

Wykład 9

Przykłady urządzeń USUP:

**wymiennik ciepła, dysza i dyfuzor, dławik gazu,
turbina, sprężarka/pompa, prosta siłownia parowa
chłodziarka sprężarkowa**

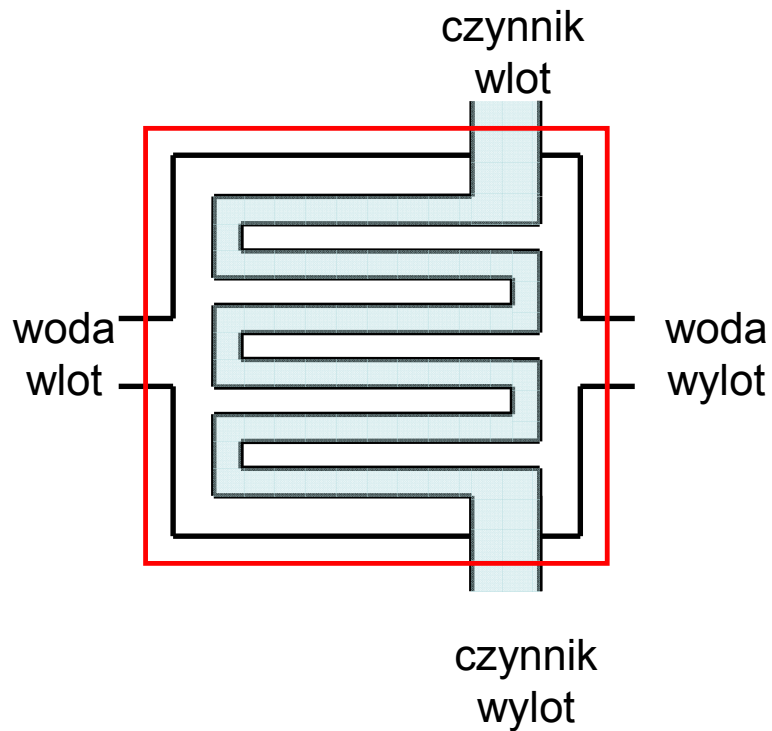
Układy niestacjonarne o nieustalonym przepływie

**Układy częściowo stacjonarne o częściowo
ustalonym przepływie (układy czeSUP)**

I zasada termodynamiki dla układów czeSUP

**Napełnianie (opróżnianie) pustego i częściowo
wypełnionego zbiornika; przykłady**

Wymiennik ciepła



Wymiennik ciepła jest układem typu SUP, który pozwala na podwyższanie lub obniżanie temperatury czynnika roboczego. Czynnik przepływa przez układ rur umożliwiając intensywną wymianę ciepła z otoczeniem za pośrednictwem np. wody lub powietrza. Może wystąpić zmiana fazy czynnika. Na ogół można pominąć zmianę ciśnienia, na ogół do pominięcia są też zmiany energii potencjalnej i kinetycznej. (Uwaga przy dużej zmianie objętości właściwej.) Układ nie wykonuje pracy i nie pobiera ciepła z otoczenia. Dwa strumienie $\dot{W}_e$ i dwa strumienie $\dot{W}_y$.

Równanie z I zasady dla takiego układu SUP:

$$\dot{m}_{cz} \cdot h_{We,cz} + \dot{m}_w \cdot h_{We,w} = \dot{m}_{cz} \cdot h_{Wy,cz} + \dot{m}_w \cdot h_{Wy,w}$$

Przykład

Skrapacz w chłodziarce z czynnikiem chłodniczym R-134a

Płyn chłodzący: R-134a

R-134a W_e : 1,0 MPa, 60°C, 0,2 kg/s

R-134a W_y : 0,95 MPa, 35°C

Woda

W_e : 10°C

W_y : 20°C

Określić strumień wody płynącej przez skraplacz.

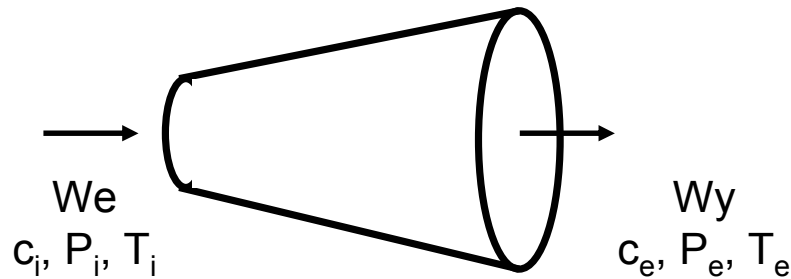
Rozwiązanie. Dla R-134a w temp. 60°C P_{nas} wynosi 1682 kPa (tablice R134a, SBvW), przy niższym ciśnieniu (1,0MPa) mamy parę przegrzaną. Dla 1,0MPa i 60°C mamy z tablic SBvW entalpię właściwą $h_{we,r134a} = 441,89$ kJ/kg. Dla 35°C $P_{nas} = 887,6$ kPa, a więc przy ciśnieniu 0,95MPa mamy na wyjściu sprężony płyn. Bierzemy z tablic wartość entalpii dla płynu nasyconego w temp. 35°C, $h_{wy,134a} = 249,1$ kJ/kg. Dla wody, w temp. 10°C, stan sprężonej cieczy przybliżamy przez stan nasyconej wody, $h_{we,woda} = 41,99$ kJ/kg, $h_{wy,woda} = 83,94$ kJ/kg (z tablic SBvW).

$$\dot{m}_R (h_{We,R} - h_{Wy,R}) = \dot{m}_w (h_{Wy,w} - h_{We,w})$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_R \frac{h_{We,R} - h_{Wy,R}}{h_{Wy,w} - h_{We,w}} = 0,2 \cdot \frac{441,9 - 249,1}{83,9 - 42,0} = 0,2 \cdot 4,6 = 0,92 \text{ kg / s}$$

Podobny wynik uzyskujemy, znacznie łatwiej i szybciej, z programu TEST.

Dysza i dyfuzor



Dysza jest układem typu SUP, który pozwala z silnie sprężonego czynnika o niewielkiej prędkości uzyskać czynnik o niższym ciśnieniu ale o wyższej prędkości. Działanie dyfuzora jest odwrotne.

Dysza może być izolowana (wtedy proces jest adiabatyczny) i układ nie pobiera ciepła. Układ nie wykonuje pracy. Na ogół można zaniedbać zmiany energii potencjalnej czynnika. Często można zaniedbać energię kinetyczną strumienia czynnika na wejściu.

I zasada dla układu SUP przyjmie postać:

$$h_i + \frac{c_i^2}{2} = h_e + \frac{c_e^2}{2}$$

Przykład

Izolowana dysza rozprężająca parę (np. w turbinie parowej)

Para przegrzana na We: 0,6 MPa, 200°C, $c_1=50$ m/s. Na wyjściu dyszy (przed turbiną) mamy parę nasyconą o ciśnieniu 0,15 MPa.

Określ temperaturę i prędkość pary nasyconej na wyjściu.

Rozwiązanie. Stan pary na wejściu jest określony (dwa niezależne parametry). Z tablic SBvW entalpia $h_1 = 2850$ kJ/kg. Przy ciśnieniu pary nasyconej 0,15 MPa, temperatura (z tablic) wyniesie 111,37°C. Dla tej pary entalpia odczytana z tablic, h_2 , wyniesie: 2693,5 kJ/kg. Z I zasady obliczamy prędkość na wyjściu (uwzględniając, że entalpia jest w kJ, a nie w J):

$$c_2 = \sqrt{2000(h_1 - h_2) + c_1^2} = 562 \text{ m / s}$$

Przykład

dysza wylotowa silnika odrzutowego, równanie przepływu spalin



wejście dyszy (komora spalania):
gorący gaz (T_c) o wysokim ciśnieniu i niskiej prędkości

wyjście dyszy:
chłodny gaz (T_e) o niskim ciśnieniu i wysokiej prędkości

Z I zasady:

$$h_e + \frac{c_e^2}{2} = h_c + \frac{c_c^2}{2}$$

Ponieważ: $h = c_p T$ mamy: $c_p T_e + \frac{c_e^2}{2} = c_p T_c + \frac{c_c^2}{2}$ a więc, w przybliżeniu:

$$c_c \approx 0 \qquad c_e = \sqrt{2c_p(T_c - T_e)} = \sqrt{2c_p T_c \left(1 - \frac{T_e}{T_c}\right)}$$

Przyjmując, że rozprężanie jest adiabatyczne mamy:

$$PV^\gamma = \text{const}; \quad V = \text{const} \times \frac{T}{P}; \quad \frac{T^\gamma}{P^{\gamma-1}} = \text{const}; \quad T = \text{const} \times P^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

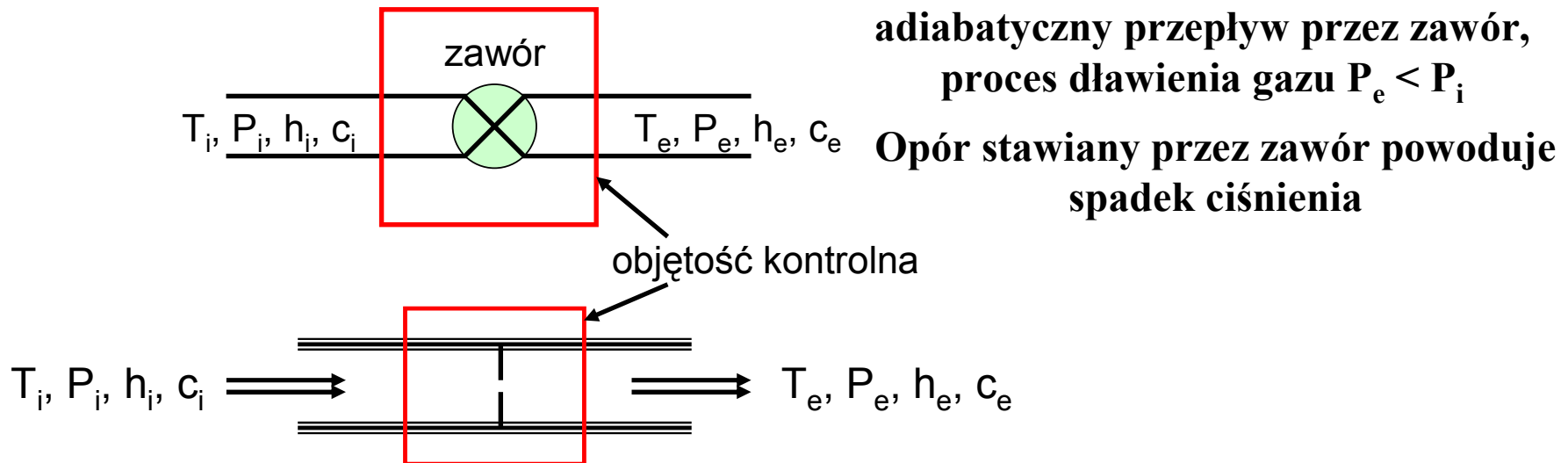
$$\text{skąd:} \quad \frac{T_e}{T_c} = \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{i:}$$

$$c_e = \sqrt{2c_p T_c \left(1 - \frac{T_e}{T_c} \right)} = \sqrt{2c_p T_c \left(1 - \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}$$

gdzie T_c i P_c określają warunki w komorze spalania, zależne od paliwa i technologii, a P_e jest ciśnieniem zewnętrznym.

Dławik gazu

adiabaticzne dławienie gazu (podejście masy kontrolnej w wykładzie 7 i 8)



I zasada dla układu stacjonarnego o ustalonym przepływie (USUP):

$$q + h_i + \frac{c_i^2}{2} + gZ_i = h_e + \frac{c_e^2}{2} + gZ_e + w_t$$

dla dławika (małe prędkości czynnika, brak q i w , niewielkie zmiany energii potencjalnej):

$$h_i = h_e$$

Współczynnik
Joule'a-Thomsona:

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h$$

Przykład

Dławienie pary wodnej

Para wodna o ciśnieniu 800 kPa, 300°C jest dławiona do 200 kPa. Zmiany w energii kinetycznej są zaniedbywalne. Określ temperaturę pary na wyjściu dławika i współczynnik Joule’a-Thomsona.

Z I zasady, $h_1 = h_2$. Ponieważ z tablic wynika, że para jest przegrzana (dla 800 kPa temperatura pary nasyconej wynosi tylko 170.43°C) szukamy h_1 w tablicy pary przegrzanej. $h_1 = 3056.43$ kJ (SBvW). $h_2 = h_1$, zatem szukamy temperatury pary na wyjściu (wiemy, że ciśnienie wynosi 200 kPa). Z tabeli B.1.3. SI (SBvW, str. 672 wynika, że temperatura będzie trochę poniżej 300°C (interpolacja liniowa daje ok. 292°C). Ponieważ ciśnienie spada i temperatura spada, współczynnik J-T będzie dodatni $(8/600) \approx 0,013$ K/kPa.

Korzystając z programu TEST: wprowadzamy stan 1 (800 kPa, 300°C), program wylicza $h_1 = 3056,4$ kJ/kg. Wprowadzamy stan 2 (200 kPa, w okienku h_2 wpisujemy $= h_1$). Program wylicza $T_2 = 292,38^\circ\text{C}$. W panelu I/O wyliczamy wsp. J-T, $(T_2 - T_1)/(P_2 - P_1) = 0,0127$ K/kPa.

Przykład

Dławienie czynnika chłodniczego w obiegu chłodzącym chłodziarki sprężarkowej

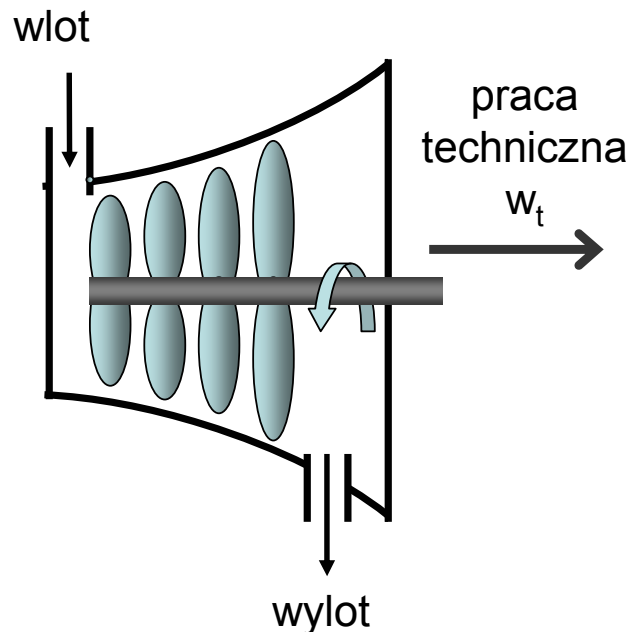
W obiegu chłodzącym sprężony (ale już chłodny) czynnik chłodzący po przejściu przez skraplacz (oddający ciepło z czynnika do otoczenia) w fazie ciekłej przechodzi przez dławik (kapilarę), która obniża ciśnienie czynnika przed wejściem do parownika. W parowniku parujący pod niskim ciśnieniem czynnik odbiera ciepło z objętości chłodzonej. W trakcie procesu dławienia część czynnika może przejść w fazę lotną.

Rozważ następujący proces z amoniakiem, jako czynnikiem chłodniczym.

Amoniak pod ciśnieniem 1,50 MPa, o temperaturze 32°C wchodzi do kapilary. Po wyjściu z kapilary jego ciśnienie wynosi 268 kPa. Oblicz jakość pary (stopień suchości) amoniaku po wyjściu z kapilary.

Program TEST: stan wejściowy (1.5 MPa, 32°C) to stan cieczy sprężonej (lub cieczy przechłodzonej). $h_1 = 332,61$ kJ/kg. Stan końcowy ($h_2 = h_1$, $P_2 = 268$ kPa) to stan pary wilgotnej o temp. -12°C i jakości pary $x = 0,1591$. Rzeczywiście, część czynnika na wyjściu kapilary występuje w fazie lotnej.

UWAGA. Przy korzystaniu z tablic, jeśli nie mamy danych o cieczy sprężonej, możemy przybliżyć stan cieczy sprężonej przez stan cieczy nasyconej (o tej samej temperaturze).



Turbina

Turbiny gazowe (obieg otwarty) i parowe (obieg zamknięty).

Turbiny są układami typu SUP (Stacjonarny Ustalony Przepływ), których celem działania jest wytwarzanie pracy technicznej poprzez wykorzystanie energii zawartej w czynniku termodynamicznym uzyskanej w komorze spalania (turbiny gazowe) lub kotle (turbiny parowe).

Wlot turbiny, sprężony gorący czynnik o niskiej prędkości.

Wylot, chłodny czynnik o niskim ciśnieniu i niskiej prędkości.

Równanie turbiny z I zasady:

$$q + h_i = h_e + w_t$$

Pominięto energię kinetyczną i potencjalną. Obecność q pozwala uwzględnić straty ciepła gorącego czynnika z objętości kontrolnej (obejmującej turbinę).

Dwa procesy pomiędzy wlotem i wylotem:

1. Obniżenie ciśnienia czynnika daje duży wzrost prędkości czynnika (dysze dławiące lub odpowiednio uformowane łopatki wirnika),
2. Energia kinetyczna czynnika przepływającego pomiędzy stojanem, a osadzonym na wale wirnikiem, jest przetwarzana na pracę techniczną.

Przykład

Turbina parowa (podstawa współczesnej energetyki)

Strumień masy na wejściu turbiny parowej wynosi 1,5 kg/s. Straty ciepła w turbinie wynoszą 8,5 kW. Stwierdzono, że na wejściu i wyjściu turbiny para wodna ma następujące parametry:

	We	Wy
ciśnienie	2,0MPa	0,1MPa
temperatura	350°C	–
jakość pary	–	100%
prędkość	50m/s	100m/s
wysokość Z	6m	3m

Określ moc turbiny.

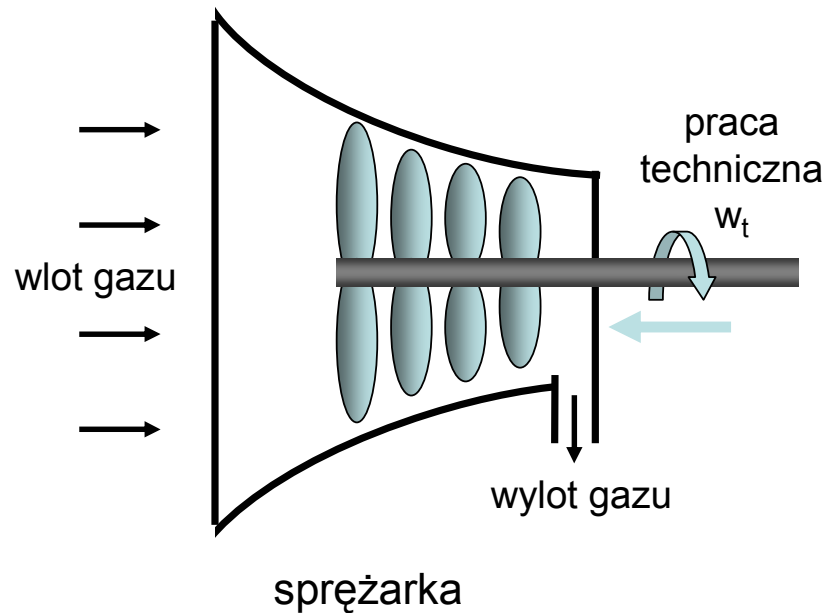
$$\dot{m} \left(q + h_i + \frac{c_i^2}{2} + gZ_i \right) = \dot{m} \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + w_t + gZ_e \right)$$

$$\dot{m}q = -8.5 \text{ kW}$$

Z programu TEST $h_i = 3136,9 \text{ kJ/kg}$, $c_i^2/2 = 1,25 \text{ kJ/kg}$, $gZ_i = 0,059 \text{ kJ/kg}$, $h_e = 2675,5 \text{ kJ/kg}$, $c_e^2/2 = 5 \text{ kJ/kg}$, $gZ_e = 0,029 \text{ kJ/kg}$

$$-8,5 \text{ kW} + 4705,4 \text{ kW} + 1,88 \text{ kW} + 0,09 \text{ kW} - 4013,25 \text{ kW} - 7,5 \text{ kW} - 0,04 \text{ kW} = 678,1 \text{ kW}$$

Sprężarka/pompa



Sprężarki (gaz) i pompy (ciecz) są układami typu SUP (Stacjonarny Ustalony Przepływ), których celem działania jest zwiększenie ciśnienia gazu lub cieczy przy użyciu zewnętrznej pracy technicznej.

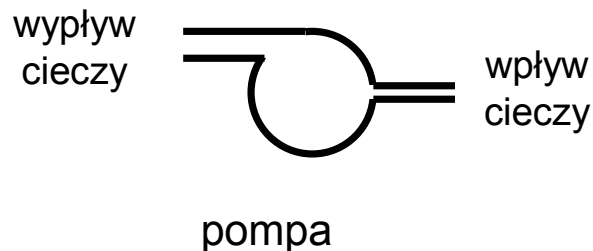
Na ogół w sprężarkach obrotowych (o przepływie osiowym lub osiowo-odśrodkowym) proces sprężania jest adiabatyczny natomiast w konstrukcjach typu cylinder – tłok może być chłodzenie czynnika, które trzeba uwzględnić w bilansie energii.

Bez chłodzenia równanie z I zasady dla sprężarki będzie:

$$h_i = h_e + \frac{c_e^2}{2} + w_t$$

Bez chłodzenia i z pominięciem energii kinetycznej równanie dla pompy będzie:

$$h_i = h_e + w_t$$



Przykład

Powietrzna sprężarka odśrodkowa

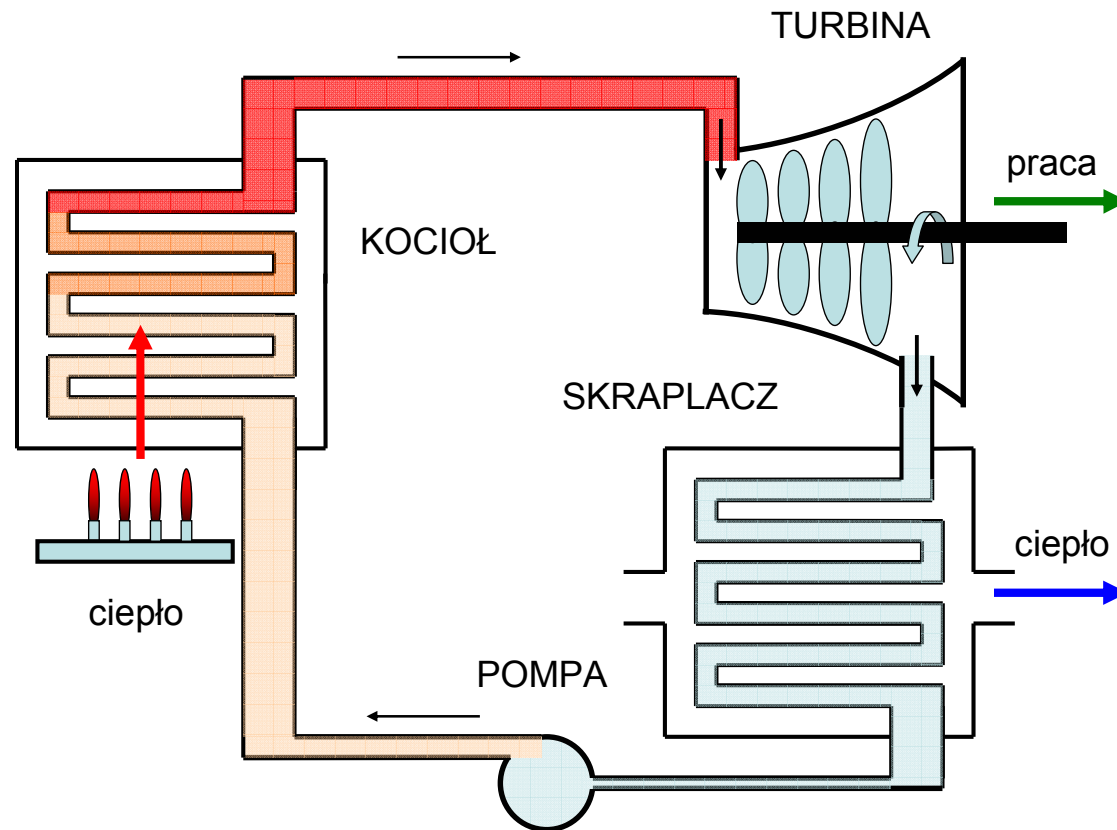
Powietrzna sprężarka odśrodkowa wchodząca w skład turbiny gazowej pobiera powietrze z otoczenia, gdzie ciśnienie wynosi 1 bar a temperatura 300 K. Na wyjściu sprężarki ciśnienie wynosi 4 bary, temperatura 480 K, a prędkość powietrza wynosi 100 m/s. Strumień masy powietrza na wejściu sprężarki wynosi 15 kg/s. Oblicz moc, potrzebną do napędzania tej sprężarki.

$$\dot{m} \left(\cancel{q} + h_i + \cancel{\frac{c_i^2}{2}} + \cancel{gz_i} \right) = \dot{m} \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + w_t + \cancel{gz_e} \right)$$
$$- \dot{m} w_t = \dot{m} \left(h_e - h_i + \frac{c_e^2}{2} \right)$$

Najbardziej dokładne rozwiązanie to wyszukanie w tablicach (A.7, SBvW) entalpii wyliczonej dla gazu doskonałego metodami termodynamiki statystycznej. Różnica wartości $h_e - h_i = (482,8 - 300,5) \text{ kJ/kg}$. Do tego dochodzi energia kinetyczna, $100 \cdot 100 / 2000$ (J na kJ), 5 kJ. Razem 187,3 kJ/kg. Po przemnożeniu przez 15 kg/s otrzymujemy 2809,5 kJ/s czyli ok. 2810 kW.

Trochę mniej dokładne rozwiązanie polega na przybliżeniu, $h_e - h_i = c_p \cdot (T_e - T_i)$, gdzie c_p , ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu dla powietrza w warunkach normalnych (25°C, 100 kPa) bierzemy z tabeli A.5 (SBvW) dla gazu doskonałego (1,004 kJ/kg K). Otrzymujemy $180 \text{ K} \cdot 1,004 + 5 \text{ kJ} = 185,7 \text{ kJ/kg}$. Po przemnożeniu przez strumień masy, 15 kg/s, otrzymujemy 2785,8 kW

Prosta siłownia parowa



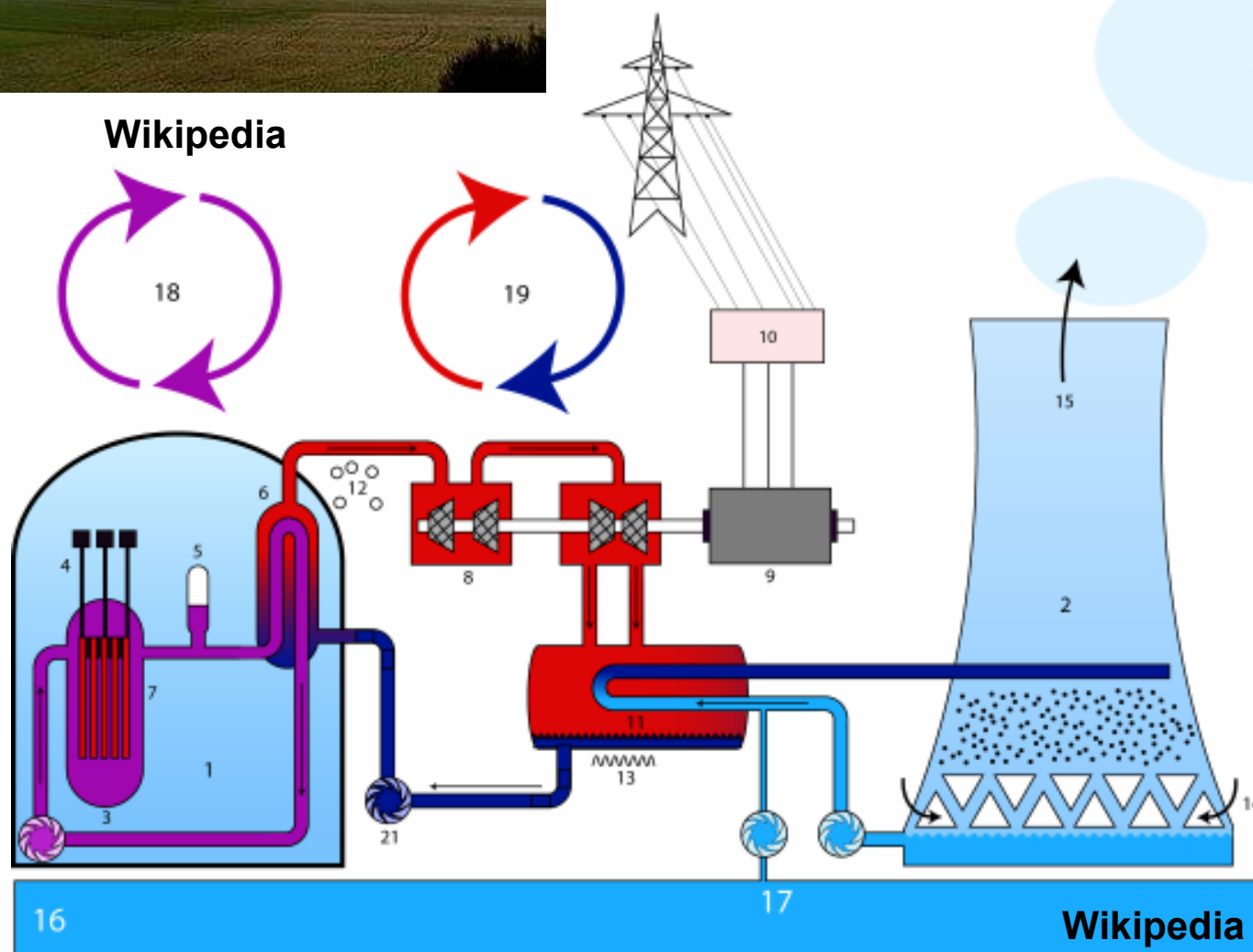
Prosta siłownia parowa składa się z kotła, turbiny, skraplacza i pompy. Pracę wytwarza turbina napędzana rozprężającą się parą otrzymaną w kotle, podgrzewanym zewnętrznym źródłem ciepła (może być reaktor jądrowy). Rozprężona para po kondensacji w skraplaczu, jest pompowana (w formie cieczy) przez pompę z powrotem do kotła.



Elektrownia jądrowa

Cattenom, Francja
4x1300 MW
rocznie – 34 TWh

1. Blok reaktora
2. Komin chłodzący
3. Reaktor
4. Pręty kontrolne
5. Zbiornik wyrównawczy ciśnienia
6. Generator pary
7. Zbiornik paliwa
8. Turbina
9. Prądnic
10. Transformator
11. Skraplacz
12. Stan gazowy
13. Stan ciekły
14. Powietrze
15. Wilgotne powietrze
16. Rzeka
17. Układ chłodzenia
18. I obieg
19. II obieg
20. Para wodna
21. Pompa



Przykład

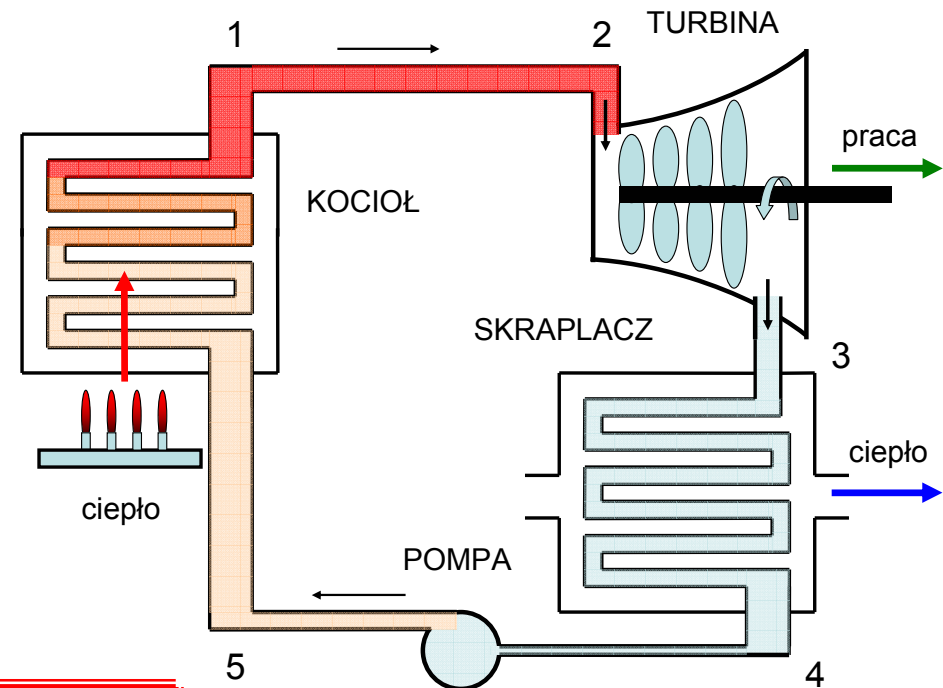
Prosta siłownia parowa

Rozważmy prostą siłownię parową pokazaną na rys. obok.
Stwierdzono, że parametry pary wodnej są następujące:

Punkt	P	T lub x
1	2,0MPa	300°C
2	1,9MPa	290°C
3	15kPa	90%
4	14kPa	45°C
praca pompy		4kJ/kg

Oblicz następujące wielkości na kg masy pary wodnej płynącej przez układ:

1. Straty ciepła w rurze prowadzącej z kotła do turbiny.
2. Pracę turbiny
3. Ciepło oddane w skraplaczu
4. Ciepło pobrane w kotle



Rozwiązanie:

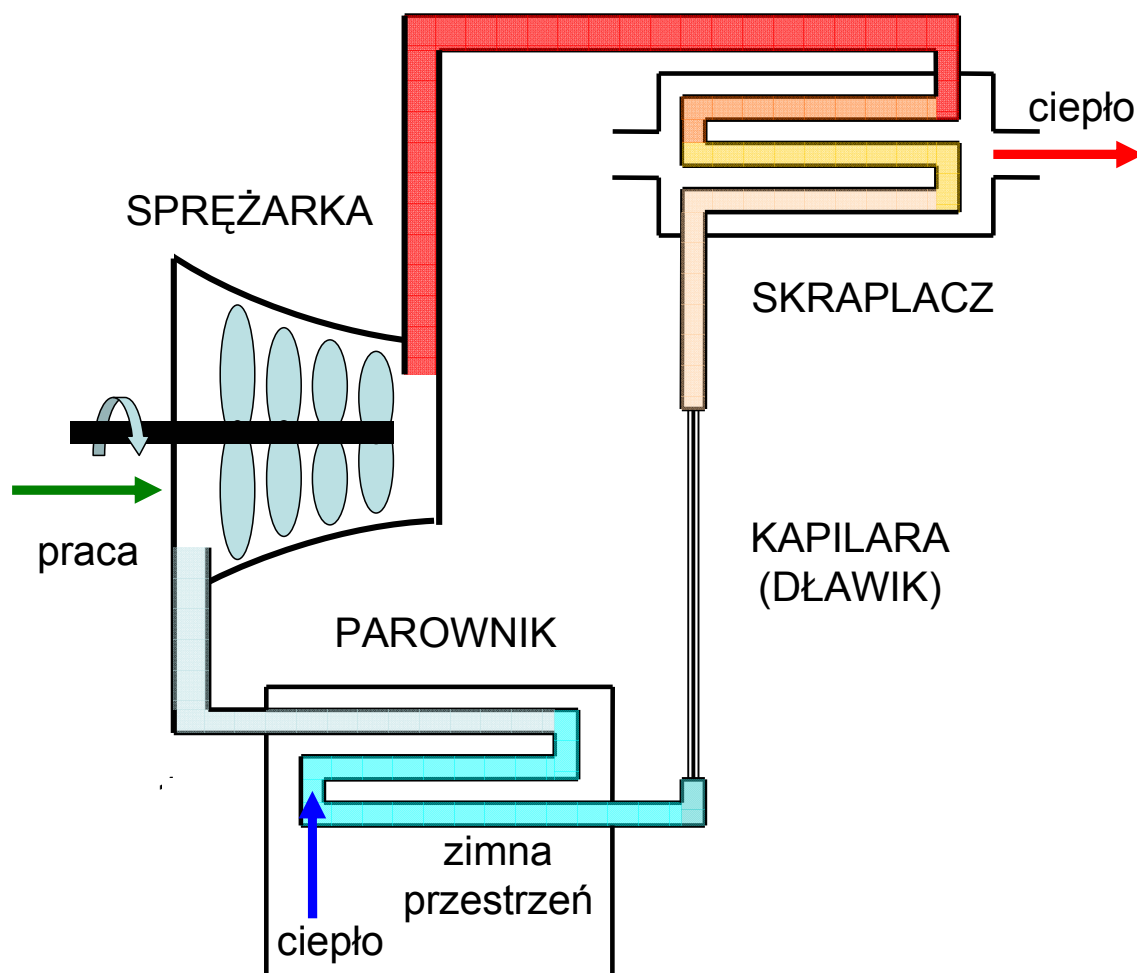
Entalpia w kluczowych lokalizacjach (z programu TEST):

1. para przegrzana, $h_1 = 3023,5 \text{ kJ/kg}$
2. para przegrzana, $h_2 = 3002,4 \text{ kJ/kg}$
3. para wilgotna, $h_3 = 2361,7 \text{ kJ/kg}$
4. sprężona ciecz, $h_4 = 188,5 \text{ kJ/kg}$
5. sprężona ciecz, $h_5 = h_4 + 4 \text{ kJ/kg} = 192,5 \text{ kJ/kg}$

$$\eta = 0,226$$

Z w/w danych obliczamy: straty ciepła 1-2 = 21,1kJ/kg,
praca turbiny 2-3 = 640,7kJ/kg, ciepło 3-4 oddane w
skraplaczu = 2173,2kJ/kg, ciepło pobrane 5-1 = 2831kJ/kg

Chłodziarka sprężarkowa



Sprężarka: sprężenie chłodnej pary do wysokiego ciśnienia i temperatury

Skrapacz: oddanie ciepła do otoczenia; ciepła para staje się parą wilgotną (kończąc na cieczy nasyconej)

Kapilara: obniżenie ciśnienia pary nasyconej wytwarza parę wilgotną o niskiej temperaturze

Parownik: wrzenie i intensywne parowanie z poborem ciepła z zimnej przestrzeni

Ciecz chłodnicza: odpowiednio niska temperatura wrzenia przy niskim ciśnieniu. Pożądana duża wartość ciepła parowania.

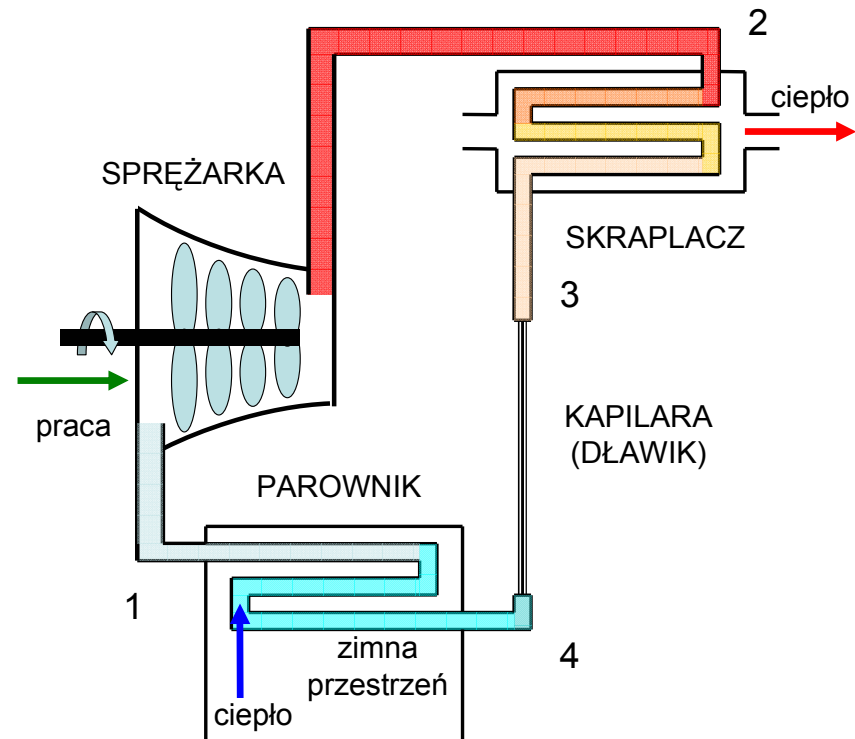
Po sprężeniu w sprężarce para czynnika chłodniczego powinna mieć temperaturę wyższą od temperatury otoczenia

Przykład

Chłodziarka sprężarkowa

Pokazana na rys. obok chłodziarka sprężarkowa używa R-134a jako czynnik chłodniczy. Strumień masy płynący przez wszystkie elementy układu wynosi 0,1 kg/s, a moc pobierana przez sprężarkę wynosi 5,0 kW. Stwierdzono, że parametry czynnika roboczego są następujące:

Punkt	P lub x	T	
1	100kPa	-20°C	zimna para
2	800kPa	50°C	ciepła para
3	0,0	30°C	ciecz nasycona
4	< 1	-25°C	para wilgotna
moc sprężarki		5,0 kW	



Rozwiązanie:

Entalpia (z programu TEST), na 0,1 kg R134a (czyli na 1s):

1. para przegrzana, $H1 = 23,8 \text{ kJ}$
2. para przegrzana, $H2 = 28,6 \text{ kJ}$
3. ciecz nasycona, $H3 = 9,28 \text{ kJ}$
4. para wilgotna, $H4 = 9,28 \text{ kJ}$

$$\eta = 14,52/5 = 2,9$$

Z w/w danych obliczamy: jakość pary w 4, 0,345 (z programu TEST dla stanu 4), moc chłodząca parownika $H1 - H4 = 14,52 \text{ kW}$, ciepło wydane przez sprężarkę $H2 - W - H1 = 4,8 - 5 = -0,2 \text{ kW}$

Oblicz następujące wielkości:

1. Jakość pary na wejściu parownika.
2. Strumień ciepła pobranego przez parownik z zimnej przestrzeni (moc chłodząca)
3. Strumień ciepła oddanego przez sprężarkę

Układy otwarte niestacjonarne o nieustalonym przepływie

Przepływ **nieustalony** (czynnika)
Stan(y) układu **nieustalony(e)** –
układ **niestacjonarny**

Przepływ czynnika **nieustalony**:

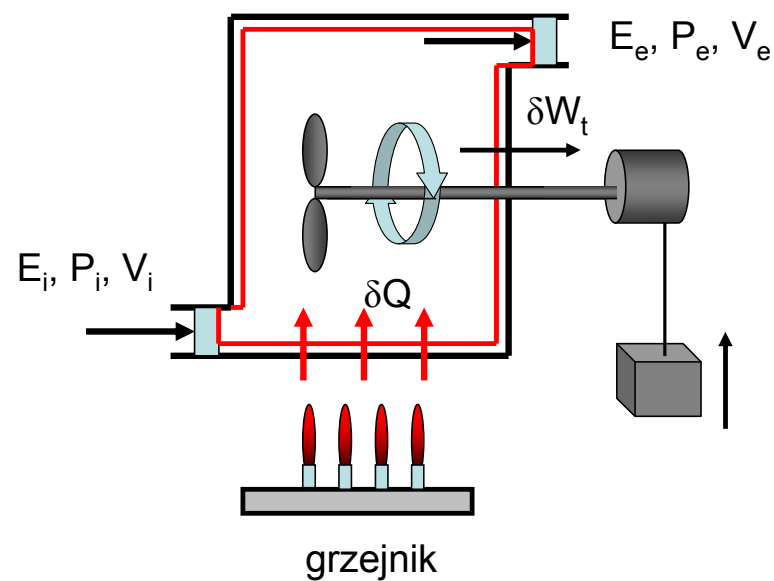
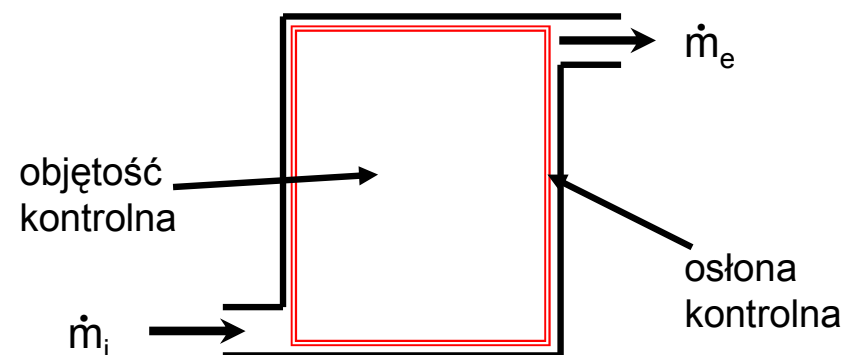
$$\dot{m}_i \neq \text{const}$$

$$\dot{m}_e \neq \text{const}$$

gdzie $\dot{m}_{i(e)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t}$ strumień masy (kg/s)

Stany układu **nieustalone** (energia i
masa zawarte w układzie zmieniają się):

$$\frac{dE_{ok}}{dt} \neq 0 \quad \text{i} \quad \frac{dm_{ok}}{dt} \neq 0$$



Układy otwarte częściowo stacjonarne o częściowo ustalonym przepływie (układy czeSUP)

Co jest ustalone, a co nieustalone w układzie czeSUP?

USTALONE:

- 1) położenie objętości kontrolnej względem układu odniesienia**
- 2) termodynamiczny stan czynnika na wejściu i wyjściu**
- 3) w danej chwili czasu stan czynnika w całej objętości kontrolnej**

MOŻE SIĘ ZMIENIAĆ:

- 1) strumień masy na wejściu i wyjściu**
- 2) Stan termodynamiczny czynnika w objętości kontrolnej (w całej objętości kontrolnej jednocześnie)**

W szczególności może się zmieniać całkowita energia i masa czynnika zawartego w objętości kontrolnej.

Układ składający się z dowolnej liczby układów czeSUP też jest układem czeSUP

I zasada termodynamiki dla układów czeSUP

$$\frac{dm_{ok}}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_e \quad \text{czyli, po scałkowaniu:} \quad \int_1^2 \frac{dm_{ok}}{dt} dt = m_2 - m_1 \quad \text{oraz:}$$

$$\int_1^2 \frac{\delta m_{i(e)}}{dt} dt = m_{i(e)}$$

gdzie 1 i 2 to stany początkowe i końcowe układu, m_1 i m_2 to masa początkowa i końcowa w objętości kontrolnej, $m_{i(e)}$ to masa czynnika który wpłynął (wypłynął) do (z) układu w trakcie procesu $1 \rightarrow 2$.

Ostatecznie mamy:

$$m_2 - m_1 = m_i - m_e$$

**ZASADA ZACHOWANIA
MASY dla objętości
kontrolnej**

ZASADA ZACHOWANIA ENERGII dla objętości kontrolnej

$$\begin{aligned} \frac{dE_{ok}}{dt} = & \dot{Q}_{ok} - \dot{W}_t + \dot{m}_i \left(u_i + P_i v_i + \frac{1}{2} c_i^2 + gZ_i \right) \\ & - \dot{m}_e \left(u_e + P_e v_e + \frac{1}{2} c_e^2 + gZ_e \right) \end{aligned}$$

dla jednego wejścia (inlet) i wyjścia (exit).

Całkując lewą stronę mamy: $\int_1^2 \frac{dE_{ok}}{dt} dt = E_2 - E_1 = m_2 e_2 - m_1 e_1$

i dalej: $m_2 e_2 - m_1 e_1 = m_2 \left(u_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gZ_1 \right)$

Całkując prawą stronę mamy:

$$Q_{ok} - W_t + m_i \left(u_i + P_i v_i + \frac{1}{2} c_i^2 + gZ_i \right) - m_e \left(u_e + P_e v_e + \frac{1}{2} c_e^2 + gZ_e \right)$$

Ostatecznie:

$$m_2 \left(u_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gZ_1 \right) = Q_{ok} - W_t + m_i \left(h_i + \frac{1}{2} c_i^2 + gZ_i \right) - m_e \left(h_e + \frac{1}{2} c_e^2 + gZ_e \right)$$

Napełnianie (opróżnianie) pustego i częściowo wypełnionego zbiornika; przykłady

Przykład (napełnianie parą wodną pustego zbiornika)

Odpompowany zbiornik jest podłączony rurą z zaworem do kotła produkującego parę wodną o temperaturze 300°C i ciśnieniu 1,4 MPa. Po otwarciu zaworu, zbiornik wypełnia się parą wodną do momentu, gdy ciśnienie w zbiorniku osiągnie wartość 1,4 MPa. Zakładamy, że proces zachodzi adiabatycznie i że energię kinetyczną i potencjalną pary na wejściu do zbiornika można pominąć.

Oblicz końcową temperaturę pary wodnej w zbiorniku. Odp. **452°C**.

Rozwiązanie. I zasada termodynamiki sprowadza się do równania:

$$m_2 u_2 = m_i h_i,$$

przy czym

$$m_2 = m_i \text{ a więc } u_2 = h_i.$$

Do programu TEST (kalkulator: states, system, PC model) wpisujemy dla stanu i (stan pary na wejściu) ciśnienie 1.4 MPa i temperaturę 300°C. Program wylicza $h_i = 3040.4$ kJ/kg). Stanu 1 nie potrzebujemy (pusty zbiornik, $m_1 = 0$). Dla stanu 2 (końcowego, para w zbiorniku) wpisujemy ciśnienie 1.4 MPa i $u_2 = 3040.4$. Program wylicza temperaturę **452.1°C**. Rozwiązanie z użyciem tablic; znając h_1 znamy u_2 (3040.4 kJ/kg) i dopasowujemy do tej wartości (i do ciśnienia 1.4 MPa) temperaturę. Konieczna interpolacja.

Przykład (napęlnianie parą wodną częściowo napęlnionego zbiornika)

Zbiornik o pojemności 0.4 m^3 zawiera parę nasyconą o ciśnieniu 350 kPa. Po otwarciu zaworu para z kotła (1.4 MPa, 300°C) wpływa do zbiornika dopóki ciśnienie w zbiorniku nie osiągnie 1.4 MPa.

Oblicz masę pary, która wpłynęła do zbiornika. Odp. **1.264 kg**

Rozwiązanie. Po wpisaniu do programu TEST parametrów pary w zbiorniku (350 kPa, $x = 1$ i $\text{vol1} = 0.4 \text{ m}^3$) program wylicza temperaturę 138.9°C , $u_1 = 2548.9 \text{ kJ/kg}$ i $m_1 = 0.763 \text{ kg}$. Z kolei dla pary z kotła (1.4 MPa, 300°C) otrzymujemy $h_i = 3040.3 \text{ kJ/kg}$.

I zasada termodynamiki sprowadza się do równania:

$m_2 u_2 - m_1 u_1 = m_i h_i$, przy czym $m_2 - m_1 = m_i$. Eliminując m_i otrzymujemy:

$$m_2(u_2 - h_i) = m_1(u_1 - h_i).$$

To równanie musi być spełnione przez parametry m_2 , u_2 , inne wielkości są ustalone. Robimy tak: wpisujemy jako stan 1 stan pary w zbiorniku (350 kPa, $x = 1$, $\text{vol1} = 0.4 \text{ m}^3$). Jako stan 2 wpisujemy stan po napęlnieniu zbiornika. Odgadujemy u_2 , powiedzmy, że zaczniemy od $u_2 = 2800 \text{ kJ/kg}$ (wpisujemy 1.4 MPa, 2800 kJ/kg i $\text{vol2} = \text{vol1}$). Wyliczamy. Uruchamiamy panel I/O. Wpisujemy:

$m_2(u_2 - 3040.3) - m_1(u_1 - 3040.3)$ i wyliczamy. Powinno być 0, jest -143. Przechodzimy do state panel i zmieniamy u_2 na powiedzmy 2900. Wyliczamy. Przechodzimy do panelu I/O.

Wymazujemy wszystko z wyjątkiem samej formuły i znowu ją wyliczamy. Dostajemy kolejne przybliżenia: 2800: -143, 2900: +103, 2850: -13, 2860: +11, 2855: -0.91, 2856: +1.5, 2855.5: +0.3, 2855.4: 0.06. Uznajemy to za dobry wynik. Sprawdzamy w state panel stan 2: $m_2 = 2.027 \text{ kg}$, co daje na m_i **$2.027 - 0.763 = 1.264 \text{ kg}$** .

W oparciu o tablice (bez programu TEST) zadanie należy rozwiązywać stosując interpolację.

Przykład (opróżnianie zbiornika z amoniakiem)

Zbiornik o pojemności 2 m³ zawiera nasycony amoniak o temperaturze 40°C. Początkowo zbiornik zawiera objętościowo 50% cieczy i 50% pary. Odpompowujemy parę (tylko parę!) z górnej części zbiornika do momentu, gdy temperatura w zbiorniku wyniesie 10°C. Przyjmując, że proces jest adiabatyczny, oblicz masę wypompowanego amoniaku. Odp. **72.7 kg**

Rozwiązanie. Po wpisaniu do programu TEST parametrów amoniaku w stanie początkowym w zbiorniku (40°C, $y = 0.5$ (ułamek objętościowy) i $\text{vol1} = 2 \text{ m}^3$) program wylicza masę amoniaku, $m_1 = 591.7 \text{ kg}$ i $u_1 = 388.51 \text{ kJ/kg}$.

Dla 40°C, $x = 1$ (wypompowujemy gaz), $h_{e40} = 1470.2 \text{ kJ/kg}$. Dla temperatury 10°C, $x = 1$, $h_{e10} = 1452 \text{ kJ/kg}$. Różnica jest mała, więc przyjmujemy $h_e = 1461 \text{ kJ/kg}$.

Równanie z I zasady termodynamiki:

$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -m_e h_e$, z zasady zachowania masy $m_e = m_2 - m_1$, eliminując m_e dostaniemy:

$$m_2(h_e - u_2) = m_1(h_e - u_1).$$

Wprowadzamy stan 1 (początkowy w zbiorniku). Wprowadzamy stan 2, 10°C, $\text{vol2} = \text{vol1}$ i próbujemy różnych u_2 . W panelu I/O wprowadzamy wyrażenie $m_2(h_e - u_2) - m_1(h_e - u_1)$ i wyliczamy je (dla dobrego wyboru u_2 powinno wyjść zero).

Najlepsze $u_2 = 238.145 \text{ kJ/kg}$, $m_2 = 519.0 \text{ kg}$

$$591.7 - 519.0 = 72.7 \text{ kg}$$