

Dr inż. Janusz Eichler
Dr inż. Jacek Kasperski

Zakład Chłodnictwa i Kriogeniki
Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów I-20
Politechnika Wroclawska

ODSTĘPSTWA RZECZYWISTEGO OBIEGU ABSORPCYJNO-DYFUZYJNEGO OD OBIEGU TEORETYCZNEGO (część I).

Problemy związane z ochroną środowiska skłaniają do powrotu do naturalnych czynników chłodniczych, m.in. amoniaku. Oznacza to także szansę dla chłodnictwa absorpcyjnego, pracującego zwykle na wodnym roztworze amoniaku. Znajduje on zastosowanie w dużych układach przemysłowych (napędzanych pompą mechaniczną) lub w małych układach absorpcyjno-dyfuzyjnych (napędzanych pompą termosyfonową), stosowanych w chłodnictwie domowym i klimatyzacji.

Na rys.1. przedstawiono schemat grawitacyjnego układu absorpcyjno-dyfuzyjnego, realizującego rzeczywisty obieg chłodniczy. Układ ten został przedstawiony w sposób ukazujący jego strukturę geometryczną. Składa się on z części wymienników ciepła realizujących tzw. „obieg silnikowy” (napędowy) oraz z części wymienników ciepła realizujących tzw. „obieg ziemniczy”. W części silnikowej układu znajdują się:

a/ DESORBER wraz z TERMOSYFONEM, spełniającym rolę pompy ciekłego roztworu roboczego i ELEMENTEM GRZEJNYM (grzałka elektryczna, rura z palnikiem gazowym lub olejowym),

b/ ABSORBER wraz ze ZBIORNIKIEM ciekłego roztworu,

c/ REKUPERATOR łączący ABSORBER z DESORBEREM.

W części ziemniczej znajdują się:

a/ SKRAPLACZ,

b/ PAROWACZ,

c/ DOZIĘBIACZ.

Układ absorpcyjno-dyfuzyjny, jako pracujący na trójskładnikowym roztworze roboczym, wyposażony jest w dodatkowe aparaty:

a/ WYMIENNIK CIEPŁA GAZÓW,

b/ DOCHŁADZACZ GAZU,

których zadaniem jest podniesienie efektywności realizowanego obiegu.

Konstrukcja powyższych aparatów może być mniej lub bardziej rozbudowana w zależności od tego, czy układ pracuje jako chłodziarka jednotemperaturowa czy dwutemperaturowa (chłodziarko-zamrażarka).

W porównaniu do przemysłowego układu absorpcyjnego, pracującego na dwuskładnikowym roztworze roboczym $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, w układzie absorpcyjno-dyfuzyjnym, jak na rys. 1., obserwujemy większą złożoność procesów, wynikającą z zastosowania trójskładnikowego roztworu roboczego $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$.

Ze ZBIORNIKA bogaty w amoniak roztwór $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ o stanie 1 wpływa poprzez REKUPERATOR do TERMOSYFONU, spełniającego rolę pompy ciekłego roztworu. Na skutek podgrzania roztworu w procesie rekuperacji ciepła, następuje zmiana stanu na 2.

W TERMOSYFONIE, poprzez doprowadzenie strumienia ciepła od ELEMENTU GRZEJNEGO, następuje proces desorpcji pary, związany z podnoszeniem ciekłego roztworu z poziomu panującego w ZBIORNIKU do poziomu cieczy w DESORBERZE. Towarzyszy temu zmiana stanu roztworu do **5**. Wypływający w górnej części TERMOSYFONU, roztwór w fazie pary mokrej, rozdziela się na skutek oddziaływania grawitacyjnego, na ciecz o stanie **5'** i parę o stanie **5''**. Ciekły roztwór o stanie **5'** poddawany jest procesowi desorpcji, w wyniku którego tworzy się ubogi roztwór o stanie **3** oraz para, która przeburzając się przez warstwę cieczy w REKTYFIKATORZE, zostaje oczyszczona do stanu **5''**. Roztwór ubogi, dzięki oddziaływaniu pola grawitacyjnego i specyficznej konstrukcji układu, samoczynnie przelewa się poprzez REKUPERATOR do górnej części ABSORBERA. Przepływ przez REKUPERATOR powoduje ochłodzenie roztworu ubogiego ze stanu **3** do stanu **4**.

Konstrukcja układu absorpcyjno-dyfuzyjnego sprawia, że przy zrównoważonym ciśnieniowo układzie, ciśnienie cząstkowe ziębniaka w DESORBERZE, przy zminimalizowanej zawartości gazu inertnego (H_2), jest praktycznie równe ciśnieniu całkowitemu (ciśnieniu napełnienia układu), gdy tymczasem w ABSORBERZE ciśnienie cząstkowe ziębniaka jest względnie niskie ze względu na powstałą mieszaninę z gazem inertnym. W ten sposób, w układzie ciśnieniowo zrównoważonym, dzięki obecności odpowiedniej ilości gazu inertnego w ABSORBERZE i jego praktycznym braku w DESORBERZE, uzyskuje się realizację obiegu silnikowego jedynie dzięki procesowi termosyfonowemu, mieszanemu, rozdzielaniu składników roztworu i konstrukcji geometrycznej układu, wykorzystującej pole grawitacyjne.

Produkowana w DESORBERZE para, podlega oczyszczeniu w DEFLEGMATORZE do stanu **6** i samoczynnie wpływa do SKRAPLACZA. Konstrukcja SKRAPLACZA (min. RURKA WYRÓWNAWCZA) pozwala na zminimalizowanie zawartości gazu inertnego, przez co ziębniak skrapla się przy wysokim ciśnieniu cząstkowym, praktycznie równym ciśnieniu napełnienia, osiągając stan **7**. Ciekły ziębniak zostaje doziębiony w DOZIĘBIACZU do stanu **8** i wpływa samoczynnie do PAROWACZA.

W PAROWACZU ciekły ziębniak dostaje się do atmosfery gazu inertnego o stanie **14**, doziębionego w WYMIENNIKU CIEPŁA GAZÓW. Na skutek mieszania pary ziębniaka z gazem inertnym, powstaje tzw. „uboga” mieszanina NH_3+H_2 , o stanie **9**, w której ciśnienie cząstkowe ziębniaka jest względnie niskie. W procesie parowania (dyfuzji ziębniaka do atmosfery gazu inertnego), ciecz spływająca grawitacyjnie w dół, wzdłuż rury PAROWACZA, odparowuje, przez co ciśnienie cząstkowe ziębniaka w mieszaninie gazowej rośnie. W wyniku procesu odparowania cieczy w PAROWACZU tworzy się tzw. „bogata” mieszanina NH_3+H_2 o stanie **10**, która pod wpływem sił grawitacji samoczynnie spływa w dół układu, w kierunku ABSORBERA.

Bogata mieszanina gazowa przepływa przez WYMIENNIK CIEPŁA GAZÓW, przejmując ciepło od ubogiej mieszaniny gazowej i zmieniając swój stan z **10** na **11**. Dzięki procesowi zmieszania pary z gazem inertnym uzyskuje się efekt analogiczny do dławienia w elemencie dławiącym (zawór, rurka kapilarna) układów sprężarkowych, co pozwala na uzyskanie niskich temperatur w strefie PAROWACZA.

Tak więc zespół procesów, realizowanych pomiędzy SKRAPLACZEM a PAROWACZEM, dzięki zastosowaniu gazu inertnego i odpowiedniej konstrukcji geometrycznej, tworzy obieg ziębniczy układu absorpcyjno-dyfuzyjnego. Bogata mieszanina gazów o stanie **11** wpływa samoczynnie, poprzez ZBIORNIK do ABSORBERA. Tutaj, w wyniku kontaktu z ubogim roztworem NH_3+H_2O , następuje proces absorpcji pary ziębniaka z atmosfery gazu inertnego, połączony z dodatnim efektem termicznym (ciepło absorpcji).

W wyniku procesu absorpcji tworzy się ciekły roztwór bogaty $\text{NH}_3+\text{H}_2\text{O}$ o stanie **1**, który spływa grawitacyjnie w dół wzdłuż rury ABSORBERA do ZBIORNIKA oraz uboga mieszanina NH_3+H_2 o stanie **12**, wypierana ku górze, w kierunku PAROWACZA. Ponieważ uboga mieszanina gazowa posiada zbyt wysoką temperaturę (na skutek podgrzania w procesie absorpcji), zostaje poddana procesowi dochładzania w DOCHŁADZACZU GAZU, poprzez kontakt z otoczeniem (zmieniając stan na **13**), a następnie procesowi doziębienia w WYMIENNIKU CIEPŁA GAZÓW (zmieniając stan na **14**).

W procesie projektowania efektywnego układu chłodniczego, pierwszym krokiem jest prawidłowe zidentyfikowanie procesów tworzących zamknięty obieg chłodniczy. Do oceny prawidłowości zamodelowanego obiegu i jego jakości stosuje się procedurę porównywania efektywności obiegu ziębiarki rzeczywistej z powszechnie przyjmowanym wzorcem teoretycznego obiegu Carnota.

Na rys.2. przedstawiono schemat porównawczego obiegu teoretycznego ziębiarki absorpcyjnej na wykresie T-s. Przyjmuje się tu następujące założenia [1]:

- 1/ ilość roztworu roboczego, krążącego między ABSORBEREM i DESORBEREM jest nieskończenie duża (co pozwala na przyjęcie stałości temperatur absorpcji T_a i desorpcji T_d),
- 2/ ekspansja ziębnika i roztworu jest izentropowa,
- 3/ ziębnik jest idealnie rektyfikowany, przez co temperatura skraplania T_k oraz temperatura parowania T_o są stałe,
- 4/ ziębnik jest płynem idealnym i właściwa pojemność cieplna cieczy i pary na krzywych granicznych jest równa zeru.

W tak wyidealizowanym obiegu, proces desorpcji na skutek doprowadzenia strumienia ciepła desorpcji \dot{Q}_d w DESORBERZE, będzie odwzorowany na wykresie T-s (rys. 2.) w postaci izotermy **2-3** przy temperaturze T_d , równej temperaturze czynnika grzejącego T_g . Proces skraplania w SKRAPLACZU, na skutek odprowadzenia do otoczenia strumienia ciepła skraplania \dot{Q}_k będzie odwzorowany poprzez izotermę **6-7**, przy temperaturze T_k , równej temperaturze otoczenia (chłodziwa) T_{ot} . Skroplony ziębnik, po izentropowym zredukowaniu ciśnienia i zmianie stanu z **7** na **9**, wrze w PAROWACZU przy stałej temperaturze T_o , równej temperaturze przestrzeni ziębionej T_z , zmieniając stan z **9** na **10** (przemiana **9-10**). Towarzyszy temu przejście z przestrzeni ziębionej strumienia ciepła \dot{Q}_o . Para wytworzona w PAROWACZU zostaje zaabsorbowana przez roztwór ubogi o stanie **4** w procesie absorpcji (przemiana **4-1**) przy stałej temperaturze otoczenia (chłodziwa) T_{ot} .

Efektywność odwracalnej ziębiarki absorpcyjnej definiuje się [1] jako stosunek wydajności ziębienia \dot{Q}_o przy temperaturze parowania T_o do strumienia ciepła desorpcji (ciepła napędowego) \dot{Q}_d przy stałej temperaturze desorpcji T_d :

$$\zeta_t = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{Q}_d} \quad (1)$$

lub

$$\zeta_t = \frac{T_d - T_k}{T_d} \times \frac{T_o}{T_k - T_o} \quad (2)$$

Liczbowa wartość ζ_t jest szczególnie łatwo określić, ponieważ zależna jest wyłącznie od temperatur poszczególnych procesów.

Analizę obiegów rzeczywistych i ich efektywności prowadzi się poprzez porównywanie rzeczywistych procesów z ich wyidealizowanymi odpowiednikami. Szczególnie wygodnie jest prowadzić tę analizę przy pomocy znanego wykresu $\lg p - \frac{1}{T}$.

Na rys. 3. przedstawiono na wykresie $\lg p - \frac{1}{T}$ schemat teoretycznego obiegu porównawczego ziębiarki absorpcyjnej. Położenie poszczególnych punktów, określających procesy obiegu teoretycznego, określono przy założeniach podobnych, jak przy konstrukcji na wykresie T-s, przyjmując jednak skończoną ilość krążącego roztworu. Obieg realizowany jest pomiędzy temperaturami :

- T_g – czynnika grzejjego,
- T_{ot} – otoczenia (chłodziwa),
- T_z – przestrzeni ziębionej

a przekazywanie ciepła jest quasistatyczne.

Przy powyższych założeniach położenie punktu 7_t , określającego proces skraplania, znajduje się w miejscu przecięcia izotermy $T_k = T_{ot}$ z linią składu $\xi_{zt} = 1,0$, określającą czysty ziębnik. Położenie punktu 7_t wyznacza teoretyczną wartość ciśnienia kondensacji p_{kt} , równą teoretycznej wartości ciśnienia desorpcji p_{dt} . Przecięcie linii $\xi_{zt} = 1,0$ z izotermą $T_{9t} = T_z$, wyznacza położenie punktu 9_t , określającego proces parowania obiegu teoretycznego. Izobara p_{to} , przechodząca przez ten punkt, wyznacza teoretyczną wartość ciśnienia parowania w obiegu teoretycznym. W miejscu przecięcia izobary p_{dt} z izotermą $T_{3t} = T_g$ określa się położenie punktu 3_t , wyznaczającego maksymalny stopień desorpcji roztworu w obiegu teoretycznym. Uzyskana wartość składu roztworu ξ_{ut} odpowiada minimalnej, teoretycznej wartości stężenia roztworu ubogiego. Z kolei, w miejscu przecięcia izobary $p_{at} = p_{to}$ z izotermą $T_{1t} = T_{ot}$ uzyskuje się położenie punktu 1_t , określającego maksymalną, teoretyczną wartość stężenia roztworu bogatego ξ_{bt} . Różnica $\Delta\xi_t = (\xi_{bt} - \xi_{ut})$ wyznacza ważny wskaźnik porównawczy, *teoretyczny zakres sorpcji* obiegu absorpcyjnego.

W miejscu przecięcia linii ξ_{bt} z izobarą p_{dt} określa się położenie punktu 2_t , wyznaczającego początek procesu desorpcji w DESORBERZE obiegu teoretycznego. Z kolei przecięcie linii ξ_{ut} z izobarą p_{at} wyznacza położenie punktu 4_t , określającego stan roztworu ubogiego na początku procesu absorpcji. Punkt 1_t na rys. 3. Określa stan roztworu bogatego, powstałego ze zmieszania pary o stanie 9_t z roztworem ubogim o stanie 4_t w procesie absorpcji teoretycznej, a punkt 2_t określa stan roztworu bogatego, który zostaje rozdzielony na czysty ziębnik o stanie 7_t oraz na roztwór ubogi o stanie 3_t , w procesie desorpcji teoretycznej.

Literatura:

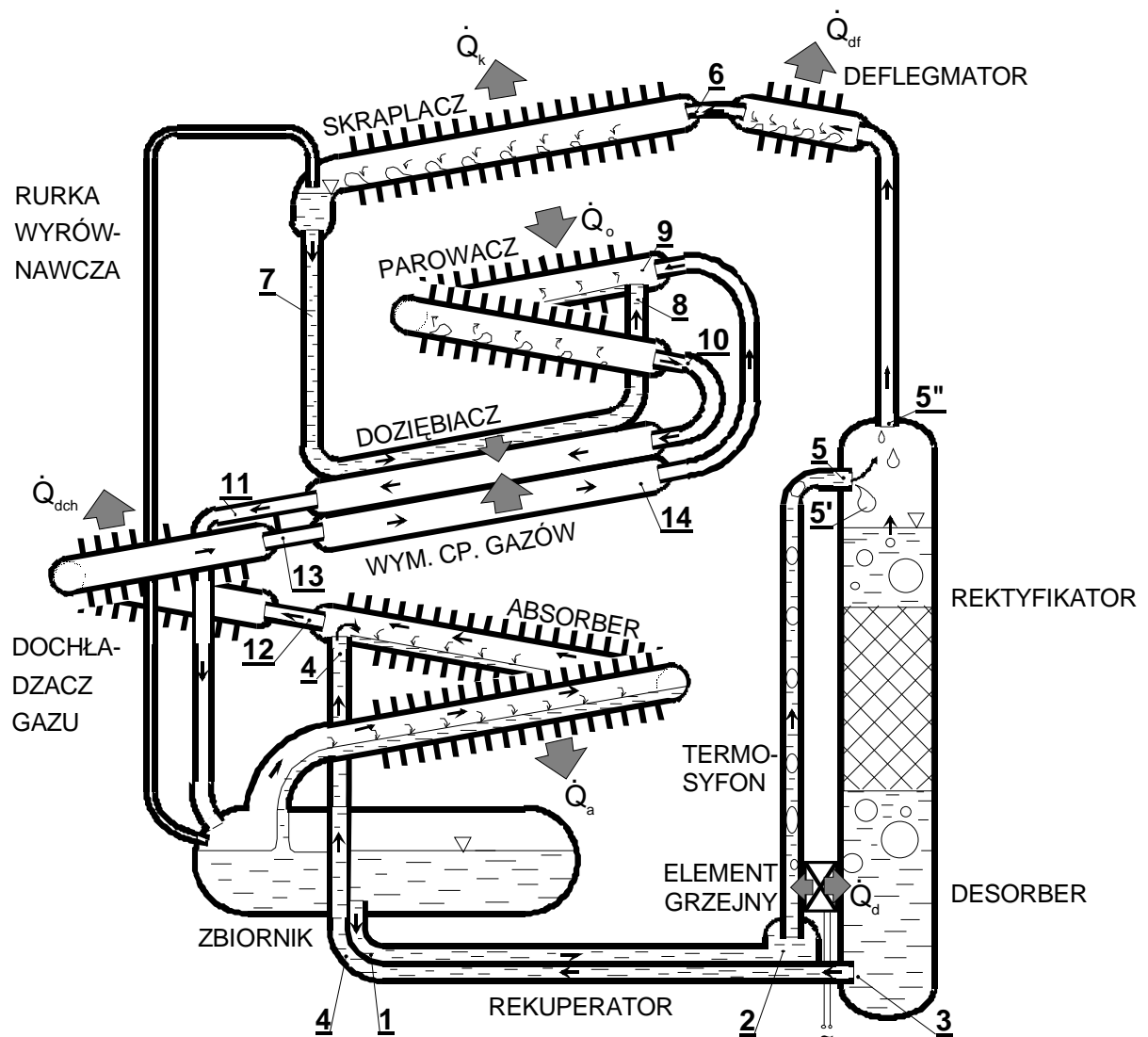
[1] Maczek K., Mieczyski M. *Chłodnictwo*. Skrypt PWr. 1981.

Streszczenie artykułu pt. „Odstępstwa rzeczywistego obiegu absorpcyjno-dyfuzyjnego od obiegu teoretycznego (część I).

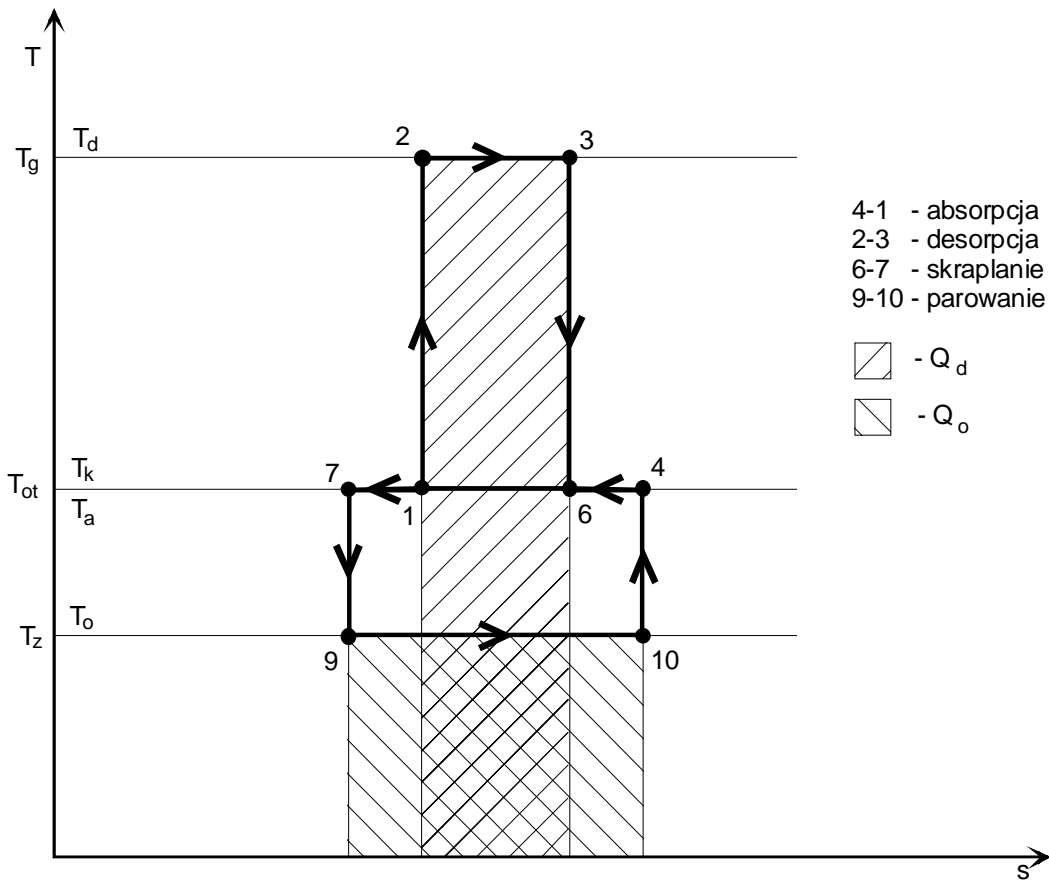
Autorzy: dr inż. Janusz Eichler, dr inż. Jacek Kasperski

Słowa kluczowe: chłodnictwo, urządzenia absorpcyjne, urządzenia chłodnicze, projektowanie

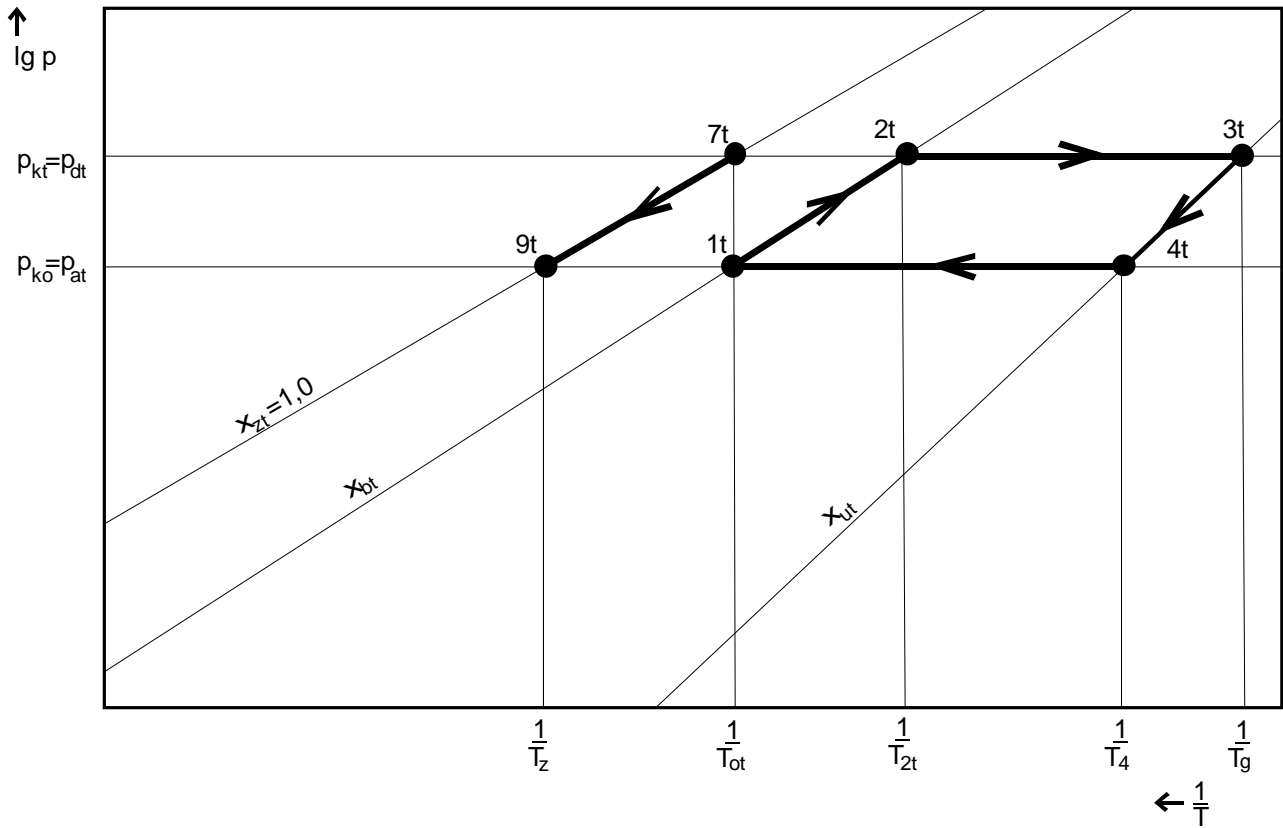
W artykule przedstawiono analizę odstępstw rzeczywistego obiegu absorpcyjno-dyfuzyjnego od obiegu teoretycznego, ukierunkowaną na wyznaczenie efektywności termodynamicznej obiegu. Na tle budowy typowego układu absorpcyjno-dyfuzyjnego wraz z opisem jego działania zaprezentowano istniejącą w literaturze fachowej koncepcję teoretycznego obiegu porównawczego, opartą na obiegu Carnota i przedstawiono odwzorowanie tego obiegu na wykresie T-s. Zdefiniowano efektywność odwracalnej ziębiarki absorpcyjnej ζ_r , tworząc punkt odniesienia dla dalszej analizy odwzorowując obieg teoretyczny na wykresie $\lg p - \frac{1}{T}$ i omawiając szczegółowo sposób identyfikacji poszczególnych punktów stanu.



Rys. 1. Schemat grawitacyjnego układu absorpcyjno-dyfuzyjnego.



Rys. 2. Porównawczy obieg teoretyczny Carnota jednostopniowej odwracalnej ziębiarki absorpcyjnej na wykresie T-s.



Rys. 3. Schemat teoretycznego obiegu porównawczego ziębiarki absorpcyjnej na wykresie $\lg p - 1/T$.