



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

21 Numer zgłoszenia: 307073

51 IntCl⁶:
F25J 1/00
F01K 9/02

22 Data zgłoszenia: 02.02.1995

GZYTELNIA
OGOLNA

54 Skraplacz azotu pracujący w przepływie odwróconym skroplin jako silnik parowy

43 Zgłoszenie ogłoszono:
05.08.1996 BUP 16/96

45 O udzieleniu patentu ogłoszono:
31.03.2000 WUP 03/00

73 Uprawniony z patentu:
Politechnika Lubelska, Lublin, PL

72 Twórcy wynalazku:
Wiesław Skrynicki, Lublin, PL
Wacław Mączka, Lublin, PL
Tomasz Milczek, Lublin, PL

74 Pełnomocnik:
Milczek Tomasz, Politechnika Lubelska

57 1. Skraplacz azotu pracujący z przepływie odwróconym skroplin jako silnik parowy zawierający dwa zespoły dwuwirnikowe wielosekcyjne, ciepły i zimny, posiadające po jednym wirniku łopatkowym o różnych średnicach z łopatkami o zarysie zawierającym dwie proste przecinające się w osi obrotu wirnika łopatkowego, w którego skład wchodzi łopatki, pierścienie międzysekcyjne oraz tarcze końcowe z tulejowymi wałami, przy czym oba wirniki łopatkowe tych zespołów są za sobą połączone sztywno, a głowy łopatek przylegają do kołowych gładzi swoich korpusów, zaś stopy tych łopatek przylegają do swoich dwóch nieruchomych cylindrów wewnętrznych połączonych sztywno z ich korpusami, w których są ułożyskowane wirniki łopatkowe, każdy współpracujący ze swoim wirnikiem wrębowym, ułożyskowanym w swoim cylindrze wewnętrznym, **znamienny tym, że** sekcje (chd, S₂r₂, S₃r₃) są wyposażone w parę sektorów pierścieniowych (39), których powierzchnie wewnętrzne przylegają do gałęzi korpusów (1, 37), jeden w strefie sprężania i drugi w strefie rozprężania gazu, które są wbudowane suwliwie i szczelnie w korpusy (1, 37) z osią przesunięcia kątownego w osi obrotu wirników łopatkowych, oraz zawierających nacięte sektory ślimacznicy sprzężonych ze ślimakami trzpieni regulacyjnych (40), ułożyskowanych w korpusach (1 i 37), zaś w pojedyncze podobne sektory regulacyjne wyposażone są pozostałe sekcje (S₄, S_{d1}, S_{d2}, S₁₁, i S₁III).

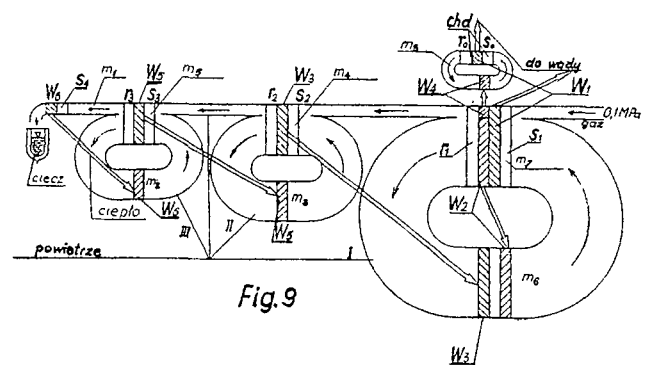


Fig. 9

Skraplacz azotu pracujący w przepływie odwróconym skroplin jako silnik parowy

Zastrzeżenia patentowe

1. Skraplacz azotu pracujący z przepływie odwróconym skroplin jako silnik parowy zawierający dwa zespoły dwuwirnikowe wielosekcyjne, ciepły i zimny, posiadające po jednym wirniku łopatkowym o różnych średnicach z łopatkami o zarysie zawierającym dwie proste przecinające się w osi obrotu wirnika łopatkowego, w którego skład wchodzi łopatki, pierścienie międzysekcyjne oraz tarcze końcowe z tulejowymi wałami, przy czym oba wirniki łopatkowe tych zespołów są za sobą połączone sztywno, a głowy łopatek przylegają do kołowych gładzi swoich korpusów, zaś stopy tych łopatek przylegają do swoich dwóch nieruchomych cylindrów wewnętrznych połączonych sztywno z ich korpusami, w których są ułożyskowane wirniki łopatkowe, każdy współpracujący ze swoim wirnikiem wrębowym, ułożyskowanym w swoim cylindrze wewnętrznym, **znamienny tym**, że sekcje (chd, S_2r_2, S_3r_3) są wyposażone w parę sektorów pierścieniowych (39), których powierzchnie wewnętrzne przylegają do gładzi korpusów (1, 37), jeden w strefie sprężania i drugi w strefie rozprężania gazu, które są wbudowane suwliwie i szczelnie w korpusy (1, 37) z osią przesunięcia kąтового w osi obrotu wirników łopatkowych, oraz zawierające nacięte sektory ślimacznicy sprzężonych ze ślimakami trzpieni regulacyjnych (40), ułożyskowanych w korpusach (1 i 37), zaś w pojedyncze podobne sektory regulacyjne wyposażone są pozostałe sekcje ($S_4, S_{d1}, S_{d2}, S_{1I},$ i S_{1III}).

2. Skraplacz azotu, **znamienny tym**, że sekcje (chd, S_{1I} i S_{1III}) zespołu ciepłego wyposażone są w walcowe oddzielne trzy wrzeciona (27, 28 i 29) ze ściętymi płaszczyznami średnicowymi na długości roboczej, osadzone obrotowo w gniazdach cylindrycznych o wspólnej osi obrotu, umieszczonych w cylindrze wewnętrznym (16) zespołu ciepłego i mają niezależne skręty, przy czym każde wrzeciono swoją pobocznica przysłania lub odsłania grupę (k5) dwóch lub trzech równoległych prostokątnych kanałów przy regulacji wydajności objętościowej, łączących strefy sprężania tych sekcji z wnętrzem ich odcinków cylindra wewnętrznego (16) zespołu ciepłego, zaś w podobne współosiowe wrzeciona (22, 32, 31) umieszczone w cylindrze wewnętrznym (18) zespołu zimnego wyposażone są sekcje (S_4, S_3r_3 i S_2r_2), a niezależne ich skręty uzyskuje się przez układ trzech wałków umieszczonych jeden w drugim, których końce wysunięte są na zewnątrz korpusu (37) zespołu zimnego.

3. Skraplacz azotu według zastrz. 2, **znamienny tym**, że napęd regulacyjny wrzecion (27, 28, 29) zespołu ciepłego z naciętymi na nich kółkami zębatymi uzyskuje się przez układ trzech dodatkowych wałków współosiowych zakończonych trzema kółkami zębatymi (34, 35, 36) zazębionymi z trzema pośrednimi kółkami (30) osadzonymi ślizgowo na wałku (38) wrzeciona (31) zespołu zimnego.

* * *

Przedmiotem wynalazku jest skraplacz azotu pracujący w przepływie odwróconym skroplin jako silnik parowy w układzie akumulacji energii po dokonaniu zabiegów regulacyjnych.

Dotychczas w technice znane jest urządzenie skraplające gazy z niskim ciśnieniem jego sprężania do 1 MPa. W polskim opisie patentowym nr 144 579 opisane jest urządzenie do skraplania gazów o niskim ciśnieniu sprężania do 1 MPa. Według tego opisu zespół urządzeń do skraplania gazów ma co najmniej dwie chłodnice gazowe, w których czynnikiem roboczym jest rozprężony gaz. Zespół ma również rurę wirową, w której zachodzi zjawisko Ranquéa. Komora rozprężna rury wirowej połączona jest ze zbiornikiem skroplonego gazu. Urządzenie ma sprężarkę, chłodnicę wodną i trzy chłodnice gazowe stanowiące drugi, trzeci i czwarty stopień chłodzenia skraplanego gazu. Chłodnica gazowa czwartego stopnia chłodzenia połączona jest z częścią

zimną rury wirowej, chłodnica gazowa trzeciego stopnia chłodzenia połączona jest z chłodnicą czwartego stopnia chłodzenia, natomiast chłodnica drugiego stopnia chłodzenia połączona jest z częścią gorącą rury wirowej i z chłodnicą gazową trzeciego stopnia chłodzenia. Część gorąca rury wirowej wyposażona jest w chłodnicą płaszczową, która stanowi element pośredniczący w przepływie rozprężonego gazu pomiędzy chłodnicami gazowymi czwartego i trzeciego stopnia chłodzenia. Część zimna rury wirowej osadzona jest wewnątrz zbiornika skroplonego gazu. Natomiast komora rozprężna rury wirowej ma kształt cylindryczny, korzystnie w postaci ściętego stożka rozszerzonego w pobliżu części zimnej rury wirowej. Komora ta połączona jest ze zbiornikiem skroplonego gazu za pomocą szczeliny, zwłaszcza umieszczonej wzdłuż tworzącej komory rozprężnej. Z opisu patentowego polskiego nr 152 837 znana jest maszyna chłodnicza obiegu gazowego, której mechanizm roboczy stanowi sztywny wirnik łopatkowy złożony z dziesięciu łopatek przymocowanych jednymi końcami do płaskiej tarczy obrotowej, a drugimi końcami do płaskiego pierścienia obrotowego połączonego z drugą tarczą obrotową poprzez wieniec koła zębatego o zarysie wewnętrzny, umieszczony w cylindrze zewnętrznym o zarysie okręgu jego gładzi, do której jest styczna wewnętrznie pobocznicą wirnika wrębowego, sprzężonego z wirnikiem łopatkowym parą kół zębatach, a którego wręby mają zarys cykloidalny. Dwie płaszczyzny każdej łopatki współpracujące z dwiema krawędziami każdego wrębu, dające odcinki prostych zarysu teoretycznego łopatki przecinają się w osi obrotu wirnika łopatkowego, jeżeli jego zewnętrzna średnica teoretyczna jest podwojoną średnicą teoretyczną wirnika wrębowego. Natomiast w dolnej części cylindra wewnętrznego wykonane jest okno przepływowe łączące międzyłopatkowe komory robocze z pierwszym przewodem wymiennika dolnego źródła ciepła, zaś w dolnej części cylindra zewnętrznego jest okno przepływowe przechodzące w spiralny kanał połączony z drugim przewodem wymiennika dolnego źródła ciepła. Wymiennik górnego źródła ciepła połączony jest ze strefami sprężania i rozprężania gazu. Z analogicznej literatury naukowo-technicznej znane są wykresy entropowe wodoru, tlenu i azotu z zakresem niskich temperatur, w których wykorzystany został między innymi - Temperature - entropy diagram for nitrogen. Section of T-S diagram for nitrogen by E.S. Burnett, 1950. (Reprinted from U.S. Bur. Mines Rept. Invest. 4729). Thirty-nine references are quoted by Burnett, U.S. Bur. Mines Rept. Invest. 4729, 1950.

Istotą skraplacza azotu pracującego w przepływie odwróconym skroplin jako silnik parowy zawierającego dwa zespoły dwuwirnikowe wielosekcyjne, ciepły i zimny, posiadające po jednym wirniku łopatkowym o różnych średnicach z łopatkami o zarysie zawierającym dwie proste przecinające się w osi obrotu wirnika łopatkowego, w którego skład wchodzi łopatki, pierścienie międzysekcyjne oraz tarcze końcowe z tulejowymi wałami, przy czym oba wirniki łopatkowe tych zespołów są ze sobą połączone sztywno, a głowy łopatek przylegają do kołowych gładzi swoich korpusów, zaś stopy tych łopatek przylegają do swoich gładzi dwóch nieruchomych cylindrów wewnętrznych połączonych sztywno z ich korpusami, w których są ułożyskowane wirniki łopatkowe, każdy współpracujący ze swoim wirnikiem wrębowym, ułożyskowanym w swoim cylindrze wewnętrznym jest to, że sekcje są wyposażone w parę sektorów pierścieniowych, których powierzchnie wewnętrzne przylegają do gładzi korpusów, jeden w strefie sprężania i drugi w strefie rozprężania gazu, które są wbudowane suwliwie i szczelnie w korpusy z osią przesunięcia kąтового w osi obrotu wirników łopatkowych, oraz zawierające nacięte sektory ślimacznice sprzężonych ze ślimakami trzpieni regulacyjnych, ułożyskowanych w korpusach, zaś w pojedyncze podobne sektory regulacyjne wyposażone są pozostałe sekcje. Sekcje zespołu ciepłego wyposażone są w walcowe oddzielne trzy wrzeciona ze ściętymi płaszczyznami średnicowymi na długości roboczej, osadzone obrotowo w gniazdach cylindrycznych o wspólnej osi obrotu, umieszczonych w cylindrze wewnętrznym zespołu ciepłego i mają niezależne skręty, przy czym każde wrzeciono swoją pobocznica przysłania lub odsłania grupę dwóch lub trzech równoległych prostokątnych kanałów przy regulacji wydajności objętościowej, łączących strefy sprężania tych sekcji z wnętrzem ich odcinków cylindra wewnętrznego zespołu ciepłego, zaś w podobne współosiowe wrzeciona umieszczone w cylindrze wewnętrznym zespołu zimnego wyposażone są inne sekcje, a niezależne ich skręty uzyskuje się przez układ trzech

wałków umieszczonych jeden w drugim, których wysunięte są na zewnątrz korpusu zespołu zimnego. Napęd regulacyjny wrzecion zespołu ciepłego z naciętymi na nich kółkami zębatymi uzyskuje się przez układ trzech dodatkowych wałków współosiowych zakończonych trzema kółkami zębatymi ząbionymi z trzema pośrednimi kółkami osadzonymi ślizgowo na wałku wrzeciona zespołu zimnego.

Korzystnym skutkiem stosowania wynalazku jest zmniejszenie energii zużytej na jednostkę masy skroplin azotu przez niskie ciśnienie sprężania tego gazu w procesie jego skraplania i wysoką sprawność cieplną sprężarek i rozprężarek skraplacza. Możliwość przedstawiania skraplacza do pracy silnikowej obniży koszty całego urządzenia do procesu akumulacji energii w tej postaci i jej wyzwania z par azotu podczas ich wielostopniowego rozprężania od ciśnienia 16 MPa do 0,1 MPa z ich międzystopniowym podgrzewaniem ciepłem otoczenia lub odpadowym. Zastosowanie szybkobieżnej wirnikowej maszyny łopatkowej zapewni ciągłość tych procesów zmniejszając ilość ruchomych części i masę całego urządzenia co daje możliwość zastosowania do napędu pojazdów ekologicznych. Korzystną ekonomikę procesu akumulacji daje wykorzystanie ciepła powstającego podczas skraplania jak i korzystną ekonomikę pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych o zmiennych losowo i okresowo mocach.

Przedmiot wynalazku przedstawiony jest na rysunku, na którym fig. 1a przedstawia przekrój poprzeczny B-B zespołu ciepłego skraplacza, fig. 1b - przekrój poprzeczny D-D regulacji ciśnienia, fig. 1c - zarys rzeczywisty i teoretyczny łopatki wirnika, fig. 2 - przekrój osiowy A-A zespołu ciepłego skraplacza, fig. 3 - przekrój osiowy A-A zespołu zimnego skraplacza, fig. 4 - przekrój poprzeczny B-B cząstkowy zespołu ciepłego skraplacza z przekrojem poprzecznym C-C cząstkowym zespołu zimnego i półwidok W skraplacza bez wymienników ciepła i zaworów, fig. 5 - rozwinięcie osiowego przekroju łamanego E-E układu regulacji wydajności objętościowej poszczególnych sekcji skraplacza, fig. 6 - schemat ideowy skraplacza, fig. 7 - schemat ideowy silnika na pary azotu, fig. 8 - wykres pomocniczy w układzie temperatura - entropia azotu do opisu działania i wydajności skraplacza, fig. 9 - schemat przepływu strumieni powietrza i azotu oraz przepływu strumieni ciepła do opisu działania skraplacza, fig. 10 - wykres w układzie temperatura - entropia azotu do opisu działania silnika parowego i jego wydajności.

Budowa skraplacza wirnikowego według schematu ideowego i przekrojów jest taka, że pierwsza sprężarka S_1 skraplacza nastawionego na skraplanie posiada trzy sekcje S_{II} , S_{III} i S_{III} , zaś pierwszy stopień jest dwusekcyjny, którego mniejsza objętościowo sekcja połączona jest króćcem ssącym z atmosferą, natomiast o większej objętości sekcja swoim króćcem łączy się przewodem z wylotem kanałów + wymiennika ciepła W_2 , zaś między tymi trzema stopniami umieszczone są sekcje wodnego wymiennika W_1 . Króciec tłoczny sekcji S_{III} łączy się z sekcją wymiennika W_1 , z której wylot rozgałęzia się i jeden przewód łączy się z wlotem do kanałów - wymiennika W_4 , a drugi łączy się z wlotem do kanałów - wymiennika W_2 . Wyloty z tych kanałów wymienników W_4 i W_2 łączy się w jeden przewód, który rozgałęzia się na dwa przewody, z których jeden prowadzi do króćca zasilania rozprężarki sekcji r_1 , a drugi do króćca zasilania rozprężarki sekcji $Sd1$, zaś króćce wylotowe tych rozprężarek łączą się z rozgałęzieniem, z którym połączony jest wlot kanałów + wymiennika W_3 , których wylot łączy się z wlotem do kanałów + wymiennika W_2 . Z przewodem łączącym wyloty z rozprężarek sekcji r_1 i $Sd1$ łączy się przewód prowadzący do króćca osiowego strefy sprężania sprężarko - rozprężarki sekcji $S_2 r_2$, z którym łączy się przewód odpływu z kanałów + wymiennika W_5 . Króciec tłoczny i zasilający sekcji $S_2 r_2$ połączone są z kanałami - wymiennika W_3 . Kanał spiralny sekcji $S_2 r_2$ łączy się z rozgałęzieniem, którego jeden przewód prowadzi do wlotu kanałów + wymiennika W_5 , a drugi przewód łączy się z króćcem osiowym sprężarko - rozprężarki sekcji $S_3 r_3$ prowadzącym do jej strefy sprężania, z którym łączy się przewód odpływu z kanałów + wymiennika W_6 . Króciec tłoczny i zasilający sekcji $S_3 r_3$ łączą się z kanałami - wymiennika W_5 , zaś kanał spiralny sekcji $S_3 r_3$ łączy się z rozgałęzieniem, którego jeden przewód prowadzi do króćca ssącego sprężarki S_4 , a drugi przewód łączy się z wlotem do kanałów + wymiennika W_6 . Króciec tłoczny sekcji S_4 łączy się z wlotem do kanałów - wymiennika W_6 , z których wypływa ciekły azot do zbiornika

kriogenicznego. Króćce tłoczny **k2** i zasilający **k3** strefy sprężania **S₀** i strefy rozprężania **r₀**, chłodziarki powietrznej sekcji **chd** łączy się z sekcją wodnego wymiennika **W₁**, zaś kanał spiralny tej chłodziarki łączy się z wlotem do kanałów + wymiennika **W₄**, z których wylot łączy się z króćcem osiowym strefy sprężania **S₀** chłodziarki sekcji **chd**. Sekcja **Sd2** jest wyłączona z pracy skraplania i jej oddławiony króćciec tłoczny łączy się bezpośrednio z króćcem ssącym. Skraplacz posiada dwa zespoły ciepły i zimny, przy czym zespół ciepły w skład, którego wchodzi sekcja **S_{II}**, **S_{III}**, **S_{III}**, **chd** i **r₁** złożony jest z korpusu 1 połączonego śrubami 41 z pokrywami czołowymi 2 i 4, w których znajdują się łożyska toczne 20 wirnika łopatkowego o promieniu 2r, sztywnego złożonego z łopatek 6, pierścieni międzysekcyjnych 7, tarczy końcowej 8 z wałem rurowym 17 z otworami **k9**, oraz z pierścienia 10 z kołem zębatym 21 o zarysie wewnętrznym z tarczą i wałkiem 9 z otworkami **k1**. Łożyska toczne 20 ustalają, pokrywka 5 z otworem i pokrywka 3. Z wirnikiem łopatkowym współpracuje wirnik wrębowy 11 o promieniu r z podcięciami międzysekcyjnymi, ułożyskowany w krażkach 13, 14 i 15 wbudowanych w cylinder wewnętrzny 16 z tuleją cylindra 18 wewnętrznego zespołu zimnego i czopem rurowym 42 ślizgowo podpartym w tulei wału 9. Oba wirniki sprzężone są parą kół zębatych 12 i 21. Sektory pierścieniowe 39 wbudowane są szczelnie i suwliwie w korpus 1 i mają nacięte zęby sektorów ślimacznic zazębionych z ślimakami trzpieni regulacyjnych 40. W dolnej części korpusu 1 sekcji **chd** jest kanał spiralny **k7**. W cylindrze wewnętrznym 16 jest wbudowane obrotowo wrzeciono 28 regulacyjne przysłaniające grupę **k9** trzech kanałów łączących strefę sprężania sekcji **chd** z wnętrzem odcinka cylindra wewnętrznego 16 z oknem **k4** i króćcem **k6**. Zespół zimny zawiera sekcja **S_{2r2}**, **S_{3r3}**, **Sd1**, **Sd2** i **S₄** i ma on podobną budowę do zespołu ciepłego. Cylinder 18 wewnętrzny zespołu zimnego z otworkami **k10** w swojej tulei, posiadający króćciec 24 z przegrodą 26 łączy się sztywno z cylindrem wewnętrznym 16 i jest unieruchomiony pokrywą 23 przymocowaną śrubami do korpusu 37. We wnętrzu cylindra 18 wewnętrznego zespołu zimnego mieszczą się w swoich gniazdach wrzeciona regulacyjne 22, 31 i 32 z wałkiem 30 dla sekcji **S_{3r3}**, **S_{2r2}** i **S₄**. Wlot gazu do strefy sprężania sekcji **S_{2r2}** odbywa się przez pokrywę 25 i otwory **k10** w wałku wirnika łopatkowego i w cylindrze 18 wewnętrznym. Zespół ciepły posiada dodatkowo wrzeciona 27 i 29 sekcji **S_{II}** i **S_{III}** i z wrzecionem 28 mają nacięte kółka zębate zazębione z kółkami 30 osadzonymi ślizgowo na wałku 38 między pierścionkami 33, zaś kółka 30 zazębiają się z kółkami 34, 35 i 36, każda na końcu wałka wchodzącego w skład układu 19 trzech wałków współosiowych o skrętach niezależnych od siebie. W cylindrze wewnętrznym 16 w strefie rozprężania wykonany jest otwór **k8** łączący tę strefę z wnętrzem odcinka cylindra wewnętrznego 16. Wirnik łopatkowy ciepłego łączy się sztywno odcinkiem wału 17 z otworkami **k10** z wirnikiem łopatkowym zespołu zimnego.

Skraplacz przedstawiony do pracy silnikowej według schematu ideowego silnika przez wyłączenie za pomocą zaworów z pracy wszystkich wymienników ciepła kolejno od **W₁** do **W₆** wyposażony jest w wirnik **W_k**, z którego przewodem doprowadzona jest para mokra azotu do króćca ssącego sprężarki **Sd1**, której króćciec tłoczny łączy się z przegrzewaczem **P₁** pary przegrzanej azotu przez sprężanie, z którym łączy się króćciec zasilania sekcji **S₄** o zredukowanej objętości wydechu nastawionej na rozprężanie. Króćciec wydechowy sekcji **S₄** łączy się poprzez podgrzewacz **P₂** z króćcem zasilania sekcji **Sd2**, a jej króćciec wydechu połączony jest poprzez podgrzewacz **P₃** z króćcem zasilania sekcji **chd** o zredukowanej objętości. Króćciec wydechu sekcji **chd** poprzez podgrzewacz **P₄** łączy się przewodem z króćcem zasilania sekcji **S₃** o zredukowanej objętości wydechu, której króćciec wydechu poprzez podgrzewacz **P₅** łączy się z króćcem zasilania sekcji **S₂**. Króćciec wydechu sekcji **S₂** łączy się z podgrzewaczem **P₆**, którego wylot rozgałęzia się na dwa przewody, jeden łączy się z króćcem zasilania sekcji **S_{III}**, a drugi z króćcem zasilania sekcji **S_{III}**. Króćce wydechu obu tych sekcji łączą się we wspólny przewód prowadzący do podgrzewacza **P₇**, z którego wylot rozgałęzia się i jeden przewód prowadzi do króćca zasilania sekcji **r₁**, a drugi do króćca zasilania sekcji **S_{II}**. Króćce wylotowe sekcji **S_{II}** i **r₁** łączą się z atmosferą, a silnik ma zredukowane obroty względem obrotów przy skraplaniu i zwrot przeciwny tych obrotów. Podgrzewacze pobierają ciepło z powietrza atmosferycznego, które może być podgrzane w kolektorze słonecznym lub ciepło odpadowe. Za jednostkę objętości zasysanych i po rozprężeniu wszystkich sekcji skraplacza oraz wydechu wszystkich sekcji silnika przyjęto objętość

$\frac{1}{25}$ kmola azotu w temperaturze 300°K o ciśnieniu 0,1 MPa równą 1 m³. Objętości sekcji skraplacza wynoszą: objętość zassana w sekcji S₄ ma wartość 0,24 i taka jest przyjęta, objętość zassana sekcji chd ma wartość jeden i taka jest przyjęta, objętość po rozprężeniu w sekcji S₃r₃ ma wartość 1,43, objętość zassana w sekcji S₃r₃ ma wartość 1,69 i taka jest przyjęta, objętość zassana w sekcji S_{III} ma wartość 3,02 i taka jest przyjęta, objętość po rozprężeniu w sekcji S₂r₂ ma wartość 2,06, objętość zassana w sekcji S₂r₂ ma wartość 3,10 i taka jest przyjęta, objętość po rozprężeniu w sekcji r₁ ma wartość 3,11, objętość zassana w sekcji Sd1 ma wartość 0,49. Przyjęto sumę objętości r₁ i Sd1 o wartości 3,11 + 0,49 = 3,6. Objętość zassana do sekcji S_{III} ma wartość 5,03 i taka jest przyjęta, objętość zassana do sekcji S_{II} ma wartość 8,26 i taka jest przyjęta. Objętości wyjściowe sekcji silnika wynoszą: objętość sekcji S₄ ma wartość 0,24, objętość sekcji Sd2 ma wartość 0,29, objętość sekcji chd ma wartość jeden, objętość sekcji S₃r₃ ma wartość 1,69, objętość sekcji S_{III} ma wartość 3,02, objętość sekcji S₂r₂ ma wartość 3,18, objętość sekcji r₁ ma wartość 3,11, objętość sekcji S_{III} ma wartość 5,03, objętość sekcji S_{II} ma wartość 8,26, objętość sekcji Sd1 ma wartość 0,49. Objętość po redukcji dla sekcji S₄ ma wartość 0,144, objętość sekcji po redukcji dla sekcji chd ma wartość 0,6, objętość po redukcji dla sekcji S₃r₃ ma wartość 1,45. Objętości przyjęte sekcji silnika wynoszą: objętość sekcji S₄ ma wartość 0,144, objętość sekcji Sd2 ma wartość 0,29, objętość sekcji chd ma wartość 0,6, objętość sekcji S₃r₃ ma wartość 1,45, objętość sekcji S₂r₂ ma wartość 3,18, objętość sumaryczna sekcji S_{III} i S_{III} ma wartość 8,05, objętość sumaryczna sekcji r₁ i S_{II} ma wartość 11,37, objętość sekcji Sd1 ma wartość 0,49. Wartości ciśnień w MPa po rozprężeniu w przyjętych sekcjach silnika wynosi: w sekcji S₄ ma wartość 7,4, w sekcji Sd2 ma wartość 3,85, w sekcji chd ma wartość 1,87, w sekcji S₃r₃ ma wartość 0,73, w sekcji S₂r₂ ma wartość 0,33, w sekcjach S_{III} + S_{III} ma wartość 0,135, w sekcjach r₁ + S_{II} ma wartość 0,1. Sekcja Sd1 przeznaczona na sprężarkę silnika, objętość podawana do sekcji S₄ - V = 0,093, $\varepsilon = \frac{11,37}{0,093} = 122$. Ciśnienie czynnika podawanego p = 16 MPa, ε - stopień rozprężania.

Przebieg skraplania jest następujący: do wału 9 przyłożony jest moment obrotowy M z prędkością kątową ω i sekcja S_{II} trójstopniowej sprężarki S_I z chłodzeniem wodnym przez sekcje wymiennika W₁ zasysa strumień skraplany z atmosfery i pierwszy strumień chłodzący I podgrzany w wymiennikach W₂ i W₃. Po sprężeniu optymalnie do 0,4 MPa sekcja S_{III} przetłacza sumaryczny strumień przez sekcję wymiennika W₁, z którego wylot rozgałęzia się na dwa przewody. Jednym płynie strumień skraplany do wymiennika W₄ chłodzącego a drugi strumień należący do pierwszego strumienia chłodzącego I płynie do wymiennika chłodzącego W₂, następnie oba te strumienie łączą się w jeden i dopływają równolegle do dwóch sekcji r₁ i Sd1. W sekcjach tych gaz rozpręża się i ochładza a wypływając z nich rozdziela się na pierwszy strumień chłodzący I płynący do wymienników W₂ i W₃, gdzie się podgrzewa i na strumień skraplany kierowany do sprężania w sekcji S₂r₂ razem z podgrzany w wymienniku W₅ drugim strumieniem chłodzącym II w sekcji S₂r₂ gaz spręża się i zostaje wytłoczony do wymiennika W₃, gdzie ochładza się a następnie płynie do rozprężarki strefy r₂, gdzie ochładza się i wypływa kanałem spiralnym sekcji S₂r₂. Za tym kanałem strumień ten rozdziela się na drugi strumień chłodzący II i strumień skraplany, który łącząc się z trzecim strumieniem chłodzącym III podgrzany w wymienniku W₆ płynie do sprężania w sekcji S₃r₃. Po sprężeniu w sekcji S₃r₃ gaz zostaje wytłoczony do ochłodzenia w wymienniku W₅ i wpływa do rozprężarki strefy r₃, gdzie ulega dalszemu ochłodzeniu, a następnie wypływa kanałem spiralnym sekcji S₃r₃ i rozdziela się. Mniejszy strumień skraplany płynie do sekcji S₄, a drugi większy z podziału jest trzecim strumieniem chłodzącym III, który ulega podgrzaniu w wymienniku W₆, zaś wypływający strumień skraplany po sprężeniu w sekcji S₄ do 0,4 MPa przepływa przez wymiennik W₆, gdzie para mokra azotu ulega całkowitemu skropleniu, a skropliny płyną do zbiornika kriogenicznego.

Chłodziarka dodatkowa sekcji chd realizuje obieg chłodniczy gazowy Joule'a. Podgrzane w wymienniku W₄ powietrze jest sprężone w jej strefie sprężania S₀, gdzie zamknięte objętości międzyłopatkowe maleją i tłoczone jest przez króciec k2 do sekcji wodnego wymiennika W₁.

Sprężone i ochłodzone powietrze kierowane jest do strefy r_0 rozprężania sekcji **chd** przez króciec **k3**, gdzie zamknięte objętości komór międzyłopatkowych rosną i powietrze ulega ochłodzeniu, a następnie jest przetłaczane odśrodkowo przez jej wirnik łopatkowy do kanału spiralnego **k7**, a stąd płynie do wymiennika **W₄**. Tutaj ulega powietrze podgrzaniu a następnie zostaje zassane przez wirnik łopatkowy przez króciec osiowy **k6** do komór międzyłopatkowych i obieg się zamyka. Moment oporowy powstaje z różnic ciśnień po obu stronach każdej łopatki 6 znajdującej się w strefie sprężania **S₀** i rozprężania r_0 . Podobnie pracują sekcje **S₂r₂** i **S₃r₃**. Przez sektory pierścieniowe 39 przesuwane kątowno trzpieniami obrotowymi 40 zazębionymi z nimi następuje dławienie gazu i jego ciśnienie rośnie. Oddławienie dopływu gazu przez króciec **k3** takim sektorem wywołuje spadek stopnia rozprężania. Regulację skokową wydajności objętościowej sekcji **chd** uzyskuje się wrzeczona 28, które przy jego obrocie odsłaniając kanały grupy **k5** opóźnia zamknięcie komór międzyłopatkowych przed sprężaniem, powodując wytłoczenie nadmiaru gazu do cylindra wewnętrznego 16. Doładowanie pierwszego stopnia sekcji **S₁₁** sprężarki **S₁** następuje przez zasysanie przez otwory **k1** w wale 9 dodatkowej porcji powietrze do komór międzyłopatkowych. Wymiana ładunku w sekcji **chd** następuje przez otwór w pokrywie 5, otwory **k9** w wale 17 i tulei cylindra 18 wewnętrznego. Wymiana ładunków w sekcjach **S₂r₂** i **S₃r₃** następuje przez część króćca 24 odgradzonego od sekcji **S₄** przegrodą 26 i przez otwór w pokrywie 25 oraz otwory **k10** w wale 17 i tulei cylindra 18 wewnętrznego. uzyskanie mniejszej objętości końca rozprężania od objętości komory międzyłopatkowej sekcji **chd** jest możliwe przez otwór **k8**, który łączy wcześniej komory międzyłopatkowe z wnętrzem odcinka cylindra wewnętrznego 16 zanim gaz rozpręży się, do pełnej objętości tych komór. Następuje wówczas zassanie części nowego ładunku powietrza z wnętrza cylindra wewnętrznego 16 do tych komór, tworząc ładunek uwarstwiony ciepłego i zimnego powietrza w tych komorach przed odśrodkową wymianą części zimnej tego ładunku. Proces skraplania jest optymalizowany na minimum energii skraplania na 1 kmol skroplin a sprężanie i rozprężanie jest izentropowe.

Przebieg pracy silnikowej jest następujący: przestawienie skraplacza do pracy silnikowej dokonuje się poprzez odłączenie zaworami wymienników kolejno od **W₁** do **W₆**, dokonanie regulacji stopni rozprężania sekcji **S₄**, **S₃r₃** i **chd** oraz regulacji wydajności objętościowej wydechu tych sekcji, dokonanie połączeń między sekcjami silnika a podgrzewaczami kolejno od **P₁** do **P₇** według schematu ideowego silnika za pomocą zaworów, połączenie wirnika **W_k** ze sprężarką sekcji **Sd1**, zamknięcie wszystkich króćców osiowych. Z wirnika **W_k** zassysana jest para mokra azotu o ciśnieniu rzędu 0,4 MPa do sprężarki sekcji **Sd1** i spręża się do około 16 MPa, stąd płynie do przegrzewacza **P₁**, gdzie osiąga temperaturę górną $\sim 350^\circ\text{K}$. Z przegrzewacza **P₁** para azotu płynie do sekcji **S₄**, gdzie rozpręża się do około 7,4 MPa i przepływa do podgrzewacza **P₂** osiągając temperaturę górną. Z podgrzewacza **P₂** azot płynie do sekcji **Sd2**, gdzie rozpręża się do około 3,85 MPa i płynie do podgrzewacza **P₃**, gdzie osiąga temperaturę górną, a stąd płynie do sekcji **chd**. Tu rozpręża się do około 1,87 MPa i azot płynie do podgrzewacza **P₄**, gdzie osiąga temperaturę górną a stąd płynie do strefy **S₃** sekcji **S₃r₃**, w której rozpręża się do około 0,73 MPa. Następnie azot zostaje przetłoczony do podgrzewacza **P₅** i osiąga temperaturę górną i płynie do strefy **S₂** sekcji **S₂r₂**, gdzie rozpręża się do około 0,33 MPa. Z sekcji **S₂r₂** azot płynie do podgrzewacza **P₆** i osiąga temperaturę górną, a następnie rozdziela się i płynie równolegle do sekcji **S₁₁₁₁** i **S₁₁₁** rozprężając się w nich do około 0,135 MPa, zaś stąd płynie jednym strumieniem do podgrzewacza **P₇**. Podgrzany azot płynie równolegle z podgrzewacza **P₇** do sekcji **mr₁** i **S₁₁**, gdzie rozpręża się do ciśnienia atmosferycznego i wypływa do otoczenia. Wysokoprężny obieg silnikowy dający moment napędowy **M** o zredukowanej prędkości kątowej ω ze zwrotem - może mieć za źródło ciepła powietrze otoczenia lub powietrze podgrzane w kolektorach słonecznych lub ciepło odpadowe z różnych procesów.

Z pomocniczego wykresu entropowego azotu otrzymujemy wydajność energetyczną niezbędną do otrzymania 1 kg skroplin azotu i masową wielkość **m** strumieni chłodzących cyrkulujących oznaczonych na rysunku fig. 9 - I, II, III to jest **m₆**, **m₃**, **m₂**, oraz strumieni poddawanych sprężaniu to jest **m₇**, **m₄**, **m₅**. Strumienie **m₁** i **m₈** są równe i wynoszą 1 kmol/sek. Znając temperatury poszczególnych etapów chłodzenia otrzymujemy wydajność objętościową zassaną

na jeden obrót wirnika łopatkowego każdej sekcji skraplacza, przyjmując za jednostkę 1 m^3 przy ciśnieniu $0,1 \text{ MPa}$ i temperaturze 300°K . Z wykresu entropowego rysunek fig. 10 obiegu silnikowego otrzymujemy wydajność energetyczną z 1 kg skroplin azotu i objętości wydechu poszczególnych sekcji silnika. Jeżeli znana jest energia włożona w 1 kg skroplin i energia uzyskana z 1 kg skroplin to znana jest sprawność akumulacji. Punkty M, J, H, A oznaczają temperatury i entropie poszczególnych etapów chłodzenia; I etap - $T_M = 203^\circ\text{K}$, II etap - $T_J = 133^\circ\text{K}$, III etap - $T_H = 90^\circ\text{K}$ pary suchej, IV etap - $T_A = 90^\circ\text{K}$ ciekły azot, a T_O - temperatura początkowa chłodzenia. Izobara $0,1 \text{ MPa}$ z wykresu entropowego przedstawia izobarę teoretyczną przyjmowania ciepła, przechodzącą przez punkty N, Z, L, K, I, O. Obieg N, X, Y, Z jest pomocniczym obiegiem chłodniczym realizowanym w sekcji chł. Z pomocniczego wykresu entropowego azotu pola pracy w cm^3 wynoszą: $F_{AHIO} = 6,65$, $F_{HJKI} = 4,05$, $F_{JMLK} = 7,0$, $F_{MONL} = 15,7$, $F_{YXNZ} = 7,35$, a pola ciepła w cm^2 wynoszą: $F_{AHTR} = 52,2$ $\alpha F_{IKUT} = 10,5 = 52,2/10,5 = 4,97$, $F_{HJUT} = 14,55$, $F_{KLWU} = 13,85$, $\beta = 14,55/13,85 = 1,05$, $F_{JMWU} = 20,85$, $F_{LZW'W} = 20,85$, $\gamma = 20,85/20,85 = 1$. Odcinek OM izobary chłodzenia odnosi się do strumienia $8,26 \text{ kmol/sek}$ masy sprężonego azotu w I etapie chłodzenia i jest schładzany dwoma strumieniami ciepła należącymi do dwóch strumieni mas, odpowiednio o masie $7,26 \text{ kmol/sek}$ pierwszego strumienia chłodzącego I i o masie 1 kmol/sek należącego do obiegu powietrza w chłodzarce dodatkowej sekcji chł, której polem obiegu jest pole F_{ZNXV} . Teoretyczna praca skraplania przy idealnych wymiennikach przeciwprądowych ciepła i bez strat w maszynie wirnikowej wynosi:

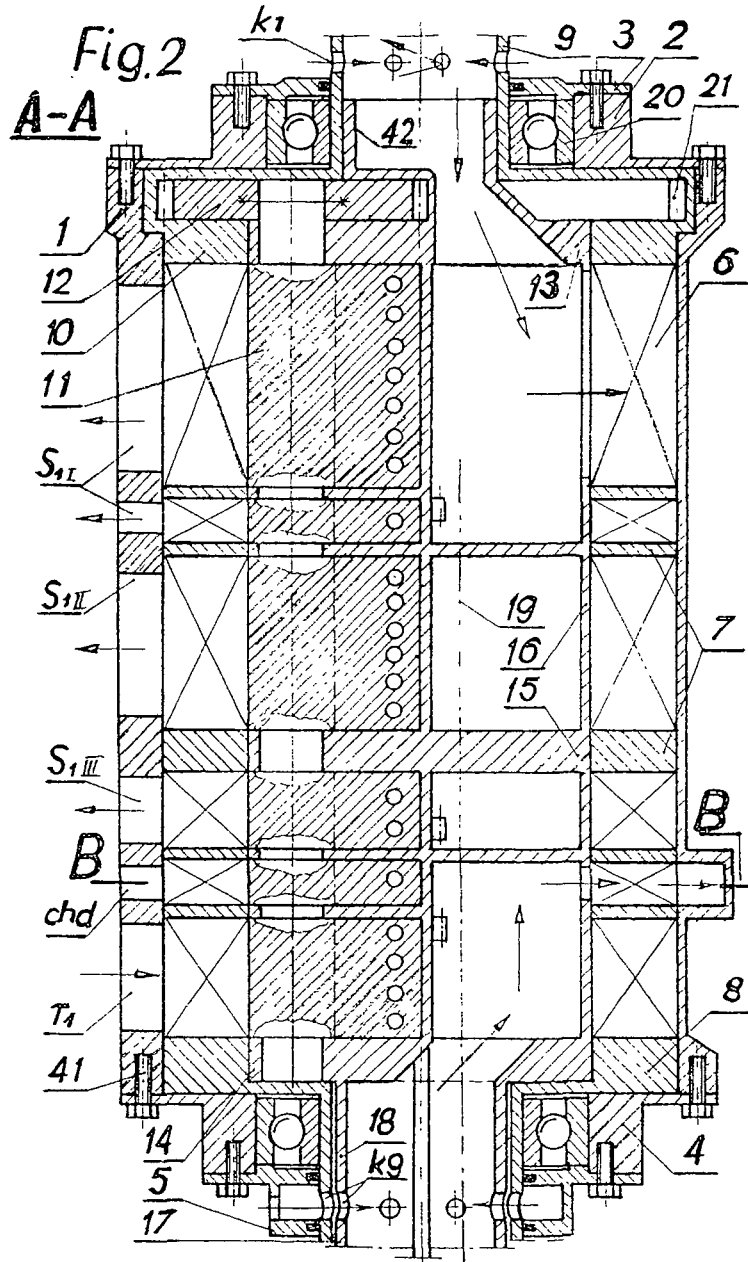
$$L_{\text{skt}} = F_{AHIO} + F_{HJKI} \times (\alpha + 1) + F_{JMLK} [(\alpha + 1) \beta + 1] + F_{MONL} [(\alpha + 1) \beta + 2] + F_{YXNZ}$$

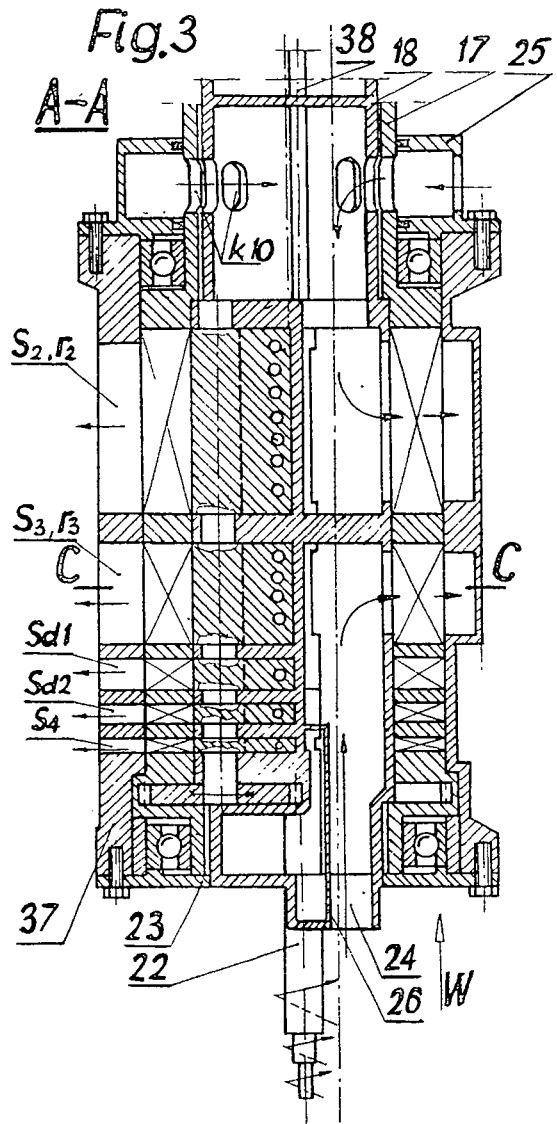
$$L_{\text{skt}} = F_{AHIO} + F_{HJKI} \times 5,97 + F_{JMLK} \times 7,26 + F_{MONL} \times 8,26 + F_{YXNZ} = 219 \text{ (cm}^2\text{)}, \gamma = 1.$$

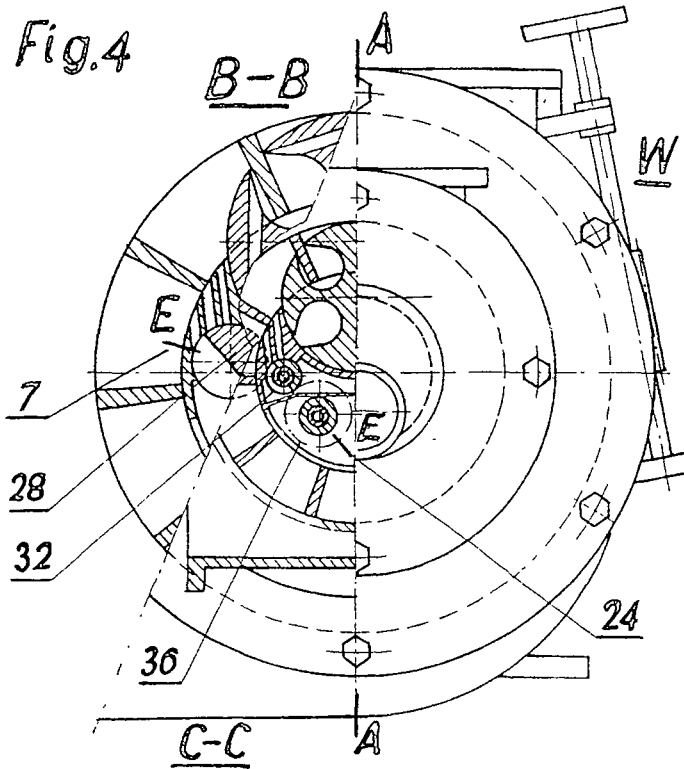
Pole jednostkowe wykresu entropowego rysunek fig. 10 wynosi: $f_{1,2,3,4} = 250 \text{ kcal/kmol}$, pole jednostkowe rysunkowe wynosi: $F_{1',2',3',4'} = 10,73 \text{ cm}^2$, zaś pole $F_{A,B,C,D,E,F,G} = 109,0 \text{ cm}^2$, a podziałka $X = 250/10,73 = 23,3 \text{ kcal/cm}^2 \text{ kmol}$. Energia uzyskana $E = 109 \times 23,3 = 2504 \text{ kcal/kmol}$, $E = 0,105 \text{ kWh/kg}$, $1 \text{ kmol} = 28 \text{ kg}$ $1 \text{ kcal} = 4,17 \text{ kJ}$. Punkt K' jest tak zwanym punktem krytycznym azotu. Praca teoretyczna uwolnienia energii z parr azotu wynosi: $L_{\text{ut}} 109 \text{ (cm}^2\text{)}$. Energia włożona do 1 kg skroplin $E = 0,210 \text{ kWh/kg}$. Teoretyczny współczynnik sprawności akumulacji energii wynosi:

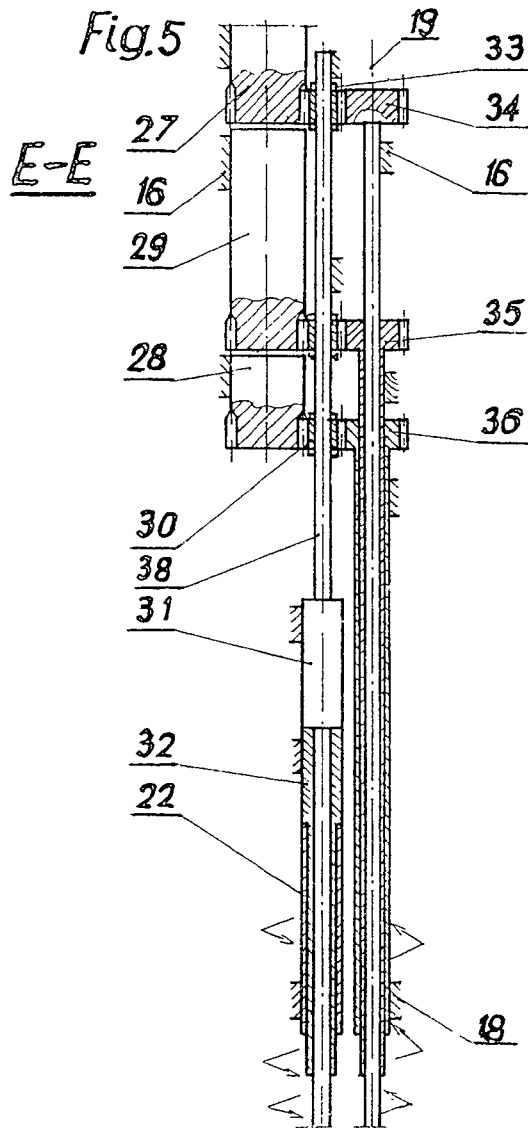
$$\eta_{\text{akt}} = \frac{109}{219} \approx 0,5$$

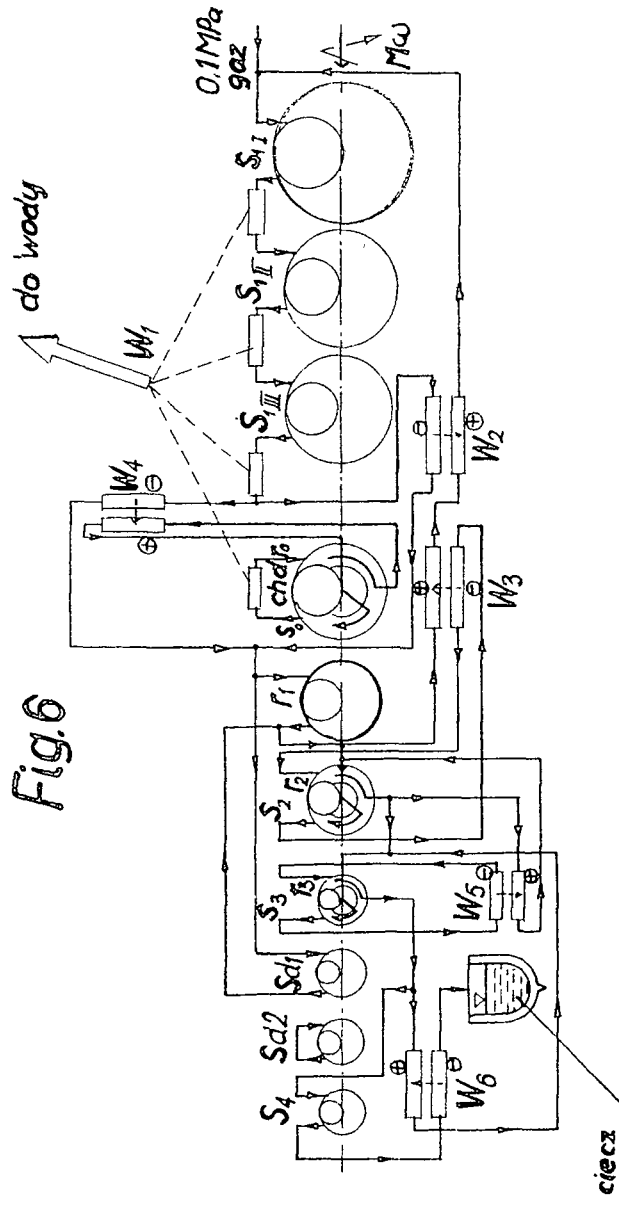
$$m_1 = m_8 = 1 \text{ kmol/sek}; m_6 = 7,26; m_7 = 8,26; m_5 = 5,97; m_4 = 7,26; m_3 = 6,26; m_2 = 4,97.$$

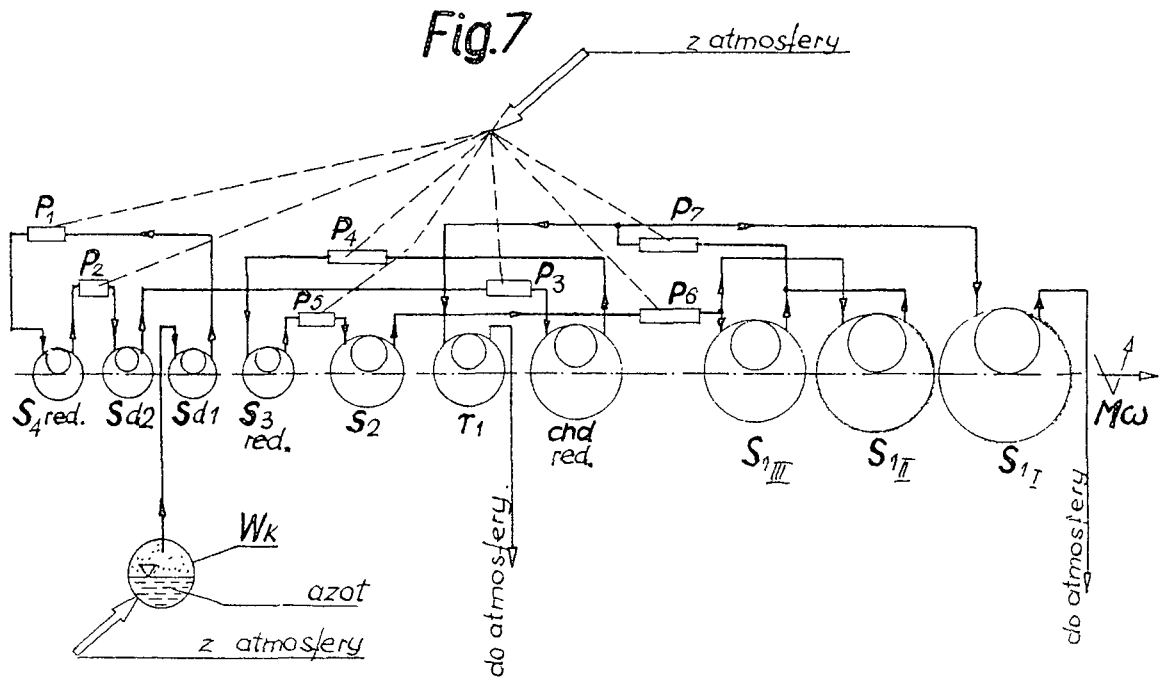












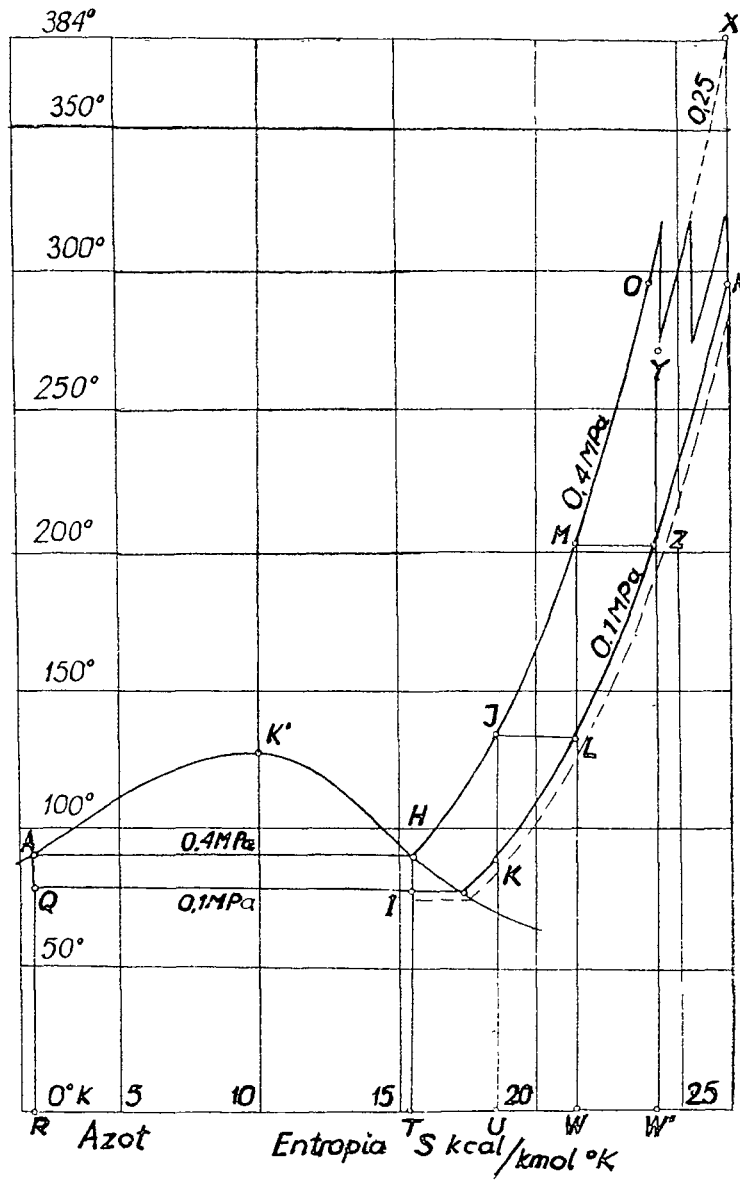


Fig.8

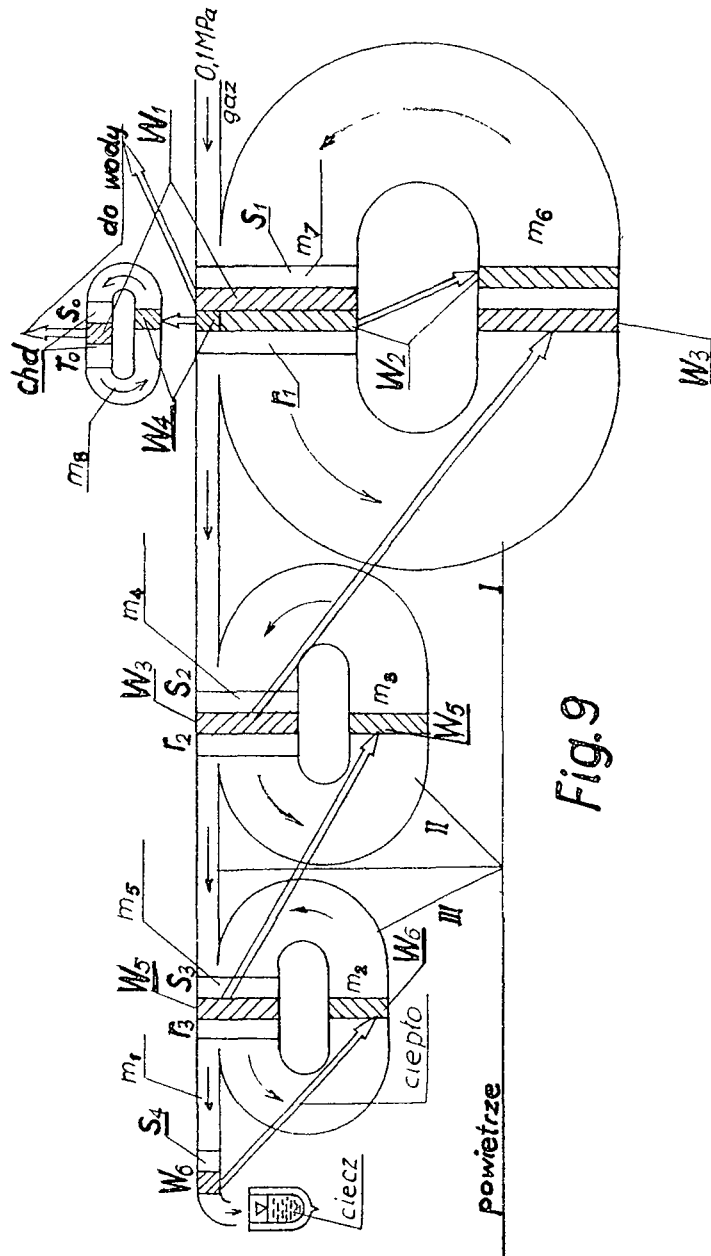


Fig. 9

Fig.10

