

# Metodyka termodynamicznej i ekonomicznej analizy hierarchicznych, dwuobiegowych gazowo-gazowych elektrowni i elektrociepłowni jądrowych z wysokotemperaturowymi reaktorami i helem jako czynnikiem obiegowym

## Spis treści

3.1. Wprowadzenie . . . . .	23	3.2.2. Metodyka doboru optymalnych parametrów termicznych czynnika obiegowego w poszczególnych punktach obiegu Joule'a . . . . .	33
3.2. Wybrane zagadnienia optymalizacji obiegu Joule'a . . . . .	30	3.2.3. Wyniki obliczeń termodynamicznych . . . . .	39
3.2.1. Ustalenie związków pomiędzy ciśnieniami gwarantującymi maksymalną sprawność energetyczną obiegu Joule'a z dwustopniowym rozprężaniem i dwustopniowym sprężaniem . . . . .	30	3.3. Jednostkowe koszty produkcji energii elektrycznej i ciepła . . . . .	50
		3.4. Podsumowanie i wnioski końcowe . . . . .	53

## 3.1. Wprowadzenie

Celem rozdziału jest przedstawienie analizy termodynamicznej i ekonomicznej innowacyjnych elektrowni i elektrociepłowni jądrowych – rysunki 3.1, 3.4, 3.6 i 3.9 – w których realizowane są w układzie hierarchicznym dwa obiegi Joule'a [10, 11, 12] – jeden w zakresie temperatur wysokich, drugi niskich.

Stosowanie w hierarchicznych układach gazowo-gazowych wysokotemperaturowych reaktorów HTGR i helu jako czynnika obiegowego pozwala istotnie zmniejszyć koszty ich działania w porównaniu z hierarchicznymi układami gazowo-gazowymi wykorzystującymi turbiny gazowe. Wynika to z użycia helu, który ma bardzo dobre właściwości odprowadzania ciepła w porównaniu ze spalinami i powietrzem, które są czynnikami obiegowymi w układach z turbinami gazowymi. Pojemność cieplna właściwa helu przy stałym ciśnieniu wynosi bowiem  $c_{p,He} = 5,234 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , natomiast dla spalin w turbinie gazowej jest w przybliżeniu równa pojemności cieplnej powietrza i wynosi zaledwie  $c_{p,sp} \approx c_{p,pow} \approx 1,0 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ .

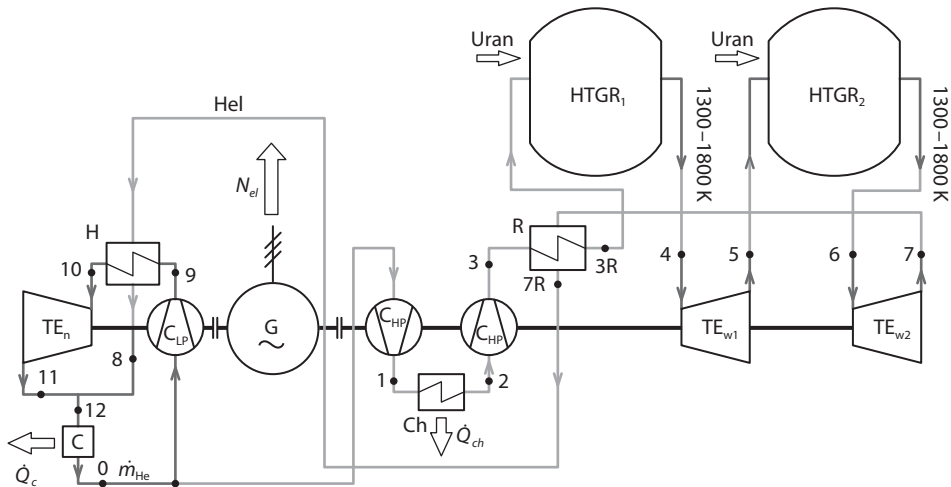
Pojemność cieplna helu jest zatem 5 razy większa. Dzięki temu strumień masy helu w układach z turboekspanderami „helowymi” – rysunki 3.1, 3.4, 3.6, 3.9 – przy takich samych mocach jak układów z turbiną gazową i niskotemperaturowym turboekspanderem „powietrznym” jest ponad 5 razy mniejszy. Tym samym i gabaryty turboekspanderów „helowych” (oraz wszystkich pozostałych maszyn i urządzeń) są wielokrotnie mniejsze od gabarytów turbiny gazowej i niskotemperaturowego turboekspandera „powietrznego”, co przekłada się na mniejsze jednostkowe (na jednostkę mocy) nakłady inwestycyjne na elektrownie, których schematy przedstawiono na wspomnianych rysunkach. Nakłady te w jeszcze większym stopniu są mniejsze od nakładów na konwencjonalne, tj. jednoobiegowe, elektrownie jądrowe, w których realizowany jest obieg Clausiusa–Rankine’a. Należy przy tym dodatkowo bardzo mocno zaznaczyć, że hierarchiczny układ gazowo-gazowy nie wymaga wody, co jest ogromną jego zaletą, a zatem można go budować na terenach, gdzie jej nie ma. „Odpadają” zatem, co szalenie ważne, bardzo istotne problemy związane z gospodarką wodną, które mają miejsce w elektrowniach Clausiusa–Rankine’a, i dotyczące tego koszty eksploatacyjne. W konsekwencji obok istotnie mniejszych nakładów inwestycyjnych i koszty eksploatacji gazowo-gazowej elektrowni jądrowej są istotnie mniejsze. Tym samym także jednostkowy koszt produkcji energii elektrycznej jest w tym przypadku również znacząco mniejszy. Należy również zaznaczyć, że reaktory helowe są strukturalnie bezpieczne. Na przykład, w przypadku awarii reaktora nie wystąpi problem wybuchu wodoru powstającego w procesie radiolizy wody w reaktorach chłodzonych nie helem, a wodą.

W rozdziale przeanalizowano 4 układy gazowo-gazowe, których schematy są przedstawione na rysunkach 3.1, 3.4, 3.6 i 3.9. Układy te w praktyce wyczerpują wszystkie możliwe warianty elektrowni i elektrociepłowni jądrowych z wysokotemperaturowymi reaktorami i helem jako czynnikiem obiegowym. Wszelkie bowiem ich modyfikacje, na przykład przez zastosowanie regeneracji ciepła w obiegu Joule’a turboekspandera niskotemperaturowego, którego moc jest relatywnie mała w porównaniu z turboekspanderem wysokotemperaturowym, nie ma uzasadnienia termodynamicznego i przede wszystkim ekonomicznego [10, 11].

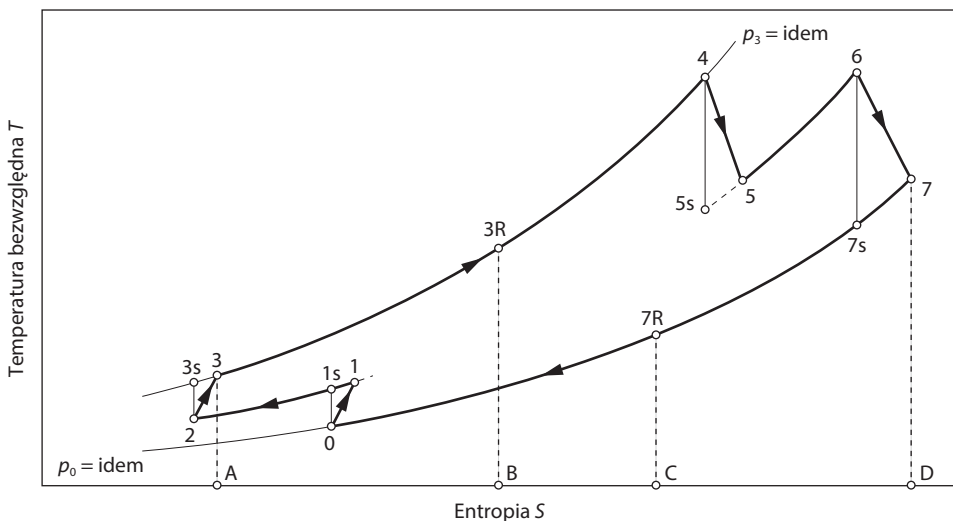
**Wariant I** – układ z dwoma reaktorami HTGR i z regeneracyjnym wymiennikiem ciepła R oraz chłodnicą międzystopniową Ch – rysunki 3.1 i 3.2.

Obieg Joule’a turboekspandera niskotemperaturowego z jednostopniowym rozprężaniem i jednostopniowym sprężaniem przedstawiono na rysunku 3.3.

**Wariant II** – układ z dwoma reaktorami HTGR bez regeneracyjnego wymiennika ciepła – rysunki 3.4 i 3.5.



**Rysunek 3.1.** Schemat ideowy hierarchicznej gazowo-gazowej elektrociepłowni i elektrowni jądrowej z dwoma wysokotemperaturowymi reaktorami i heliem jako czynnikiem obiegowym (w obiegu wysokotemperaturowym ma miejsce dwustopniowe rozprężanie i dwustopniowe sprężanie; w obiegu niskotemperaturowym zachodzi jednostopniowe rozprężanie i jednostopniowe sprężanie): C – wymiennik ciepłowniczy;  $C_{HP}$  – dwustopniowa sprężarka wysokociśnieniowa z chłodziwą międzystopniową Ch;  $C_{LP}$  – sprężarka niskociśnieniowa; G – generator elektryczny; HTGR – wysokotemperaturowy reaktor jądrowy chłodzony heliem; H – wymiennik ciepła; R – regeneracyjny wymiennik ciepła;  $TE_w$ ,  $TE_n$  – turbosprężarki wysoko- i niskociśnieniowe (w przypadku elektrowni strumień ciepła  $\dot{Q}_c$  jest wyprowadzany nie do sieci ciepłowniczej, a do otoczenia)



**Rysunek 3.2.** Obieg Joule'a turbosprężarki wysokotemperaturowej z dwustopniowym rozprężaniem i dwustopniowym sprężaniem oraz z regeneracją ciepła (ciepło regeneracji obrazują pola pod izobarami, przy czym pole A-3-3R-B równa się polu C-7R-7-D)