatur isə inversiya temperaturu adlanır. Diaqramlarda inversiya əyrisi temperaturun dəyişməsinin sərhəd əyrisi olur.

İnversiya əyrisinin tənliyi (16) tənliyindən alınır.

$$T\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial T}\right)_p - \upsilon = 0. \qquad (17)$$

Bəzən inversiya əyrisinin tənliyi kimi identik tənlik götürülür

$$T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\upsilon + \upsilon\left(\frac{\partial p}{\partial \upsilon}\right)_T = 0. \qquad (18)$$

Alçaq təzyiqlər üçün (atmosfer təzyiqi ətrafında) inversiya temperaturunu tapaq.

(2) tənliyinə belə forma verək

$$p\upsilon = pb + RT - \frac{a(\upsilon-b)}{T(\upsilon+c)^2}. \qquad (19)$$

$p=const$ şəklində bu tənliyi differensiallayaq və (17) ifadəsində nəzərə alaraq

$$T\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial T}\right)_p - \upsilon = \frac{RT^2(\upsilon+c)^3 + a(\upsilon-b)(\upsilon+c) - p\upsilon T(\upsilon+c)^3 + a\upsilon(\upsilon-2b-c)}{pT(\upsilon+c)^3 - a(\upsilon-2b-c)} = 0.$$

(19) tənliyindən $p\upsilon$-nin qiymətyini burada yerinə yazaq

$$T\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial T}\right)_p - \upsilon = \frac{-pbT(\upsilon+c)^3 + 3a\upsilon^2 - 4a\upsilon b + a\upsilon c - 2abc}{pT(\upsilon+c)^3 - a(\upsilon-2b-c)} = 0. \qquad (20)$$

Alçaq təzyiqlər üçün $p=RT/\upsilon$ yazaq

$$T\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial T}\right)_p - \upsilon = \frac{-RT^2 b(\upsilon+c)^3/\upsilon + 3a\upsilon^2 - 4a\upsilon b + a\upsilon c - 2abc}{RT^2(\upsilon+c)^3/\upsilon - a(\upsilon-2b-c)} =$$
$$= \frac{-RT^2 b + 3a\upsilon^3/(\upsilon+c)^3 - (4a\upsilon b - a\upsilon c + 2abc)\upsilon/(\upsilon+c)^3}{RT^2 - a(\upsilon-2b-c)\upsilon/(\upsilon+c)^3} = 0. \qquad (21)$$

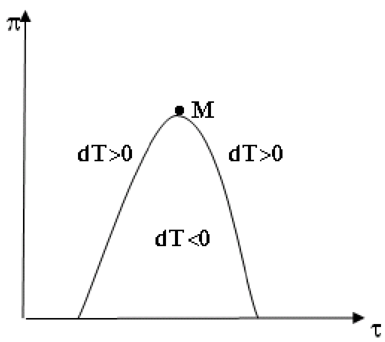
Kiçik təzyiqlərdə qəbul edək ki, $p\to 0$, $1/\upsilon\to 0$, onda (21) ifadəsi sadələşər; eyni zamanda $\upsilon^3/(\upsilon+c)^3\approx 1$ olduğundan

$$T\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial T}\right)_p - \upsilon = \frac{-RT^2 b + 3a\frac{\upsilon^3}{(\upsilon+c)^3}}{RT^2} = 0,$$

$$-b \approx \frac{3a}{RT^2}, \qquad T_{inv}^2 \approx \frac{3a}{Rb}, \qquad (22)$$

$$T_{inv} \approx \sqrt{\frac{3a}{Rb}} \approx 3{,}21 T_k.$$

İnversiya tənliyinə (17) görə pT diaqramında inversiya əyrisi temperatur azaldıqca əvvəl yuxarı qalxır, sonra maksimum nöqtəni M keçərək azalmağa başlayır (şəkil 1).



Şəkil π-τ koordinatlarında göstərilib, haradakı π və τ uyğun olaraq gətirilmiş təzyiq və temperaturdur.

Əgər qazın halı əyri içərisindəki sahəyə düşərsə o drossellәndikdә soyuyar, әyridәn xaricdәki sahәyә düşәrsә o qızar, әyri üzәrinә düşәrsә qazın temperaturu dәyişmәz. Belәliklә, әyrinin tәyini xüsusi әhәmiyyәt kәsb edir.

(19) tәnliyindәn birinci törәmәni alsaq (p=const)

$$\left[p-\frac{a\upsilon}{T(\upsilon+c)^3}+\frac{a(2b+c)}{T(\upsilon+c)^3}\right]\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial T}\right)_p=R+\frac{a\upsilon}{T^3(\upsilon+c)^2}-\frac{ab}{T^2(\upsilon+c)^2}. \quad (23)$$

İkinci törәmәni alaq ($p=const$)

$$\left[p-\frac{a(\upsilon-2b-c)}{T(\upsilon+c)^3}\right]\cdot\left(\frac{\partial^2\upsilon}{\partial T^2}\right)_p+\left[\frac{2a(\upsilon-3b-2c)}{T(\upsilon+c)^4}\right]\cdot\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial T}\right)_p^2+\left[\frac{2a(\upsilon-2b-c)}{T^2(\upsilon+c)^3}\right]\cdot\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial T}\right)_p+\frac{2a(\upsilon-b)}{T^3(\upsilon+c)^2}=0. \quad (24)$$

(23) bәrabәrliyini sadәlәşdirәk. Qәbul edәk ki, $p(\partial\upsilon/\partial T)_p=R$. Onda (23)-dәn alarıq

$$\frac{2a(\upsilon-2b-c)}{T^2(\upsilon+c)^3}\cdot\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial T}\right)_p=\frac{-2a(\upsilon-b)}{T^3(\upsilon+c)^2} \quad (25)$$

Bu qiymәti (24) tәnliyindә nәzәrә alaq

$$\left[p-\frac{a(\upsilon-2b-c)}{T(\upsilon+c)^3}\right]\cdot\left(\frac{\partial^2\upsilon}{\partial T^2}\right)_p+\left[\frac{2a(\upsilon-3b-2c)}{T(\upsilon+c)^4}\right]\cdot\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial T}\right)_p^2=0 \quad (26)$$

(26) ifadәsindәn istifadә etmәk üçün inversiyanın tәnliyindәn әlavә şәrti alaq. (17) tәnliyindәn T vә p-yә görә törәmә alaq.

$$T\left(\frac{\partial^2\upsilon}{\partial T^2}\right)+\left[T\left(\frac{\partial^2\upsilon}{\partial T\partial p}\right)-2\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial p}\right)_T\right]\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{inv}=0 \quad (27)$$

İnversiya әyrisinin maksimum şәrtinә görә $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{inv}=0$; demәli $\left(\frac{\partial^2\upsilon}{\partial T^2}\right)$ da sıfır olacaq. Bunu (26) ifadәsindә nәzәrә alsaq ikinci hәdd dә sıfır olacaq.

(17) tәnliyindәn inversiya şәrtinә görә $\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial T}\right)_p=\frac{\upsilon}{T}$; $\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial T}\right)^2=\frac{\upsilon^2}{T^2}$, demәli

$$\frac{2a(\upsilon-3b-2c)}{T(\upsilon+c)^4}=0$$

olar.

Buradan

$$\upsilon_{max}=3b+2c=\upsilon_k. \quad (28)$$

T_{max} temperaturunu tapmaq üçün (18) tәnliyindәn istifadә edәk. Tәnliyin ikinci hәddini (4) tәnliyindәn alaq

$$\upsilon\left(\frac{\partial p}{\partial\upsilon}\right)_T=-\frac{RT\upsilon}{(\upsilon-b)^2}+\frac{2a\upsilon}{T(\upsilon+c)^3}. \quad (29)$$

(18) tәnliyinin birinci hәddini (2) tәnliyini υ=const şәrtindә differensialladıqda almaq olar

$$T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\upsilon=\frac{RT}{\upsilon-b}+\frac{a}{T(\upsilon+c)^2}. \quad (30)$$

Onda

$$T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\upsilon+\upsilon\left(\frac{\partial p}{\partial\upsilon}\right)_T=\frac{-RTb}{(\upsilon-b)^2}+\frac{a(3\upsilon+c)}{T(\upsilon+c)^3}=0.$$

Buradan

$$T_{\max}^2=\frac{4a(9b+7c)}{27Rb(b+c)}=T_k^2\,\frac{9b+7c}{2b}.$$

Bellәiklә,

$$T_{\max}=\sqrt{\frac{9b+7c}{2b}}\cdot T_k \quad (31)$$

Maksimal tәzyiqi (20) tәnliyindәn almaq olar

$$-pbT(\upsilon+c)^3+a(3\upsilon^2-4\upsilon b+\upsilon c-2bc)=0,$$

$$p_{\max}=\frac{a\left(3\upsilon_{\max}^2-4\upsilon_{\max}b+\upsilon_{\max}c-2bc\right)}{bT_{\max}(\upsilon_{\max}+c)^3}.$$

T_{max} vә υ_{max}-un qiymәtlәrini yerinә yazsaq alarıq

$$p_{\max}=\frac{2p_k}{3b}(15b+14c)\sqrt{\frac{9b}{2(9b+7c)}}\approx 7{,}1p_k\left(1+\frac{c}{b}\right)\sqrt{\frac{9b}{9b+7c}}. \quad (32)$$

υ_{max}, T_{max} vә p_{max}-u bilәrәk z_{max}-u tәyin etmәk olar

$$z_{\max} = \frac{p_{\max} \cdot \upsilon_{\max}}{RT_{\max}} = \frac{(15b + 14c)(3b + 2c)}{4(b + c)(9b + 7c)} . \tag{33}$$

[1] V.A. Kirillin, V.V. Sıçev, A.E. Şeyndlin. Texniçeskaya termodinamika. M.: Enerqiya. 1968. 472 s. (Rusca).

[2] E.E. Şpilrayn, P.M. Kesselman. Osnovı teorii teplofiziçeskix svoystv veşşestv. M.: Enerqiya. 1977. 248 s. (Rusca).

[3] S.O. Hüseynov, Y.M.Naziyev. Termodinamika (axının termodinamikası). Bakı. AzPİ. 1981. 53 s.

[4] Obzorı po teplofiziçeskim svoystvam veşşestv. M.: İVTAN. 1986. №1, 57, 127 s. (Rusca).

Дж.Я. Назиев

О ДРОССЕЛИРОВАНИИ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

В статье рассмотрено дросселирование реальных газов, подчиняющихся уравнению Клаузиуса. Определены критические параметры газа и максимальные параметры кривой инверсии.

J.Y. Naziyev

ON THROTTLİNG OF REAL GASES

The throttling of real gases, submitted to Klauzius equation is considered in the given paper. The critical gas parameters and maximal parameters of inversion curve are defined.

Received: 16.09.06