ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 104 Energetyka z. 14 1964

ANTONI GUZIK

Katedra Energetyki Cieplnej

EGZERGIA TERMICZNA GŁÓWNYCH SKŁADNIKÓW POWIETRZA W TEMPERATURACH ZBLIŻONYCH DO BEZWZGLĘDNEGO ZERA

Streszczenie. Podano ogólne zasady wyznaczania egzergii termicznej strumienia substancji w temperaturach zbliżonych do bezwzględnego zera. Dla głównych składników powietrza sporządzono wykresy egzergii przy umownych parametrach odniesienia. Podano równania zezwalające na przeliczenie wartości odczytanej z wykresu na dowolne warunki otoczenia.

1. Egzergia termiczna strumienia jednorodnej substancji w temperaturach zbliżonych do bezwzględnego zera

W rozwijającej się coraz bardziej technice niskich temperatur może zajść potrzeba określenia egzergii substancji w temperaturach zbliżonych do bezwzględnego zera.

Egzergię termiczną strumienia jednorodnej substancji określa równanie:

$$b_t = i - i_{ot} - T_{ot}\,(s - s_{ot}) \tag{1}$$

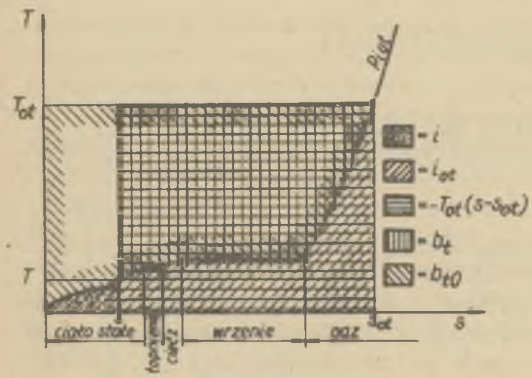
gdzie:

i, s - entalpia i entropia rozważanej substancji mającej parametry T, p,

i_{ot}, s_{ot} - entalpia i entropia substancji w stanie równowagi termodynamicznej z otoczeniem (mającej temperaturę otoczenia i ciśnienie $p_{i\,ot}$ zgodne z ciśnieniem składnikowym w otoczeniu),

T_{ot} - bezwzględna temperatura otoczenia.

Graficzną interpretację równania (1) przedstawiono w układzie (T,s) na rysunku 1. Uwzględniono izobaryczno-izotermiczne zmiany stanu skupienia oraz izobaryczno-izotermiczne przemiany alotropowe w krystalicznym stanie stałym.



Rys. 1

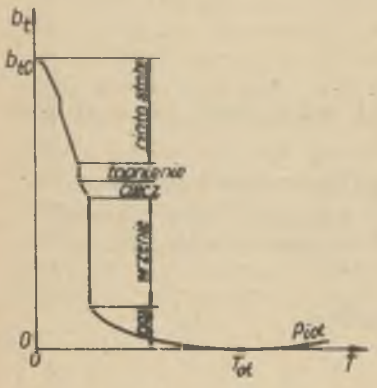
W celu określenia egzergii $b_{t\,0}$ w temperaturze bezwzględnego zera można przyjąć, że entalpia i_0 i entropia s_0 w tej temperaturze mają dowolną wartość lub prościej, są równe zero. Wówczas z równania (1) uzyskuje się [4]

$$b_{t\,0} = T_{ot}\ s_{ot} - i_{ot} \qquad (2)$$

gdzie:

s_{ot}, i_{ot} - właściwa entropia i entalpia liczona od stanu w temperaturze 0 °K.

Z równania (2) wynika, że egzergia w temperaturze 0 °K ma wartość skończoną, zależną jedynie od temperatury T_{ot} otoczenia, entropii s_{ot} i entalpii i_{ot} w stanie równowagi termodynamicznej rozważanej substancji z otoczeniem.



Rys. 2

Na wykresie entropowym (T,s) egzergię $b_{t\,0}$ przedstawia pole zawarte pomiędzy izotermą T_{ot} a izobarą $p_{i\,ot}$ (rys. 1). W oparciu o wykres (T,s) można sporządzić wykres (b_t,T) (rys. 2) dla założonej wartości temperatury otoczenia i ciśnienia $p=p_{i\,ot}$. W zakresie stanów skondensowanych przy niezbyt wysokich ciśnieniach wpływ ciśnienia na wartość entalpii i entropii jest nieznaczny i w związku z tym wykres podany na rys. 2 obowiązuje w tym zakresie również dla ciśnień różnych od $p_{i\,ot}$.

2. Egzergia termiczna głównych składników powietrza

Znajomość egzergii głównych składników powietrza (N_2, O_2, Ar, CO_2, Ne, He, Kr, Xe) w niskich temperaturach może być przydatna przy analizie egzergetycznej procesu skraplania powietrza i otrzymywania z niego gazów technicznych oraz przy rozpatrywaniu procesów, w których skroplone powietrze lub jego składniki spełniają rolę cieczy kriogenicznych [5].

2.1. Normalna egzergia termiczna

Temperatura T_{ot} oraz ciśnienie składnikowe $p_{i\,ot}$ od których zależy egzergia termiczna b_t ulegają wahaniom. Chcąc więc sporządzić wykresy entropowe i wykresy egzergii należy przyjąć umowną wartość parametrów otoczenia T_n, $p_{i\,n}$, którym odpowiada normalna egzergia termiczna $b_{t\,n}$. Jako normalną temperaturę otoczenia najlepiej przyjąć temperaturę $T_n = 298{,}15^\circ$ K (25°C), dla której są podawane wielkości termochemiczne substancji.

Normalne ciśnienia składnikowe $p_{i\,n}$ zostały określone w publikacji [6] według przeciętnego składu suchego powietrza, przeciętnego ciśnienia składnikowego pary wodnej w powietrzu oraz przeciętnego ciśnienia otoczenia. W tablicy 1 zestawiono za publikacją [6] skład suchego powietrza oraz normalne umowne ciśnienia składnikowe $p_{i\,n}$ jego składników.

Tablica 1

Udział molowy oraz normalne ciśnienie składnikowe $p_{i\,n}$ głównych składników powietrza

Składnik		Udział molowy w suchym powietrzu	Normalne ciśnienie składnikowe $p_{i\,n}$	
Nazwa	Wzór chemiczny		bar	ata
Azot	N_2	0,7803	0,7583	0,7733
Tlen	O_2	0,2099	0,2040	0,2080
Argon	Ar	0,00933	0,00907	0,00925
Dwutlenek węgla	CO_2	0,0003	0,000294	0,0003
Neon	Ne	$18 \cdot 10^{-6}$	$17{,}7 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$
Hel	He	$5 \cdot 10^{-6}$	$4{,}8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Krypton	Kr	$1 \cdot 10^{-6}$	$0{,}98 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Ksenon	Xe	$0{,}09 \cdot 10^{-6}$	$0{,}088 \cdot 10^{-6}$	$0{,}09 \cdot 10^{-6}$

Sporządzenie wykresów entropowych dla ciśnień składnikowych napotyka na trudności spowodowane brakiem niezbędnych danych w literaturze. Najpowszechniej spotykane dane dotyczą ciśnienia normalnego p_n = 1,01325 bar (760 Tr).

W tablicy 2 zestawiono wielkości potrzebne do sporządzenia wykresów entropowych zaczerpnięte z literatury, przeważnie z publikacji [10] (zakresy temperatur, odpowiadające im zmiany entropii oraz zmiany entalpii przemian fazowych). Tablicę uzupełniono wynikami przeliczeń wielkości, których nie znaleziono w literaturze (zmiany entalpii w zakresie tego samego stanu skupienia oraz niektóre zmiany entropii).

Zmiany entalpii w zakresie najniższych temperatur wyliczono w oparciu o wartości tabelarycznego ujęcia pełnej funkcji Debye'a [7]. Nie dla wszystkich składników jednak była znana charakterystyczna temperatura Debye'a Θ_D. W tych przypadkach na podstawie znajomości współrzędnych T oraz s punktu leżącego na linii Debye'a obliczono temperaturę Θ_D. Wartości temperatur Θ_D podano w tablicy 2. W zakresie wyższych temperatur dla stanu stałego i ciekłego, zmiany entalpii uzyskiwano przez planimetrowanie wykresów $c_p = f(T)$ sporządzonych na podstawie danych z literatury [3], [9], [10]. Dla kontroli obliczono również zmiany entropii w rozważanych przedziałach temperatur planimetrując wykresy $\frac{c_p}{T} = F(T)$ i porównując wyniki z wartościami zaczerpniętymi z literatury. Na ogół uzyskiwano zupełną zgodność, jedynie dla tlenu skorygowano nieznacznie wartości z literatury powiększając dla stanu krystalicznego II zmianę entropii o ok. 1 kJ/(kmol grd), natomiast dla stanu ciekłego zmniejszając o ok. 0,5 kJ/(kmol grd). Zmiany entalpii i entropii gazowego N_2, O_2, CO_2 i He odczytano z wykresów entropowych [2], [5] zaś dla Ar, Ne, Kr i Xe obliczono jak dla gazu doskonałego przyjmując ciepło właściwe c_p = 20,81 kJ/(kmol grd) [10].

Najwięcej trudności napotyka się przy zestawianiu potrzebnych wielkości dla helu. W dostępnej literaturze nie znaleziono wiarygodnych danych dotyczących temperatury i zmiany entalpii topnienia helu. Np. źródło [8] dla temperatury topnienia podaje dwie wartości: 0,95° K (str. 331) i 1,75° K (str. 541). Za źródłem [1] przyjęto wartość 0,92° K, która dość dobrze zgadza się z wartością 0,95° K. Ciekły hel w temperaturze 2,19° K (pod ciśnieniem nasycenia) przechodzi przemianę drugiego rodzaju, która objawia się znacznym wzrostem ciepła właściwego.

Zmianę entropii ciekłego helu obliczono graficznie w oparciu o wykres ciepła właściwego [3], [5].

W tablicy 2 podano również wartości entalpii normalnej i_n oraz wartości normalnej entropii kalorymetrycznej s_n obliczone jako suma zmian entalpii i entropii w zakresie od 0° K do T_n = 298,15 °K. Podano również wartości bezwzględnej entropii standardowej dla substancji w gazowym stanie doskonałym.

Tablica 2

Zestawienie danych do sporządzenia wykresów (T,s) (rys. 3) dla p_n = 1,01325 bar (760 Tr)

Składnik	Stan	Zakres temperatur °K	Zmiana entalpii kJ/kmol	Zmiana entropii kJ/(kmol grd)	Uwagi
1	2	3	4	5	6
Azot N_2	Kryst. II	0÷10	4	1,92	θ_D=68°K [10]
	Kryst. II	10÷35,61	621	25,26	
	Przem. alotrop.	35,61	229	6,43	
	Kryst. I	35,61÷63,14	1 135	23,40	
	Topnienie	63,15	721	11,43	
	Ciekły	63,14÷77,32	794	11,42	
	Wrzenie	77,32	5 580	72,18	
	Gazowy	77,32÷298,15	6 530	40,03	[2]
	Razem	0÷298,15	15 624	192,07	
	Doskonały	0÷298,15		191,72	[10]
Tlen O_2	Kryst. III	0÷11,75	12	1,34	θ_D=91°K Obl.
	Kryst. III	11,75÷23,66	140	7,10	
	Przem. alotropowa	23,66	94	3,97	
	Kryst. II	23,66÷43,76	704	20,52	
	Przem. alotropowa	43,76	744	16,99	
	Kryst. I	43,76÷54,39	490	10,04	
	Topnienie	54,39	445	8,18	
	Ciekły	54,39÷90,13	1 885	26,54	
	Wrzenie	90,13	6 819	75,66	
	Gazowy	90,13÷298,15	6 050	35,80	[2]
	Razem	0÷298,15	17 383	206,14	
	Doskonały	0÷298,15		205,28	[10]
Argon Ar	Krystaliczny	0÷17,8	60	4,73	θ_D=83°K Oblicz.
	Krystaliczny	17,8÷83,0	1 616	33,91	θ_D=85°K [5]
	Topnienie	83,0	1 121	13,52	
	Ciekły	83,0÷87,3	189	2,22	
	Wrzenie	87,3	6 464	74,07	
	Gazowy	87,3÷298,15	4 387	25,58	Obliczono
	Razem	0÷298,15	13 837	154,03	
	Doskonały	0÷298,15		154,87	[10]
Dwutlenek węgla CO_2	Krystaliczny	0÷15	86	0,79	θ_D=140°K [10]
	Krystaliczny	15÷194,67	6 714	68,37	
	Sublimacja	194,67	25 246	129,67	
	Gazowy	194,67÷298,15	3 860	15,87	[2]
	Razem	0÷298,15	35 906	214,70	
	Doskonały	0÷298,15		213,86	[10]

1	2	3	4	5	6
Neon Ne	Krystaliczny	0÷10	18	2,43	θ_D=62°K Oblicz.
	Krystaliczny	10÷24,57	223	12,43	θ_D=63°K [5]
	Topnienie	24,57	335	13,65	[10]
	Ciekły	24,57÷27,25	81	3,13	Oblicz. [8]
	Wrzenie	27,25	1 732	63,56	[9]
	Gazowy	27,25÷298,15	5 637	49,74	Oblicz.
	Razem	0÷298,15	8 026	144,94	
	Doskonały	0÷298,15		146,37	[10]
Hel He	Krystaliczny	0÷0,92			
	Topnienie	0,92			[1]
	Ciekły II	0,92÷2,19	12	6,5	Oblicz. [3]
	Przem. II-I	2,19	-	-	
	Ciekły I	2,19÷4,216	24	7,5	Oblicz. [3]
	Wrzenie	4,216	82	19,47	Oblicz. [5]
	Gazowy	4,216÷298,15	5 970	92,32	[5]
	Razem	0÷298,15			
	Doskonały	0÷298,15		126,15	[10]
Krypton Kr	Krystaliczny	0÷10,0	17	2,39	θ_D=63°K [10]
	Krystaliczny	10,0÷115,95	2 706	51,00	
	Topnienie	115,95	1 636	14,11	
	Ciekły	115,95÷119,93	173	1,47	
	Wrzenie	119,93	9 035	75,36	
	Gazowy	119,93÷298,15	3 708	18,97	Obliczone
	Razem	0÷298,15	17 275	163,30	
	Doskonały	0÷298,15		164,12	[10]
Ksenon Xe	Krystaliczny	0÷10,0	25	3,43	θ_D=54°K Oblicz.
	Krystaliczny	10,0÷161,3	4 085	62,05	
	Topnienie	161,3	2 296	14,24	
	Ciekły	161,3÷165,1	162	1,00	
	Wrzenie	165,1	12 644	76,58	
	Gazowy	165,1÷298,15	2 769	12,31	Obliczono
	Razem	0÷298,15	21 981	169,61	
	Doskonały	0÷298,15		169,73	[10]

Rozbieżności pomiędzy wartością entropii kalorymetrycznej, a entropią standardową są spowodowane tym, że wartości entropii standardowej wynikają z pomiarów spektroskopowych. Brak jednak podstaw do przeprowadzenia korekty entropii kalorymetrycznej i dlatego przy sporządzaniu wykresów entropowych przedstawionych na rysunku 3 oparto się na wartościach z tablicy 2. W celu ułatwienia przedstawienia na tym wykresie poprawki egzergii termicznej omówionej niżej, przyjęto na osi odciętych dla wszystkich składników wspólny punkt, odpowiadający normalnej entropii kalorymetrycznej s_n w temperaturze T_n. Na osi odciętych przedstawiono więc wartość $(s - s_n)$ różnicy entropii w zakresie od temperatury T substancji do temperatury normalnej T_n pod ciśnieniem p_n. Ponieważ wykres obowiązuje dla stanu skondensowanego, pominięto na nim zakres wrzenia i stanu gazowego.

Przebieg izobary dla stanu krystalicznego od temperatury 0 °K do pierwszego punktu określonego danymi z tablicy 2 oparto na wartościach tabelarycznego ujęcia pełnej funkcji Debye'a. Dla stanu krystalicznego w wyższych temperaturach oraz dla stanu ciekłego przebieg izobary ustalono w oparciu o graficzne całkowanie funkcji $\frac{c_p}{T} = F(T)$.

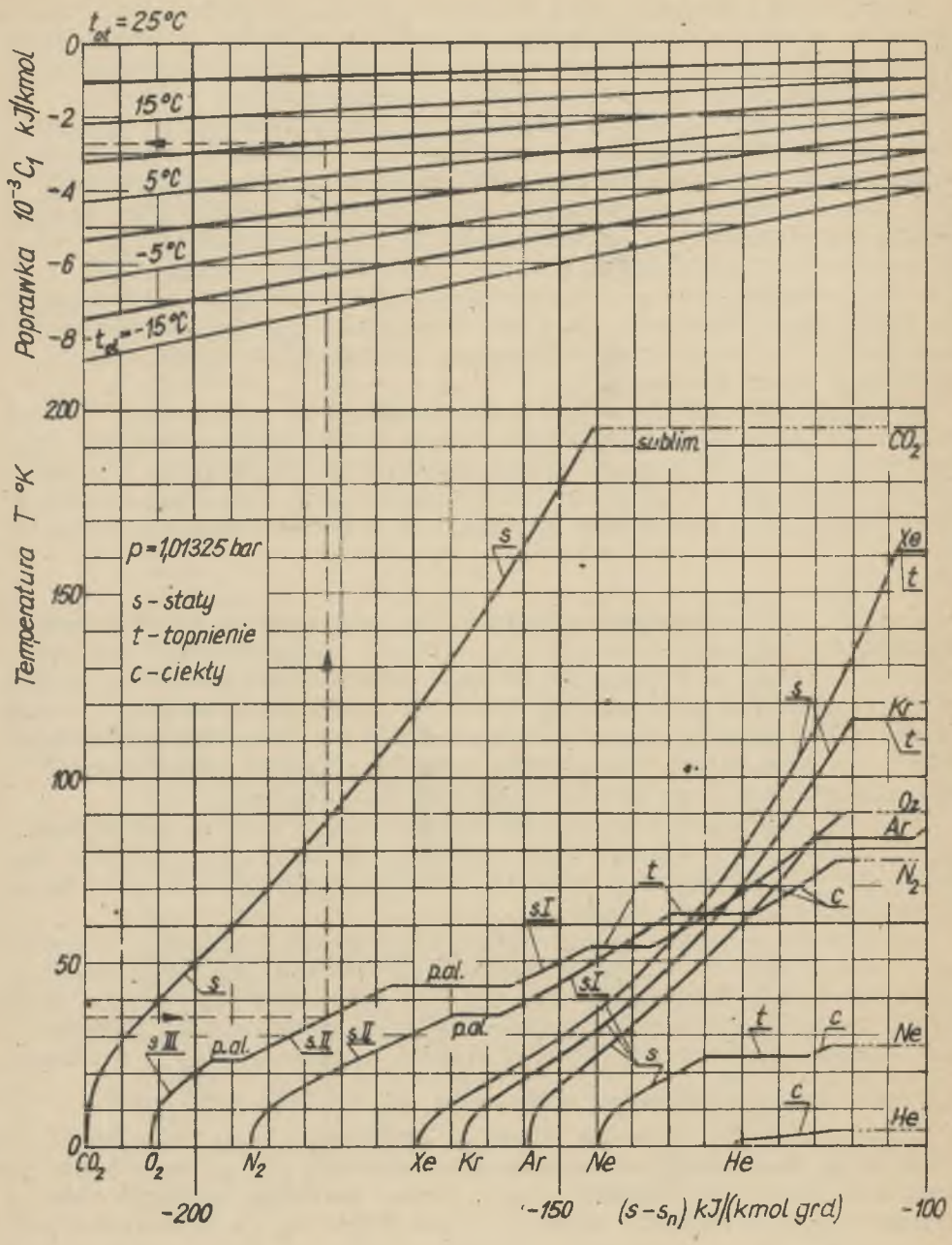
Jedynie przy wykreślaniu izobary dla helu punktem wyjścia była wartość standardowej entropii $s_n = 126{,}15$ kJ/(kmol grd), w temperaturze normalnej. Poczynając od tego punktu można wykreślić izobarę aż do początku krzepnięcia. Przebieg pozostałego odcinka izobary aż do 0 °K przedstawiono w sposób przybliżony. Ponieważ jednak odcinek ten jest krótki i przebiega w bardzo niskich temperaturach wpływ przybliżenia na wartość egzergii jest znikomy.

Wykresy entropowe zostały sporządzone dla ciśnienia normalnego $p_n = 1{,}01325$ bar i dlatego pole pomiędzy izotermą T_n, izobarą p_n i odciętą s, przedstawia jedynie normalną fizyczną egzergię $b_{f\,n}$ liczoną od przyjętego stanu T_n, p_n.

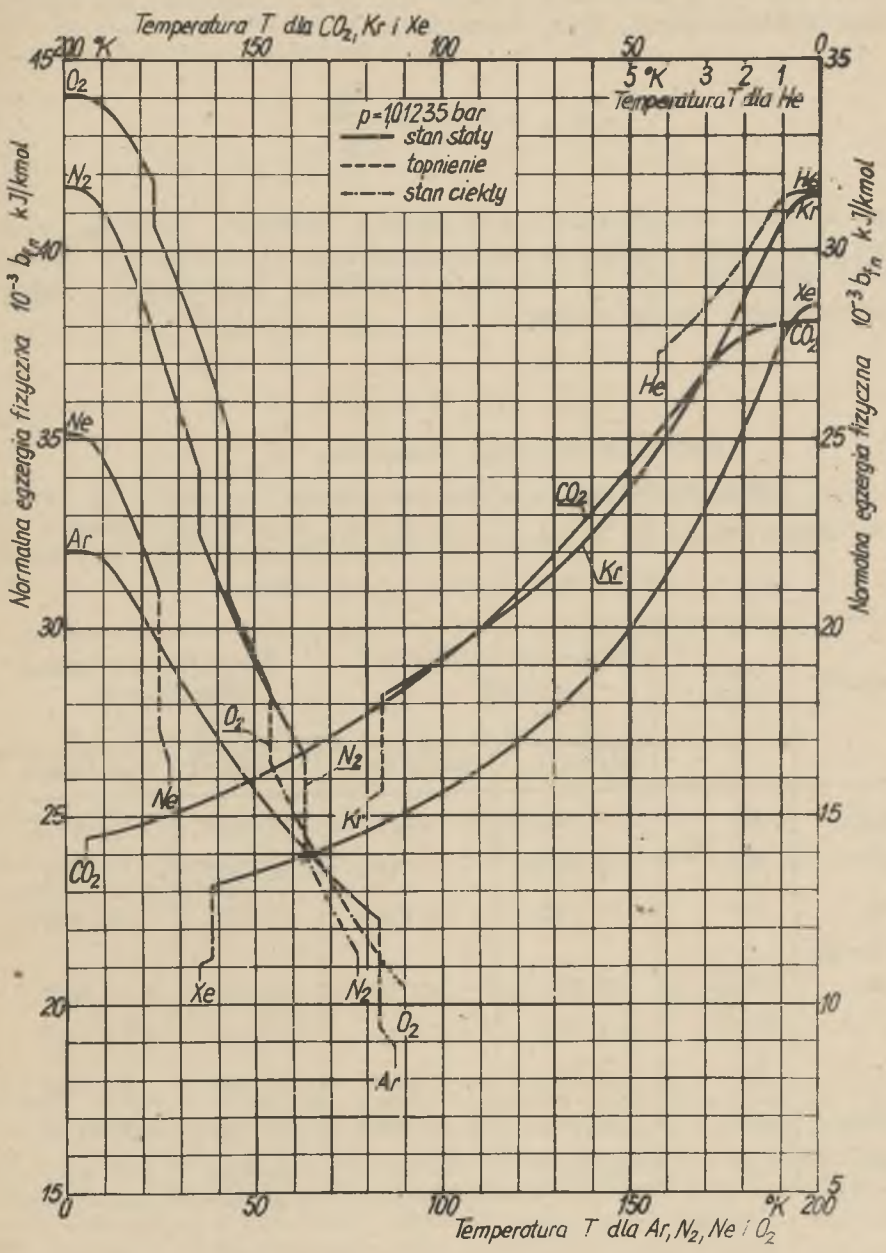
Na rysunku 4 przedstawiono wykresy normalnej fizycznej egzergii $b_{f\,n}$ w zakresie od 0 °K do temperatury wrzenia pod normalnym ciśnieniem p_n. Obowiązują więc one dla stanu skondensowanego. W celu zwiększenia dokładności wykresy te sporządzono nie na podstawie wykresów entropowych, lecz w oparciu o dane zawarte w tablicy 2 i omawiane wyżej wykresy pomocnicze $c_p = f(T)$ i $\frac{c_p}{T} = F(T)$.

Chcąc wyznaczyć normalną egzergię termiczną $b_{t\,n}$ substancji odniesioną do umownego ciśnienia składnikowego $p_{i\,n}$, należy do normalnej egzergii fizycznej $b_{f\,n}$ dodać normalną egzergię chemiczną $b_{ch\,n}$ substancji mającej temperaturę T_n i ciśnienie p_n

$$b_{t\,n} = b_{f\,n} + b_{ch\,n} \tag{3}$$



Rys.3. Wykres entropowy głównych składników powietrza



Rys.4. Wykres normalnej egzergii fizycznej głównych składników powietrza

Normalną egzergię chemiczną ustala się przy normalnej wartości ciśnienia składnikowego $p_{i\,n}$ w otoczeniu [6]

$$b_{ch\,n} = R\,T_n \ln \frac{p_n}{p_{i\,n}} \tag{4}$$

gdzie R jest uniwersalną stałą gazową. Normalną egzergię chemiczną składników powietrza zawiera tablica 3. W tablicy 3 podano również wartości $b_{t\,n\,0}$ normalnej egzergii termicznej składników powietrza w temperaturze 0 °K.

Tablica 3

Normalna egzergia chemiczna $b_{ch\,n}$
oraz normalna egzergia termiczna $b_{t\,n\,0}$
w temperaturze 0 °K odniesione do stanu T_n = 298,15 °K,
p_n = 1,01325 bar oraz $p_{i\,n}$ wg tablicy 1

Składnik	Wzór chem.	Normalna egzergia chem. $b_{ch\,n}$		Normalna egzergia termiczna $b_{t\,n\,0}$	
		kJ/kmol	kcal/kmol	kJ/kmol	kcal/kmol
Azot	N_2	720	172	42 362	10 118
Tlen	O_2	3 975	949	48 053	11 477
Argon	Ar	11 690	2 792	43 777	10 456
Dwutlenek węgla	CO_2	20 171	4 818	48 278	11 053
Neon	Ne	27 154	6 486	62 351	14 893
Hel	He	30 359	7 251	61 881	14 780
Krypton	Kr	34 321	8 197	65 734	15 700
Ksenon	Xe	40 300	9 625	68 888	16 454

2.2. Egzergia termiczna dla dowolnych parametrów otoczenia

Równanie (1) określające egzergię termiczną b_t można doprowadzić do następującej postaci:

$$b_t = b_{f\,n} + \frac{T_{ot}}{T_n} b_{ch\,n} + C_1 + C_2 + C_3 \tag{5}$$

Poprawki C_1, C_2 i C_3 uwzględniają wpływ parametrów otoczenia na wartość egzergii.

Poprawkę C_1 określa równanie

$$C_1 = (T_n - T_{ot})(s - s_n) \tag{6}$$

Poprawkę tę można odczytać na rysunku 3. Sposób określenia jej dla tlenu zademonstrowano na rysunku.

Poprawka C_2 wynika z wzoru

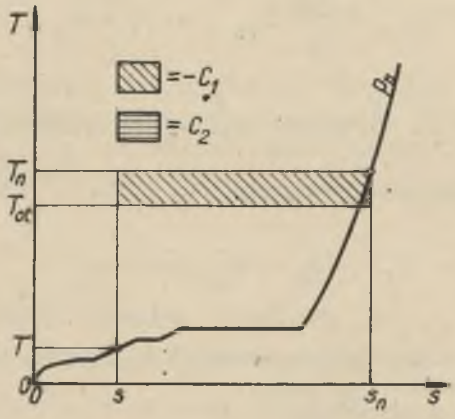
$$C_2 = \Delta i \Big|_{T_{ot},\, p_{i\,ot}}^{T_n,\, p_n} - T_{ot}\, \Delta s \Big|_{T_{ot},\, p_{i\,ot}}^{T_n,\, p_{i\,n}} \tag{7}$$

Jeżeli założy się, że w zakresie temperatur od T_{ot} do T_n składniki powietrza zachowują się jak gazy doskonałe, wówczas równanie (7) przyjmie postać:

$$C_2 = c_p\left(T_n - T_{ot} - T_{ot} \ln \frac{T_n}{T_{ot}}\right) + R\, T_{ot} \ln \frac{p_{i\,n}}{p_{i\,ot}} \tag{8}$$

Pierwszy wyraz w ostatnim równaniu ujmuje wpływ temperatury T_{ot} na wartość egzergii, drugi natomiast określa wpływ odstępstwa ciśnienia składnikowego $p_{i\,ot}$ w otoczeniu od umownej wartości normalnej $p_{i\,n}$. Odstępstwo to może być spowodowane przez zmiany ciśnienia otoczenia i ciśnienia składnikowego pary wodnej w otoczeniu. Wpływ ten jest jednak bardzo mały i może być pominięty.

Poprawkę C_1 i C_2 (po przyjęciu $p_{i\ ot} = p_{i\ n}$) można łatwo przedstawić na wykresie (T,s) (rys. 5). Z wykresu tego wynika, że cała poprawka C_2 jest mała w porównaniu z poprawką C_1 i może być pominięta.



Rys. 5. Poprawka C_1, C_2 egzergii termicznej

Poprawkę C_3 określa wzór

$$C_3 = \Delta i_T \Big|_{p_n}^{p} - T_{ot} \Delta s_T \Big|_{p_n}^{p} \tag{9}$$

Zgodnie z wcześniej przyjętym założeniem pomijającym wpływ ciśnienia na entalpię i entropię substancji w stanie skondensowanym, otrzymuje się wartość $C_3 = 0$.

Ostatecznie przybliżone obliczanie egzergii składników powietrza w temperaturach zbliżonych do bezwzględnego zera sprowadza się do posługiwania się wzorem:

$$b_t \approx b_{f\ n} + \frac{T_{ot}}{T_n} b_{ch\ n} + C_1 \tag{10}$$

gdzie:

$b_{f\,n}$ - odczytuje się z rysunku 4,

$b_{ch\,n}$ - z tablicy 3, zaś

C_1 - z rysunku 3.

Na zakończenie autor pragnie podziękować prof. dr inż. J. Szargutowi za wskazanie tematu, zachętę oraz cenne wskazówki przy jego opracowaniu.

LITERATURA

[1] W.G. FASTOWSKIJ - Razdielenije gazowych smiesiej, Moskwa-Leningrad 1947.

[2] S.Ja. GIERSZ - Głubokoje ochłażdienije, t.I, Moskwa 1957.

[3] M.P. MAŁKOW i K.F. PAWŁOW - Sprawocznik po głubokomu ochłażdieniju w tiechnikie, Moskwa-Leningrad 1947.

[4] R. PETELA - Egzergia promieniowania cieplnego, Energetyka Przemysłowa X (1962) nr 11, str. 402.

[5] R.B. SCOTT - Technika niskich temperatur, tłum. z angielskiego, WNT Warszawa, 1963.

[6] J. SZARGUT - Bilans egzergetyczny procesów hutniczych, Archiwum Hutnictwa 6 (1961) nr 1, str. 23/61.

[7] Kratkij sprawocznik fizykochimiczeskich wieliczin, Leningrad 1957.

[8] Poradnik fizykochemiczny, WNT Warszawa, 1952.

[9] Sprawocznik po rozdieleniju gazowych smiesiej, Moskwa-Leningrad 1953.

[10] Termiczeskije konstanty nieorganiczeskich wieszczestw, Moskwa-Leningrad, 1949.

ЭКСЕРГИЯ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВОЗДУХА В ТЕМПЕРАТУРЕ ВЛИЗКОЙ АБСОЛЮТНОГО НУЛЯ

Резюме

Автор объясняет общие принципы определения термической эксергии вещества в температуре близкой абсолютного нуля. Для основных компонентов воздуха в твердом и жидком состоянии составлена диаграмма нормальной физической эксергии (рис.4). Эта величина расчитана от состояния с параметрами p_n, t_n и относится к нормальной температуре окружающей среды.

Определены тоже уравнения, которые дают возможность учитывать изменения параметров окружающей среды. Для практических расчетов автор рекомендует формулу (10), в которой: $b_{f\,n}$ - нормальная физическая эксергия (рис.4), $b_{ch\,n}$- нормальная химическая эксергия (табл.3), C_1 - поправка, учитывающая реальную температуру окружающего воздуха (рис.3).

THE EXERGY OF AIR COMPONENTS IN THE TEMPERATURE NEAR TO THE ABSOLUTE ZERO

Summary

The author explains the general methods used to determine the thermal exergy of substance in the temperature near to the absolute zero. For the main components of air in the solid and liquid state, the diagrams of normal physical exergy are developed (Fig. 4). The normal physical exergy is defined for the substance in the normal thermal conditions and normal temperature of environment. Author presents also the equations giving the possibility of the environment parameters changes. For practical purposes the author's recomendation is to use the formula (10) in which:

$b_{f\,n}$ - normal physical exergy (Fig. 4),

$b_{ch\,n}$ - normal chemical exergy (Tab. 3),

C_1 - correction factor taking into account the real temperature of surrounding air (Fig. 3).