

Mgr inż. Anna GRZYMKOWSKA

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa

## **MODEL NEURONOWY JAKO ALTERNATYWA DLA NUMERYCZNEGO MODELU OKOŁODŹWIĘKOWEGO PRZEPLYWU PARY PRZEZ PALISADĘ TURBINOWĄ**

*Streszczenie: Występowanie skośnej fali uderzeniowej w przepływie pary przez palisadę turbinową stanowi zagrożenie dla bezpiecznej pracy turbiny oraz dla jej elementów konstrukcyjnych. Detekcja oraz lokalizacja fali uderzeniowej, a także rozpoznanie przyczyny jej powstawania, nie są możliwe do osiągnięcia na drodze pomiarowej. Analizę zjawisk zachodzących wewnątrz kanału przepływowego umożliwiają natomiast modele numeryczne oraz neuronowe. Zaletą modeli opartych o sztuczne sieci neuronowe jest szybkość obliczeń, znacznie większa niż w przypadku modeli numerycznych. Poprawnie utworzony model neuronowy kanału przepływowego pozwoliłby zatem wykryć i zlokalizować falę uderzeniową, a usunięcie przyczyny jej występowania umożliwiłoby przywrócenie warunków poprawnej pracy diagnozowanej maszyny przepływowej.*

## **THE NEURAL MODEL AS AN ALTERNATIVE TO THE NUMERICAL MODEL OF THE SUBSONIC STEAM FLOW THROUGH THE TURBINE BLADING ROW**

*Abstract: A skew shock wave in the flow through the steam turbine blading row puts proper turbine work and its structural elements at risk. Detection and localisation of the shock wave, and also identification of its occurrence cause, are not possible to obtain by measurements. However, numerical and neural models enable the analysis of phenomena in flow channels. A much shorter time of neural calculations is their advantage over numerical models. Thus, a proper neural model of the flow channel will allow detection and localisation of the shock wave. Moreover, elimination of the cause of the shock wave occurrence will enable the proper work conditions of the diagnosed fluid flow machine to be restored.*

*Słowa kluczowe: turbina parowa, fala uderzeniowa, model numeryczny, model neuronowy*

*Keywords: steam turbine, shock wave, numerical model, neural model*

### **1. WSTĘP**

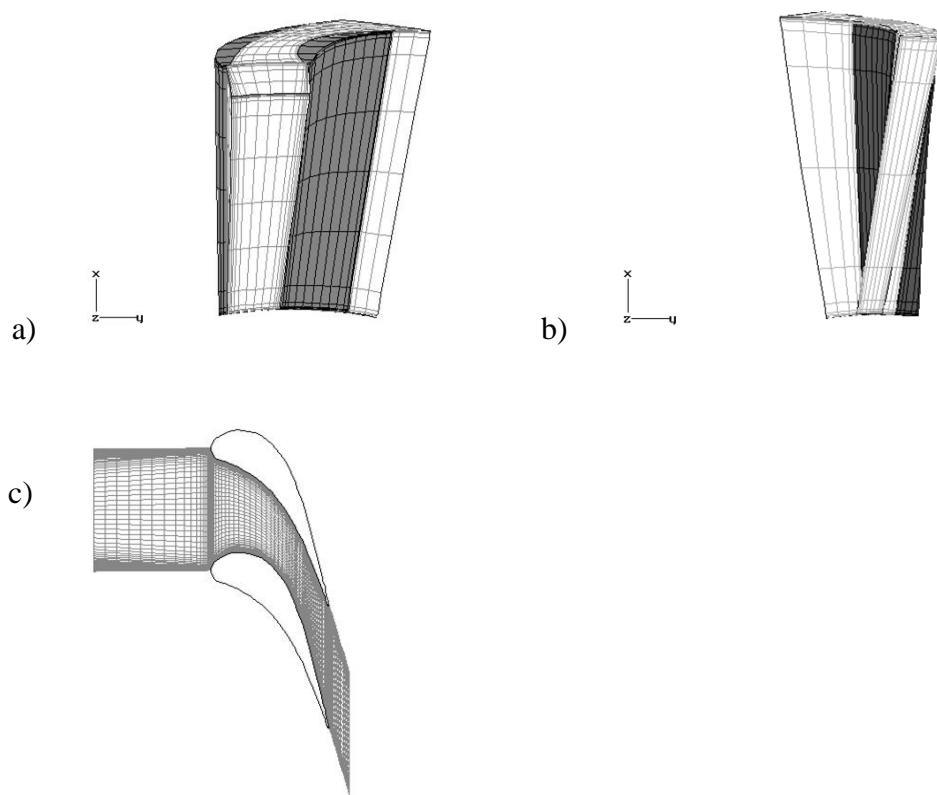
Jednym ze zjawisk występujących w okołodźwiękowym przepływie pary przez palisadę turbinową jest zjawisko powstawania skośnej fali uderzeniowej w ostatnich stopniach turbin parowych. Towarzyszące mu skokowe zmiany parametrów przepływu nie tylko zaburzają poprawną pracę turbiny, ale przede wszystkim stanowią zagrożenie dla jej elementów

konstrukcyjnych. Powstawanie skośnej fali uderzeniowej związane jest z przyrostem prędkości przepływu czynnika. Może być on spowodowany zarówno wzrostem ciśnienia pary na wlocie do stopnia, jak i występowaniem erozyjnych uszkodzeń łopatek turbiny (takich jak uszkodzenie krawędzi spływu) powstających i pogłębiających się w czasie eksploatacji.

Detekcja fali uderzeniowej oraz lokalizacja miejsca jej występowania wymaga znajomości rzeczywistych rozkładów parametrów czynnika roboczego (tj. ciśnienia, prędkości itp.). Uzyskanie rozkładów poszczególnych parametrów przepływu na drodze pomiarowej nie jest możliwe, gdyż wymagałoby umieszczenia licznych czujników pomiarowych wewnątrz kanału przepływowego, zakłócających swobodny przepływ czynnika roboczego. Dla potrzeb cieplno-przepływowej diagnostyki palisad turbinowych można natomiast stworzyć modele numeryczne bądź neuronowe, które pozwolą zobrazować zjawiska zachodzące wewnątrz kanału przepływowego w oparciu o wartości parametrów czynnika roboczego na wlocie i wylocie z kanału. Proponowane rozwiązanie umożliwiłoby detekcję fali uderzeniowej oraz określenie przyczyny jej powstawania bez ingerencji w przepływ czynnika oraz bez konieczności odstawiania maszyny przepływowej na czas wykonywania badań diagnostycznych (tzw. diagnostyka on-line).

## 2. MODEL NUMERYCZNY

Obliczenia numeryczne wykonano dla przykładowej geometrii dwustopniowej turbiny parowej małej mocy, dla trzech rozpatrywanych przypadków. Utworzono trójwymiarową strukturalną siatkę kanału przepływowego (rys. 1) oraz zadano wartości warunków brzegowych na jego wlocie oraz wylocie.



Rys. 1. Widok numerycznej siatki kanału przepływowego: a) kierownica pierwszego stopnia; b) wirnik pierwszego stopnia; c) przekrój u stopy łopatki kierowniczej, w płaszczyźnie YOZ

Pierwszym rozważanym przypadkiem była praca turbiny w warunkach nominalnych. Podczas symulacji numerycznej zadano następujące wielkości:

- na wlocie:      temperatura całkowita      332,85°C  
                         ciśnienie całkowite              19,7 kPa  
                         ciśnienie statyczne              19,0 kPa
- na wylocie:      ciśnienie statyczne              10,0 kPa

W przypadku drugim – praca turbiny przy obniżonych parametrach – zmniejszono wartości ciśnień:

- na wlocie:      temperatura całkowita      332,85°C  
                         ciśnienie całkowite              10,0 kPa  
                         ciśnienie statyczne              9,6 kPa
- na wylocie:      ciśnienie statyczne              5,0 kPa

Trzeci przypadek dotyczył dwuprocentowego zniszczenia krawędzi spływu łopatki kierowniczej pierwszego stopnia. Przyjęto nominalne wartości parametrów pracy turbiny, a uszkodzenie łopatki zamodelowano poprzez zmianę jej geometrii.

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono w postaci rozkładów ciśnień oraz rozkładów liczby Macha i zestawiono w tabl. 1-3 oraz na rys. 2.

#### 3.1. Parametry nominalne

Przy nominalnych parametrach pracy turbiny rozkłady ciśnienia oraz rozkłady liczby Macha odpowiadają okołodziesiękowemu charakterowi analizowanego przepływu (tabl. 1, rys. 2). Niższym wartościom ciśnienia w kanale przepływowym towarzyszą wyższe wartości liczby Macha – większe prędkości przepływu pary. Maksymalna wartość liczby Macha, zbliżona do jedności, występuje u stopy łopatki kierowniczej pierwszego stopnia – w 0,65% jej rozpiętości.

Maksimum prędkości przepływu pary przez wieniec wirnikowy wystąpiło przy wierzchołku łopatki, a jego wartość była zauważalnie niższa od maksimum w wieńcu kierowniczym. W drugim stopniu analizowanej turbiny zaobserwowano dalszy spadek wartości liczby Macha w stosunku do stopnia pierwszego, stąd podczas analizy parametrów przepływu największą uwagę poświęcono pierwszemu wieńcowi kierowniczemu.

#### 3.2. Obniżone parametry

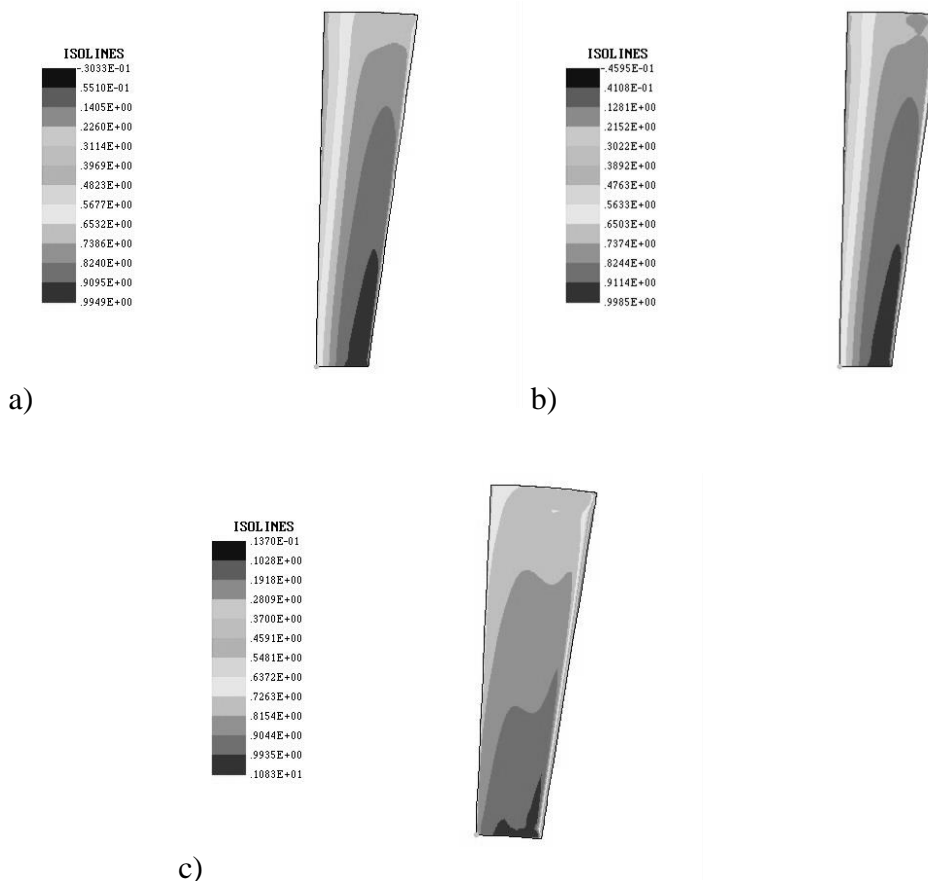
Obniżenie parametrów pary na wlocie do stopnia nie wpłynęło w istotny sposób na charakter rozkładów rozważanych parametrów, które zmieniły się proporcjonalnie do spadku wielkości zadawanych podczas symulacji numerycznych (tabl. 2, rys. 2). Widoczne jest niewielkie



przesunięcie maksimum prędkości przepływu pary z 0,65% rozpiętości łopatki kierowniczej pierwszego stopnia do 0,78% jej rozpiętości. Wartość prędkości we wspomnianym przekroju jest o 0,36% wyższa w stosunku do wartości występującej w przypadku pracy turbiny przy parametrach nominalnych.

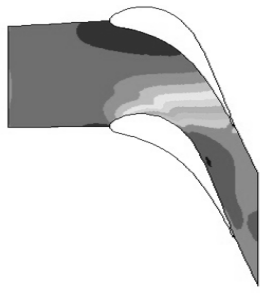
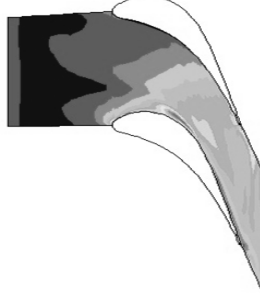
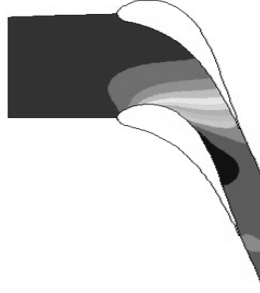
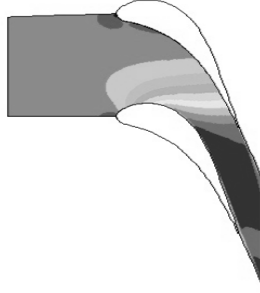
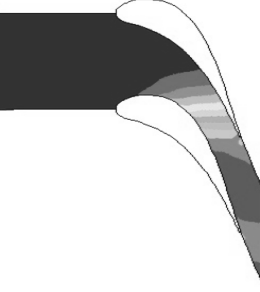
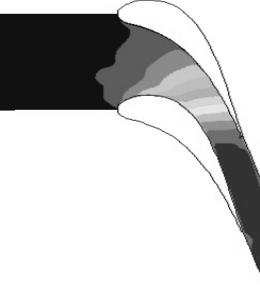
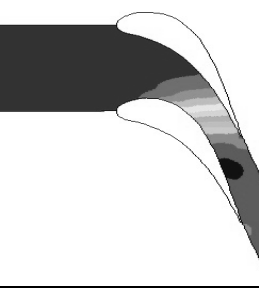
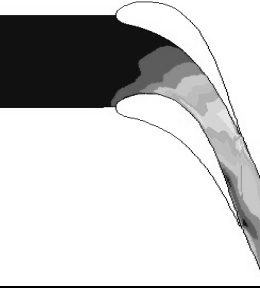
### 3.3. Zniszczenie krawędzi splywu

Ostatnim rozpatrywanym przypadkiem było dwuprocentowe zniszczenie krawędzi splywu łopatki kierowniczej pierwszego stopnia. Zamodelowane uszkodzenie spowodowało wzrost maksymalnej wartości liczby Macha i jednocześnie przekroczenie przez nią wartości granicznej – powodując w efekcie wystąpienie skośnej fali uderzeniowej (tabl. 3, rys. 2). Lokalizacja obserwowanego zjawiska (1,23% rozpiętości łopatki kierowniczej) jest zbliżona do miejsca występowania maksymalnej wartości prędkości przepływu pary zarówno przy nominalnych parametrach pracy turbiny, jak i przy parametrach obniżonych. Charakter rozkładów ciśnienia oraz liczby Macha również nie różni się znacząco od poprzednich dwóch przypadków.

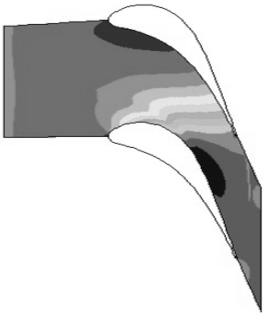
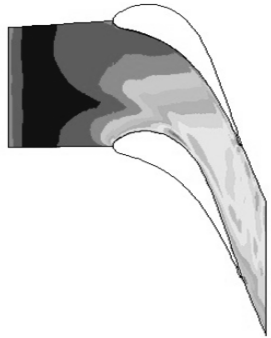
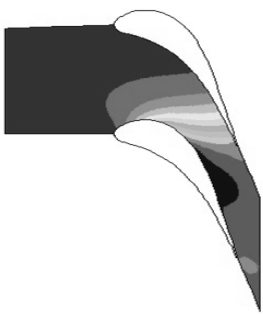
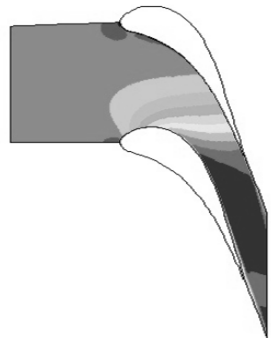
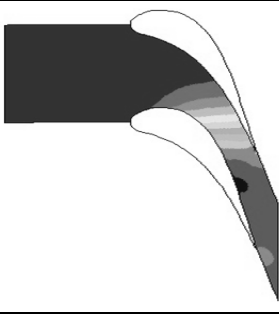
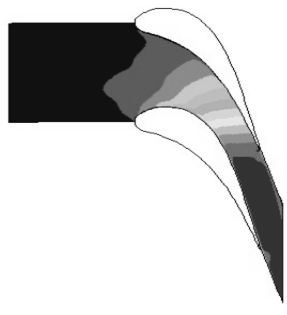
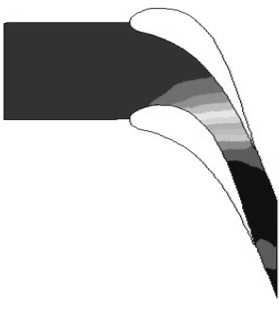
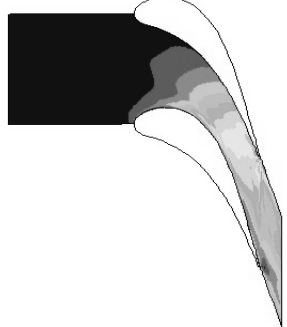


Rys. 2. Rozkład liczby Macha w kanale przepływowym kierownicy pierwszego stopnia w płaszczyźnie XOY, w miejscu występowania wartości maksymalnej: a) przy nominalnych parametrach pracy turbiny; b) przy parametrach obniżonych; c) przy dwuprocentowym ścięciu krawędzi splywu

Tablica 1. Zestawienie rozkładów ciśnienia oraz rozkładów liczby Macha w płaszczyźnie YOZ dla wybranych rozpiętości łopatki kierowniczej pierwszego stopnia przy nominalnych parametrach pracy turbiny

Rozpiętość łopatki [%]	Rozkład ciśnienia w płaszczyźnie YOZ [Pa]	Rozkład liczby Macha w płaszczyźnie YOZ [-]
99,98	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1410E+05</li> <li>1462E+05</li> <li>1506E+05</li> <li>1550E+05</li> <li>1595E+05</li> <li>1639E+05</li> <li>1683E+05</li> <li>1728E+05</li> <li>1772E+05</li> <li>1816E+05</li> <li>1860E+05</li> <li>1905E+05</li> <li>1949E+05</li> </ul> 	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3055E-03</li> <li>1905E-01</li> <li>3780E-01</li> <li>5655E-01</li> <li>7530E-01</li> <li>9405E-01</li> <li>1128E+00</li> <li>1315E+00</li> <li>1503E+00</li> <li>1690E+00</li> <li>1878E+00</li> <li>2065E+00</li> <li>2253E+00</li> </ul> 
52,72	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1282E+05</li> <li>1340E+05</li> <li>1397E+05</li> <li>1455E+05</li> <li>1512E+05</li> <li>1569E+05</li> <li>1627E+05</li> <li>1684E+05</li> <li>1742E+05</li> <li>1799E+05</li> <li>1857E+05</li> <li>1914E+05</li> <li>1971E+05</li> </ul> 	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1068E-01</li> <li>8309E-01</li> <li>1555E+00</li> <li>2279E+00</li> <li>3003E+00</li> <li>3727E+00</li> <li>4451E+00</li> <li>5175E+00</li> <li>5899E+00</li> <li>6623E+00</li> <li>7347E+00</li> <li>8071E+00</li> <li>8795E+00</li> </ul> 
0,65	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1063E+05</li> <li>1137E+05</li> <li>1210E+05</li> <li>1284E+05</li> <li>1358E+05</li> <li>1432E+05</li> <li>1506E+05</li> <li>1580E+05</li> <li>1654E+05</li> <li>1728E+05</li> <li>1802E+05</li> <li>1875E+05</li> <li>1949E+05</li> </ul> 	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>4083E-02</li> <li>8665E-01</li> <li>1692E+00</li> <li>2518E+00</li> <li>3343E+00</li> <li>4169E+00</li> <li>4995E+00</li> <li>5820E+00</li> <li>6646E+00</li> <li>7472E+00</li> <li>8297E+00</li> <li>9123E+00</li> <li>9949E+00</li> </ul> 
0,02	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1107E+05</li> <li>1177E+05</li> <li>1248E+05</li> <li>1318E+05</li> <li>1389E+05</li> <li>1459E+05</li> <li>1530E+05</li> <li>1601E+05</li> <li>1671E+05</li> <li>1742E+05</li> <li>1812E+05</li> <li>1883E+05</li> <li>1953E+05</li> </ul> 	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1154E-03</li> <li>3471E-01</li> <li>6930E-01</li> <li>1039E+00</li> <li>1385E+00</li> <li>1731E+00</li> <li>2077E+00</li> <li>2423E+00</li> <li>2769E+00</li> <li>3114E+00</li> <li>3460E+00</li> <li>3806E+00</li> <li>4152E+00</li> </ul> 

Tablica 2. Zestawienie rozkładów ciśnienia oraz rozkładów liczby Macha w płaszczyźnie YOZ dla wybranych rozpiętości łopatki kierowniczej pierwszego stopnia, przy obniżonych parametrach pracy turbiny

Rozpiętość łopatki [%]	Rozkład ciśnienia w płaszczyźnie YOZ [Pa]	Rozkład liczby Macha w płaszczyźnie YOZ [-]
99,98	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>7264E+04</li> <li>7487E+04</li> <li>7711E+04</li> <li>7934E+04</li> <li>8157E+04</li> <li>8381E+04</li> <li>8604E+04</li> <li>8828E+04</li> <li>9051E+04</li> <li>9274E+04</li> <li>9498E+04</li> <li>9721E+04</li> <li>9944E+04</li> </ul> 	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>7152E-03</li> <li>1236E-01</li> <li>2401E-01</li> <li>3566E-01</li> <li>4731E-01</li> <li>5895E-01</li> <li>7060E-01</li> <li>8225E-01</li> <li>9390E-01</li> <li>1055E+00</li> <li>1172E+00</li> <li>1288E+00</li> <li>1405E+00</li> </ul> 
52,72	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>6474E+04</li> <li>6769E+04</li> <li>7063E+04</li> <li>7357E+04</li> <li>7651E+04</li> <li>7945E+04</li> <li>8240E+04</li> <li>8534E+04</li> <li>8828E+04</li> <li>9122E+04</li> <li>9416E+04</li> <li>9710E+04</li> <li>1.000E+05</li> </ul> 	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>9521E-02</li> <li>8252E-01</li> <li>1555E+00</li> <li>2285E+00</li> <li>3015E+00</li> <li>3745E+00</li> <li>4475E+00</li> <li>5205E+00</li> <li>5935E+00</li> <li>6665E+00</li> <li>7395E+00</li> <li>8125E+00</li> <li>8856E+00</li> </ul> 
0,78	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>5528E+04</li> <li>5893E+04</li> <li>6257E+04</li> <li>6622E+04</li> <li>6986E+04</li> <li>7351E+04</li> <li>7715E+04</li> <li>8080E+04</li> <li>8444E+04</li> <li>8809E+04</li> <li>9173E+04</li> <li>9538E+04</li> <li>9902E+04</li> </ul> 	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>4193E-02</li> <li>8705E-01</li> <li>1699E+00</li> <li>2528E+00</li> <li>3356E+00</li> <li>4185E+00</li> <li>5013E+00</li> <li>5842E+00</li> <li>6670E+00</li> <li>7499E+00</li> <li>8327E+00</li> <li>9156E+00</li> <li>9985E+00</li> </ul> 
0,02	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>5828E+04</li> <li>6169E+04</li> <li>6510E+04</li> <li>6851E+04</li> <li>7192E+04</li> <li>7533E+04</li> <li>7873E+04</li> <li>8214E+04</li> <li>8555E+04</li> <li>8896E+04</li> <li>9237E+04</li> <li>9578E+04</li> <li>9919E+04</li> </ul> 	<p><b>ISOLINES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2150E-03</li> <li>2254E-01</li> <li>4486E-01</li> <li>6718E-01</li> <li>8951E-01</li> <li>1118E+00</li> <li>1342E+00</li> <li>1565E+00</li> <li>1788E+00</li> <li>2011E+00</li> <li>2234E+00</li> <li>2458E+00</li> <li>2681E+00</li> </ul> 

Tablica 3. Zestawienie rozkładów ciśnienia oraz rozkładów liczby Macha w płaszczyźnie YOZ dla wybranych rozpiętości łopatki kierowniczej pierwszego stopnia, przy dwuprocentowym uszkodzeniu krawędzi splywu

Rozpiętość łopatki [%]	Rozkład ciśnienia w płaszczyźnie YOZ [Pa]	Rozkład liczby Macha w płaszczyźnie YOZ [-]
99,98		
52,72		
1,23		
0,02		

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone obliczenia numeryczne umożliwiły analizę zjawisk zachodzących wewnątrz kanału przepływowego analizowanej turbiny parowej małej mocy, niemożliwych do zaobserwowania w warunkach rzeczywistych. Potwierdziły również wpływ spadku parametrów przepływu na wlocie do stopnia oraz uszkodzenia krawędzi splywu łopatki kierowniczej na warunki pracy analizowanej turbiny. Otrzymane wyniki są zgodne

z założeniami teoretycznymi i świadczą o możliwościach diagnostycznych, jakie oferują obliczenia numeryczne CFD.

Stworzenie modelu neuronowego będącego odpowiednikiem analizowanego modelu numerycznego wpłynęłoby korzystnie na szybkość wykonywanych obliczeń, nie zmieniając przy tym ich dokładności. Wyniki uzyskane na drodze symulacji numerycznych posłużyłyby wówczas jako baza do nauki tworzonej sieci neuronowej, której „budowa” nie wymaga znajomości skomplikowanych zależności matematycznych wiążących poszczególne parametry przepływu czynnika roboczego.

Modele oparte o sztuczne sieci neuronowe, umożliwiające szybką detekcję i jednocześnie lokalizację skośnych fal uderzeniowych, są zatem szansą dla ciepłno-przepływowej diagnostyki on-line maszyn przepływowych.

## LITERATURA

- [1] *O zastosowaniu neuronowych symulatorów przepływu przez kanały łopatkowe turbin do wyznaczania stanu referencyjnego w diagnostyce ciepłno-przepływowej*, pod red. J. Głucha, Gdańsk, 2014 (przyjęta do druku).
- [2] Świrydczuk J., Szymaniak M.: *Analiza profili kierowniczych wieńców turbinowych w aspekcie zastosowania w obliczeniach neuronowych*, OW WOiO 26/11/PB.
- [3] *Fluent User's Guide*, Fluent Inc., 2006.
- [4] *Gambit Modeling Guide*, Fluent Inc., 1988-2012.