

Włodzimierz WRÓBLEWSKI  
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Politechnika Śląska  
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice  
wroblews@polsl.gliwice.pl

## PRZEPIŁY WY DWUF AZOWE W UKŁADACH ŁOPATKOWYCH TURBIN PAROWYCH

**Streszczenie.** W niskoprężnych stopniach turbiny parowej występują złożone zjawiska przepływowe, odpowiedzialne za generację strat. Jednym ze źródeł tych strat jest pojawiająca się w czasie ekspansji pary wodnej faza ciekła, która wpływa na warunki pracy stopnia turbinowego. Modelowanie ekspansji w turbinie parowej uwzględnia proces kondensacji homogenicznej oraz kondensacji heterogenicznej na rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych zanieczyszczeniach pary wodnej. Zaprezentowane są przykładowe wyniki numerycznej analizy procesu ekspansji pary mokrej w części niskoprężnej turbiny parowej.

## TWO-PHASE FLOWS IN STEAM TURBINE CASCADES

**Summary.** For the low pressure steam turbines an improvement of efficiency in last stage can significantly impact the output of the total unit. Accurate estimation of the losses in the steam flow through the last stages requires that the steam should be treated as the two-phase real gas flow. The non-equilibrium condensation process is taken into account. The flow structure is modeled using the 3-D inviscid or viscous governing equations with turbulence model. The homogeneous condensation in steam is modeled using classical nucleation theory. Heterogeneous effects are simulated by assuming a given concentration of spherical particles of impurities with a given radii, where the liquid mass can grow according to the droplet growth law. The influence of chemical soluble steam impurities on the nucleation process is included. Some chosen calculation results and comparisons are presented.

### 1. Wprowadzenie

Stopnie turbiny parowej, pracujące w części niskoprężnej, są przedmiotem szczególnego zainteresowania przy poszukiwaniu rezerw poprawy sprawności konwersji energii. Dzieje się tak m.in. z tego powodu, że w tych stopniach mamy do czynienia z bardzo złożonymi zjawiskami przepływowymi. Ich modelowanie za pomocą złożonych algorytmów numerycznych nie przynosi w pełni zadowalających rezultatów. Podstawowa przyczyna tkwi w złożoności struktur przepływowych i trudności ich zamodelowania, co powoduje ograniczenia przy określaniu strat. Ten problem dotyczy głównie modelowania turbulencji. Dodatkowo w części stopni, w których ekspansja przebiega poniżej linii nasycenia, mamy

do czynienia z przepływem dwufazowym i zjawiskami mu towarzyszącymi. Należy do nich m.in. wystąpienie nierównowagowego procesu kondensacji pary wodnej. Obecność strefy kondensacji istotnie wpływa na warunki pracy stopnia turbinowego. Mechanizmy tego procesu wywołane są czynnikami przepływowymi oraz obecnością zanieczyszczeń w przepływie.

W czasie ekspansji pary wodnej w kanale dyszowym, przebiegającej poniżej linii nasycenia, para może osiągać stany nierównowagowe inicjujące proces kondensacji homogenicznej. W przypadku rzeczywistej ekspansji w turbinie proces kondensacji obserwuje się wcześniej, niż zakłada to teoria kondensacji homogenicznej. Wyjaśnienie tego faktu wymaga uwzględnienia w modelu innego mechanizmu kondensacji, występującego na zanieczyszczeniach pary wodnej, głównie pyłach i kroplach soli i zasad (kondensacji heterogenicznej).

Badanie fizyki zjawisk występujących podczas ekspansji pary wodnej w obszarze pary mokrej jest ważnym celem prac badawczych prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych zagranicznych i krajowych. Poznanie procesu powstawania fazy ciekłej w czasie ekspansji czynnika wymaga uwzględnienia i głębszego zbadania układu dwufazowego w stanach nierównowagowych. Jedne z pierwszych badań eksperymentalnych nierównowagowego przepływu dwufazowego w dyszy Laval'a przeprowadzone zostały przez Barschdorffa (1971), Dejcz (1981), Puzyrewskiego i innych (1976). Równocześnie zainicjowane zostały badania nad metodami modelowania przepływów dwufazowych. Towarzyszył temu rozwój efektywnych metod numerycznych, które uwzględniały własności termodynamiczne pary wodnej jako gazu rzeczywistego.

Mimo znacznego postępu w rozwoju metod obliczeniowych numerycznej mechaniki płynów zadanie modelowania przepływu dwufazowego w układach łopatkowych turbiny ze względu na swoją złożoność zostało podjęte dla dwóch i trzech zmiennych przestrzennych stosunkowo późno. Pierwsze próby numerycznego modelowania dwuwymiarowego przepływu pary wodnej ze zjawiskiem kondensacji zawiera praca Bakhtara i Tohaia (1980). Zastosowany w niej model przepływu odnosi się jednak do przyjęcia dla pary własności gazu doskonałego. Mimo to dla prostych geometrii przepływowych (dysza) otrzymane wyniki były stosunkowo dobre.

Współcześnie pojawiły się publikacje dotyczące modelowania przepływu pary wodnej z ograniczonym uwzględnieniem efektów gazu rzeczywistego w przepływie. Należy tu wymienić m.in. pracę White'a i innych (1996), dotyczącą porównania badań eksperymentalnych i numerycznych dla geometrii płaskiego kanału międzyłopatkowego oraz prace Stastny'ego (1997) zajmującą się modelowaniem przepływu pary wodnej w kanale turbinowym z uwzględnieniem kondensacji na obcych zarodkach (kondensacja heterogeniczna). We wszystkich tych przypadkach nie wprowadza się do analizy pełnych równań stanu pary wodnej.

Większość obecnie prezentowanych prac z zakresu modelowania struktury przepływu pary wodnej w kanałach maszyn wirnikowych oparta jest na niestacjonarnych równaniach zachowania Eulera rozwiązywanych w ortogonalnym krzywoliniowym układzie współrzędnych, np. Stastny (1997), Bohn i Kerpici (2000), Dohrmann (1989).

Od kilku lat pojawiają się prace rozszerzające model przepływu z kondensacją o efekty lepkościowe. Dotyczy to prac związanych z badaniem przepływu pary wodnej w kanałach turbinowych. W tym zakresie można wymienić szczególnie prace Heilera (1999) i Winklera (2000). Dotyczą one zastosowania równań NS w zagadnieniach dwuwymiarowych. Uwzględniane są również efekty niestacjonarne.

Istnieje niewiele prac, w których model przepływu z kondensacją został rozbudowany do trzech wymiarów. Istotną przyczyną w tym zakresie jest z jednej strony bardzo ograniczona możliwość weryfikacji eksperymentalnej takich obliczeń, a z drugiej strony znaczne czasy obliczeń. Do prac prezentujących badania przepływu przestrzennego należy zaliczyć m.in. opracowanie Singha (1999). W pracy tej przedstawiony jest model obliczeń przepływu przez stopnie części niskoprężnej turbiny z uwzględnieniem modelu uśredniania parametrów w szczelinie międzywieńcowej. Otrzymuje się w tym przypadku stacjonarne rozwiązanie zagadnienia przepływowego w stopniach turbiny.

Również w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych stosowana jest i rozwijana metoda rozwiązania przepływu dwufazowego przy wykorzystaniu równań Eulera i uśrednionych równań Naviera-Stokesa dla zagadnień dwuwymiarowych i przestrzennych, np. Wróblewski (2000), Dykas (2001), Wróblewski i inni (2001).

Podczas ekspansji pary wodnej w turbinie mogą przebiegać równolegle dwa procesy: kondensacji homogenicznej i heterogenicznej. Zanieczyszczenia zawarte w parze, warunkujące wystąpienie kondensacji heterogenicznej, pojawiają się w postaci zawiesiny rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych w wodzie cząstek. Właściwości chemiczne i fizyczne powstałej zawiesiny wpływają na wielkość tworzących się na nich cząstek, a także na sam przebieg procesu kondensacji. Nie bez znaczenia są również właściwości termodynamiczne otaczającej cząstkę gazu.

Jak można wywnioskować z przedstawionych uwag, rozpatrzenie procesu kondensacji, przy uwzględnieniu wszystkich aspektów rzeczywistego procesu (nie tylko w turbinie parowej), wymaga bardzo rozbudowanego modelu chemicznego, termodynamicznego i przepływowego. Podjęcie wysiłku badawczego w tym kierunku spowodowane było obecnością zanieczyszczeń w substancjach biorących udział w procesach przemysłowych (np. zapyłone powietrze, obecność soli w parze wodnej), występowaniem kondensacji w czynnikach wieloskładnikowych (np. tunele naddźwiękowe, procesy w atmosferze ziemi), występowaniem różnic między wynikami badań laboratoryjnych i badań na obiektach rzeczywistych (np. turbiny parowe).

Badania nad mechanizmami kondensacji heterogenicznej w przepływie pary przez układy łopatkowe można znaleźć u Stastnego (1997, 2001). Jego model uwzględnia efekty związane z heterogeniczną i homogeniczną nukleacją w przepływie. Badał on różne proporcje między mechanizmami kondensacji homogenicznej i heterogenicznej i porównywał z wynikami badań eksperymentalnych. W wyniku tych rozważań stwierdził, że konieczne jest



Rys.1. Rozkłady parametrów w dyszy dla przepływu pary wodnej z kondensacją homogeniczną  
Fig. 1. Parameters distribution in the nozzle for steam water homogenous condensing flow

uwzględnianie obu mechanizmów kondensacji w obliczeniach przepływu przez stopnie turbinowe.

Dalszy krok w swych rozważaniach nad mechanizmem procesu nukleacji poczynili Gorbunov z Hamiltonem (1997), którzy badali ten proces w układach wieloskładnikowych. Uwzględnili oni w swym modelu zjawisko formowania cząstek w wyniku osadzania się różnych składników par na zarodkach rozpuszczalnych. Głównym obszarem zastosowań tego modelu były zjawiska formowania się chmur. Uproszczony model Gorbunova i Hamiltona w przepływie pary wodnej został uwzględniony przez Bohna i innych (2001).

Zagadnienia modelowania procesów nukleacji na rozpuszczalnych zarodkach w czasie ekspansji pary wodnej w kanale łopatkowym są również przedmiotem badań prowadzonych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej (np. Chmielniak i inni 2002).

## 2. Model obliczeń przepływu pary wodnej z kondensacją homogeniczną

W ostatnich stopniach turbiny parowej para ekspandując poniżej linii nasycenia podlega silnemu przechłodzeniu, co powoduje powstanie początkowo przypadkowych skupisk molekuł wody, a później w miarę dalszego przechłodzenia wzrost liczby i prawdopodobieństwo powstania kropeł krytycznych. Krople krytyczne tworzą zarodki kondensacji, na których gwałtownie kondensuje się para. Mamy tu do czynienia z kondensacją spontaniczną, w wyniku której powstają krople pierwotne oraz następuje przejście pary przechłodzonej w mgłę. Na pojawiających się w parze kropkach osiadają inne molekuly wody, powodując wzrost kropli. Procesowi temu towarzyszy przejmowanie przez rosnące krople ciepła parowania od molekuł. Ciepło to musi zostać przyjęte przez parę, otaczającą kroplę, jeśli kropla ma przetrwać i nie odparować. Wzrostowi kropli towarzyszy znaczny przyrost jej temperatury w stosunku do otaczającej pary. Ta różnica utrzymuje się, dopóki para nie powróci do stanu równowagi termodynamicznej. W związku z tym para mokra jako czynnik roboczy w turbinach parowych odznacza się większą zdolnością magazynowania i przekazywania energii niż para przegrzana.

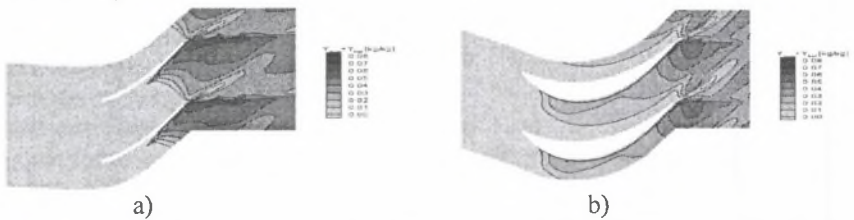
W modelu procesu kondensacji spontanicznej w kanale łopatkowym nie uwzględnia się efektów wtórnych, tzn. osadzania się kropeł na łopatkach oraz spływu kropeł z krawędzi łopatki. Modelowanie opiera się na klasycznym modelu nukleacji (tworzenia zarodków kondensacji) Frenkela (1955). W opisie zjawisk wymiany pomiędzy fazami w procesie wzrostu kropli zastosowany jest ciągły model wymiany masy i ciepła. Przepływ dwufazowy analizowany jest w oparciu o przyjęcie modelu bezpoślizgowego. Pozwala to ograniczyć się do rozpatrywania jedynie wymiany masy i energii. Przyjęto, że faza ciekła i gazowa są nielepkie oraz faza ciekła, z wyjątkiem etapu kondensacji, nie przewodzi ciepła. Faza ciekła jest reprezentowana przez niezliczoną ilość kropeł, dla których pomija się ich ruch obrotowy, wewnętrzną cyrkulację masy oraz zakłada się, że krople nie oddziałują pomiędzy sobą. Dodatkowo założono, że objętość fazy ciekłej jest pomijalnie mała w porównaniu z fazą gazową. Opis przestrzennej struktury przepływu czynnika roboczego w kanałach maszyn przepływowych tworzą niestacjonarne równania zachowania (Eulera lub Naviera-Stokesa) rozwiązywane w ortogonalnym krzywoliniowym układzie współrzędnych. Faza ciekła powstała w wyniku kondensacji homogenicznej opisywana jest przez układ równań w postaci:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho'_{\text{hom}} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \rho v'_{\text{hom}} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho v'_{y,\text{hom}} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \rho v'_{n,\text{hom}} \right\} = \left[ \frac{4}{3} \pi \rho_l \left( J_{\text{hom}} r^{\ast 3} + 3 \rho n_{\text{hom}} r^2 \frac{dr_{\text{hom}}}{dt} \right) \right], \quad (1)$$

gdzie:  $y_{\text{hom}}$  - stopień wilgotności spowodowany procesem kondensacji homogenicznej,  $n_{\text{hom}}$  - ilość cząstek obcych na jednostkę masy pary,  $r_{\text{hom}}$  - promień kropli,  $J_{\text{hom}}$  - szybkość tworzenia zarodki,  $r^*$  - promień krytyczny kropli.

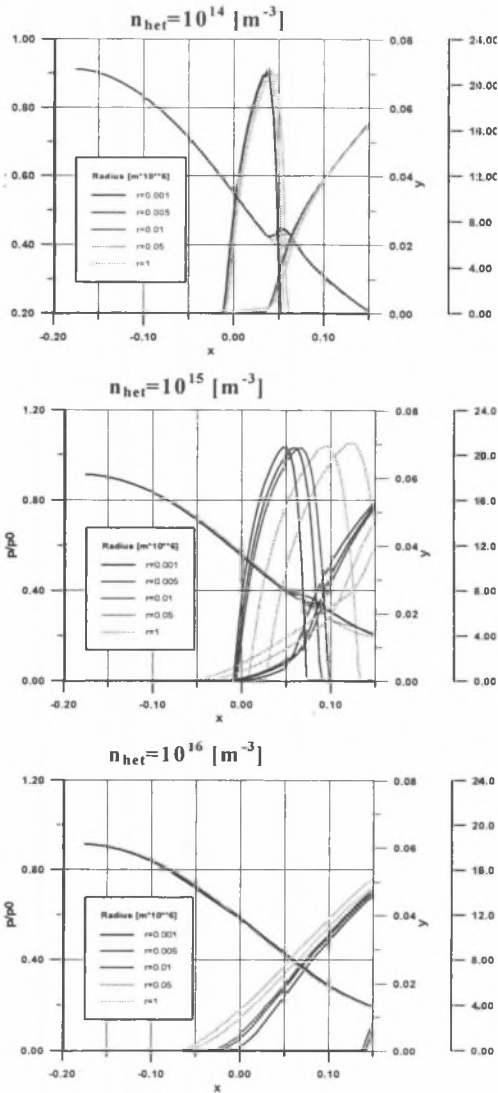
Metoda numeryczna zastosowana do analizy przepływu fazy gazowej jest jawną metodą kroków czasowych wyższego rzędu dokładności w czasie. Do obliczeń wykorzystuje się metodę objętości skończonych, w której do bilansowania elementarnych komórek obliczeniowych stosuje się schemat upwind typu Godunowa. W schemacie Godunowa rozwiązuje się jednowymiarowe zagadnienia Riemanna dla gazu rzeczywistego. Wykorzystując technikę MUSCL otrzymuje się wyższy rząd dokładności schematu w przestrzeni, pozwalający modelować intensywne zjawiska falowe z dużą rozdzielczością. Dla przepływu turbulentnego równania uzupełnia się odpowiednim modelem turbulencji.

Dodatkowymi równaniami, opisującymi fazę ciekłą, są: równanie na szybkość tworzenia zarodki sformułowane w oparciu o klasyczną teorię nukleacji, równanie na promień krytyczny kropli oraz równanie wzrostu kropli dla pary wodnej wg Gyaramathy'ego (1960), Dejcz (1981) z uwzględnieniem korekty Kantrowitza (1951). Uzupełniające wielkości, jak napięcie powierzchniowe oraz współczynnik przewodności cieplnej, określone są z zależności empirycznych (Dejcz 1981). Rozpatrywane zagadnienie przepływu pary wodnej z kondensacją opisane jest przez układ równań różniczkowych cząstkowych, uwzględniających zmienną czasową. Pozwala to na rozpatrywanie niestacjonarnych zagadnień przepływowych. Algorytm obliczeniowy rozszerzony został do zagadnień trójwymiarowych, z uwzględnieniem przepływu przez pojedynczy wieniec łopatkowy i przez stopień. Przedstawiony model obliczeniowy był testowany dla szeregu przypadków przepływu pary wodnej. Przykładowe rozkłady parametrów w przepływie z kondensacją homogeniczną przez dysze przedstawiono na rys.1. Przykładowe wyniki badania przepływu przez wirnik ostatniego stopnia części niskoprężnej turbiny parowej przedstawione są na rys.2.



Rys.2. Rozkłady stopnia wilgotności w przekrojach obszaru obliczeniowego łopatkowej ostatniego stopnia części niskoprężnej - kondensacja homogeniczna: a) przekrój wierzchołkowy, b) przekrój przy piąście

Fig.2. Wetness fraction distributions in sections of last stage blade –homogenous condensation: a) tip section, b) hub section



Rys.3. Wpływ promienia i koncentracji cząstek w parze na proces kondensacji

Fig.3. Influence of particles radius and concentration on the condensation process

nia, które nie rozpuszczają się w układzie wodno-parowym siłowni oraz zanieczyszczenia, które doznają przemian fazowych w zakresie zmian parametrów termodynamicznych w obiegu. Wśród tych ostatnich szczególnie zainteresowanie skupia się na związku NaCl, który rozpuszcza się nieco powyżej linii nasyceń pary wodnej.

Uwzględnienie w modelu przepływu procesu kondensacji oraz własności gazu rzeczywistego w odniesieniu do pary wodnej pozwala na dokładniejsze określenie warunków przepływowych w kanale. Szczególnie widoczne jest to w obciążeniu układu łopatkowego oraz w kinematyce pracy stopnia. Otrzymywane różnice w kątach wypływu z wieńca w znacznym stopniu wpływają na pracę następných wieńców łopatkowych. Zastosowanie tych modeli przepływu w projektowaniu stopni z przemianami fazowymi pozwala poprawić konstrukcję części niskoprężnej i uzyskać w konsekwencji poprawę sprawności.

### 3. Kondensacja heterogeniczna

Prowadzone badania eksperymentalne procesu kondensacji pary na stanowiskach laboratoryjnych i na rzeczywistych obiektach wskazywały na istnienie rozbieżności w intensywności oraz w lokalizacji miejsca powstawania zarodki nukleacji. Poszukiwano w początkowej fazie różnych korekt klasycznej teorii nukleacji, aby uzyskać zadowalającą zgodność modeli teoretycznych i wyników eksperymentalnych. Przyczyną powstawania tych rozbieżności upatrywano w obecności w parze zanieczyszczeń. W rzeczywistym układzie parowym siłowni możemy wyróżnić różne rodzaje zanieczyszczeń. Najistotniejsze z nich to te związki chemiczne, zawarte w wodzie, które nie zostały usunięte w procesie przygotowania wody kotłowej. Należą do nich głównie różnego rodzaju sole i zasady. Oprócz tego możemy wymienić zanieczyszczenia wynikające z procesów erozyjnych i korozyjnych. Pod względem fizykochemicznym wyróżniamy zanieczyszczenia,

W przypadku nukleacji na rozpuszczalnych cząstkach wskazane jest uwzględnienie w teorii nukleacji zmiany ich rozmiarów oraz zmiany stężenia roztworu w kropli. W modelu przepływu para wodna powinna być traktowana jak gaz rzeczywisty. Teorię nukleacji heterogenicznej zaproponował Fletcher (1962), a rozwinięli Gorbunov i Hamilton (1997). Wywodzi się ona z badań aerodynamiki i termodynamiki chmur. Uwzględnia przebieg procesu kondensacji na cząstkach rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych. Jej adaptacja do przypadku przepływu pary wodnej pozwala na uwzględnienie w turbinie parowej wszystkich mechanizmów przebiegu procesu kondensacji. Poprawne sformułowanie problemu wymaga znajomości szeregu parametrów (własności) fizycznych i chemicznych roztworów soli w wodzie w obecności pary wodnej. Są to często informacje niezbadane lub przebadane tylko dla wybranych wąskich zakresów parametrów. Zagadnienia kondensacji na cząstkach rozpuszczalnych są przedmiotem badań podjętych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej.

W najprostszym modelu kondensacji heterogenicznej na cząstkach nierozpuszczalnych zakłada się, że proces tworzenia zarodków przebiega nieskończenie szybko. Pomija się szybkość tworzenia zarodków kondensacji heterogenicznej, ilość zarodków i proces ich wzrostu. Cząstki znajdujące się w przepływie traktowane są jak krople. Proces ten opisuje następujące równanie różniczkowe:

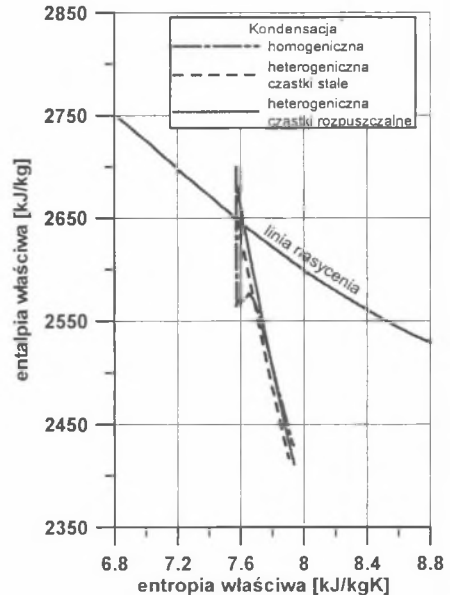
$$\frac{\partial(\rho y_{het})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho y_{het} u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho y_{het} v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho y_{het} w)}{\partial z} = 4\pi\rho_2 n_{het} r_{het}^2 \frac{dr_{het}}{dt}, \quad (2)$$

gdzie:  $y_{het}$  - stopień wilgotności spowodowany procesem kondensacji heterogenicznej,  $n_{het}$  - ilość cząstek obcych na jednostkę objętości pary,  $r_{het}$  - promień kropli utworzonej na cząstce obcej.

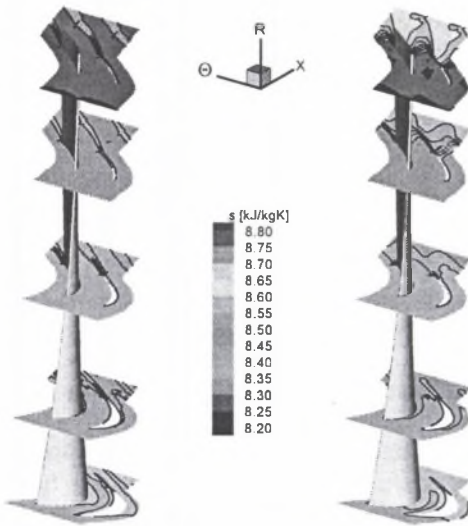
Z równania (2) wyznacza się ilość skondensowanej na obcych cząstkach wody. Równanie to wraz z równaniami (1), równaniami opisującymi przepływ mieszaniny parowo-wodnej oraz równaniem stanu pozwala na opis procesu kondensacji homoheterogenicznej w przepływie pary wodnej.

Przykładowe rezultaty badania wpływu ilości oraz rozmiaru zanieczyszczeń w parze na proces kondensacji w dyszy przedstawiono na rys.3. Przedstawiono na nim rozkłady wartości ciśnienia statycznego, szybkości nukleacji oraz stopnia wilgotności w osi dyszy.

W tych przypadkach, w których występuje kondensacja heterogeniczna na cząstkach stałych, obserwuje się wcześniejsze pojawienie się wilgoci niż w przypadku kondensacji homogenicznej. Obecność cząstek rozpuszczalnych w parze powoduje pojawienie się wilgoci powyżej linii nasyce-



Rys.4. Linie ekspansji pary wodnej w dyszy przy różnych warunkach powstawania fazy ciekłej  
Fig.4. Expansion lines in the nozzle for different condensation processes



Rys. 5. Rozkłady entropii: a) przepływ adiabatyczny, b) kondensacja na cząstkach stałych ( $n_{\text{het},0}=10^{15}[\text{l}/\text{m}^3]$ ,  $r_{\text{het},0}=10^{-8}[\text{m}]$ ) (Dykas i inni, 2003)

Fig. 5. Entropy: a) adiabatic flow, b) heterogenous condensation on the solid particles

nia pary wodnej. Można to prześledzić na rys.4. Aplikacja różnych mechanizmów procesu kondensacji pary wodnej do analizy przepływu w kanałach turbiny parowej pozwala na dokładniejsze określenie poziomu strat energii w przepływie. Przykładowe porównanie rozkładów entropii dla przepływu adiabatycznego i przepływu z kondensacją heterogeniczną w kanale wirnikowym przedstawiono na rys.5.

#### 4. Porównanie strat energii w przepływie pary mokrej

Celem budowy coraz bardziej złożonych modeli przepływowych jest jak najdokładniejsze określenie strat w przepływie. Pozwoli to otrzymać w procesie projektowym coraz sprawniejsze układy łopatkowe. W chwili obecnej weryfikacja modeli, ze względu na ograniczony materiał eksperymentalny, jest zagadnieniem stosunkowo trudnym. Jedną z metod uwiarygodnienia otrzymanych wyników jest porównanie z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu innych modeli. W tym celu

przeprowadzono obliczenia przepływu pary mokrej przez wieniec wirnikowy za pomocą:

- metody krzywizny linii prądu (merydionalny przepływ pary wodnej z zależnościami emirycznymi dla strat)
- pakietu Tascflow (przepływy równowagowe pary mokrej)
- pakietu obliczeniowego Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Wynik tych porównań dla różnych parametrów pracy wieńca przedstawiono za pomocą promieniowego rozkładu współczynnika strat (rys.6), zdefiniowanego za pomocą formuły:

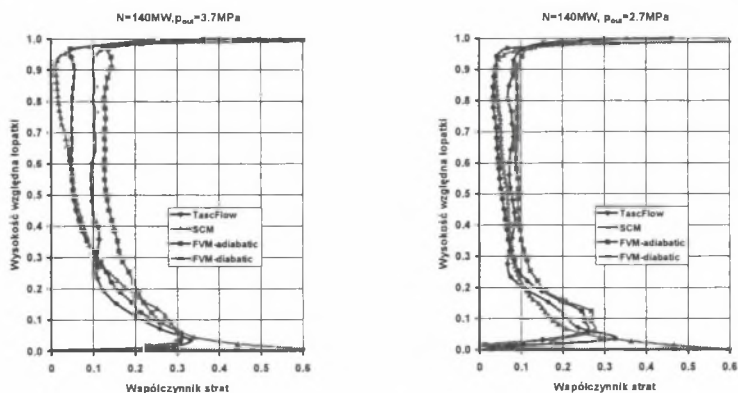
$$\zeta = \frac{T_2 \Delta s}{\frac{1}{2} w_{2s}^2} = \frac{T_2 \Delta s}{h_{sR} + \frac{1}{2} w_1^2} \quad (3)$$

gdzie  $T_2$  - temperatura na wylocie,  $\Delta s$  - przyrost entropii między wlotem i wylotem,  $w_{2s}$  i  $w_1$  - odpowiednio prędkość izentropowa względna na wylocie i prędkość względna na wlocie,  $h_{sR}$  - izentropowy spadek entalpii w wieńcu.

W formule (3) wykorzystuje się uśrednione obwodowo parametry przepływu. W metodzie krzywizny linii prądu jest to założenie podstawowe, a otrzymane wielkości są już wielkościami uśrednionymi obwodowo. Natomiast w metodach opisujących przepływ przestrzenny wyniki obliczeń są poddawane procedurze uśredniania obwodowego. Dla entalpii i entropii stosowana jest procedura uśredniania masowego, a dla temperatury



i prędkości uśredniania algebraicznego. Zakłada się w sposób przybliżony, że linie prądu na powierzchni merydionalnej odpowiadają liniom siatki obliczeniowej.



Rys. 6. Rozkłady promieniowe współczynnika strat dla łopatki wirnikowej przy różnych warunkach obciążenia

Fig. 6. Radial distributions of losses coefficient for the blade in different loads

## 5. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono kierunki badań związanych z modelowaniem przepływu pary wodnej w kanałach turbinowych. Uwzględnienie procesu kondensacji homogenicznej i heterogenicznej w obliczeniach ekspansji pary mokrej. Zastosowane modele opisu procesu ekspansji w obszarze pary mokrej pozwalają uzyskiwać dodatkowe informacje o strukturze przepływu. Jest to istotne szczególnie w przypadku złożonych przepływów w części niskoprężnej turbiny. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń numerycznych, które potwierdzają przydatność i skuteczność stosowanych algorytmów obliczeniowych. Mimo szeregu uproszczeń stosowanych w modelu przepływu pary wodnej jako czynnika dwufazowego możliwe jest uzyskanie efektywnych narzędzi zarówno do analizy, jak i projektowania układów łopatkowych turbin parowych.

## Bibliografia

1. Bakhtar F., Mohammadi Tochai M.T.: An Investigation of Two-Dimensional Flows of Nucleating and Wet Steam by the Time-Marching Method, Int. J. Heat & Fluid Flow, Vol 2, No.1, 1980
2. Barschdorff D.: „Verlauf der Zustandsgrößen und gasdynamische Zusammenhänge der spontanen Kondensation reinen Wasserdampfes in Lavaldüsen”, Forsch. Ing.-Wes. Vol.37, Nr 5, 1971
3. Bohn D.E., Kerpicci H.: Lagrangian/Eulerian calculation approach in the computation of homogeneous condensation in a nozzle guide vane of a LP-steam turbine, Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. symp. On Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, IS-ROMAC-8, Vol.1, 2000

4. Chmielniak T., Wróblewski W., Gepert A.: Modelowanie wpływu zanieczyszczeń chemicznych na proces kondensacji w przepływie pary wodnej, Krajowa Konferencja Mechaniki Płynów, Olsztyn-Łańsk, 2002
5. Dejcz M.E: Gazodynamika dwufaznych sried, Energija, Moskwa, 1981
6. Dohrmann U.: Ein numerisches Verfahren zur Berechnung stationärer transsonischer Strömungen mit Energiezufuhr durch homogene Kondensation, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1989
7. Dykas S.: Numerical calculation of the Steam Condensing Flow, Task Quarterly, Gdańsk, Vol.5, No4, 2001
8. Dykas S., Wróblewski W., Chmielniak T.: Numerical Research on the Flow Through the Last Rotor of LP Steam Turbine, 5<sup>th</sup> Euomech Fluid Mechanics Conference, Toulouse, 2003
9. Fletcher N. H.): The Physics of the Rainclouds. p.386 Cambridge University Press, Cambridge, 1962
10. Frenkel J.: Kinetic Theory of Liquids, Dover, New York, 1955
11. Gorbunov B., Hamilton R.: Water Nucleation on Aerosol Particles Containing both Soluble and Insoluble Substances. J. Aerosol Sci., Vol. 110, No.20, 1997, 10035-10045.
12. Gyarmathy G.: Grundlagen einer Theorie der Nassdampfturbine, Juris Verlag, Zürich. 1960
13. Heiler M.: Instationäre Phänomene in homogen/heterogen kondensierenden Duesen- und Turbinenstroemungen, Dissertation, Universität Karlsruhe. 1999
14. Kantrowitz A.: Nucleation in Very Rapid Vapor Expansions, Journal Chem. Phys., 19, 1951, 1097-1100.
15. Puzyrewski R., Król T. (1976): Numerical Analysis of Hertz-Knudsen Model of Condensation., Prace IMP, nr 70-72.
16. Stastny M., Sejna M., Jonas O., (1997): Modelling the Flow with Condensation and Chemical Impurities in Steam Turbine Cascades, 2nd European Conference on Turbomachinery-Fluid Dynamics and Thermodynamics, Antwerpen
17. Stastny M., Sejna M.: Two-Population Numerical Model of Heterohomogeneous Condensation of the Steam Flowing in Turbine Cascades. 4th European Conference on Turbomachinery-Fluid Dynamics and Thermodynamics, London, 2001, 803-812.
18. White, A. J., Young J. B., Walters P.T. (1996): Experimental Validation of Condensing Flow Theory for a Stationary Cascade of Steam Turbine Blades, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 354 599-88.
19. Winkler G.: Laufrad-Leitrad-Wechselwirkung in homogen-heterogen kondensierenden Turbinenstroemungen, Dissertation, Universitaet Karlsruhe. 2000
20. Wróblewski W. (2000): Numeryczna symulacja zjawisk przepływowych w turbinach cieplnych, Zeszyty Naukowe Polit. Śląskiej, s.Energetyka, z. 132, Gliwice
21. Wróblewski W., Chmielniak T., Dykas S., Łukowicz H., Górski J., Pająk S.: Modelowanie efektów gazu rzeczywistego w transonicznym przepływie przez układy łopatkowe maszyn wirnikowych, Sprawozdanie IMiUE z grantu KBN Projekt 7T07B 00517, Gliwice, 2001