

## **SPIS NADESŁANYCH ABSTRAKTÓW NA XVIIKKMPL BELCHTÓW'06**

1. Witold Elsner, Marian Wysocki, Stanisław Drobnik, METODYKA DETEKCJI SPOTÓW TURBULENTNYCH Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY WAVELET
2. Władysław Piotrowski, Witold Elsner, MODELOWANIE PRZEJŚCIA LAMINARNO-TURBULENTNEGO Z WYKORZYSTANIEM RÓWNIANIA TRANSPORTU INTERMITENCJI
3. Alicja Jarża, Renata Gnatowska, INTERFERENCJA ZJAWISK NIESTACJONARNYCH PRZY OPŁYWIE UKŁADU SZTYWNYCH PRĘTÓW
4. Marcin Huptas, Alicja Jarża, MODELOWANIE ZJAWISK PRZEPŁYWOWYCH W PRZYZIEMNEJ STREFIE ZABUDOWANEJ
5. Krzysztof Kubryński, ROZWAŻANIA NAD OPŁYWEM I OPOREM SKRZYDŁA O SKOŃCZONEJ ROZPIĘTOŚCI
6. Zbigniew Nosal, Witold Selerowicz, BADANIA PROFILU NADKRYTYCZNEGO W WARUNKACH DUŻEJ WILGOTNOŚCI POWIETRZA
7. Piotr Doerffer, Oskar Szulc, OSŁABIENIE FALI UDERZENIOWEJ POPRZECZ ZASTOSOWANIE PASYWNEJ KONTROLI
8. Monika Warmowska, Jan Jankowski, WPŁYW PORUSZAJĄCEGO SIĘ ŁADUNKU PŁYNNEGO NA RUCH STATKU
9. Bogdan Antoszewski, Jacek Rokicki, WPŁYW NIEJEDNORODNOŚCI POWIERZCHNI NA PRZEPŁYW W USZCZELNIENIU CZOŁOWYM
10. Mariusz Niklas, Dariusz Asendrych, MODELOWANIE PRZEPŁYWU PŁYNU O ZŁOŻONYCH WŁASNOŚCIACH REOLOGICZNYCH
11. Jarosław Błaszczak, BADANIA WARSTW PRZYŚCIENNYCH NA PROFILACH KIEROWNICZYCH W WYSOKOOBciążONEJ TURBINIE DWUSTOPNIOWEJ
12. Jarosław Błaszczak, BADANIA KORELACJI HAŁASU PRZEPŁYWU, SPRAWNOŚCI ORAZ POZIOMU DRGAŃ DLA PRZYPADKU DWUSTOPNIOWEJ TURBINY
13. Andrzej Gardzilewicz, Jerzy Świryczuk, Barbara Kurant, STRATY W PRZEPŁYWACH PRZECZ STOPNIE W PROJEKTOWANIU TURBIN PAROWYCH
14. Marek Grudziński, BADANIA ROZKŁADÓW CIŚNIENIA W DYFUZORZE ŁOPATKOWYM PROMIENIOWEGO STOPNIA SPRĘŻAJĄCEGO

15. Marcin Janczak, Janusz Plutecki, WPŁYW POŁA PRZEPŁYWU NA WŁASNOŚCI SSAWNE WIRNIKA WIELOSTOPNIOWEJ POMPY WIROWEJ
16. Piotr Lampart, BADANIA NUMERYCZNE PRZECIEKU NADŁOPATKOWEGO W TURBINACH OSIOWYCH
17. Antoni Smolny, Jarosław R. Błaszczak, WPŁYW WZAJEMNEGO USTAWIENIA KIEROWNIC NA POLE PRZEPŁYWU W DWUSTOPNIOWEJ TURBINIE BADAWCZEJ
18. Mariusz Szymaniak, OBLICZENIA NUMERYCZNE STOPNI TURBIN PAROWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM UPUSTÓW REGENERACYJNYCH
19. Jerzy Świryczuk, PROBLEM ROZDZIELCZOŚCI SIATKI W ANALIZACH NUMERYCZNYCH ODDZIAŁYWANIA KIEROWNICA/WIRNIK
20. Dariusz Asendrych, SYMULACJA PRZEPŁYWU W SEPARATORZE ZANIECZYSZCZEŃ
21. Grzegorz Borsuk, Bolesław Dobrowolski, Jacek Wydrych, PRZEPŁYW MIESZANINY GAZ-CZĄSTKI STAŁE PRZEZ UKŁAD DWÓCH KOLAN
22. Włodzimierz Wróblewski, Sławomir Dykas, Aleksandra Gepert, PROBLEMATYKA WERYFIKACJI OBLICZEŃ PRZEPŁYWU MOKREJ PARY WODNEJ
23. Marek Jaszczur, Luis Portela, DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN PARTICLE-LADEN TURBULENT FLOWS
24. Robert Sekret, Wojciech Nowak, WPŁYW WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH W KOMORZE PALENISKOWEJ KOTŁA Z CWF O MOCY 670 MW NA EMISJĘ ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH
25. Agnieszka Słowicka, Zbigniew A. Walenta, POWSTAWANIE NANOSTRUKTUR W EMULSIACH
26. Tomasz Wacławczyk, Tadeusz Koronowicz, MODELOWANIE PRZEPŁYWU ZE SWOBODNĄ POWIERZCHNIĄ ZA POMOCĄ SCHEMATÓW WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI
27. Artur Bartosik, MODELOWANIE PRZEPŁYWU TURBULENTNEGO Z ZASTOSOWANIEM REOLOGICZNEGO MODELU HERSCHEL'A-BULKLEY'A
28. Sławomir Dykas, Tadeusz Chmielniak, NOWE BADANIA EKSPERYMENTALNE PRZEPŁYWÓW OKOŁODŹWIĘKOWYCH Z KONDENSACJĄ
29. Elżbieta Fornalik, Piotr Filar, Hiroyuki Ozoe, Janusz S. Szmyd, KONWEKCJA MAGNETYCZNA W NACZYNIU CYLINDRYCZNYM
30. Elżbieta Moryń-Kucharczyk, Pavel Jonáš, Oton Mazur, Maciej Podolski, Václav Uruba, ZASTOSOWANIE TECHNIKI TERMOANEMOMETRYCZNEJ W

BADANIACH MODELOWYCH NAD ROZPRZESTRZENIANIEM SIĘ  
ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH

31. Tomasz A. Kowalewski, Sławomir Błoński, MICROFLOWS AND NANOFIBRES
32. Zbigniew Matras, Stanisław Walczak, ANORMALNE ZJAWISKO PRZEPŁYWOWE WYWOŁANE DODATKAMI POLIMEROWO – MICELARNYMI
33. Zbigniew Matras, Stanisław Walczak, IDENTYFIKACJA ZŁOŻONYCH REOLOGICZNIE CIECZY NIENEWTONOWSKICH
34. Paweł Mirek, Wojciech Nowak, BADANIA WARUNKÓW PRZEPŁYWOWYCH TWORZĄCYCH SIĘ W SKRZYNIACH POWIETRZNYCH KOTŁÓW Z CWF DUŻEJ MOCY
35. Paweł Mirek, Wojciech Nowak, TECHNIKA LASEROWEGO NOŻA ŚWIETLNEGO W BADANIACH UKŁADÓW FLUIDYZACYJNYCH
36. Łukasz Malinowski , Kazimierz Rup, ANALIZA TEORETYCZNO DOŚWIADCZALNA POMIARU STRUMIENIA OBJĘTOŚCI PŁYNU ZA POMOCĄ PRZEPŁYWOMIERZA KOLANOWEGO
37. Aleksander Olczyk, Krzysztof Sobczak, ANALIZA NIESTACJONARNYCH ZJAWISK PRZEPŁYWOWYCH W PRZEWODACH ZASILANYCH PRZEPŁYWEM PULSACYJNYM
38. Maciej Podolski, NIESTACJONARNE ZJAWISKA TERMICZNE PODCZAS CHŁODZENIA CYLINDRA TURBULENTNYM STRUMIENIEM OSCYLACYJNYM
39. Jan Artur Szumski, Piotr Doerffer, ZASTOSOWANIE FARBY CZUŁEJ NA CIŚNIENIE W RZEPŁYWACH TRANSONICZNYCH (PSP METHOD)
40. Artur Tyliczszak, Andrzej Bogusławski, MODELOWANIE STRUG BIFURKUJĄCYCH METODĄ LES
41. Sławomir Kubacki, Andrzej Bogusławski, ZASTOSOWANIE METODY MACIERZY WPŁYWU W POŁĄCZENIU Z METODĄ DEKOMPOZYCJI OBSZARU OBLICZENIOWEGO DO ROZWIĄZANIA RÓWNAŃ NAVIERA-STOKESA
42. Michał Stępień, Andrzej Bogusławski, MATEMATYCZNE MODELOWANIE TRÓJWYMIAROWEGO OGNIWA PALIWOWEGO TYPU PEM
43. Bolesław Dobrowolski, Krzysztof Kręcisz, ANALIZA WPŁYWU ZAWIROWANIA STRUGI NA WŁASNOŚCI METROLOGICZNE KRYZY POMIAROWEJ

44. Sławomir Dykas, Włodzimierz Wróblewski, Tadeusz Chmielniak,  
NUMERYCZNE MODELOWANIE AERODYNAMICZNEGO HAŁASU  
METODĄ SPRZĘŻONĄ URANS+EULER
45. Paweł Flaszyński, Ryszard Szwaba, EKSPERYMENTALNO-NUMERYCZNA  
ANALIZA GENERATORA WIROW WZDŁUŻNYCH W PRZEPŁYWIE  
PODDŹWIĘKOWYM
46. Hubert Jopek, SYMULACJA KONWEKCJI CIEPLNEJ W ZALEŻNOŚCI OD  
KĄTA POMIĘDZY SIŁĄ CIĘŻKOŚCI A GRADIENTEM TEMPERATURY
47. Mirosław Kabaciński, Janusz Pospolita, OCENA STOSOWALNOŚCI  
WYBRANYCH MODELI TURBULENCJI W BADANIACH  
NUMERYCZNYCH OPŁYWÓW Z ODERWANIEM STRUGI
48. Mirosława Kołodziejczyk, PŁASKI NIESTACJONARNY PRZEPŁYW  
CIECZY LEPKIEJ W OBSZARZE O NIEREGULARNYM BRZEGU
49. Zbigniew Kosma, ROZWIĄZYWANIE ZAGADNIEŃ PŁASKIEGO RUCHU  
CIECZY LEPKIEJ SFORMUŁOWANYCH DLA FUNKCJI PRĄDU
50. Wojciech Litwin, Paweł Flaszyński, PRÓBA WYKORZYSTANIA PROGRAMU  
FLUENT DO OBLICZANIA HYDRODYNAMICZNYCH OKRĘTOWYCH  
ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH SMAROWANYCH WODĄ
51. Jerzy Majewski, ANISOTROPOWA ADAPTACJA DLA  
TRÓJWYMIAROWYCH STACJONARNYCH I NIESTACJONARNYCH  
PRZEPŁYWÓW ŚCIŚLIWYCH
52. Robert Roszak, Piotr Posadzy, Marek Morzyński, SYMULACJE  
AEROELASTYCZNE Z UWZGLĘDNIENIEM NIELINIOWYCH  
WŁASNOŚCI MODELI STRUKTURALNYCH
53. Marek Morzyński, Witold Stankiewicz, Bernd Noack, Rudibert King, Frank  
Thiele, Gilead Tadmor, PROBLEMY STEROWANIA PRZEPŁYWEM Z  
ZASTOSOWANIEM GLOBALNEJ ANALIZY STABILNOŚCI I  
MODELOWANIA NISKOWYMIAROWEGO
54. Piotr Posadzy, Robert Roszak, Marek Morzyński, OBLICZENIA  
AEROELASTYCZNE OBIEKTÓW O ZŁOŻONEJ GEOMETRII
55. Witold Stankiewicz, Marek Morzyński, Bernd R. Noack, NISKOWYMIAROWE  
MODELE PRZEPŁYWU WOKÓŁ CYLINDRA OPARTE NA MODACH POD  
ORAZ MODACH WŁASNYCH GLOBALNEJ ANALIZY STABILNOŚCI
56. Zbigniew Kosma, Bogdan Noga, ROZWIĄZYWANIE ZAGADNIEŃ RUCHU  
CIECZY LEPKIEJ METODĄ SZTUCZNEJ ŚCIŚLIWOŚCI
57. Marta Poćwierz, Andrzej Styczek, WYZNACZANIE SIŁY DZIAŁAJĄCEJ NA  
BRYŁĘ OPŁYWANĄ CIECZĄ PRZY RUCHU ZMIENNYM W CZASIE
58. Marek Rabiega, GRADIENTOWA PRZEZ WRAŻLIWOŚĆ  
OPTIMALIZACJA KSZTAŁTU ŚCIAN KANAŁÓW MASZYN

PRZEPŁYWOWYCH DLA USTALONYCH PRZEPŁYWÓW BURZLIWYCH  
I NIELEPKICH

59. Jacek Rokicki, Robert Wieteska, METODA WENO TRZECIEGO RZĘDU NA PRZESTRZENNYCH SIATKACH NIESTRUKTURALNYCH
60. Łukasz Jeziorek, Jacek Rokicki, SPRĘŻENIE ELASTYCZNO - PRZEPŁYWOWE W SYMULACJACH PRZEPŁYWÓW OKOŁODŹWIĘKOWYCH
61. Jacek Rokicki, Michał Wichulski, ALGORYTM SZYBKIEJ LOKALIZACJI PUNKTU NA SIATKACH TRÓJKĄTNYCH I TETRAHEDRALNYCH
62. Przemysław Skotniczny, TRÓJWYMIAROWA SYMULACJA ZJAWISK PRZEPŁYWOWYCH W KOPALNIANYCH SIECIACH WENTYLACYJNYCH
63. Jolanta Stacharska - Targosz, Monika Chmielowiec, PORÓWNANIE ADEKWATNOŚCI WYBRANYCH METOD NUMERYCZNYCH DO OPISU POŁA PRZEPŁYWU W WENTYLATORZE POPRZECZNYM; CZĘŚĆ I CHARAKTERYSTYKA ZASTOSOWANYCH METOD NUMERYCZNYCH ANSYS I FLO++
64. Jolanta Stacharska – Targosz, Monika Chmielowiec, PORÓWNANIE ADEKWATNOŚCI WYBRANYCH METOD NUMERYCZNYCH DO OPISU POŁA PRZEPŁYWU W WENTYLATORZE POPRZECZNYM; CZĘŚĆ II ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH I BADAŃ DOSWIADCZALNYCH
65. Tomasz Stręk, ANALIZA WPŁYWU POŁA MAGNETYCZNEGO NA PRZEPŁYW CIEPŁA W PŁYNIE FERROMAGNETYCZNYM
66. Artur Zieliński, Ewa Tuliszk-Sznitko, SYMULACJA NUMERYCZNA IZOTERMICZNYCH I NIE-IZOTERMICZNYCH PRZEPŁYWÓW W WIRUJĄCYCH PRZESTRZENIACH
67. Krzysztof Mizerski, Konrad Bajer, DWUWYMIAROWY PRZEPŁYW STOKES'A W CYLINDRYCZNYM FILTRZE
68. Jarosław Bartoszewicz, Leon Bogusławski, WPŁYW ZMIAN PRĘDKOŚCI W PRZĘKROJU WYLOTOWYM DYSZY NA STRUKTURĘ PŁYNU W KOMORZE NAWROTNEJ
69. Jarosław Bartoszewicz, Leon Bogusławski, WPŁYW ZMIAN STOPNIA TURBULENCJI W PRZĘKROJU WYLOTOWYM DYSZY NA STRUKTURĘ PŁYNU W KOMORZE NAWROTNEJ
70. Dariusz Kardaś, MODEL PRZEPŁYWU PŁYNU Z DWOMA CIŚNIENIAMI
71. Krystyna Jeżowiecka-Kabsch, Katarzyna Strzelecka, WPŁYW LICZBY REYNOLDSA NA STRUKTURĘ POŁA PRĘDKOŚCI ZA ROZSZERZENIEM RURY

72. Marta Waclawczyk, Martin Oberlack, ZASTOSOWANIE METODY GRUP LIEGO DO ANALIZY RÓWNAŃ FUNKCJONALNYCH HOPFA
73. Witold Elsner, Robert Zarzycki, WPLYW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI NA STRUKTURĘ ŚLADU ZA PRĘTEM CYLINDRYCZNYM
74. Jacek Pozorski, Mirosław Łuniewski, WPLYW EFEKTÓW PODSIATKOWYCH NA RUCH CZĄSTEK W TURBULENTNYM PRZEPŁYWIE PRZYŚCIENNYM
75. Jan Kulczyk, Maciej Zawiślak, METODY NUMERYCZNE W OPISIE RUCHU STATKU NA WODZIE PŁYTKIEJ
76. Mateusz Grzelczak, WPLYW KĄTA ZAWIROWANIA WSTĘPNEGO NA SPRAWNOŚĆ PROCESU SPRĘŻANIA DMUCHAWY DA 200 WSPÓRACUJĄCEJ Z WIRNIKAMI O ZRÓŻNICOWANYM SPOSOBIE SKRACANIA ŁOPATEK
77. Zygmunt Wierciński, Maciej Kaiser, ANALOGIA WYMIANY CIEPŁA I PĘDU PRZY NIESTACJONARNYM OPLYWIE PŁYTY
78. Zbigniew Zarzycki, Kamil Urbanowicz, MODELOWANIE STANÓW NIEUSTALONYCH PODCZAS UDERZENIA HYDRAULICZNEGO Z UWZGLĘDNIENIEM KAWITACJI PRZEJŚCIOWEJ W PRZEWODACH CIŚNIENIOWYCH
79. Kazimierz Wójs, Romuald Redzicki, Andrzej Sitka, KAWITACJA W PŁYNACH LEPICH I LEPKO-SPRĘŻYSTYCH
80. Michał Krężelewski, KOŁYSANIE WODOLOTU NA WZBURZONYM MORZU
81. Paweł Regucki, Henryk Kudela, MODELOWANIE ZJAWISKA REKONEKCJI PIERŚCIENI WIROWYCH METODĄ CZĄSTEK WIROWYCH
82. Henryk Kudela, Paweł Regucki, Ziemowit Malecha, ZASTOSOWANIE METODY CZĄSTEK WIROWYCH DO MODELOWANIA ODDZIAŁYWANIA TRÓJWYMIAROWYCH STRUKTUR WIROWYCH ZE ŚCIANKĄ SZTYWNĄ
83. Henryk Kudela, Ziemowit Malecha, BADANIE ERUPCJI WARSTWY WIROWEJ METODĄ CZĄSTEK WIROWYCH
84. Henryk Kudela, Ziemowit Malecha, BADANIE ERUPCJI WARSTWY WIROWEJ METODĄ CZĄSTEK WIROWYCH
85. Zbigniew Królicki, Rafał Florek, Bogusław Białko, MODEL MATEMATYCZNY PRZEPŁYWU MIESZANINY ZEOTROPOWEJ ZIĘBNIKÓW W WARUNKACH METASTABILNYCH

86. Zbigniew Królicki, Rafał Florek, Bogusław Biało, OSOBLIWOŚCI PRZEPŁYWÓW DWUFAZOWYCH MIESZANIN ZEOTROPOWYCH ZIĘBNIKÓW ZE ZNACZNYM SPADKIEM CIŚNIENIA
87. Jarosław Frączak, SYMULACJA DWUWYMIAROWYCH ODDZIAŁYWAŃ PARY WIRÓW METODĄ DYSKRETNÝCH WIRÓW
88. Andrzej Witkowski, Mirosław Majkut, Jacek Żukowski, WIELOASPEKTOWE BADANIA DOŚWIADCZALNE I NUMERYCZNE, STRUKTURY PRZEPŁYWU W OSIOWYM STOPNIU SPRĘŻAJĄCYM
89. Tadeusz Koronowicz, WPŁYW PRACY ŚRUBY NAPĘDOWEJ NA POLE PRĘDKOŚCI WOKÓŁ KADŁUBA STATKU
90. Andrzej Frąckowiak, ROZWIĄZANIE DWUWYMIAROWEGO RÓWNANIA NAVIERA-STOKESA WE WSPÓŁRZĘDNYCH ZESPOLONYCH



WITOLD ELSNER, MARIAN WYSOCKI, STANISŁAW DROBNIAK

## METODYKA DETEKCJI SPOTÓW TURBULENTNYCH Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY WAVELET

### DETECTION METHOD OF TURBULENT SPOTS USING WAVELET ANALYSIS

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki,  
Instytut Maszyn Ciepłych, al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,  
[welsner@imc.pcz.czest.pl](mailto:welsner@imc.pcz.czest.pl), [mawy@imc.pcz.czest.pl](mailto:mawy@imc.pcz.czest.pl), [drobniak@imc.pcz.czest.pl](mailto:drobniak@imc.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: przejście laminarno-turbulentne, spot turbulentny, analiza falkowa

Charakterystyczną cechą przejścia laminarno-turbulentnego jest pojawianie się w laminarnej warstwie przyściennej pojedynczych struktur charakteryzujących się wysokim poziomem intensywności turbulencji tzw. turbulentnych spotów. Struktury te o kształtach zbliżonych do grotu, przemieszczając się w dół przepływu rozrastają się we wszystkich kierunkach i powodują wyraźny przyrost warstwy przyściennej. Spoty turbulentne widoczne są w uzyskanym techniką termooanemometryczną sygnale jako jednoznacznie zlokalizowane obszary charakteryzujące się podwyższoną wartością prędkości oraz obecnością wysokoczęstotliwościowych fluktuacji. Analiza tego typu sygnałów przy pomocy tradycyjnej metody spektralnej jest nieskuteczna, gdyż wysokoczęstotliwościowe oscylacje sygnału powodują wzrost wartości wszystkich współczynników Fouriera co pociąga za sobą podniesienie wartości prążków widmowych w szerokim zakresie częstotliwości. W przypadku analizy przejścia laminarno-turbulentnego, poza poznaniem własności częstotliwościowych analizowanego zjawiska istnieje potrzeba zlokalizowania charakterystycznych „zdarzeń” - spotów turbulentnych - w czasie. Metodą, która pozwala nie tylko na uzyskanie dokładnych informacji częstotliwościowych, ale i na lokalizację czasową „zdarzeń” jest analiza falkowa.

W pracy do detekcji spotów turbulentnych w warstwie przyściennej na powierzchni profilu łopatkowego zastosowano analizę falkową wykorzystując falkę Morleta, która ze względu na dobrą efektywność w określeniu rozkładu skal czasowych [1] najlepiej nadaje się do identyfikacji tego typu „zdarzeń”. W oparciu o uzyskane skalogramy i wybrane linie współczynników transformaty, wyznaczone dla kolejnych trawersów pomiarowych, określono liczbę spotów wzdłuż strefy przejścia laminarno-turbulentnego. Informacja ta pozwoliła na wyznaczenie rozkładu współczynnika produkcji spotów turbulentnych tzw. „spot production rate”, który został porównany z rozkładami uzyskanymi w oparciu o znane z literatury korelacje empiryczne [2].

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] SHAIKH F.N., *Investigation of transition to turbulence using white-noise excitation and local analysis technique*, Journal of Fluid Mechanics 1997, **348**, 29-83.
- [2] GOSTELOW J.P., BLUNDEN A.R., WALKER G.J., *Effects of Free-Stream Turbulence and Adverse Pressure Gradients on Boundary Layer Transition*, ASME Journal of Turbomachinery 1994a, **116**, 392-404.



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: AERODYNAMIKA



WŁADYSŁAW PIOTROWSKI, WITOLD ELSNER

## MODELOWANIE PRZEJŚCIA LAMINARNO-TURBULENTNEGO Z WYKORZYSTANIEM RÓWNIANIA TRANSPORTU INTERMITENCJI MODELLING OF LAMINAR-TURBULENT TRANSITION WITH THE USE OF INTERMITTENCY TRANSPORT EQUATION

Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Ciepłych, Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa  
[welsner@imc.pcz.czest.pl](mailto:welsner@imc.pcz.czest.pl), [piotrowski@imc.pcz.czest.pl](mailto:piotrowski@imc.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: warstwa przyścienna, przejście laminarno-turbulentne, model transportu intermitencji

Modelowanie obszaru przejścia laminarno-turbulentnego w warstwie przyściennej jest jednym z trudniejszych przedsięwzięć numerycznej mechaniki płynów co wynika z bezpośredniej bliskości ścianki a więc dużych wymagań co do rozdzielczości siatki obliczeniowej jak również z niestacjonarnego charakteru tego procesu. Dodatkowo pożądanym jest aby modelowanie przejścia l-t bazowało zarówno na lokalnych parametrach przepływowych jak również uwzględniało historię przepływu. Jedną z bardziej interesujących propozycji pozwalającą na modelowanie warstwy przyściennej jest model przejścia laminarno-turbulentnego ( $\gamma$ - $Re_\theta$ ) opracowany przez Mentera i innych [1]. Model ten składa się z dwóch równań transportu, z których pierwsze jest równaniem transportu intermitencji  $\gamma$ , a drugie równaniem transportu liczby Reynoldsa opartej na mierze liniowej straty pędu  $Re_{\theta t}$ . Model ten był podstawą opracowanego w Instytucie Maszyn Ciepłych modelu ITM, który został rozszerzony o własne korelacje empiryczne na początek oraz długość przejścia l-t.

W pracy przedstawiono rezultaty obliczeń numerycznych dla kilku przypadków testowych. Pierwszą grupę stanowiły dane testowe dotyczące opływu płaskiej płyty, dostępne w bazie danych ERCOFTAC. W drugim etapie badań przeprowadzono obliczenia dla bardziej złożonej geometrii jaką był profil turbinowy N3-60 testowany eksperymentalnie w Instytucie Maszyn Ciepłych. W tym ostatnim przypadku przeprowadzono dodatkowo analizę wpływu turbulencji wlotowej na rozwój warstwy przyściennej. Dane numeryczne zostały porównane z wynikami uzyskanymi przy pomocy innych modeli przejścia l-t [2] jak również z danymi eksperymentalnymi. Wykazano, że procesy przejściowe w warstwie przyściennej mogą być z zadowalającą dokładnością modelowane przy wykorzystaniu równania transportu intermitencji.

### PIŚMIENICTWO CYTOWANE

- [1] MENTER, F., LANGTRY, R., S., SUZEN, Y., and HUANG, P., 2004, *A correlation-based transition model using local variables*, In Proceedings of ASME Turbo Expo, Vienna, Austria,
- [2] LODEFIER K., DICK E., PIOTROWSKI W., ELSNER W., *Modelling of wake induced transition with dynamic description of intermittency*, 6<sup>th</sup> European Turbomachinery Conference., Lille 2005, Paper No. 071\_05/66.



ALICJA JARŻA, RENATA GNATOWSKA

## INTERFERENCJA ZJAWISK NIESTACJONARNYCH PRZY OPŁYWIE UKŁADU SZTYWNYCH PRĘTÓW

### INTERFERENCE OF UNSTEADY PHENOMENA IN FLOW AROUND BLUFF- BODIES ARRANGEMENT

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki  
Instytut Maszyn Ciepłych, al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,  
[alicja@imc.pcz.czyst.pl](mailto:alicja@imc.pcz.czyst.pl), [gmatowska@imc.pcz.czyst.pl](mailto:gmatowska@imc.pcz.czyst.pl)

Słowa kluczowe: interferencja struktur wirowych, obciążenia aerodynamiczne

Prezentowana praca dotyczy analizy aerodynamicznej interakcji zjawisk niestacjonarnych (buffeting) generowanych przy opływie sztywnych prętów w układzie tandem z uwzględnieniem różnych odległości ich wzajemnego usytuowania w zakresie umożliwiającym obserwację różnych stanów dynamicznych. Podjęte rozważania koncentrują się na 2-wymiarowym przykładzie konfiguracji typu tandem dwóch sztywnych prętów ostrokrawędziowych, w której zjawiska aerodynamicznej interferencji obiektów, a w szczególności rezonansowa synchronizacja zjawisk okresowych objawia się w sposób szczególnie wyraźny [1,2]. Spodziewany skutek objawia się wzrostem dynamicznych obciążeń elementów układu oraz silnymi oscylacjami przepływu w bezpośrednim otoczeniu obiektów.

Badania zawarte w programie pracy koncentrują się przede wszystkim na analizie cech niestacjonarności zjawisk przepływowych obserwowanych w otoczeniu badanej konfiguracji, których cechą szczególną jest współistnienie periodycznych i losowych fluktuacji pól prędkości i ciśnień.

Praca ma charakter eksperymentalno-numeryczny. Zastosowano technikę termoanemometryczną oraz przetworniki ciśnienia o dużej dynamice odpowiedzi. Eksperyment jest wspomagany symulacją numeryczną z wykorzystaniem modelu turbulencji RNG k-ε zawierającego zmienne uśrednione fazowo. Uzyskane dane opisują proces generacji i rozwoju struktur wirowych w badanym przepływie oraz dają możliwość szacowania obciążeń dynamicznych przepływu z uwzględnieniem ich składowej oscylacyjnej.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] JARŻA A., GNATOWSKA R.: *Lock-on effect on unsteady loading of rigid bluff – body in tandem arrangement*. Proc. of International Conference on Urban Wind Engineering and Buildings Aerodynamics - von Karman Institute (cost C14), Rhode-St-Genese, Belgium, 2004, C.2.1-10.
- [2] HAVEL B., HANGAN H., MARTINUZZI R.: *Buffeting for 2D and 3D sharp-edged bluff bodies*. Journal of Wind Eng and Industrial Aerodynamics 2001, **89**, 1369-1381.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: AERODYNAMIKA



MARCIN HUPTAS, ALICJA JARŻA

## MODELOWANIE ZJAWISK PRZEPŁYWOWYCH W PRZYZIEMNEJ STREFIE ZABUDOWANEJ

### MODELLING OF WIND FLOW PHENOMENA IN THE BUILT ENVIRONMENT

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Maszyn Ciepłych,  
Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,  
[huptas@imc.pcz.czest.pl](mailto:huptas@imc.pcz.czest.pl), [alicja@imc.pcz.czest.pl](mailto:alicja@imc.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: aerodynamika obszarów zabudowanych, komfort wiatrowy, optymalizacja zagospodarowania terenu pod zabudowę

Współczesny rozwój numerycznych metod modelowania przepływu wiatru wokół budynków, mimo faktu, że nie są one wolne od niedoskonałości, dostarczyć może dobrych narzędzi dla architektów i planistów. Jednakże, w celu znalezienia rozwiązań optymalnych, niezbędna jest analiza dużej liczby przypadków i uwzględnienie wielu oddziaływań. Większą efektywność osiągnąć można zatem łącząc symulacje numeryczne z wielokryterialnymi procedurami optymalizacyjnymi. Parametrami decyzyjnymi wprowadzanymi do procedur optymalizacyjnych mogą być dane o rozmieszczeniu obiektów, ich geometrii bądź o warunkach napływu wiatru na rozważany obszar. Kryterium optymalizacyjne wynika z przyjętych założeń dotyczących warunków wiatrowych wyznaczających granice dyskomfortu. W praktyce projektowania przestrzennego obszarów zabudowanych za główną miarę komfortu wiatrowego przyjmuje się najczęściej lokalną wartość prędkości średniej, odniesioną do poziomu, który stanowi graniczną wartość dla zachowania w danym obszarze warunków korzystnych dla przebywających tam ludzi. Projekt architektoniczny uwzględniać może różne funkcje użytkowe przypisywane poszczególnym strefom obszaru zabudowanego i w zależności od tych założeń dla każdej kategorii stosowane być mogą różne graniczne poziomy parametru dyskomfortu [1].

Generowanie rozwiązań dla różnych parametrów decyzyjnych przyjętych w fazie projektowania zabudowy i poszukiwanie konfiguracji optymalnych pod kątem minimalizacji obszarów dyskomfortu wiatrowego z łącznym wykorzystaniem metod CFD [2] oraz procedur optymalizacyjnych stanowi główne zagadnienie w prezentowanym artykule. Oczekiwany efektem winna być, zweryfikowana eksperymentalnie procedura obliczeniowa, która daje uzasadniony fizykalnie wynik przydatny w doborze optymalnego wariantu projektowanej zabudowy.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] LAWSON T., *Building Aerodynamics*. Imperial College Press, 2001,
- [2] CASTRO I. P., *CFD for External Aerodynamics in the Built Environment*. The QNET-CFD Network Newsletter, 2003.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: AERODYNAMIKA



KRZYSZTOF KUBRYŃSKI

## ROZWAŻANIA NAD OPŁYWEM I OPOREM SKRZYDŁA O SKOŃCZONEJ ROZPIĘTOŚCI

### CONSIDERATIONS ABOUT FLOW AND DRAG DUE TO LIFT OF A FINITE WING

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny-Energetyki i Lotnictwa, ul. Nowowiejska 24/26 00-605  
Warszawa, [kkubryn@meil.pw.edu.pl](mailto:kkubryn@meil.pw.edu.pl)

Słowa kluczowe: aerodynamika skrzydła, opór indukowany

Opór indukowany skrzydła o skończonej rozpiętości stanowi zwykle znaczącą część oporu całkowitego. W warunkach optymalnych (maksymalna doskonałość aerodynamiczna) stanowi ok. 50% oporu całkowitego. Przy dużych kątach natarcia może osiągnąć nawet 80-90% oporu całkowitego. Możliwość jego poprawnego wyznaczenia oraz określenia warunków jego minimalizacji jest bardzo istotna z punktu widzenia celów projektowania aerodynamicznego samolotu. Najbardziej rozpowszechniona metoda pozwalająca na określenie wpływu skończonej rozpiętości skrzydła na jego charakterystyki aerodynamiczne bazuje na modelu przepływu potencjalnego i teorii linii nośnej bądź (w bardziej zaawansowanej postaci) na teorii powierzchni nośnej. Istnieje jednak szereg przesłanek do tego, aby uznać, że taki model nie ujmuje wielu istotnych czynników i zjawisk, które w sposób istotny wpływają na uzyskiwane wyniki. W pewnych sytuacjach rozważania oparte o ten model mogą prowadzić wręcz do nieprawidłowego określenia jakościowego wpływu zachodzących zjawisk na finalne charakterystyki aerodynamiczne. W szczególności dotyczy to silnie nieliniowych zjawisk związanych z trójwymiarowym opływem końcówki płata. W pracy przedstawione zostaną rozważania na temat źródeł oporu wynikającego z generacji siły nośnej, możliwości jego poprawnego wyznaczenia, dopuszczalności stosowania uproszczeń w równaniach przepływu i ich wpływ na obraz przepływu i wyznaczane charakterystyki aerodynamiczne. Zaprezentowane zostaną wyniki uzyskane w oparciu o modele przepływu potencjalnego i równań Eulera dla przykładowych konfiguracji skrzydeł płaskich oraz z końcówkami typu winglet. Omówione zostaną możliwości efektywnego projektowania skrzydła minimalizującego opór indukowany, jak i zapewniającego poprawne własności pilotażowe samolotu (zwłaszcza przy dużych kątach natarcia).

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: AERODYNAMIKA



ZBIGNIEW NOSAL, WITOLD SELEROWICZ

## BADANIA PROFILU NADKRYTYCZNEGO W WARUNKACH DUŻEJ WILGOTNOŚCI POWIETRZA SUPERCRITICAL AIRFOIL FLOW STUDY IN HUMID AIR

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, ul. Nowowiejska 24, 00-665  
Warszawa, [znos@meil.pw.edu.pl](mailto:znos@meil.pw.edu.pl), [seler@meil.pw.edu.pl](mailto:seler@meil.pw.edu.pl)

Słowa kluczowe: przepływ transoniczny, profil nadkrytyczny, obciążenia profilu

Transoniczny opływ typowego profilu lotniczego charakteryzuje się występowaniem na jego górnej powierzchni obszaru przepływu naddźwiękowego zamkniętego falą uderzeniową. Wielkość tego obszaru oraz położenie i intensywność fali zależą od liczby Macha przepływu niezakłóconego oraz kąta natarcia. Oddziaływanie fali uderzeniowej z warstwą przyścienną o narastającej grubości prowadzi do zjawiska oderwania, co zmniejsza siłę nośną i zwiększa opór.

Profil nadkrytyczny, będący rozwinięciem klasycznego profilu transonicznego, jest zbudowany w taki sposób, aby na górnej powierzchni uzyskać duży obszar naddźwiękowy z falą uderzeniową o możliwie małej intensywności dla parametrów obliczeniowych. Niewielka zmiana tych parametrów powoduje zazwyczaj bardzo istotną zmianę konfiguracji przepływu na profilu. W warunkach dużej wilgotności powietrza jego opływowi towarzyszy dodatkowo zjawisko kondensacji pary wodnej w obszarach o niskim ciśnieniu powiązane z wymianą ciepła i wystąpieniem przepływu wielofazowego.

W pracy przedstawiono wyniki badań profilu nadkrytycznego SC(2)\_0714 w warunkach zmiennej wilgotności powietrza. Profil ten, ze względu na zakres dostępnych danych doświadczalnych można uważać za profil wzorcowy w swej klasie. Badany był głównie w tunelach niskich temperatur, ze względu na możliwość uzyskiwania tam dużych liczb Reynoldsa. Z racji ich konstrukcji, tunele te mają ograniczony zakres pracy wyłącznie do powietrza suchego. Wyniki uzyskane w tunelu transonicznym ITLiMS PW dla powietrza wilgotnego poszerzają istniejącą wiedzę na temat własności profili nadkrytycznych.



PIOTR DOERFFER, OSKAR SZULC

## OSŁABIENIE FALI UDERZENIOWEJ POPRZECZ ZASTOSOWANIE PASYWNEJ KONTROLI

### SHOCK WAVE SMEARING BY PASSIVE CONTROL

Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Fiszer 14, 80-952, Gdańsk  
[doerffer@imp.gda.pl](mailto:doerffer@imp.gda.pl), [osmark@imp.gda.pl](mailto:osmark@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: fale uderzeniowe, pasywna kontrola, transpiracja

Fale uderzeniowe, oraz ich oddziaływanie z warstwą przyścienną, pełnią dominującą rolę w ograniczeniu zdolności aerodynamicznych samolotów transonicznych i wirników helikopterowych. Jednym ze sposobów redukcji negatywnego wpływu silnych fal uderzeniowych jest zastosowanie pasywnej kontroli w rejonie interakcji fali z warstwą przyścienną.

W latach 90-tych pasywna kontrola oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną była badana w projektach europejskich Euroshock I i Euroshock II. Głównym celem było poprawienie warunków opływu profilu dla wysokich liczb Macha, tzn. osiągnięcie wyższych liczb Macha lotu bez obniżenia parametrów aerodynamicznych (tj. siły nośnej, oporu itp.). Z tego powodu badano tylko wpływ perforacji o niewielkiej długości (do 10% długości cięciwy) umieszczonej lokalnie pod falą uderzeniową.

W obecnej pracy zaproponowano inne podejście przydatne dla łopat wirnika helikoptera. Zarówno podczas lotu helikoptera z dużą prędkością postępową, kiedy powstają fale uderzeniowe związane z cyklicznym powstawaniem obszarów naddźwiękowych, jak i w warunkach zawisu z dużą prędkością obrotową, kiedy fala uderzeniowa jest quasi-stacjonarna w stosunku do łopaty, fale uderzeniowe są istotnym źródłem hałasu impulsowego. Likwidacja silnej fali uderzeniowej stanowi istotne wyzwanie podczas projektowania wirników helikopterowych i jest na tyle ważna, że nowa metoda może prowadzić do nieznacznego spadku siły nośnej i wzrostu oporów.

W pracy [1] pokazano, że w wyniku odpowiedniego dobrania położenia oraz długości kawerny w dyszy transonicznej można doprowadzić do likwidacji silnej, prostopadłej fali uderzeniowej i zastąpienia jej sekwencją słabszych fal skośnych odbijających się pomiędzy perforowaną ścianką a granicą obszaru naddźwiękowego. Niniejsza praca zawiera wyniki numeryczne uzyskane kodem przepływowym SPARC dla profilu lotniczego NACA0012 wyposażonego w perforację. Wyciągnięte poprzednio wnioski dla przepływów wewnętrznych potwierdziły się także dla opływu profilu, ujawniając potencjalne zastosowanie metody do redukcji hałasu impulsowego na profilach helikopterowych.

#### PIŚMIENICTWO CYTOWANE

- [1] DOERFFER P., SZULC O., *Wykorzystanie perforowanej ściany do kontrolowania oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną*, XVI Krajowa Konferencja Mechaniki Płynów, Waplewo 2004.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: **HYDRODYNAMIKA OKRĘTU**



MONIKA WARMOWSKA, JAN JANKOWSKI

## WPŁYW PORUSZAJĄCEGO SIĘ ŁADUNKU PŁYNNEGO NA RUCH STATKU

### SHIP MOTION AFFECTED BY MOVING LIQUID CARGO IN HOLDS

Polski Rejestr Statków S.A., Al. Gen. Józefa Hallera 126, 80-416 Gdańsk,  
[M.Warmowska@prs.pl](mailto:M.Warmowska@prs.pl), [J.Jankowski@prs.pl](mailto:J.Jankowski@prs.pl)

Słowa kluczowe: ruch statku na fali nieregularnej, siły hydrodynamiczne, sloshing

Siły generowane falą morską oraz siły bezwładności są siłami determinującymi ruch statku na fali nieregularnej. Jednak w przypadku przewożenia ładunków płynnych w częściowo wypełnionych ładowniach dodatkowo występują siły wywołane ruchem cieczy we wnętrzu ładowni.

Ruch statku na fali w dziedzinie czasu opisano przy pomocy nieliniowych równań różniczkowych zapisanych w nieinercjalnym układzie odniesienia. W równaniach uwzględniono siły wywołane poruszającym się we wnętrzu ładowni ładunkiem płynnym. Ruch cieczy we wnętrzu statku opisano przy pomocy różniczkowych zagadnień brzegowych, w których istotnym elementem jest zmieniająca się w czasie swobodna powierzchnia. Zagadnienia te rozwiązano przy zastosowaniu metody elementów brzegowych.

W referacie przedstawiono analizę wpływu ruchu ładunku płynnego na ruch statku w przypadku częściowego wypełnienia ładowni. Analizę wykonano dla różnych fal regularnych i nieregularnych wymuszających ruch statku. Numeryczne rozwiązanie zagadnień brzegowych oraz równań ruchu umożliwiło wykonanie symulacji i wizualizację ruchu statku i ruchu ładunku płynnego w jego ładowni.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: MASZYNY PRZEPŁYWOWE



BOGDAN ANTOSZEWSKI, JACEK ROKICKI

## WPLYW NIEJEDNORODNOŚCI POWIERZCHNI NA PRZEPŁYW W USZCZELNIENIU CZOŁOWYM

### INFLUENCE OF HETEROGENEOUS SURFACE ON FLUID FLOW IN MECHANICAL SEALS

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn,  
Al.1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce, [ktrba@tu.kielce.pl](mailto:ktrba@tu.kielce.pl)

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,  
ul. Nowowiejska 24 00-665 Warszawa, [jack@meil.pw.edu.pl](mailto:jack@meil.pw.edu.pl)

Słowa kluczowe: uszczelnienie czołowe, przepływy szczelinowe, równanie Reynoldsa

Współczesna technika stawia coraz to wyższe wymagania w zakresie trwałości i niezawodności uszczelnień czołowych pracujących przy wysokich obciążeniach. Jednym z działań które umożliwiają rozwiązanie tego problemu jest tworzenie powierzchni niejednorodnych. Kierunek ten aktualnie intensywnie się rozwija i stosowany jest do rozwiązywania najtrudniejszych problemów dotyczących procesów smarowania w ekstremalnych warunkach. Istotnym elementem tego kierunku jest to że może on być realizowany poprzez zastosowanie wielu technologii inżynierii powierzchni przy czym dominujące znaczenie będą miały technologie umożliwiające lokalne oddziaływanie. Rozwiązanie prezentowane w tym referacie opiera się na celowym zróżnicowaniu obszarów powierzchni roboczych uszczelnienia poprzez wykorzystanie wiązki promieniowania laserowego dla osiągnięcia wyższej siły nośnej filmu smarnego i korzystnego kierunku przepływu medium w szczelinie. Prezentowany teoretyczny model przepływu oparty jest na równaniu Reynoldsa. Jest ono tak zmodyfikowane, że obejmuje również obszary kawitacji i oderwanie filmu smarnego w okolicy wgłębień w powierzchni ślizgowej. Tak otrzymane równanie jest typu mieszanego eliptyczno/hiperbolicznego, a jego rozwiązanie osiąga się przy użyciu technik numerycznych analogicznych jak przy przepływach transonicznych (upwind finite difference schemes). Rezultatem modelowania jest przewidywanie sił i momentów działających na parę ślizgową, a także precyzyjne oszacowanie radialnego wydatku masowego (przecieku przez uszczelnienie). Rozwiązanie numeryczne zrealizowane są dla wytypowanych kilku geometrii niejednorodności przy różnych parametrach pracy uszczelnienia. W części eksperymentalnej opracowania przedstawiono wyniki badań stanowiskowych określających opory tarcia oraz przecieki przez uszczelnienie czołowe z niejednorodnymi powierzchniami roboczymi. Uzyskane wyniki mogą być przydatne przy projektowaniu uszczelnień jak również innych ślizgowych węzłów tarcia.





MARIUSZ NIKLAS, DARIUSZ ASENDRYCH

## MODELOWANIE PRZEPŁYWU PŁYNU O ZŁOŻONYCH WŁASNOŚCIACH REOLOGICZNYCH

### MODELLING OF FLUID FLOW WITH COMPLEX RHEOLOGY

Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Ciepłych, Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,  
[niklas@imc.pcz.czest.pl](mailto:niklas@imc.pcz.czest.pl), [darek@imc.pcz.czest.pl](mailto:darek@imc.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: numeryczna mechanika płynów, reologia, recykling papieru

Praca dotyczy modelowania przepływu masy papierniczej w młynie papierniczym tzw. hydro-pulperze. Tematyka ta została podjęta w związku z realizacją projektu badawczego mającego na celu optymalizację pracy tego urządzenia, w którym realizowane jest rozwłóknianie masy papierniczej stanowiące początkowy etap technologii przetwórstwa makulatury. Proces ten charakteryzuje się wysokim stopniem złożoności wynikającym przede wszystkim ze skomplikowanych właściwości reologicznych masy jak również ze skomplikowanego charakteru przepływu (współistnienie obszarów o laminarnym i turbulentnym charakterze przepływu, złożona geometria, ruchome elementy). Masa papiernicza to nieprzeźroczyste medium składające się z wody, włókien celulozy i różnego rodzaju zanieczyszczeń (wtrąceń). Mimo swojego wielofazowego charakteru masa może być traktowana jako continuum, co pozwala opisywać jej zachowanie przy zastosowaniu klasycznego układu równań transportu. Jako narzędzie obliczeniowe został użyty komercyjny kod Fluent, którego efektywne wykorzystanie wymagało jednak rozbudowy jego kodu o dodatkowe procedury. Dzięki ich zastosowaniu możliwa była implementacja adekwatnego modelu reologicznego jak również sterowanie pracą solwera wykorzystującego (w zależności od charakteru przepływu) różne modele konstytutywne.

Budowa adekwatnego modelu zjawiska wymagała znajomości własności materiałowych masy papierniczej. Z uwagi na fakt braku dostatecznych danych literaturowych koniecznym było przeprowadzenie własnego eksperymentu. Uzyskane wyniki pomiarów tzw. krzywe płynięcia pozwoliły na opisanie własności reologicznych masy papierniczej w użytecznych zakresach stężenia zawiesiny włóknistej oraz prędkości ścinania.

Przedmiotem symulacji był młyn papierniczy wykorzystywany w badaniach recyklingu papieru w Instytucie Celulozowo Papierniczym w Łodzi. Model mieszalnika był dokładnym odzwierciedleniem obiektu rzeczywistego, jednakże z uwagi na jego znaczne gabaryty zastosowano skalę geometryczną 5:1.

Wstępne wyniki obliczeń wskazują na adekwatność zastosowanej metodyki. Uzyskane pole przepływu w szczególności kształt powierzchni swobodnej wykazuje jakościową zgodność z obserwacjami wizualnymi. Mimo pewnych rozbieżności (wynikających z zastosowanych uproszczeń oraz faktu prowadzenia obliczeń w skali) proponowany model przepływu masy papierniczej wydaje się być użytecznym narzędziem w optymalizacji procesu rozwłókniania.



JAROSŁAW BŁASZCZAK

## BADANIA WARSTW PRZYŚCIENNYCH NA PROFILACH KIEROWNICZYCH W WYSOKOOBciążONEJ TURBINIE DWUSTOPNIOWEJ

### VANE-PROFILE BOUNDARY LAYERS INVESTIGATIONS IN A TWO-STAGE HIGHLY-LOADED TURBINE

Politechnika Łódzka, instytut Maszyn Przepływowych I-10, Wólczańska 219/223, 93-005 Łódź,  
[blaszczak@p.lodz.pl](mailto:blaszczak@p.lodz.pl)

Słowa kluczowe: turbina, profil, warstwa przyścienna

Podstawowym celem przedstawianych wyników badań eksperymentalnych było określenie rozkładów ciśnienia na profilach kierownic dla nowej konfiguracji geometrycznej dwustopniowej wysokoobciążonej turbiny modelowej w Instytucie Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej.

Rozbieżności jakie pojawiły się pomiędzy wcześniejszym modelowaniem numerycznym oraz danymi eksperymentalnymi [1] sprawiły, że szczególną uwagę przywiązano do uzyskania wysokiej jakości pomiarów, m.in. poprzez zapewnienie bardzo stabilnej pracy maszyny, głównie poprzez kontrolę stabilności prędkości obrotowej oraz wartości parametrów na wlocie do turbiny, a także poprzez użycie sprzętu pomiarowego najwyższej klasy [2]. W pracy skupiono się głównie, oprócz charakterystyk maszyny, na szczegółowych rozkładach ciśnień na profilach dla dwóch przykładowych prędkości obrotowych turbiny (nominalnej oraz dla przypadku znacznie zwiększonego obciążenia maszyny), a także dla dwóch charakterystycznych wzajemnych położenia wieńców kierowniczych. Wyniki uzyskanych pomiarów porównano z obliczeniami numerycznymi przeprowadzonymi przy użyciu programu CFX TascFlow z zastosowaniem strukturalnych nieortogonalnych siatek hexahedralnych z 1 250 000 węzłami. Zarówno dane uzyskane z eksperymentu, jak i modelowania numerycznego, wykazały wpływ omawianych zmian parametrów pracy (prędkości obrotowej) oraz geometrii maszyny (zmiana wzajemnego położenia pierwszej kierownicy względem drugiej) w stosunku do założonych parametrów projektowych. Uzyskana bardzo dobra zgodność obydwu metod badawczych stanowi podstawę do dalszego modelowania przepływu w maszynie celem polepszenia jej wydajności. Rozbieżności zauważono przede wszystkim w obszarach bliskich ściankom ograniczającym kanał przepływowy (piasta i korpus maszyny) dla przypadków znacznie odbiegających od warunków nominalnych.

#### PIŚMIENICTWO CYTOWANE

- [1] KRYSINSKI J., BŁASZCZAK J.R., SMOLNY A., *Measurement Technique Challenges and Results of the Clocking-Effect Experimental Investigations in a Two-Stage Low-Pressure Turbine*. ISROMAC10-2004-083.
- [2] BŁASZCZAK J.R., *Efficiency Improvement and Noise Reduction Through Stator-Stator Clocking Effect of a Two-Stage Turbine*, ASME GT2005-68833



JAROSŁAW BŁASZCZAK

## BADANIA KORELACJI HAŁASU PRZEPŁYWU, SPRAWNOŚCI ORAZ POZIOMU DRGAŃ DLA PRZYPADKU DWUSTOPNIOWEJ TURBINY

### FLOW NOISE CORRELATION WITH EFFICIENCY AND VIBRATION LEVEL – TWO-STAGE TURBINE CASE

Politechnika Łódzka, instytut Maszyn Przepływowych I-10, Wólczańska 219/223, 93-005 Łódź,  
[blaszczk@p.lodz.pl](mailto:blaszczk@p.lodz.pl)

Słowa kluczowe: turbina, przepływ, hałas

Podstawowym celem przedstawianych wyników badań eksperymentalnych było określenie poziomu hałasu emitowanego przez przepływ dla przypadku dwustopniowej wysokoobciążonej turbiny modelowej w Instytucie Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej.

Szczególną uwagę przywiązano do uzyskania wysokiej jakości pomiarów, m.in. poprzez zapewnienie bardzo stabilnej pracy maszyny, głównie poprzez kontrole stabilności prędkości obrotowej oraz wartości parametrów na wlocie do turbiny, a także poprzez użycie sprzętu pomiarowego najwyższej klasy. Badania, z użyciem metodyki opracowanej na podstawie doświadczeń autora ze współpracy z Ecole Centrale de Lyon (Francja), przeprowadzono m.in. w nowopowstałej bezechowej komorze aeroakustycznej znajdującej się w IMP PL [1]. W pracy skupiono się głównie, oprócz charakterystyk pracy maszyny i ogólnego poziomu emitowanego hałasu i drgań, na szczegółowej analizie FFT uzyskanych wyników i próbie określenia korelacji zachodzącej pomiędzy omawianymi wielkościami dla dwóch przykładowych prędkości obrotowych turbiny (nominalnej oraz dla przypadku znacznie zwiększonego obciążenia maszyny), a także dla dwóch charakterystycznych wzajemnych położań wieńców kierowniczych. Uzyskane z eksperymentu dane wykazały wpływ omawianych zmian parametrów pracy (prędkości obrotowej) oraz geometrii maszyny (zmiana wzajemnego położenia pierwszej kierownicy względem drugiej) zarówno na poziom emitowanego hałasu, jak i poziomu drgań maszyny. Z powodu braku analogicznych opracowań w literaturze naukowej dokonano rozpoznania wzajemnych korelacji omawianych zjawisk mające na celu polepszenie pracy maszyn przepływowych, w szczególności w odniesieniu do silników lotniczych samolotów pasażerskich, co jest zgodne z najnowszymi dyrektywami Unii Europejskiej w zakresie walki z hałasem oraz ogólnymi tendencjami światowymi.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] BŁASZCZAK J.R., COMTE-BELLOT G., SMOLNY A., *New Aeroacoustic Facility at the Institute of Turbomachinery, Technical University of Lodz*, CMP/Turbomachinery Vol. 128, pp.79-86.
- [2] BŁASZCZAK J.R., *Efficiency Improvement and Noise Reduction Through Stator-Stator Clocking Effect of a Two-Stage Turbine*, ASME GT2005-68833



ANDRZEJ GARDZILEWICZ, JERZY ŚWIRYDCZUK, BARBARA KURANT

## STRATY W PRZEPŁYWACH PRZEZ STOPNIE W PROJEKTOWANIU TURBIN PAROWYCH

### STAGE FLOW LOSSES IN STEAM TURBINE DESIGN

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego Polskiej Akademii Nauk,  
Fiszera 14, 80-231 Gdańsk, [gar@imp.gda.pl](mailto:gar@imp.gda.pl), [jsk@imp.gda.pl](mailto:jsk@imp.gda.pl), [kurant@imp.gda.pl](mailto:kurant@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: stopień turbinowy, straty niestacjonarne, oddziaływanie kierownica/wirnik

Wskutek narastającej konkurencji wynikającej z burzliwego rozwoju komputeryzacji, projektanci turbin parowych stają przed koniecznością coraz szybszej a zarazem coraz dokładniejszej realizacji zadań projektowych. Wymóg szybkości jest rzeczą naturalną, natomiast wymóg dokładnego określania sprawności i przelotności turbin na relatywnie wczesnym etapie projektowania wiąże się z jednej strony z koniecznością dotrzymywania warunków projektowych uzgodnionych z nabywcą, a z drugiej - z próbą unikania sytuacji, w której bez żadnej rekompensaty sprzedaje się nabywcy urządzenie o parametrach wyższych niż wstępnie założone. Narzędziami najczęściej stosowanymi w projektowaniu były i są nadal uproszczone kody 1D i 2D pozwalające na określenie geometrii i wyznaczenie rozkładów głównych parametrów przepływowych w poszczególnych częściach turbiny. Warunkiem poprawnej pracy tych kodów jest wprowadzenie do w nich współczynników korekcyjnych równań zachowania, których wartości dobierane były dotychczas na podstawie kosztownych badań eksperymentalnych i uogólnionych analiz teoretycznych. W ostatnim okresie czasu powyższe badania i analizy oceny współczynników są zastępowane obliczeniami numerycznymi CFD. Dzięki temu wiele czołowych producentów turbin parowych na świecie doprowadziło do sytuacji że w dalszym ciągu w projektowaniu preferowane są uproszczone obliczenia cieplno-przepływowe w stosunku żmudnych i w dalszym ciągu długotrwałych obliczeń wykorzystujących równania Naviera-Stokesa (RANS) w modelu 3D. Jak się okazuje, takie podejście w bardzo prosty sposób pozwala wykorzystać standaryzowane elementy układu przepływowego, np. profile i uszczelnienia.

W pracy przedstawiono ogólną koncepcję wyznaczania współczynników korekcyjnych ze szczególnym uwzględnieniem strat energetycznych. Obliczenia testowe przeprowadzono z wykorzystaniem kodu FlowER rozwiązującego niestacjonarną wersję układu równań Naviera-Stokesa w uśrednieniu Reynoldsa (URANS) dla wybranych stosowanych w praktyce projektowej geometrii stopni oraz warunków przepływowych. Szczególną uwagę zwrócono na ocenę strat energetycznych, które decydują o sprawności turbin. Wskazano źródła potencjalnych błędów w oszacowaniu poziomu strat stacjonarnych i niestacjonarnych (uwzględniających ruch obrotowy wirnika względem kierownicy) oraz ich zakresy.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: MASZYNY PRZEPŁYWOWE



MAREK GRUDZIŃSKI

## BADANIA ROZKŁADÓW CIŚNIENIA W DYFUZORZE ŁOPATKOWYM PROMIENIOWEGO STOPNIA SPRĘŻAJĄCEGO

### INVESTIGATIONS OF PRESSURE DISTRIBUTIONS IN VANED DIFFUSER OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGE

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,  
[marek.grudzinski@put.poznan.pl](mailto:marek.grudzinski@put.poznan.pl)

Słowa kluczowe: dyfuzor łopatkowy, dmuchawa promieniowa, maszyny przepływowe

W artykule zaprezentowane będą wybrane wyniki badań eksperymentalnych nastawialnego dyfuzora łopatkowego przeprowadzone przez Katedrę Techniki Ciepłej Politechniki Poznańskiej we współpracy z Fabryką Urządzeń Mechanicznych W5 zakładów H.Cegielski Poznań S.A. Kanał ten umieszczony za wirnikiem, w obszarze największych w stopniu prędkości ma istotny wpływ na sprawność całej maszyny, stąd potrzeba zgłębiania zjawisk zachodzących w tym obszarze. Prace były dofinansowane przez Komitet Badań Naukowych w ramach projektu celowego nr 3128/C.T07-6/2002 pt. „Opracowanie konstrukcji typoszeregów wysokociśnieniowych dmuchaw promieniowych i uruchomienie ich produkcji”. Obiektem badań była prototypowa dmuchawa DA200 z półotwartym wirnikiem osiowo-promieniowym o średnicy  $D_2=200\text{ mm}$ . Badania przeprowadzono dla dwóch szerokości względnego wirnika  $b_2/D_2=0.08$  i  $b_2/D_2=0.06$ . Dmuchawa była wyposażona w kierownicę wstępną i nastawialny dyfuzor łopatkowy o 19 łopatkach. Ideą użycia takiego dyfuzora jest poprzez obrót łopatki dostosowanie kąta łopatkowego  $\alpha_3^*$  do kąta napływającego strumienia  $\alpha_3$  i tym samym zmniejszenie strat przepływu.

Badania przeprowadzone zostały w całym zakresie pracy dmuchawy, czyli od granicy pompażu do maksymalnej uzyskiwanej wydajności dla wybranych nastaw łopatek dyfuzora w zakresie kątów  $\alpha_3^*=9.6^\circ \div 29.5^\circ$ . Program badań obejmował pomiary ciśnień na tarczy przedniej i tylnej dyfuzora. Mierzone były wartości średnie w czasie. Oprócz ciśnień w dyfuzorze mierzone były wielkości służące wyznaczeniu charakterystyk całego stopnia: ciśnienia i temperatury w przekroju ssącym i tłocznym stopnia oraz strumień masy za pomocą kryzy na rurociągu ssącym. W artykule przedstawione zostaną wybrane rozkłady ciśnienia po obwodzie na wlocie i wylocie z dyfuzora oraz dla projektowego kąta nastawy łopatek, wzdłuż kanału międzyłopatkowego.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych posłużą do szerokiej weryfikacji obliczeń numerycznych przepływu płynu rzeczywistego przez stopień sprężający. Jednym z weryfikowanych programów jest pakiet Reflux autorstwa S.Yershova i A.Rusanova opracowany w zakładzie Hydromechaniki Maszyn Energetycznych Instytutu Problemów Budowy Maszyn Akademii Nauk Ukrainy. Dalsze prace obejmować będą weryfikację programu ANSYS CFX, zakupionego przez Katedrę Techniki Ciepłej.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: **MASZyny PRZEPLYWOWE**



MARCIN JANCZAK, JANUSZ PLUTECKI

## WPLYW POLA PRZEPLYWU NA WLASNOŚCI SSAWNE WIRNIKA WIELOSTOPNIOWEJ POMPY WIROWEJ

### THE INFLUENCE OF FLOW FIELD ON SUCTION PERFORMANCE IN IMPELLER OF MULTISTAGE PUMP

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, [marcin.janczak@pwr.wroc.pl](mailto:marcin.janczak@pwr.wroc.pl),  
[janusz.plutecki@pwr.wroc.pl](mailto:janusz.plutecki@pwr.wroc.pl)

Słowa kluczowe: maszyny przepływowe, pompy wielostopniowe, własności ssawne

Wirniki pomp wielostopniowych ze względu na duże wartości średnicy wału, charakteryzują się małymi własnościami ssawnymi. W artykule przedstawiono wyniki modelowania numerycznego wirnika pierwszego stopnia wielostopniowej pompy wirowej. Ze względu na złożony charakter trójwymiarowego przepływu do modelowania przyjęto komercyjny kod, bazujący na metodzie objętości skończonych. Badano geometrię składającą się z rury wlotowej, wirnika, odśrodkowej kierownicy łopatkowej i półprzewału. Badania prowadzono zarówno dla nominalnych parametrów pracy pompy, jak również dla znacznie odbiegających od nominalnych parametrów. Wyniki przedstawiono w formie rozkładu pola prędkości i pola ciśnienia w poszczególnych przekrojach badanej geometrii. Podjęto próbę odpowiedzi na pytanie dlaczego rozkład pola ciśnienia nie jest identyczny w poszczególnych kanałach międzyłopatkowych wirnika? Wykazano wpływ oddziaływania wstecznego kierownicy łopatkowej na rozkład pola ciśnienia w badanym wirniku. Ukazano wpływ rozkładu pola ciśnienia na własności ssawne wirnika pierwszego stopnia pompy wielostopniowej.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: **MASZYNY PRZEPŁYWOWE**



PIOTR LAMPART

## BADANIA NUMERYCZNE PRZECIEKU NADŁOPATKOWEGO W TURBINACH OSIOWYCH

### NUMERICAL INVESTIGATION OF TIP LEAKAGE FLOW IN AXIAL TURBINES

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN, ul. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk,  
[lampart@imp.gda.pl](mailto:lampart@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: turbina osiowa, przeciek nadłopatkowy, CFD

Przepływy uboczne w turbinach są rezultatem obecności szczelin technologicznych pomiędzy nieruchomymi i ruchomymi elementami maszyn. Do podstawowych form przepływów ubocznych należy przeciek nadłopatkowy nad wirującą łopatką wirnikową. Strumień przecieku omija układ łopatkowy i nie wykonuje pracy. Przyjmuje się, że entalpia strumienia przecieku pozostaje niezmienną. Jest to strumień zdolny do wykonania pracy w następnym stopniu. Przeciek jednakże charakteryzuje się parametrami znacznie odbiegającymi od parametrów przepływu głównego, co pokazują wyniki pomiarów na turbinach rzeczywistych. Szczególnie znacząca jest różnica pomiędzy prędkością (chodzi tu zarówno o wartość prędkości jak i jej kierunek) strumienia przecieku i przepływu głównego. Mieszanie tych strumieni jest istotnym źródłem strat przepływu w turbinach.

Mechanizm formowania się przecieku nad łopatkami niebandażowanymi jest inny niż przecieku nad łopatkami bandażowanymi. Motorem napędowym przecieku nad łopatkami niebandażowanymi jest różnica ciśnienia, jaka ukształtowała się w przepływie pomiędzy powierzchnią ciskającą i ssącą, w przypadku przecieku nad łopatkami bandażowanymi jest to różnica ciśnienia pomiędzy krawędzią wylotową i wlotową układu łopatkowego. Znacznie różnią się także struktury przepływu, które obserwuje się w obszarze wpływu tych dwóch form przecieku. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej obejmującej mechanizmy formowania się przecieku nadłopatkowego, wzajemne oddziaływanie przecieku nadłopatkowego z przepływem głównym i wirami kanałowym, wpływ parametrów geometrycznych i przepływowych stopnia turbinowego oraz względnego ruchu ograniczenia zewnętrznego kanału. Poddano dyskusji problem generacji strat w obszarze przecieku nadłopatkowego. Cykl obliczeń numerycznych wykonano w oparciu o program FLOWER - solver modelu RANS w geometrii układów łopatkowych turbin.



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: MASZYNY PRZEPŁYWOWE



ANTONI SMOLNY, JAROSŁAW R. BŁASZCZAK

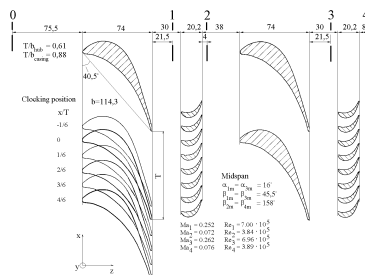
## WPLYW WZAJEMNEGO USTAWIENIA KIEROWNIC NA POLE PRZEPŁYWU W DWUSTOPNIOWEJ TURBINIE BADAWCZEJ

### INFLUENCE OF CLOCKING EFFECT ON FLOW FEATURES IN A TWO STAGE TEST TURBINE

Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, ul. Wólczańska 219/223, 93-005 Łódź, [asmo1948i@p.lodz.pl](mailto:asmo1948i@p.lodz.pl)

Słowa kluczowe: turbina, przepływ, sprawność

Konstruktorzy z założenia zawsze dążą do uzyskania jak największej sprawności maszyn przepływowych i uzyskania jeszcze lepszych parametrów w stosunku do istniejących rozwiązań. W dzisiejszych czasach jest już bardzo trudne i wymaga szczegółowej wiedzy o strukturach przepływu i ich wzajemnych interakcjach. W maszynach wielostopniowych zmiana wzajemnego położenia wieńców sąsiednich stopni może wpływać na interakcję struktur przepływu i w wyniku zmieniać sprawności, obciążenie łopatek, redystrybucję pola przepływu itd. Jest zatem atrakcyjną metodą zwiększenia sprawności maszyn wielostopniowych niewielkim kosztem. W IMP PŁ zbudowano stoisko turbiny dwustopniowej pokazane na rys. 1 do badań wzajemnego wpływu kierownic dla względnie małej wysokości łopatek, dla których wpływ na ogólną sprawność maszyny odgrywają zarówno straty profilowe jak i straty przepływu wtórnego.



Przeprowadzono szczegółowe badania eksperymentalne parametrów przepływu średniego i nie-stacjonarnego oraz wykonano obliczenia trójwymiarowego pola przepływu w turbinie dla różnych wzajemnych położenia kierownic. Badania te pokazują, że możliwe są nie tylko oddziaływania śladów i wynikające stąd zmiany sprawności turbiny, ale również pozytywnie mogą oddziaływać struktury wirów przepływu wtórnego. Pozytywne oddziaływania mogą powodować zmiany sprawności „pik to pik” w obszarze piasty nawet do 1.5% sprawności turbiny. Przedstawione w pracy wyniki badań pokazują możliwość kontroli rozwoju struktur przepływu wtórnego poprzez odpowiednie wzajemne ustawienie kierownic, co ma duże znaczenia dla maszyn wielostopniowych o małej rozpiętości łopatek.



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: MASZYNY PRZEPŁYWOWE



MARIUSZ SZYMANIAK

## OBLICZENIA NUMERYCZNE STOPNI TURBIN PAROWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM UPUSTÓW REGENERACYJNYCH CFD CALCULATION OF STEAM TURBINE STAGES WITH EXTRACTION POINTS

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk,  
Fiszera 14, 80-231 Gdańsk, [masz@imp.gda.pl](mailto:masz@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: stopień turbinowy, przecieki, upusty regeneracyjne

Obliczenia stopni turbin parowych realizuje się zwykle przy założeniu periodyczności obwodowej geometrii i warunków brzegowych. W ten sposób, poprzez zastąpienie obszaru obliczeniowego obejmującego cały wieniec kierowniczy bądź wirnikowy obszarem zredukowanym do jednego kanału w każdym z wieńców skraca się w sposób zdecydowany czas żmudnych obliczeń numerycznych CFD rozwiązujących układ równań Naviera-Stokesa. Uproszczenie powyższe może być źródłem błędów w przypadkach, gdy w układach łopatkowych występują przepływy zaburzające obwodową symetrię. Należą do nich m.in. wypływy przez rurociągi upustowe wyprowadzające parę z turbiny do wymienników regeneracyjnych. W prezentowanej pracy dokonano oszacowania charakteru i zakresu efektów powyższej niesymetryczności w zastosowaniu do ostatnich stopni części niskoprężnej turbiny 200 MW z upustem, przy uwzględnieniu intensywnych przecieków nad łopatkami poprzedzającego wieńca wirnikowego, które utrudniają wypływ pary do upustu. Zastosowano dwuetapową procedurę poszukiwania rozwiązania, w której połączono „symetryczne” obliczenia przepływu pary przez stopnie sąsiadujące z upustem, (obliczenia te realizowane były dla wieńców reprezentowanych przez pojedyncze kanały ze zmiennymi warunkami brzegowymi), z obliczeniami „niesymetrycznymi” przepływu przez dyfuzor międzywieńcowy z komorą upustową. Rozwiązanie otrzymano drogą kolejnych iteracji obliczeń w obu obszarach sprzężonych ze sobą warunkami zszycia przy odpowiednio zaproponowanej metodyce uśrednień parametrów po obwodzie. W obliczeniach zastosowano kody FlowER i Fluent.



JERZY ŚWIRYDCZUK

## PROBLEM ROZDZIELCZOŚCI SIATKI W ANALIZACH NUMERYCZNYCH ODDZIAŁYWANIA KIEROWNICA/WIRNIK

### GRID RESOLUTION IN STATOR/ROTOR INTERACTION CFD ANALYSES

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego Polskiej Akademii Nauk,  
Fiszera 14, 80-231 Gdańsk, [jsk@imp.gda.pl](mailto:jsk@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: stopień turbinowy, oddziaływanie kierownica/wirnik, rozdzielczość siatki

Numeryczne analizy niestacjonarnego oddziaływania kierownica/wirnik w stopniach maszyn przepływowych wciąż stanowią duże wyzwanie dla badaczy. Przyczyną takiego stanu rzeczy są m.in. trudności w odpowiednim doborze parametrów siatki obliczeniowej pozwalającej na wyeliminowanie jej wpływu na uzyskiwane wyniki. W analizach realizowanych w dwóch wymiarach zagadnieniem tym zajmowali się m.in. Arnone i Pacciani [1], którzy stwierdzili, że dla spełnienia warunku niezależności rozwiązania od przyjętych parametrów siatki jej rozdzielczość winna być rzędu 15-20 tysięcy klatek na jeden kanał palisadowy. W przypadku zadań 3D oceny takie nie były publikowane, co nie przeszkadzało w przeprowadzeniu wielu wartościowych jakościowych analiz przebiegu i efektów oddziaływania kierownica/wirnik. Można, jednakże, wskazać sytuacje, w których znaczenia nabierają efekty ilościowe, np. poziom strat energetycznych generowanych przez to oddziaływanie (obliczenia projektowe) czy intensywność śladu kierowniczego na wylocie ze stopnia (badania clockingu). W takich sytuacjach przyjęta rozdzielczość siatki ma duże znaczenie dla oceny wyników końcowych. Niniejsza praca prezentuje próbę oszacowania minimalnej rozdzielczości siatki 3D, która pozwoliłaby pominąć jej wpływ na wyniki obliczeń oddziaływania kierownica/wirnik w stopniu turbinowym. Jako materiał porównawczy wykorzystano wyniki niestacjonarnych obliczeń przepływu przez stopień turbiny WP, do których wykorzystano kod URANS i kod oparty na teorii dynamiki wirów. Pierwsze z tych obliczeń zrealizowano w dwóch wariantach na siatce strukturalnej H o zmiennej rozdzielczości i porównano z wynikami uzyskanymi przez kod TDW i poddanymi weryfikacji eksperymentalnej, do której użyto dostępnych danych literaturowych [2]. Finalnym efektem analizy porównawczej jest oszacowanie minimalnej rozdzielczości siatki, przy której można oczekiwać iż jej wpływ na uzyskane wyniki 3D oddziaływania kierownica/wirnik będzie pomijalny.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] ARNONE A., PACCIANI R., *Rotor-Stator Interaction Analysis Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Methods*. ASME J. Turbomachinery, 1996, **118**, 679-689.
- [2] KOST F., HUMMEL F., TIEDEMANN M., *Investigation of the Unsteady Rotor Flow Field in a Single HP Turbine Stage*. Proceedings ASME TURBO EXPO 2000, May 8-11, Munich, Germany.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: **MASZyny PRZEPLYWOWE**



DARIUSZ ASENDRYCH

## SYMULACJA PRZEPŁYWU W SEPARATORZE ZANIECZYSZCZEŃ FLOW SIMULATION IN SCREEN

Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Ciepłych, al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,  
[darek@imc.pcz.czest.pl](mailto:darek@imc.pcz.czest.pl)

# Referat wycofany



GRZEGORZ BORSUK, BOLESŁAW DOBROWOLSKI, JACEK WYDRYCH

## PRZEPŁYW MIESZANINY GAZ-CZĄSTKI STAŁE PRZEZ UKŁAD DWÓCH KOLAN

### THE GAS-PARTICLE FLOW THROUGH A TWO BENDS FLOW SYSTEM

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, ul. Mikołajczyka 5, 45-256 Opole, [bdobr@po.opole.pl](mailto:bdobr@po.opole.pl)

Słowa kluczowe: transport pneumatyczny, segregacja cząstek, opory przepływu

Podczas transportu pneumatycznego materiałów rozdrobnionych ma miejsce niekontrolowana segregacja cząstek stałych. Jej przyczyną jest działanie siły ciężkości oraz siły odśrodkowej przy zmianie kierunku przepływu. Prowadzi to w efekcie do tworzenia się tzw. „sznura” cząstek wewnątrz strugi gazu, co zakłóca proces transportu pneumatycznego oraz sprzyja przyspieszonej erozji poszczególnych elementów układu. O ile zjawiska towarzyszące przepływowi przez pojedyncze kolano są stosunkowo dobrze poznane, dwu, lub wielokrotna zmiana kierunku przepływu znacznie komplikuje obraz przepływu.

Przedmiotem pracy jest teoretyczna analiza zjawiska segregacji cząstek stałych przy przepływie przez układ dwóch kolan przy uwzględnieniu polidispersyjności cząstek unoszonych w strudze gazu. Ruch gazu opisano układem równań Reynoldsa domkniętym modelem turbulencji. Trajektorie cząstek wyznaczano na podstawie całkowania równania ruchu cząstki w polu prędkości gazu przy uwzględnieniu ich zderzeń ze ściankami. Stosowany model matematyczny pozwolił na analizę ruchu mieszaniny gaz-cząstki w szerokim zakresie zmian geometrii układu przepływowego oraz głównych parametrów przepływającej strugi.

Obliczenia numeryczne zrealizowano przy zastosowaniu programu Fluent. Szczegółowej analizie poddano przepływ mieszaniny pyłowo-powietrznej przez układ dwóch kolan. Wyniki obliczeń numerycznych wykazały, że istnieje duży wpływ wzajemnej konfiguracji kolan na stopień niejednorodności rozkładu koncentracji cząstek oraz opory przepływu. Wyniki badań mogą znaleźć zastosowanie przy projektowaniu układów do transportu pneumatycznego materiałów rozdrobnionych.



WŁODZIMIERZ WRÓBLEWSKI, SŁAWOMIR DYKAS, ALEKSANDRA GEPERT

## PROBLEMATYKA WERYFIKACJI OBLICZEŃ PRZEPŁYWU MOKREJ PARY WODNEJ

### PROBLEMS CONCERNED WITH VERIFICATION OF WET STEAM FLOW COMPUTATIONS

Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Konarskiego 18, 44-101 Gliwice,  
[wlodzimierz.wroblewski@polsl.pl](mailto:wlodzimierz.wroblewski@polsl.pl), [dykas@imiue.polsl.pl](mailto:dykas@imiue.polsl.pl), [gepercik@imiue.polsl.pl](mailto:gepercik@imiue.polsl.pl)

Słowa kluczowe: numeryczna mechanika płynów, para wodna, kondensacja

W części niskoprężnej kondensacyjnej turbiny parowej linia ekspansji pary wodnej przechodzi w obszar pary mokrej. Przekroczenie linii nasycenia przy dużych szybkościach ekspansji powoduje silne przechłodzenie pary, tworząc warunki do inicjacji procesu kondensacji homogenicznej. Na proces kondensacji wpływają również zanieczyszczenia obecne w parze. Model fizyczny opracowanej metody obliczeniowej uwzględnia różne mechanizmy kondensacji w przepływie pary wodnej.

W pracy zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych pola przepływu pary wodnej. Model obliczeniowy uwzględnia własności fizykochemiczne parowych zanieczyszczeń a parę wodną traktuje jako gaz rzeczywisty. Proces kondensacji jest bardzo czuły na szereg parametrów przepływowych. Weryfikacja modelu obliczeniowego powinna więc wykorzystać możliwie dokładne dane pomiarowe. Uzyskanie takich danych jest stosunkowo trudne, ze względu na złożone warunki pomiaru w przepływie pary mokrej. W prezentowanej pracy przedstawiono szereg prób weryfikacji skonstruowanego modelu obliczeniowego i metody numerycznej w oparciu o dostępne, najbardziej wiarygodne źródła literaturowe [np. 1,2]. W każdym z przypadków przeanalizowano warunki przeprowadzonego eksperymentu oraz podkreślono trudności w sformułowaniu właściwych danych i warunków brzegowych dla modeli obliczeniowych. Zwrócono uwagę na niedostatek danych o jakości pary wykorzystywanej w eksperymencie oraz na nieprecyzyjne informacje o sposobie przeprowadzenia pomiarów. Mankamentem wielu wyników jest brak możliwości określenia błędu pomiaru oraz błędu przyrządów pomiarowych.

We wnioskach, oprócz analizy zgodności wyników obliczeń z danymi pomiarowymi, sformułowano zakres niezbędnych danych, jakie powinien zawierać eksperyment przeprowadzany z udziałem mokrej pary wodnej.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] GYARMATHY G., *Nucleation of Steam in High-Pressure Nozzle Experiments*. Proceedings of 6<sup>th</sup> European Conference on Turbomachinery 2005, ST\_042\_05/225, 458-469,
- [2] WHITE A. J., YOUNG J. B., WALTERS P. T., *Experimental validation of condensing flow theory for a stationary cascade of steam turbine blade*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A (1996), 59-88,



MAREK JASZCZUR, LUIS PORTELA

## DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN PARTICLE-LADEN TURBULENT FLOWS

Delft University of Technology, Faculty of Applied Physics, MSP, Prins Bernhardlaan 6, 2628BW Delft,  
The Netherlands, [M.Jaszczur@klft.tn.tudelft.nl](mailto:M.Jaszczur@klft.tn.tudelft.nl)

Keywords: Direct Numerical Simulation, Multiphase Flow, Particle-Laden Flow

Flow with particle has recently received considerable attention due to its relevance to many industrial applications. However, the focus of researchers has been concentrated on the particle-fluid interactions mainly in isothermal flows. It is known that depending on the particle diameter and density the turbulent flow can be highly influence by the presence of the particles. This phenomenon has been study in large numbers of works concerning mixing enhancement as well as drug reduction. But still it is not recognized how presence of particles will influence turbulent heat transfer. In present work heat transfer in the region near the wall of a turbulent open channel in particle-laden turbulent flows has been study with the fluid-particle interaction approach. Direct Numerical Simulation of the flow, combined with Lagrangian particle tracking technique has been performed to study problem. In presented wall-bounded configuration small solid and dense particles with various response times carrying by fluid forces were influence by turbulent non-isothermal flow. The simulation were performed until particles phase reached a statistically stationary state and for the flow Reynolds number  $Re_\tau=180$  and 395 (base on the friction velocity and the channel half width), the molecular Prandtl number were 1.0 and 0.2. The uniform constant heat flux was imposed on the both channel walls.

Direct Numerical Simulation was performed with the use of the control volume method and pseudo-spectral approach. Simulation was carried out with the use of few computational grids and schemes with special attention paid on the stability and accuracy of the solution. Comparisons of the numerical results obtain with different grids and with the different numerical approximations of the unsteady terms and the convective terms have been presented.

The obtained flow field has been visualized, pattern of particle concentration and particle temperature were presented. In particular the effect of the particle response time on the particle concentration and temperature distributions has been determined. It has been shown that particles distributed uniformly at initial time were accumulating with time. This effect strongly affects particle temperature and influence the fluid temperature.

### PIŚMIENICTWO CYTOWANE

- [1] NARAYANA CH, LAKEHAL D., *Mechanisms of particle deposition in a fully developed turbulent open channel flow*. Phys. of Fluids 2003, **15**, 3, 763-775.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: MECHANIKA PŁYNÓW WIELOFAZOWYCH



ROBERT SEKRET, WOJCIECH NOWAK

## WPŁYW WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH W KOMORZE PALENISKOWEJ KOTŁA Z CWF O MOCY 670 MW NA EMISJĘ ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH

### THE EFFECT OF HYDRODYNAMICS CONDITIONS IN THE COMBUSTION CHAMBER OF A 670 MW CFB BOILER ON THE EMISSION OF GASEOUS POLLUTANTS

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii i Ochrony Środowiska,  
Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa, [rsekret@is.pcz.czest.pl](mailto:rsekret@is.pcz.czest.pl), [wnowak@is.pcz.czest.pl](mailto:wnowak@is.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: spalanie, zanieczyszczenia, fluidyzacja

W pracy dokonano analizy wpływu warunków hydrodynamicznych w komorze paleniskowej kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną (CWF) na wartość emisji zanieczyszczeń gazowych. Badania zrealizowano na kotle o mocy 670 MW. Komora paleniskowa badanego kotła na poziomie rusztu fluidyzującego posiada długość 21,2 m oraz szerokość 5,2 m, która zwiększa się wraz ze wzrostem odległości od rusztu. Na wysokości 6,7 m szerokość komory paleniskowej wynosi 9,9 m i nie ulega zmianie wraz z dalszym wzrostem odległości od rusztu. Wysokość komory paleniskowej równa jest 44,8 m. W badaniach wykorzystano pięć portów pomiarowych o przekroju 22mm x 52mm wykonanych na ścianie przedniej w odległości 26,7 m od rusztu. Poprzez przygotowane porty pomiarowe wprowadzano do wnętrza komory paleniskowej chłodzoną wodą sondę do poboru gazu. Sonda posiadała przekrój 20 mm x 50 mm oraz długość 4,5 m. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, iż optymalizacja rozdziału powietrza pierwotnego i wtórnego, jak również rozdziału paliwa pozwoliła na redukcję emisji: CO o 52%, SO<sub>2</sub> o 40% i NO o 6% w odniesieniu do standardowych warunków pracy badanego kotła. Przedstawione wyniki badań wskazały, iż zwiększenie krotności cyrkulacji ziaren materiału warstwy pomiędzy komorą paleniskową a układem nawrotu może być efektywniejszym sposobem ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych, niż optymalizacja rozpyłu powietrza i paliwa, zwłaszcza w przypadku tlenków azotu. Ostatecznie wyniki badań wykazały ograniczenie emisji: CO o 71%, SO<sub>2</sub> o 41% i NO<sub>x</sub> o 19% wraz ze wzrostem krotności cyrkulacji ziaren z 28 do 60 dla analizowanego kotła. Wysoka skuteczność separacji cyklonu zapewniła utrzymanie w komorze paleniskowej kotła cyrkulacyjnego wyrównanego profilu temperatury. Należy zaznaczyć, że dotychczas powszechnie zaniedbywano ten wpływ, sądząc że skuteczność separacji w separatorze ma wpływ jedynie na stratę niecałkowitego spalania.



AGNIESZKA SŁOWICKA, ZBIGNIEW A. WALENTA

## POWSTAWANIE NANOSTRUKTUR W EMULSJACH CREATING NANOSTRUCTURES IN EMULSIONS

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Świetokrzyska 21, 00-049 Warszawa,  
aslowick@ippt.gov.pl, [zwalenta@ippt.gov.pl](mailto:zwalenta@ippt.gov.pl)

Słowa kluczowe: nanotechnologie, emulsje, dynamika molekularna

Technologie tworzenia nowoczesnych materiałów, w szczególności mikro- i nanomateriałów, należą do najszybciej rozwijających się dziedzin współczesnej techniki. Jedną z możliwych metod polega na wykorzystaniu emulsji jako matrycy do budowy takiego materiału [1]. Emulsja taka złożona jest z regularnych, drobnych kropelek oleju w wodzie; ich średnice mierzymy w nanometrach. Trzecia substancja, biorąca udział w procesie, osadza się cienką warstwą na powierzchniach kropelek. Po jej utwardzeniu i usunięciu emulsji substancja ta staje się poszukiwanym nanomateriałem. Przedmiotem prezentowanej pracy było poszukiwanie modeli molekularnych substancji, które osadzałyby się cienką warstwą między olejem i wodą.

Jako narzędzia badawcze użyto metody Dynamiki Molekularnej [2]. Symulacje numeryczne wykonano za pomocą programu MOLDY [3]. Poszukując najwłaściwszego modelu molekularnego wody wykonano symulacje zachowania się kropli wody w próżni. Na tej podstawie wybrano model TIPS2, który uwzględnił dipolarność tej molekuly. Do stworzenia emulsji posłużono się dwoma typami substancji: zwykłym olejem (np. sojowym) i limonenem (olejek eteryczny). Molekuly obu substancji modelowano jako sferyczne, niepolarne oddziałujące ze sobą słabo w porównaniu z oddziaływaniami między molekułami wody.

Następnie przebadano model substancji o strukturze surfaktantu, umieszczonej w symulacji na powierzchni styku oleju i wody. Molekuly takiej substancji mają kształt łańcucha, złożonego z części hydrofobowej i hydrofilowej. Stabilną warstwę surfaktantu uzyskano wtedy, gdy część hydrofobowa łańcucha była dostatecznie długa.

W następnym kroku poszukiwano modelu substancji stałej, która w podobny sposób może stworzyć nanomateriał. W pierwszych symulacjach posłużono się molekularnym modelem węgla. Okazało się, że węgiel osiada na powierzchni styku oleju i wody, gdy jego atomy tworzą struktury krystaliczne. Pojedyncze atomy węgla przechodzą w głąb fazy olejowej.

### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] TCHOLAKOVA, DENKOV, *Interrelation between Drop Size*. Langmuir, **19**, No.14, 2003, 5640 – 5649,
- [2] ALLEN M. P., TILDESLEY D. J., *Computer simulation of liquids*, Clarendon, Oxford, 1987,
- [3] REFSON K., *Moldy: a portable molecular dynamics simulation program for serial and parallel computers*, Comput. Phys. Commun. **126**, 3, 2000, 309 – 328.





TOMASZ WACŁAWCZYK, TADEUSZ KORONOWICZ

## MODELOWANIE PRZEPŁYWU ZE SWOBODNĄ POWIERZCHNIĄ ZA POMOCĄ SCHEMATÓW WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI

### MODELING OF THE FREE SURFACE FLOW WITH HIGH-RESOLUTION SCHEMES

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polska Akademia Nauk  
ul. J. Fiszer 80-952 Gdańsk, [tomi@imp.gda.pl](mailto:tomi@imp.gda.pl), [ttk@imp.gda.pl](mailto:ttk@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: przepływy ze swobodną powierzchnią, schematy o wysokiej rozdzielczości, numeryczna mechanika płynów

Poniższa praca dotyczy modelowania przepływów ze swobodną powierzchnią za pomocą metody Volume of Fluid (VOF). Dwa schematy o wysokiej rozdzielczości (ang. high resolution schemes) CICSAM [2] i HRIC [1] zostały użyte do dyskretyzacji członu konwekcyjnego w równaniu transportu objętościowego współczynnika wypełnienia. Zastosowanie schematów o wysokiej rozdzielczości jest uzasadnione potrzebą wyeliminowania zjawiska numerycznej dyfuzji i zjawiska numerycznej dyspersji. Aby modelować dynamikę przepływów dwu płynów nieściśliwych nie podlegających zmieszaniu na poziomie molekularnym (np. wody i powietrza) rozwiązanie równania transportu objętościowego współczynnika wypełnienia, zostało sprzężone z programem rozwiązującym układ równań Naviera-Stokesa dyskretyzowany za pomocą metody objętości skończonej drugiego rzędu dokładności. Schemat SIMPLE został użyty w procedurze korekcji ciśnienia. Opracowaną metodę wykorzystano do modelowania przepływu wody i powietrza w kilku przypadkach testowych. Powyższy sposób dyskretyzacji równania transportu objętościowego współczynnika wypełnienia pozwolił na osiągnięcie dobrej zgodności z wynikami eksperymentalnymi i wynikami symulacji numerycznych innych autorów. Dodatkowo, ponieważ schemat HRIC jest stosowany w programach komercyjnych (np. Comet, Fluent) został on porównany z innym schematem o wysokiej rozdzielczości. Porównanie schematów CICSAM i HRIC przeprowadzono ze szczególnym uwzględnieniem możliwości śledzenia powierzchni rozdziału, która może podlegać silnej deformacji. Doświadczenia zdobyte w czasie wykonywania powyższej pracy zostaną wykorzystane do modelowania układu falowego wokół statku.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] MUZAFERIJA S., PERIC M., *Computation of free-surface flows around ships and floating bodies*, Nonlinear Water Wave Interaction, Southampton 1998
- [2] UBBINK O., ISSA R.I., *A Method for Capturing Sharp Fluid Interfaces on Arbitrary Meshes*, Journal of Computational Physics, Vol. **153**, 26-50, 1999



ARTUR BARTOSIK

## MODELOWANIE PRZEPŁYWU TURBULENTNEGO Z ZASTOSOWANIEM REOLOGICZNEGO MODELU HERSCHEL'A-BULKLEY'A MODELING OF TURBULENT FLOW USING HERSCHEL-BULKLEY RHEOLOGICAL MODEL

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego,  
Instytut Inżynierii Produkcji, Al. 1000-Lecia P.P. 7, 25-314 Kielce, [bartosik@it.kielce.pl](mailto:bartosik@it.kielce.pl)

Słowa kluczowe: przepływ nienewtonowski; modelowanie turbulencji; symulacja przepływu turbulentnego

Turbulentny przepływ drobno-dyspersyjnej hydro-mieszaniny, posiadającej „próg płynięcia”, często występuje zarówno w inżynierii chemicznej jak i przemyśle wydobywczym. Przewidywanie tego typu przepływu na ogół sprowadza się do określenia jednostkowego spadku ciśnienia i/lub profilu prędkości. W przypadku przepływu laminarnego, gdy prawidłowo określony zostanie model reologiczny, zadanie to jest stosunkowo proste. Natomiast przewidywanie przepływu turbulentnego jest zadaniem o wiele bardziej złożonym, mimo że ze względów praktycznych często zakładamy, że hydro-mieszanina jest jednorodna o zwiększonej lepkości i gęstości.

Niniejsza praca dotyczy w pełni rozwiniętego, osiowo-symetrycznego i turbulentnego przepływu drobno-dyspersyjnej hydro-mieszaniny w przewodzie poziomym. Model matematyczny powstał na bazie uśrednionych po czasie równań Navier'a-Stokes'a, w których tensor naprężeń turbulentnych wyznaczono przy użyciu zmodyfikowanego modelu turbulencji  $k-\varepsilon$  [1]. W modelu matematycznym wykorzystano hipotezę Wilson'a-Thomas'a, mówiącą o zwiększeniu grubości podwarstwy lepkiej w przypadku drobno-dyspersyjnych nienewtonowskich cieczy. Wykorzystując tę hipotezę w modelu wprowadzono lepkość pozorną, którą wyznaczono na podstawie modelu reologicznego Herschel'a-Bulkley'a, a następnie zastosowano zmodyfikowany model turbulencji  $k-\varepsilon$  [1–2]. **Celem niniejszej pracy** jest określenie wpływu modelu Herschel'a-Bulkley'a na wyniki symulacji numerycznej turbulentnego przepływu drobno-dyspersyjnej hydro-mieszaniny. Wyniki obliczeń numerycznych zweryfikowano z dostępnymi wynikami badań eksperymentalnych i przedstawiono w postaci wykresów. Na tej podstawie sformułowano wnioski dotyczące wpływu modelu reologicznego na wynik symulacji dla w pełni rozwiniętego turbulentnego przepływu drobno-dyspersyjnej hydro-mieszaniny.

### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] BARTOSIK, A.S., 1997, *Modification of  $k-\varepsilon$  Model for Slurry Flow with Yield Stress*, 10th Int. Conf. Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, Pineridge Press, **10**, 265-274.
- [2] BARTOSIK, A.S., 2004, *Influence of Rheological Models on Numerical Prediction of Turbulent Flow*, 12th Int. Conf. Transport and Sedimentation of Solid Particles No.481, 167-174, Editor: Academy of Sciences of the Czech Republic



SŁAWOMIR DYKAS, TADEUSZ CHMIELNIAK

## NOWE BADANIA EKSPERYMENTALNE PRZEPŁYWÓW OKOŁODŹWIEKOWYCH Z KONDENSACJĄ

### NEW EXPERIMENTAL RESEARCH ON TRANSONIC FLOWS WITH CONDENSATION

Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice,  
[imiue@polsl.pl](mailto:imiue@polsl.pl)

Słowa kluczowe: kondensacja, para wodna, powietrze wilgotne

Badania eksperymentalne nad zjawiskiem kondensacji pary wodnej podejmowane były wielokrotnie przez wielu badaczy (np. [1], [3]). Badania te służyły przez wiele lat jako materiał porównawczy przy opracowywaniu metod numerycznych modelujących pole przepływu z kondensacją homogeniczną. Jednak problemy z weryfikacją metod numerycznych modelujących okołodźwiękowy przepływ pary wodnej i powietrza wilgotnego z kondensacją homogeniczną oraz heterogeniczną [2] były motywacją do podjęcia badań eksperymentalnych w tym kierunku.

Projektowane stanowisko do badań eksperymentalnych procesu kondensacji w przepływie pary wodnej lub powietrza wilgotnego zakłada:

- konieczność precyzyjnej regulacji temperatury i ciśnienia na wlocie do przestrzeni pomiarowej
- możliwość utrzymywania stałych parametrów na wlocie do przestrzeni pomiarowej podczas cyklu pomiarowego
- kontrolę zanieczyszczeń czynnika przepływowego

Spełnienie powyższych założeń nie było zadaniem prostym i wymaga szeregu skomplikowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

W artykule przedstawiony będzie opis stanowiska badawczego wraz z systemem pomiarowym oraz wstępne badania eksperymentalne przepływu z kondensacją w dyszach zbieżno-rozbieżnych.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] BARSCHDORFF D. (1967), *Kurzzeitfeuchtemessung und ihre Anwendung bei Kondensationerscheinungen in Lavalduesen*, Stroemungsmechanik und Stroemungsmaschinen, G.Braun-Verlag, Karlsruhe, Vol.6, 18-39,
- [2] DYKAS S. (2001), *Numerical calculation of the Steam Condensing Flow*, Task Quarterly, Gdańsk, Vol.5, No4.
- [3] PUZYREWSKI R. (1969), *Kondensacja pary wodnej w dyszy de Laval*, PWN, Warszawa-Poznań



ELŻBIETA FORNALIK\*, PIOTR FILAR\*\*, HIROYUKI OZOE\*, JANUSZ S. SZMYD\*

## KONWEKCJA MAGNETYCZNA W NACZYNIU CYLINDRYCZNYM MAGNETIC CONVECTION IN A CYLINDRICAL ENCLOSURE

\*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, Katedra Teorii i Inżynierii Procesów Metalurgicznych, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, [elaf@agh.edu.pl](mailto:elaf@agh.edu.pl)

\*\*Siltronic Japan Corporation, 3434 Shimata, Hikari, Yamaguchi 743-0063 Japan, [piotr.filar@siltronic.com](mailto:piotr.filar@siltronic.com)

Słowa kluczowe: konwekcja magnetyczna, termosyfon, wizualizacja

W pracy przedstawiono analizę eksperymentalną pola temperatury wraz z symulacją numeryczną przepływu płynu w naczyniu cylindrycznym. Badane naczynie stanowiło prosty model termosyfonu. Cylinder wykonany został z miedzi. Jedna połowa ścianki bocznej była grzana, natomiast druga – chłodzona. Między nimi została umieszczona płyta z Plexiglasu o grubości 0.004 m. Jej zadaniem było ograniczenie przepływu ciepła między grzaną i chłodzoną częścią ścianki bocznej. Górna i dolna ścianka cylindra również została wykonana z Plexiglasu lecz o grubości 0.005 m. Poza ograniczeniem strat ciepła, te ścianki umożliwiały wizualizację pola temperatury.

Naczynie wypełnione było cieczą paramagnetyczną z dodatkiem zawiesziny ciekłych kryształów. Ciekłe kryształy wykorzystane zostały do wizualizacji pola temperatury w przekroju znajdującym się w połowie wysokości cylindra. Podatność magnetyczna cieczy paramagnetycznej, zgodnie z prawem Curie, jest odwrotnie proporcjonalna do jej temperatury bezwzględnej. W sytuacji, gdy ciecz posiada różną temperaturę, wystąpi również różnica w podatności magnetycznej. Ta własność ma ogromne znaczenie, gdy ciecz paramagnetyczna zostanie poddana działaniu pola magnetycznego.

W przypadku gdy górna połowa ścianki bocznej cylindra była chłodzona, a dolna grzana obserwowano zjawisko konwekcji naturalnej. Na zdjęciach pola temperatury izotermy układały się w strukturę szprychową. Ilość struktur szprychowych zależała od różnicy temperatur między grzaną a chłodzoną częścią ścianki bocznej: im wyższa różnica tym większa ilość struktur szprychowych.

Gdy ten system został umieszczony w silnym polu magnetycznym (do 5 Tesli) ciecz o wyższej temperaturze była „odpychana”, a ciecz o niższej temperaturze „przyciągana” przez pole magnetyczne. Obserwacja pola temperatury pokazała zwiększoną ilość struktur szprychowych, co sugeruje intensyfikację konwekcji podobną do tej, która pojawiała się przy zwiększonej różnicy temperatur.

Analiza numeryczna tego zjawiska pozwoliła na poznanie genezy powstawania struktur szprychowych w obrazie pola temperatury, co uzupełniło badania eksperymentalne i pozwoliło na lepsze poznanie zachodzących zjawisk.

Podziękowania

Badania te były częściowo finansowane przez Unię Europejską (Projekt [Dev-CPPS](#), FP6 - [No. 002968](#)).

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY DOŚWIADCZALNE MECHANIKI PŁYNÓW



ELŻBIETA MORYŃ-KUCHARCZYK<sup>1</sup>, PAVEL JONÁŠ<sup>2</sup>, OTON MAZUR<sup>2</sup>, MACIEJ PODOLSKI<sup>1</sup>,  
VÁCLAV URUBA<sup>2</sup>

## ZASTOSOWANIE TECHNIKI TERMOANEMOMETRYCZNEJ W BADANIACH MODELOWYCH NAD ROZPRZESTRZENIANIEM SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH

### APPLICATION OF HOT-WIRE ANEMOMETRY TO THE INVESTIGATIONS OF POLLUTANT DISPERSION

<sup>1</sup>Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Al. Armii Krajowej 21,  
42-200 Częstochowa, [moryn@imc.pcz.czest.pl](mailto:moryn@imc.pcz.czest.pl), [podolski@imc.pcz.czest.pl](mailto:podolski@imc.pcz.czest.pl)

<sup>2</sup>Czeska Akademia Nauk, Instytut Termomechaniki, Dolejškova 5, 18200 Praga 8, [jonas@it.cas.cz](mailto:jonas@it.cas.cz),  
[mazur@it.cas.cz](mailto:mazur@it.cas.cz), [uruba@it.cas.cz](mailto:uruba@it.cas.cz)

Słowa kluczowe: mieszanina powietrze/CO<sub>2</sub>, pomiar koncentracji i prędkości, termooanemometria

W pracy przedstawione zostały wyniki wspólnych badań prowadzonych w Instytucie Termomechaniki Czeskiej Akademii Nauk w Pradze i w Instytucie Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej dotyczących wykorzystania techniki termooanemometrycznej do jednoczesnego pomiaru prędkości i koncentracji dwuskładnikowych mieszanin gazowych [1,2]. Skoncentrowano się na sondach dwuczujnikowych przeznaczonych do pomiarów w mieszaninie powietrze/CO<sub>2</sub>, bazując przy tym na doświadczeniach Instytutu Termomechaniki z tego typu sondami, ale o innej konstrukcji, wykorzystywanych do badań w mieszaninie powietrze/hel. Hel ze względu na swoje właściwości termofizyczne nie nadaje się jednak na gaz znacznikowy w badaniach z zakresu aerodynamiki środowiska i stąd zainteresowanie dwutlenkiem węgla i możliwościami pomiaru koncentracji i prędkości w mieszaninie powietrze/CO<sub>2</sub>.

W pracy omówione zostały właściwości badanych sond, sposób ich wzorcowania i związane z tym problemy. Przedstawiono także opracowane metody określania wartości średnich i wariancji koncentracji dwutlenku węgla i prędkości mieszaniny powietrze/CO<sub>2</sub> wraz z dyskusją ich wad i zalet. Pozwoliło to na wyciągnięcie wniosków co do możliwości i ograniczeń techniki termooanemometrycznej w zastosowaniu do modelowych badań dyspersji zanieczyszczeń z dwutlenkiem węgla jako znacznikiem gazowym.

#### PIŚMIENICTWO CYTOWANE

- [1] MORYŃ-KUCHARCZYK E., JONÁŠ P., MAZUR O., URUBA V., *Preliminary investigation of the features of a probe with a hot wires pair at measurement in an air/CO<sub>2</sub> mixture stream*. Proc. Colloquium FLUID DYNAMICS 2003, Prague, 22.-24.10.2003, 89-92.
- [2] MORYŃ-KUCHARCZYK E., JONÁŠ P., MAZUR O., URUBA V., *Application of hot-wire anemometry in a wind-tunnel modeling of gaseous pollutants spreading*. Proc. Colloquium ENGINEERING MECHANICS 2004, Svratka, 10.-13.05.2004, CD



TOMASZ A. KOWALEWSKI, SŁAWOMIR BŁOŃSKI

## MICROFLOWS AND NANOFIBRES

Polish Academy of Sciences, Institute of Fundamental Technological Research,  
IPPT PAN, Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa, [tkowale@ippt.gov.pl](mailto:tkowale@ippt.gov.pl)

Keywords: microflow, micro-PIV, nanofibers, electrospinning

Fast developments in micro- and nanotechnology, advances in microfabrication, manipulation and engineering of systems characterized by micrometer and, more recently, nanometer scales create the demanding challenge for traditional fluid mechanics. In the response outburst of new experimental tools, theoretical approaches and numerical methods becomes available, allowing fluid dynamists to explore and characterize such systems. Here we present short review of the subject illustrated by two snap-shots from our recent research: turbulent flow in micro-channel and electrospinning of nanofibers.

The first of described research problems involves both numerical and experimental investigation of instability and turbulence structures within micro-channel, with the main application being break-up of micro-emulsion droplets and micro-scale mixing. Due to the small dimensions, achieving turbulent eddies and other flow instabilities is more difficult than at the macro-scale. More difficult yet is imaging such turbulent structures. In the study water pumped in a narrow gap of an emulsifier is investigated experimentally using micro-PIV technique and compared with numerical predictions performed using the commercial code Fluent. The micro-PIV system, based on epifluorescence illumination and high speed imaging, allows for collection instantaneous flow velocity fields in a 0.4mm high and 1mm long channel formed between two glass plates. The experimental data are compared with the numerical results obtained using both turbulent and laminar flow models. It was found that due to small channel dimensions and very short flow development length the turbulent energy dissipation takes place mainly in the gap and shortly behind it. The estimated value of mean energy dissipation is used to predict mean droplets diameter. These predictions are validated using experimental data for the emulsion.

The production of nano-scale dimension materials is not a trivial task. One of the simplest possibilities to reach small size is electrospinning of nanofibres from polymer solutions or melts. It is obtained by issuing a liquid jet electrically charged by high voltage potential (~20kV/m). The axial tension of a fibre, provided by electrostatic forces, leads to elongation ratios of 10000 and more without breaking the thread. The resulting nanofibre is collected as an interconnected web of thin filaments (fibre mat) on the surface of a grounded target. Characterisation of the charged liquid jet dynamics creates challenging problem, involving hydrodynamics, rheology and electrostatics. The problem is analysed experimentally and compared with simplified theoretical model. By applying numerical simulations parametric study is performed to elucidate basic factors responsible for the phenomenon.



ZBIGNIEW MATRAS, STANISŁAW WALCZAK

## ANORMALNE ZJAWISKO PRZEPŁYWOWE WYWOŁANE DODATKAMI POLIMEROWO – MICELARNYMI

### THE FLOW PHENOMENA CAUSED BY POLYMER AND SURFACTANT ADDITIVES

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, al. Jana Pawła II nr 37, 31-864 Kraków,  
[zmatras@mech.pk.edu.pl](mailto:zmatras@mech.pk.edu.pl), [swalczak@mech.pk.edu.pl](mailto:swalczak@mech.pk.edu.pl)

Słowa kluczowe: dodatki polimerowo – micelarne, redukcja oporów przepływu

W pracy podjęto próbę wyjaśnienia zjawiska redukcji oporów przepływu za pomocą jednoczesnego dodania do rozpuszczalnika (wody) środka powierzchniowo czynnego i wielkocząsteczkowego polimeru.

Opisano mechanizm powstawania struktur polimerowo – micelarnych oraz metodę ich identyfikacji. Na podstawie przeprowadzonych badań reologicznych zidentyfikowano badane roztwory zaliczając je do potęgowych cieczy Ostwalda – de Waele. Wykreślono krzywe oporów przepływu i porównano je z krzywymi oporów substancji powierzchniowo czynnych oraz wielkocząsteczkowych polimerów. Na tej podstawie stwierdzono, że roztwory polimerowo – micelarne wykazują znacznie efektywniejszą redukcję, ulegając przy tym tylko niewielkiej degradacji. Wyszczególniono wszystkie dodatkowe efekty towarzyszące przepływowi cieczy polimerowo – micelarnej dokumentując je odpowiednimi wykresami.

Wysunięto hipotezę dotyczącą mechanizmu redukcji oporów, która zdaniem autorów powinna przybliżyć zrozumienie tego nowego zjawiska. Zaproponowano także zależności funkcyjne opisujące krzywą oporów przepływu substancji polimerowo – micelarnej w poszczególnych jej zakresach.

Głównym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonych obszernych badań doświadczalnych, jest stwierdzenie, że w porównaniu z roztworami wielkocząsteczkowych polimerów i cieczy polimerowo – micelarnych następuje znacznie większa i efektywniejsza redukcja oporów przepływu w zakresie turbulentnym oraz istotnie mniejsza degradacja struktury molekularnej roztworu dla niewielkich stężeń tego rodzaju roztworów.





ZBIGNIEW MATRAS, STANISŁAW WALCZAK

## IDENTYFIKACJA ZŁOŻONYCH REOLOGICZNIE CIECZY NIENEWTONOWSKICH

### THE IDENTIFICATION OF COMPLEX PROPERTIES OF NON-NEWTONIAN FLUIDS

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, al. Jana Pawła II nr 37, 31-864 Kraków,  
[zmatras@mech.pk.edu.pl](mailto:zmatras@mech.pk.edu.pl), [swalczak@mech.pk.edu.pl](mailto:swalczak@mech.pk.edu.pl)

Słowa kluczowe: własności reologiczne, ciecze nienewtonowskie

Głównym celem pracy była identyfikacja złożonych reologicznie cieczy nienewtonowskich wykazujących anormalne zachowanie się w zakresie przepływu turbulentnego. Dotyczyło to zbadania parametrów reologicznych i charakterystyk przepływowych roztworów polimerowych i substancji powierzchniowo czynnych.

Przygotowane uprzednio roztwory polimerowe i polimerowo - micelarne poddano badaniom reologicznym, sporządzając tzw. rurowe krzywe płynięcia. Krzywe te określają zależność pomiędzy naprężeniem stycznym na ścianie przewodu a tzw. rurową szybkością ścinania.

Celem wyznaczenia krzywej płynięcia zastosowano kapilary o tak dobranych średnicach, aby zapewnić przepływ laminarny w szerokim zakresie prędkości ścinania. Stwierdzono, że efekt poślizgu na ścianie nie występuje w badanych przez autorów roztworach nienewtonowskich.

Podstawową charakterystykę reologiczną (krzywą płynięcia) badanych roztworów opisać można prawem potęgowym Ostwalda de Waele. Wartości wskaźnika płynięcia „n” i stałej konsystencji „K” wyznaczono metodą regresji liniowej, aproksymując dane doświadczalne krzywej płynięcia w układzie podwójnie logarytmicznym.

W miarę wzrostu stężenia roztworu wartość wskaźnika płynięcia „n” maleje, co świadczy o narastających nienewtonowskich właściwościach badanych roztworów. Wartość wskaźnika płynięcia „n” jest w przybliżeniu stała w szerokim zakresie prędkości ścinania (tzn. współczynnik kierunkowy stycznej do krzywej płynięcia jest taki sam w każdym punkcie, i był mniejszy od jedności).

Badaniom reologicznym poddano także wodne roztwory wielkocząsteczkowego polimeru (politlenku etylenu PEO) o trzech różnych masach cząsteczkowych, równych odpowiednio  $3,3 \cdot 10^6$ ,  $5 \cdot 10^6$  i  $8 \cdot 10^6$ , które posłużyły autorom jako podstawa do porównania, roztworów polimerowo – micelarnych z roztworami polimerowymi lub micelarnymi i wpływem masy cząsteczkowej PEO na charakterystyki przepływowe badanych roztworów rurach o przekroju kołowym.

Podstawowym wnioskiem (poza innymi pobocznymi) jest stwierdzenie, że wzrost masy cząsteczkowej polimeru w roztworze powoduje istotną redukcję oporów przepływu oraz nienewtonowskie zachowanie się cieczy.

W miarę wzrostu masy cząsteczkowej politlenku etylenu (PEO) nasilają się również nienewtonowskie a zwłaszcza lepkość właściwości badanych roztworów.



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY DOŚWIADCZALNE MECHANIKI PŁYNÓW



PAWEŁ MIREK, WOJCIECH NOWAK

## BADANIA WARUNKÓW PRZEPŁYWOWYCH TWORZĄCYCH SIĘ W SKRZYNIACH POWIETRZNYCH KOTŁÓW Z CWF DUŻEJ MOCY

### THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW CONDITIONS FORMING IN THE WINDBOX OF LARGE-SCALE CFB BOILERS

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii i Ochrony Środowiska,  
ul. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa, [pmirek@neo.pl](mailto:pmirek@neo.pl)

Słowa kluczowe: skrzynia powietrzna, dysze powietrzne, pole prędkości

W artykule opisano wpływ warunków przepływowych tworzących się w skrzyniach powietrznych kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną na równomierność rozprowadzenia powietrza w komorze paleniskowej kotła, a w szczególności na występowanie niepożądanego zjawiska przesypywania materiału warstwy do objętości skrzyni. W oparciu o pomiary ruchowe kotła, jak również badania laboratoryjne oraz symulacje numeryczne, dokonano identyfikacji warunków, przy których zachodzi przesyp materiału. Główną uwagę w pracy zwrócono na silny wpływ pola prędkości gazu formującego się w bezpośrednim sąsiedztwie rusztu na występowanie odwróconego gradientu ciśnienia. Tego typu podejście, lekceważone do tej pory w nielicznych doniesieniach literaturowych, przenosi ciężar dotychczasowych rozważań nad problemem przesypywania z urządzeń, jakimi w tym wypadku są dysze powietrzne, na zapewnienie właściwych warunków przepływowych, tworzących się w objętości wewnętrznej pod rusztem. Zdaniem autorów, optymalizacja rusztu powietrza pierwotnego stanowi zadanie wieloetapowe, w którym pierwszym krokiem jest dokładne zbadanie jednorodności pola prędkości gazu występującego w skrzyni powietrznej.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY DOŚWIADCZALNE MECHANIKI PŁYNÓW



PAWEŁ MIREK, WOJCIECH NOWAK

## TECHNIKA LASEROWEGO NOŻA ŚWIETLNEGO W BADANIACH UKŁADÓW FLUIDYZACYJNYCH

### THE LASER SHEET TECHNIQUE IN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLUIDIZED BED SYSTEMS

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii i Ochrony Środowiska,  
ul. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa, [pmirek@neo.pl](mailto:pmirek@neo.pl)

Słowa kluczowe: laserowy nóż świetlny, sonda telemetryczna, warstwa fluidalna

W pracy opisano możliwości wykorzystania techniki laserowego noża świetlnego do badania cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej. W badaniach wykorzystano laserowy nóż świetlny wygenerowany przez laser półprzewodnikowy dużej mocy, co pozwoliło na elektroniczną modulację wiązki oraz rejestrację trójwymiarowego pola prędkości ziaren z wykorzystaniem komercyjnej kamery CCD, pracującej ze standardową częstotliwością telewizyjną. Do elektronicznej modulacji wiązki wykorzystano opracowany w KOWiOA Politechniki Częstochowskiej mikroprocesorowy sterownik prądowy umożliwiający dowolne modelowanie kształtu oraz częstotliwości generowanych impulsów prądowych. Analiza zarejestrowanych obrazów wieloekspozycyjnych dokonana została przy wykorzystaniu autorskiego oprogramowania. Drugim z testowanych detektorów była quasipunktowa ultraszybka linijka fotodiodowa. W tym przypadku, pomiary wykonywano przy niezmodulowanej wiązce światła laserowego. Przedstawiono wyniki pomiarów względnej koncentracji oraz prędkości ziaren, zarejestrowane w rzadkich strefach kolumny fluidyzacyjnej. Ponadto, dokonano porównania prezentowanych metod pomiarowych w odniesieniu do standardowo wykorzystywanych technik PIV, wykorzystujących dwuklatkową jednoekspozycyjną rejestrację obrazów, jak również znanych quasipunktowych technik pomiarowych, wykorzystujących ideę amplitudowego filtra cieniowego.



ŁUKASZ MALINOWSKI, KAZIMIERZ RUP

## ANALIZA TEORETYCZNO DOŚWIADCZALNA POMIARU STRUMIENIA OBJĘTOŚCI PŁYNU ZA POMOCĄ PRZEPŁYWOMIERZA KOLANOWEGO

### THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF FLUID FLOW RATE MEASUREMENT WITH USE OF ELBOW METER

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków,  
[lucam@interia.pl](mailto:lucam@interia.pl), [krup@usk.pk.edu.pl](mailto:krup@usk.pk.edu.pl)

Słowa kluczowe: metoda pomiaru, przepływomierz kolanowy

Szybki rozwój numerycznych technik obliczeniowych umożliwia opracowanie nowych metod pomiarowych opartych na realistycznych modelach matematycznych badanych zjawisk przepływowych.

W niniejszej pracy zostanie zaprezentowana oryginalna metoda pomiaru strumienia przepływu w zastosowaniu do przepływomierzy kolanowych. Cechą charakterystyczną prezentowanej metody jest dwuparametrowe ( $\Delta p$ ,  $Re$ ) badanie wyznaczanego strumienia płynu. Gdzie  $\Delta p$  oznacza różnicę ciśnienia w skrajnych punktach siecznej łuku kolana. Poszukiwaną wartość strumienia objętościowego przepływu płynu wyznacza się w sposób numeryczny dokonując minimalizacji wyrażenia stanowiącego różnicę pomiędzy wielkością zmierzoną  $\Delta p_{exp}$  i odpowiednią obliczoną  $\Delta p_{num}$ . W obliczeniach numerycznych oprócz zmierzonej różnicy ciśnienia ( $\Delta p_{exp}$ ) uwzględnia się dokładną geometrię obszaru przepływu oraz zmierzoną wartość temperatury płynu, determinującą właściwości termofizyczne płynu. Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą pakietu FLUENT.

W celu praktycznej realizacji metody zbudowano stanowisko doświadczalne. Podstawową częścią stanowiska jest rurociąg o średnicy wewnętrznej  $D_w=100,6[\text{mm}]$ , złożony z trzech części: odcinka pionowego o długości  $L_1=6[\text{m}]$ , łuku kolana  $90^\circ$  o względnym promieniu  $R/D=3,92$  oraz odcinka poziomego za kolaniem o długości  $L_2=3[\text{m}]$ . W połowie pionowego odcinka rury umieszczono kryzę pomiarową o średnicy wewnętrznej  $d=78 [\text{mm}]$ . Uzyskane za pomocą wspomnianej kryzy rezultaty służą do porównań wyników pomiaru pośredniego. Na siecznej kolana wykonano dwa otwory impulsowe do pomiaru ciśnienia za pomocą zestawu przetwornika ciśnienia wraz z miernikiem cyfrowym. Wspomniane otwory impulsowe do pomiaru ciśnienia wykorzystywano wymiennie do pomiaru rozkładu prędkości na siecznej kolana za pomocą termoanemometru.

Zaprezentowana w pracy metoda pośredniego pomiaru strumienia przepływu płynu odznacza się wysoką dokładnością i powtarzalnością oraz eliminuje konieczność częstego wzorcowania przepływomierza kolanowego. Wysoką dokładność pomiaru umożliwia między innymi opracowany, realistyczny model matematyczny, złożonego przepływu płynu w obszarze przepływomierza.

Rozważany przepływomierz kolanowy realizujący prezentowaną pośrednią metodę pomiaru może być zastosowany do wyznaczenia strumienia przepływu gazów jak również cieczy.



ALEKSANDER OLCZYK, KRZYSZTOF SOBCZAK

## ANALIZA NIESTACJONARNYCH ZJAWISK PRZEPŁYWOWYCH W PRZEWODACH ZASILANYCH PRZEPŁYWEM PULSACYJNYM

### ANALYSIS OF UNSTEADY FLOW PHENOMENA IN PIPES SUPPLIED WITH PULSATING FLOW

Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Instytut Maszyn Przepływowych;  
ul. Wólczańska 219/223, 93-005 Łódź, [aolczyk@p.lodz.pl](mailto:aolczyk@p.lodz.pl), [ksobczak@p.lodz.pl](mailto:ksobczak@p.lodz.pl)

Słowa kluczowe: jednowymiarowy, niestacjonarny przepływ gazu

W artykule zostanie zaprezentowany i zweryfikowany model jednowymiarowego przepływu niestacjonarnego dla lepkiego, ściśliwego czynnika płynącego w prostym przewodzie o przekroju kołowym. Model ten został opisany w [1], a jego cechami charakterystycznymi są zamodelowanie zależności naprężeń stycznych a średnią prędkością przepływu na podstawie analizy wymiarowej przy wykorzystaniu formuły Blasiusa oraz zależności strumienia ciepła przez ściankę kanału od naprężeń stycznych na podstawie analogii Colburna [2]. Pierwotnie model był wykorzystywany do obliczeń transmisji sygnału pneumatycznego w cienkich rurkach sygnałowych. W prezentowanym zastosowaniu wykorzystano go do obliczeń parametrów przepływu w przewodach zasilających turbinę zespołu ładującego. W tym przypadku mamy do czynienia z przepływem o charakterze pulsacyjnym o częstościach sięgających 150Hz oraz amplitudach przekraczających nierzadko 100% składowej stałej. Zastosowanie modelu do nowego obiektu wymagało zmiany stawianych warunków brzegowych oraz dostosowania go do wyższych amplitud. Weryfikację modelu przeprowadzono zadając na wylocie z przewodu warunek stałego ciśnienia (realizowany przy pomocy zbiornika o dużej objętości) lub zmiennego ciśnienia (realizowany za pomocą turbiny zespołu ładującego umieszczonej zamiast zbiornika). W celu możliwie dokładnego postawienia warunków brzegowych, w przekrojach kontrolnych przewodu dokonywano pomiarów chwilowych wartości parametrów przepływu: ciśnień (za pomocą przetworników piezorezystancyjnych) temperatur oraz prędkości przepływu (za pomocą dwuwłóknowego układu termometr stałoprądowy-termoanemometr stałotemperaturowy).

Model został pozytywnie zweryfikowany w obszarze zmian parametrów przepływu występującym podczas badań. Rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarami są rzędu kilku procent – w skrajnych przypadkach sięgają kilkunastu %. Ważnym atutem modelu jest jego prostota, przebiegająca się bezpośrednio na czas obliczeń.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] KAZIMIERSKI Z., RABIEGA M., SOBCZAK K., *One-Dimensional Model of a Pulsating Viscous Flow in Tubes*. Turbomachinery n° 115, Technical University of Łódź. 1999.
- [2] SOBCZAK K., *Opracowanie numerycznego modelu turbulentnego przepływu pulsacyjnego gazu przez rurki z wymianą ciepła*. Raport końcowy projektu KBN nr 8T07A04020, 2002.



MACIEJ PODOLSKI

## NIESTACJONARNE ZJAWISKA TERMICZNE PODCZAS CHŁODZENIA CYLINDRA TURBULENTNYM STRUMIENIEM OSCYLACYJNYM

### UNSTEADY HEAT TRANSFER FROM A CIRCULAR CYLINDER IN TURBULENT OSCILATION FLOW

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki  
Instytut Maszyn Ciepłych, Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,  
[podolski@imc.pcz.czest.pl](mailto:podolski@imc.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: niestacjonarna wymiana ciepła, napływ oscylacyjny, synchronizacja lock-on

Tematyka niniejszej pracy jest ściśle związana z dziedziną termoaerodynamiki procesów przepływowych, których cechą jest współistnienie w przepływie zjawisk o losowym i periodycznym charakterze zmienności. Właściwości takie towarzyszą między innymi turbulentnemu opływowi chłodzonych w opływie ciał. Wymuszona konwekcja ciepła zachodzi tu bowiem w obecności nie tylko losowych fluktuacji prędkości, lecz również w warunkach istnienia okresowych form ruchu wywołanych głównie procesem schodzenia wirów, ale również zewnętrznie uformowanymi oscylacjami napływu [1].

Wykorzystana w pracy metoda pomiaru chwilowych wielkości charakteryzujących proces wymiany ciepła zakłada wykorzystanie dwóch identycznych czujników foliowych naklejonych jeden na drugim i połączonych ze standardowymi układami CTA. Taka konfiguracja pozwala zakładać, że strumień energii cieplnej dyssypowanej z „głównego” czujnika odbierany jest na drodze konwekcji wymuszonej przez przepływ, a jego nieznaczna część (zależna od poziomu różnicy temperatur obu czujników), na drodze przewodzenia oddawana jest do badanego obiektu.

Pomiary zostały wykonane w tunelu aerodynamicznym przy stałej prędkości średniej i zmiennej częstotliwości zaburzeń wlotowego pola prędkości w zakresie obejmującym rezonans lock-on oraz zakres poza rezonansowy [2]. Uzyskane rezultaty wskazują jednoznacznie na silnie modyfikujący wpływ pulsacji napływu na nieustalony proces chłodzenia obiektu widoczny szczególnie w punkcie stagnacji oraz za obiektem, a dotyczy zarówno charakterystyk wielkości średnich jak i fluktuacyjnych.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] SANITJAI S., GOLDSTEIN R.J., *Forced convection heat transfer from a circular cylinder in crossflow to air and liquids*. Int. J. Heat and Mass Transfer, **47**, 2004, 4795 – 4805.
- [2] JARZA J., PODOLSKI M., *Turbulence structure in the vortex formation region behind a circular cylinder in lock-on conditions*. European Journal of Mechanics B/Fluids, **23**, 2004, 535–550.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY DOŚWIADCZALNE MECHANIKI PŁYNÓW



JAN ARTUR SZUMSKI, PIOTR DOERFFER

## ZASTOSOWANIE FARBY CZUŁEJ NA CIŚNIENIE W RZEPŁYWACH TRANSONICZNYCH (PSP METHOD)

### APPLICATION OF THE PRESSURE SENSITIVE PAINT METHOD FOR TRANSONIC FLOW MEASUREMENTS

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego Polskiej Akademii Nauk, Ośrodek Termomechaniki Płynów, Zakład Przepływów Transonicznych i Metod Numerycznych, ul. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk,  
[jaszum@imp.gda.pl](mailto:jaszum@imp.gda.pl), [doerffer@imp.gda.pl](mailto:doerffer@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: eksperymentalne metody pomiarowe, wizualizacja przepływu, farby czułe na ciśnienie

Tradycyjny pomiar rozkładu ciśnienia na powierzchni modelu wykonywany jest za pomocą układu otworków pomiaru ciśnienia statycznego. Metoda ta wymaga wiercenia otworów pomiaru ciśnienia statycznego o niewielkiej średnicy w modelu, a więc naruszenia jego powierzchni. Otworki ciśnienia statycznego łączone są z urządzeniem rejestrującym ciśnienie np. zestawem manometrów lub układem przetworników ciśnienia. Zastosowanie tej metody jest kłopotliwe w przypadku poruszającego się modelu (obracające się łopatki sprężarki lub turbiny) oraz w przypadku cienkich profili skrzydeł lub konstrukcji o niewielkiej sztywności.

Nowa metoda optyczna wykorzystująca farby czułe na ciśnienie (koncentrację powierzchniową tlenu) pozwala otrzymać ciągły rozkład ciśnienia statycznego na całej powierzchni modelu bez jego modyfikacji. Technologia PSP pozwala lepiej zrozumieć naturę przepływu ze względu na dużą ilość dostarczanych informacji, potrzebnych w analizie zachodzących zjawisk. Metoda ta jest bardzo dobrym rozwiązaniem dla skomplikowanych przepływów (badania przedmuchu przez ściany perforowane, badania wpływu wirów wzdłużnych na stabilizację pozycji fali uderzeniowej i redukcję obszaru oderwania warstwy przyściennej).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie podstaw fizycznych metody PSP, ogólnej idei, podstawowych równań, typowego układu pomiarowego i różnych sposobów aplikacji metody. Praca niniejsza adresowana jest więc do badaczy chcących zdobyć podstawową wiedzę o metodzie farb czułych na ciśnienie lub planujących zwiększyć ilość metod pomiarowych w ich laboratoriach. W pracy zawarto dane techniczne typowego systemu pomiarowego PSP, a także podstawowy skład chemiczny farb PSP zawierającej dwa komponenty. Niniejsza praca zawiera również podstawowy opis zjawisk fizycznych towarzyszących metodzie PSP takich jak: wzbudzenie, emisja oraz tłumienie tlenowe.

Wdrożenie systemu PSP w IMP PAN jest w końcowej fazie i w chwili publikacji niniejszego streszczenia dostępne są wstępne wyniki kalibracji. Niniejsza praca zawiera przegląd wybranych funkcji pakietu AFIX2 używanego do przetwarzania danych w metodzie PSP. Ostatnim wątkiem niniejszej pracy jest przedstawienie planów IMP PAN związanych z metodą PSP.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



ARTUR TYLISZCZAK, ANDRZEJ BOGUSŁAWSKI

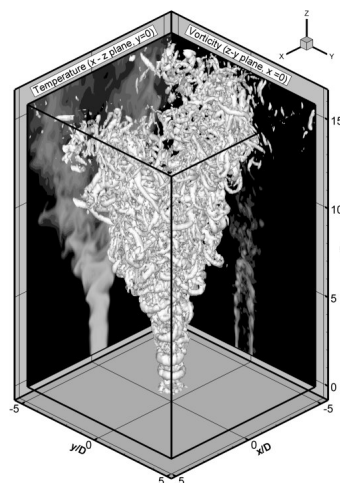
## MODELOWANIE STRUG BIFURKUJĄCYCH METODĄ LES

### MODELLING OF THE BIFURCATING JET USING LES METHOD

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Maszyn Ciepłych  
Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa  
[atyl@imc.pcz.czest.pl](mailto:atyl@imc.pcz.czest.pl), [abogus@imc.pcz.czest.pl](mailto:abogus@imc.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: LES, strugi bifurkujące, kontrola przepływu

Procesy mieszania odgrywają bardzo istotną rolę w bardzo wielu technicznych aplikacjach (spalanie, hałas aerodynamiczny, odparowanie spraju). Ich efektywność w strugach swobodnych jest zdeterminowana mechanizmem utraty stabilności (konwekcyjna lub absolutna utrata stabilności) oraz poziomem turbulencji w początkowym obszarze strugi. Z praktycznego punktu widzenia pożądane jest, aby procesy mieszania w strugach można było intensyfikować lub tłumić w sposób bezpośredni, mając w ten sposób „pełną” kontrolę nad rozwojem przepływu. Tak zwana aktywna kontrola przepływu, choć zapoczątkowana przez Crow & Champagne (JFM, 1971) już w latach 70., znajduje się obecnie w głównym nurcie zainteresowań wielu ośrodków badawczych. W przypadku przepływów strug polega ona na odpowiedniej modulacji wlotowego pola prędkości, przez co w istotny sposób można wpływać zarówno na ilościowe jak i jakościowe zmiany charakteru przepływu. Niezwykle ciekawym zjawiskiem powstającym w wyniku tego typu oddziaływania są tak zwane strugi bifurkujące - charakteryzują się one rozdzieleniem głównego strumienia na dwa współistniejące strumienie (patrz przedstawiony rysunek). Badania numeryczne przeprowadzone metodami DNS (Danaila & Boersma, Phys. Fluids 1999) i LES (Urbin & Metais, DLES-2 1997; da Silva & Metais, Phys. Fluids 2002, Tyliszczak & Bogusławski, DLES-6 2005) potwierdziły wnioski obserwowane w pracach eksperymentalnych. W niniejszej pracy analizie numerycznej poddano wpływ parametrów wlotowych (poziom turbulencji, grubość strefy mieszania, poziom i typ modulowanego zaburzenia) na pole przepływu w bifurkujących strugach izotermicznych. Obliczenia wykonano własnym kompaktowo/pseudospektralnym kodem obliczeniowym SAILOR metodą LES. Uzyskane wstępne wyniki symulacji pokazują, iż wymienione powyżej parametry kontrolne w sposób bardzo istotny wpływają na pole przepływu, jednakże bifurkacja strugi jest w głównej mierze zdeterminowana przez typ modulowanego zaburzenia.







SŁAWOMIR KUBACKI, ANDRZEJ BOGUSŁAWSKI

## ZASTOSOWANIE METODY MACIERZY WPŁYWU W POŁĄCZENIU Z METODĄ DEKOMPOZYCJI OBSZARU OBLICZENIOWEGO DO ROZWIĄZANIA RÓWNAŃ NAVIERA-STOKESA

### APPLICATION OF THE INFLUENCE MATRIX METHOD FOR MULTI-DOMAIN SOLUTION OF THE NAVIER-STOKES EQUATIONS

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Maszyn Ciepłych,  
al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, [kubacki@imc.pcz.czest.pl](mailto:kubacki@imc.pcz.czest.pl),  
[abogus@imc.pcz.czest.pl](mailto:abogus@imc.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: obliczenia równoległe, metody spektralne, sformułowanie wirowość-funkcja prądu

Metody dekompozycji obszaru obliczeniowego w połączeniu ze spektralną aproksymacją rozwiązania stanowią efektywny algorytm umożliwiający rozwiązanie złożonych zagadnień numerycznej mechaniki płynów. Metody spektralne ze względu na wysoki rząd aproksymacji pozwalają na uzyskanie dużych dokładności obliczeniowych i stosowane są m.in. do symulacji przepływów przy bezpośrednim rozwiązaniu równań Naviera-Stokesa metodą DNS (Direct Numerical Simulation) dla relatywnie prostych geometrii obszarów obliczeniowych. Metody dekompozycji obszaru obliczeniowego pozwalają na rozszerzenie stosowalności metod spektralnych do rozwiązania zagadnień, w których występują bardziej złożone geometrie obszarów obliczeniowych i stanowią podstawę implementacji algorytmów zrównoleglenia obliczeń.

Zasadniczym celem niniejszej pracy jest opracowanie efektywnego algorytmu zrównoleglenia równań Naviera-Stokesa sformułowanych w postaci wirowość-funkcja prądu, przy zastosowaniu spektralnej metody kolokacji. Do rozwiązania równań Naviera-Stokesa zastosowano metodę iteracyjną dekompozycji obszaru obliczeniowego dla podoblaszów nie przekrywających się, w połączeniu z metodą macierzy wpływu. Metoda macierzy wpływu pozwala na wyznaczenie nieznanych wartości wirowości na brzegu obszaru obliczeniowego. W ramach pracy zaproponowano dwa algorytmy zrównoleglenia obliczeń przy zastosowaniu metody macierzy wpływu w połączeniu z metodą dekompozycji obszaru obliczeniowego. W pierwszej metodzie nieznanne wartości wirowości na brzegu obszaru obliczeniowego wyznaczane są na podstawie rozwiązania układu równań na jednym z procesorów. W metodzie drugiej do rozwiązania tego zagadnienia zastosowano algorytm iteracyjny bazujący na lokalnych macierzach wpływu, rozwiązywanych niezależnie na każdym z procesorów.

Zaproponowane algorytmy obliczeń równoległych zastosowano do rozwiązania przepływu w kwadratowym zagłębieniu oraz do symulacji zjawiska konwekcji naturalnej w długim kanale, stosując podział obszaru obliczeniowego w jednym z kierunków przestrzeni na określoną liczbę podoblaszów.



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



MICHAŁ STĘPIEŃ, ANDRZEJ BOGUSŁAWSKI

## MATEMATYCZNE MODELOWANIE TRÓJWYMIAROWEGO OGNIWA PALIWOWEGO TYPU PEM

### MATHEMATICAL MODELLING OF THREE-DIMENSIONAL PEM FUEL CELL

Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Ciepłych, Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,  
[abogus@imc.pcz.czest.pl](mailto:abogus@imc.pcz.czest.pl), [mstepien@imc.pcz.czest.pl](mailto:mstepien@imc.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: ogniwo paliwowe typu PEM, numeryczna mechanika płynów

W pracy przedstawiony został trójwymiarowy model matematyczny ogniwa paliwowego z membraną polimerową. W modelu założono warunki ustalone, stałą temperaturę ogniwa oraz uwzględniono reakcje elektrochemiczne na katalizatorach anody i katody. Odpowiedni układ równań transportu opisujący pracę ogniwa paliwowego rozwiązany został w kanałach przepływowych oraz w warstwach dyfuzyjnych za pomocą komercyjnego programu FLUENT. Procesy fizyko - chemiczne występujące w poszczególnych obszarach ogniwa paliwowego wyrażone zostały poprzez człony źródłowe w odpowiednich równaniach transportu. Program FLUENT w swej podstawowej wersji nie pozwala na modelowanie reakcji elektrochemicznych, dlatego został poddany modyfikacji przy użyciu funkcji użytkownika UDF. Są to funkcje programowalne przez użytkownika, które mogą być następnie dynamicznie podłączane do solvera programu Fluent. Po przeprowadzeniu analizy możliwości tych funkcji, stwierdzono, iż w zupełności pozwalają one na zamodelowanie odpowiednich członów źródłowych w równaniach transportu, określających przebieg reakcji elektrochemicznych.

Otrzymane rezultaty obliczeń wskazują, iż grubość membrany oraz napięcie ogniwa mają znaczący wpływ na rozkład gęstości prądu wzdłuż ogniwa paliwowego. Ponadto uwzględnienie w modelu porowatych warstw dyfuzyjnych powoduje zmniejszenie wartości gęstości prądu elektrycznego a jego rozkład jest bardziej równomierny porównując z wynikami obliczeń otrzymanymi w przypadku pominięcia obszaru porowatego [1]. Krytycznym czynnikiem warunkującym efektywność pracy ogniwa paliwowego jest transport wody, którego mechanizmy, tj. dyfuzja i elektroosmoza, zostały również uwzględnione w niniejszej pracy.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] JUNG S.YI., NGUYEN V., *An Along the Channel Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cell*. J. Electrochem. Soc. 1998, **145**, 1149-1159.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



BOLESŁAW DOBROWOLSKI, KRZYSZTOF KRĘCISZ

## ANALIZA WPŁYWU ZAWIROWANIA STRUGI NA WŁASNOŚCI METROLOGICZNE KRYZY POMIAROWEJ

### THE INFLUENCE OF THE SWIRLING FLOW ON THE PERFORMANCE OF A PIPE ORIFICE

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, ul. Mikołajczyka 5, 45-256 Opole, [bdobr@po.opole.pl](mailto:bdobr@po.opole.pl)

Słowa kluczowe: pomiary przepływu, kryzy, struga zawirowana

Przedmiotem pracy jest ocena wpływu osiowo-symetrycznego zawirowania strugi na własności metrologiczne kryzy pomiarowej. Problem ten jest stosunkowo słabo zbadany, gdyż większość zrealizowanych prac badawczych dotyczy układów, gdzie zaburzenie pola prędkości generowane jest przez pojedyncze kolano lub układ kolan. W wyniku badań stwierdzono, że układ dwóch kolan umieszczonych w różnych płaszczyznach może generować asymetryczne zawirowanie strugi. W literaturze istnieją jednak spore rozbieżności dotyczące zakresu zmian wartości liczby przepływu jako funkcji stopnia zawirowania strugi oraz modułu kryzy.

W pracy ruch płynu opisano równaniami Reynoldsa, domkniętymi RNG k- $\epsilon$  modelem turbulencji. Przeprowadzono serię obliczeń numerycznych dla osiowo-symetrycznego, zawirowanego przepływu płynu nieściśliwego przez kryzy o różnych modułach w szerokim zakresie zmian intensywności zawirowania strugi. Warunki na wlocie do układu obliczano oddzielnie, rozpatrując formowanie się w pełni rozwiniętego przepływu zawirowanego w rurociągu prostoosiowym.

W wyniku szerokich badań parametrycznych, realizowanych przy wykorzystaniu programu Fluent stwierdzono, że zawirowanie strugi powoduje wzrost wartości liczby przepływu. Wzrost ten jest tym bardziej istotny im większą wartość ma moduł kryzy. Szczegółowa analiza wyników obliczeń wykazała ponadto, że zawirowanie strugi powoduje zmianę lokalizacji przekroju „vena contracta”, który oddala się od kryzy przy wzroście intensywności zawirowania strugi. Stwierdzono słabą zbieżność procesu iteracyjnego, wynikającą ze słabego sprzężenia równania ruchu dla składowej obwodowej wektora prędkości z pozostałymi równaniami, co spowodowało konieczność stosowania specjalnych technik numerycznych.

Otrzymane wyniki badań numerycznych porównano z wynikami obliczeń dla strugi nie zawirowanej oraz dostępnymi danymi eksperymentalnymi.



SŁAWOMIR DYKAS, WŁODZIMIERZ WRÓBLEWSKI, TADEUSZ CHMIELNIAK

## NUMERYCZNE MODELOWANIE AERODYNAMICZNEGO HAŁASU METODĄ SPRZĘŻONĄ uRANS+Euler

### AERODYNAMIC NOISE NUMERICAL MODELLING WITH THE USE OF HYBRID COUPLING METHOD uRANS+Euler

Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice,  
[imiue@polsl.pl](mailto:imiue@polsl.pl)

Słowa kluczowe: aerodynamiczny hałas, uRANS, Euler

Dla celów inżynierskich i procesów projektowych dokładne czasowo symulacje (DNS i LES) pozostają na razie poza zasięgiem ze względu na wysoki koszt obliczeń i wymagań dotyczących pamięci operacyjnej. Dlatego metody hybrydowe, łączące obliczenia CFD metodą RANS, uRANS oraz również LES z numerycznymi metodami określania aerodynamicznego hałasu (CAA) są obecnie najpowszechniej stosowane [1]. Metody hybrydowe można generalnie podzielić na dwie grupy, metody stochastyczne oraz metody sprzężone uRANS/CAA lub LES/CAA.

Większość sprzężonych metod hybrydowych uRANS/CAA polega na określaniu niestacjonarnego pola przepływu rozwiązując niestacjonarne uśrednione równanie Naviera-Stokese oraz identyfikacji hałasu aerodynamicznego poprzez rozwiązanie zlinearyzowanych równań Eulera dla zmiennych akustycznych z członem źródłowym zawierającym informacje z rozwiązania uRANS (np. [2]).

Hybrydowa metoda sprzężona uRANS+Euler zaproponowana przez autorów jest metodą bardzo podobną do innych metod hybrydowych uRANS/CAA modelujących aerodynamiczny hałas. Posiada ona jednak kilka cech wyróżniających ją od innych. Cztery najważniejsze z nich to:

- rozwiązanie pełnych równań Eulera dla zmiennych akustycznych (fluktuacji),
- wykorzystanie analogicznych technik numerycznych dla rozwiązania tych równań jak dla równań uRANS,
- użycie tej samej siatki numerycznej,
- niezależne obliczenia akustyczne od obliczeń pola przepływu (CAA od CFD).

W artykule planowane jest przedstawienie modelu matematycznego oraz metody numerycznej algorytmu służącego do numerycznego modelowania aerodynamicznego hałasu w okolicy przepływów gazów. Zaprezentowane będą testy obliczeniowe weryfikujące opracowany algorytm odnośnie propagacji jak i generacji fal akustycznych.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] PRANTLE I. (2002): *Strömungsakustik auf der Basis akustischer Analogie mit LES und URANS*, PhD Thesis, Universität Karlsruhe,
- [2] DJAMBAZOV G.S., LAI CH., PERICLEOUS A. (1998): *Efficient Computation of Aeroacoustic Noise*, Contemporary Mathematics, Vol.218

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



PAWEŁ FLASZYŃSKI, RYSZARD SZWABA

## EKSPERYMENTALNO-NUMERYCZNA ANALIZA GENERATORA WIRÓW WZDŁUŻNYCH W PRZEPŁYWIE PODDŹWIKOWYM

### EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF STREAMWISE VORTEX GENERATOR FOR SUBSONIC FLOW

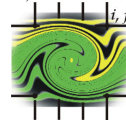
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, [pflaszyn@pg.gda.pl](mailto:pflaszyn@pg.gda.pl)  
Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, [rssz@imp.gda.pl](mailto:rssz@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: generatory wirów, jety, wiry wzdluzne

Generatory wirów wzdluznych są istotnym i często wykorzystywanym elementem do kontrolowania przepływu. Najczęściej stosowanymi generatorami wirów są stałe elementy kształtowe ułożone w odpowiednich obszarach przepływu. Ich niewątpliwą zaletą jest niezawodność i relatywna łatwość ich montażu i obsługi. Jednakże już w latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia wykazano efektywność stosowania jetów jako generatorów wirów, nawet w zakresie prędkości nadźwiękowych [1]. W przypadku przepływów wewnętrznych, między innymi w stopniach turbin gazowych, stosowane są zewnętrzne układy chłodzenia, których zadaniem jest doprowadzenie czynnika chłodzącego do przepływu głównego. Wydmuch realizowany jest przez otwory lub szczeliny, które mogłyby być wykorzystane także jako generatory wirów wzdluznych umożliwiających kontrolowanie przepływu. Struktura przepływu w maszynach wirnikowych jest silnie trójwymiarowa obejmująca szerokie spektrum generowanych wirów, zależnych od parametrów geometrycznych i przepływowych. Zastosowanie takiej techniki w maszynach wirnikowych wymaga wnikliwej analizy na poziomie podstawowym w celu zrozumienia wpływu poszczególnych parametrów generatora wirów wzdluznych na uzyskaną wirowość czy trwałość wiru. Wstępne prace numeryczne dotyczące interakcji wiru wzdluznego z wirami podkowiatym [2] wskazały na interesujące możliwości kontrolowania przepływu i skłoniły do dalszej analizy tego zagadnienia na jeszcze bardziej podstawowym poziomie. W poniższej pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych dla pojedynczego jetu. Badania eksperymentalne przeprowadzono w tunelu transsonicznym IMP PAN dla dwóch liczb Macha: 0.3 i 0.8. Pomiarów ciśnień umożliwia określenie położenia wiru oraz stanowią odniesienie dla obliczeń numerycznych (SPARC). W pracy zaprezentowano porównanie uzyskanych wyników obliczeń i pomiarów oraz przeprowadzono analizę rozwoju generowanego wiru dla różnych konfiguracji jetu.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] PEARCY, H., *Shock induced separation and its prevention by design and boundary layer control*. Edited by C.V. Lachmann. Boundary Layer and Flow Control, New York: Pergamon Press, 1961 2: 1166-1344
- [2] DOERFFER P., FLASZYŃSKI P., MAGAGNATO F., *Streamwise vortex interaction with a horseshoe vortex*. Journal of Thermal Science, Vol. 12, No.4, 2003, 304-309



HUBERT JOPEK

## SYMULACJA KONWEKCJI CIEPLNEJ W ZALEŻNOŚCI OD KĄTA POMIĘDZY SIŁĄ CIĘŻKOŚCI A GRADIENTEM TEMPERATURY

### SIMULATION OF THERMAL CONVECTION DEPENDING ON THE ANGLE BETWEEN GRAVITY FORCE AND TEMPERATURE GRADIENT

Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, ul. Piotrowo 3 60-965 Poznań,  
[hubert.jopek@put.poznan.pl](mailto:hubert.jopek@put.poznan.pl)

Słowa kluczowe: konwekcja cieplna

W pracy przedstawione zostało zagadnienie konwekcji cieplnej zachodzącej w kawernie prostokątnej. Model zakłada, że dwie ściany kawerny są poddane działaniu dwóch różnych temperatur, zaś dwie pozostałe są izolowane. Ponadto zmienia się kąt nachylenia kawerny, co odpowiada kątowi zawartemu pomiędzy gradientem temperatury a siłą grawitacji. Równania opisujące przedstawione zagadnienie, to równanie ciągłości, równania Naviera-Stokesa, oraz równanie przewodnictwa ciepła. Ponadto, w odróżnieniu od zwykle prezentowanych modeli, w tym przypadku wpływ zmiany gęstości płynu nie jest ograniczany wyłącznie do członu związanego z działaniem siły masowej, lecz uwzględniana jest ona wszędzie tam gdzie powinna na mocy zaprezentowanych równań. Wyrażenie opisujące zmianę gęstości płynu w zależności od temperatury przyjmuje następującą postać:  $\rho = \rho_0[1 + \beta(T - T_0)]$ . W analizowanym modelu zakłada się, że badany płyn jest płynem o stałej lepkości. W pracy symulacja komputerowa przeprowadzona została na podstawie bezwymiarowych równań następującej postaci:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \\ \left(1 + \delta T \beta \left(T - \frac{T_0}{\delta T}\right)\right) \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}\right) &= -\nabla p + Pr \nabla^2 \mathbf{u} + Pr Ra \left(T - \frac{T_0}{\delta T}\right), \\ \left(1 + \delta T \beta \left(T - \frac{T_0}{\delta T}\right)\right) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T\right) &= -\nabla^2 T \end{aligned}$$

gdzie  $Pr$  oznacza liczbę Prandtla, a  $Ra$  liczbę Rayleigha, iloraz  $\frac{T_0}{\delta T}$  jest wielkością bezwymiarową, w której  $T_0$  oznacza temperaturę początkową płynu, zaś  $\delta T$  jest różnicą temperatur pomiędzy przeciwległymi ścianami kawerny o zadanych temperaturach.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



MIROSLAW KABACIŃSKI, JANUSZ POSPOLITA

## OCENA STOSOWALNOŚCI WYBRANYCH MODELI TURBULENCJI W BADANIACH NUMERYCZNYCH OPŁYWÓW Z ODERWANIEM STRUGI APPLICABILITY OF THE CHOSEN TURBULENCE MODELS IN NUMERICAL INVESTIGATIONS OF FLOWS AROUND THE BODY WITH STREAM SEPARATION

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, [kabat@po.opole.pl](mailto:kabat@po.opole.pl),  
[posp@po.opole.pl](mailto:posp@po.opole.pl)

Słowa kluczowe: symulacje numeryczne opływu, pomiary przepływów, modele turbulencji

Modelowanie matematyczne i symulacja numeryczna przepływów płynów jest cennym narzędziem w analizie pracy wielu maszyn i urządzeń przepływowych. Stanowią one pomoc we wstępnej ocenie koncepcji nowych urządzeń lub propozycji zmian w istniejących konstrukcjach. Jeśli w wielu przypadkach wystarczająca jest zgodność jakościowa wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi to w pewnych przypadkach taka dokładność może okazać się niewystarczająca. Przykładem może być numeryczna analiza nowych konstrukcji czujników służących do pomiaru prędkości czy strumienia [1]. W tego rodzaju czujnikach prędkość miejscową lub średnią, a także strumień płynu wyznacza się na podstawie zmierzonej różnicy ciśnień, najczęściej w dwóch punktach wybranych tak, aby uzyskana różnica ciśnień była możliwie największa. Dlatego pierwszy z punktów znajduje się w części napływowej czujnika, a drugi – niejednokrotnie – za punktem oderwania strugi. Stwierdzono, że określenie w tym przypadku na drodze symulacji numerycznej ciśnienia  $p^-$  wiąże się często z dużym błędem zależnym zarówno od gęstości siatki różnicowej, ale przede wszystkim od wybranego modelu turbulencji.

W pracy porównano wyniki obliczeń numerycznych opływu zrealizowanych za pośrednictwem programu FLUENT i wyniki przeprowadzonych eksperymentów w przypadku dwóch odmiennych czujników, gdy różnią się one m.in. sposobem odbioru różnicy ciśnień. W przypadku czujnika okrągłego (walca) przedstawiono studium otrzymanych numerycznie rozwiązań, gdy zastosowano następujące modele turbulencji: Standardowy k- $\epsilon$ , Renormalizacyjny (RNG) k- $\epsilon$ , Realizable k- $\epsilon$ , Standardowy k- $\omega$ , SST k- $\omega$ , wraz z dostępnymi funkcjami opisującymi ruch płynu w bezpośrednim sąsiedztwie ścianki opływanej kształtu. Wyniki porównano z własnymi danymi eksperymentalnymi uzyskanymi w tunelu aerodynamicznym. Sformułowano wnioski przydatne w numerycznych badaniach opływów ciał.

### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] DOBROWOLSKI B., KABACIŃSKI M., POSPOLITA J., *Numerical analysis of the flow around the averaging impact sensor*, Metrology and Measurement Systems, Vol. XI, Number I (2004), 45-60.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



MIROSLAWA KOŁODZIEJCZYK

## PŁASKI NIESTACJONARNY PRZEPŁYW CIECZY LEPKIEJ W OBSZARZE O NIEREGULARNYM BRZEGU

### UNSTEADY INCOMPRESSIBLE VISCOUS FLOW IN A PLANE DOMAIN OF IRREGULAR BOUNDARY

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45c, 15-351 Białystok, [mirka@pb.bialystok.pl](mailto:mirka@pb.bialystok.pl)

Słowa kluczowe: równania Naviera-Stokesa, metoda eliminacji ciśnienia, różnice skończone

W pracy przedstawiono pewne rozwiązanie płaskiego, niestacjonarnego ruchu cieczy lepkiej o stałej gęstości i lepkości w obszarze o nieregularnym brzegu. Zastosowana metoda rozwiązania zagadnienia przepływowego sprowadza się do wyeliminowania ciśnienia z równań Naviera-Stokesa drogą wyznaczenia całki po konturze zamkniętym z różniczki zupełnej ciśnienia. Metoda ta po raz pierwszy została zastosowana w pracy [1].

Całka po konturze zamkniętym z różniczki zupełnej ciśnienia jest równa zeru ze względu na jednowartościowość funkcji  $p(x,y)$ . Równanie to wraz ze zrózniczkowanym względem czasu równaniem ciągłości tworzy zamknięty układ równań ze względu na niewiadome składowe wektora prędkości  $u(x,y,t)$  i  $v(x,y,t)$ . Zagadnienie opisane pierwotnie przez układ równań różniczkowych cząstkowych drugiego rzędu zostało przekształcone do zagadnienia początkowego dla układu równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu. Układ równań zwyczajnych uzyskiwany jest przez zastosowanie metody różnic skończonych do obszaru obliczeniowego, na który została nałożona prostokątna siatka obliczeniowa. Przybliżonego całkowania w całce ciśnienia dokonano metodą trapezów wzdłuż rombu obejmującego węzeł siatki. Pochodne cząstkowe w równaniu ciągłości, zrózniczkowanym względem czasu, aproksymowano różnicami centralnymi wewnątrz obszaru. Zagadnienie początkowe dla uzyskanego układu równań różniczkowych zwyczajnych rozwiązywane było metodą Rungego-Kutty.

Bezpośrednim wynikiem rozwiązania niestacjonarnego zagadnienia przepływowego w obszarze o nieregularnym brzegu jest dyskretne pole prędkości cieczy. Ciśnienie w zastosowanej metodzie uzyskuje się zgodnie z całką ciśnienia już po wyznaczeniu składowych wektora prędkości.

Przepływ w obrębie obszaru generowany był skończoną liczbą dopływów i odpływów przez granice obszaru. Siatka obliczeniowa jest siatką równomierną wewnątrz obszaru przepływu i nierównomierną w pobliżu brzegu, ze względu na jego nieregularny kształt.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] PROSNAK W.J., KOSMA Z.J., *On a New Method for Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations*. Acta Mechanica 1989, Springer Verlag





ZBIGNIEW KOSMA

## ROZWIĄZYWANIE ZAGADNIENÍ PŁASKIEGO RUCHU CIECZY LEPKIEJ SFORMUŁOWANYCH DLA FUNKCJI PRĄDU

### NUMERICAL RESOLUTION OF INCOMPRESSIBLE NAVIER-STOKES EQUATIONS IN THE STREAM-FUNCTION FORMULATION

Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Instytut Mechaniki Stosowanej, Krasickiego 54, 26-600  
Radom, [zbigniew.kosma@pr.radom.pl](mailto:zbigniew.kosma@pr.radom.pl)

Słowa kluczowe: płaski ruch cieczy lepkiej, równanie 4-go rzędu dla funkcji prądu, metoda prostych

Przedstawione zostały własne algorytmy numeryczne, przeznaczone do obliczania płaskiego ruchu cieczy lepkiej w obszarach jedno- i wielospójnych – oparte na rozwiązywaniu zagadnienia początkowo-brzegowego dla pełnych równań Naviera-Stokesa, sprowadzonych do quasi-liniowego równania czwartego rzędu dla funkcji prądu. Zaletami tego opisu matematycznego są: automatyczne spełnienie warunku ciągłości przepływu i ścisłe określenie warunków brzegowych w obszarach jednospójnych, a jego wadą wysoki rząd równania, którego postać umożliwia jednak obliczanie pochodnych trzeciego i czwartego rzędu dwustopniowo – jako pochodnych laplasjanu: pierwszego i drugiego rzędu.

Przy rozwiązywaniu zagadnień początkowo-brzegowych dla równania czwartego rzędu dla funkcji prądu wszystkie pochodne względem zmiennych przestrzennych aproksymowano przy wykorzystaniu kompaktowych schematów różnicowych czwartego i szóstego rzędu oraz klasycznych ilorazów różnicowych – na równomiernych i nierównomiernych siatkach obliczeniowych. Przy zachowaniu czasu jako zmiennej niezależnej ciągłej (metoda prostych) uzyskano zagadnienia początkowe dla układów równań różniczkowych zwyczajnych dla nieznanych wartości funkcji prądu w każdym węźle wewnętrznym siatek obliczeniowych. Zagadnienia te rozwiązywano metodą predyktor-korektor opartą na wzorach wstecznego różniczkowania, po uprzednim sprowadzeniu układów równań różniczkowych zwyczajnych do postaci normalnej Cauchy'ego.

Obliczenia ruchu cieczy lepkiej wykonano w jednospójnym obszarze kwadratowego zagłębienia z jedną poruszającą się ścianką dla  $Re \leq 30\,000$  ( $Re_{kr} \approx 8000$ ) oraz w dwuspójnym obszarze wokół profilu lotniczego dla  $Re \leq 3000$ , obróconego o duży kąt natarcia do napływającego strumienia w nieskończoności – po jego transformacji na obszar kanoniczny metodami odwzorowania konforemnego. Nieznane wartości funkcji prądu na obwodzie profilu w każdej chwili czasu wyznaczano z warunku znikania całki okrężnej z różniczki ciśnienia. Stwierdzono bardzo dobrą zgodność rozkładów składowych prędkości na osiach symetrii zagłębienia oraz obrazów struktur wirowych w zagłębieniu i ścieżki wirowej za profilem w porównaniu z wynikami analogicznych obliczeń i wynikami badań eksperymentalnych – prezentowanymi w publikacjach.



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: **METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW**



WOJCIECH LITWIN, PAWEŁ FLASZYŃSKI

PRÓBA WYKORZYSTANIA PROGRAMU FLUENT DO OBLICZANIA  
HYDRODYNAMICZNYCH OKRĘTOWYCH ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH  
SMAROWANYCH WODĄ

THE TEST OF THE POSSIBILITY OF USING THE FLUENT PROGRAMME FOR  
CALCULATING THE WATER LUBRICATED MARINE STERN TUBE BEARINGS

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, ul. Narutowicza 11/12, 80-950 Gdańsk,  
[wlitwin@pg.gda.pl](mailto:wlitwin@pg.gda.pl); Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, ul. Narutowicza 11/12, 80-950 Gdańsk,  
[pflaszyn@pg.gda.pl](mailto:pflaszyn@pg.gda.pl)

Referat wycofany.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



JERZY MAJEWSKI

## ANISOTROPOWA ADAPTACJA DLA TRÓJWYMIAROWYCH STACJONARNYCH I NIESTACJONARNYCH PRZEPŁYWÓW ŚCISLIWYCH

### ANISOTROPIC ADAPTATION FOR 3D STEADY AND UNSTEADY COMPRESSIBLE FLOWS

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,  
Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa,  
[jmajewsk@meil.pw.edu.pl](mailto:jmajewsk@meil.pw.edu.pl)

Słowa kluczowe: adaptacja siatek, symulacja stacjonarnych i niestacjonarnych przepływów ściśliwych

Adaptacja siatek jest skutecznym narzędziem służącym do znaczącego poprawienia jakości rozwiązania przy minimalnym wzroście kosztów obliczeniowych. Pewnym problem typowego podejścia do adaptacji, zagęszczającego siatkę w sposób isotropowy jest fakt, że podczas modyfikacji siatki w okolicach fal uderzeniowych siatka jest zagęszczana również w kierunku stycznym do fali. Prowadzi to do nadmiernego zwiększania ilości węzłów, którego można uniknąć zniekształcając komórki z uwzględnieniem informacji kierunkowej.

Prezentowana metoda anisotropowej adaptacji jest oparta na regeneracji siatki. Oznacza to, że w każdym kroku adaptacji jest generowana nowa siatka. Rozmiar komórek nowej siatki jest opisany przez pole metryki utworzonej przez estymator błędu operujący na rozwiązaniu opisanym na siatce starej. Bazuje on na założeniu, że rozwiązanie jest przybliżone przez funkcję kawałkami liniową a błąd rozwiązania jest wprost proporcjonalny do błędu interpolacji czyli Hesjanu rozwiązania.

Jednym z wyzwań przy tworzeniu ogólnego algorytmu służącego do adaptacji przepływów niestacjonarnych jest zagwarantowanie, że fala uderzeniowa nie wyjdzie w danym okresie czasowym poza zagęszczony obszar siatki. Ponieważ apriori nie znane są ani kierunek ani prędkość przemieszczania fali konieczne jest zastosowanie mechanizmów pozwalających na wstępne śledzenie ruchu fali.

W czasie prezentacji zostaną przedstawione wyniki symulacji z adaptacją dla trójwymiarowych, stacjonarnych i niestacjonarnych przepływów ściśliwych.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] ALAUZET F., GEORGE P.L., MOHAMMADI B., FREY P., BOROUCAKI H., *Transient fixed point-based unstructured mesh adaptation*, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2003, **43**, 729-745.
- [2] MAJEWSKI J., *Anisotropic adaptation applied to Euler and ideal MHD flows*, CMS'05, Computer Methods and Systems, November 2005, Krakow, Poland.



ROBERT ROSZAK, PIOTR POSADZY, MAREK MORZYŃSKI

SYMULACJE AEROELASTYCZNE Z UWZGLĘDNIENIEM  
NIELINIOWYCH WŁASNOŚCI MODELI STRUKTURALNYCH  
AEROELASTIC SIMULATIONS INCLUDING NONLINEAR PROPERTIES OF  
STRUCTURAL MODELS

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965,  
[roszak@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:roszak@stanton.ice.put.poznan.pl), [posadzy@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:posadzy@stanton.ice.put.poznan.pl),  
[morzynski@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:morzynski@stanton.ice.put.poznan.pl)

Słowa kluczowe: aeroelastyka, nieliniowość fizyczna, nieliniowość geometryczna

W pracy przedstawiono algorytm przeprowadzenia numerycznych obliczeń aeroelastycznych z uwzględnieniem nieliniowości fizycznej i geometrycznej w analizach strukturalnych opływanego ciała. W zaawansowanych systemach obliczeń aeroelastycznych w zastosowaniach lotniczych w tego rodzaju symulacjach najczęściej nie uwzględnia się nieliniowości fizycznej i geometrycznej. Takie założenie jest pewnym uproszczeniem, które w określonych przypadkach uniemożliwia uzyskanie poprawnych rozwiązań.

Praca prezentuje połączenie komercyjnego kodu TAU-DLR do obliczeń przepływowych z własnym programem dla zagadnień strukturalnych w jeden integralny system do obliczeń aeroelastycznych. Możliwe będą obliczenia przepływowe z zastosowaniem niestrukuralnej siatki dla symulacji równań Eulera jak i obliczenia z dodatkowymi elementami w warstwie przyściennej dla obliczeń RANS. Obliczenia przepływowe będą prowadzone w wersji równoległej z zaimplementowanymi modelami turbulencji LEA K- $\omega$ , Wilcox K- $\omega$ .

Numeryczny eksperyment modelujący zagadnienie sprzężenia strukturalno przepływowego obejmuje: obliczenia na siatkach niestrukuralnych z podziałem na poddomeny, równoległe rozwiązywanie układów równań, zagadnienia wizualizacji oraz zagadnienia sprzężenia obliczeń zjawisk przepływowych i sprężystych. Celem pracy jest zrealizowanie systemu symulacji sprzężenia strukturalno-przepływowego uwzględniającego zagadnienia nieliniowości struktury w aplikacjach aeroelastycznych.

W pracy porównane zostaną obliczenia z uwzględnieniem nieliniowości z przypadkiem liniowo-sprężystym.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



MAREK MORZYŃSKI, WITOLD STANKIEWICZ, BERND NOACK, RUDIBERT KING, FRANK THIELE, GILEAD TADMOR

## PROBLEMY STEROWANIA PRZEPŁYWEM Z ZASTOSOWANIEM GLOBALNEJ ANALIZY STABILNOŚCI I MODELOWANIA NISKOWYMIAROWEGO

### FLOW CONTROL DESIGN USING GLOBAL STABILITY ANALYSIS AND REDUCED ORDER MODELING

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,  
[morzynski@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:morzynski@stanton.ice.put.poznan.pl), [stankiewicz@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:stankiewicz@stanton.ice.put.poznan.pl),  
Technische Universität Berlin, Hermann-Föttinger Institut, Müller-Breslau Str. 8, D-10623 Berlin,  
Technische Universität Berlin, Measurement and Control Group, D-10623 Berlin,  
Electrical & Computer Engineering Department, Northeastern University, Boston

Słowa kluczowe: stabilność, modelowanie, sterowanie przepływem

W pracy przedstawiona zostanie ujednolicona teoria sterowania przepływem. Wszystkie metody sterowania przepływem – począwszy od metod biernych a skończywszy na aktywnym wpływaniu na przepływ da się sprowadzić do jednego zagadnienia uogólnionego problemu wartości własnych.

Jako przykład sterowania biernego przyjęto cylinder sterujący Strykowski, w przypadku metod aktywnych omówione zostaną sposoby tłumienia ścieżki wirowej Karmana dla ciał cylindrycznych. Pokazane zostanie, iż z punktu widzenia numerycznego sterowanie przepływem jest niewielką modyfikacją elementów macierzy zlinearyzowanego równania Naviera-Stokesa, mającą na celu zmianę jej spektrum i wyeliminowanie wartości własnych o dodatniej części rzeczywistej.

W dalszej części przedstawione zostaną doświadczenia dotyczące modelowania równań Naviera-Stokesa z punktu widzenia wymagań sterowania przepływem. Modele niskowymiarowe, które są niezbędne w takim przypadku, charakteryzują się powszechną wadą – niedostateczną dokładnością przewidywania dynamiki układu. Sposoby przezwyciężenia tych trudności: powiększanie bazy modów służących do modelowania i uzależnienie modów od stanu dynamicznego sterowanego przepływu przedstawione zostaną w pracy.

Uzyskane wyniki odniesione zostaną do uogólnionej teorii przepływów uśrednionych. Pokazane zostanie jak złożonym zagadnieniem jest zastosowanie aktywnego sterowania w przypadku układu dynamicznego opisanego równaniem Naviera-Stokesa i jakie są perspektywy takiej analizy.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



PIOTR POSADZY, ROBERT ROSZAK, MAREK MORZYŃSKI

## OBLICZENIA AEROELASTYCZNE OBIEKTÓW O ZŁOŻONEJ GEOMETRII AEROELASTIC CALCULATIONS OF THE OBJECTS WITH COMPLEX GEOMETRY

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,  
[posadzy@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:posadzy@stanton.ice.put.poznan.pl), [roszak@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:roszak@stanton.ice.put.poznan.pl), [morzynski@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:morzynski@stanton.ice.put.poznan.pl)

Słowa kluczowe: aeroelastyka, AGARD 445.6, flater

Tendencją rozwoju współczesnych narzędzi aeroelastycznych jest modułowy system wykorzystujący niezależne programy obliczeniowe, często komercyjne. Wymaga to jednak opracowania uniwersalnych narzędzi do wymiany danych pomiędzy aplikacjami bazującymi na różnych siatkach elementów skończonych.

W niniejszej pracy przedstawione zostanie narzędzie do symulacji aeroelastycznych, którego głównymi modułami są komercyjny kod przepływowy oraz własny kod strukturalny MF3. Połączenie programów obliczeniowych wymagało opracowania własnych interfejsów do wymiany danych, bazujących na nowych algorytmach, które w znaczny sposób przyspieszyły proces wymiany danych.

Opracowane narzędzie przetestowane zostało na modelu skrzydła AGARD 445.6 [1], dzięki czemu została oszacowana jego dokładność [2]. Przedstawione zostaną poszerzone wyniki tej symulacji [1], które zostały potraktowane jako test sprawdzający przed obliczeniami prowadzonymi na obiektach o znacznie większej złożoności. Zasadnicze obliczenia obejmują próbę symulacji aeroelastycznej obiektu o bardziej skomplikowanej geometrii jaką jest niewielki samolot pasażerski. Uzyskane rezultaty obejmują test samolotu podczas normalnego przelotu, oraz określenie warunków wystąpienia zjawiska flater.

### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] CARSON YATES, E. JR, *AGARD standard aeroelastic configurations for dynamic response I.–Wing 445.6*, AGARD Report No. 765 , 1988
- [2] POSADZY P., MORZYŃSKI M., ROSZAK R., *Aeroelastic tool for flutter simulation*, Mathematical Modelling and Analysis 2005. Proceedings of the 10th International Conference MMA2005&CMAM2 Trakai 2005, ISBN 9986-05-924-0, 111-116



WITOLD STANKIEWICZ, MAREK MORZYŃSKI, BERND R. NOACK

## NISKOWYMIAROWE MODELE PRZEPŁYWU WOKÓŁ CYLINDRA OPARTE NA MODACH POD ORAZ MODACH WŁASNYCH GLOBALNEJ ANALIZY STABILNOŚCI

### LOW-DIMENSIONAL FLOW OVER CIRCULAR CYLINDER MODELS BASED ON POD MODES AND EIGENMODES OF STABILITY ANALYSIS

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,  
[stankiewicz@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:stankiewicz@stanton.ice.put.poznan.pl), [morzynski@stanton.ice.put.poznan.pl](mailto:morzynski@stanton.ice.put.poznan.pl),  
Technische Universität Berlin, Hermann-Föttinger Institut, Müller-Breslau Str. 8, D-10623 Berlin,  
[bernd.r.noack@tu-berlin.de](mailto:bernd.r.noack@tu-berlin.de)

Słowa kluczowe: stabilność, modelowanie przepływu, metoda Galerkina

Stworzenie niskowymiarowego modelu przepływu, wykorzystującego jedynie ograniczoną liczbę stopni swobody, jest podstawowym warunkiem przeprowadzenia aktywnej kontroli tego przepływu - krótki czas pomiędzy pomiarem aktualnego stanu w sensorach a zastosowaniem aktuacji wyklucza przeprowadzenie symulacji numerycznej (DNS). Dotychczasowe modele [1] (oparte na metodzie Galerkina), wykorzystywały zestaw modów z rozkładu POD (Karhunen-Loeve), który wymagał wcześniejszego przeprowadzenia obliczeń niestacjonarnych dla danej konfiguracji.

Inny zestaw modów można otrzymać z globalnej analizy stabilności przepływu [2]. W przypadku tej metody do otrzymania modów niezbędna jest znajomość rozwiązania bazowego, wokół którego linearyzowane są równania Naviera-Stokesa. Najczęściej rozwiązaniem bazowym staje się przepływ ustalony.

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę stabilności dla przepływu nierównoległego, nieściśliwego wokół okrągłego cylindra i przedstawiono wynikające z tej analizy mody własne oraz mody POD otrzymane z rozkładu Karhunen-Loeve przepływu nieustalonego. Następnie przedstawiono i porównano modele przepływu, wykorzystujące wspomnianą metodę Galerkina oraz wymienione wyżej mody.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] NOACK B. R., TADMOR G., MORZYŃSKI M., *Low-dimensional models for feedback flow control. Part 1: Empirical Galerkin models*. AIAA-Paper 2004-2408, 2nd AIAA Flow Control Conference, 2004.
- [2] MORZYŃSKI M., AFANASIEV K., THIELE F., *Solution of the eigenvalue problem resulting from global non-parallel flow stability analysis*. Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg. **169**, 161-176, 1999.



ZBIGNIEW KOSMA, BOGDAN NOGA

## ROZWIĄZYWANIE ZAGADNIEŃ RUCHU CIECZY LEPKIEJ METODĄ SZTUCZNEJ ŚCISŁIWOŚCI

### NUMERICAL SIMULATIONS OF VISCOUS FLUID MOTIONS USING THE ARTIFICIAL COMPRESSIBILITY METHOD

Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Instytut Mechaniki Stosowanej,  
Krasickiego 54, 26-600 Radom, [zbigniew.kosma@pr.radom.pl](mailto:zbigniew.kosma@pr.radom.pl)

Słowa kluczowe: ruch cieczy lepkiej, metoda sztucznej ścisłości, metoda prostych

Przedstawione zostały własne algorytmy numeryczne, przeznaczone do wyznaczania dwu- i trójwymiarowego, stacjonarnego ruchu cieczy lepkiej metodą sztucznej ścisłości w obszarach zagłębień z jedną poruszającą się ścianką: kwadratowego i sześciennego oraz prostoliniowych kanałów: z uskokiem jednej ścianki i podwójnie zagiętego. Zagadnienia te są często rozwiązywane w celu testowania efektywności i dokładności różnych algorytmów obliczeniowych.

Równaniami wyjściowymi do wyznaczania przepływów cieczy lepkiej metodą sztucznej ścisłości jest układ równań różniczkowych cząstkowych – utworzony ze zmodyfikowanego równania ciągłości i równań Naviera-Stokesa, zapisanych w formie różniczkowej w postaci bezwymiarowej. Zasadniczą ideą metody sztucznej ścisłości jest przyłączenie pochodnej ciśnienia względem czasu do równania ciągłości, co umożliwia sprzężenie ciśnienia z prędkością.

Warunki brzegowe na ściankach nieruchomych zagłębień i kanałów wyrażają znikanie składowych wektora prędkości, górne ścianki zagłębień poruszają się ze stałą prędkością, w przekrojach kanałów: wlotowym i wylotowym rozkłady prędkości są zadane. Wartości ciśnienia na granicach obszarów wynikają z równania Naviera-Stokesa, przy czym założono znikanie gradientu ciśnienia na wlocie do kanałów oraz stałą jego wartość na wylocie z kanałów.

Przy rozwiązywaniu sformułowanych zagadnień początkowo-brzegowych dla ciśnienia i składowych prędkości wszystkie pochodne względem zmiennych przestrzennych aproksymowano przy wykorzystaniu klasycznych ilorazów różnicowych drugiego rzędu dokładności na równomiernych, nierównomiernych i nakładających się siatkach obliczeniowych. Przy zachowaniu czasu jako zmiennej niezależnej ciągłej (metoda prostych) uzyskano zagadnienia początkowe dla układów równań różniczkowych zwyczajnych dla nieznanymi wartości obliczanych funkcji w każdym węźle wewnętrznym siatek. Zagadnienia te rozwiązywano dwukrokową metodą predyktor-korektor, zrealizowaną dla metody wstecznego różniczkowania.

Obliczenia przepływów cieczy lepkiej w zagłębieniach zostały wykonane dla  $Re \leq 1000$ ; w kanale z uskokiem jednej ścianki – dla  $Re \leq 800$ , w kanale podwójnie zagiętym – dla  $Re \leq 300$ . Stwierdzono dobrą zgodność wartości składowych prędkości na osiach symetrii zagłębień oraz długości stref recyrkulacyjnych w kanałach w porównaniu z wynikami analogicznych obliczeń i wynikami badań eksperymentalnych – prezentowanymi w publikacjach.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



MARTA POĆWIERZ, ANDRZEJ STYCZEK

## WYZNACZANIE SIŁY DZIAŁAJĄCEJ NA BRYŁĘ OPŁYWANĄ CIECZĄ PRZY RUCHU ZMIENNYM W CZASIE

### CALCULATION OF THE FORCE ON THE SOLID BODY IN THE UNSTEADY FLOW OF THE INCOMPRESSIBLE FLUID

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny-Energetyki i Lotnictwa,  
Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa, [mpocwie@meil.pw.edu.pl](mailto:mpocwie@meil.pw.edu.pl), [bkuchar@meil.pw.edu.pl](mailto:bkuchar@meil.pw.edu.pl)

Słowa kluczowe: siła, pola prędkości i wirowości

Reakcja aerodynamiczna może być wyznaczona z definicji jednostkowej siły powierzchniowej. Wymaga to jednak określenia ciśnienia na brzegu jak również brzegowych wartości przestrzennych pochodnych pola prędkości określających składnik lepki tensora naprężenia. Wielkości te mogą być trudne do wyznaczenia lub mieć niekorzystne właściwości. Zwłaszcza, gdy pole prędkości jest wyznaczane w sposób przybliżony.

Alternatywna metoda wariacyjna Qurtapelle – Napolitano stosowana wprost daje dobre rezultaty przy dokładnym odwzorowaniu pól wirowości i prędkości w sąsiedztwie powierzchni opływającego ciała. W metodzie wirowej w ruchu trójwymiarowym wymaganie to niełatwo spełnić, gdyż do dobrego zaproksymowania tych pól potrzeba dużej ilości cząstek wirowych usytuowanych w wirowej warstwie brzegowej.

Można jednak metodę Qurtapelle – Napolitano zastosować do zewnątrz wielkiej kuli otaczającej opływającą bryłę. Tam pola prędkości i wirowości mają znane właściwości, pozwalające dokonać rachunków analitycznych. W ich wyniku uzyskuje się proste wyrażenia określające poszukiwaną siłę. Słabym punktem metody jest konieczność różniczkowania względem czasu funkcji szybkozmiennej. Jeśli używa się stochastycznej (wienerowskiej) symulacji dyfuzji, to przed wykonaniem różniczkowania należy dokonać estymacji nie różniczkowalnego procesu losowego funkcją różniczkowalną. Jeśli zastąpić metodę wienerowską sposobem deterministycznym to niewygodna cecha zniknie.



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



MAREK RABIEGA

## GRADIENTOWA PRZEZ WRAŻLIWOŚĆ OPTIMALIZACJA KSZTAŁTU ŚCIAN KANAŁÓW MASZYN PRZEPŁYWOWYCH DLA USTALONYCH PRZEPŁYWÓW BURZLIWYCH I NIELEPKICH

GRADIENT-VIA-SENSITIVITY SHAPE OPTIMIZATION OF TURBOMACHINERY  
CHANNEL WALLS FOR STEADY TURBULENT FLOWS AND INVISCID FLOWS

Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Instytut Maszyn Przepływowych,  
ul. Wólczańska 219/223, 93-005 Łódź, [rabiega@rz.vline.pl](mailto:rabiega@rz.vline.pl)

Słowa kluczowe: numeryczna mechanika płynów, optymalizacja kształtu, maszyny przepływowe

Z równań energii i drugiej zasady termodynamiki wyprowadzono funkcjonały oparte na trójwymiarowym przepływie, które oszacowują dyssypację energii mechanicznej płynu w kanałach maszyn przepływowych. Postawiono zagadnienie optymalizacji kształtu ścian kanału międzyłopatkowego w obecności ustalonego trójwymiarowego turbulentnego przepływu modelowanego równaniami RANS. Przedstawiono ciągłe liniowe zagadnienie na wrażliwość. Omówiono warunki brzegowe dla przepływów płynów lepkich i nielepkich, ściśliwych i nieściśliwych. Zagadnienie przedstawiono w krzywoliniowym układzie współrzędnych dopasowanym do powierzchni ścian kanału. Równania zachowania pędu podano w formie kontrawariantnej. Wykorzystując wspólne elementy struktury matematycznej wyprowadzonych funkcjonałów podano efektywne wzory do obliczenia ich gradientu w przestrzeni zmiennych decyzyjnych. Opisano algorytm i numeryczną organizację iteracyjnego rozwiązywania zadania optymalizacyjnego w oparciu o metodę BFGS szukania minimum funkcjonału celu. Uwspółbieżniono proces wyznaczania bieżących składowych gradientu funkcjonału. Proces optymalizacyjny oparto o rozwiązania równań rządzących i równań na wrażliwość zdyskretyzowanych na siatkach przesuniętych metodą różnic skończonych. Zastosowano dyskretyzację centralną drugiego rzędu dokładności z wyjątkiem równania energii, którego składniki konwekcji zdyskretyzowano pod prąd z dokładnością rzędu pierwszego. Zastosowano algebraiczny model turbulencji Baldwina-Lomaxa z własną dyskretyzacją gradientu prędkości przy ścianie pełniącą rolę swoistego prawa ścianki.

Przedstawiono przykład obliczeniowy, w którym optymalizuje się kształt prostokreślnych łopatek koła sprężarki odśrodkowej prowadząc do minimalizacji strat mieszania spowodowanych niejednorodnością przepływu w przekroju wylotowym koła. Kształt końcowy optymalizacji dla przepływu nielepkiego i burzliwego wypadł podobny.



JACEK ROKICKI, ROBERT WIETESKA

## METODA WENO TRZECIEGO RZĘDU NA PRZESTRZENNYCH SIATKACH NIESTRUKTURALNYCH

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,  
Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa, [\[jack,wietek\]@meil.pw.edu.pl](mailto:[jack,wietek]@meil.pw.edu.pl)

Słowa kluczowe: przepływy transoniczne, schematy wysokiego rzędu

We współczesnej Numerycznej Mechanice Płynów do symulacji ruchu płynów ściśliwych (równanie Eulera/Naviera-Stokesa) w głównej mierze wykorzystuje się Metody Objętości Skończonych. Wyższy niż pierwszy rząd dokładności uzyskać można stosując schematy nieliniowe (upwind) oraz właściwą rekonstrukcję rozwiązania wewnątrz komórki. Rekonstrukcję drugiego i wyższych rzędów konstruuje się wykorzystując dane z komórek otaczających. Przestrzenny rząd rozwiązania zależy od dwóch czynników:

- lokalnego rzędu rekonstrukcji rozwiązania (funkcja rekonstrukcji kawałkami stała, liniowa, kwadratowa),
- przyjętego sposobu całkowania na brzeg obszaru, w celu policzenia strumieni.

Dodatkowo w przypadku przepływów okołodźwiękowych, w których pojawiają się wszelkiego rodzaju nieciągłości (fale uderzeniowe, nieciągłości styczne), procedura rekonstrukcji powinna zapobiegać powstawaniu wszelkiego rodzaju oscylacji (twierdzenie Godunova). Metodą spełniającą powyższe założenia jest metoda WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) opisana szerzej w [1] oraz [2]. Główna idea schematu opiera się na wyznaczeniu sekwencji funkcji rekonstruujących  $R_i$  opartych na komórkach z najbliższego sąsiedztwa obszaru kontrolnego  $\Omega_j$ , a następnie eliminacji tych, które generują oscylację. Postępowanie takie choć ma zastosowanie zarówno dla siatek niestrukuralnych jak i strukturalnych, podlega szeregowi ograniczeń podobnie jak to ma miejsce w przypadku klasycznych schematów EMUSCL. Jednym z nich jest redukcja przestrzennego rzędu dokładności rozwiązania w przypadku przepływów z nieciągłościami. W obecnej pracy zostanie przedstawiona nowa rozbudowana metoda aproksymacji rozwiązania trzeciego rzędu dokładności w przestrzeni, w oparciu o klasyczne schematy WENO. Weryfikacja metody zostanie przedstawiona na przykładzie opływu skrzydła OneraM6 oraz przepływu w kanale z uskokiem.

### PIŚMIENICTWO CYTOWANE

- [1] WIETESKA R, MAJEWSKI J., ROKICKI J., *Investigation of WENO Schemes For 3D Unstructured Grids*, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, (w druku), 2006.
- [2] SHI J. HU CH. SHU CH-W., *A Technique of Treating Negative Weights in WENO Schemes*, Journal of Computational Physics **Vol.175**, 108-127, 2002.
- [3] HU CH. SHU CH-W. *High Order ENO and WENO Schemes for Computational Fluid Dynamics*, Journal of Computational Physics **Vol.150**, 97-127, 1999.



ŁUKASZ JEZIOREK, JACEK ROKICKI

## SPRĘŻENIE ELASTYCZNO - PRZEPŁYWOWE W SYMULACJACH PRZEPŁYWÓW OKOŁODŹWIĘKOWYCH

### FLUID - STRUCTURE INTERACTION IN SIMULATION OF TRANSONIC FLOWS

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,  
ul. Nowowiejska 24, 00-655 Warszawa, [jeziorek@meil.pw.edu.pl](mailto:jeziorek@meil.pw.edu.pl), [jack@meil.pw.edu.pl](mailto:jack@meil.pw.edu.pl)

Słowa kluczowe: aeroelastyka, przepływy okołodźwiękowe

W wielu zastosowaniach technicznych (skrzydło samolotu, łopata turbiny) ciało odkształca się sprężyste pod wpływem sił aerodynamicznych. Powstaje wówczas sprężenie w wyniku którego opływane ciało przyjmuje kształt odpowiadający jego minimalnej energii sprężystej a obciążenia aerodynamiczne zależą od tego kształtu [1,2,4]. Zmiana przepływu jest przy tym silnie nieliniową funkcją geometrii (szczególnie dla przepływów z falami uderzeniowymi) [3].

Zmianę kształtu typowych skrzydeł (zwłaszcza skośnych) można zredukować do ugięcia i lokalnego skręcenia. Skręcenie istotnie wpływa na postać opływu, tak więc w przypadku smukłych skrzydeł nieuwzględnienie tego zjawiska w obliczeniach prowadzi do dużych błędów.

W niniejszej prezentacji opisano iteracyjny algorytm sprzężenia elastyczno-przepływowego dla przypadku ustalonego przepływu okołodźwiękowego. Obliczenia przepływowe dokonywane były przy użyciu metody objętości skończonych (model płynu Eulera) oraz różnic skończonych (model warstwy przyściennej). Do obliczenia odkształcenia skrzydła użyto komercyjnego kodu NASTRAN (TM) bazującego na metodzie elementu skończonego. Otrzymane deformacje stanowiły podstawę do zmiany geometrii w następnej iteracji. W tym celu opracowano prosty algorytm modyfikacji geometrii siatki obliczeniowej dla solvera przepływowego oraz algorytm transmisji wyznaczonych ciśnień na model MES. Algorytm sprzężenia przetestowano na smukłym skrzydle o dużym, dodatnim kącie skosu w warunkach przepływu okołodźwiękowego. Model struktury skrzydła odpowiadał typowemu modelowi używanemu do badań w tunelach aerodynamicznych (jednorodny model stalowy). Uzyskane wyniki numeryczne porównano z doświadczalnie otrzymanymi w kriogenicznym Europejskim Tunelu Transonicznym ETW [3].

#### PIŚMIENICTWO CYTOWANE

- [1] ARMIN BECKERT, *Coupling fluid (CFD) and structural (FE) models using finite interpolation elements*, Aero. Sci. Technol. 2000.
- [2] GURU P. GURUSWAMY, *A review of numerical fluids/structures interface methods for computations using high-fidelity equations*, Computers and Structures 2002.
- [3] M. C. N. WRIGHT, *High speed Benchmark Validation Wind Tunnel Tests on the Half-Span Model N4 MDAW-ETW-104-Do12*, ETW ref. E9011 TR 044, Feb 2004
- [4] ARMIN BECKERT, *Coupling fluid (CFD) and structural (FE) models using finite interpolation elements*, Aero. Sci. Technol. 2000.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



JACEK ROKICKI, MICHAŁ WICHULSKI

## ALGORYTM SZYBKIEJ LOKALIZACJI PUNKTU NA SIATKACH TRÓJKĄTNYCH I TETRAHEDRALNYCH

### FAST POINT LOCATION ALGORITHM ON TRIANGULAR AND TETRAHEDRAL MESHES

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej,  
Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa, [jack@meil.pw.edu.pl](mailto:jack@meil.pw.edu.pl), [wichulski@meil.pw.edu.pl](mailto:wichulski@meil.pw.edu.pl)

Słowa kluczowe: Geometria obliczeniowa, lokalizacja punktu

W obliczeniowej mechanice płynów, szczególnie w metodzie nakładających się siatek, ale również przy generacji siatek obliczeniowych, występuje zadanie lokalizacji punktu. Polega ono na tym, że w obszarze, który jest podzielony na wielokąty lub wielościany wypukłe (komórki), poszukujemy komórki zawierającej punkt o zadanych współrzędnych. Zadanie to z pozoru proste, jest jednak złożone obliczeniowo w sytuacji ogromnych siatek  $N > 106$  i wielkiej liczby punktów lokalizowanych  $M > 104$ . Poszukuje się wówczas algorytmu o złożoności  $O(\log N)$ , podczas gdy algorytmy "naiwne" oparte o przeszukiwanie systematyczne mają złożoność  $O(N)$ .

W pracy przedstawiono zastosowanie trwałych dynamicznych struktur danych (*persistent data structures*) do rozwiązania zagadnienia wyszukiwania punktu na płaszczyźnie i w przestrzeni. Tego typu struktury przechowują informację o zmianach, jakie były w nich dokonywane, przy czym zamiast przechowywania oddzielnych kopii struktury danych uzyskiwanych po kolejnych aktualizacjach, zapamiętywana jest tylko zmiana jaka następuje.

Wykorzystywana metoda bazuje na rozbudowaniu czerwono-czarnego drzewa wyszukiwań binarnych w postaci trwałej, w którym kluczami są informacje o wzajemnym położeniu wielokątów tworzących siatkę obliczeniową. Omówiona została konstrukcja struktury, szczegółowy proces jej tworzenia i późniejszego użycia do lokalizacji punktu. Głównym zadaniem, jakie autorzy postawili przed sobą, było znalezienie algorytmu o logarytmicznej złożoności, który jest możliwy do praktycznego zaimplementowania. Efektywność algorytmu będzie zaprezentowana dla typowych nie-strukturalnych siatek o komórkach trójkątnych.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] DISCROLL J. R., SARNAK N., SLEATOR D. D., AND TARJAN R. E., *Making data structures persistent*, J. Comput. Syst. Sci., 1989, **38**(1), 267-280.
- [2] PREPARATA F. P., TAMASSIA R., *Fully dynamic point location in monotone subdivision*, SIAM J. Comput., 1989, **18**(4), 811-930.



PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY

## TRÓJWYMIAROWA SYMULACJA ZJAWISK PRZEPŁYWOWYCH W KOPALNIA NYCH SIECIACH WENTYLACYJNYCH

### THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF FLOW PHENOMENA IN MINE VENTILATION NETWORK

Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk, Pracownia Wentylacji Kopalń,  
ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków, [skotnicz@img-pan.krakow.pl](mailto:skotnicz@img-pan.krakow.pl)

Słowa kluczowe: wyrobisko górnicze, propagacja metanu, mieszanina płynów

Ciągła wymiana powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej jest niezbędnym warunkiem bezpiecznej pracy górników i eksploatacji kopaliny. Efektywność tego procesu jest szczególnie istotna w kopalniach węgla kamiennego, w których oprócz zagrożeń termicznych występują również skojarzone zagrożenia metanowo-pożarowe (metan, produkty utleniania węgla-tlenek węgla), jak i gazy inertne - azot i ditlenek węgla. Struktura kopalnianych sieci wentylacyjnych jest niezwykle złożona. W jej skład oprócz wyrobisk pionowych (szyby, szybiki) wchodzi szereg wyrobisk korytarzowych (przekopy, chodniki badawcze, przyścianowe, pochylne, upadowe) zlokalizowanych na poszczególnych poziomach eksploatacyjnych. Zastosowania trójwymiarowego modelu przepływu masy i energii do obliczeń całej sieci wentylacyjnej z uwagi na jej złożoność i rozległość jest obecnie niemożliwe. Istnieje jednak możliwość zastosowania tego typu modelu dla istotnych zagadnień przepływowych mających charakter lokalny. W artykule przedstawiono wyniki symulacji nieustalonego wypływu metanu z czoła przodka. Skoncentrowano się na wyznaczeniu trójwymiarowych rozkładów składowych wektora prędkości oraz stężeń metanu dla omawianego przypadku. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do analizy stanu zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego. Ze względów bezpieczeństwa znajomość rozkładów stężenia metanu w przodku pozwala na optymalne umieszczenie czujników monitoringu zagrożenia metanowego.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] DZIURZYŃSKI W., KRAWCZYK J., PAŁKA T., *Obserwacja stanu sieci wentylacyjnej przy pomocy interaktywnego programu z symulacją danych z systemu monitoringu*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2004 **1** s.18-26.
- [2] ELSNER J. W., *Turbulencja przepływów*. PWN, 1987.
- [3] ROZCZYŃIAŁSKI W., TRUTWIN W., WACŁAWIK J., *Kopalniane pomiary wentylacyjne*. Śląsk, 1992.
- [4] STOLZ J. WALA A. M. JACOB J.D., *Experimental Study of a Mine Face ventilation System For CFD Code Validation. Proceedings of the 8-Th International Mine Ventilation Congress, Kraków, 2001* pp 411-417.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200-500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



JOLANTA STACHARSKA - TARGOSZ, MONIKA CHMIELOWIEC

PORÓWNANIE ADEKWATNOŚCI WYBRANYCH METOD  
NUMERYCZNYCH DO OPISU POŁA PRZEPŁYWU W WENTYLATORZE  
POPRZECZNYM

CZĘŚĆ I CHARAKTERYSTYKA ZASTOSOWANYCH METOD  
NUMERYCZNYCH ANSYS I FLO++

THE COMPARISON TWO OF NUMERICAL METHODS FOR DESCRIPTION FLOW  
FIELD IN THE CROSS-FLOW FAN  
PART I DESCRIPTION OF THE APPLIED NUMERICAL METHODS ANSYS  
AND FLO++

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków,  
[jstachar@mech.pk.edu.pl](mailto:jstachar@mech.pk.edu.pl), [mchmielo@poczta.onet.pl](mailto:mchmielo@poczta.onet.pl)

Słowa kluczowe: wentylator poprzeczny, Ansys, Flo++

Dwuczęściowy artykuł zawiera opis i analizę obliczeń porównawczych identycznego modelu przepływu płynu w wentylatorze poprzecznym wykonanych za pomocą dwóch programów CFD, wykorzystujących odmienne metody i algorytmy numeryczne. Do przeprowadzenia symulacji pola przepływu w wentylatorze poprzecznym zastosowano dwa programy: Flo++, pełny pakiet CFD [1] oparty jest na metodzie objętości skończonych, natomiast drugi to solver YFLOW-Rota, współpracujący z programem ANSYS [2], wykorzystuje metodę elementów skończonych.

W pierwszej części artykułu zaprezentowano cechy wspólne obu stosowanych programów oraz omówiono zasadnicze różnice.

Opisano w sposób szczegółowy proces tworzenia modeli, zwracając szczególną uwagę na sposoby umożliwiające osiągnięcie maksymalnego podobieństwa.

Zaprezentowano siatki modeli oraz dokonano ich szczegółowego porównania.

PIŚMIENICTWO CYTOWANE

[1] FLO ++ USER MANUAL, SOFTFLO++, 2004,

[2] ANSYS USER MANUAL,

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



JOLANTA STACHARSKA – TARGOSZ, MONIKA CHMIELOWIEC

PORÓWNANIE ADEKWATNOŚCI WYBRANYCH METOD  
NUMERYCZNYCH DO OPISU POŁA PRZEPŁYWU W WENTYLATORZE  
POPRZECZNYM  
CZĘŚĆ II ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH I BADAŃ  
DOSWIADCZALNYCH

THE COMPARISON TWO OF NUMERICAL METHODS FOR DESCRIPTION FLOW  
FIELD IN THE CROSS-FLOW FAN  
ANALYSIS OF NUMERICAL RESULTS AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków,  
[lstachar@mech.pk.edu.pl](mailto:lstachar@mech.pk.edu.pl), [mchmielo@poczta.onet.pl](mailto:mchmielo@poczta.onet.pl)

Słowa kluczowe: wentylator poprzeczny, metody numeryczne, charakterystyki aerodynamiczne

Dwuczęściowy artykuł zawiera opis i analizę obliczeń porównawczych identycznego modelu przepływu płynu w wentylatorze poprzecznym wykonanych za pomocą dwóch programów CFD, wykorzystujących odmienne metody i algorytmy numeryczne. W drugiej części przedstawiono rezultaty symulacji numerycznych pola przepływu w wentylatorze poprzecznym uzyskane przy zastosowaniu metody objętości skończonych (program Flo++) oraz metody elementów skończonych (Ansys). Otrzymane wyniki numeryczne opracowano w formie wykresów pól wektorowych prędkości oraz rozkładów ciśnienia w postaci izolinii i wykresów powierzchniowych.

Wykazano zgodność rezultatów numerycznych z wynikami uzyskanymi na drodze doświadczalnej.

Artykuł stanowi propozycję wzorcowej dyskretyzacji wentylatorów poprzecznych, co w założeniu ma służyć budowie prawidłowych charakterystyk aerodynamicznych tego typu maszyn przepływowych, tworzonych na drodze numerycznej. Możliwość uzyskiwania rzeczywistych charakterystyk pracy wentylatorów poprzecznych metodami numerycznymi może umożliwić znaczne rozszerzenie obszaru ich stosowania i współpracę z urządzeniami w różnego typu systemach.





TOMASZ STRĘK

## ANALIZA WPŁYWU POLA MAGNETYCZNEGO NA PRZEPŁYW CIEPŁA W PŁYNIE FERROMAGNETYCZNYM

### FINITE ELEMENT ANALYSIS OF INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON HEAT TRANSFER IN FERROFLUID

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,  
[tomasz.strek@put.poznan.pl](mailto:tomasz.strek@put.poznan.pl)

Słowa kluczowe: płyn ferromagnetyczny, przepływ ciepła, kontrola przepływu

Płyny ferromagnetyczne stanowiące podgrupę płynów magnetoreologicznych, zaliczane są do grupy tzw. materiałów inteligentnych. Płyny ferromagnetyczne są nieprzewodzącymi prąd koloidalnymi zawiesinami cząsteczek ferromagnetycznych w nieprzewodzącym płynie. W jednym metrze sześciennym typowego płynu ferromagnetycznego znajduje się około  $10^{23}$  cząsteczek o wielkości 5-15 nm. W przypadku braku pola magnetycznego działającego na płyn ferromagnetyczny cząsteczki ułożone są w sposób chaotyczny. Po przyłożeniu pola magnetycznego cząsteczki układają się w uporządkowane łańcuchy, które zwiększają ich lepkość. Zmieniając pole magnetyczne możemy zmieniać ich lepkość bez używania urządzeń mechanicznych. Daje to możliwość ich zastosowania w mikroelektromechanicznych układach (ang. MEMS) np. w biosensorach czy też mikrowymienialnikach ciepła [1].

W przypadku modelowania przepływu ciepła przez płyn ferromagnetyczny musimy uwzględnić wpływ pola magnetycznego na przepływ [2]. Ponieważ płyny ferromagnetyczne są ośrodkami nieprzewodzącymi prąd równania Maxwella możemy zapisać w uproszczonej postaci  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ,  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0}$ , gdzie  $\mathbf{B}$  jest wektorem indukcji magnetycznej,  $\mathbf{M}$  - magnetyzacji a  $\mathbf{H}$  - pola magnetycznego. Wektory te powiązane są równaniem konstytutywnym  $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{M} + \mathbf{H})$ . W przypadku występowania pola magnetycznego w równaniu opisującym bilans pędu uwzględnić musimy dodatkową siłę masową zwaną siłą Kelvina  $\mathbf{f} = (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B}$ , która jest siłą jakiej doświadcza płyn magnetyczny (ferromagnetyczny) w niejednorodnym polu magnetycznym.

W wąskim zakresie temperatur wektor magnetyzacji  $\mathbf{M}$  płynu magnetycznego może być wyrażony jako liniowa funkcja wektora pola magnetycznego  $\mathbf{H}$  oraz temperatury płynu. Związek ten można zapisać w postaci  $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$  gdzie  $\chi_m = \chi_m(T)$  [1] jest całkowitą podatnością magnetyczną płynu, a  $\alpha$  jest współczynnikiem rozszerzalności termicznej płynu.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] GANGULY R., SEN S., PURI I.K., *Heat transfer augmentation using a magnetic fluid under the influence of a line dipole*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, **271**, 63-73.
- [2] STRĘK T., *Ferrofluid channel flow under the influence of magnetic dipole*, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2005, **10**, 103-109.



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



ARTUR ZIELIŃSKI, EWA TULISZKA-SZNITKO

## SYMULACJA NUMERYCZNA IZOTERMICZNYCH I NIE- IZOTERMICZNYCH PRZEPŁYWÓW W WIRUJĄCYCH PRZESTRZENIACH NUMERICAL INVESTIGATION OF THE ISOTHERMAL AND NOT-ISOTHERMAL FLOWS IN ROTATING CAVITY

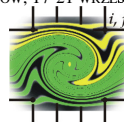
Katedra Techniki Ciepłej, Politechnika Poznańska, ul Piotrowo 3, 60-965 Poznań,  
[artur.zielinski@doctorate.put.poznan.pl](mailto:artur.zielinski@doctorate.put.poznan.pl), [sznitko@sol.put.poznan.pl](mailto:sznitko@sol.put.poznan.pl)

Słowa kluczowe: Przejście laminarno-turbulentne, DNS, wirujące przestrzenie

W pracy badane są metodą bezpośrednią przepływy izotermiczne i nie-izotermiczne w przestrzeni pomiędzy dwoma wirującymi dyskami i dwoma wirującymi cylindrami o współczynniku rozciągłości obszaru  $L=9$  i współczynniku krzywizny  $Rm=1.5$ . Tego typu badania są istotne nie tylko ze względów poznawczych, ale również aplikacyjnych. Praca może zainteresować inżynierów zajmujących się chłodzeniem tarcz wirnikowych w silnikach turbogazowych. Obliczenia prowadzone były dla różnych konfiguracji: wirnik/ wirnik, wirnik/stojan oraz wirnik/ wirnik ze źródłem i upustem. Przepływ opisany został za pomocą 3D równania Naviera-Stokesa, równania energii i równania ciągłości przepływu. W obliczeniach użyto model Boussinesq do opisu zależności pomiędzy temperaturą i gęstością. Do aproksymacji równań zastosowano metodę spektralnej kolokacji bazującą na szeregach Czebyszewa i Fouriera. Do aproksymacji po czasie zastosowano schemat wsteczny o dokładności drugiego rzędu i schemat Adamsa-Bashfortha. Dokładny opis algorytmu zawierają prace [1, 2]. Obliczenia zostały przeprowadzone dla różnych liczb Reynoldsa, różnych termicznych liczb Rossbiego, różnych współczynników prędkości obrotowych obu dysków  $s=\Omega_2/\Omega_1$  oraz różnych warunków brzegowych na cylindrach zamykających obszar. W przypadku konfiguracji wirnik/wirnik ze źródłem i upustem badano wpływ strumienia masy  $C_w$  na stabilność przepływu. Obliczenia pokazały olbrzymie bogactwo struktur niestabilnościowych występujących w badanych przepływach. Zgodność uzyskanych struktur ze strukturami uzyskanymi eksperymentalnie przez Gauthiera [3] jest bardzo dobra. Badania umożliwiły również wyznaczenie wielu parametrów istotnych z punktu widzenia inżynierskiego; między innymi wyznaczono rozkłady liczb Nusselta na wirujących dyskach dla różnych warunków termicznych. Rozkłady te zostały porównane z wynikami prac teoretycznych i eksperymentalnych.

### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] SERRE E., TULISZKA-SZNITKO E., BONToux P., *Coupled numerical and theoretical study of the flow transition between a rotating and stationary disk*, Phys. of Fluids. 2004, **16**, 3, 688-707
- [2] TULISZKA-SZNITKO E., SERRE E., BONToux P., *Numerical investigation of flow instability in rotating cavity*, Proc. MIT CFSMC, Elsevier, Edited by Bathe, 2005, 892-895
- [3] GAUTHIER G., GONDRET P., MOISY F., RABAUT M., *Instabilities in the flow between co- and counter-rotating disks*, J. Fluid Mech. 2002, **473**, 1-21.



KRZYSZTOF MIZERSKI, KONRAD BAJER

## DWUWYMIAROWY PRZEPŁYW STOKES'A W CYLINDRYCZNYM FILTRZE

### TWO-DIMENSIONAL STOKES FLOW IN A CYLINDRICAL FILTER

Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, Instytut Geofizyki, ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa,  
[kamiz@igf.fuw.edu.pl](mailto:kamiz@igf.fuw.edu.pl)  
[kbajer@fuw.edu.pl](mailto:kbajer@fuw.edu.pl)

Słowa kluczowe: przepływ Stokes'a, filtracja mocznika

Celem pracy jest uzyskanie jakościowego oraz ilościowego opisu przepływu w filtrach przemysłowych.

Analizowany jest przepływ lepkiego płynu pomiędzy dwoma koncentrycznymi cylindrami o ustalonej wysokości w jednorodnym polu grawitacyjnym w granicy małych liczb Reynolds'a (przepływ Stokes'a). Zewnętrzny cylinder oraz podstawa są sztywne i płyn nie może ich penetrować natomiast na powierzchni wewnętrznego walca (cylinder filtrujący) zadawany jest, zależny tylko od wysokości, rozkład składowej normalnej pola prędkości, modelujący rozkład otworów w rzeczywistym układzie filtracyjnym. Na górnej powierzchni swobodnej zadawany jest warunek znikania naprężeń stycznych.

Przepływ cieczy w układzie opisywany jest funkcją prądu Stokes'a spełniającą w zmiennych cylindrycznych równanie  $[\Delta - (1/r^2)]^2 \psi = 0$ , gdzie  $\Delta$  to skalarny operator Laplace'a. Równanie to jest rozwiązywane z powyższymi warunkami brzegowymi dla różnych rozkładów składowej normalnej przepływu na cylindrze filtrującym, przy użyciu pakietu numerycznego FLUENT udostępnianego przez *Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego* (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego. W wyniku otrzymywany jest optymalny dla warunków filtracyjnych rozkład otworów na wewnętrznym cylindrze.

W rzeczywistym układzie filtracyjnym cylinder zewnętrzny wypełniony jest wieloma cylindrami filtrującymi. Modelowanie przepływu w takim układzie oraz optymalizacja filtracji ze względu na gęstość i rozmieszczenie cylindrów filtrujących jest przedmiotem aktualnych badań.



JAROSŁAW BARTOSZEWICZ, LEON BOGUSŁAWSKI

## WPŁYW ZMIAN PRĘDKOŚCI W PRZEKROJU WYLOTOWYM DYSZY NA STRUKTURĘ PŁYNU W KOMORZE NAWROTNEJ

### INFLUENCE OF CHANGES VELOCITY AT INLET OF NOZZEL ON STRUCTURE OF FLOW IN REVERSE CHAMBER

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Katedra Techniki Ciepłej, ul. Piotrowo  
3, 60-965 Poznań, [Jaroslaw.Bartoszewicz@put.poznan.pl](mailto:Jaroslaw.Bartoszewicz@put.poznan.pl)

Słowa kluczowe: komora nawrotna, turbulencja, struga kołowa

W pracy przedstawione zostaną wyniki analizy struktury strugi kołowej przepływającej przez komorę nawrotną. Badany element stanowi model geometryczny komór nawrotnych występujących w wielu maszynach ciepło-przepływowych stosowanych w chwili obecnej w technice. Analizowana klasa przepływów do chwili obecnej nie była tematem systematycznych badań mających na celu opis struktury płynu oraz określenia jego oddziaływania ze ściankami kanału podczas zmiany głównego kierunku przepływu o kąt 180 stopni. Autorzy pracy przed dwoma laty rozpoczęli badania zmierzające do opisu zjawisk występujących w strudze oraz na ściance kanału, a pierwsze wyniki zaprezentowano w minionym roku na forum publicznym [1,2]. Z prac wcześniejszych wynika, że struktura strugi kołowej przepływającej przez komorę nawrotną mimo pozornego podobieństwa do strugi uderzającej cechuje się istotnymi różnicami wynikającymi z kontrakcji strugi i ścianek komory. Wyniki szeroko publikowanych prac z zakresu strug swobodnych i uderzających mogą tylko fragmentarycznie posłużyć do opisu przepływu ze zmianą kierunku głównego o 180 stopni i stanowią w najlepszym przypadku pierwsze przybliżenie zjawisk zachodzących w obrębie komór nawrotnych maszyn.

Tematem pracy jest określenie wpływu zmian prędkości strugi wpływającej do komory nawrotnej na rozkład wartości średnich oraz parametrów turbulencji w obszarze płynu oraz na ściankach kanału. W pracy przedstawione zostaną dla różnych prędkości wlotowych promieniowe i poosiowe rozkłady: składowych wektora prędkości, ciśnienia statycznego, temperatury (w przypadku strugi nieizotermicznej), kinetycznej energii turbulencji, naprężeń ścinających na ścianach komory oraz liczby Stanton. W podsumowaniu dokonano oceny wpływu prędkości początkowej na strukturę strugi kołowej oraz stopnia jej oddziaływania na ściany kanałów i jej istotności w aspektach konstrukcyjnych.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] BARTOSZEWICZ J., BOGUSŁAWSKI L., *The optimization of numerical grid for flow of round jet in cylindrical vessel*. GRETh, Heat-SET Conference, Grenoble, 2005, 102-103.
- [2] BARTOSZEWICZ J., BOGUSŁAWSKI L., *Influence of numerical grid on results of flow analysis of round jet in cylindrical chamber*. Ciepłne Maszyny Przepływowe, Turbomachinery, 2005, Nr 128, Vol II, 53-60.



JAROSŁAW BARTOSZEWICZ, LEON BOGUSŁAWSKI

## WPŁYW ZMIAN STOPNIA TURBULENCJI W PRZĘKROJU WYŁOTOWYM DYSZY NA STRUKTURĘ PŁYNU W KOMORZE NAWROTNEJ

### INFLUENCE OF CHANGES TURBULENCE INTENSITY AT INLET OF NOZZEL ON STRUCTURE OF FLOW IN REVERSE CHAMBER

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Katedra Techniki Ciepłej, ul. Piotrowo  
3, 60-965 Poznań, [Jaroslaw.Bartoszewicz@put.poznan.pl](mailto:Jaroslaw.Bartoszewicz@put.poznan.pl)

Słowa kluczowe: komora nawrotna, turbulencja, struga kołowa

W pracy przedstawione zostaną wyniki analizy strugi kołowej przepływającej przez komorę nawrotną, w której następuje zmiana kierunku głównego strugi o 180 stopni w przypadku zmian stopnia turbulencji strugi w przekroju wlotowym komory. Praca stanowi uzupełnienie artykułu poświęconego badaniu wpływu zmian prędkości wlotowej do komory nawrotnej stanowiącej etap pracy poświęcony badaniu wpływu zmian wartości średnich oraz parametrów turbulencji na strukturę płynu w komorze oraz wzajemnego oddziaływania pomiędzy płynem i ścianą kanału. Do analiz wykorzystano kod komercyjny Phoenix [2], który z powodzeniem wykorzystywany jest od wielu lat przez autorów w badaniach numerycznych oraz w procesach projektowych elementów maszyn ciepłno-przepływowych. W obliczeniach numerycznych rozwiązywano układ równań transportu masy, pędu i energii uzupełniony o równania dodatkowe, w tym o równania modelu turbulencji  $k-\varepsilon$  w wersji zaproponowanej przez Laundera i Spaldinga [1]. Uzyskane wyniki radykalnie różnią się od obserwacji wpływu zmian stopnia turbulencji strugi kołowej w strugach swobodnych i uderzających. W przypadku strug swobodnych oddziaływanie to obejmuje odległość kilkunastu średnic i nie powoduje istotnych zmian w rozkładach wartości średnich. W przypadku strugi kołowej przepływającej przez komorę nawrotną zmiana stopnia turbulencji powoduje zmianę struktury strugi na poziomie parametrów turbulencji oraz wartości średnich.

W pracy przedstawione zostaną rozkłady wartości średnich oraz parametrów turbulencji dla różnych stopni turbulencji strugi w przekroju wylotowym dyszy. Na znormalizowanych wykresach przedstawione zostaną promieniowe i poosiowe rozkłady: składowych wektora prędkości, ciśnienia statycznego, temperatury (w przypadku strugi nieizotermicznej), kinetycznej energii turbulencji, naprężeń ścinających na ścianach komory oraz liczby Stanton na ścianach komory.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] LAUNDER B.E., SPALDING D.B., *The numerical computation of turbulent flows*. Comp. Mech. In Applied Mechanics & Engineering. 1975, **3**, 269.
- [2] ROSTEN H.I., SPALDING D.B., *The Phoenix beginners guides*. CHAM report, No TR110, CHAM Limited, Wimbledon, England 1985.



DARIUSZ KARDAŚ

## MODEL PRZEPŁYWU PŁYNU Z DWOMA CIŚNIENIAMI TWO PRESSURES FLUID FLOW MODEL

Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 80-952, ul. Fiszer 14, [dk@imp.gda.pl](mailto:dk@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: nierównowaga termodynamiczna, lepkościowe ciśnienie objętościowe, prędkość dźwięku

Równania bilansu masy, pędu i energii uzupełnione związkami opartymi na hipotezie Newtona opisują ruch płynu, w którym na naprężenia składa się ciśnienie termodynamiczne, ciśnienie objętościowe oraz naprężenia ścinające. Lepkościowe ciśnienie objętościowe jest w takim podejściu zależne od dywergencji wektora prędkości. Jedną z cech charakterystycznych tak opisanego ruchu płynu jest nieskończona prędkość rozchodzenia się małych zaburzeń. W ramach rozszerzonej termodynamiki procesów nierównowagowych strumienie masy, pędu i energii są traktowane jako zmienne niezależne, których dynamiką rządzą równania ewolucyjne. W niniejszej pracy przedstawiono jednowymiarowy model przepływu płynu, w którym lepkościowe ciśnienie objętościowe jest kolejną składową wektora stanu opisaną dodatkowym równaniem ewolucyjnym. Dla prostoty wybrano opis jednowymiarowy. Cały model składa się z równań bilansu masy, pędu i energii płynu oraz z równania na zmiany lepkościowego ciśnienia objętościowego (typu Maxwella-Cattaneo) w

następującej postaci  $\frac{\partial p^v}{\partial t} + v \frac{\partial p^v}{\partial x} = -\frac{p^v}{\theta} - \frac{\xi}{\theta} \frac{\partial v}{\partial x}$ , gdzie  $p^v$  jest ciśnieniem objętościowym, zaś  $v$  prędkością,  $\theta$  czasem relaksacji, a  $\xi$  lepkością. Dla takiego modelu, przy pomocy metody charakterystyk, wyznaczono szybkości rozchodzenia się sygnałów. Okazało się, że małe zaburzenia rozchodzą się ze skończonymi prędkościami. Dzieje się tak pomimo tego, że w modelu występuje lepkość. Prędkość propagacji impulsu zależy od ciśnienia termodynamicznego, ale również od ciśnienia objętościowego i to w taki sposób, że maleje ona wraz ze wzrostem ciśnienia objętościowego, czyli w obszarze dużego gradientu prędkości. Zmniejszenie prędkości fali wraz ze wzrostem gradientu prędkości przepływu przeciwdziała efektowi nieliniowości, czyli wzrostowi prędkości rozchodzenia się sygnału wraz ze wzrostem jego amplitudy. W ramach badania własności modelu przeprowadzono analizę małych zaburzeń z uwzględnieniem wpływu czasu relaksacji i lepkości. Zbudowano schemat numeryczny i rozwiązano zagadnienie brzegowo-początkowe dla tego układu równań w kanale zbieżno - rozbieżnym.

### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] JOU D., J. CASAS-VAZQUEZ J., LEBON G., *Extended Irreversible Thermodynamic*, Springer 1998



KRYSTYNA JEŻOWIECKA-KABSCH, KATARZYNA STRZELECKA

## WPŁYW LICZBY REYNOLDSA NA STRUKTURĘ POŁA PRĘDKOŚCI ZA ROZSZERZENIEM RURY

### THE REYNOLDS NUMBER'S INFLUENCE ON VELOCITY DISTRIBUTION BEHIND PIPE SUDDEN EXPANSION

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, [krystyna.jezowiecka-kabsch@pwr.wroc.pl](mailto:krystyna.jezowiecka-kabsch@pwr.wroc.pl)  
[katarzyna.strzelecka@pwr.wroc.pl](mailto:katarzyna.strzelecka@pwr.wroc.pl)

Słowa kluczowe: nagłe rozszerzenie, profil prędkości, strefa recyrkulacji

W instalacjach przepływowych występują elementy gwałtownie zmieniające pole przepływu, w tym także nagłe rozszerzenia przewodu. Struktura strugi w części dopływowej takiego przewodu zależy od charakteru przepływu, natomiast po wypływie z niego, czyli za rozszerzeniem, ulega destabilizacji. Dochodzi wówczas do losowych fluktuacji hydrodynamicznych parametrów przepływu, wpływających zapewne na kształtowanie się prędkości za rozszerzeniem.

Badania doświadczalne strefy wypływu strug nieograniczonych wykazały, że w takim przepływie powstają makrostruktury w wyniku naturalnych zaburzeń wywołanych ostrą krawędzią wylotową [1] oraz że struktury te mają wpływ na podniesienie stopnia turbulencji (przede wszystkim na granicy strugi) [2].

Powstaje zatem pytanie: jak kształtują się struktury wielkoskalowe w osiowosymetrycznym przepływie przez rurę z nagłym rozszerzeniem przekroju oraz jaka jest zależność zasięgu oddziaływania krawędzi wylotowej (a więc także zasięg występowania makrostruktur) od stopnia rozszerzenia rury.

W tym celu przeprowadzono metodą anemometrii laserowej LDA pomiary prędkości miejscowych dla dwóch zdecydowanie różnych stopni nagłego, osiowosymetrycznego rozszerzenia rury:  $d/D = (0,53; 0,82)$  w zakresie liczb Reynoldsa:  $Re \in (1000; 100000)$ . Na podstawie analizy pól prędkości miejscowych (uśrednionych i fluktuacyjnych) wykazano, że zasięg stref recyrkulacji, a więc również odległość od oporu miejscowego, w której struga odzyskuje stabilność i tworzy się uformowany profil prędkości zależy od liczby Reynoldsa. Zaobserwowano ponadto, że wartość wzdłużnej składowej intensywności turbulencji zmienia się z odległością od przeszkody oraz od osi przewodu.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] DROBNIAK S., *Struktury koherentne swobodnej strugi osiowo-symetrycznej*. Politechnika Częstochowska, seria Monografie nr 1, Częstochowa 1986.
- [2] JEŻOWIECKA-KABSCH K., SZEWCZYK H., WĘDRYCHOWICZ W., *Struktura pulsującego przepływu przez rurę z kryzą*. Inż. Chem. Proc. 2004, **25**, 155-168.



MARTA WACŁAWCZYK, MARTIN OBERLACK

## ZASTOSOWANIE METODY GRUP LIEGO DO ANALIZY RÓWNAŃ FUNKCJONALNYCH HOPFA

### APPLICATION OF THE LIE GROUP METHOD TO THE ANALYSIS OF HOPF FUNCTIONAL EQUATIONS

Instytut Maszyn Przepływowych PAN, ul. J. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, [mw@imp.gda.pl](mailto:mw@imp.gda.pl)  
Department of Hydromechanics and Hydraulics, Darmstadt University of Technology, Petersenstrasse 13,  
64287 Germany, [oberlack@hyhy.tu-darmstadt.de](mailto:oberlack@hyhy.tu-darmstadt.de)

Słowa kluczowe: funkcjonal Hopfa, równanie Burgera, teoria grup

The purpose of symmetry method based on the Lie group theory is to analyze, simplify and find solutions of partial differential equations. The method has also been applied in the area of fluid dynamics. The examples of its applications include finding broad range of invariant solutions for turbulence statistics [1], as well as the analysis and the construction of new turbulence models satisfying the required symmetries of the Navier-Stokes equations.

The present work concerns the application of Lie group theory to functional differential equations. The description of turbulence in terms of functional equations has been first introduced in the seminal work of E. Hopf [2]. In statistical mechanics, the system of  $N$  particles can be described by the probability density function  $P(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_N, t)$ , the phase space of this function contains the positions  $\mathbf{x}$  and velocities  $\mathbf{u}$  of all the particles. In the continuum limit (e.g., in hydromechanics) the elements of the phase space  $\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_N$  become a continuous function of spatial variable  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x})$ . In this case the system is described by the probability density functional  $P([\mathbf{u}(\mathbf{x})], t)$ . Hopf functional equations have not been studied so far in terms of the symmetry analysis. Hence, in the present work we extend the Lie group method and apply it to the functional formulation of the Burgers equation. The Burgers equation is often considered as a “toy model” of the Navier-Stokes equations. From the transformation groups we derive a particular, invariant solution of this equation. Analogous solution was found by Hopf for the case of functional formulation of the Navier-Stokes equations. In our work, however, the group theory allows to find solutions by a strictly determined procedure where no guessing is necessary. The new method can lead to significant applications in fluid dynamics, e.g., finding new invariant solution for multipoint turbulence statistics. The new method can also be applied in other areas of physics, where the description in terms of functional equations is used.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] OBERLACK M., *Unified Approach for Symmetries in Plane Parallel Turbulent Shear Flow*, J. Fluid Mech., 2001, **427**, 299-328
- [2] HOPF E., *Statistical hydromechanics and functional calculus*, J. Rational Mech. Anal., 1952, **1**, 87-123.





WITOLD ELSNER, ROBERT ZARZYCKI

## WPŁYW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI NA STRUKTURĘ ŚŁADU ZA PRĘTEM CYLINDRYCZNYM

### THE EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON THE WAKE BEHIND CIRCULAR CYLINDER

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Maszyn Ciepłych,  
Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,  
[welsner@imc.pcz.czest.pl](mailto:welsner@imc.pcz.czest.pl), [zarzycki@imc.pcz.czest.pl](mailto:zarzycki@imc.pcz.czest.pl)

Słowa kluczowe: opływ cylindra, ślady spływowe, parametry śladu

W badaniach poświęconych oddziaływaniu pomiędzy wirnikiem a kierownicą w turbinowym czy też sprężarkowym stopniu łopatkowym do modelowania śladów najczęściej stosuje się pręty cylindryczne. W celu wyjaśnienia roli parametrów śladów zaburzających na rozwój warstwy przyściennej można zastosować pręty o różnych średnicach, jak również o różnej chropowatości powierzchni. Można się spodziewać, że zmiana chropowatości powierzchni pręta wpłynie będzie na strukturę śladu spływowego w odmienny sposób modyfikując defekt prędkości, a inaczej poziom intensywności turbulencji w śladzie. Celem prezentowanej pracy była analiza parametrów śladu za prętem cylindrycznym o różnej chropowatości powierzchni, która miała potwierdzić, lub zaprzeczyć słuszności powyższych założeń. Dotychczasowe prace badawcze zajmujące się wpływem chropowatości powierzchni na opływ cylindra koncentrowały się zazwyczaj na przypadkach wyższych liczb  $Re_d$ , a więc obszarach krytycznym i nadkrytycznym. Dodatkowo, z powodu trudności pomiarowych, analiza ograniczona była zazwyczaj do oceny rozkładów ciśnienia na powierzchni, oraz wartości współczynnika oporu  $C_D$ .

Badania opisane w prezentowanej pracy prowadzone były w zakresie liczby Reynoldsa  $Re_d$  od 3000 do 4000, a więc w zakresie podkrytycznego opływu walca. Przepływ ten, dla gładkiej powierzchni ścianki, charakteryzuje się występowaniem laminarnej warstwy przyściennej na powierzchni walca oraz w pełni turbulentnym śladem tworzącym się za walcem. Na powierzchni cylindra w przypadku reżimu podkrytycznego tworzą się naprzemiennie struktury wirowe, tworzące za opływającym cylindrem wirową ścieżkę Karmana. W pracy analizie poddano profile prędkości średniej oraz fluktuacji losowych zarejestrowane w kilku trawersach pomiarowych za opływającymi cylindrami. Profile te pozwoliły na określenie charakterystycznych parametrów śladów aerodynamicznych tj.: szerokości połówkowej, defektu prędkości i intensywności turbulencji w osi śladu. Analiza rozkładów tych wielkości w kierunku przepływu wykazała, że wprowadzając chropowatość powierzchni można w pewnym zakresie sterować parametrami śladu. Stwierdzono, że chropowatość powierzchni powoduje zmianę częstotliwości formowania się struktur wirowych Karmana co daje w efekcie spadek liczby Strouhala.



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: TURBULENCJA



JACEK POZORSKI, MIROSŁAW ŁUNIEWSKI

## WPŁYW EFEKTÓW PODSIATKOWYCH NA RUCH CZĄSTEK W TURBULENTNYM PRZEPŁYWIE PRZYŚCIENNYM

### EFFECT OF SUBGRID-SCALES ON PARTICLE MOTION IN WALL TURBULENCE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN, ul. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, [jp@imp.gda.pl](mailto:jp@imp.gda.pl), [mirmir@imp.gda.pl](mailto:mirmir@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: przepływy dwufazowe, turbulencja, efekty podsiatkowe

W pracy podjęto zagadnienie modelowania ruchu fazy dyspersyjnej (cząstki, krople) w turbulentnym przepływie dwufazowym. Współcześnie publikowane prace [1] zwracają uwagę na potrzebę uwzględnienia wpływu nierozwiązywanych (podsiatkowych) skal turbulencji przepływu na ruch cząstek. Z praktycznego punktu widzenia istotne jest poprawne przewidywanie dyspersji turbulentnej cząstek, a w turbulencji przyściennej także separacji cząstek na ściankach.

Do obliczeń ruchu fazy ciągłej (płynu) zastosowano metodę dużych wirów (LES). Przykład obliczeniowy stanowił rozwinięty przepływ turbulentny w kanale płaskim. Wyznaczono statystyki ruchu cząstek w przepływie oraz ich szybkość separacji na ścianie. Wyniki zestawiono z dostępnymi danymi eksperymentalnymi i rozwiązaniem pełnych równań przepływu (DNS).

Obliczenia numeryczne (w toku), prowadzone z użyciem modelu dyspersji podsiatkowej [2], powinny dostarczyć wskazówek co do celowości jego zastosowania w turbulencji przyściennej oraz wyników ilościowych dla rozważanych domknięć podsiatkowych.

#### PIŚMIENICTWO CYTOWANE

- [1] KUERTEN J.G.M., VREMAN A.V., *Can turbophoresis be predicted by large-eddy simulation?* Phys. Fluids 2005, **17**, art. 011701.
- [2] POZORSKI J., APTE S.V., RAMAN V., *Filtered particle tracking for dispersed two-phase turbulent flows.* Proceedings of the Summer Program 2004, Center for Turbulence Research, Stanford, pp. 329-340.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: **HYDROMECHANIKA OKRĘTU**



JAN KULCZYK, MACIEJ ZAWIŚŁAK

## METODY NUMERYCZNE W OPISIE RUCHU STATKU NA WODZIE PŁYTKIEJ

### NUMERICAL METHODS IN DESCRIPTION OF SHIP MOTION IN SHALLOW WATER

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław,  
[jan.kulczyk@pwr.wroc.pl](mailto:jan.kulczyk@pwr.wroc.pl)

Słowa kluczowe: statek śródlądowy, woda płytka, obliczenia numeryczne

Badania modelowe statków śródlądowych prowadzone są w oparciu o metodykę stosowaną w badaniach modelowych statków morskich. Dotyczy to szczególnie podstawowych badań mających istotne znaczenie praktyczne tj. badań oporowych i oporowo napędowych. Dodatkowe pomiary jakie wykonuje się niejako przy okazji odnoszą się do pomiarów wielkości osiadania, czy przegłębienia statku w czasie ruchu na wodzie ograniczonej. Wyniki tych pomiarów mają ważne znaczenie do określania bezpiecznych dopuszczalnych prędkości pływania na wodzie ograniczonej. Nie zwiększa to wiarygodności, dokładności prognoz napędowych statków śródlądowych wykonanych w oparciu o badania modelowe. Wyniki eksperymentu wykonanego na zlecenie ITTC wykazały, że prognozy napędowe są różne w zależności od ośrodka i metody przeliczeń. Różnice wynosiły do 20%. W ograniczonym stopniu zalecane przez ITTC metody prognozowania oporu statku na wodzie płytkiej uwzględniają wpływ ograniczonej głębokości. Zalecane sposoby uwzględnienia ograniczonej głębokości, to metodyka określenia współczynnika kształtu uwzględniającego ograniczoną głębokość, lub przyjęcie do obliczenia liczby Reynoldsa prędkości statku zwiększonej o prędkość przepływu wstecznego. W badaniach modelowych pomija się w zasadzie wpływ prędkości prądu na kształtowanie opływu kadłuba statku śródlądowego.

Na Politechnice Wrocławskiej, zespół zajmujący się projektowaniem i eksploatacją statków eksploatowanych na wodach śródlądowych, od wielu lat pracuje nad rozwojem numerycznych metod analizy ruchu statku na wodzie ograniczonej. Prócz własnego systemu obliczeniowego HPSDK z powodzeniem adoptuje komercyjny system FLUENT do analizy opływu kadłuba statku śródlądowego. Oba te systemy traktowane są jako wzajemnie uzupełniające się. FLUENT umożliwia wykonanie obliczeń oporu statku, HPSDK parametry pracy układu napędowego z uwzględnieniem oddziaływania kadłuba statku i ograniczeń drogi wodnej. Pozwala to na wykonanie pełnej numerycznej prognozy napędowej dla określonych warunków nawigacyjnych. W referacie przedstawione zostaną przykładowe wyniki obliczeń zjawisk jakie zachodzą przy ruchu statku na wodzie płytkiej przy zastosowaniu wymienionych tu systemów obliczeniowych. Otrzymane wyniki porównane będą z dostępnymi wynikami badań modelowych.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA:



MATEUSZ GRZELCZAK

## WPLYW KĄTA ZAWIROWANIA WSTĘPNEGO NA SPRAWNOŚĆ PROCESU SPRĘŻANIA DMUCHAWY DA 200 WSPÓPRACUJĄCEJ Z WIRNIKAMI O ZRÓŻNICOWANYM SPOSOBIE SKRACANIA ŁOPATEK

### THE EFFECT OF PRESWIRL ANGLE ON THE COMPRESSION PROCESS EFFICIENCY IN THE CENTRIFUGAL COMPRESSOR DA 200 WITH DIFFERENT SPLITTER BLADES USED IN IMPELLERS

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,  
[Mateusz.Grzeczak@put.poznan.pl](mailto:Mateusz.Grzeczak@put.poznan.pl)

Słowa kluczowe: maszyny przepływowe, mechanika płynów

Problematyka zawarta w referacie dotyczyć będzie zjawisk przepływowych występujących w osiowo-promieniowych wirnikach prototypowej dmuchawy DA 200 wyprodukowanej w HCP Poznań S.A. Dmuchawa DA 200 współpracuje łącznie z trzema wirnikami o liczbie łopatek  $z_w = 24$  przy czym w dwóch wirnikach zastosowano łopatki skracane. Na podstawie badań eksperymentalnych dla każdego z trzech wirników zaprezentowane zostaną wyniki w postaci sprawności procesu sprężania dla różnych wartości kąta zawirowania wstępnego. Poza tym poddane zostaną analizie rozkłady ciśnień w przekroju wylotowym wirnika, wzdłuż tarczy pokrywającej, a także rozkłady ciśnień całkowitych i statycznych przed wirnikiem. Uzyskane rozkłady ciśnień porównane zostaną z obliczeniami numerycznymi dla geometrii stopnia sprężającego z wirnikiem bez skracanych łopatek, gdzie parametry termodynamiczne uzyskane z badań w przekrojach kontrolnych stopnia, posłużyły za warunki brzegowe niezbędne do uzyskania rozwiązań numerycznych. Obliczenia numeryczne prowadzone były przy wykorzystaniu pakietu REFlux, rozwiązującego przepływ opisany układem trójwymiarowych równań Naviera-Stokesa z uśrednieniami Reynoldsa w krzywoliniowym układzie współrzędnych. Równania uzupełniono o dwurównaniowy różniczkowy model turbulencji Mentera.



ZYGMUNT WIERCIŃSKI, MACIEJ KAISER

## ANALOGIA WYMIANY CIEPŁA I PĘDU PRZY NIESTACJONARNYM OPŁYWIE PŁYTY

### THE ANALOGY OF THE HEAT AND MOMENTUM TRANSFER IN NONSTATIONARY FLOW PAST A PLATE

Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk, ul. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, [zw@imp.gda.pl](mailto:zw@imp.gda.pl),  
[cesarz@imp.gda.pl](mailto:cesarz@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: Analogia Reynoldsa, przejście laminarno-turbulentne, termiczna warstwa przyścienna

W pracy przedstawiono rezultaty badań wymiany ciepła na płaskiej płycie w poddźwiękowym tunelu aerodynamicznym o niskim poziomie turbulencji,  $Tu < 0.08\%$ . Celem pracy było zbadanie wpływu zaburzeń pola prędkości generowanych przez ślady spływowe na proces wymiany ciepła w warstwie przyściennej na płaskiej płycie, a w szczególności jakościowa i ilościowa ocena prawdziwości hipotezy o analogii wymiany ciepła i pędu.

Już Reynolds (1874), postulował proporcjonalność pomiędzy tarcieniem  $\tau_w$  a strumieniem ciepła  $q_w$ , co oznacza podobieństwo gradientów temperatury  $T$  i prędkości  $U$ .

Wymiana pędu powietrza opływającego płaską płytę może być scharakteryzowana przez współczynnik tarcia  $C_f$ , zaś wymiana ciepła pomiędzy płytą a przepływem - przez liczbę Stanton  $St$ . Analogia pomiędzy wymianą ciepła a wymianą pędu, tzw. analogia Reynoldsa - Colburna wiąże parametry przepływu z parametrami termicznymi. Jeżeli dane pole przepływu jest określone, to właściwości wymiany ciepła mogą być znalezione przez użycie tej analogii.

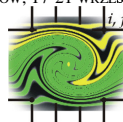
$$St = C_{ni} \frac{C_f}{2 \cdot s} Pr^{-2/3},$$

gdzie  $Pr$  jest liczbą Prandtla,  $s$  - współczynnikiem analogii Reynoldsa,  $C_{ni}$  jest współczynnikiem nieizotermiczności.

Jak wiadomo z literatury wartość liczby Prandtla dla powietrza w przepływie laminarnym równa jest  $Pr_l = 0.72$ , zaś w turbulentnym wynosi  $Pr_t = 1$ . Aby wyznaczyć współczynnik analogii Reynoldsa musi być znana liczba Prandtla na całej długości badanego obszaru warstwy przyściennej, tzn. w rejonie zarówno jej stanu laminarnego jak i przejściowego oraz turbulentnego. Zaproponowano zastosowanie rozkładu współczynnika intermitencji w postaci dystrybucji trójparametrowego rozkładu Weibulla do wyznaczenia rozkładu liczby Prandtla w obszarze przejścia laminarno-turbulentnego w warstwie przyściennej dla przepływów o różnym poziomie niestacjonarności.

Wyznaczone wartości współczynnika analogii Reynoldsa dla badanych przepływów świadczą o tym, że analogia Reynoldsa istnieje zarówno dla laminarnego, przejściowego, jak i dla turbulentnego przepływu. Jednakże w przypadku warstwy przyściennej w przepływie niestacjonarnym wartości współczynnika Reynoldsa są nieco wyższe, niż to jest w pozostałych przypadkach. Co oznacza, że w tego rodzaju przepływie, gradient prędkości jest większy o 10% od gradientu temperatury. Wy tłumaczyć to można wzrostem częstotliwości i intensywności silnych niestacjonarności na zewnątrz warstwy przyściennej wywołanych przejściem śladów spływowych, a te są właśnie większe przy zastosowaniu bębna.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: MASZYNY PRZEPŁYWOWE



ZBIGNIEW ZARZYCKI, KAMIL URBANOWICZ

## MODELOWANIE STANÓW NIEUSTALONYCH PODCZAS UDERZENIA HYDRAULICZNEGO Z UWZGLĘDNIENIEM KAWITACJI PRZEJŚCIOWEJ W PRZEWODACH CIŚNIENIOWYCH

### MODELLING TRANSIENT FLOW DURING WATER HAMMER CONSIDERING CAVITATION IN PRESSURE PIPES

Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn,  
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, [zbigniew.zarzycki@ps.pl](mailto:zbigniew.zarzycki@ps.pl), [kurbanowicz@ps.pl](mailto:kurbanowicz@ps.pl)

Słowa kluczowe: kawitacja, modelowanie, przebiegi przejściowe w przewodach

W przewodach zamkniętych w układach hydraulicznych może wystąpić zjawisko kawitacji spowodowane np. gwałtowną zmianą prędkości (wskutek skokowego zamknięcia zaworu, lub awaryjnego wyłączenia silnika napędzającego pompę). Zjawisku temu (tzw. uderzeniu hydraulicznemu) towarzyszą chwilowe pulsacje ciśnienia, które mogą spowodować naruszenie ciągłości przepływu, związane z wystąpieniem zjawiska kawitacji. Przy czym mogą występować dwa rodzaje kawitacji: kawitacja parowa i kawitacja gazowo – parowa (związana dodatkowo z wydzielaniem się rozpuszczonego powietrza z cieczy).

W pracy przedstawiono dwa modele matematyczne kawitacji: model kawitacji dyskretnej (naruszenia ciągłości przepływu w całym przekroju, tzw. rozerwania strumienia (słupa) cieczy) oraz model kawitacji pęcherzykowej (uwzględniający wpływ chwilowego współczynnika stężenia objętościowego fazy ciekłej). Ruch płynu w przewodzie opisują dwa równania quasi-jednowymiarowe, różniczkowe cząstkowe typu hiperbolicznego. Nowością w pracy jest uwzględnianie w równaniu ruchu zmiennych w czasie oporów tarcia w postaci całki splotowej z przyśpieszenia i tzw. funkcji wagi:

$$\tau(t) = \frac{2 \cdot \mu}{R} \int_0^t \frac{\partial v}{\partial t}(u) \cdot w(t-u) du$$

W przypadku przepływu laminarnego funkcję „w” przyjęto wg. modelu Schohl’a, a w przypadku przepływu turbulentnego opracowano jej efektywną postać przydatną do symulacji komputerowej. Występujący w nich efektywny współczynnik lepkości, uwzględnia zarówno lepkość cieczy jak i pary (gazu). Rozwiązanie przedstawiono metodą charakterystyk. Wyniki obliczeń porównano z dostępnymi wynikami badań eksperymentalnych. Pokazują one, że w przypadku uwzględnienia zmiennych oporów, wyniki obliczeniowe są zbliżone do wyników badań eksperymentalnych.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: OGÓLNA MECHANIKA PŁYNÓW



KAZIMIERZ WÓJS, ROMUALD REDZICKI, ANDRZEJ SITKA

## KAWITACJA W PŁYNACH LEPICH I LEPKO-SPRĘŻYSTYCH CAVITATION IN VISCOUS AND VISCOELASTIC LIQUIDS

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27,  
50-370 Wrocław, [kazimierz.wojs@pwr.wroc.pl](mailto:kazimierz.wojs@pwr.wroc.pl)

Słowa kluczowe: kawitacja, ciecz nieniutonowska

W pracy przedstawiono równania i numeryczne rozwiązania oscylacji pęcherzyka kawitacyjnego w płynie nieniutonowskim lepkim i lepkosprężystym. Własności lepkie płynu opisano modelem potęgowym (1) a własności lepkosprężyste modelem OWF (Oldroyda Waltersa Fridricksona) (2).

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \int_{-\infty}^t N(t-t') \dot{B}_{ij}(t') dt' \quad (2)$$

Uzyskane z obliczeń numerycznych charakterystyki oscylacji pojedynczego pęcherzyka kawitacyjnego różnią się dla cieczy niutonowskiej i nieniutonowskiej. Z przeprowadzonej analizy numerycznej wynika, że lepkość i sprężystość płynu w znaczący sposób ograniczają zjawisko kawitacji. Wskazują na to uzyskane charakterystyki zależności oscylacji prędkości i ciśnienia, wykazujące zmniejszenie amplitudy drgań pęcherzyka wraz ze wzrostem lepkości i sprężystości płynu.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA:



MICHAŁ KRĘŻELEWSKI

## KOŁYSANIE WODOLOTU NA WZBURZONYM MORZU HYDROFOIL CRAFT MOTIONS IN ROUGH SEA

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk,  
krezel@pg.gda.pl

Słowa kluczowe: wodolot, kołysanie, falowanie morza

W pracy przedstawiono, bardziej od dotychczas znanych, matematyczny, liniowy model ruchów wodolotu na wzburzonym morzu. Fala jest wiatrową o zadanym widmie a kurs wodolotu względem głównego kierunku biegu fal może być dowolny. Wodolot może być jednokadłubowcem lub kataranem, podpartym układem dwóch lub trzech płatów nośnych, przy czym co najmniej jego płaty dziobowe przecinają niezakłóconą powierzchnię wody. Płaty nośne mogą być wyposażone w płetwy stabilizacyjne a wodolot w stery i śruby napędowe. W tym modelu istnieje możliwość włączenia automatycznego, idealnego pilota oraz stabilizatora kołysań bocznych wodolotu. Przy wyznaczaniu sił hydrodynamicznych na płatach nośnych, ich wspornikach, płetwach stabilizacyjnych i sterach uwzględniono wpływ zanurzenia profili płatów pod powierzchnią wody na pochodną współczynnika siły nośnej, wpływ zmiennej powierzchni płatów, wpływ niestacjonarności oraz wpływ zmniejszenia prędkości i przyspieszeń cząstek wody w fali wraz z głębokością ich zanurzenia. W oparciu o ten model matematyczny, zweryfikowany wynikami badań modelowych, został opracowany program do numerycznych badań zachowania się jednostki w różnych warunkach jej eksploatacji a także do badań wpływu różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu płatów nośnych. Wyniki uzyskuje się w postaci znaczących amplitud pochyłań - kiwań, przechyłań - kołysań bocznych, odchyłań – myszkowania, nurzań oraz kołysań burtowych wodolotu. Na podstawie wykonanych obszernych badań numerycznych wynika kilka uwag o znaczeniu poznawczym i praktycznym. Między innymi obliczenia wykazują korzystny wpływ rufowych stabilizatorów kursowych na amplitudy myszkowania i kołysań burtowych na dwuwymiarowym falowaniu nieregularnym oraz korzystny wpływ na amplitudy wszystkich kołysań poprzecznych na nieregularnej fali trójwymiarowej. Kołysania burtowe oraz myszkowanie wodolotu na wzburzonym morzu można znacznie poprawić poprzez zastosowanie autopilota. Badania numeryczne wykazują, że przy kursach bakstagowych celowym jest użycie stabilizatorów kołysań bocznych oraz autopilota. Jednocześnie, stwierdzono że, wpływ śrub napędowych na znaczące wartości amplitud ruchów wodolotu jest znikomy.



PAWEŁ REGUCKI, HENRYK KUDELA

## MODELOWANIE ZJAWISKA REKONEKCJI PIERŚCIENI WIROWYCH METODĄ CZĄSTEK WIROWYCH

### MODELLING OF VORTEX RINGS RECONNECTION BY VORTICITY PARTICLE METHOD

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, [henryk.kudela@pwr.wroc.pl](mailto:henryk.kudela@pwr.wroc.pl), [pawel.regucki@pwr.wroc.pl](mailto:pawel.regucki@pwr.wroc.pl)

Słowa kluczowe: metoda wirowa, pierścień wirowy, zjawisko rekonekcji

Obserwowane powszechnie w przepływach trójwymiarowych, koherentne struktury wirowe odgrywają fundamentalną rolę zarówno w procesach przejścia jak również w pełni rozwiniętej turbulencji. Pierścień wirowy jest strukturą, którą relatywnie łatwo poddaje się badaniom numerycznym i laboratoryjnym. Prostota geometrii ułatwia prowadzenie obliczeń, a także prowadzenie rozważań teoretycznych. Uważa się jednak, że pierścień wirowy jest jedną z generycznych trójwymiarowych struktur wirowych obserwowanych w przepływach turbulentnych. Zjawiska związane ze wzajemnym oddziaływaniem pierścieni wirowych są jednak silnie nieliniowe i mimo prostej geometrii niezwykle złożone [1].

W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznej zjawiska rekonekcji dwóch pierścieni wirowych. Rekonekcja (zwana również *cut-and-connect* lub *crosslinking*) jest jednym ze spektakularnych zjawisk wirowych zachodzących jedynie w przepływach lepkich. Polega ona na zmianie topologii pola wirowości w wyniku zderzenia dwóch struktur wirowych. Wzajemne oddziaływanie pierścieni prowadzi do powstania obszaru, w którym zachodzi rozłączanie i ponowne przełączanie linii wirowych, skutkiem czego jest powstanie zupełnie nowej struktury. Bogaty materiał doświadczalny jaki można znaleźć w literaturze pozwala na weryfikację obliczeń numerycznych.

Przedstawiona w pracy analiza zjawiska rekonekcji obejmuje nie tylko badanie ewolucji pola wirowości, ale również próbę interpretacji zmian wartości energii kinetycznej i entropii oddziaływających pierścieni. Do modelowania zjawiska wykorzystano trójwymiarową metodę „cząstka wirowa w komórce” [2]. Metoda służy do rozwiązywania równań cieczy lepkiej, wykorzystując tzw. algorytm dekompozycji lepkościowej.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] LIM T.T., NICKELS T.B., *Vortex Rings, Fluid Vortices*, Kluwer Academic Publisher, 1995, 95-153,
- [2] KUDELA H., REGUCKI P., *The Vortex-in-Cell Method for the Study of Three-Dimensional Vortex Structures, Tubes, Sheets and Singularities in Fluid Dynamics*, Vol. 71, *Fluid Mechanics and Its Applications*, Kluwer Academic Publisher, 2002, 49-54,



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



HENRYK KUDELA, PAWEŁ REGUCKI, ZIEMOWIT MALECHA

## ZASTOSOWANIE METODY CZĄSTEK WIROWYCH DO MODELOWANIA ODDZIAŁYWANIA TRÓJWYMIAROWYCH STRUKTUR WIROWYCH ZE ŚCIANKĄ SZTYWNĄ

### APPLICATION OF VORTICITY PARTICLE METHOD FOR MODELING OF INTERACTIONS OF VORTEX STRUCTURES WITH RIGID WALL

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27,  
50-370 Wrocław, [[henryk.kudela](mailto:henryk.kudela@pwr.wroc.pl), [pawel.regucki](mailto:pawel.regucki@pwr.wroc.pl), [ziemowit.malecha](mailto:ziemowit.malecha@pwr.wroc.pl)]

Słowa kluczowe: metoda wirowa, pierścień wirowy, ściana sztywna

Oddziaływanie dużych struktur wirowych w przepływach z dużą liczbą Reynoldsa prowadzi do złożonych i interesujących zjawisk. Dotyczy to zjawiska gwałtownej erupcji wirowości ze ściany w obszar przepływu, powstawanie dynamicznych stref zastoju, rozpadu struktur wirowych i ich regeneracji, zjawiska rekonekcji. Wiąże się to z silnym, nieliniowym charakterem wzajemnego oddziaływania struktur wirowych ze ścianami. Poznanie tych mechanizmów ma fundamentalne znaczenie zarówno dla praktyki jak i badań teoretycznych nad zjawiskami przejścia z ruchu laminarnego w turbulentny, niestabilnością warstwy przyściennej, turbulencji. Ze względu na wirowy charakter wspomnianych zjawisk wydaje się, że numeryczna metoda cząstek wirowych szczególnie dobrze nadaje się do tego typu badań. W pracy podjęto próbę adaptacji metody wirowej typu „cząstka wirowa w komórce” (VIC) do modelowania oddziaływania struktur wirowych w przepływach lepkich w obecności ściany sztywnej. W metodzie VIC ewolucję pola wirowości bada się przez śledzenie położenia cząstek wirowych. Obliczenia prowadzone są w zmiennych Lagrange’a. Aby skrócić czas obliczeń, prędkość cząstek obliczana jest przy pomocy metod z użyciem siatki numerycznej i interpolację wartości prędkości z oczek siatki na położenia wirów. W pracy przedstawiono obliczenia ruchu pojedynczego pierścienia w kierunku prostopadłym do ściany. Gdy pierścień wirowy zbliża się do ściany indukuje powierzchnię wirową, która odrywa się od ściany i gwałtownie narasta. Wąski strumień wirowości „wstrzykuje się” w obszar przepływu. Obliczenia z użyciem cząstek wirowych niosą komplikację wynikającą, z faktu, że nie jest znana wartość wirowości na ścianie. Nadrzędnym warunkiem brzegowym jest znikanie składowej stycznej pola prędkości. Warunek ten zastępowany jest albo generacją wirowości na ścianie (warunek Dirichleta) albo też odpowiednio skonstruowany strumień wirowości. W pracy zostaną przedstawione oba sposoby generacji wirowości i ich wpływ na zachowanie się pierścienia wirowego w pobliżu ściany.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



HENRYK KUDELA, ZIEMOWIT MALECHA

## BADANIE ERUPCJI WARSTWY WIROWEJ METODĄ CZĄSTEK WIROWYCH

### STUDY OF THE ERUPTION OF VORTEX LAYER BY VORTEX-IN-CELL METHOD

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27,  
50-370 Wrocław, [henryk.kudela@pwr.wroc.pl](mailto:henryk.kudela@pwr.wroc.pl), [ziemowit.malecha@pwr.wroc.pl](mailto:ziemowit.malecha@pwr.wroc.pl)

Słowa kluczowe: erupcja, warstwa przyścienna, separacja

Skoncentrowana struktura wirowa unoszona w przepływie lepkiem wzdłuż ściany sztywnej wywołuje nagłe wyrzucenie, z obszaru ściany do przepływu, wąskiej strugi wirowości. Ta zlokalizowana, gwałtowna erupcja wirowości ze ściany w obszar przepływu nazywana jest również separacją warstwy przyściennej. W tradycyjnym opisie zagadnienia separacji warstwy przyściennej mówi się, że spowodowana jest ona wystąpieniem wstecznego gradientu ciśnienia. Mimo jednak faktu, że przy przejściu struktury wirowej w pobliżu ściany również powstaje obszar wstecznego gradientu ciśnienia, to jednak wydaje się, że mechanizm separacji warstwy wirowej powodowany jest mechanizmem kumulowania się wirowości na ścianie. Lepkość cieczy wymusza zerową prędkość styczną na ścianie i przez to generację wirowości. Zjawisko erupcji wirowości ma olbrzymie znaczenie w praktyce. Wstępuje na łopatkach turbin inicjując gwałtowne stany przejściowe w przepływie, w aerodynamice samolotów, w procesach mieszania i wymiany ciepła. Dlatego poznanie mechanizmów powstawania erupcji ma znaczenie podstawowe. W pracy przeprowadzono badania nad zjawiskiem erupcji warstwy wirowej wywołanej przejściem wiru o skończonym niewielkim nośniku nad płaską ścianą. Do badań wykorzystano dwu wymiarową metodę cząstek wirowych typu „cząstka wirowa w komórce”. Obliczenia prowadzone są w zmiennych Lagrange’a. Pole prędkości cząstek wyznaczane jest metodą siatkową poprzez rozwiązywanie równania Poissona na funkcję prądu, a wartości prędkości z węzłów siatki są interpolowane na położenia cząstek wirowych. Pozwala to znacząco skrócić czas obliczeń, a także użycie w obliczeniach dużej liczby cząstek ( $N = 50000$ ). Metoda wyjątkowo dobrze nadaje się do badania erupcji warstwy, ze względu na możliwość bezpośredniego śledzenia czasu i miejsca wystąpienia erupcji, kształtu i ewolucji wyrzucanej do przepływu porcji wirowości. Dokonano analizy pól prędkości, linii prądu, rozkładu energii i wirowości. Badania potwierdzają, że erupcja wywołana jest efektem lepkości, który wymusza zerową prędkość na ścianie i generacją wirowości. Prowadzi to do kumulacji wirowości i erupcji. Erupcja warstwy wirowej zachodzi jednak dla małej lepkości płynu (dużej liczbie Reynoldsa).

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



HENRYK KUDELA, ZIEMOWIT MALECHA

## MODELOWANIE DWU WYMIAROWYCH PRZEPŁYWÓW W OBSZARACH O ZŁOŻONEJ GEOMETRII METODĄ CZĄSTEK WIROWYCH

### MODELING OF 2D FLOW IN COMPLEX GEOMETRY BY VORTEX PARTICLE METHOD

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27,  
50-370 Wrocław, [henryk.kudela@pwr.wroc.pl](mailto:henryk.kudela@pwr.wroc.pl), [ziemowit.malecha@pwr.wroc.pl](mailto:ziemowit.malecha@pwr.wroc.pl)

Słowa kluczowe: metoda wirowa, przepływ dwu wymiarowy

Metody cząstek wirowych nazywane również metodami dyskretnych wirów stanowią od wielu lat atrakcyjne narzędzie badawcze uczonych zajmujących się modelowaniem zjawisk hydrodynamicznych. Jednak zastosowania tych metod przeważnie sprowadzają się do zagadnień bardzo szczególnych np. przepływów nielepkich lub też prostych geometrii przepływów. Wśród metod wirowych na szczególną uwagę zasługuje, metoda nazywana metodą cząstki wirowej w komórce (VIC). Jest ona kilka rzędów wielkości razy szybsza, przy tej samej liczbie cząstek wirowych biorących udział w obliczeniach, od metody bezpośredniej opartej na prawie Biota–Savarta. W metodzie VIC pole wirowości wyznacza się śledząc położenia cząstek wirowych. Pole prędkości pozwalające przemieszczać cząstki, wyznacza się na siatce numerycznej i interpoluje jej wartości na położenia cząstek. Pole prędkości wyznacza się z funkcji prądu, którą otrzymuje się przez rozwiązanie równania Poissona. Skuteczność obliczeń zależy od efektywnego rozwiązywania równania Poissona, ponieważ musi ono być rozwiązywane w każdym korku czasowym. Najczęściej wykorzystane są algorytmy szybkiego (dokładnego) rozwiązywania układów równań powstałych po dyskretyzacji równania Poissona. Niestety takie szybkie algorytmy nadają się do rozwiązywania w obszarach o prostej geometrii np. prostokąt lub koło. Istotnym elementem składowym obliczeń w metodzie VIC jest również redystrybucja cyrkulacji cząstek na węzły siatki. W prostych geometriach oczka siatki są kwadratami i w powszechnym użyciu do redystrybucji jest wykorzystywana metoda ważonych objętości lub B-funkcji. W pracy przedstawiono badania nad wykorzystaniem w metodzie VIC siatki niestrukturalnej (oczka siatki są trójkąty lub czworokąty). Pozwala to na dokładniejsze pokrycie siatką numeryczną złożonych geometrii wykorzystując do tego podprogramy do generowania siatek numerycznych i rozwiązywania równania Poissona na takich siatkach. Opracowano i sprawdzono kilka algorytmów redystrybucji cyrkulacji cząstek na oczka siatki w nieregularnych komórkach. Obliczenia testowe przeprowadzono dla opływu walca i profilu lotniczego z różnymi kątami natarcia.



ZBIGNIEW KRÓLICKI, RAFAŁ FLOREK, BOGUSŁAW BIAŁKO

## MODEL MATEMATYCZNY PRZEPŁYWU MIESZANINY ZEOTROPOWEJ ZIĘBNIKÓW W WARUNKACH METASTABILNYCH

### THE MATHEMATICAL MODEL OF REFRIGERANTS ZEOTROPIC MIXTURE FLOW IN THE METASTABLE CONDITIONS

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27,  
50-370 Wrocław, [zbigniew.krolicki@pwr.wroc.pl](mailto:zbigniew.krolicki@pwr.wroc.pl), [rafal.florek@pwr.wroc.pl](mailto:rafal.florek@pwr.wroc.pl), [boguslaw.bialko@pwr.wroc.pl](mailto:boguslaw.bialko@pwr.wroc.pl)

Słowa kluczowe: przepływ dwufazowy, mieszanina zeotropowa, metastabilność

Zjawisko występowania stref przepływu metastabilnego w procesie dławienia ziębników wewnątrz kapilarnych elementów dławiących, zauważone i potwierdzone eksperymentalnie [Mikol & Dudley, Kuipers & Janssen, Koizumi & Yokohama], traktowane było dotychczas marginalnie zarówno przez praktyków, jak i przez teoretyków. Również podjęte próby opisu tego zjawiska wynikały głównie z prowadzonych badań [Chen i in.], nie zaś z analizy teoretycznej i stosownych prac modelowych. W literaturze brak jest wyjaśnienia przyczyn powstawania czy też potwierdzenia istotności wpływu metastabilności przepływu na funkcjonowanie kapilarnego elementu dławiącego.

W pracy omówiono szczegółowo warunki powstawania przepływu metastabilnego, pojawiającego się przy znacznych spadkach ciśnienia, przedstawiono i porównano dwa odrębne modele matematyczne. Pierwszy stanowi model procesu dławienia dwufazowego ziębnika przebiegający w warunkach termodynamicznej i mechanicznej równowagi, drugi zaś uwzględnia występowanie zjawiska przepływu metastabilnego.

W matematycznym opisie procesu dławienia dwufazowej mieszaniny zeotropowej wykorzystano dwa podstawowe modele struktury przepływu: model homogeniczny i model pęcherzykowy. Modele te zaadaptowano do opisu wieloskładnikowych przepływów dwufazowych – proces dławienia zeotropowych mieszanin ziębników – przez wprowadzenie dodatkowego równania zachowania i tego składnika substancji oraz modelu matematycznego własności mieszanin.

Do modelu matematycznego z metastabilnością przepływu zaproponowano wykorzystanie pojęcia relaksacji i matematycznego opisu czasu relaksacji, które z powodzeniem wykorzystane było m.in. do opisu procesu gwałtownego obniżania ciśnienia wody [Bilicki i in.].

W rozwiązaniu obu modeli wykorzystana była metoda całkowania numerycznego, przy czym zastosowano metodę o zmiennej wartości kroku całkowania.

Rozwiązanie przeprowadzono dla mieszaniny zeotropowej ziębników naturalnych (propan-izobutan) niedestrukcyjnych dla ozonu.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: MECHANIKA PŁYNÓW WIELOFAZOWYCH



ZBIGNIEW KRÓLICKI, RAFAŁ FLOREK, BOGUSŁAW BIAŁKO

## OSOBLIWOŚCI PRZEPŁYWÓW DWUFAZOWYCH MIESZANIN ZEOTROPOWYCH ZIĘBNIKÓW ZE ZNACZNYM SPADKIEM CIŚNIENIA PHENOMENA OF REFRIGERANTS ZEOTROPIC MIXTURE FLOW WITH THE HIGH GRADIENT PRESSURE DROP

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27,  
50-370 Wrocław, [zbigniew.krolicki@pwr.wroc.pl](mailto:zbigniew.krolicki@pwr.wroc.pl), [rafal.florek@pwr.wroc.pl](mailto:rafal.florek@pwr.wroc.pl), [boguslaw.bialko@pwr.wroc.pl](mailto:boguslaw.bialko@pwr.wroc.pl)

Słowa kluczowe: dławienie, przepływ dwufazowy, mieszanina zeotropowa

W technice chłodniczej szczególnego znaczenia nabierają dwufazowe procesy przepływowe czynników roboczych (ziębników), odbywające się ze znacznym spadkiem ciśnienia – dławienie.

Dławienie ziębnika wewnątrz elementu kapilarnego jest procesem specyficznym, wyraźnie różniącym się od wielu procesów opisywanych w literaturze teorii przepływów dwufazowych. Rzeczywisty proces dławienia charakteryzuje się m.in.: możliwością wystąpienia parametrów krytycznych, zmiennokierunkową diabatycznością procesu, możliwością wystąpienia warunków przepływu metastabilnego. Proces przepływowy dwufazowego (ciecz-para) czynnika odbywa się przy zmiennym, wzrastającym udziale pary, przy czym proces wrzenia ziębnika przebiega nie wskutek dopływu ciepła, lecz w wyniku obniżania ciśnienia (tzw. parowanie rozprężne).

Modelowanie i dobór kapilarnego elementu dławiącego wynika obecnie bardziej z doświadczenia producentów urządzeń ziębniczych, niż ze szczegółowych analiz teoretycznych. Zdobyta wiedza i doświadczenie dotyczy jednak wycofywanych ziębników z grup CFC i HCFC oraz – co istotne z punktu widzenia pracy sprężarki – współpracujących z nimi olejów mineralnych.

Szczegółowej analizy wymaga zastosowanie w nowo projektowanych instalacjach ziębniczych, tzw. zamienników, np. substancji pochodzenia naturalnego a w szczególności ich zeotropowych mieszanin. Okazuje się, że wykorzystanie mieszanin zeotropowych w systemach ziębienia powoduje pojawienie się zjawiska nieizotermiczności przemian fazowych (poślizg temperaturowy) i realizację obiegu Lorenza a nie obiegu Carnota. Uwypukla to dodatkowo wszystkie osobliwości procesu dławienia i wpływa na zmniejszenie spadku ciśnienia ziębnika wewnątrz rurki kapilarnej, zmianę przepustowości kapilarnego elementu dławiącego, zmniejszenie stopnia suchości dwufazowej mieszaniny na wylocie z kapilary, wzrost temperatury ziębnika opuszczającego rurkę kapilarną.

W pracy przedstawiono model matematyczny procesu dławienia dwufazowej, dwuskładnikowej mieszaniny azeotropowej z uwzględnieniem wszystkich osobliwości przepływu, a na podstawie uzyskanych charakterystyk analizę ich wpływu na parametry procesu dławienia.



JAROSŁAW FRĄCZAK

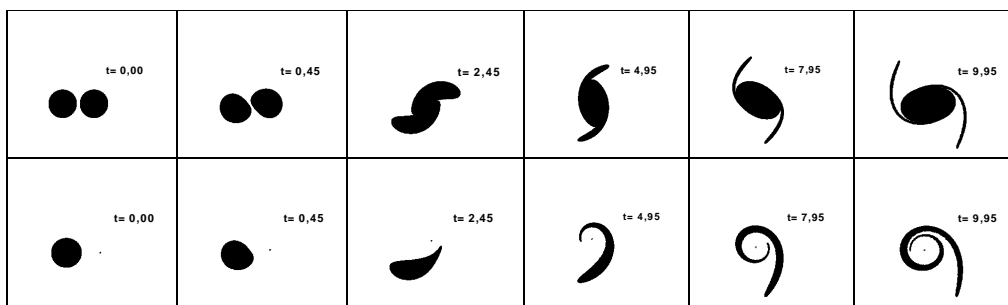
## SYMULACJA DWUWYMIAROWYCH ODDZIAŁYWAŃ PARY WIRÓW METODĄ DYSKRETNYCH WIRÓW

### SIMULATION OF TWO-DIMENSIONAL INTERACTIONS OF VORTEX PAIR BY A DISCRETE VORTEX METHOD

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego, Polskiej Akademii Nauk,  
 ul. J. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, [jfrk@imp.gda.pl](mailto:jfrk@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: metoda dyskretnych wirów, symulacje numeryczne, dynamika wirów

Dwuwymiarowe oddziaływania pary wirów o zgodnym kierunku rotacji w płynie nieściśliwym symulowano numerycznie metodą dyskretnych wirów. Efekt lepkości płynu uwzględniono metodą prędkości dyfuzyjnej. Ewolucję pary wirów o kołowych rdzeniach obliczano dla przypadków symetrycznego i asymetrycznego, w celu ustalenia wpływ parametrów wirów na przebieg procesu ich wzajemnych oddziaływań. Eksperymenty numeryczne obejmowały symulacje dla identycznych wirów oraz dla wirów różniących się natężeniem i/lub promieniem w płynie lepkim i nielepkim przy czym wykorzystywano różne rozkłady wirowości. Uzyskane rezultaty demonstrują istotny wpływ asymetrii na proces łączenia wirów. Wyniki dla przypadku symetrycznych wirów zgodne są ze znanymi rezultatami wcześniejszych badań doświadczalnych i numerycznych wskazujących na wpływ odległości wirów na proces łączenia, któremu towarzyszy formowanie ramion i początkowo eliptycznego kształtu rdzenia powstającej struktury wirowej. W przypadku silnej asymetrii wyniki symulacji uwiadcniają nieco słabiej rozpoznane cechy przebiegu procesu łączenia wirów, polegające m.in. na deformacji i nawijaniu wiru o większym promieniu na intensywny, skupiony wir przy jego równoczesnym przesuwaniu się w kierunku środka układu.



Rys. 1. Oddziaływania pomiędzy dwoma wirami o równym natężeniu, w przypadku wirów o jednakowych i skrajnie różnych rozmiarach – płyn nielepki.



ANDRZEJ WITKOWSKI, MIROSŁAW MAJKUT, JACEK ŻUKOWSKI

## WIELOASPEKTOWE BADANIA DOŚWIADCZALNE I NUMERYCZNE, STRUKTURY PRZEPŁYWU W OSIOWYM STOPNIU SPRĘŻAJĄCYM

### MULTI-ASPECT EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS OF THE UNSTEADY FLOW IN AXIAL-FLOW COMPRESSOR STAGE

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Konarskiego 18,  
44-100 Gliwice, [andrzej.witkowski@polsl.pl](mailto:andrzej.witkowski@polsl.pl), [mirosław.majkut@polsl.pl](mailto:mirosław.majkut@polsl.pl), [jacek.zukowski@polsl.pl](mailto:jacek.zukowski@polsl.pl)

Słowa kluczowe: struktura przepływu, niestacjonarność, osiowy stopień sprężający

Praca przedstawia wyniki wieloletnich badań eksperymentalnych i numerycznych, struktury przepływu w osiowym niskoobrotowym stopniu sprężającym, służącym jako model doświadczalny.

W części eksperymentalnej posłużono się trzema, działającymi na całkowicie odmiennych zasadach systemami pomiarowymi:

- z zastosowaniem sond aerodynamicznych do badań przepływu uśrednionego oraz dwóch systemów pomiarowych, umożliwiających zsynchronizowane z kątowym położeniem koła wirnikowego próbkowanie nieustalonego pola prędkości,
- kontaktowego, z wykorzystaniem stałotemperaturowych termooanemometrycznych sond z trójdzielną folią (TSFP),
- bezkontaktowego, z wykorzystaniem trójwymiarowego dopplerowskiego anemometru laserowego (LDA).

Za pomocą wymienionych systemów pomiarowych zrealizowane zostały następujące cele badawcze:

- krytyczne porównanie wyników badań przepływu przy zastosowaniu trzech, pracujących na całkowicie różnych zasadach systemów pomiarowych, w różnych warunkach przepływu,
- analizę wpływu punktu pracy na strukturę przepływu,
- rozpoznanie procesu zanikania śladów poza łopatkowych oraz wzajemnego oddziaływania wirujących i statowych wieńców łopatkowych.

Wyniki badań eksperymentalnych stanowiły również podstawę weryfikacji wyników obliczeń numerycznych rozwiązujących uśrednione po czasie równania Naviera-Stokesa, uzupełnione o algebraiczne i naprężeniowe modele turbulencji.

Porównanie obliczeń numerycznych z wynikami badań doświadczalnych wykazało zadowalającą zgodność wyników zarówno struktury przepływu jak i charakterystyk aerodynamicznych badanego koła wirnikowego.

PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: **HYDROMECHANIKA OKRĘTU**



TADEUSZ KORONOWICZ

## WPŁYW PRACY ŚRUBY NAPĘDOWEJ NA POLE PRĘDKOŚCI WOKÓŁ KADŁUBA STATKU

### THE INFLUENCE OF SCREW PROPELLER ON THE VELOCITY FIELD AROUND THE HULL OF A SHIP

Instytut Maszyn Przepływowych PAN, ul. J. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk, [ttk@imp.gda.pl](mailto:ttk@imp.gda.pl)

Słowa kluczowe: hydromechanika okrętowa, prawo Biota-Savarta

Znaczącymi elementami Komputerowego Basenu Modelowego (KMB) są programy wyznaczające zmiany oporu kadłuba statku wywołaną ssącym działaniem pędnika oraz programy uwzględniającymi wpływ pracy pędnika na pole prędkości w strumieniu zakadłubowy. Pierwsze obliczenia KMB wykazały ogólnie biorąc poprawne wyniki oprócz rażąco błędnych wartości obliczonej siły ssącej na kadłubie. Znając, wcześniej zweryfikowane pole prędkości indukowanych wokół śruby napędowej w przestrzeni bez kadłuba statku, wysunięto **hipotezę roboczą** odnośnie sposobu obliczania pola prędkości indukowanych przez układy wirowe reprezentujące śrubę napędową i strumień śrubowy przy obecności kadłuba statku. Zmodyfikowano sposób wyznaczania danych wejściowych do wzoru i uzyskano zdecydowanie lepsze wyniki obliczeń (weryfikację wykonano w oparciu o bardzo bogaty materiał doświadczalny). Weryfikacja dotyczyła tylko wielkości siły ssącej, dlatego też zdecydowano się na badania eksperymentalne z pomiarem prędkości.

Badania eksperymentalne w pełni potwierdziły postawioną hipotezę:

- **obliczenia wokół kadłuba statku prędkości indukowanych przez układy wirowe reprezentujące śrubę napędową i strumień śrubowy, wymagają modyfikacji wzoru Biota-Savarta.**

W podręcznikach hydromechaniki i w literaturze przedmiotu brak wzmianki na ten temat. W KMB zaproponowano inżynierski, ale skuteczny sposób modyfikacji danych wejściowych do wzoru Biota-Savarta. Do wyznaczenia prawidłowego wzoru w przestrzeni wielospójnej **konieczne są dalsze prace teoretyczne związane z tym problemem.**



PEŁNY TEKST ARTYKUŁU ZOSTAŁ OPUBLIKOWANY W:  
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA 24, 200–500 (2004)\*  
TEMATYKA: METODY KOMPUTEROWE MECHANIKI PŁYNÓW



ANDRZEJ FRĄCKOWIAK

## ROZWIĄZANIE DWUWYMIAROWEGO RÓWNANIA NAVIERA-STOKESA WE WSPÓŁRZĘDNYCH ZESPOLONYCH

### SOLUTION OF TWO-DIMENSIONAL NAVIER-STOKES EQUATION IN COMPLEX COORDINATES

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Katedra Techniki Ciepłej, Piotrowo 3,  
60-965 Poznań, Andrzej.Frackowiak@put.poznan.pl

Słowa kluczowe: równanie Naviera-Stokesa, funkcje zespolone

W pracy przedstawione zostało równanie Naviera-Stokesa dla obszarów płaskich we współrzędnych zespolonych. Okazuje się, że taka postać równania pozwala na nowo spojrzeć na konstrukcję jego rozwiązań. Używając zmiennych zespolonych, można równanie przekształcać za pomocą całki nieoznaczonej (względem zmiennej zespolonej), co umożliwia otrzymanie innych postaci rozwiązań równania Naviera-Stokesa. Pokazany w pracy schemat postępowania dla przypadku stacjonarnego, stanowi najprostszy przykład takiego rozwiązania. Przedstawione również zostały własności funkcji bazowych związane z tym rozwiązaniem oraz obliczenia dla przepływu płynu nieściśliwego w zagłębieniu prostokątnym.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że podstawowy problem to zbyt duży czas wyznaczania wartości funkcji bazowych. Wartości te nie zmieniały się w kolejnym kroku iteracji. W tym przypadku czas wyznaczenia tych wartości wynosił około 20 godzin. Ponadto postać funkcji bazowych wymuszała kształt prostokątny elementu siatki (prostokąty nie musiały być jednakowej wielkości), co w przypadku obszarów o skomplikowanej geometrii jest niewygodne. W związku z tym należy zmienić postać funkcji bazowych, tak aby można było stosowanie siatek o dowolnym kształcie oraz aby czas obliczeń funkcji bazowych był jak najkrótszy. Te dwa czynniki wyznaczają kierunek dalszych badań.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] CIAŁKOWSKI M.J., FRĄCKOWIAK A., KOŁODZIEJ J.A., *Investigation of laminar flow through solution of inverse problem for heat conduction equation*, Mechanics Research Communications, 2001, Vol. 28, 6. 623-628.
- [2] GHIA U., GHIA K.N., SHIN C.T., *High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method*, Journ. Comp. Phys., 1982, 48, 387-411.
- [3] KOSMA Z., *Wyznaczanie laminarnych przepływów cieczy lepkiej*, Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 1999.
- [4] PROSNAK W.J., *Mechanika Płynów*, PWN 1988, t.1.