

Andrzej PIOTROWICZ

OBR GASTROMASZ, Bydgoszcz

## ADIABATYCZNE ROZPRĘŻANIE PARY MOKREJ W ZBIORNIKU<sup>\*)</sup>

**Streszczenie.** Rozpatrzono trzy możliwe przypadki rozprężania pary mokrej w doskonale zaizolowanym zbiorniku w celu określenia jej stanu po rozprężeniu.

### WET VAPOUR ADIABATIC EXPANSION IN A VESSEL

**Summary.** Three possible means of wet vapour adiabatic expansion (WVAE) in a vessel, by flowing out of:

- saturation vapour (WVAE1-V),
- saturation liquid (WVAE1-L),
- both phases simultaneously (WVAE2)

were analysed looking into thermodynamical point of view.

### WSTĘP

Para nasycona mokra składa się z pary nasyconej suchej o właściwej objętości  $v''$ , entalpii  $i''$  i entropii  $s''$  oraz cieczy w stanie pęcherzyków o właściwej objętości, entalpii i entropii - odpowiednio  $v'$ ,  $i'$ ,  $s'$ . Obie fazy pary mokrej mogą występować jako:

- zmieszane (zawiesina kropeł cieczy w parze nasyconej suchej), np. przy wyptywie z turbiny,
- rozdzielone, np. w zbiorniku.

Stan pary mokrej danego czynnika w zbiorniku określa ciśnienie  $p$  (lub odpowiadająca mu temperatura nasycenia  $T$ ) i stopień suchości  $x \in (0;1)$ , zdefiniowany zależnością

<sup>\*)</sup> Praca powstała przy realizacji projektu badawczego KBN S 603 007 07.

$$x = \frac{G''}{G' + G''}, \quad (1)$$

gdzie:

$G'$ ,  $G''$  - ilość (masa) ciekłej i parowej fazy pary mokrej.

Znajomość wartości  $p$  i  $x$  pozwala obliczyć objętość właściwej  $v_x$  pary mokrej

$$v_x = v' + x(v'' - v') \quad (2)$$

oraz jej parametrów kalorycznych - entalpii właściwej  $i_x$  i entropii właściwej  $s_x$

$$i_x = i' + x r \quad (3)$$

$$s_x = s' + x \frac{r}{T}, \quad (4)$$

gdzie:

$r = i'' - i'$  - entalpia parowania czynnika w temperaturze  $T$ .

Wzory (2), (3), (4) stosuje się do pary mokrej o fazach zmieszanych i rozdzielonych (np. [2, 3, 4]).

Jeżeli znana jest ponadto pojemność  $V$  zbiornika, można obliczyć zawartą w nim łączną ilość (masę)  $G = G' + G''$  pary mokrej

$$G = \frac{V}{v_x} \quad (5)$$

oraz masę poszczególnych faz - korzystając z definicji (1) stopnia suchości

$$G'' = xG, \quad G' = (1 - x)G \quad (6)$$

Analiza adiabatycznego rozprężania pary mokrej (ARPM) ma na celu określenie stanu tej pary po rozprężeniu do danego ciśnienia w zaizolowanym zbiorniku, co sprowadza się do wyznaczenia jej stopnia suchości.

ARPM może być spowodowane wpływem ze zbiornika

- jednej fazy (ARPM1) - parowej lub ciekłej,
- dwu faz (ARPM2) - parowej i ciekłej - równocześnie,

czynnika tworzącego parę mokrą.

Rozpatruje się rozprężanie bardzo powolne, podczas którego obie fazy pary mokrej w zbiorniku pozostają wzajemnie w stanie równowagi termicznej, przy parowaniu cieczy obniżającym jej temperaturę.

Równanie bilansu ciepłego ARPM ma postać:

$$-dU = dI, \quad (7)$$

gdzie:

$U, I$  - energia wewnętrzna i entalpia ilości  $G$  pary mokrej w zbiorniku.

Każdemu z przypadków ARPM odpowiada inne rozwinięcie równania (7).

## ROZPRĘŻANIE PARY MOKREJ W WYNIKU WYPŁYWU FAZY PAROWEJ ZE ZBIORNIKA (ARPM1-P)

Składniki bilansu (7) wyrażają zależność

$$dU = d(Gu_x), \quad dI = -i''dG \quad (8)$$

Energię wewnętrzną właściwą  $u_x$  pary mokrej można ująć zapisem wynikającym z funkcji Gibbsa

$$u_x = i_x - pv_x \quad (9)$$

Podstawiając (8) do (7) przy wykorzystaniu (5) i (9) otrzymuje się równanie różniczkowe ARPM1-P

$$di_x - v_x dp + (i'' - i_x) \frac{dv_x}{v_x} = 0 \quad (10)$$

Do łatwego scałkowania nadaje się inna, równoważna postać równania (10)

$$d(Gi_x) - Vdp - i''dG = 0 \quad (10a)$$

Całkowanie dokonuje się w przedziale stanów:

od

- początkowego znanego stanu 1, określonego ciśnieniem  $p_1$  (temperaturą nasycenia  $T_1$ ) i stopniem suchości  $x_1$

do

- końcowego, nie w pełni znanego stanu 2, określonego znanym ciśnieniem  $p_2$  (temperaturą nasycenia  $T_2$ ) i poszukiwanym stopniem suchości  $x_2$ .

Wielkości fizyczne odpowiadające tym stanom oznaczono odpowiednio indeksami cyfrowymi 1 i 2.

Przyjmując średnią entalpię właściwą  $i''_m$  pary nasyconej suchej w przedziale ciśnień od  $p_1$  do  $p_2$  ze scałkowania (10a) otrzymuje się równanie:

$$G_1 i_{x1} - G_2 i_{x2} - V(p_1 - p_2) - i''_m(G_1 - G_2) = 0 \quad (11)$$

Po wykorzystaniu (5), (2), (3) uzyskuje się z (11) wzór na obliczanie poszukiwanego stopnia suchości  $x_2$  pary mokrej po rozprężeniu

$$x_2 = \frac{v_{x1}[i_m'' - i_2' - v_2'(p_1 - p_2)] - v_2'(i_m'' - i_{x1})}{v_{x1}[r_2 + (v_2'' - v_2')(p_1 - p_2)] - (v_2'' - v_2')(i_m'' - i_{x1})} \quad (12)$$

Wartość  $x_2$  obliczona z (12) i ciśnienie  $p_2$  określają jednoznacznie stan pary mokrej po rozprężeniu pod warunkiem, że  $x_2 \in (0;1)$ . Spełnienie tego warunku (osiągalność zadanego rozprężenia pary mokrej) zależy od początkowego stopnia suchości  $x_1$ . Z (12) wynika, że dla danych  $p_1$  i  $p_2$

$$x_2 \geq 0,$$

jeżeli

$$x_1 \in (0;1) \geq \frac{v_2'(i_m'' - i_1') - v_1'[i_m'' - i_2' - v_2'(p_1 - p_2)]}{v_2'r_1 + (v_1'' - v_1')[i_m'' - i_2' - v_2'(p_1 - p_2)]} \quad (a)$$

oraz

$$x_2 \leq 1,$$

jeżeli

$$x_1 \in (0;1) \leq \frac{v_2'(i_m'' - i_1') - v_1'[i_m'' - i_2' - v_2'(p_1 - p_2)]}{v_2'r_1 + (v_1'' - v_1')[i_m'' - i_2' - v_2'(p_1 - p_2)]} \quad (b)$$

Jeżeli wartość  $x_1$  nie spełnia jednocześnie nierówności (a) i (b), rozprężenie pary mokrej od  $p_1$  do  $p_2$  jest nieosiągalne. Przy zbyt dużej wartości  $x_1$  może odparować cała faza ciekła zanim ciśnienie w zbiorniku osiągnie wartość  $p_2$ .

Najmniejszy ( $x_{2min}$ ) oraz największy ( $x_{2max}$ ) stopień suchości po rozprężeniu od  $p_1$  do  $p_2$  wynika z (12) odpowiednio dla  $x_1 = 0$  ( $v_{x1} = v_1'$ ,  $i_{x1} = i_1'$ ) oraz  $x_1 = 1$  ( $v_{x1} = v_1''$ ,  $i_{x1} = i_1''$ ).

Wzór (12) można wykorzystać do wyznaczenia takiej wartości  $x_1$ , przy której po rozprężeniu para mokra będzie posiadała stopień suchości jak przed rozprężeniem (a więc na wykresach entalpowych oba krańcowe stany przemiany określone zostaną punktami leżącymi na tej samej izokserze<sup>\*)</sup>). Podstawiając do (12)  $x_1$  w miejsce  $x_2$  i korzystając z (2) i (3), otrzymuje się równanie:

$$Ax_1^2 + Bx_1 + C = 0, \quad (13)$$

w którym

$$A = (v_2'' - v_2')r_1 - (v_1'' - v_1')r_2 - (v_1'' - v_1')(v_2'' - v_2')(p_1 - p_2) \quad (c)$$

<sup>\*)</sup> Izoksera - przemiana termodynamiczna pary mokrej, przebiegająca przy stałym stopniu suchości, a także linia stałego stopnia suchości na wykresach entalpowych tej pary.

$$B = (v_1'' - v_1') [i_m'' - i_2' - v_2'(p_1 - p_2)] + v_2'r_1 - (v_2'' - v_2') [i_m'' - i_1' - v_1'(p_1 - p_2)] - v_1'r_2 \quad (d)$$

$$C = v_1' [i_m'' - i_2' - v_2'(p_1 - p_2)] - v_2' (i_m'' - i_1') \quad (e)$$

Wartość  $x_1 \langle 0;1 \rangle$  determinująca stan izokseryczny po rozprężeniu jest jednym z pierwiastków równania (13), przy czym

$$0 \leq x_1 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \leq 1,$$

jeżeli dla  $A > 0$  lub  $A < 0$

$$C \geq 0, \quad B \leq -(A + C)$$

albo

$$0 \leq x_1 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \leq 1,$$

jeżeli dla  $A > 0$  lub  $A < 0$

$$C \leq 0, \quad B \geq -(A + C)$$

Niespełnienie przez B i C podanych warunków oznacza niezawieranie się wartości  $x_1$  w przedziale  $\langle 0;1 \rangle$ , a więc nieosiągalność stanu izokserycznego po rozprężeniu.

## ROZPRĘŻANIE PARY MOKREJ W WYNIKU WYPŁYWU FAZY CIEKŁEJ ZE ZBIORNIKA (ARPM1-C)

Składniki bilansu (7) wyrażają zależności:

$$dU = d(Gu_x), \quad dI = -i' dG \quad (14)$$

Podstawiając (14) do (7) przy wykorzystaniu (5) i (9) otrzymuje się równanie różniczkowe ARPM1-C

$$di_x - v_x dp - (i_x - i') \frac{dv_x}{v_x} = 0 \quad (15)$$

W celu scałkowania równaniu (15) nadaje się postać:

$$d(Gi_x) - V dp - i' dG = 0 \quad (15a)$$

Całkując (15a) analogicznie do całkowania (10a) uzyskuje się równanie:

$$G_1 i_{x1} - G_2 i_{x2} - V(p_1 - p_2) - i_m'(G_1 - G_2) = 0, \quad (16)$$

gdzie:

$i_m'$  - średnia wartość entalpii właściwej  $i'$  cieczy w przedziale ciśnień od  $p_1$  do  $p_2$ .

Z (16), po wykorzystaniu (5), (2), (3), otrzymuje się wzór na stopień suchości  $x_2$

$$x_2 = \frac{v_{x1}[i_m' - i_2' - v_2'(p_1 - p_2)] + v_2'(i_{x1}' - i_m')}{v_{x1}[r_2 + (v_2'' - v_2')(p_1 - p_2)] - (v_2'' - v_2')(i_{x1}' - i_m')}, \quad (17)$$

przy czym dla danych  $p_1$  i  $p_2$

$$x_2 \geq 0,$$

jeżeli

$$x_1 \langle 0; 1 \rangle \geq \frac{(v_2'' - v_2')(i_1' - i_m') - v_1'[r_2 + (v_2'' - v_2')(p_1 - p_2)]}{(v_1'' - v_1')[r_2 + (v_2'' - v_2')(p_1 - p_2)] - (v_2'' - v_2')r_1} \quad (f)$$

oraz

$$x_2 \leq 1,$$

jeżeli

$$x_1 \langle 0; 1 \rangle \leq \frac{v_1'[i_2'' - i_m' + v_2''(p_1 - p_2)] + v_2''(i_1' - i_m')}{v_2''r_1 + (v_1'' - v_1')[i_2'' - i_m' + v_2''(p_1 - p_2)]} \quad (g)$$

Ujemny mianownik zmienia kierunek nierówności (f) i (g).

Wartość  $x_1$  musi spełniać jednocześnie nierówności (f) i (g), by rozprężenie pary mokrej od  $p_1$  do  $p_2$  było możliwe. Przy zbyt dużej wartości  $x_1$  faza ciekła może wypłynąć ze zbiornika znikając całkowicie przed osiągnięciem ciśnienia  $p_2$  pomimo ciągłego (lecz nie wystarczającego) zwiększania jej ilości na skutek skraplania się pary<sup>\*)</sup>.

Najmniejszy ( $x_{2min}$ ) stopień suchości po rozprężeniu od  $p_1$  do  $p_2$  wynika z (17) dla  $x_1 = 0 (v_{x1} = v_1', i_{x1} = i_1')$ .

Podstawiając do (17)  $x_1$  w miejsce  $x_2$  przy wykorzystaniu (2) i (3) można otrzymać równanie analogiczne do (13). Jednakże wynikająca z niego wartość  $x_1$ , mająca determinować stan izokseryczny po rozprężeniu, nie może mieścić się w przedziale  $\langle 0; 1 \rangle$ , nie ma więc sensu fizycznego.

Łatwo wykazać, że ilość czynnika ciekłego odprowadzona ze zbiornika w przemianie ARPM1-C w celu uzyskania założonego rozprężenia jest znacznie większa od ilości czynnika parowego, jaką w tym samym celu trzeba odprowadzić w przemianie ARPM1-P

<sup>\*)</sup> O tym, że podczas ARPM1-C na granicy faz dominuje zjawisko skraplania się pary (a nie parowania cieczy), można się przekonać zestawiając różniczkowe bilanse substancjalne dla obu faz oddzielnie.

$$\frac{(G_1 - G_2)_{\text{ARPMI-C}}}{(G_1 - G_2)_{\text{ARPMI-P}}} = \frac{(v_2'' - v_2')i_m'' - (v_2''i_2'' - v_2'i_2'')}{(v_2'' - v_2')i_m' - (v_2''i_2' - v_2'i_2')} > 1 \quad (\text{h})$$

Zależność (h) dotyczy oczywiście rozprężenia dającego się osiągnąć w obu przemianach przy jednakowym początkowym stopniu suchości.

## ROZPRĘŻANIE PARY MOKREJ W WYNIKU RÓWNOCZESNEGO WYPŁYWU OBU FAZ ZE ZBIORNIKA (ARPM2)

Składniki bilansu (7) wyrażone są zależnościami:

$$dU = d(Gu_x), dI = -[xi'' + (1-x)']dG = -i_x dG \quad (18)$$

Podstawiając (18) do (7) przy wykorzystaniu (5) i (9) otrzymuje się równanie różniczkowe ARPM2

$$di_x - v_x dp = 0 \quad (19)$$

Z równania (19) i z definicji entropii właściwej pary mokrej

$$ds_x = \frac{di_x - v_x dp}{T} \quad (20)$$

wynika, że przemiana ARPM2 jest izentropą<sup>9)</sup>, więc

$$s_{x2} = s_{x1} \quad (21)$$

Korzystając z (21) i (4) uzyskuje się wzór

$$x_2 = \frac{T_2}{r_2} \left( x_1 \frac{r_1}{T_1} + s_1' - s_2' \right) \quad (22)$$

Wartość  $x_2$  obliczona z (22) i ciśnienie  $p_2$  (temperatura nasycenia  $T_2$ ) określają jednoznacznie stan 2 pary mokrej po przemianie ARPM2. Osiągalność tego stanu zależy od spełnienia warunków

$$x_2 \geq 0,$$

gdy

$$x_1 \langle 0; 1 \rangle \geq -\frac{T_1}{r_1} (s_1' - s_2') \quad (\text{i})$$

(który to warunek jest zawsze spełniony, bo  $s_1' > s_2'$ )

<sup>9)</sup> w odniesieniu do jednostki zmiennej ilości pary mokrej w zbiorniku.

oraz

$$x_2 \leq 1,$$

gdym

$$x_1 \langle 0; 1 \rangle \leq \frac{T_1}{r_1} \left[ \frac{r_2}{T_2} - (s'_1 - s'_2) \right] \quad (j)$$

Najmniejszy ( $x_{2\min}$ ) stopień suchości po rozprężeniu od  $p_1$  do  $p_2$  wynika z (22) dla  $x_1 = 0$ .

Przy początkowym stopniu suchości określonym zależnością

$$0 < x_1 = \frac{T_1 T_2 (s'_1 - s'_2)}{T_1 r_2 - T_2 r_1} < 1 \quad (23)$$

przemiana ARPM2 prowadzi do stanu izokserycznego. Oznacza to, że rozprężona para mokra ma nie tylko taką samą entropię właściwą, ale i stopień suchości jak przed rozprężeniem.

#### PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Freon 22 (para mokra), zawarty w zaizolowanym zbiorniku o pojemności  $V=0.1 \text{ m}^3$ , poddano rozprężeniu w celu oziębienia od temperatury  $T_1=308.15 \text{ K}$  ( $p_1=1.3532 \text{ MPa}$ ) do temperatury  $T_2=263.15 \text{ K}$  ( $p_2=0.3552 \text{ MPa}$ ).

Rozprężanie zbadano według przeanalizowanych ARPM.

Wartości objętości właściwej i parametrów kalorycznych freonu zaczerpnięto z [1]. Dla krańcowych stanów przemian rozprężania są one równe:

$$v'_1=0.8665 \cdot 10^{-3}, \quad v''_1=17.23 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$i'_1=542.88, \quad i''_1=714.66 \quad \text{kJ/kg}$$

$$r_1=171.78 \text{ kJ/kg}, \quad s'_1=1.1452 \quad \text{kJ/kg K}$$

$$v'_2=0.7586 \cdot 10^{-3}, \quad v''_2=65.08 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$i'_2=488.34, \quad i''_2=700.42 \quad \text{kJ/kg}$$

$$r_2=212.08 \text{ kJ/kg}, \quad s'_2=0.9569 \quad \text{kJ/kg K}$$

Średnie arytmetyczne wartości entalpii właściwej cieczy i pary w przemianach - wyznaczone dla odczytów wartości tablicowych  $i'$  i  $i''$  dokonanych co 1K - wynoszą:

$$i'_m=515.14, \quad i''_m=708.27 \quad \text{kJ/kg}$$



Określono warunki, jakie spełniać powinny wartości  $x_1$ :

– dla ARPM1-P, z (a) i (b)

$$x_2 \geq 0, \text{ jeżeli } x_1 \geq -0.017,$$

$$x_2 \leq 1, \text{ jeżeli } x_1 \leq 1.055;$$

– dla ARPM1-C, z (f) i (g)

$$x_2 \geq 0, \text{ jeżeli } x_1 \leq -0.237,$$

$$x_2 \leq 1, \text{ jeżeli } x_1 \leq -0.224;$$

– dla ARPM2, z (i) i (j)

$$x_2 \geq 0, \text{ jeżeli } x_1 \geq -0.338,,$$

$$x_2 \leq 1, \text{ jeżeli } x_1 \leq 1.108.$$

Z warunków (a), (b) oraz (i), (j) wynika, że przemiany ARPM1-P i ARPM2 mogą być zrealizowane w założonym przedziale ciśnień (temperatur nasycenia) przy dowolnej wartości  $x_1 \in \langle 0; 1 \rangle$ . Z warunków (f), (g) wynika natomiast, że założone rozprężenie nie da się zrealizować w przemianie ARPM1-C, bo  $x_1$  nie może przybierać wartości ujemnych. Wartość  $x_2=1$  w tej przemianie zostałaby osiągnięta przy temperaturze wyższej od  $T_2$ .

W celu uściślenia wyników obliczeń, ze względu na występujące we wzorach (12) i (17) średnie wartości entalpii właściwej pary i cieczy, założony przedział temperatur nasycenia  $\langle 308.15; 263.15 \text{K} \rangle$  podzielono na podprzedziały:

– dla ARPM1-P - co 5K,

– dla ARPM1-C - co 1K.

Przemianę ARPM1-C badano do stanu, w którym stopień suchości osiągał wartość na tyle zbliżoną do jedności, że przy dalszym rozprężeniu, odpowiadającym oziębieniu o 1K, przestałyby się mieścić w przedziale  $\langle 0; 1 \rangle$ , a więc utraciłyby sens fizyczny.

Przemianę ARPM2 badano w podprzedziałach co 5K w celu uzyskania możliwości porównania wyników z wynikami badania ARPM1-P.

Do obliczeń przyjęto:

– dla ARPM1-P i ARPM2:  $x_1=0; 0.25; 0.50; 0.75; 1$ ,

– dla ARPM1-C:  $x_1=0; 0.25; 0.50$ .

Wartości stopnia suchości po rozprężeniu w każdym z podprzedziałów obliczono ze wzorów (12), (17) i (22).

Ze wzorów (2), (3), (4) wyznaczono  $v_x$ ,  $i_x$ ,  $s_x$ , których zmienność ilustruje przebieg przemian.

Ze wzorów (5) i (6) obliczono ilość czynnika w zbiorniku - całkowitą i w poszczególnych fazach - przed i po rozprężeniu według ARPM1-P i ARPM2.

Wyniki obliczeń zestawiono w tablicach 1-4.

Wyznaczono także wartości  $x_1$ , przy których po rozprężeniu według ARPM1-P i ARPM2 występują stany izokseryczne:

- z (c), (d), (e) otrzymano dla ARPM1-P

$$A = 6528.340\ 83 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3 \text{kJ}}{\text{kg}^2},$$

$$B = -7\ 160.758\ 352 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3 \text{kJ}}{\text{kg}^2},$$

$$C = 64.448\ 478\ 75 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3 \text{kJ}}{\text{kg}^2},$$

a więc dla  $A > 0$ ,  $C > 0$ ,  $B > -(A+C)$  z (13) wynika

$$x_1 = 9.075\ 318\ 3 \cdot 10^{-3} = x_2,$$

a stąd początkowe i końcowe parametry czynnika

$$v_{x1} = 1.015\ 004 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$i_{x1} = 544.439 \text{ kJ/kg}, \quad s_{x1} = 1.150\ 259 \text{ kJ/kg K}$$

oraz

$$v_{x2} = 1.342\ 337 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$i_{x2} = 490.265 \text{ kJ/kg}, \quad s_{x2} = 0.964\ 214 \text{ kJ/kg K};$$

- z (23) otrzymano dla ARPM2

$$x_1 = 0.757\ 830\ 668 = x_2,$$

a stąd początkowe i końcowe parametry czynnika

$$v_{x1} = 13.267\ 262 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$i_{x1} = 673.060 \text{ kJ/kg}, \quad s_{x1} = 1.567\ 657 \text{ kJ/kg K}$$

oraz

$$v_{x2} = 49.503\ 330 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$i_{x2} = 649.061 \text{ kJ/kg}, \quad s_{x2} = 1.567\ 657 \text{ kJ/kg K}.$$

Oczywiście, przebieg obu przemian nie jest izokseryczny.

## WNIOSKI

1. Adiabatyczne rozprężanie pary mokrej w zbiorniku można realizować przez odprowadzanie:
  - fazy parowej (ARPM1-P),
  - fazy ciekłej (ARPM1-C),
  - obu faz równocześnie (ARPM2).
2. Dla założonego przedziału ciśnień (temperatur nasycenia) stopień suchości osiągnięty po rozprężeniu zależy od:
  - rodzaju czynnika,
  - rodzaju przemiany (sposobu rozprężania),
  - początkowego stopnia suchości.
3. Dla jednej, ściśle określonej (dla danego przedziału ciśnień i rodzaju czynnika) wartości początkowego stopnia suchości można po rozprężeniu otrzymać końcowy stopień suchości równy początkowemu - jeśli rozprężanie przebiega według ARPM1-P lub ARPM2.
4. Przemianę ARPM2 charakteryzuje stała entropia właściwa pary mokrej w zbiorniku.
5. Rozprężanie według każdej z rozpatrywanych przemian można zrealizować w danym przedziale ciśnień, jeśli wartość początkowego stopnia suchości spełnia warunki określone w pracy.
6. Jeżeli celem rozprężania jest otrzymanie jak największej ilości oziębionej cieczy, należy stosować przemianę ARPM1-P przy jak najmniejszym początkowym stopniu suchości (patrz tablica 4).

Wyniki przykładu obliczeniowego potwierdzają wnioski z rozważań teoretycznych. Wykazują, że przy rozprężaniu w przyjętym przedziale ciśnień (temperatur nasycenia), wraz z obniżaniem się ciśnienia i temperatury

**w przemianie ARPM1-P (tablica 1):**

- maleje właściwa entalpia i entropia pary mokrej oraz stopień suchości (z wyjątkiem rozprężania przy  $x_1=0$ , podczas którego stopień suchości wzrasta, po czym nieznacznie maleje),
- zwiększa się objętość właściwa pary mokrej;

**w przemianie ARPM1-C (tablica 2):**

- zwiększa się właściwa entalpia, entropia i objętość pary mokrej przede wszystkim w wyniku bardzo wyraźnego wzrastania stopnia suchości;

**w przemianie ARPM2 (tablica 3):**

- zwiększa się objętość właściwa pary mokrej i stopień suchości (z wyjątkiem rozprężania przy  $x_1=1$ , podczas którego stopień suchości maleje),
- maleje entalpia właściwa pary mokrej, a jej entropia właściwa zachowuje wartość stałą (tym większą, im większa jest wartość  $x_1$ ).

Obliczenia potwierdziły także możliwość osiągnięcia stanu izokserycznego po rozprężeniu według ARPM1-P i ARPM2.

Tablica 1

Parametry czynnika w krańcowych stanach  
podprzediałów przemiany ARPM1-P  
(do przykładu obliczeniowego)

T [K]	p [MPa]	x	$10^3 v_x$ [m <sup>3</sup> /kg]	$i_x$ [kJ/kg]	$s_x$ [kJ/kg K]
1	2	3	4	5	6
308.15	1.3532	0.00000	0.8665	542.880	1.14520
303.00	1.1908	0.00236	0.8959	536.930	1.12620
298.00	1.0432	0.00405	0.9255	530.970	1.10680
293.00	0.9097	0.00521	0.9553	525.020	1.08710
288.00	0.7892	0.00595	0.9854	519.080	1.06710
283.00	0.6811	0.00636	1.0157	513.140	1.04660
278.00	0.5844	0.00651	1.0462	507.220	1.02590
273.00	0.4983	0.00646	1.0769	501.320	1.00480
268.00	0.4222	0.00624	1.1077	495.450	0.98340
263.15	0.3552	0.00591	1.1388	489.590	0.96170
308.15	1.3532	0.25000	4.9574	585.830	1.28460
303.00	1.1908	0.23272	5.2379	577.720	1.26070
298.00	1.0432	0.21566	5.5245	569.500	1.23600
293.00	0.9097	0.19878	5.8170	561.200	1.21050
288.00	0.7892	0.18218	6.1151	552.830	1.18420
283.00	0.6811	0.16609	6.4175	544.430	1.15710
278.00	0.5844	0.15042	6.7235	536.030	1.12950

cd. tablicy I

273.00	0.4983	0.13536	7.0324	527.650	1.10120
268.00	0.4222	0.12092	7.3431	519.330	1.07250
263.15	0.3552	0.10722	7.6552	511.080	1.04330
308.15	1.3532	0.50000	9.0483	628.770	1.42400
303.00	1.1908	0.47341	9.7746	620.330	1.40130
298.00	1.0432	0.44645	10.5400	611.520	1.37700
293.00	0.9097	0.41895	11.3470	602.350	1.35090
288.00	0.7892	0.39110	12.1950	592.820	1.32300
283.00	0.6811	0.36303	13.0780	583.020	1.29340
278.00	0.5844	0.33482	13.9980	572.940	1.26220
273.00	0.4983	0.30674	14.9500	562.660	1.22940
268.00	0.4222	0.27887	15.9310	552.220	1.19520
263.15	0.3552	0.25150	16.9360	541.680	1.15960
308.15	1.3532	0.75000	13.1390	671.720	1.56330
303.00	1.1908	0.72514	14.5190	664.900	1.54840
298.00	1.0432	0.69913	16.0310	657.530	1.53130
293.00	0.9097	0.67161	17.6920	649.570	1.51200
288.00	0.7892	0.64251	19.5140	640.970	1.49000
283.00	0.6811	0.61194	21.4960	631.780	1.46560
278.00	0.5844	0.57961	23.6550	621.940	1.43830
273.00	0.4983	0.54573	25.9920	611.480	1.40810
268.00	0.4222	0.51026	28.5120	600.410	1.37490
263.15	0.3552	0.47346	31.2120	588.750	1.33850
308.15	1.3532	1.00000	17.2300	714.660	1.70270
303.00	1.1908	0.98869	19.4870	711.570	1.70230
298.00	1.0432	0.97697	22.0700	708.130	1.70100
293.00	0.9097	0.96452	25.0490	704.310	1.69870
288.00	0.7892	0.95111	28.4970	700.070	1.69510
283.00	0.6811	0.93647	32.4720	695.360	1.69010
278.00	0.5844	0.92026	37.0940	690.130	1.68350
273.00	0.4983	0.90216	42.4600	684.290	1.67470
268.00	0.4222	0.88183	48.7150	677.780	1.66340
263.15	0.3552	0.85889	56.0040	670.490	1.64920

Tablica 2

Parametry czynnika w krańcowych stanach  
podprzedziałów przemiany ARPM1-C  
(do przykładu obliczeniowego)

T [K]	p [MPa]	x	$10^3 v_x$ [m <sup>3</sup> /kg]	$i_x$ [kJ/kg]	$s_x$ [kJ/kg K]
1	2	3	4	5	6
308.15	1.3532	0.000000	0.8665	542.88	1.1452
307.00	1.3196	0.007756	0.9939	542.94	1.1455
306.00	1.2864	0.016612	1.1479	543.21	1.1465
305.00	1.2539	0.026802	1.3347	543.74	1.1484
304.00	1.2221	0.038790	1.5648	544.61	1.1513
303.00	1.1908	0.053208	1.8544	545.93	1.1559
302.00	1.1601	0.070866	2.2228	547.86	1.1625
301.00	1.1300	0.092766	2.6969	550.60	1.1718
300.00	1.1005	0.121014	3.3271	554.53	1.1851
299.00	1.0716	0.159276	4.2042	560.32	1.2048
298.00	1.0432	0.213125	5.4693	569.04	1.2345
297.00	1.0154	0.295471	7.4462	583.08	1.2822
296.00	0.9882	0.434813	10.8450	607.76	1.3663
295.15	0.9615	0.718606	17.8610	659.45	1.5424
308.15	1.3532	0.250000	4.9574	585.83	1.2846
307.00	1.3196	0.321813	6.2784	597.23	1.3222
306.00	1.2864	0.429587	8.2963	615.04	1.3811
305.00	1.2539	0.609506	11.7140	645.70	1.4825
304.15	1.2221	0.952142	18.2930	705.38	1.6799
308.15	1.3532	0.500000	9.0483	628.77	1.4240
307.15	1.3196	0.708880	12.7910	664.14	1.5401

Tablica 3

Parametry czynnika w krańcowych stanach  
podprzędziół przemiany ARPM2  
(do przykładu obliczeniowego)

T [K]	p [MPa]	x	$10^3 v_x$ [m <sup>3</sup> /kg]	$i_x$ [kJ/kg]	$s_x$ [kJ/kg K]
1	2	3	4	5	6
308.15	1.3532	0.000000	0.867	542.88	1.1452
303.00	1.1908	0.034927	1.510	542.69	1.1452
298.00	1.0432	0.066969	2.293	542.42	1.1452
293.00	0.9097	0.096310	3.244	542.05	1.1452
288.00	0.7892	0.123542	4.408	641.60	1.1452
283.00	0.6811	0.148859	5.835	541.05	1.1452
278.00	0.5844	0.172307	7.587	540.41	1.1452
273.00	0.4983	0.194152	9.749	539.66	1.1452
268.00	0.4222	0.214530	12.433	538.82	1.1452
263.15	0.3552	0.233644	15.787	537.89	1.1452
308.15	1.3532	0.250000	4.957	585.83	1.2846
303.00	1.1908	0.273537	6.007	584.94	1.2846
298.00	1.0432	0.295160	7.252	583.98	1.2846
293.00	0.9097	0.314912	8.734	582.90	1.2846
288.00	0.7892	0.333254	10.513	581.75	1.2846
283.00	0.6811	0.350272	12.647	580.52	1.2846
278.00	0.5844	0.365962	15.227	579.17	1.2846
273.00	0.4983	0.380500	18.358	577.73	1.2846
268.00	0.4222	0.393989	22.190	576.19	1.2846
263.15	0.3552	0.406567	26.910	574.56	1.2846
308.15	1.3532	0.500000	9.048	628.77	1.4239
303.00	1.1908	0.512146	10.505	627.19	1.4239
298.00	1.0432	0.523351	12.211	625.53	1.4239
293.00	0.9097	0.533514	14.224	623.76	1.4239
288.00	0.7892	0.542966	16.617	621.91	1.4239
283.00	0.6811	0.551686	19.458	619.98	1.4239
278.00	0.5844	0.559618	22.867	617.94	1.4239
273.00	0.4983	0.566849	26.968	615.80	1.4239
268.00	0.4222	0.573447	31.948	613.56	1.4239
263.15	0.3552	0.579491	38.032	611.24	1.4239

cd. tablicy 3

308.15	1.3532	0.750000	13.139	671.72	1.5633
303.00	1.1908	0.750756	15.002	669.44	1.5633
298.00	1.0432	0.751543	17.170	667.08	1.5633
293.00	0.9097	0.752116	19.714	664.61	1.5633
288.00	0.7892	0.752678	22.721	662.07	1.5633
283.00	0.6811	0.753099	26.270	659.44	1.5633
278.00	0.5844	0.753294	30.506	656.70	1.5633
273.00	0.4983	0.753197	35.577	653.86	1.5633
268.00	0.4222	0.752906	41.705	650.94	1.5633
263.15	0.3552	0.752414	49.155	647.91	1.5633
308.15	1.3532	1.000000	17.230	714.66	1.7027
303.00	1.1908	0.989365	19.500	711.69	1.7027
298.00	1.0432	0.979734	22.130	708.63	1.7027
293.00	0.9097	0.970718	15.205	705.47	1.7027
288.00	0.7892	0.962390	28.825	702.23	1.7027
283.00	0.6811	0.954512	33.082	698.90	1.7027
278.00	0.5844	0.946930	38.146	695.47	1.7027
273.00	0.4983	0.939546	44.187	691.93	1.7027
268.00	0.4222	0.932364	51.463	688.31	1.7027
263.15	0.3552	0.925338	60.278	684.59	1.7027

Tablica 4

**Ilość czynnika w zbiorniku przed (1) i po (2) rozprężeniu  
(do przykładu obliczeniowego)**

$x_1$	Stan początkowy			ARPM1-P			ARPM2		
	$G_1$	$G'_1$	$G''_1$	$G_2$	$G'_2$	$G''_2$	$G_2$	$G'_2$	$G''_2$
	kg			kg			kg		
0.00	115.407	115.407	0.000	87.812	87.293	0.519	6.334	4.854	1.480
0.25	20.172	15.129	5.043	13.063	11.662	1.401	3.716	2.205	1.511
0.50	11.052	5.526	5.526	5.905	4.420	1.485	2.629	1.105	1.524
0.75	7.611	1.903	5.708	3.204	0.801	2.403	2.034	0.503	1.531
1.00	5.804	0.000	5.804	1.786	0.252	1.534	1.659	0.124	1.535

## LITERATURA

1. Bogdanow S. N., Iwanow O. P., Kuprijanowa A. W.: Chołodilnaja tiechnika. Swojstwa wieszcziestw. MASZINOSTROJENIJE, Leningrad 1976.
2. Ochęduszek S.: Termodynamika stosowana. WNT, Warszawa 1974.



3. Saad M. A.: Thermodynamic for Engineers. PRENTICE - HALL, INC. Englewood Cliffs, N. J. 1966.
4. Szargut J.: Termodynamika techniczna. PWN, Warszawa 1991.

Recenzent: Dr hab.inż. Joachim Koziół  
Prof. Politechniki Śląskiej

Wpłynęło do Redakcji: 12.05.1998 r.

### **Abstract**

Three possible means of wet vapour adiabatic expansion in a vessel were analysed. They could be realised by flowing out saturation vapour or saturation liquid or both phases simultaneously.

It was proved that only while the third of mentioned expansion means the wet vapour specific entropy was constant. It was proved also that for the first and third expansion means in defined pressure range the quality of wet vapour could have the same value after expansion as before. Such final state named as isoxeric state.

Final wet vapour qualities calculation formulae for each means of expansion were derived. Theoretical considerations were reinforced with numerical example.