



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Kierunek studiów:
Elektrotechnika

Agata Kaźmierczyk

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

Podstawy procesów konwersji energii

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23



Spis treści

1. Część teoretyczna	2
1.1. Entalpia, entropia	2
1.2. Podstawowe obiegi termodynamiczne	3
1.3. Sprawność obiegów	4
1.4. Sprawność cieplna obiegu Rankine'a.....	5
1.5. Wykres pary wodnej.....	5
1.6. Podstawowe przemiany pary wodnej	6
1.7. Podstawy teoretyczne obiegu kondensacyjnego elektrowni.....	8
1.8. Sprawność teoretyczna obiegu elektrowni kondensacyjnej.....	9
1.9. Sprawność ogólna elektrowni kondensacyjnej brutto i netto	10
2. Przykładowe zadania.....	11
Literatura.....	28



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Część teoretyczna

1.1. Entalpia, entropia

Entalpia (H) i entropia (S) to fundamentalne wielkości w analizie procesów termodynamicznych, szczególnie w technicznych układach parowych oraz energetycznych.

Entalpia

Entalpia jest funkcją stanu określającą całkowitą energię układu obejmującą energię wewnętrzną oraz pracę objętościową. Definicja entalpii to:

$$H = U + pV \quad (1)$$

gdzie:

- H – entalpia,
- U – energia wewnętrzna,
- p – ciśnienie,
- V – objętość.

Przy przemianach pod stałym ciśnieniem zmiana entalpii równa się wymienionemu ciepłu ($\Delta H = Q_p$). W technice energetycznej (np. w kotłach i turbinach parowych) entalpia pary i wody pobierana jest z tablic parowych na podstawie ciśnienia i temperatury.

Entropia

Entropia jest miarą nieuporządkowania układu i kluczowym wskaźnikiem kierunku procesów termodynamicznych. Zmiana entropii (ΔS) dla odwracalnej przemiany izotermicznej wyraża się wzorem:

$$\Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T} \quad (2)$$

gdzie:

- Q_{rev} – ciepło wymienione w procesie odwracalnym,
- T – temperatura bezwzględna (w Kelwinach).



W bardziej złożonych procesach, dla zmiany temperatury przy cieple właściwym c :

$$\Delta S = m \int_{T_1}^{T_2} \frac{c}{T} dT \quad (3)$$

gdzie:

- m – masa.

Obie wielkości stosuje się do bilansów energetycznych i wyznaczania sprawności cykli cieplnych, np. w analizach układów Rankine'a czy dla obliczeń w elektrowniach parowych. W praktyce korzysta się z tablic i diagramów pary wodnej, gdzie odczytuje się bezpośrednio wartości entalpii i entropii dla zadanych parametrów pary i wody.

1.2. Podstawowe obiegi termodynamiczne

Podstawowe obiegi termodynamiczne wykorzystywane w technice to cykle przemian, w których czynnik roboczy (np. para wodna, powietrze, czynnik chłodniczy) przechodzi przez kolejne etapy, powracając do punktu wyjścia. Pozwalają one analizować pracę urządzeń takich jak silniki cieplne, turbiny czy pompy ciepła.

Najważniejsze obiegi termodynamiczne

- Obieg Carnota: Model idealny składający się z dwóch izoterm (podgrzewanie i schładzanie) oraz dwóch izentrop (rozprężanie i sprężanie). Wyznacza teoretyczną maksymalną sprawność, do której dążą rzeczywiste cykle;
- Obieg Rankine'a: Podstawowy obieg w siłowniach parowych i elektrowniach, złożony z czterech etapów: sprężanie w pompie, podgrzewanie w kotle, rozprężanie w turbinie oraz schładzanie w kondensatorze (skraplaczu). Umożliwia praktyczną generację energii elektrycznej z pary wodnej;
- Obieg Braytona: Wykorzystywany w turbinach gazowych i silnikach odrzutowych; składa się z kompresji powietrza, spalania paliwa, rozprężania w turbinie oraz odprowadzenia spalin;
- Obieg Otto: Podstawowy cykl pracy silnika benzynowego (czterosuwowego), bazujący na sprężaniu adiabatycznym, spalaniu izochorycznym, rozprężaniu adiabatycznym i wydechu;
- Obieg Diesel'a: Dotyczy silników wysokoprężnych, złożony z kompresji adiabatycznej, spalania izobarycznego, rozprężania i wydechu;
- Obiegi chłodnicze (np. Lindego): Lewobieźne cykle, w których czynnik roboczy sprężany jest w sprężarce, schładzany w skraplaczu, rozprężany w zaworze i pochłania ciepło w parowniku. Wykorzystuje się je w pompach ciepła i chłodziarkach.

Obiegi dzielą się na:

- Obiegi prawobieźne (silniki cieplne): Zamieniają ciepło na pracę mechaniczną;
- Obiegi lewobieźne (chłodziarki, pompy ciepła): Transportują ciepło z obszaru o niższej temperaturze do wyższej, wymagając nakładu pracy.



W praktyce ważną rolę odgrywa także regeneracja ciepła oraz stosowanie podgrzewaczy w obiegach technicznych (np. w elektrowniach dla poprawy sprawności Rankine'a).

1.3. Sprawność obiegów

Sprawność obiegów termodynamicznych to stosunek użytecznej pracy lub energii wyjściowej do energii dostarczonej do układu. Określa ona efektywność przemian energetycznych zachodzących w danym cyklu.

Sprawność obiegów cieplnych

- Sprawność obiegu cieplnego (η):

$$\eta = \frac{W_u}{Q_d} \quad (4)$$

gdzie:

- W_u – praca użyteczna wytworzona przez obieg (np. w turbinie);
- Q_d – ciepło dostarczone do układu (np. w kotle);
- Maksymalna sprawność możliwa (obieg Carnota):

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_u}{T_d} \quad (5)$$

gdzie T_u to temperatura odbioru ciepła (zimny zbiornik), a T_d temperatura źródła ciepła (gorący zbiornik) wyrażone w Kelwinach.

Dla obiegu Rankine'a, szczegółowa analiza sprawności opiera się na bilansie energii wokół poszczególnych elementów układu i wykorzystuje entalpie pary i cieczy w odpowiednich punktach obiegu.

Założenia:

- Czynnik roboczy to para wodna;
- h_i – entalpia w stanie i ;
- turbina i pompa mają sprawności η_t i η_p .

Moc użyteczna (praca turbiny):

$$W_t = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (6)$$

- $\dot{m}$ – natężenie przepływu masowego czynnika;
- h_1 – entalpia pary na wejściu do turbiny;



- h_2 – entalpia pary po rozprężaniu w turbinie (wyjściu).

Praca pompy:

$$W_p = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (7)$$

- h_4 – entalpia cieczy po sprężeniu,
- h_3 – entalpia cieczy na wejściu do pompy.

Ciepło dostarczone w kotle:

$$Q_d = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (8)$$

1.4. Sprawność cieplna obiegu Rankine'a

$$\eta = \frac{W_t - W_p}{Q_d} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{m}(h_4 - h_3)}{\dot{m}(h_1 - h_4)} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \quad (9)$$

- W praktyce entalpie h odczytuje się z tablic parowych według punktów charakterystycznych (ciśnienia, temperatury);
- Sprawności turbiny i pompy wpływają na wartość entalpii po rozprężaniu i sprężaniu (częstkowe straty);
- Często uwzględnia się też sprawność kotła i inne straty dla pełnej analizy.

1.5. Wykres pary wodnej

Wykres fazowy pary wodnej przedstawia zależność między ciśnieniem a temperaturą, wskazując różne stany skupienia wody: ciekły, gazowy (para) oraz stały (lód). Kluczowe elementy wykresu to:

- Krzywa nasycenia: Oddziela obszar pary nasyconej od ciekłej. Krzywa ta dzieli wykres na dwie fazy: wodę w stanie ciekłym (po lewej) i parę nasyconą (po prawej);
- Punkt krytyczny: Jest to najwyższy punkt krzywej nasycenia, w którym granice pomiędzy fazą ciekłą a parową zanikają. Powyżej tego punktu występuje para przegrzana;
- Oś pozioma: Reprezentuje temperaturę ($^{\circ}\text{C}$);
- Oś pionowa: Reprezentuje ciśnienie (MPa lub bar).

W obszarze poniżej krzywej nasycenia znajduje się woda ciekła, a powyżej – para przegrzana. Wzdłuż krzywej pary i cieczy następuje przemiana fazowa, czyli wrzenie lub kondensacja.



Wykres ten jest podstawowym narzędziem do analizy i projektowania układów termodynamicznych wykorzystujących parę wodną, np. w obiegach Rankine'a

1.6. Podstawowe przemiany pary wodnej

Para wodna jest najczęściej czynnikiem roboczym w obiegach termodynamicznych elektrowni ciepłych. Ze względu na zmiany stanów skupienia przy parowaniu i skraplaniu czynnik roboczy znajduje się albo w stanie ciekłym jako woda, albo w stanie gazowym jako para, której nie można uważać za gaz doskonały, ponieważ nie spełnia równania gazu doskonałego.

Parę wodną stosuje się powszechnie zarówno w klasycznych elektrowniach ciepłych, jak i w elektrowniach jądrowych, ponieważ ma wiele korzystnych właściwości fizyczno-chemicznych i techniczno-ekonomicznych, a w szczególności charakteryzuje się:

- -znacznym udziałem ciepła parowania w entalpii całkowitej;
- -dużą różnicą objętości pomiędzy parą a cieczą powstałą w wyniku skroplenia tej pary;
- -stałością chemiczną (para nie rozkłada się na pierwiastki składowe: wodór i tlen, w war. roboczych);
- -dostępnością w dużych ilościach małym kosztem.

Zjawiska występujące przy różnych parametrach stanu i w różnych obszarach pary wodnej (w stanie gazowym) oraz wody (w stanie ciekłym) można najłatwiej rozpatrzeć i prześledzić na wykresach charakterystycznych, do których należą przede wszystkim wykresy p, v i T, s . Na obu wykresach poszczególne obszary są oddzielone od siebie linią graniczną, która składa się z dwóch gałęzi: lewej i prawej, połączonych ze sobą w punkcie krytycznym K.

Lewa gałąź linii granicznej łączy ze sobą punkty, w których wskutek doprowadzania ciepła z zewnątrz występuje wrzenie, czyli rozpoczyna się parowanie wody przy określonym ciśnieniu; jest to zatem linia wody wrzącej. Prawa gałąź linii granicznej łączy natomiast punkty, w których odparowywana mieszanina wody wrzącej i pary staje się parą nasyconą suchą, a więc całkowicie pozbawioną wody; jest to więc linia pary nasyconej suchej.

Na lewo od lewej linii granicznej leży obszar cieczy; pomiędzy lewą i prawą linią graniczną znajduje się obszar pary mokrej (wilgotnej), będącej mieszaniną wody wrzącej i pary nasyconej suchej, a na prawo od prawej linii granicznej – obszar pary przegrzanej, której temperatura jest wyższa od temperatury pary nasyconej przy danym ciśnieniu, zwanej temp. nasycenia.



Przy ochładzaniu czynnika, czyli oddawaniu ciepła na zewnątrz, na prawej linii granicznej rozpoczyna się skraplanie pary przy określonym ciśnieniu, a na lewej linii granicznej skraplana para mokra staje się z powrotem wodą wrzącą. Obie gałęzie linii granicznej łączą się ze sobą w punkcie krytycznym.

Na wykresie p,v izobary i izochory są przedstawione za pomocą linii prostych, przy czym izobary przebiegają poziomo, izochory pionowo. Izobara krytyczna przechodzi przez punkt krytyczny.

Na wykresie T,s grupę linii prostych poziomych stanowią izotermy, wśród których wyróżnia się izotermę krytyczną. Izoterma na wykresie p,v jest natomiast krzywą malejącą, przechodzącą przez punkt K. Przy temperaturach znacznie wyższych od temperatury krytycznej przebieg izoterm jest mniej lub bardziej zbliżony do linii hiperbolicznej, która w układzie p,v charakteryzowała izotermę dla gazu doskonałego.

Izoterma podkrytyczna w obszarze pary mokrej pokrywa się z odpowiednią izobarą. Dopiero po przejściu przez linię graniczną $x=1$ izoterma podkrytyczna staje się na wykresie p,v krzywą malejącą. Wynika to z właściwości fizycznych pary mokrej, której odparowywanie następuje przy stałej temperaturze i odpowiednio stałym ciśnieniu, zwanym ciśnieniem nasycenia.

W podobny sposób można przedstawić przebieg izobary podkrytycznej ($p_1 < p_k$) na wykresie T,s . W obszarze cieczy izobara p_1 przebiega nieco powyżej linii $x=0$, ale bardzo blisko. W obszarze pary mokrej izobara p_1 pokrywa się z odpowiednią izotermą. Dopiero po przejściu przez linię $x=1$ izobara podkrytyczna staje się krzywą rosnącą.

Łącząc ze sobą odpowiednie wartości entalpii i oraz entropii s , otrzymuje się nowy układ współrzędnych i,s w którym można przedstawić poszczególne przemiany i obiegi termodynamiczne dla pary wodnej.

Linia graniczna na wykresie i,s przechodzi przez początek układu współrzędnych, ponieważ zakłada się, że $i=0$ przy $s=0$. Punkt krytyczny leży teraz nie na wierzchołku linii granicznej, jak na wykresie T,s lecz poniżej tego wierzchołka, po lewej jego stronie.

Izobary w obszarze pary mokrej pokrywają się z izotermami i stanowią na wykresie i,s grupę linii prostych nierównoległych o różnym nachyleniu zależnym od wartości ciśnienia. Po przejściu przez linię graniczną $x=1$ izobary w obszarze pary przegrzanej zakrzywiają się do góry, a izotermy załamują się na linii granicznej i w obszarze pary przegrzanej zakrzywiają się do poziomu. Linie stałego stopnia suchości x stanowią – podobnie jak na wykresie T,s – pęk linii wychodzących z punktu krytycznego K.

Pozostałe przemiany przedstawia się na wykresach T,s oraz i,s w następujący sposób:



- -izochory v na wykresie T,s są w obszarze pary mokrej wypukłe do góry, a w obszarze pary przegrzanej przebiegają podobnie do izobar, natomiast na wykresie i,s mają znacznie większe nachylenie, czyli w porównaniu z izobarami są bardziej strome i w obszarze pary mokrej nie są liniami prostymi, lecz dla większych wartości stopnia suchości zakrzywiają się do góry;
- -izentropy s są liniami prostymi pionowymi zarówno na wykresie T,s jak i na wykresie i,s ;
- -izentalpy i mają na wykresie T,s przebieg zbliżony do hiperbolicznego, a na wykresie i,s są liniami prostymi poziomymi.

Posługując się wartościami entalpii pary i wody, odczytanymi z tablic i wykresów i,s albo określonymi za pomocą odpowiednich programów komputerowych, można obliczyć ciepło doprowadzane do czynnika roboczego w przemianie izobarycznej oraz pracę techniczną, uzyskiwaną w przemianie izentropowej w obiegu termodynamicznym i na tej podstawie określić sprawność energetyczną przetwarzania energii cieplnej na energię elektryczną w elektrowni parowej.

1.7. Podstawy teoretyczne obiegu kondensacyjnego elektrowni

Podstawy teoretyczne obiegu kondensacyjnego elektrowni parowej opierają się na analizie termodynamicznej procesu przemian czynnika roboczego (pary wodnej) w klasycznym obiegu Clausiusa-Rankine'a.

Elementy i główne przemiany obiegu kondensacyjnego:

- **Kocioł parowy:** para wodna jest podgrzewana i przegrzewana do wysokiego ciśnienia i temperatury;
- **Turbina parowa:** para rozpręża się adiabatycznie (izentropowo) wykonując pracę mechaniczną przy zmniejszeniu ciśnienia do wartości kondensacji;
- **Skraplacz:** para ulega skropleniu (przemiana izobaryczna) do stanu ciekłego;
- **Pompa wody zasilającej:** tłoczy skroploną wodę do ciśnienia kotła (proces adiabatyczny);
- **Generator:** przekształca pracę mechaniczną turbiny na energię elektryczną.

Termodynamiczne aspekty obiegu:

- Para zasilająca turbinę jest przegrzana, co zwiększa efektywność i zmniejsza ryzyko kondensacji wewnątrz turbiny;



- Rozprężanie w turbinie jest czymś zbliżonym do przemiany izentropowej, choć w rzeczywistości występują straty powodujące zmniejszenie sprawności turbiny;
- W skraplaczu następuje kondensacja pary przy stałym ciśnieniu. Ciepło od kondensacji jest odprowadzane do środowiska, co obniża temperaturę wody powracającej do kotła;
- Praca pompy potrzebna do podniesienia ciśnienia wody jest stosunkowo niewielka w porównaniu do pracy generowanej w turbinie.

Sprawność termiczna obiegu kondensacyjnego

Wyznaczana jako stosunek netto pracy użytecznej (turbina minus pompa) do ciepła dostarczonego w kotle:

$$\eta = \frac{W_t - W_p}{Q_d} \quad (10)$$

Przy czym W_t to praca turbiny, W_p to praca pompy, a Q_d to ciepło dostarczone do obiegu.

Wady i zalety obiegu kondensacyjnego

- **Zalety:** wysoka sprawność energetyczna, możliwość wykorzystania pary przegrzanej;
- **Wady:** konieczność oddzielnego systemu chłodzenia do skraplacza, skomplikowana instalacja.

Obieg kondensacyjny jest podstawą pracy większości elektrowni ciepłych i jądrowych, gdzie celem jest maksymalizacja wytwarzanej energii elektrycznej przy minimalizacji strat ciepłych.

1.8. Sprawność teoretyczna obiegu elektrowni kondensacyjnej

Obieg Rankine'a z użyciem pary przegrzanej stosowany jest w elektrowni kondensacyjnej. Jest to obieg, w którym para wodna na wlocie do turbiny (para dolotowa) jest parą przegrzaną, a proces jej rozprężania w turbinie odbywa się częściowo w obszarze pary przegrzanej i tylko częściowo - w końcowej fazie - w obszarze pary mokrej.



Sprawność teoretyczna obiegu kondensacyjnego elektrowni parowej (Rankine'a) jest definiowana jako stosunek netto pracy mechanicznej wykonanej przez turbinę (po odjęciu pracy pompy) do ciepła dostarczonego w kotle.

Formuła tej sprawności to:

$$\eta = \frac{W_t - W_p}{Q_d} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \quad (11)$$

gdzie:

- h_1 – entalpia pary na wejściu do turbiny,
- h_2 – entalpia pary po rozprężaniu w turbinie,
- h_3 – entalpia cieczy po skropleniu w skraplaczu,
- h_4 – entalpia cieczy po sprężeniu w pompie,
- W_t – praca turbiny,
- W_p – praca pompy,
- W_d – ciepło dostarczone do obiegu w kotle.

Sprawność ta ma charakter teoretyczny, opiera się na idealnych warunkach przepływu oraz pełnej regeneracji energii. W praktyce sprawność rzeczywista jest niższa, ze względu na straty ciepła, mechaniczne i hydrauliczne.

Dla poprawy sprawności w elektrowniach kondensacyjnych stosuje się m.in.:

- podwyższanie parametrów pary (ciśnienia, temperatury) na wlocie do turbiny;
- wtórne przegrzewanie pary;
- regeneracyjne podgrzewanie wody zasilającej kocioł;
- obniżanie ciśnienia w skraplaczu.

Te działania pozwalają zbliżyć sprawność rzeczywistą do wartości teoretycznej.

1.9. Sprawność ogólna elektrowni kondensacyjnej brutto i netto

- **Sprawność brutto (ogólna brutto):**

Jest to stosunek całkowitej energii elektrycznej wyprodukowanej przez elektrownię (łącznie z energią zużywaną na potrzeby własne obiektu) do energii chemicznej zawartej w paliwie. Obejmuje ona całą moc generowaną przed odjęciem mocy na potrzeby własne, takie jak napędy pomp, wentylatorów czy systemów sterowania.

- **Sprawność netto (ogólna netto):**

Jest to stosunek energii elektrycznej oddanej do sieci (po odjęciu zużycia na



potrzeby własne elektrowni) do energii pierwotnej zawartej w paliwie. Tę sprawność liczy się jako efektywną zdolność produkcji energii elektrycznej dostępnej dla odbiorców.

$$\eta_{\text{brutto}} = \frac{E_{\text{brutto}}}{Q_p} \cdot 100\% \quad (12)$$

$$\eta_{\text{netto}} = \frac{E_{\text{netto}}}{Q_p} \cdot 100\% \quad (13)$$

gdzie:

- E_{brutto} – całkowita wyprodukowana energia elektryczna,
- E_{netto} – energia elektryczna oddana do sieci po odjęciu potrzeb własnych,
- Q_p – energia chemiczna zawarta w zużytym paliwie.

!!!!!!

- Sprawność netto jest zawsze mniejsza od brutto;
- W praktyce do oceny efektywności energetycznej elektrowni preferuje się używanie sprawności netto, gdyż odzwierciedla ona rzeczywistą energię dostarczaną użytkownikom;
- Zużycie energii na potrzeby własne elektrowni obejmuje m.in. pompy zasilające, wentylatory, oświetlenie i układy sterowania;
- Współczesne elektrownie optymalizują zużycie energii własnej, aby minimalizować różnicę między sprawnościami brutto i netto;
- Emisyjność maleje jeśli wzrasta gładkość powierzchni;
- Emisyjność jest większa dla metali pokrytych tlenkiem w stosunku do metali wypolerowanych

2. Przykładowe zadania

Zadanie 1

Obliczyć promieniowanie pochłonięte przez absorber jeżeli osłonę przezroczystą kolektora stanowi pojedyncza szyba

Dane:

$n_2 = 1,526$ – współczynnik załamania szkła

$n_1 = 1$ – współczynnik załamania w powietrzu

$\alpha = 0,95$ – absorpcyjność absorbera



$d = 4\text{mm}$ – grubość szkła

$K = 20 \text{ 1/m}$ – współczynnik ekstynkcji (wygaszenia promieniowania słonecznego)

$G_b = 550 \text{ W/m}^2$ – promieniowanie bezpośrednie

$G_d = 280 \text{ W/m}^2$ – promieniowanie rozproszone

$\rho_0 = 0,2$ – współczynnik odbicia od podłoża ($\rho_0 = 0,2$ oznacza ziemię porośniętą trawą)

$\theta_\beta = 17,33^\circ$ - kąt padania promieniowania na powierzchnię odbiornika

Rozwiązanie:

Całkowite promieniowanie słoneczne na powierzchnię określone jest wzorem:

$$S = G_b \cdot R_b(\tau\alpha)_{\theta_\beta} + [G_d \cdot R_d + (G_b + G_d) \cdot \rho_0 \cdot R_0] \cdot (\tau\alpha)_{60^\circ} \quad (14)$$

gdzie:

G_b – promieniowania bezpośrednie

G_d – promieniowanie rozproszone

$R_b = 1,127$ – współczynnik korekcyjny dla promieniowania bezpośredniego (współczynnik „widzenia” danej powierzchni bezpośredniego promieniowania słonecznego)

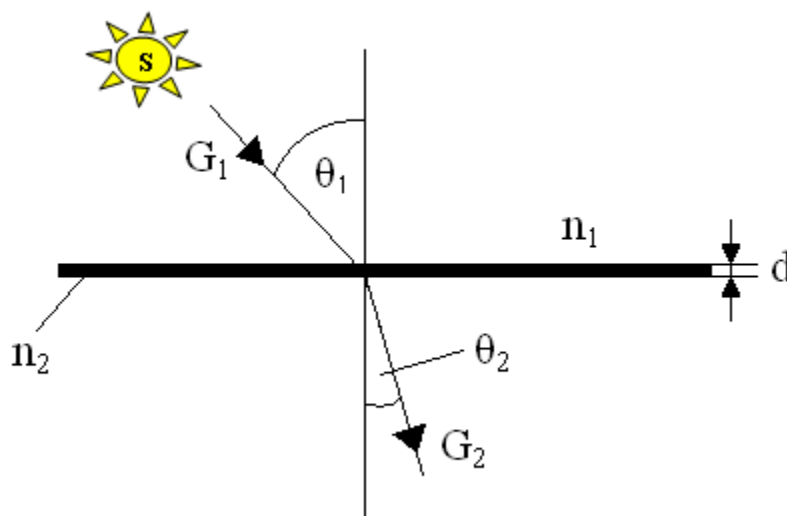
$R_d = 0,933$ – współczynnik korekcyjny dla promieniowania rozproszonego (współczynnik „widzenia” powierzchni kolektora przez promieniowanie rozproszone)

$R_0 = 0,067$ – współczynnik korekcyjny dla promieniowania odbitego

ρ_0 – współczynnik odbicia od podłoża

$\tau\alpha$ - współczynnik transmisyjno- absorpcyjny

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia schemat ilustrujący zjawisko załamania promieniowania słonecznego (światła) w cienkiej warstwie materiału o grubości d i współczynniku załamania n_1 , znajdującej się pomiędzy dwoma innymi ośrodkami o współczynniku załamania n_2 . Z lewej strony rysunku widać słońce jako źródło promieniowania. Promień padający G_1 pod kątem θ_1 przechodzi przez granicę do warstwy n_1 . Następnie, po przejściu przez warstwę o grubości d , promień wychodzi z niej pod kątem θ_2 jako promień G_2 . Wszystkie kąty są mierzone względem prostej prostopadłej do powierzchni warstwy]

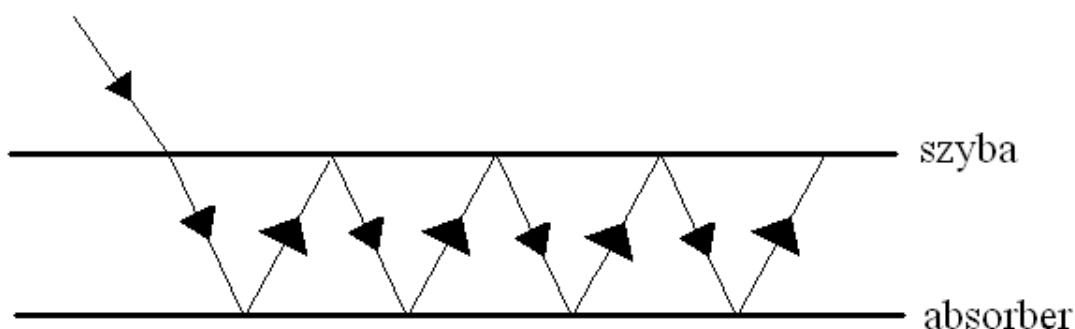


Rys. 1. Rysunek pomocniczy do zadania

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1 \cdot \sin\theta_1}{n_2} \quad (15)$$

$n_1 = 1$ – współczynnik załamania dla powietrza przyjmuje wartość 1

[Tekst alternatywny Rysunek przedstawia promień światła padający na układ składający się z dwóch warstw: górnej oznaczonej jako „szyba” i dolnej jako „absorber”. Po wejściu do środka promień wielokrotnie odbija się pomiędzy szybą a absorberem, zgodnie ze wskazanym kierunkiem strzałek, ilustrując przepływ promieniowania wewnątrz warstw.]



Rys.2. Odbicie wielokrotne na granicy szkło- absorber

Wprowadza się współczynnik wielokrotnego odbicia:



- Prostopadłego

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (16)$$

- Równoległego

$$\rho_{\parallel} = \frac{tg^2(\theta_2 - \theta_1)}{tg^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (17)$$

Współczynnik transmisyjności:

$$\tau_r = \frac{1}{2}(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}) = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \rho_{\perp}}{1 + \rho_{\perp}} + \frac{1 - \rho_{\parallel}}{1 + \rho_{\parallel}} \right) \quad (18)$$

Szyba i absorber pochłaniają część promieniowania dlatego oblicza się współczynnik osłabienia promieniowania na skutek pochłaniania promieniowania przez szybę:

$$\tau_{\alpha} = \exp \frac{-k \cdot d}{\cos(\theta_2)} \quad (19)$$

Transmisyjność całkowita:

$$\tau_{c(60)} = \tau_{\alpha(60)} \cdot \tau_{r(60)} \quad (20)$$

Dla tego samego kąta padania $\theta_1 = 60^\circ$ należy obliczyć współczynnik odbicia dla szyby. Do jego określenia potrzebna jest znajomość współczynnika absorpcji w szybie:

$$\alpha_c = 1 - \tau_{\alpha} \quad (21)$$

zaś współczynnik odbicia wyliczamy:

$$\rho_c = 1 - \tau_c - \alpha_c = \tau_{\alpha} \cdot (1 - \tau_r) \quad (22)$$

Współczynnik transmisyjno-absorpcyjny dla składowej dyfuzyjnej promieniowania obliczony za pomocą poniższego wzoru:



$$\tau\alpha = \frac{\tau_c \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho_c} \quad (23)$$

Zadanie 2

Dla kolektora rozpatrywanego w poprzednim zadaniu (kolektor pochylony pod kątem 30° i skierowany w stronę południa, godz. 10⁴⁵ czasu rzeczywistego słonecznego w dniu 15 czerwca, zlokalizowany w Warszawie $\Phi = 52^\circ\text{N}$, $G_b = 550 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $G_d = 280 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, współczynnik odbicia od podłoża $\rho_o = 0,2$), obliczyć promieniowanie pochłonięte przez absorber S, jeżeli osłonę przezroczystą kolektora stanowi pojedyncza szyba.

Dane: współczynnik załamania szkła $n_2 = 1,526$, grubość szyby $d_c = 4 \text{ mm}$, współczynnik ekstynkcji $K = 20 \text{ m}^{-1}$, absorpcyjność absorbera $\alpha = 0,95$.

W poprzednim zadaniu obliczono kąt padania promieniowania bezpośredniego na kolektor $\theta_B = 18,19^\circ$, wartości współczynników korekcyjnych $R_b = 1,13$, $R_d = 0,93$, $R_o = 0,067$; oraz sumaryczne promieniowanie docierające do zewnętrznej powierzchni kolektora $G_\beta = 893 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Aby określić transmisję przez szybę promieniowania dyfuzyjnego i odbitego, musimy znaleźć współczynnik transmisyjno-absorpcyjny dla kąta padania $\theta_1 = 60^\circ$.

Odpowiadający mu kąt załamania wynosi:

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1 \cdot \sin\theta_1}{n_2} \quad (24)$$

$$n_1 = 1 - \text{współczynnik załamania dla powietrza przyjmuje wartość } 1$$

$$\theta_2 = \arcsin(\sin\theta_2)$$

Stąd współczynniki odbicia od granicy faz szkło-powietrze dla obu składowych spolaryzowanych obliczamy zgodnie z:

$$\rho_\perp = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (25)$$

$$\rho_\parallel = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (26)$$

Transmisyjność wynikająca z wielokrotnych odbić w samej tylko szybie wyniesie:



$$\tau_r = \frac{1}{2}(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}) = \frac{1}{2}\left(\frac{1-\rho_{\perp}}{1+\rho_{\perp}} + \frac{1-\rho_{\parallel}}{1+\rho_{\parallel}}\right) \quad (27)$$

zaś osłabienie promieniowania wskutek pochłaniania w szybie wyniesie:

$$\tau_{\alpha} = \exp \frac{-K \cdot d_c}{\cos \theta_2} \quad (28)$$

a więc transmisyjność całkowita szyby dla kąta padania $\theta_1 = 60^\circ$ będzie równa:

$$\tau_{c(60)} = \tau_{\alpha(60)} \cdot \tau_{r(60)} \quad (29)$$

Dla tego samego kąta padania $\theta_1 = 60^\circ$ należy obliczyć współczynnik odbicia dla szyby. Do jego określenia potrzebna jest znajomość współczynnika absorpcji w szybie:

$$\alpha_c = 1 - \tau_{\alpha} \quad (30)$$

zaś współczynnik odbicia wyliczamy:

$$\rho_c = 1 - \tau_c - \alpha_c = \tau_{\alpha} \cdot (1 - \tau_r) \quad (31)$$

Współczynnik transmisyjno-absorpcyjny dla składowej dyfuzyjnej promieniowania obliczony za pomocą poniższego wzoru:

$$\tau_{\alpha} = \frac{\tau_c \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho_c} \quad (32)$$

Te same obliczenia przeprowadzone dla kąta padania $\theta_1 = 18,19^\circ$ odpowiadającego promieniowaniu bezpośredniemu:

Promieniowanie pochłonięte przez absorber określone poniższym wzorem będzie równe:



$$S = G_b \cdot R_b(\tau\alpha)_\theta + [G_d \cdot R_d + (G_b + G_d) \cdot \rho_0 \cdot R_0] \cdot (\tau\alpha)_{60^\circ} \quad (33)$$

Zadanie 3

Obliczyć promieniowanie słoneczne na płaszczyznę pochyloną pod kątem $\beta = 30^\circ$ względem poziomu i skierowaną w stronę południa o godz. 10⁴⁵ czasu rzeczywistego słonecznego w dniu 15 czerwca ($n = 165$), zlokalizowaną w Warszawie ($\Phi = 52^\circ \text{ N}$).

Jaki będzie średni dzienny współczynnik R_b w tym dniu?

Dane: $G_b = 550 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $G_d = 280 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, współczynnik odbicia od podłoża $\rho_0 = 0,2$.

gdzie:

G_b – gęstość strumienia promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę poziomą [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$];

G_d – gęstość strumienia promieniowania dyfuzyjnego na płaszczyznę poziomą [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$];

ρ_0 – współczynnik refleksyjności podłoża (bezwymiarowy współczynnik odbicia), zależy on od rodzaju podłoża odbijającego.

Deklinacja słoneczna w tym dniu zgodnie z formułą Coopera:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+165}{365}\right) = 23^\circ \quad (34)$$

gdzie:

n - numer kolejnego dnia w roku;

Kąt godzinny dla godziny 10⁴⁵ wynosi:

$$\omega = 15 \cdot (\tau - 12^{00}) = 15 \cdot (10^{45} - 12^{00}) = -1\text{h } 15 \text{ minut} = -18,75^\circ$$

1h - 15°

gdzie:

τ - jest to godzina dnia, dla której chcemy określić ω ;

Odpowiadające tym wartościom cosinusy kątów padania promieniowania bezpośredniego na powierzchnię pochyloną i poziomą:



Pochylona:

$$\cos\theta_B = \cos(\phi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin\delta \quad (35)$$

$$\cos\theta_B = \cos(52 - 30) \cdot \cos(23) \cdot \cos(-18,75) + \sin(52 - 30) \cdot \sin(23) = 0,95$$

$$\theta_B = 18,19^\circ$$

Pozioma:

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta \quad (36)$$

$$\cos\theta_z = \cos(52) \cdot \cos(23) \cdot \cos(-18,75) + \sin(52) \cdot \sin(23) = 0,84$$

$$\theta_z = 33^\circ$$

Współczynniki korekcyjne promieniowania:

R_b – współczynnik korekcyjny uzależnia bezpośrednie promieniowanie słoneczne na powierzchnię dowolnie pochyloną skierowaną od promieniowania bezpośredniego na powierzchnię poziomą. Jest funkcją kąta padania na daną powierzchnię oraz kąta padania na powierzchnię poziomą;

R_d – współczynnik korekcyjny dla promieniowania rozproszonego, będący współczynnikiem „widzenia” niebosłonu przez powierzchnię kolektora;

R_0 – współczynnik korekcyjny dla promieniowania odbitego, będący współczynnikiem „widzenia” płaszczyzny gruntu z powierzchni kolektora;

$$R_b = \frac{\cos\theta_B}{\cos\theta_z} = \frac{0,95}{0,84} = 1,13 \quad (37)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos\beta}{2} = \frac{1 + \cos(30)}{2} = 0,93 \quad (38)$$

$$R_0 = \frac{1 - \cos\beta}{2} = \frac{1 - \cos(30)}{2} = 0,067 \quad (39)$$

Promieniowanie całkowite na powierzchnię pochyloną liczymy zgodnie z poniższym wzorem:

$$G_\beta = G_b \cdot R_b + G_d \cdot R_d + (G_b + G_d) \cdot \rho \cdot R_0 \quad (40)$$



gdzie:

G_b – gęstość strumienia promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę poziomą [$W \cdot m^{-2}$];

G_d – gęstość strumienia promieniowania dyfuzyjnego na płaszczyznę poziomą [$W \cdot m^{-2}$];

R_b – współczynnik korekcyjny dla promieniowania bezpośredniego;

ρ_0 – współczynnik refleksyjności podłoża (bezwymiarowy współczynnik odbicia), zależy on od rodzaju podłoża odbijającego.

Po podstawieniu do wzoru otrzymujemy:

$$G_\beta = 893 [W/m^2]$$

Do obliczenia średniego dziennego współczynnika korekcyjnego R_b dla promieniowania bezpośredniego niezbędna jest znajomość kątów godzinnych wschodu Słońca na powierzchnię poziomą i pochyloną. Znajdujemy je za pomocą wzorów:

$$\omega_{WSCH} = \arccos[-tg\phi \cdot tg\delta] = \arccos[-tg(52) \cdot tg(23)] = -122^\circ \quad (41)$$

$$\omega_{WSCH}^* = \arccos[-tg(\phi - \beta) \cdot tg\delta] = \arccos[-tg(52 - 30) \cdot tg(23)] = -100^\circ \quad (42)$$

Do dalszych obliczeń przyjmujemy kąt wschodu o mniejszej wartości bezwzględnej, czyli kąt wschodu Słońca na kolektor ω_{wsch}^* . Współczynnik korekcyjny średni dzienny dla promieniowania bezpośredniego wyniesie więc:

$$\bar{R}_b = \frac{\sin \omega_{wsch}^* \cdot \cos(\Phi - \beta) \cdot \cos \delta + (\omega_{wsch}^*) \cdot \sin(\Phi - \beta) \cdot \sin \delta}{\sin \omega_{wsch} \cdot \cos \Phi \cdot \cos \delta + (\omega_{wsch}) \cdot \sin \Phi \cdot \sin \delta} \quad (43)$$

$$R_b = \frac{\sin(-100) \cdot \cos(52-30) \cdot \cos(23) + \frac{\pi \cdot (-100)}{180} \cdot \sin(52-30) \cdot \sin(23)}{\sin(-122) \cdot \cos(52) \cdot \cos(23) + \frac{\pi \cdot (-122)}{180} \cdot \sin(52) \cdot \sin(23)} =$$

$$\frac{(-0,98) \cdot 0,93 \cdot 0,92 + (-1,75) \cdot 0,37 \cdot 0,39}{(-0,85) \cdot 0,62 \cdot 0,92 + (-2,13) \cdot 0,79 \cdot 0,39} = 0,96$$

Promieniowanie całkowite na powierzchnię nachyloną zgodnie z warunkami zadania wynosi: $G_\beta = 892 [W/m^2]$, natomiast współczynnik korekcyjny średni dzienny dla promieniowania słonecznego ma wartość równą: $R_b = 0,96$

Zadanie 4

Obliczyć sprawność rzeczywistą $\eta_{tw} = \eta_{rz}$ w podgrzewaczu mieszkankowym przy ciśnieniu p_u , dla parametrów pary podanych niżej, oraz ciśnienia w skraplaczu p_2 . Obliczyć także jednostkowe i godzinowe zużycie pary w turbozespołe jeżeli jego moc wynosi P , o ile wzrasta w porównaniu z układem czysto kondensacyjnym gdzie $\eta_{mg} = 0,96$

Dane:

$$p_1 = 14 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_u = 3 \text{ MPa}$$

$$p_2 = 0,005 \text{ MPa}$$

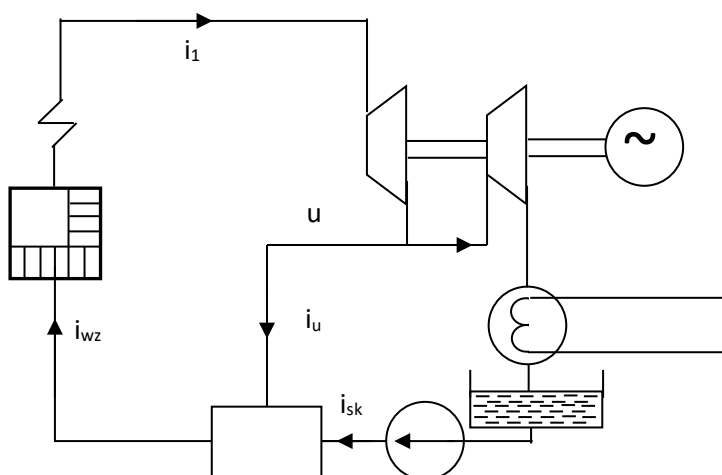
$$\eta_1 = 0,81$$

$$\eta_2 = 0,79$$

$$\eta_{mg} = 0,96$$

$$P = 50 \text{ MW}$$

[Tekst alternatywny Schemat przedstawia układ automatycznej regulacji generatora pary lub turbiny. Po lewej stronie widoczny jest element pomiarowy (np. czujnik lub sterownik), z którego wychodzi sygnał sterujący i_{wz} . Sygnał ten trafia do dalszych bloków, a przez obwód płynie prąd i_1 . Obszar środkowy przedstawia blok regulacyjny mierzący napięcie u oraz prąd i_u , a także prąd sprzężenia zwrotnego i_{sk} z prędkościomierza lub licznika obrotów. Po prawej stronie znajduje się turbozespół ze sprzężonym generatorem oraz element przedstawiający podgrzewany zbiornik wody.]



Rys.3. Schemat elektrowni z regeneracyjnym podgrzewaniem wody zasilającej



Dla ciśnienia p_1 i temperatury t_1 odczytujemy z wykresu $s - i$ wartość entalpii i_1 .

$$i_1 = 3460 \text{ kJ/kg}$$

Przy ciśnieniu upustu odczytujemy entalpie upustu pary.

$$i_{ua} = 3016 \text{ kJ/kg}$$

$$i_u = i_1 - \eta_{wI}(i_1 - i_{ua}) \quad (44)$$

$$i_u = 3460 - 0,81(3460 - 3016) = 3100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Dla obliczonej entalpii upustu $i_u = 3100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ przy ciśnienia upustu $p_u = 3 \text{ MPa}$, odczytujemy z wykresu entalpie na wyjściu z turbiny dla przemiany izotropowej.

$$i_{2a} = 2052 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_2 = i_u - \eta_{w2} \cdot (i_u - i_{2a}) \quad (45)$$

$$i_2 = 3100 - 0,79 \cdot (3100 - 2052) = 2272,08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Należy wyznaczyć entalpię skroplin przy użyciu wykresy $s - i$ dla ciśnienia p_2 .

$$i_{sk} = t_n \cdot c_w = 33 \cdot 4,19 = 138,27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (46)$$

Entalpii wody zasilającej z wykresu nie da się obliczyć, ponieważ stałą w postaci ciepła właściwego wody którą znamy można stosować w zakresie temperatur od 0°C do 150°C , dla tego obliczeń dokonuje się posługując się tabelaryzowanymi danymi.

- entalpia skroplin:

$$i_{sk} = t_n \cdot c_w = 32,89 \cdot 4,19 = 137,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- entalpia wody zasilającej:

$$i_{wz} = 1008,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



Upust pary wyraża się wzorem:

$$u = \frac{i_{w2} - i_{sk}}{i_u - i_{sk}} = \frac{1008,4 - 137,8}{3100 - 137,8} = 0,293 \quad (47)$$

Sprawność rzeczywista układu kondensacyjnego:

$$\eta_k = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{wz}} = \frac{3460 - 2272,08}{3460 - 1008,4} = 0,4845 \quad (48)$$

Sprawność rzeczywista układu upustowego:

$$\eta_u = 1 - \frac{(1-u) \cdot (i_2 - i_{sk})}{(i_1 - i_{wz})} = 1 - \frac{(1-0,293) \cdot (2272,08 - 137,81)}{(3460 - 1008,4)} = 0,385 \quad (49)$$

$$d_k = \frac{3600}{(i_1 - i_2) \cdot \eta_{mg}} = \frac{3600}{(3460 - 2272,08) \cdot 0,96} = 3,1568 \frac{kg}{kWh} \quad (50)$$

$$D_k = P \cdot d_k = 50000000 \cdot 3,1568 = 157,84 \frac{t}{h} \quad (51)$$

Współczynnik niewykorzystania pary upustowej:

$$Y = \frac{i_u - i_2}{i_1 - i_2} = \frac{3100 - 2272,08}{3460 - 2272,08} = 0,6969 \quad (52)$$

$$d_u = \frac{d_k}{1 - Y \cdot u} = \frac{3,1568}{1 - 0,6969 \cdot 0,293} = 3,9668 \frac{kg}{kWh} \quad (53)$$

Godzinowe zużycie pary:

$$D_u = P \cdot d_u = 50000000 \cdot 3,9668 = 198,34 \frac{t}{h} \quad (54)$$

Obliczam o ile należy zwiększyć procentowo zużycie pary:

$$\Delta d = \frac{d_u - d_k}{d_k} \cdot 100 \% = \frac{3,9668 - 3,1568}{3,1568} \cdot 100 \% = 25,65 \% \quad (55)$$

Zadanie 5

Część I



Układ elektrowni kondensacyjnej pracującej według obiegu Rankine'a charakteryzują parametry: $p_1 = 15,5 \text{ MPa}$, $t_1 = 550^\circ\text{C}$, $p_2 = 0,006 \text{ MPa}$.

Obliczyć podstawowe zużycie pary, ciepła i paliwa jeżeli sprawności cząstkowe wynoszą: $\eta_k = 0,89$; $\eta_r = 0,99$; $\eta_w = 0,85$; $\eta_m = 0,97$; $\eta_g = 0,96$. wartość opałowa paliwa $Q_w^v = 21000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$. określić sprawność Wyznaczyć moc generatora jeżeli

natężenie przepływu pary wynosi $D = 28 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$. Określić sprawność elektrowni brutto i netto jeżeli współczynnik zużycia energii na potrzeby własne wynosi: $\varepsilon = 7 \%$.

Obliczyć zużycie paliwa przez kocioł przy danych parametrach pracy układu. Przyjąć entalpię wody zasilającej kocioł. Przyjąć entalpię wody zasilającej kocioł równą entalpii skroplin otrzymywanych w skraplaczu (przy ciśnieniu panującym w skraplaczu). Przedstawić schemat zastępczy układu oraz przebieg przemian na wykresie „s-i” dla powyższego zadania.

Część II

Porównać wartość sprawności netto obiegu obliczanego powyżej ze sprawnością netto układu z międzystopniowym przegrzewaniem pary, dla danych jak powyżej oraz dla ciśnienia $p_m = 3 \text{ MPa}$ i $t_m = t_1$. Przyjąć wartość sprawności wewnętrznej turbiny dla części wysokoprężnej $\eta_{w1} = \eta_w$, natomiast dla części niskoprężnej przyjąć $\eta_{w2} = \eta_w + 0,01$.

Rozwiązanie

Część I

Dla ciśnienia $p_1 = 15,5 \text{ MPa}$ i temperatury $t_1 = 550^\circ\text{C}$ odczytujemy wartość entalpii

$i_1 = 3444 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ następnie równolegle do osi i ciągniemy prostą do przecięcia z

ciśnieniem o wartości $p_2 = 0,006 \text{ MPa}$ i odczytujemy wartość entalpii $i_{2a} = 2012 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Obliczamy wartość entalpii i_2 :

$$\eta_w = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2a}} \quad (56)$$

$$i_2 = i_1 - \eta_w \cdot (i_1 - i_{2a}) \quad (57)$$

$$i_2 = 3444 - 0,85 \cdot (3444 - 2012)$$

$$i_2 = 2226,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



Sprawność teoretyczna obiegu:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_{2a}}{i_1 - i_{sk}} \quad (58)$$

$$i_{sk} = i_{w2} = c_w \cdot t_{w2} = 4,19 \cdot 36,17 = 151,5 \frac{kJ}{kg} \quad (59)$$

$$\eta_t = \frac{3444 - 2226,8}{3444 - 151,5}$$

$$\eta_t = 0,37$$

Sprawność elektrowni brutto wynosi:

$$\eta_{eb} = \eta_k \cdot \eta_r \cdot \eta_t \cdot \eta_w \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (60)$$

$$\eta_{eb} = 0,89 \cdot 0,99 \cdot 0,37 \cdot 0,85 \cdot 0,97 \cdot 0,96$$

$$\eta_{eb} = 0,258$$

Sprawność elektrowni netto wynosi:

$$\eta_{en} = \eta_{eb} \cdot (1 - \varepsilon) \quad (61)$$

$$\eta_{en} = 0,258 \cdot (1 - 0,07)$$

$$\eta_{en} = 0,24$$

Jednostkowe zużycie pary w turbinie:

$$d = \frac{1}{(i_1 - i_2) \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad (62)$$

$$d = \frac{1}{(3444 - 2226,8) \cdot 0,97 \cdot 0,96}$$

$$d = 8,82 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{kJ}$$

po przeliczeniu na $\frac{kg}{kW \cdot h}$ $d = 3,2 \frac{kg}{kW \cdot h}$



Jednostkowe zużycie ciepła w turbinie:

$$q = \frac{1}{\eta_t \cdot \eta_w \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad (63)$$

$$q = \frac{1}{0,37 \cdot 0,85 \cdot 0,97 \cdot 0,96}$$

$$q = 3,41 \frac{kJ}{kJ}$$

po przeliczeniu: $q = 12276 \frac{kJ}{kW \cdot h}$

Jednostkowe zużycie ciepła w paliwie:

$$q_{pal} = \frac{1}{\eta_{eb}} \quad (64)$$

$$q_{pal} = \frac{1}{0,258}$$

$$q_{pal} = 3,876 \frac{kJ}{kJ}$$

po przeliczeniu: $q_{pal} = 13953,6 \frac{kJ}{kW \cdot h}$

Jednostkowe zużycie paliwa:

$$b = \frac{q_{pal}}{Q_w^r} \quad (65)$$

$$b = \frac{13953,6}{21000}$$

$$b = 0,664 \frac{kg}{kW \cdot h}$$

Moc generatora:

$$P_g = D \cdot (i_1 - i_2) \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (66)$$

$$P_g = 28 \cdot (3444 - 2226,8) \cdot 0,97 \cdot 0,96$$



$$P_g = 31736,79 \text{ MW}$$

Z wzoru na sprawność kotła wyznaczmy zużycie paliwa przez kocioł:

$$\eta_k = \frac{D \cdot (i_1 - i_{w2})}{B \cdot Q_w^r} \quad (67)$$

$$B = \frac{D \cdot (i_1 - i_{w2})}{\eta_k \cdot Q_w^r} \quad (68)$$

$$B = \frac{28 \cdot (3444 - 151,5)}{0,89 \cdot 21000}$$

$$B = 4,93 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Część II

Z wykresu odczytujemy wartość entalpii i_1 dla ciśnienia $p_1 = 15,5 \text{ MPa}$, i temperatury $t_1 = 550^\circ\text{C}$, $i_1 = 3444 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, odczytujemy wartość entalpii i_{ma} , dla $p_m = 3 \text{ MPa}$,

$$i_{ma} = 2976 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Obliczamy wartość entalpii i_{m2} :

$$i_{m2} = i_1 - \eta_{w1} \cdot (i_1 - i_{ma}) \quad (69)$$

$$i_{m2} = 3444 - 0,85 \cdot (3444 - 2976)$$

$$i_{m2} = 3046,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Odczytujemy wartość entalpii i_m dla $p_m = 3 \text{ MPa}$, i $t_m = t_1 = 550^\circ\text{C}$, $i_m = 3576 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

odczytujemy wartość entalpii i_{2a} dla $p_2 = 0,006 \text{ MPa}$, $i_{2a} = 2276 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Obliczyć wartość entalpii i_2 :

$$i_2 = i_m - \eta_{w2} \cdot (i_m - i_{2a}) \quad (70)$$

$$i_2 = 3576 - 0,86 \cdot (3576 - 2276)$$



$$i_2 = 2458 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta i_m = i_m - i_{m2}$$

$$\Delta i_m = 3576 - 3046,2$$

$$\Delta i_m = 529 \frac{kJ}{kg}$$

Wyznaczyć sprawność teoretyczną:

$$\eta'_t = \frac{i_1 - i_{2a} + \Delta i_m}{i_1 - i_{wz} + \Delta i_m} \quad (71)$$

$$\eta'_t = \frac{3444 - 2458 + 529}{3444 - 151,5 - 529}$$

$$\eta'_t = 0,396$$

sprawność elektrowni brutto:

$$\eta_{eb} = \eta_k \cdot \eta_r \cdot \eta'_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (72)$$

$$\eta_{eb} = 0,89 \cdot 0,99 \cdot 0,396 \cdot 0,85 \cdot 0,97 \cdot 0,96$$

$$\eta_{eb} = 0,276$$

Sprawność elektrowni netto:

$$\eta_{en} = \eta_{eb} \cdot (1 - \varepsilon) \quad (73)$$

$$\eta_{en} = 0,276 \cdot (1 - 0,07)$$

$$\eta_{en} = 0,257$$

Sprawność elektrowni z międzystopniowym przegrzewaniem pary jest większa niż sprawność elektrowni pracującej według obiegu Rankine'a.



Literatura

1. Chmielniak T.: Technologie energetyczne. WNT, Warszawa 2016.
2. Marecki J.: Podstawy przemian energetycznych, WNT, Warszawa 2018.
3. Szafran R.: Podstawy procesów energetycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
4. Szargut J.: Termodynamika. PWN, Warszawa 2010.
5. Wiśniewski S.: Termodynamika techniczna, WNT, Warszawa 2005.