

RYSZARD PETELA
Katedra Energetyki Ciepłej

TADEUSZ KOZYRA

BILANS EGZERGIJNY TLENOWNI

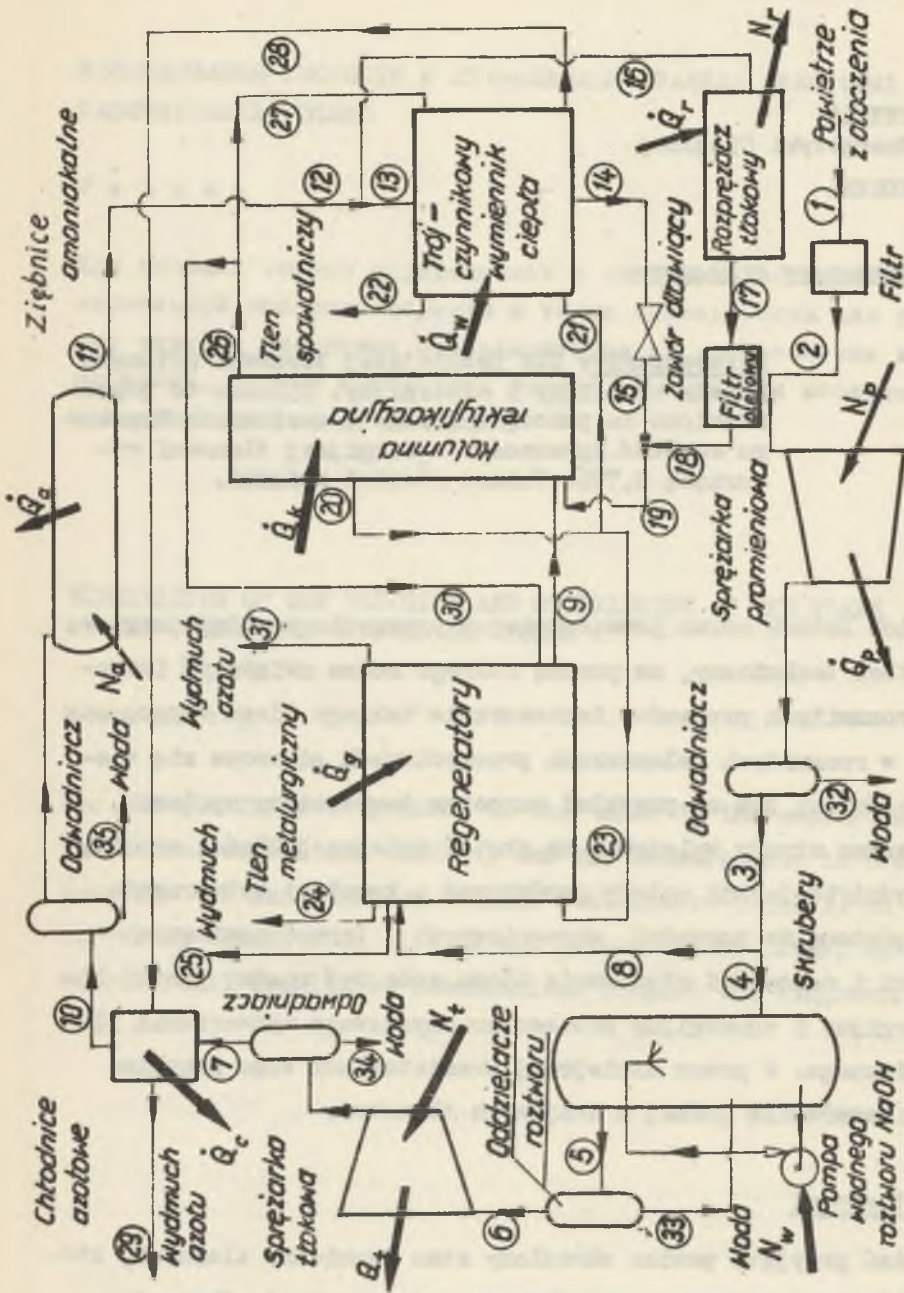
Streszczenie: Dla istniejącej tlenowni wykonano bilans energijny i egzergijny. Bilanse te przedstawiono za pomocą wykresów i zestawień. Uzyskano wartość sprawności egzergijnej tlenowni wynoszącą 9,75%. Podano również wnioski.

1. Wstęp

W ostatnich latach coraz powszechniej w przemyśle znajduje zastosowanie tlen techniczny, za pomocą którego można zwiększyć intensywność rozmaitych procesów. Zastosowanie takiego tlenu w procesie spalania w rozmaitych paleniskach przemysłowych odznacza się wieloma korzyściami jak na przykład wzrostem temperatury spalania, zmniejszeniem straty wylotowej na skutek mniejszej ilości spalin, itp. Korzyści te jednak należy porównywać z kosztami wytwarzania tlenu. Podstawą do rozważań ekonomicznych i termodynamicznych możliwości i celowości stosowania tlenu może być między innymi bilans energijny i egzergijny procesu przemysłowego wytwarzania tlenu technicznego. W pracy niniejszej przedstawiono więc przykład takich bilansów dla jednej z krajowych tlenowni.

2. Opis tlenowni

Do rozważań przyjęto pewien określony stan termiczny tlenowni, którą przedstawiono uproszczonym schematem na rysunku 1. Parametry termiczne czynników zestawiono w tabelicy 1, [1].



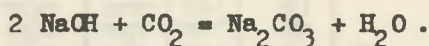
Rys. 1. Schemat tlenowni

Tablica 1

Parametry czynników w tlenowni

Numer punktu pomiarowego	Czynnik	Ciśnienie bar	Temperatura °C	Właściwa entalpia kJ/kmol	Właściwa entropia kJ/(kmol deg)	Właściwa egzergia kJ/kmol	Strumień czynnika mol/s	Udział molowy tlenu ($Q_2 = 100 - X_2$) %
1	Powietrze z otoczenia	0,98	1	13130	124,30	0	272,2	
2		0,90	4	13220	123,20	-189	272,2	
3		6,18	26	13860	111,60	4224	272,0	
4		6,0	25	13830	111,70	4152	33,4	
5		5,9	25	13830	111,80	4125	33,4	
6		5,8	24	13800	111,90	4068	33,3	
7		140	20	12608	82,23	11175	33,2	
8		5,9	25	13830	111,80	4125	238,8	
9		5,8	-165	7525	78,10	7235	225,5	
10	Powietrze	139	6	12110	80,50	11160	33,2	21,0
11		138	-45	10100	72,60	11300	33,2	
12		138	-41	10280	73,50	11230	33,2	
13		138	-41	10280	73,50	11230	11,1	
14		135	-95	7500	60,20	12100	11,1	
15		5,8	-172	7500	77,90	7250	11,1	
16		138	-40	10300	73,60	11225	22,0	
17		6,0	-156	8065	83,00	6435	22,0	
18		5,9	-155	8100	83,15	6430	22,0	
19		5,8	-162	7800	81,30	6630	33,2	
20		1,46	-179	7700	89,30	8180	48,9	
21		1,22	-175	7770	95,60	6880	3,5	
22	Tlen	1,08	-40	11600	118,00	4482	3,5	99,8
23		1,27	-174	7700	92,00	7580	45,4	
24		1,07	23	13480	125,30	3835	46,0	98,6
25	Wydmuch powietrza	3,45	19	13938	117,59	4128	7,4	21,0
26		1,18	-179	7600	91,40	4013	209,8	
27		1,18	-177	7650	92,10	3873	4,3	
28	Azot	1,05	-40	11670	118,70	614	4,3	2,6
29		1,00	10	13140	124,80	415	4,3	
30		1,18	-176	7680	92,15	3869	205,5	
31	Wydmuch pow. i azotu	1,08	24	13520	122,30	1322	210,7	5,0
32	Woda	6,18	26	1972	6,82	229	0,186	-
33	Woda (roztwór NaOH)	5,9	25	1890	6,57	222	0,008	-
34	Woda	140	20	1739	5,28	193	0,166	-
35	Woda	139	6	696	1,77	213	0,006	-

Powietrze z otoczenia zassane poprzez filtr zostaje sprężone do ciśnienia 6 bar przez chłodzoną sprężarkę promieniową. W sprężarce tej występują straty ciepła $\dot{Q}_p = 1607,3$ kW zaś rozwijana moc silnika elektrycznego napędzającego sprężarkę wynosiła $N_p = 1926$ kW. Część zawartej w powietrzu wilgoci zostaje wykroplona i oddzielona w odwadniaczu. Następnie powietrze rozdzielona się na część płynącą do skruberów i na część płynącą do regeneratorów. W skruberach powietrze jest zraszane przez wodny roztwór NaOH dla usunięcia CO_2 z powietrza. Roztwór ten krąży w układzie zamkniętym i napędzany jest pompą o mocy silnika elektrycznego $N_w = 13,6$ kW. W czasie pomiarów roztwór ten nie był regenerowany i w związku z tym występuje w nim wzrost zawartości sody według reakcji



Wzrost ten reprezentowany małą pozycją w bilansach, pominięto.

Następnie powietrze po oddzieleniu kropeł roztworu w oddzielnikach dopływa do chłodzonej sprężarki tłokowej, w której jest sprężane do ciśnienia rzędu 160 bar. W sprężarce tej występuje strata ciepła $\dot{Q}_t = 300,6$ kW. Moc silnika elektrycznego napędzającego sprężarkę wynosiła $N_t = 348,6$ kW. Ze sprężarki tej powietrze przez odwadniacz płynie do chłodnic, w których ochładzane jest azotem. Strata ciepła w chłodnicach wynosi $\dot{Q}_c = 10,2$ kW. Po oddzieleniu wilgoci powietrze to jest ziębione w sprężarkowych ziębnicach amoniakalnych ($N_z = 62,4$ kW). Strata ciepła wynosi tu $\dot{Q}_z = 66,7$ kW. Oziębione powietrze płynie następnie częściowo do trójczynnikowego wymiennika ciepła, w którym oziębia się kosztem wzrostu temperatury tlenu i azotu (przy stracie zimna $\dot{Q}_w = 1,5$ kW), częściowo zaś do rozprężacza tłokowego celem dalszego oziębienia się i wykonania przy tym pracy ($N_r = 37,0$ kW). W rozprężaczu strata zimna jest bardzo mała ($\dot{Q}_r = 0,0$ kW). Powietrze wypływające

z trójczynnikowego wymiennika ciepła dławione jest następnie zaworem i miesza się z powietrzem z rozprężacza tłokowego, które oczyszcza się z oleju za pomocą filtru. Obydwie te strugi dopływają następnie do dolnej części kolumny rektyfikacyjnej. Do tej części również dopływa powietrze oddzielone przed skruberami i ochłodzone w regeneratorach za pomocą tlenu i azotu.

W kolumnie rektyfikacyjnej, w której można wyodrębnić trzy części (dolna kolumna, skraplacz-parowacz oraz górna kolumna) następuje rozdzielenie powietrza. Strata zimna w kolumnie rektyfikacyjnej wynosi $\dot{Q}_k = 15,2$ kW. Tlen odprowadzany z dolnej części kolumny górnej płynie częściowo do regeneratorów, z których po ochłodzeniu powietrza odprowadzony jest do zbiornika tlenu metalurgicznego, częściowo zaś do trójczynnikowego wymiennika ciepła, z którego po oziębieniu powietrza pobierany jest do odbiorców lub do zbiornika. Strata zimna w regeneratorach wynosi $\dot{Q}_g = 19,7$ kW.

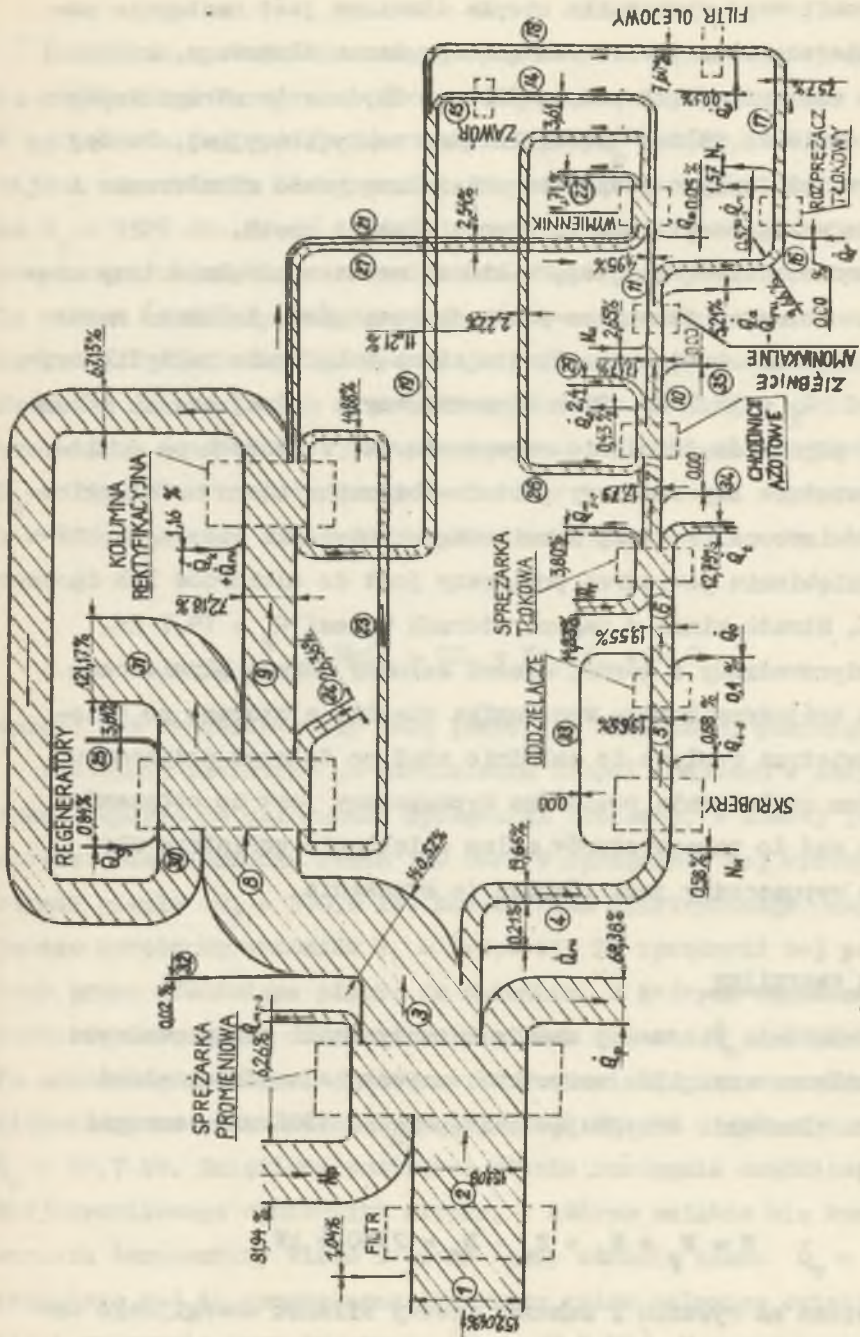
Azot odprowadzany z górnej części kolumny górnej płynie częściowo do trójczynnikowego wymiennika ciepła, z którego po oziębieniu powietrza dopływa do chłodnic skąd po dalszym podgrzaniu się kosztem ochłodzenia powietrza wypuszczany jest do otoczenia, częściowo zaś do regeneratorów celem oziębienia powietrza skąd następnie wypuszczany jest również do otoczenia.

3. Bilans energijny

Stosując równanie pierwszej zasady termodynamiki przeprowadzono odrębne bilanse energijne wszystkich najważniejszych urządzeń składowych tlenowni. Przyjmując następnie za 100% sumę energii napędowej

$$N = N_p + N_w + N_t + N_a = 2350,6 \text{ kW}$$

przedstawiono na rysunku 2 schemat ideowy bilansu energijnego całej tlenowni.



Rys. 2. Bilans energetyczny tlenowni

Proces rozdzielania składników powietrza w tlenowni jest jednym z procesów, dla którego ocena użytecznego skutku nie może być przeprowadzona na podstawie odpowiedniego przyrostu entalpii [2]. Różnica bowiem entalpii powietrza rozdzielonego i nie rozdzielonego przy tej samej temperaturze jest praktycznie równa zero. Jeżeli wziąć pod uwagę rzeczywiste parametry termiczne produkowanych strumieni rozdzielonego powietrza z pominięciem małych strumieni np. wody z odwadniaczy, wówczas w rozważanym przykładzie tlenowni różnica ta wynosi

$$\frac{\dot{I}_{24} + \dot{I}_{22} + \dot{I}_{25} + \dot{I}_{31} + \dot{I}_{29} - \dot{I}_1}{N} = 155,29 - 152,04 = 3,25\%$$

gdzie:

\dot{I} - entalpia strumienia czynnika w danym punkcie.

Proces uzyskiwania tlenu nadaje się więc szczególnie do określania jego doskonałości za pomocą sprawności egzergijnej.

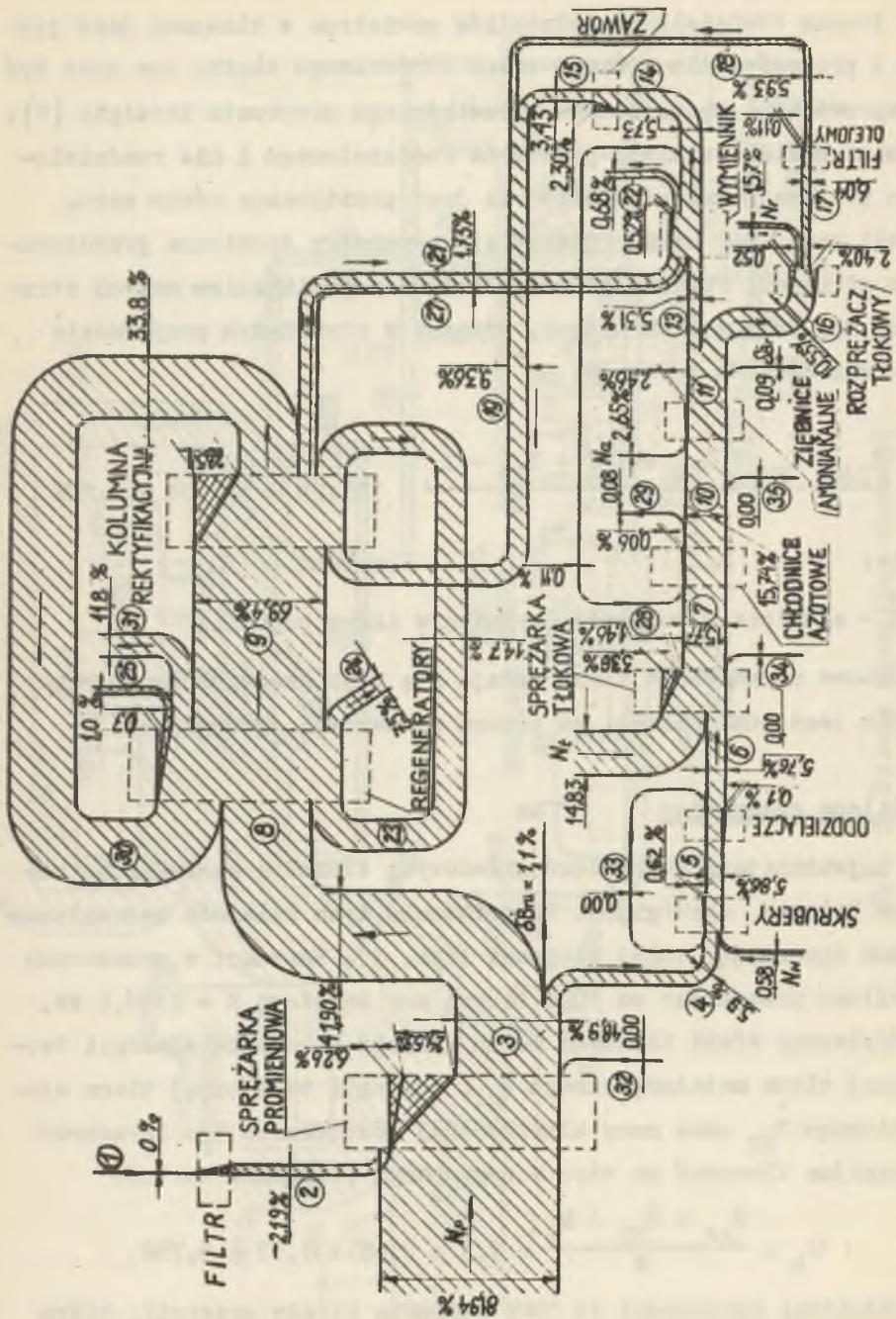
4. Bilans egzergijny

Dla najważniejszych urządzeń składowych tlenowni sporządzono odrębne bilanse egzergijne. Na podstawie tych bilansów sporządzono bilans egzergijny całej tlenowni (rys. 3). Wartości w procentach określono przyjmując za 100% łączną moc napędową $N = 2350,6$ kW.

Użyteczny efekt tlenowni można wyrazić jako sumę egzergii termicznej tlenu metalurgicznego \dot{B}_{24} , egzergii termicznej tlenu spawalniczego \dot{B}_{22} oraz mocy elektrycznej rozprężacza N_F . Sprawność egzergijna tlenowni ma więc w rozważanym przypadku wartość

$$\eta_b = \frac{\dot{B}_{24} + \dot{B}_{22} + N_F}{N} = 7,5 + 0,68 + 1,57 = 9,75\%$$

Uzupełnienie sprawności do 100% stanowią straty egzergii, które przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Bilans egzergijny tlenowni

5. Wnioski

W tablicy 2 podano zestawienie składników bilansu energetycznego i egzergicznego aby umożliwić porównanie tych bilansów.

Pozycje przychodowe obu bilansów różnią się tylko w przypadku strumienia powietrza pobieranego z otoczenia. Pozycje rozchodowe składają się ze strat i efektu użytecznego. Największe straty w bilansie energetycznym występują w regeneratorach, w sprężarce promieniowej oraz w sprężarce tłokowej. W bilansie egzergicznym największe straty mają miejsce w sprężarce promieniowej, w kolumnie rektyfikacyjnej oraz w regeneratorach.

Bilans egzergiczny pozwala w właściwy sposób ocenić straty w poszczególnych ogniach tlenowni oraz ujawnia właściwe proporcje wielkości strat w poszczególnych procesach tlenowni. Z bilansu energetycznego wynika na przykład, że w rozpatrywanej tlenowni źródłem poważnych strat (28,56%) jest kolumna rektyfikacyjna podczas gdy z bilansu energetycznego wynika, że proces w kolumnie rektyfikacyjnej przebiega z niewielką ujemną stratą energii (-1,16%).

Dzięki wprowadzeniu do rozważań bilansu egzergicznego, można posługiwać się pojęciem sprawności egzergicznej tlenowni wynoszącej w rozważanym przypadku zaledwie 9,75%. Proces rozdzielania składników powietrza jest więc procesem mało sprawnym. Sprawdzenia takiego nie można dokonać na podstawie bilansu energetycznego.

Dla bilansowanej tlenowni zużycie energii elektrycznej przypadające na jeden normalny (0°C , 1 bar) m^3 tlenu wynosi

$$\frac{N}{22,71 (\dot{n}_{22} + \dot{n}_{24})} = 0,582 \text{ kW}/(\text{m}_n^3 \text{ O}_2),$$

gdzie:

\dot{n}_{22} , \dot{n}_{24} - molowy strumień czynnika w punkcie 22 i 24 (rys. 1).

Tablica 2

Pozycje bilansów tlenowni

Pozycja bilansu	Wartość pozycji (%) w bilansie	
	energijnym	egzergijnym
Sprężarka promieniowa	81,94	81,94
Sprężarka tłokowa	14,83	14,83
Amoniakalnia	2,65	2,65
Skrubery	0,58	0,58
Powietrze z otoczenia	152,04	0
Przychód razem	252,04	100,00
Straty		
Filtr	-1,04	2,19
Sprężarka promieniowa	74,64	30,85
Regeneratory	123,97	13,50
Kolumna rektyfikacyjna	-1,16	28,53
Skrubery	0,58	0,62
Odziałacze roztworu	0,10	0,10
Sprężarka tłokowa	16,59	4,82
Chłodnice azotowe	2,84	0,14
Ziębnice amoniakalne	5,21	2,46
Trójczynniki wymiennik ciepła	-0,05	0,52
Rozprężacz	0,52	2,92
Filtr olejowy	-0,03	0,11
Zawór	0	2,30
Rurociągi	0,23	1,19
Efekt użyteczny	29,64	9,75
Rozchód razem	252,04	100,00

Obliczona wartość jednostkowego zużycia energii jest w przybliżeniu równa wartościom takim podawanym w literaturze [3].

Wydmuchiwanie do otoczenia azotu z regeneratorów powoduje znaczne straty. W przypadku użytecznego wykorzystywania tego azotu jak również azotu z chłodziw azotowych sprawność egzergijna wzrosłaby do wartości $9,75 + (\dot{B}_{31} + \dot{B}_{29})/N = 9,75 + 11,8 + 0,08 = 21,63\%$.

W punkcie 4 niniejszej pracy obliczono wartość sprawności egzergijnej wynoszącą 9,75%. Jeżeli jednak uwzględnimy się w liczniku tej sprawności użyteczną wartość użytecznego produktu tlenowni, wówczas egzergię strumieni \dot{n}_{24} i \dot{n}_{22} należy wyrazić dla temperatury i ciśnienia otoczenia, bowiem celem tlenowni jest jedynie zmiana koncentracji tlenu w powietrzu a nie zmiana ciśnienia lub temperatury. Uwzględniając moc N_r bez zmian otrzymuje się w tym przypadku wartość sprawności egzergijnej wynoszącą 9,09%.

LITERATURA

- [1] Petela R., Kozyra T.: Bilans egzergetyczny tlenowni. Mgr pr. dypl. Zakł. Gospod. Gazowej Katedry Energetyki Ciepłej Politechniki Śląskiej, 1969.
- [2] Szargut J., Petela R.: Egzergia, WNT Warszawa 1965 lub poprawione i uzupełnione wydanie w języku rosyjskim: Ekszergija, Energija, Moskwa 1968.
- [3] Jepifanowa W.I., Aksielrod L.S.: Razdielienie wozducha miethodom głubokogo ochładzienia. Izdatielstwo "Maszynostrojenie", Moskwa 1964.

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС КИСЛОРОДНОЙ УСТАНОВКИ

Р е з ю м е

Для существующей кислородной установки сделан тепловой и эксергетический баланс. Балансы представлены в виде диаграмм и таблиц. Эксергетический к.п.д. установки имеет значение 9,75%. Сделаны некоторые выводы.

EXERGY BALANCE OF THE OXYGEN STATION

S u m m a r y

The paper contains the energy and the exergy balances of the existing oxygen station. The balances are presented by means of the diagrams and the tables. The worth of 9,75% for the exergy efficiency of the station is obtained. Conclusions are given.