

Dr inż. Janusz EICHLER
Dr inż. Jacek KASPERSKI

Zakład Chłodnictwa i Kriogeniki ITCiMP Politechniki Wrocławskiej

METODA SKORELOWANYCH WYKRESÓW ENTALPIA - STĘŻENIE W ZASTOSOWANIU DO MODELOWANIA OBIEGU W KLIMATYZATORZE ABSORPCYJNO-DYFUZYJNYM.

W Zakładzie Chłodnictwa i Kriogeniki Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej prowadzone są prace studialne i projektowe nad zastosowaniem układów absorpcyjno-dyfuzyjnych w chłodnictwie i klimatyzacji.

Jednym z kierunków tych prac było opracowanie klimatyzatora absorpcyjno-dyfuzyjnego, napędzanego odpadowym ciepłem spalin z silnika spalinowego samojezdnej ładowarki urobku w kopalni rudy miedzi, a przeznaczonej do klimatyzacji kabiny operatora [1]. Ogromne ilości energii odpadowej, nadające się znakomicie do napędu układu absorpcyjno-dyfuzyjnego, pozwalają na prawie darmową eksploatację takiego urządzenia.

Warunki bezpieczeństwa, obowiązujące w kopalni, nie pozwoliły na zastosowanie najbardziej popularnego w układach absorpcyjno-dyfuzyjnych, roztworu $\text{NH}_3+\text{H}_2\text{O}+\text{H}_2$. Dlatego, w wyniku prac studialnych, zdecydowano się na wybór bezpiecznego w tych warunkach, roztworu $\text{R22}+\text{E181}+\text{N}_2$, charakteryzującego się dodatkowo praktycznie nielotną parą rozpuszczalnika (E181), co znacznie upraszcza i potania konstrukcję generatora.

Pierwszym krokiem w rozwiązaniu tego zadania było zamodelowanie części chłodniczej klimatyzatora, której konstrukcja, dzięki odpowiedniej formie geometrycznej, wykorzystuje siły statycznego pola grawitacyjnego Ziemi do wymuszenia realizacji obiegu termodynamicznego. Na rys.1 przedstawiono schemat części chłodniczej wraz z zaznaczeniem punktów stanu, przeznaczonych do identyfikacji obiegu i bilansu energetycznego.

Roztwór bogaty o stanie **1**, powstały w pionowym absorberze ociekowym, spływa grawitacyjnie, poprzez węzownicowy rekuperator, do generatora. W rekuperatorze następuje podgrzanie *roztworu bogatego* do stanu **2** kosztem ochłodzenia *roztworu ubogiego* od stanu **4** do stanu **5**. W generatorze o konstrukcji pionowej, roztwór bogaty wpływa do wiązki rurek termosyfonowych, gdzie na skutek doprowadzania ciepła desorpcji Q_d od spalin z silnika spalinowego, następuje proces desorpcji, połączony z termosyfonowym podnoszeniem ciekłego roztworu na wyższy poziom. Towarzyszy temu zmiana stanu roztworu z *bogatego* o stanie **2** do *uboższego* o stanie **3'**. Na wylocie z pęczka rurek termosyfonowych następuje oddzielenie ciekłego roztworu (stan **3'**) od pozostającej z nim w równowadze termodynamicznej pary (stan **3''**). Ciekły roztwór poddany zostaje dalszemu procesowi desorpcji, w wyniku czego zmienia się jego stan od **3'** do **4**. Powstały w ten sposób *roztwór ubogi* spływa grawitacyjnie, dzięki istniejącej różnicy wysokości słupów cieczy, z generatora, poprzez rekuperator, do górnej części absorbera (stan **5**). W ten sposób zamyka się obieg ciekłego roztworu w układzie.

Powstała w generatorze *para czystego żiębnika* (R22) o stanie **3''** wpływa samoczynnie do ożebrowanej zewnętrznie węzownicy skraplacza, gdzie skrapla się, zmieniając swój stan do punktu **6**. Towarzyszy temu odprowadzenie do otoczenia strumienia ciepła kondensacji Q_k . Skroplony *ziębnik* spływa następnie grawitacyjnie, poprzez potrójny wymiennik: doziębiacz + wymiennik ciepła gazów (WCG) do parowacza. Towarzyszy temu zmiana stanu doziębionej cieczy z **6** na **7**. Na wlocie do parowacza *ziębnik* dostaje się do atmosfery *gazu inertnego*, dopływającego w *ubogim gazowym roztworze*: *ziębnik*+gaz inertny z WCG (stan

13). W procesie mieszania następuje zmiana stanu *ziębniaka* z 7 na 8. Towarzyszy temu dyfuzja *pary ziębniaka* do atmosfery *gazu inertnego* na powierzchni wewnętrznej rur pionowych parowacza, związana z przejmowaniem strumienia ciepła Q_0 od powietrza przepływającego na zewnątrz rur, z wnętrza klimatyzowanej kabiny. Powstały w ten sposób *bogaty gazowy roztwór ziębnik+gaz inertny* o stanie **9**, spływa pod działaniem sił grawitacji poprzez WCG do absorbera. W absorberze w wyniku kontaktu *bogatego gazowego roztworu* z *ubogim roztworem* R22+E181, następuje proces absorpcji *pary ziębniaka* przez ciekły roztwór, co powoduje zmianę stanu *roztworu gazowego* z **11** na **12**. Towarzyszy temu odprowadzenie do otoczenia strumienia ciepła absorpcji Q_a . Powstały w absorberze *gazowy roztwór ubogi* o stanie **12** zostaje wyparty pod wpływem sił grawitacji poprzez WCG (stan **13**) ponownie do parowacza. W ten sposób obieg *gazu inertnego* w polu sił grawitacyjnych zostaje zamknięty.

Prawidłowe zamodelowanie obiegu absorpcyjno-dyfuzyjnego tak ukształtowanego urządzenia nastęrcza duże trudności nie tylko z uwagi na złożoność procesów realizowanych w poszczególnych wymiennikach ciepła i substancji, ale także braku spójnej metodologii projektowania tych układów. W pracy [2] autorzy zasygnalizowali potrzebę rozpoczęcia prac nad rozwiązaniem tego problemu w oparciu o metodę analizy termodynamicznej, wykorzystującej analityczno-wykreślną metodę bilansu energetycznego w oparciu o wykresy fazowe dla substancji biorących udział w procesie. Teoretyczne podstawy tej metody, z przeznaczeniem do projektowania przemysłowych układów absorpcyjnych pompowych, głównie na roztwór NH_3+H_2O , zawarto w [3, 4, 5]. Na potrzeby tej metody opracowano wykres $h - \xi$ dla NH_3+H_2O , szeroko stosowany w projektowaniu obiegu przemysłowych układów absorpcyjnych z pompą mechaniczną.

Dalsze rozwinięcie tej metody w zastosowaniu do obiegu gazu inertnego w układach absorpcyjno-dyfuzyjnych, pracujących na roztworze $NH_3+H_2O+H_2$ zawarto w [6, 7]. Przedstawiono tam sposób konstruowania wykresu $h-y$ dla roztworu NH_3+H_2 , przydatnego do identyfikacji procesów zachodzących w obiegu gazu inertnego. Autorzy artykułu rozwinęli zawarte tam idee i adaptowali je dla potrzeb modelowania obiegu w projektowanym klimatyzatorze.

W ten sposób powstała tzw. „Metoda skorelowanych wykresów entalpia-stężenie”. W rzeczywistym urządzeniu absorpcyjno-dyfuzyjnym mamy do czynienia z roztworem trójskładnikowym (ziębnik+rozpuszczalnik+gaz inertny), przez co proces identyfikacji punktów stanu i bilans energetyczny powinny być przeprowadzone na wykresie $h - \xi$ dla takiego trójskładnikowego roztworu (rys.2). Dotychczas nie dysponujemy ani takim wykresem, ani wystarczającymi danymi doświadczalnymi, pozwalającymi na jego opracowanie. W uwagi jednak, że zastosowany rozpuszczalnik (E181) charakteryzuje się praktycznie nielotną parą w stosowanym zakresie temperatur i ciśnień, w procesach cząstkowych obiegu realizowane są przemiany w obrębie roztworów dwuskładnikowych. Jeżeli więc przyjmie się, że rozpuszczalność gazu inertnego w rozpuszczalniku jest pomijalnie mała i nie wpłynie w istotny sposób na przebieg procesu absorpcji i desorpcji, wówczas poszczególne procesy cząstkowe obiegu można identyfikować i bilansować przy pomocy wykresów $h - \xi$ dwuskładnikowych, sprzęgniętych ze sobą wspólną osią entalpii dla czystego ziębniaka.

Na podstawie tabel własności roztworu R22+E181 [8] opracowano funkcje i procedury iteracyjne, pozwalające na wykonanie dla niego wykresu $h - \xi$ [1]. Wykres ten, w formie zaadaptowanej dla potrzeb identyfikacji obiegu w projektowanym klimatyzatorze absorpcyjno-dyfuzyjnym, przedstawiono na rys.3.

Podobnie, na podstawie tabel danych dla czystych czynników R22 i N_2 oraz w oparciu o sugestie w [6], opracowano wykres $h - y$ dla R22+ N_2 (rys.4) wraz z wykresem

pomocniczym, służącym do określania składu y gazowego roztworu R22+N₂ (rys.5), pozwalające z wystarczającą dokładnością na odwzorowanie procesów, realizowanych w obiegu gazu inertnego klimatyzatora. Dla praktycznego posługiwania się tymi wykresami w celu identyfikacji punktów stanu i bilansu energetycznego obiegu, konieczne jest myślowe sprzęgnięcie wykresów na rys. 3, 4 i 5 poprzez wspólną oś entalpii h dla czystego R22. W tym celu dokonujemy „lustrzanego odbicia” wykresu z rys.4 wobec pionowej osi entalpii h.

W wyniku sprzężenia obu wykresów (rys. 6) dla roztworów dwuskładnikowych poprzez oś czystego R22, identyfikacji na wykresie h - ξ dla roztworu R22+E181 podlegają następujące procesy, realizowane przez dwuskładnikowy roztwór R22+E181 i czysty R22:

- absorpcja - pkt. 5 - 1,
- rekuperacja - pkt. 1 - 2 dla roztworu bogatego,
pkt. 4 - 5 dla roztworu ubogiego,
- desorpcja - pkt. 2 - 3 - 4,
- kondensacja pary - pkt. 3'' - 6,
- doziębienie - pkt. 6 - 7 - doziębiony kondensat,
pkt. 9 - 11 - ogrzewana para.

Z kolei identyfikacji na wykresie h - y dla roztworu R22+N₂ podlegają następujące procesy, realizowane przez dwuskładnikowy roztwór R22+N₂:

- doziębienie - pkt. 6 - 7 - doziębiony kondensat,
pkt. 9 - 11 - ogrzewana para.
- mieszanie („dyfuzyjne dławienie”) - pkt. 7 - 8 - 13,
- parowanie - pkt. 8 - 9b,
- rekuperacja ciepła w WCG - pkt. 9b - 10b - dla gazowego roztworu bogatego,
pkt. 12 - 13 - dla gazowego roztworu ubogiego.

Zastosowanie metody rzutów biegunowych [4, 9] spowoduje, że poszczególne przyrosty entalpii, zrzutowane na wspólną dla obu wykresów, oś entalpii dla czystego R22, pozwalają na zestawienie bilansu energetycznego całego obiegu w postaci:

$$q_d - q_k + q_{dz} - q_{dz} + q_p - q_{wgc} + q_{wgc} - q_a + q_r - q_r = 0 \quad (1)$$

gdzie: q_i - jednostkowy strumień ciepła i-tej przemiany cząstkowej.

Po uproszczeniu:

$$q_d - q_k + q_o - q_a = 0 \quad (2)$$

Uzyskane w ten sposób, jednostkowe strumienie ciepła poszczególnych przemian q_i pozwalają na zestawienie bilansu energetycznego całego klimatyzatora w postaci:

$$m_z (q_d - q_k + q_o - q_a) = 0 \quad (3)$$

lub

$$Q_d - Q_k + Q_p - Q_a = 0 \quad (4)$$

gdzie:

m_z - strumień substancjalny ziębniaka,

Q_i - strumień ciepła i-tej przemiany cząstkowej.

Pozwala to na uzyskanie wytycznych do obliczeń cieplnych poszczególnych aparatów klimatyzatora.

Metoda skorelowanych wykresów entalpia - stężenie może znaleźć zastosowanie we wszystkich układach absorpcyjno-dyfuzyjnych trójskładnikowych o nielotnej parze

rozpuszczalnika a także, po pewnych modyfikacjach w układach o lotnej parze rozpuszczalnika (np. $\text{NH}_3+\text{H}_2\text{O}+\text{H}_2$).

LITERATURA :

- [1] Siatka J., Kasperski J., Eichler J. - *Prace nad zastosowaniem R22-E181-N₂ w systemach absorpcyjno-dyfuzyjnych. Wykres entalpia-stężenie dla R22-E181.* Chłodnictwo 11/1990.
- [2] Siatka J. i inni - *Absorpcyjna dyfuzyjna pompa ciepła. Etap II. Modelowanie własności zespołu sorpcyjnego z gazem wyrównawczym.* Raport I-20/SPR 63/88 Politechniki Wrocławskiej.
- [3] Bošnjaković F. - *Technische Thermodynamik.* cz. II. Lipsk 1937.
- [4] Maczek K. - *Obliczanie bilansu energetycznego i egzergetycznego przemysłowej ziębiarki absorpcyjnej na roztwór amoniak - woda.* Biuletyn Informacyjny. Chłodnictwo 2/1966.
- [5] Maczek K. - *Modelowanie matematyczne w optymalizacji urządzeń cieplnych sorpcyjnych.* Monografia. Politechnika Krakowska. Kraków 1984.
- [6] Backstrom M. - *The theory of the evaporator working with diffusion.* Kylteknisk Tidskrift 2/1954.
- [7] Niebergall W. - *Sorptionskaltmaschinen. Band 7 - Handbuch der Kältetechnik.* Springer Verlag. Berlin 1981.
- [8] Kriebel M., Löffler H. J. - *Thermodynamische Eigenschaften des binären Systems Difluormonochlormethan (R22) - Tetraethylenglykolmethylether (E181).* Kältetechnik 9/1965.
- [9] Maczek K., Mieczyski M. - *Chłodnictwo.* Skrypt Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1981.