

Nierównowagowe przemiany fazowe

Wprowadzenie

Substancje takie jak woda, powietrze, spaliny, czy też para wodna, kiedy zostaną skierowane przez człowieka do urządzenia przepływowego stają się czynnikiem roboczym. Są one bardzo chętnie używanymi nośnikami energii w maszynach przepływowych jako płyny robocze, w oparciu o które pracują silniki cieplne i mechaniczne, a także maszyny i urządzenia energetyczne. Na szczególną uwagę zasługuje tutaj para wodna, która jako substancja energetyczna jest przedmiotem zainteresowań wielu gałęzi nauki i techniki na całym świecie [5,10].

W maszynach i urządzeniach, podczas ich pracy, mogą zachodzić przemiany fazowe czynnika roboczego, w wyniku zmiany podstawowych parametrów takich jak: temperatura, ciśnienie, czy też objętość. Z fizycznego punktu widzenia przemiana fazowa jest zjawiskiem, w którym faza macierzysta pod wpływem bodźców zewnętrznych przechodzi w nową fazę. Jeśli fazą macierzystą jest, na przykład, woda, a nową jest para wodna, to przemianę taką nazywamy parowaniem (z powierzchni rozdziału) lub wrzeniem (w całej objętości). Inne przemiany zachodzące w objętości wody to kawitacja, odparowanie rozprężne (flashing) i super-kawitacja. Gdy faza macierzysta jest parą, a nową fazą jest ciecz, to mówimy o skraplaniu (na powierzchni) lub kondensacji (w objętości) [18].

Do najciekawszych przemian indukowanych „naprężeniowo” wody i pary wodnej, zachodzących w maszynach przepływowych, należą: flashing i kondensacja. Zjawiskiem nierównowagowym występującym w pompie jest spontaniczne wrzenie występujące jako kawitacja [ciecz zimna] lub flashing [ciecz gorąca]. Polega ono na tym, że stan przegrzania wody osiąga się bez doprowadzania ciepła z zewnątrz, a jedynie przez dwa czynniki: ekspansję przy stałym ciśnieniu lub dekompresję przy stałej objętości. Ekspansja możliwa jest nawet dla cieczy nieściśliwej, jaką jest woda i polega na nagłym zwiększaniu objętości właściwej wody. Woda kawituje wtedy tworząc jakby pęknięcia wewnątrz, w których trudno będzie zachować to samo, co na zewnątrz ciśnienie. Podobny metastabilny stan wody otrzymamy przez nagłą dekompresję wody polegającą na obniżeniu ciśnienia poniżej ciśnienia nasycenia, jednakże przy stałej objętości. W rzeczywistych przepływach obie te przyczyny, ekspansja i dekompresja, występują razem w miejscach zerwania strug, nieciągłościach geometrii kanału itp. tworząc warunki inicjacji nowej fazy [19]. Kawitacja rozumiana jest jako rozerwania zimnej cieczy na zarodkach, natomiast flashing, występujący w wymiennikach regeneracyjnych, to spontaniczne odparowanie gorącego kondensatu powodowane lokalną obniżką ciśnienia poniżej ciśnienia nasycenia [18].

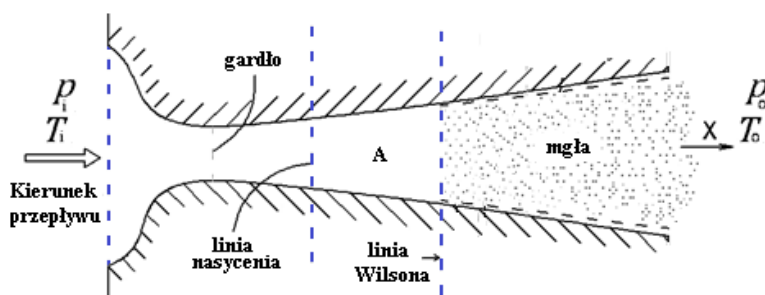
W przypadku przemian fazowych, zachodzących w metastabilnych obszarach wody i indukowanych naprężeniowo (w przypadku flashingu i kondensacji), przepływ w kanale traktowany jest adiabatycznie. Silne zmienia się natomiast temperatura nasycenia, która jest funkcją ciśnienia [20].

Jeżeli chodzi o opis matematyczny, to kondensację możemy podzielić ze względu na równowagę faz na: równowagową (*equilibrium*), w której fazy znajdują się w równowadze i nie są od siebie oddzielone powierzchniami międzyfazowymi; i nierównowagową (*non-equilibrium*), w której faza ciekła i faza pary są wyraźnie rozdzielone powierzchniami międzyfazowymi [6]. Ze względu na zarodkia kondensacji możemy ją podzielić na: homogeniczną, w której kondensacja zachodzi na naturalnie wytworzonych ośrodkach kondensacji (para jest wolna od wszelakich zanieczyszczeń) [5]; i heterogoniczną, w której kondensacja zachodzi na sztucznych (obcych) zarodkach, którymi są między innymi zanieczyszczenia, sole, czy produkty korozji [2, 6].

¹ S. Kornet – Instytut Maszyn Przepływowych, Zakład Konwersji Energii, Gdańsk. E: skornet@imp.gda.pl

² J. Badur – Instytut Maszyn Przepływowych, Zakład Konwersji Energii, Gdańsk.

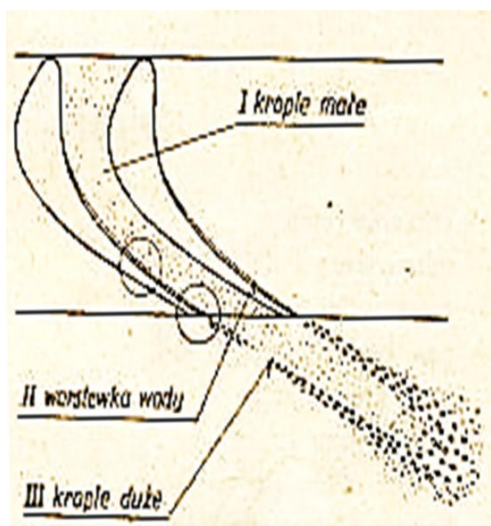
Przestrzeń międzyłatkowa wieńca kadłuba turbiny parowej najczęściej przypomina kształt zakrzywionej dyszy de Laval, która służy do zwiększania prędkości płynu i uzyskiwania przepływów naddźwiękowych. Tuż za gardłem dyszy para wodna posiada tzw. parametry krytyczne, które najczęściej odpowiadają punktowi geometrycznemu, na wykresie $p-v$ i $T-s$, poniżej linii nasycenia. Jednakże w tym miejscu nie wydzielają się jeszcze kropelki kondensatu. Początek obszaru pary mokrej określa linia Wilsona, po której przekroczeniu z pary wydzielają się lawinowo duże ilości małych kropelek ciecchy. Zjawisko takie nazywane jest spontaniczną kondensacją. Pomiędzy linią nasycenia i linią Wilsona znajduje się obszar (oznaczony literą A na rysunku 1), w którym para wodna jest w stanie metastabilnym.



Rys. 1. Zjawisko spontanicznej kondensacji w dyszy de Laval.

Para mokra w turbinach parowych została zastąpiona parą przegrzaną, co znacznie poprawiło jej sprawność. Jednakże dominująca liczba kondensacyjnych turbin parowych wielkiej mocy posiada część niskoprężną (NP) pracującą w parze wilgotnej, dlatego też zjawisko kondensacji i jej wpływ na parametry przepływu stanowi główny problem przepływowy w badaniach związanych z dwufazowością przepływu w stopniu turbiny. Najbardziej niekorzystnym zjawiskiem, towarzyszącym spontanicznej kondensacji w części NP jest erozja łopatek wirnikowych powodowana uderzeniami kropeł zarówno pierwotnych, jak i wtórnych [5, 10]. W literaturze brak jest współczesnej weryfikacji tych klasycznych założeń oraz numerycznego i pomiarowego potwierdzenia roli hetero- i homogenicznej kondensacji. Dodatkowo, przy częściowych obciążeniach turbiny, może na krawędziach spływowych ostatniego stopnia wystąpić korozja naprężeniowa powodowana wtórnym przepływem mokrej pary w okolicach stopy [7].

Generalnie, w ostatnich stopniach turbiny kondensacyjnej dużej mocy można wyróżnić trzy podstawowe formy fazy ciekłej (rysunek 2). Pierwsza forma, to drobnokropelkowa para powstała w wyniku procesu kondensacji. Druga forma, to separująca się na powierzchniach obmywanych łopatek warstewka ciecchy, która zostaje rozdrobniona tworząc trzecią formę – grubokropelkową strukturę wody. Nas interesuje pierwsza forma, która podczas modelowania spontanicznej kondensacji, napotyka na problemy takie jak: zlokalizowanie miejsca początku obszaru kondensacji (wyznaczenie linii Wilsona), wyznaczeniu intensywności nukleacji kondensacji oraz tempa wzrostu kropeł pierwotnych [4].



Rys. 2. Trzy formy fazy ciekłej w śladzie aerodynamicznym [4].

Poznanie zjawiska przepływów dwufazowych może doprowadzić do rozwiązania problemów związanych z: niską sprawnością stopnia turbin pracujących w parze wilgotnej oraz erozją łopatek wirników, co przyczyni się do wydłużenia czasu eksploatacji, zmniejszenia kosztów napraw i zwiększenia wydajności.

Sposoby modelowania przepływu pary idealnej i pary dwufazowej

Trzy podstawowe równania bilansu (zachowania) przepływu są takie same zarówno dla modelu gazu idealnego bez kondensacji jak i modelu pary z kondensacją. Tymi trzema równaniami opisującymi Computational Fluid Dynamics (CFD) są:

- bilans masy [8, 9]:

$$\partial_t(\rho) + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

- bilans pędu [8, 9]:

$$\partial_t(\rho \mathbf{v}) + \text{div}(\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} + p \mathbf{I}) = \text{div}(\tau^c) + \rho \mathbf{b} \quad (2)$$

- bilans energii [8, 9]:

$$\partial_t(\rho e) + \text{div}(\rho e \mathbf{v} + p \mathbf{v}) = \text{div}(\tau^c \mathbf{v} + \mathbf{q}^c) + \rho \mathbf{b} \cdot \mathbf{v} \quad (3)$$

Są to równania bilansu w postaci zachowawczej, gdzie:

ρ – gęstość mieszaniny fazy ciekłej i gazowej,

$\tau^c = \tau + \mathbf{R} + \mathbf{D}$ – całkowity tensor naprężeń lepkich mieszaniny,

$\mathbf{v} = v_i \mathbf{e}_i$ – średnia prędkość mieszaniny,

$\mathbf{q}^c = \mathbf{q} + \mathbf{q}^+ + \mathbf{q}^{ph}$ – całkowity strumień ciepła mieszaniny,

p – ciśnienie,

$e = u + 1/2 v^2$ – całkowita energia,

$\mathbf{b} = -9,81 \mathbf{e}_z$.

W modelach ewolucji kropeł kondensatu, między fazą ciekłą i fazą gazową należy uwzględnić transport masy, pędu oraz energii [1, 3]. Podczas modelowania jednocześnie rozwoju fazy ciekłej i jej ewolucji powinniśmy zastosować model matematyczny powstawania kondensatu, który posiada taki sam układ równań bilansu masy, pędu i energii [7]. Powyższe trzy równania są uzupełnione dwoma równaniami ewolucji dla parametrów pozwalających na określenie składowych tensora naprężeń:

- równanie ewolucji dotyczące energii turbulentnej k [8, 9]:

$$\partial_t(\rho k) + \text{div}(\rho k \mathbf{v}) = \text{div}(\mathbf{J}_k) + \rho s_k \quad (4)$$

- równanie ewolucji dotyczące dyssypacji energii ε [8, 9]:

$$\partial_t(\rho \varepsilon) + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{v}) = \text{div}(\mathbf{J}_\varepsilon) + \rho s_\varepsilon \quad (5)$$

Aby móc dokładnie opisać nierównowagową kondensację pary wodnej należy rozszerzyć układ równań o dodatkowe równanie ewolucji nierównowagowego stopnia suchości x oraz bilansu gęstości liczby kropeł a [m^2 / m^3]:

- równanie ewolucji stopnia suchości x [9]:

$$\partial_t(\rho x) + \text{div}(\rho x \mathbf{v}) = \text{div}(\mathbf{J}_x) + \rho s_x \quad (6)$$

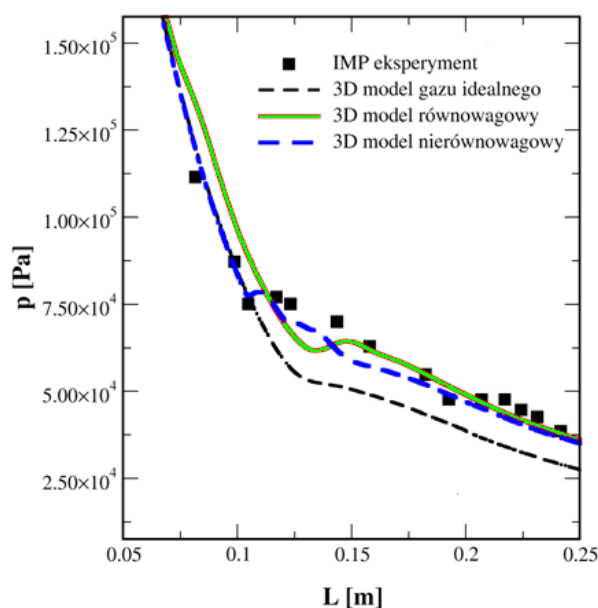
- równanie dotyczące liczby kropli a [9]:

$$\partial_t(\rho a) + \text{div}(\rho a \mathbf{v}) = \text{div}(\mathbf{J}_a) + \rho s_a \quad (7)$$

Równania ewolucji x , a , k , ε są związane z rozwojem kondensacji w warunkach przepływu turbulentnego lub ewolucją turbulencji w przepływie podlegającym kondensacji. Równania te są ze sobą sprzęgnięte poprzez cztery źródła s_φ i cztery strumienie J_φ , które zostały opracowane w zespole profesora Janusza Badura (gdzie symbol $\varphi = k, a, x, \varepsilon$ oznacza odpowiednią zmienną zachowawczą) [7, 9, 11].

Eksperyment imp pan – kalibracja modeli pary

Modele przyjęte do numerycznych obliczeń części NP turbiny parowej sprawdzone zostały w oparciu o klasyczny eksperyment ekspansji pary w dyszy de Laval, przeprowadzony w IMP PAN przez zespół profesora Roumualda Puzyrewskiego w 1969 roku. Parametry pary na wlocie do badanej dyszy były dobrane tak, aby odpowiadały punkowi geometrycznemu w okolicach linii nasycenia, żeby zagwarantować uzyskanie efektu kondensacji. Dla zapewnienie przepływu naddźwiękowego stosunek ciśnienia wlotowego, do ciśnienia wylotowego ustalono na poziomie 3 ($\xi = p_{in} / p_{out} = 3$). Spadek ciśnienia pary wzdłuż dyszy dla eksperymentu w porównaniu z przyjętymi modelami: modelem pary idealnej, modelu równowagowego i nierównowagowego pary mokrej, przedstawiono na rys. 3 [12].



Rys. 3. Ekspansja pary w dyszy de Laval – porównanie wyników obliczeń z eksperymentem [12].

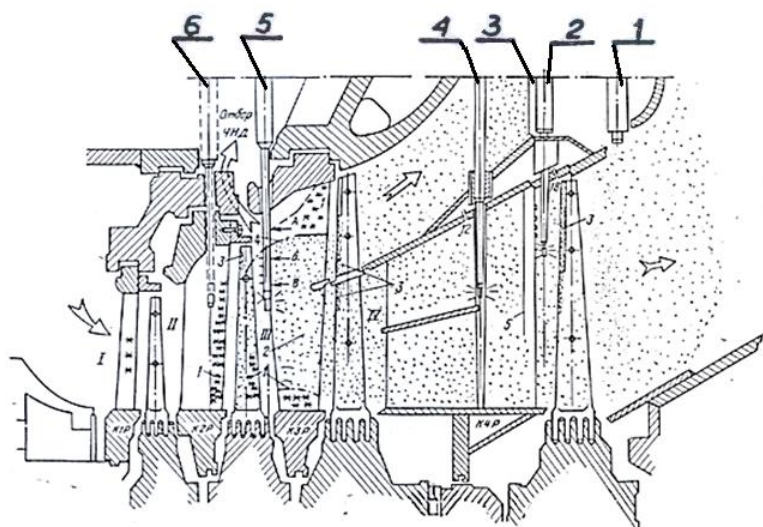
Wyniki obliczeń ekspansji pary dla wszystkich przyjętych modeli są zgodne z wynikami eksperymentu do momentu pojawienia się kondensatu. Model równowagowy w obszarze wlotowym dyszy zawyża wyniki ciśnienia w porównaniu z rzeczywistością, natomiast model gazu idealnego zaniża wyniki w części wylotowej. Jedynie model nierównowagowy poprawnie odzwierciedla zmianę ciśnienia wzdłuż całej dyszy i poprawnie opisuje rzeczywiste warunki panujące w dyszy.

Stopień Baumanna

Duży strumień objętościowy przepływającej pary sprawia wiele kłopotów podczas projektowania części niskoprężnej turbiny parowej. Do rozwiązania owego problemu doszedł Baumann poprzez stworzenie dwudzielnego przedostatniego stopnia części NP (rysunek 4). Stopień Baumanna jest elementem konstrukcyjnym, który pracuje w obszarze, w którym zachodzi zjawisko tzw. spontanicznej kondensacji. Strefa ta związana jest z położeniem, tak zwanej, linii Wilsona wyznaczającej początek obszaru pary mokrej. Dochodzi tu do skomplikowanego wytwarzania pierwotnych i wtórnych kropeł kondensatu, mających heterogeniczne lub homogeniczne źródło. Strumień pary w takim stopniu jest rozdzielany osiowo-symetryczną powierzchnią na dwie części:

- zewnętrzną (tak zwane piętro górne), gdzie cały stojący do dyspozycji spadek entalpii przetwarzany jest na energię mechaniczną w jednym stopniu,
- wewnętrzną (tak zwane piętro dolne), gdzie ten sam spadek przetwarzany jest w dwóch stopniach [14].

W miejscu podziału łopatki mają odpowiednie występy (półki), które wspólnie tworzą pierścień (mostek), stanowiący element rozdzielający strumień. Łopátka robocza, podobnie jak i kierownicza stopnia Baumanna, składa się z dwóch części – zewnętrznej (piętro górne) i wewnętrznej, o różnych zwichrowaniach. Każda z nich powinna być dostosowana do różnych kinematyk przepływu pary w piętrach górnym i dolnym [15, 16, 17]. Przedstawione przez Baumanna rozwiązanie stwarza możliwość zwiększenia mocy wyjściowej bez zwiększanie długości łopatek ostatniego stopnia tej części turbiny.



Rys. 4. Stopień Baumanna w niskoprężnej części turbiny wielkiej mocy [12].

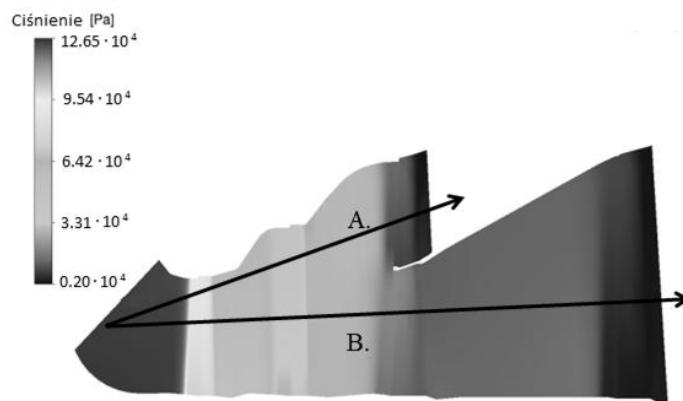
Na rysunku nr 4 kropczkami oznaczone zostały obszary pojawienia się kropelek kondensatu, natomiast liczbami oznaczono sześć sond, przy których pomocy były mierzone takie parametry jak: ciśnienie i temperatura. Wyniki pomiarów wykonanych właśnie przy pomocy tych sond były porównywane z wynikami numerycznymi. Strzałkami zaznaczone są kierunki przepływu strumienia pary.

Analiza numeryczna części np. turbiny parowej ze stopniem Baumanna

Obliczenia CFD przeprowadzono na całej geometrii części NP ze stopniem Baumanna. Zdyskretyzowany został zarówno wirnik jak i kadłub tej części turbiny. Warunki brzegowe (ciśnienia, temperatura i strumień masowy) zostały zaczerpnięte z eksperymentu Błażko z 1989 roku dla dwóch różnych punktów pracy. Parametry wykorzystane podczas obliczeń przedstawia tablica 1. Do opisu przepływu pary wykorzystane zostały dwa modele pary: model pary idealnej bez kondensacji i model pary mokrej z równowagową kondensacją.

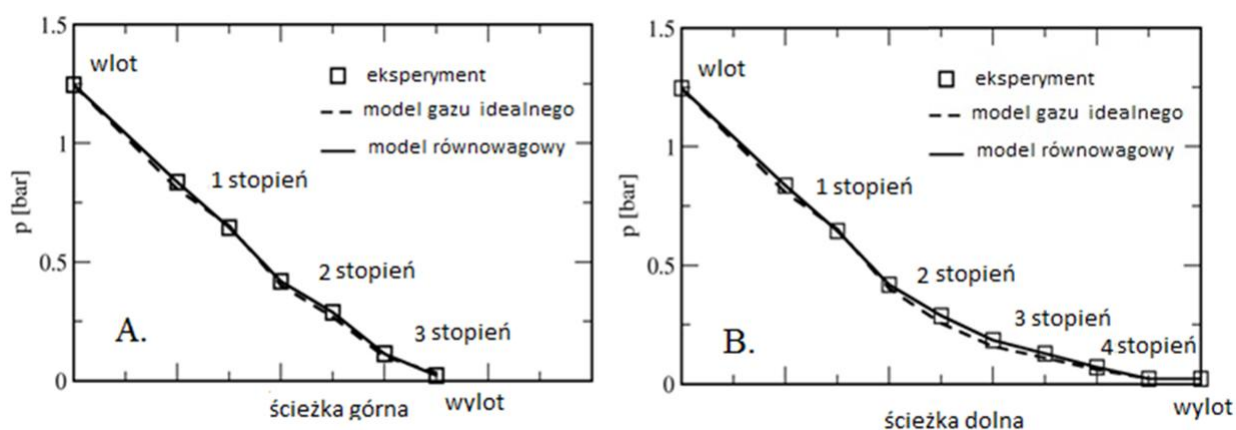
Tablica 1. Wyniki eksperymentu (Błażko 1989) przyjęte jako warunki brzegowe do obliczeń numerycznych [13].

Parametry:	Punkt-1 26,2MW	Punkt-2 31,4MW
ciśnienie początkowe	$p_0 = 1,247 \text{ bar}$	$p_0 = 1,474 \text{ bar}$
temperatura początkowa	$t_0 = 179,2 \text{ °C}$	$t_0 = 181 \text{ °C}$
ciśnienie w kondensatorze	$p_k = 0,023 \text{ bar}$	$p_k = 0,037 \text{ bar}$
strumień masowy	$m = 65,194 \text{ kg/s}$	$m = 76,9 \text{ kg/s}$
upust pary	$m_u = 4,621 \text{ kg/s}$	$m_u = 4,2 \text{ kg/s}$



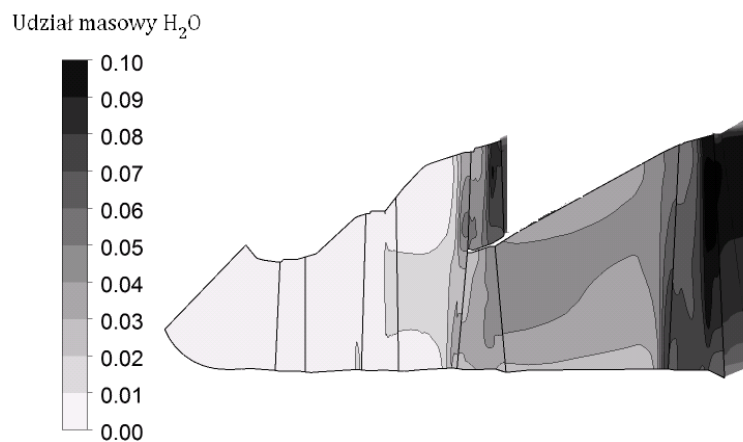
Rys. 5. Rozkład ciśnienia w części NP ze stopniem Baumanna.

Rozkład ciśnienia, obwodowo uśredniony w przekroju części NP ze stopniem Baumanna, przedstawia rysunek 5. Porównanie spadków ciśnień (zarówno dla ścieżki górnej i ścieżki dolnej przepływu) wynikających z danych eksperymentalnych i wyników obliczeń CFD dla dwóch przyjętych modeli pary ukazuje rysunek 6. Model gazu idealnego bez kondensacji niewiele zaniża wartości uśrednionego ciśnienia w części turbiny bliskiej wylotowi. Model z kondensacją równowagową daje bardzo zbliżone wyniki do danych eksperymentalnych w każdym stopniu części NP zarówno dla ścieżki górnej jak i dolnej. Różnice między wynikami eksperymentu, a wynikami obliczeń dla obu modeli są bardzo znikome, dlatego też można stwierdzić, że na poszczególnych stopniach lokalne spadki ciśnienia wyznaczone są poprawnie bez względu na zastosowany model.



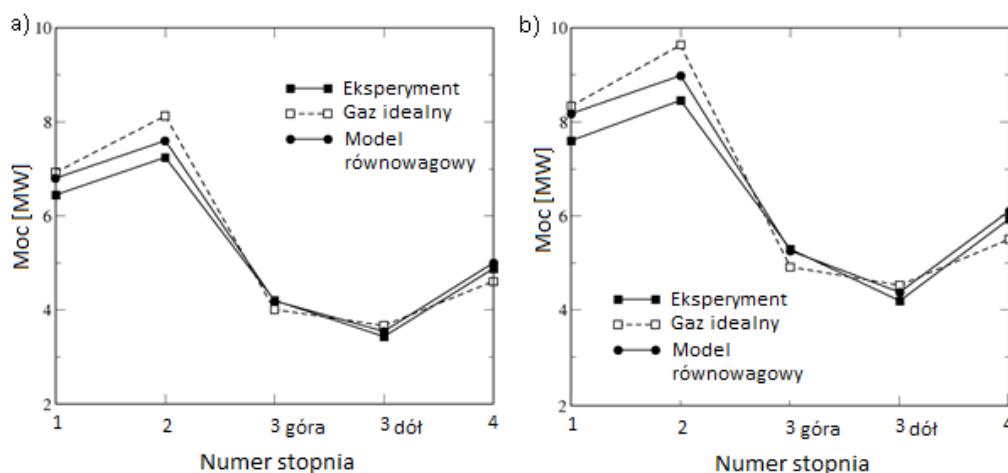
Rys. 6. Ekspansja pary w górnej (wykres po lewej) i dolnej (wykres po prawej) ścieżce przepływu w części NP turbiny parowej wielkiej mocy.

Udział masowego kondensatu (rozkład stopnia zawilgocenia $y=1-x$) w przekroju części NP dla zastosowanego modelu równowago pary mokrej przedstawia rysunek 7. Wyniki obliczeń numerycznych dla tego matematycznego opisu pary mokrej wskazują na możliwość pojawienia się pierwszych kropelek kondensatu (kropelek cieczy) już za drugim stopniem. Czynnikiem roboczym, którym jest para wodna, jest zanieczyszczona związkami chemicznymi różnego pochodzenia, co potwierdza fakt występowania kondensacji znacznie wcześniej niż wyznacza ją linia Wilsona. W części NP turbiny parowej dochodzi do skomplikowanego wytwarzania pierwotnych i wtórnych kropli kondensatu, mających homogeniczne i heterogeniczne źródło.



Rys. 7. Rozkład stopnia zawilgocenia w przekroju części NP turbiny 200 MW.

Porównanie mocy poszczególnych stopni części NP turbiny 200MW dla danych eksperymentalnych i przyjętych modeli pary przedstawiono na rys. 8. W porównaniu do danych doświadczalnych model gazu idealnego niepoprawnie określa moce poszczególnych stopni dla obu przypadków pracy turbiny. Wyniki dla tego modelu w obu punktach pracy wskazują na zawyżanie wyników mocy w części wlotowej do turbiny, natomiast zaniżanie mocy w części wylotowej. Model pary mokrej z kondensacją równowagową wykazują bardzo zbliżone wyniki do eksperymentu na wylocie z turbiny. Wlotowe wartości są zawyżane, co może wskazywać, że proces kondensacji zaczął się już wcześniej. Zastosowanie modelu nierównowagowego, który wymaga dużej mocy obliczeniowej i znacznego zwiększenia czasu obliczeniowego, może przyczynić się do poprawnego wyznaczania zarówno spadków ciśnienia jak i mocy poszczególnych stopni w całej części niskoprężnej turbin parowych dużej mocy.



Rys. 7. Moc poszczególnych stopni części NP dla: a) punktu pracy 1, b) punktu pracy 2.

Wnioski

Numeryczne obliczenia części niskoprężnej turbiny parowej dużej mocy zostały przeprowadzone w oparciu o weryfikacje modeli pary na eksperymencie dyszy de Laval'a. Obliczenia wykazały, że bez względu na wykorzystany model wartości spadków ciśnienia są wyznaczone poprawnie. Stwierdzono, że kody numeryczne typu CFD poprawnie modelują przepływ pary. Modele mogą być z powodzeniem używane do obliczeń przepływów w dyszach, a także turbinach i ich stopniach. Model pary mokrej z kondensacją równowagową daje zbliżone wyniki mocy dla wylotowej części turbiny, zarówno dla ścieżki górnej jak i dolnej. Należy się spodziewać, że wykorzystanie modelu z kondensacją nierównowagową będzie precyzyjnie odzwierciedlać rzeczywiste warunki panujące w turbinie. Niestety model ten trudno zastosować do obliczeń całej części NP turbiny parowej, a czas obliczeń przy wykorzystaniu tego modelu wzrasta kilkakrotnie. Badania wykazały, że podstawowe parametry przepływowe mogą być wyznaczone przy użyciu równowagowego modelu kondensacji. Chcąc znaleźć szczegółowe informacje należy sięgnąć

po model nierównowagowy. Dalsze badania nad modelami przejść fazowych przepływającej pary mogą się przyczynić do zwiększenia sprawności turbiny jak i do zwiększenia czasu jej eksploatacji, a także do projektowania nowych turbin parowych.

Streszczenie

Woda jest substancją, która występuje najczęściej w naturze i może przyjmować różne stany skupienia. Przemiany fazowe zachodzące w wodzie są przedmiotem naszego codziennego doświadczenia. Mogą one zachodzić spontanicznie, lub także mogą być one inicjowane przez człowieka w różnego rodzaju maszynach i urządzeniach. Do najbardziej ciekawych przemian, które zachodzą w tym płynie są kondensacja i flashing. Oba te zjawiska mogą być zainicjowane poprzez szybką zmianę ciśnienia, zatem są to przemiany indukowane „naprężeniowo”. Zjawiskiem brany pod uwagę w realizowanych badaniach jest kondensacja pary wodnej. W części NP kondensacyjnej turbiny parowej przedostatni i ostatni stopień pracują w obszarze, w którym zachodzi zjawisko tzw. spontanicznej kondensacji, która jest nierównowagowym przejściem fazowym. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń przepływu pary w części NP turbiny parowej mocy 200MW i porównano je z danymi eksperymentalnymi. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem różnych sposobów modelowania przepływu pary.

Słowa kluczowe: Kondensacja, Flashing.

NON-EQUILIBRIUM PHASE TRANSITION

Abstract

Water is a substance, which occurs most commonly in nature and can exist in different states of aggregation. Phase transformations, taking place in the water, are a subject of our everyday experience. They happen spontaneously or are initiated by a man in a various kinds of machines and devices. The most interesting phenomenons, occurring in this fluid, are condensation and flashing. Both of these phenomenons can be initiated through a rapid pressure change, therefore there are a stress induced phase transitions brought about the mechanism of local tension of the fluid. Condensation was the main object of the research. In the experimental part of the work only condensation has been taken into account. Actually, in the *CFD* literature, there are three main types of non-equilibrium condensation models. These three main types of models are: the single continuum approach (called also single-fluid approach), the Eulerian –Eulerian multi-phase approach (called also two-fluid approach) and Lagrangean-Eulerian Fluid Solid Interaction approach. In this part, there have been taken the attempts of different condensation models comparison. Numerical calculation, done using the *CFD* code, are confronted with a classical experiment *IMP PAN* made in the de Laval nozzle.

Keywords: Condensation, Flashing.

Literatura

- [1]Badur J., Bilicki Z., Kwidziński R.: *Operacyjna lepkość objętościowa w procesie transport pędu ekspandującej wody i uderzeniowej kondensacji pary wodnej*, „Zeszyty Nauk. IMP PAN”, 479, 1997, s. 1–81.
- [2]Gyarmathy G.: *Condensation in flowing steam*, [in:] *Two-Phase steam flow in turbines and separators*, eds M. J. Moore, C. H. Sieverding, Hemisphere Pub., 1976, s. 127–189.

- [3]Puzyrewski R., Krzeczowski S.: *Some results of investigations on water-film break-up and motion of water drops in aerodynamic trail*, "Transactions of IFFM", tom 29–31, 1966, s. 21–44.
- [4]Puzyrewski R.: *Kondensacja pary wodnej w dyszy de Laval*, PWN, Poznań, 1969.
- [5]Schnerr H., Badur J.: *Przepływy wielofazowe, zagadnienia kondensacji i kawitacji*, „Opr. Wew. IMP”, 23/02, Gdańsk 2002, s. 1–44.
- [6]Schnerr G., Vortmann C., Winkler G. Badur J., Banaszkiewicz M., Karcz M., Ochrymiuk T.: *Niestacjonarne przepływy wielofazowe zagadnienia kondensacji i kawitacji*, IMP PAN, 491/99, Gdańsk 1999.
- [7]Sienczak T., Badur J.: *Problemy modelowania nierównowagowej homo- i heterogonicznej kondensacji pary wodnej w warunkach turbinowych*, Mat. IX Konf. Nauk.-Tech. Elektrownie Ciepłne, Eksploatacja-Modernizacja-Remonty, Słok –Bełchatów, 2009, 189-195.
- [8]Badur J.: *Pięć wykładów ze współczesnej termomechaniki płynów*, skrypt PK, www.imp.gda.pl, Gdańsk, 5002.
- [9]Zakrzewski W.: *Walidacja modelu pary mokrej przez porównanie z eksperymentem*, Współczesne technologie i konwersja energii, Wydawca Wydział Mechaniczny, Gdańsk 2011.
- [10]Perycz S.: *Turbiny parowe i gazowe*, Wyd. Pol. Gdańskiej, 1988.
- [11]Karcz M., Zakrzewski W., Lemański M., Badur J.: *Zagadnienia modelowanie 3D spontanicznej kondensacji w części niskoprężnej turbiny parowej 200MW*, Mat. X Konf. Nauk.-Tech. „Elektrownie Ciepłne Eksploatacja-Modernizacja-Remonty”, Słok k.Belchatowa, 2011, s. 253–262.
- [12]Zakrzewski W., Nastalek L., Kornet S., Badur J.: *Numerical simulations of wet steam flow in the Baumann stage and comparisons with measurements on 200MW turbine unit*, Mat. Konf. Applied Mechanics 7, Bydgoszcz 2012.
- [13]Badur J., Ziółkowski P., Kornet S., Jesionek K., Masłyk M.: *Modelowanie pracy stopnia Baumanna, część III – Kondensacja i osadzanie się kropel*, Mat. 52 Symp. Modelowanie w Mechanice, Ustroń 2013.
- [14]Badur J., Karcz M., Lemański M., Zakrzewski W., Jesionek K., Straś K., Masłyk M.: *Modelowanie pracy stopnia Baumanna, część I – Przepływ*, Mat.50 Symp. Modelowanie w Mechanice, Gliwice, 2011.
- [15]Gundlach W.: *Podstawy maszyn przepływowych i ich systemów energetycznych*, WNT, Warszawa 2008.
- [16]Błażko E.: *Modernization of PWK-200, TK-200 low pressure part installed in power stations with an open cooling water system*, IMP PAN Reports, 41/89, 1989, s. 1–124.
- [17]Badur J., Karcz M., Lemański M., Zakrzewski W., Jesionek K.: *Remarks on steam condensation modeling related to steam turbine of large output*, Proc. Of microCAD “International Scientific Conference”, Miscolc 2011.
- [18]J. Badur, M. Banaszkiewicz, *Application of Korteweg’s capillary stress tensor in momentum balance for flashing flow*, „Arch. Thermodynamics”, 19, 1998, s. 61–86.
- [19]Badur J., Bilicki Z.: *Spontaniczne wrzenie w przepływie i w objętości. Analiza równania domknięcia określającego początek wrzenia*, IMP PAN w Gdańsku, Gdańsk, nr 450/1406/97, 1995, s.1–45.
- [20]Badur J., Banaszkiewicz M.: *Kapilarne własności przepływów z odparowaniem rozprężnym w fenomenologicznym modelu Ginzburga-Landaua*, IMP PAN w Gdańsku, Gdańsk, nr 485/1444/97, 1997, s. 1–97.