

JAN SZARGUT

Instytut Techniki Ciepłej

KAZIMIERZ DZIEDZINIEWICZ

Akademia Górniczo-Hutnicza

## EGZERGIA CHEMICZNA JEDNORODNYCH SUBSTANCJI NIEORGANICZNYCH

Streszczenie. Przedstawiono nowy ogólny schemat obliczania egzergii chemicznej, omówiono zasady dobierania substancji odniesienia i podano aktualnie przyjęte substancje odniesienia. Podano metodę obliczania egzergii chemicznej związku chemicznego za pomocą wartości egzergii chemicznej pierwiastków. Obliczono tablicę wartości normalnej egzergii chemicznej stanowiącą uzupełnienie tablic wcześniej opublikowanych.

1. Ogólne zasady obliczania egzergii chemicznej

Egzergia jest to maksymalna zdolność materii do wykonania pracy, obliczona względem powszechnie występujących składników otaczającej przyrody. Egzergia określa przydatność nośnika energii do napędzania procesów cieplnych i służy do oceny stopnia niedoskonałości termodynamicznej procesów oraz do wykrywania i oceny ilościowej przyczyny zwiększających tę niedoskonałość. Przy rozpatrywaniu przemian w układach zamkniętych, można w sposób dość dowolny przyjąć poziom zerowy egzergii, gdyż w obliczeniach występują tylko jej przyrosty lub ubytki. Większość jednak procesów technicznych przebiega w układach otwartych. W takich przypadkach jest konieczne przyjęcie dla egzergii poziomu zerowego narzuconego przez otaczającą przyrodę, gdyż w przeciwnym razie nie byłoby możliwa prawidłowa ocena sprawności egzergetycznej i strat egzergii w badanym procesie. Egzergia bowiem produktu użytecznego otrzymanego w procesie stanowi podstawę obliczenia sprawności egzergetycznej. Egzergia produktów odpadowych procesu ulega zniszczeniu na zewnątrz rozpatrywanego urządzenia, w otaczającej przyrodzie i dlatego wyraża zewnętrzne straty egzergii danego procesu [3].

Dalsze rozważania niniejszej pracy dotyczą wyłącznie procesów fizycznych i chemicznych. Przy rozpatrywaniu tych procesów egzergię strugi substancji doprowadzanej do układu lub wyprowadzanej z układu można podzielić na egzergię kinetyczną, potencjalną, fizyczną i chemiczną [2]. Egzergia kinetyczną wyraża energia kinetyczna obliczona względem ziemi. Egzergia potencjalna jest to energia potencjalna obliczona względem poziomu powierzchni ziemi przeważającego w otoczeniu. Egzergia fizyczna wynika z różnicy temperatury i ciśnienia w porównaniu z temperaturą i ciśnieniem otoczenia. Egzergia chemiczna jest następstwem różnicy składu chemicznego roz-

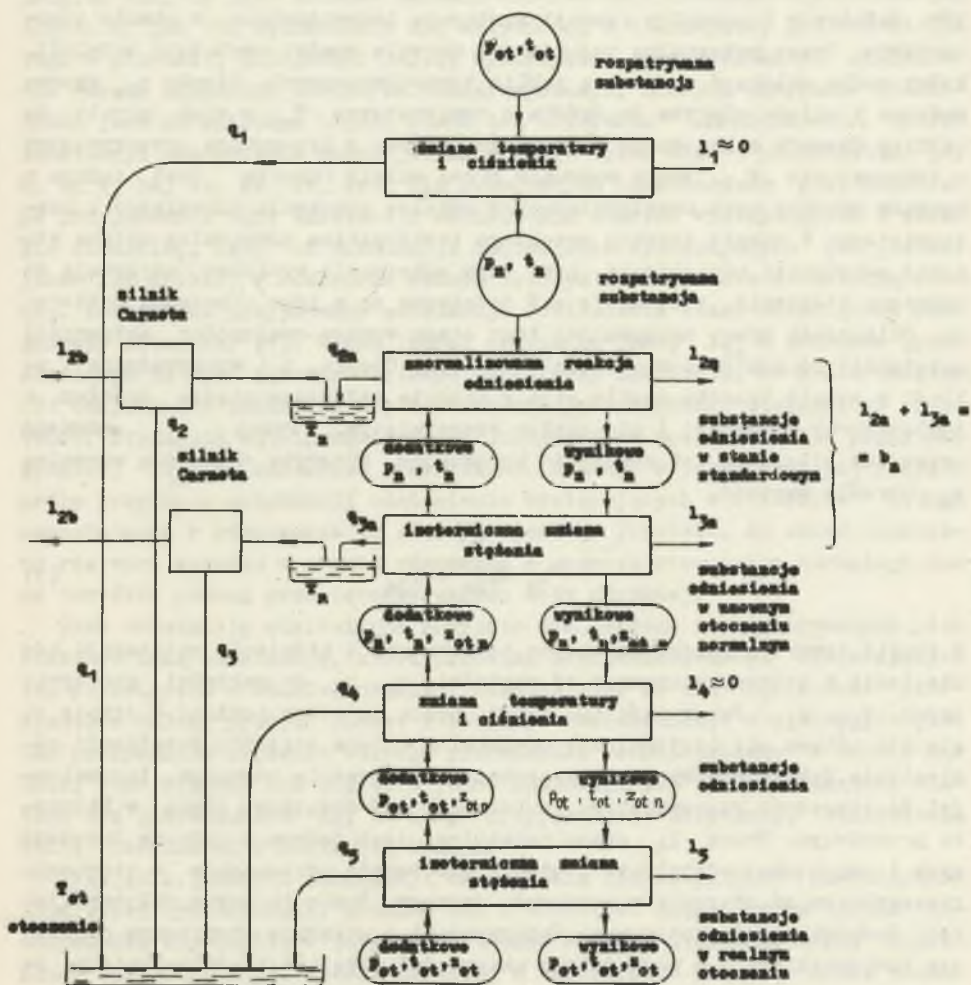
patrywanej substancji i powszechnie występujących składników otaczającej przyrody. Egzergia chemiczna dotyczy substancji pod ciśnieniem otoczenia i w temperaturze otoczenia.

Obliczenie egzergii chemicznej jest najczęściej połączone ze znacznymi trudnościami ze względu na trudności określenia składu chemicznego i wartości funkcji termodynamicznych dla substancji powszechnie występujących w otaczającej przyrodzie. Należy jednak podkreślić, że ewentualna niedokładność wyznaczenia tych wielkości nie ma wpływu na wyniki obliczenia wewnętrznych strat egzergii w rozpatrywanym procesie, a jedynie wpływa na obliczoną wartość zewnętrznych strat egzergii. Podstawowym wymaganiem przy obliczaniu egzergii chemicznej jest konsekwentne przyjęcie stanów odniesienia. W razie nie przestrzegania zasad konsekwencji występuje w bilansie egzergii wewnętrzna sprzeczność, a mianowicie wewnętrzna strata egzergii obliczona z zamknięcia bilansu egzergii nie jest zgodna ze stratą obliczoną bezpośrednio za pomocą prawa Gouya-Stodoli. Nie zawsze dochodzi do wykrycia tej sprzeczności, gdyż zwykle poprzestaje się na jednej metodzie obliczenia strat egzergii.

W celu zapewnienia pełnej konsekwencji przy obliczaniu egzergii chemicznej należy dla każdego pierwiastka przyjąć jedną i tylko jedną substancję odniesienia, zawierającą w swym składzie rozpatrywany pierwiastek. Gdyby w otoczeniu panowała pełna równowaga termodynamiczna, sposób przyjęcia substancji odniesienia nie miałby wpływu na wyniki obliczenia egzergii chemicznej. Ze względu jednak na występowanie odchyień od stanu równowagi, należy przyjmować substancje odniesienia jak najbardziej rozpowszechnione. Wówczas ułatwione jest wyznaczenie stężenia substancji odniesienia w otoczeniu i zapewnione jest uzyskanie bliskich ze ra wartości egzergii dla najbardziej pospolitych składników otaczającej przyrody. Składniki otoczenia występujące w ograniczonej ilości mają wówczas dodatnią egzergię chemiczną i mogą być uważane za bogactwa naturalne.

Znaczne trudności obliczenia egzergii chemicznej były powodem wprowadzenia pojęcia egzergii chemicznej normalnej. Jest to egzergia obliczona przy założeniu, że ciśnienie i temperatura otoczenia mają wartość normalną i że stężenie substancji odniesienia w otoczeniu ma również wartość normalną wynikającą z przeciętnego składu chemicznego ciał występujących w otaczającej przyrodzie [1]. Wartości egzergii chemicznej normalnej można zebrać w tablicach. Tablice te znacznie ułatwiają sporządzenie bilansów egzergii. W wielu bowiem przypadkach można przyjąć, że rzeczywista wartość egzergii chemicznej nieznacznie odbiega od wartości normalnej i tylko w stosunkowo nielicznych przypadkach należy odpowiednio skorygować egzergię chemiczną normalną w celu uzyskania wartości rzeczywistej.

Ogólny schemat obliczania egzergii chemicznej przedstawiono na rys. 1. Schemat ten zmieniono w porównaniu z dotąd stosowanym [1], w celu wyraźnego wyodrębnienia egzergii chemicznej normalnej. Schemat obejmuje przemiana-



Schemat do obliczenia egzergii chemicznej



ny odwracalne pozwalające sprowadzić rozpatrywaną substancję do stanu równowagi termodynamicznej z substancjami odniesienia występującymi w otaczającej przyrodzie. W etapie pierwszym następuje zmiana temperatury i ciśnienia rozpatrywanej substancji, od temperatury i ciśnienia otoczenia do normalnej temperatury i normalnego ciśnienia. Praca maksymalna tego etapu jest mała i ma przeciwny znak niż praca etapu 4. Dlatego prace  $l_1$  i  $l_4$  można pominąć. W etapie drugim przebiega znormalizowana reakcja odniesienia, w której obok rozpatrywanej substancji biorą udział tylko substancje odniesienia, dodatki po stronie substratów i produkty po stronie produktów. Substraty i produkty reakcji występują indywidualnie w stanie standardowym. Pracę maksymalną tej reakcji określa spadek swobodnej entalpii, który można obliczyć za pomocą tablic termochemicznych. Ciepło  $q_{2a}$  wyprowadzone z układu odpływa do źródła o temperaturze  $T_n$ , a stąd płynie do silnika Carnota załączonego między tym źródłem a otoczeniem rzeczywistym o temperaturze  $T_{ot}$ . Praca wykonana przez silnik Carnota jest jednym z wyrazów korekcyjnych uwzględniających różnicę otoczenia normalnego i rzeczywistego. W etapie trzecim przebiega izotermiczna odwracalna zmiana stężenia substancji odniesienia, przy czym substancje wynikowe odpływają do umownego otoczenia, substancje zaś dodatkowe są z tego otoczenia pobierane. Obliczenie pracy maksymalnej tego etapu wymaga znajomości aktywności substancji odniesienia w otoczeniu umownym. Ciepło  $q_{3a}$  wyprowadzone z układu w etapie trzecim zasila silnik Carnota załączony między źródłem o temperaturze normalnej i otoczeniem rzeczywistym. Praca  $l_{3b}$  wykonana przez ten silnik ma też znaczenie korekcyjne. Egzergię chemiczną normalną  $b_n$  określa wartość

$$b_n = l_{2a} + l_{3a} \quad (1)$$

W etapie czwartym przebiega zmiana temperatury i ciśnienia substancji odniesienia w otoczeniu umownym od wartości  $t_n, p_n$  do wartości rzeczywistych  $t_{ot}, p_{ot}$ . Jak wyjaśniono wyżej, pracę tę można pominąć. W etapie ostatnim odbywa się izotermiczna odwracalna zmiana stężenia substancji odniesienia. Substancje wynikowe przechodzą z otoczenia umownego (normalnego) do otoczenia rzeczywistego, substancje zaś dodatkowe płyną w kierunku przeciwnym. Praca  $l_5$  etapu ostatniego jest jednym z członów korekcyjnych i uwzględnia odchylenie stężenia substancji odniesienia w otoczeniu rzeczywistym od stężenia w otoczeniu umownym. Pracę tę można obliczyć, jeżeli dysponujemy dostatecznymi informacjami o składzie chemicznym otoczenia rzeczywistego i o wartościach aktywności substancji odniesienia w otoczeniu rzeczywistym. Zgodnie więc ze schematem pokazanym na rys. 1 egzergię chemiczną wyraża wzór

$$b_{ch} = b_n + (q_{2a} + q_{3a}) \frac{T_n - T_{ot}}{T_n} + l_5 \quad (2)$$

## 2. Substancje odniesienia przy obliczaniu egzergii chemicznej

Substancje odniesienia przy obliczaniu egzergii chemicznej powinno się przyjąć tak, by było możliwe zarówno dostatecznie dokładne określenie ich stężenia, jak też wyznaczenie ich aktywności w otaczającej przyrodzie. Dlatego w pierwszej kolejności należy wykorzystać jako substancje odniesienia gazowe składniki powietrza atmosferycznego, których aktywność ciśnieniowa jest ze znikomym błędem równa ich ciśnieniu składnikowemu. Gazowe substancje odniesienia można jednak przyjąć tylko dla 9 pierwiastków (C, H, O, N, Ar, He, Ne, Kr, Xe). Dla pozostałych pierwiastków jest konieczne przyjmowanie bądź substancji odniesienia stałych występujących w skorupie ziemskiej, bądź też substancji odniesienia występujących (w postaci jonów lub drobin) w roztworze wodnym będącym w równowadze ze skorupą ziemską. Początkowo przyjmowano substancje odniesienia stałe wchodzące w skład skorupy ziemskiej [1]. W tym jednak przypadku pracę  $l_{3a}$  w schemacie przedstawionym na rys. 1 można obliczyć tylko przy założeniu, że stałe substancje odniesienia zachowują się w otoczeniu jak składniki doskonałego roztworu. Nie ulega wątpliwości, że obliczona w ten sposób wartość pracy maksymalnej  $l_{3a}$  ma znaczenie przybliżone. Dlatego w publikacji [4] podjęto próbę przyjęcia substancji odniesienia występujących w roztworze wodnym pozostającym w równowadze ze skorupą ziemską. Przyjęto, że skład chemiczny roztworu wodnego w stanie równowagi z umownym otoczeniem normalnym można określić podług przeciętnego składu wody morskiej.

Jako substancję odniesienia przyjęto dla każdego z rozpatrywanych pierwiastków taką substancję, która przeważa wśród substancji zawierających ten pierwiastek w wodzie morskiej. Okazało się, że dla większości pierwiastków należy przyjąć jonowe substancje odniesienia, w niektórych jednak przypadkach stężenie wolnego pierwiastka rozpuszczonego w wodzie morskiej jest większe niż stężenie jonów zawierających ten pierwiastek. Dlatego dla pierwiastków Ag, Au i Hg przyjęto jako substancję odniesienia wolny pierwiastek w roztworze wodnym.

Przyjęcie jonowych substancji odniesienia dla wszystkich pierwiastków poza wyżej wymienionymi, okazało się niemożliwe. Znanie bowiem prawa termodynamiki elektrolitów dotyczy roztworów o małym stężeniu. Przy stężeniach występujących w wodzie morskiej o uśrednionym składzie można dostatecznie dokładnie obliczyć aktywność tylko dla zespołów jonów jedno i dwu wartościowych. Dlatego dla pierwiastków występujących w morzu głównie w jonach trój- i więcej wartościowych, pozostawiono wcześniej przyjęte stałe substancje odniesienia, występujące w skorupie ziemskiej. Pełne zesta-

Tablica 1

Substancje odniesienia  
i normalna egzergia chemiczna pierwiastków

Pierwiastek	Stan <sup>x)</sup>	Substancja odniesienia	Normalna egzergia chemiczna ( $Mb_n$ ) kJ/kmol
1	2	3	4
Ag	s	Ag w roztworze wodnym	59 100
Al	s	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> , s sili-manit	887 890
Ar	g	Ar, g	11 690
As	s	HAso <sub>4</sub> <sup>---</sup> , jon	477 040
Au	s	Au w roztworze wodnym	69 950
B	s	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , jon	615 920
Ba	s, II	Ba <sup>++</sup> , jon	760 050
Bi	s	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , s	271 370
Br <sub>2</sub>	l	Br <sup>-</sup> , jon	91 770
C	s, grafit	CO <sub>2</sub> , g	410 530
Ca	s, II	Ca <sup>++</sup> , jon	717 400
Cd	s	Cd <sup>++</sup> , jon	290 920
Cl <sub>2</sub>	g	Cl <sup>-</sup> , jon	117 520
Co	s, III	Co <sup>++</sup> , jon	260 520
Cr	s	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , s	538 610
Cs	s	Cs <sup>+</sup> , jon	408 530
Cu	s	Cu <sup>++</sup> , jon	134 400
D <sub>2</sub>	g	D <sub>2</sub> O, g	264 780
F <sub>2</sub>	g	F <sup>-</sup> , jon	448 820
Fe	s	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , s	377 740
H <sub>2</sub>	g	H <sub>2</sub> O, g	238 350



cd. tablicy 1

1	2	3	4
He	g	He, g	30 360
Hg	l	Hg w roztworze wodnym	66 010
J <sub>2</sub>	s	JO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , jon	184 190
K	s	K <sup>+</sup> , jon	371 520
Kr	g	Kr, g	34 320
Li	s	Li <sup>+</sup> , jon	396 170
Mg	s	Mg <sup>++</sup> , jon	626 710
Mn	s, α, IV	MnO <sub>2</sub> , s	483 240
Mo	s	MoO <sub>3</sub> , s	715 540
N <sub>2</sub>	g	N <sub>2</sub> , g	720
Na	s	Na <sup>+</sup> , jon	343 830
Ne	g	Ne, g	27 150
Ni	s	Ni <sup>++</sup> , jon	252 800
O <sub>2</sub>	g	O <sub>2</sub> , g	3 970
P	s, biały	HPO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , jon	859 600
Pb	s	Pb <sup>++</sup> , jon	226 940
Rb	s	Rb <sup>+</sup> , jon	398 800
S	s, rombowa	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , jon	598 850
Sb	s, III	Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , s	359-190
Se	s	SeO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , jon	326 960
Si	s	SiO <sub>2</sub> , s	803 010
Sn	s, biała	SnO <sub>2</sub> , s	542 660
Sr	s	Sr <sup>++</sup> , jon	737 650
Ti	s, II	TiO <sub>2</sub> , s, III, rutil	876 000
U	s, III	UO <sub>3</sub> , s	1 224 180
V	s	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , s	725 880
W	s	WO <sub>3</sub> , s, żółty	799 680
Xe	g	Xe, g	40 300
Zn	s	Zn <sup>++</sup> , jon	353 160

x) s - stały, l - ciekły, g - gazowy.

wienie przyjętych substancji odniesienia zawiera tablica 1. Ścisłe rzecz biorąc, za jonowe substancje odniesienia przyjęto zespoły jonów ujęte ogólnym wyrażeniem

$$I^q - q H^+ \quad (3)$$

gdzie  $I^q$  oznacza tzw. jon zasadniczy, zawierający w swym składzie rozpatrywany pierwiastek,  $q$  wyraża wartościowość algebraiczną jonu zasadniczego. Dla  $q < 0$  zespół jonów (3) jest wprost elektrolitem. Dla  $q > 0$  zespół ten należy uzupełnić anionem  $A^-$  wprowadzonym raz ze znakiem algebraicznym plus, raz ze znakiem minus. Otrzymuje się wówczas dwa elektrolity

$$(I^q + q A^-) - q(H^+ + A^-) \quad (4)$$

Znak minus przy elektrodzie HA oznacza, że kierunek przemian tego elektrolitu jest przeciwny niż elektrolitu  $I A_q$ . Obranie za substancję odniesienia zespołów jonów było podyktowane tym, że funkcje termodynamiczne nie są znane dla samodzielnych jonów. Tok obliczenia egzergii chemicznej przy użyciu jonowych substancji odniesienia przytoczono w publikacji [4]. Tok obliczeń dla stałych substancji odniesienia podano w pracy [1]. Warto nadmienić, że wartości normalnej egzergii chemicznej obliczone za pomocą jonowych substancji odniesienia w większości przypadków są zbliżone do wartości obliczonych wcześniej za pomocą stałych substancji odniesienia, mimo że w obu tych przypadkach wykorzystano zupełnie inne dane wyjściowe i wzory obliczeniowe.

### 3. Obliczenie egzergii chemicznej związków za pomocą egzergii chemicznej pierwiastków

Obliczenie egzergii chemicznej za pomocą schematu pokazanego na rys. 1 i schematów szczegółowych wynikających z rozwinięcia schematu ogólnego, jest konieczne tylko przy rozpatrywaniu pierwiastków chemicznych. Obliczone wyżej omówionymi metodami wartości normalnej egzergii chemicznej pierwiastków podano w tablicy 1. Wartości te pozwalają w stosunkowo prosty sposób obliczyć normalną egzergię chemiczną związków chemicznych. Z bilansu bowiem egzergii dla znormalizowanej reakcji tworzenia wynika następujący wzór na normalną egzergię chemiczną związku chemicznego

$$b_n = \gamma_n + \sum B_n \text{ elem} \quad (5)$$



gdzie:

$\chi_n$  - swobodna entalpia tworzenia związku chemicznego (różnica swobodnej entalpii związku i pierwiastków składowych),

$B_n \text{ elem}$  - normalna egzergia chemiczna pierwiastka składowego przypadająca na jednostkę rozpatrywanego związku.

Wartości  $\chi_n$  można dla licznych związków znaleźć w tablicach termodynamicznych albo można je obliczyć, jeżeli jest znana entalpia tworzenia związku i normalna entropia bezwzględna pierwiastków składowych oraz rozpatrywanego związku

$$\chi_n = H_{pn} + T_n(s_n - \sum S_n \text{ elem}) \quad (6)$$

gdzie:

$H_{pn}$  - normalna entalpia tworzenia związku chemicznego,

$s_n$  - normalna entropia bezwzględna związku chemicznego,

$S_n \text{ elem}$  - normalna entropia bezwzględna pierwiastka składowego przypadająca na jednostkę rozpatrywanego związku.

Za pomocą wzorów (5) i (6) przeprowadzono obliczenia normalnej egzergii chemicznej licznych jednorodnych substancji chemicznych. Wyniki tych obliczeń zawiera tabela 2. Tabele tę należy uważać za uzupełnienie tabeli 5 zamieszczonej w monografii [3]. W tabeli 2 uwzględniono przede wszystkim te pierwiastki i związki chemiczne, których nie zamieszczono w książce [3]. Podano ponadto nowe wartości egzergii chemicznej, dla tych związków, dla których zostały przyjęte nowe substancje odniesienia (są to związki pierwiastków Ba, Ca, Cd, Cl, Co, Cu, K, Mg, Na, Ni, P, Pb, S, Sr, Zn). Nie podano natomiast tych wartości, które pozostały bez zmiany w porównaniu z wcześniej obliczonymi. Jeżeli więc jakiegoś związku chemicznego nie ma w tabeli 2, a związek ten znajduje się w tablicach monografii [3], to wartości podane w cytowanej monografii nie uległy zmianie. W szczególności dotyczy to związków zawierających wyłącznie pierwiastki Al, Bi, C, Cr, D, Fe, H, Mn, Mo, N, O, Sb, Si, Sn, Ti, U, V, W.

Autorzy wyrażają nadzieję, że tabela 2 będzie dużą pomocą przy sporządzaniu bilansów egzergii dla procesów chemicznych i ułatwi badanie stopnia doskonałości termodynamicznej tych procesów. Autorzy pragną ponadto podziękować Panu mgr inż. J. Koziołowi za przeprowadzenie uzupełniających obliczeń.

Tablica 2

Normalna egzergia chemiczna  
jednorodnych substancji nieorganicznych

Substancja	Stan <sup>x)</sup>	Masa drobinowa M kg/kmol	Normalna egzergia chemiczna (M <sub>b<sub>n</sub></sub> ) kJ/kmol
1	2	3	4
AgBr	s	187,79	9 660
AgCN	s	133,89	632 470
AgCNO	s	149,89	410 750
Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	s	275,77	96 870
AgCl	s	143,33	8 000
AgClO <sub>3</sub>	s	191,33	178 460
AgClO <sub>4</sub>	s	207,33	192 380
AgF	s	126,88	96 780
AgF·H <sub>2</sub> O	s	144,90	97 820
AgF·4H <sub>2</sub> O	s	198,96	121 020
AgJ	s	234,79	86 130
AgNO <sub>3</sub>	s	169,89	33 120
AgO	s	123,88	71 970
Ag <sub>2</sub> O	s	231,76	109 180
Ag <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	s	247,76	85 330
AgOH	s	124,89	55 460
Ag <sub>2</sub> S	s	247,82	676 570
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	s	311,82	108 700
AlCl <sub>3</sub>	s	133,33	424 930
Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	s	150,16	3 051 810
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	s	342,16	502 190
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s, jednoskośny	197,82	395 650
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s, rombowy	197,82	388 530
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	s	229,82	191 120
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ·4H <sub>2</sub> O	s	301,90	200 620
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	s	246,00	2 603 570

cd. tablicy 2

1	2	3	4
AuBr	s	276,91	100 340
AuCl	s	232,45	111 130
AuCl <sub>3</sub>	s	303,35	184 270
AuCl <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	s	339,39	202 250
AuF	s	216,00	235 730
AuF <sub>3</sub>	s	254,00	445,490
AuJ	s	323,91	130 220
Au <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	442,00	68 200
B <sub>4</sub> C	s	55,29	2 813 830
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	69,64	50 010
B <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	s	117,82	2 794 350
BaCO <sub>3</sub>	s, II, witeryt	197,37	39 930
BaCl <sub>2</sub>	s	208,26	63 610
BaF <sub>2</sub>	s	175,36	61 470
BaO	s	153,36	244 880
BaO <sub>2</sub>	s	169,36	175 770
BaO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	s	187,38	188 110
Ba(OH) <sub>2</sub>	s	171,38	145 520
BaS	s	169,42	896 670
BaSO <sub>3</sub>	s	217,42	257 450
BaSO <sub>4</sub>	s, baryt	233,42	13 470
BiO	s	225,00	92 440
Bi <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	s	482,00	94 240
Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	s	514,18	2 165 480
BrO <sub>2</sub>	l	111,91	52 800
CHCl <sub>3</sub>	l	119,39	443 100
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	l	84,94	814 720
	g	84,94	816 900
CH <sub>3</sub> Cl	g	50,49	771 880



cd. tablicy 2

1	2	3	4
$\text{CH}_3\text{OH}$	l	31,03	1 505 260
$\text{CS}_2$	l	76,14	1 689 000
$\text{CaAl}_2\text{O}_4$	s	158,04	326 780
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_5$	s	270,20	559 690
$\text{CaC}_2$	s	64,10	1 471 200
$\text{CaCO}_3$	s, kalcyt	100,09	5 050
$\text{CaCO}_3$	s, aragonit	100,09	6 090
$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	s, dolomit	182,42	590
$\text{CaCl}_2$	s	110,99	84 910
$\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	s	129,00	63 610
$\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	s	183,06	61 990
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	s	219,10	62 390
$\text{CaF}_2$	s	78,08	3 540
$\text{CaFe}_2\text{O}_4$	s	215,78	56 480
$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	s	271,86	213 620
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	s	164,10	117 980
$\text{CaO}$	s	56,08	119 620
$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	s	214,12	339 540
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	s	326,28	485 420
$12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$	s	1 386,68	2 211 220
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	s	74,10	60 700
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	s, *	310,18	31 910
$\text{CaS}$	s	72,15	838 880
$\text{CaSO}_4$	s, anhydryt	136,14	4 300
$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	s, $\alpha$	145,15	4 350
$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	s, $\beta$	145,15	5 310
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	s, gips	172,25	2 760
$\text{CaSiO}_3$	s, wolastonit	116,17	27 590
$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	s	172,25	116 680
$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	s	228,33	250 770

cd. tablicy 2

1	2	3	4
$\text{CdCO}_3$	s	272,23	37 190
$\text{CdCl}_2$	s	183,32	65 810
$\text{CdO}$	s	128,41	65 980
$\text{Cd(OH)}_2$	s	146,43	61 370
$\text{CdS}$	s	144,48	749 050
$\text{CdSO}_4$	s	208,47	81 290
$\text{CdSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	s	226,49	63 070
$\text{Co}_2\text{O}_3$	s	129,89	944 940
$\text{CoCO}_3$	s	118,95	29 630
$\text{CoCl}_2$	s	129,84	103 800
$\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	s	165,88	83 270
$\text{CoO}$	s	74,94	51 070
$\text{Co}_3\text{O}_4$	s	240,82	37 560
$\text{Co(OH)}_2$	s	92,96	47 120
$\text{Co(OH)}_3$	s	109,97	27 240
$\text{CoS}$	s	91,00	765 580
$\text{Co}_2\text{S}_3$	s	214,06	2 108 250
$\text{CoSO}_4$	s	155,00	103 220
$\text{CoSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	s	263,12	88 090
$\text{CrCl}_2$	s	122,92	306 000
$\text{CrCl}_3$	s	158,38	221 120
$\text{CsCl}$	s	168,36	62 850
$\text{CsF}$	s	151,91	127 180
$\text{CsNO}_3$	s	194,92	22 310
$\text{Cs}_2\text{O}$	s	281,82	544 370
$\text{CsOH}$	s	149,92	164 090
$\text{Cs}_2\text{S}$	s	297,88	1 091 020
$\text{Cs}_2\text{SO}_4$	s	361,88	123 020
$\text{CuCO}_3$	s	123,55	33 210
$\text{CuCl}$	s	98,99	77 050

cd. tablicy 2

1	2	3	4
$\text{CuCl}_2$	s	134,44	120 450
$\text{CuCl}_2 \cdot \text{CuO}$	s	213,98	95 230
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	s	170,43	82 330
$\text{Cu}^{\text{F}}$	s	82,54	168 310
$\text{CuF}_2$	s	101,54	97 550
$\text{CuFe}_2\text{O}_4$	s	239,24	22 790
$\text{CuO}$	s	79,54	6 590
$\text{Cu}_2\text{O}$	s	143,08	123 500
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	s	97,56	19 770
$\text{CuS}$	s	95,60	668 020
$\text{Cu}_2\text{S}$	s, II	159,15	773 000
$\text{CuSO}_4$	s	159,60	80 940
$\text{Cu}_2\text{SO}_4$	s	223,14	222 450
$\text{F}_2$	g	38,00	448 820
F	g	19,00	228 880
$\text{F}_2\text{O}$	g	54,00	501 350
$\text{FeCl}_2$	s	126,75	193 130
$\text{FeCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	s	162,79	171 900
$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	s	198,83	168 030
$\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	s	234,87	105 130
$\text{FeCl}_3$	s	162,20	225 600
$\text{FeS}$	s, $\alpha$	87,91	879 000
$\text{FeS}$	s, $\beta$	87,91	890 180
$\text{FeS}_2$	s, piryt	119,97	1 447 410
$\text{FeSO}_4$	s	151,91	170 240
$\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	s	169,93	138 830
$\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	s	223,99	154 590
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	s	278,05	146 490
HBr	g	79,94	111 640
HCl	g	36,47	85 950



cd. tablicy 2

1	2	3	4
HF	g	20,01	71 840
HJ	g	127,92	212 570
HJO <sub>3</sub>	s	175,92	72 870
H <sub>3</sub> PO <sub>3</sub>	s	82,00	383 070
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	s	98,00	98 850
H <sub>2</sub> S	g	34,08	803 810
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	l	98,08	241 590
HgCO <sub>3</sub>	s	260,62	2 590
Hg <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	s	461,23	83 000
HgCl <sub>2</sub>	s	271,51	6 840
Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	s	472,12	38 900
HgO	s, czerwony	216,61	4 770
Hg <sub>2</sub> O	s	417,22	78 320
Hg(OH) <sub>2</sub>	s	234,63	10 420
Hg <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	s	435,24	82 080
HgS	s	232,67	687 960
Hg <sub>2</sub> S	s	433,28	700 600
HgSO <sub>4</sub>	s	296,67	73 670
Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	s	497,28	114 520
J <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	s	333,82	166 900
KBr	s	119,01	38 290
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	s	138,21	90 110
KCl	s	74,56	21 390
KClO <sub>4</sub>	s	111,55	133 710
KF	s	58,10	59 760
KJ	s	166,01	143 320
KMnO <sub>4</sub>	s	158,04	148 840
K <sub>2</sub> O	s	94,20	425 540
KOH	s	56,11	101 320
K <sub>2</sub> S	s	110,26	928 230

cd. tablicy 2

1	2	3	4
$K_2SO_3$	s	158,26	384 910
$K_2SO_4$	s, II	174,26	38 470
$K_2SiO_3$	s	154,29	1 565 320
$Li_2CO_3$	s	73,89	77 180
$LiCl$	s	42,39	70 160
$LiCl \cdot 2H_2O$	s	78,43	60 090
$LiNO_3$	s	68,95	12 700
$Li_2C$	s	29,88	233 460
$LiOH$	s	23,95	75 620
$LiOH \cdot H_2O$	s	41,97	73 650
$Li_2SO_4$	s	109,94	76 520
$Li_2SO_4 \cdot 2H_2O$	s	127,96	72 950
$MgCO_3$	s	84,33	13 700
$MgCl_2$	s	95,23	151 860
$MgFe_2O_4$	s	200,02	38 230
$MgO$	s	40,32	59 170
$Mg(OH)_2$	s	58,34	33 830
$MgS$	s	56,38	875 550
$MgSO_3$	s	104,38	305 400
$MgSO_4$	s	120,38	67 480
$MgSO_4 \cdot 2H_2O$	s	156,42	337 090
$MgSO_4 \cdot 4H_2O$	s	192,46	55 300
$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	s	228,50	71 190
$MgSiO_3$	s	100,41	25 060
$Mg_2SiO_4$	s, forsteryt	140,73	140 770
$Mg_2TiO_4$	s	160,54	92 200
$MnCl_2$	s	125,84	159 340
$MnCl_2 \cdot 2H_2O$	s	161,88	80 680
$MnFe_2O_4$	s	230,64	131 730
$Mn(OH)_2$	s	88,96	110 810

cd. tablicy 2

1	2	3	4
$Mn(OH)_3$	s	105,97	89 130
MnS	s, I, zielony	87,00	873 540
$MnSO_4$	s	151,00	137 540
$MnSO_4 \cdot H_2O$	s	169,02	115 130
$MnSO_4 \cdot 2H_2O$	s	187,04	380 670
$MoCl_5$	s	273,20	739 400
$Mo_2S_3$	s	288,08	2 811 400
$NH_4Cl$	s	53,50	331 150
$NH_4NO_3$	s	80,05	296 230
$(NH_4)_2SO_4$	s	132,15	660 470
$NO_3$	g	62,01	138 620
$N_2O_3$	g	76,02	187 550
$N_2O_5$	s	108,02	107 360
$NaAlO_2$	s	81,97	120 280
$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$	s, analcyt	220,17	95 250
NaBr	s	102,90	41 800
$Na_2CO_3$	s	105,99	53 130
$Na_2CO_3 \cdot H_2O$	s	124,01	52 790
$Na_2CO_3 \cdot 7H_2O$	s	232,13	69 640
NaCl	s	58,44	22 200
NaF	s	41,99	24 250
$NaHCO_3$	s	84,01	224 370
NaJ	s	149,90	150 390
$NaNO_3$	s	69,00	182 860
$Na_2O$	s	61,98	313 260
NaOH	s, II	40,00	84 490
$Na_2S$	s	78,05	930 340
$Na_2SO_3$	s	126,04	82 840
$Na_2SO_4$	s, II	142,04	35 000
$Na_2SO_4 \cdot CaSO_4$	s	278,18	20 320



cd. tablicy 2

1	2	3	4
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	s	322,24	54 380
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	s	122,07	71 660
$\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	s	182,16	61 190
$\text{Na}_4\text{SiO}_4$	s	184,05	312 120
$\text{Ni}_3\text{C}$	s	188,08	1 209 430
$\text{NiCO}_3$	s	118,70	42 980
$\text{NiCl}_2$	s	129,59	111 150
$\text{NiCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	s	165,63	84 340
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$	s	86,71	25 110
$\text{NiO}$	s	74,69	38 460
$\text{Ni}(\text{OH})_2$	s	92,71	49 160
$\text{Ni}(\text{OH})_3$	s	109,72	74 370
$\text{NiS}$	s, I	90,75	775 450
$\text{Ni}_2\text{S}_2$	s	181,50	1 524 940
$\text{Ni}_3\text{S}_2$	s	240,26	1 774 810
$\text{NiSO}_4$	s	154,75	76 080
$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	s, zielony	262,87	72 830
$\text{PbCl}_3$	l	137,32	744 060
$\text{PbCl}_5$	l	208,22	768 210
$\text{PbCO}_3$	s	267,22	17 090
$\text{PbCl}_2$	s	278,11	30 410
$\text{PbO}$	s, I, żółty	223,21	40 020
$\text{PbO}$	s, II, czerwony	223,21	39 400
$\text{PbO}_2$	s	239,21	17 380

cd. tablicy 2

1	2	3	4
$Pb_3O_4$	s	685,63	71 510
$Pb(OH)_2$	s	241,23	41 560
PbS	s	239,27	724 390
$PbSO_4$	s, II	303,27	21 660
$PbSiO_3$	s	283,30	36 120
$Pb_2SiO_4$	s	506,51	69 530
$Rb_2CO_3$	s	230,97	170 630
RbCl	s	120,93	51 440
RbF	s	104,48	102 780
RbJ	s	212,39	168 500
$RbNO_3$	s	147,49	14 490
$Rb_2O$	s	186,96	608 590
RbOH	s	102,49	147 840
$Rb_2S$	s	203,02	1 052 290
$Rb_2SO_4$	s	267,02	92 110
S	s, I, jednoskoś- na	32,06	598 950
$SCl_2$	l	102,96	636 820
$SCl_4$	l	173,86	838 080
$SO_2$	g	64,06	303 500
$SO_3$	g	80,06	225 070
$SeCl_2$	l	149,86	391 750
$SeCl_4$	s	220,76	454 820
$SeO_2$	s	110,96	155 930
$SiCl_4$	l	169,89	465 010

cd. tablicy 2

1	2	3	4
SiP	s	59,06	1 605 710
SiS <sub>2</sub>	s, biały	92,21	996 740
Sn	s, III, szara	118,70	547 180
SnCl <sub>2</sub>	s	189,60	355 630
SnS	s	150,76	1 059 060
SnS <sub>2</sub>	s	182,82	1 581 260
SrCO <sub>3</sub>	s, III, stronc- janit	147,64	16 570
SrCl <sub>2</sub>	s	158,54	74 480
SrCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	s	258,95	66 330
SrO	s	103,63	165 750
SrO <sub>2</sub>	s	119,63	153 800
Sr(OH) <sub>2</sub>	s	121,65	109 310
SrS	s	119,69	988 710
SrSO <sub>4</sub>	s	183,69	9 170
TiS <sub>2</sub>	s	112,02	1 743 640
UCl <sub>3</sub>	s	344,42	534 850
UCl <sub>4</sub>	s	379,87	483 790
UCl <sub>5</sub>	s	415,32	508 710
WS <sub>2</sub>	s	248,04	1 803 920
ZnCO <sub>3</sub>	s	125,39	38 290
ZnCl <sub>2</sub>	s	136,29	101 340
ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	s	241,08	27 630
ZnO	s	81,38	37 080
Zn(OH) <sub>2</sub>	s	99,40	34 260
ZnS	s, II, sfaleryt	97,44	764 860
ZnSO <sub>4</sub>	s	161,44	93 280
ZnSiO <sub>3</sub>	s	141,47	12 590
Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	s	222,85	121 280

x) c - stały, l - ciekły, g - gazowy.

## LITERATURA

- [1] Szargut J. - Bilans eksergetyczny procesów hutniczych, Archiwum Hutnictwa 6 (1961) nr 1, s. 23/60
- [2] Szargut J. - Klasyfikacja pojęć egzergii, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 104, Energetyka z. 14, 1964, str. 5/11.
- [3] Szargut J., Petela R. - Egzergia, WNT Warszawa, 1965.
- [4] Szargut J., Dziedziniewicz K. - Energie utilisable des substances chimiques, Entropie (w druku).

## ХИМИЧЕСКАЯ ЭКСЕРГИЯ ОДНОРОДНЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

## Р е з ю м е

В работе представлена новая общая схема расчета химической эксергии. Выяснены принципы подбора веществ отсчета для отдельных элементов. Авторы принимают газовые вещества отсчета для 10 элементов, твердые для 13 элементов, вещества отсчета в виде ионов растворенных в воде для 24 элементов и вещества отсчета в виде частиц, растворенных в воде для 3 элементов. Дан метод расчета химической эксергии соединения при помощи значений химической эксергии элементов. Приводится таблица значений химической эксергии однородных веществ, дополняющая раньше опубликованные таблицы.

## CHEMICAL EXERGY OF HOMOGENEOUS INORGANIC SUBSTANCES

## S u m m a r y

The paper gives the calculation scheme of the chemical exergy. The choice principles of a reference substance are explained. The authors assume the gaseous reference substances for 10 chemical elements, the solid ones for 13 elements, the reference substances as the ions dissolved in water for 24 elements and the reference substances as the molecules dissolved in water for 3 elements. There is presented the calculation method of the chemical exergy of the chemical compounds by means of the values determined for chemical elements. The table gives the chemical exergy values for homogeneous substances. That table is the supplement to the ones published before.