

**O2**

**Zagadnienia termomechaniki płynów**

**Problems of Thermomechanics of Fluid**



**02/Z1 Zagadnienia termomechaniki, eksploatacji i diagnostyki cieplno-przepływowej turbin**

Prace wykonywane w 2006 roku stanowiły kontynuację tematów podjętych w latach ubiegłych i skupiały się na dwóch zasadniczych kierunkach:

- obliczenia numeryczne przepływu lepkiego gazu przez maszyny wirnikowe;
- diagnostyka cieplno-przepływowa turbin.

Główny nurt badań związany był z obliczeniami numerycznymi przepływu gazu w zastosowaniu dla turbin parowych. Te prace dotyczyły zarówno obliczeń w układzie stacjonarnym jak i niestacjonarnym. Swoiste podsumowanie obliczeń stacjonarnych zawarto w przygotowanej pracy habilitacyjnej, gdzie m.in. przedstawiono dyskusję modelu matematycznego przepływu w turbinie i jego realizacji numerycznej oraz ocenę jakości otrzymanych rozwiązań przepływu w oparciu o dostępny materiał eksperymentalny. Ponadto omówiono główne źródła strat przepływu w układach łopatkowych turbin, określono możliwości podniesienia sprawności przepływowej stopni turbinowych poprzez modyfikacje geometryczne kanałów łopatkowych oraz przeanalizowano aerodynamikę układów łopatkowych pracujących w warunkach zmiennego obciążenia.

W dziedzinie przepływów niestacjonarnych kontynuowano numeryczne

**02/Z1 Problems of thermomechanics, operation and thermal hydraulic diagnostics of turbines**

*Activities carried out in 2005 formed a continuation of topics commenced in recent years and focused on two principal directions:*

- *numerical calculations of viscous gas flows through rotating machinery;*
- *thermal hydraulic diagnostics of turbines.*

*The main stream of investigations was related to numerical calculations of gas flow in application to steam turbines. These works were related both to calculations under steady state and transient conditions. A some sort of a summary of calculations of steady state calculations has been contained in preparation of habilitational dissertation where, amongst the others, presented has been discussion of mathematical model of the flow in turbine together with numerical realization and assessment of the quality of obtained results of the flow in relation to available experimental evidence. Additionally discussed were major sources of flow losses in blading systems of turbines, determined were possibilities of increase of hydraulic efficiency of turbine stages by geometrical modification of blade channels and analysed was aerodynamics of blading systems operating under conditions of variable load.*

badania efektów wynikających z oddziaływania śladów kierowniczych z wieńcem wirnikowym. Badania te koncentrowały się na próbach ilościowego wyznaczenia strat związanych z tym zjawiskiem. Podkreślić należy, iż ten aspekt zagadnienia niezwykle rzadko był przedmiotem badań w ośrodkach naukowo-badawczych na świecie. Wyniki analizy strat nieszacjonarnych generowanych wskutek oddziaływania kierownica-wirnik w stopniu turbinowym mają formę analitycznej formuły uzależniającej poziom tych strat od szerokości szczeliny międzywieńcowej pomiędzy kierownicą a wirnikiem.

Inne prace dotyczące zastosowania techniki numerycznej CFD w projektowaniu maszyn wirnikowych dotyczyły zagadnienia regulacji adaptacyjnej części niskoprężnej turbin w warunkach kogeneracji energii elektrycznej i ciepła. Przedstawiono korzyści wynikające z zastosowania regulacji opartej o stopień regulacyjny z obracanymi łopatkami kierowniczymi. Polegają one na zapewnieniu okólnominalnych warunków pracy dla stopnia adaptacyjnego (jak również dla stopnia położonych w dół przepływu) oraz na uniknięciu ekspansji pozałopatkowych i optymalnym wykorzystaniu dostępnego spadku ciśnienia. Prowadzono również prace związane z zagadnieniem optymalizacji sprawnościowej kształtu przestrzennego układów łopatkowych turbin w odniesieniu do pojedynczego stopnia turbinowego dla zadanego obciążenia nominalnego

*In the area of non-stationary flows continued have been numerical investigations of the effects resulting from interaction of guide vane wakes and rotor blade rim. These investigations were concentrated on attempts of quantitative determination of losses related to that phenomenon. It ought to be stressed that this aspect of the problem extremely rarely was a topic of investigations in research centres across the world. The results of analysis of non-stationary losses generated due to guide vane – rotor interaction in the turbine stage have a form of analytical formula relating the level of these losses to the depth of inter-rim clearance between the guide vane and rotor.*

*Other works regarding application of numerical CFD technique in design of rotating machinery related the problem of adaptive control of low pressure part of a turbine under conditions of cogeneration of electricity and heat. Presented have been benefits stemming from application of the control based on a regulation stage with adjustable guide vanes. These are based on assurance of near nominal conditions of operation for the adaptive stage (as well as for stages located downstream) and refraining from expansion beyond the blades and optimal utilization of available pressure drop. Carried out were also works related to efficiency optimization of spatial shape of blading systems with respect to a single turbine stage for a given nominal load (one-point optimization) and a given range of load (multi-point optimization).*

(optymalizacja jednopunktowa) oraz dla zadanego zakresu obciążeń (optymalizacja wielopunktowa).

Prace w dziedzinie diagnostyki w 2006 roku dotyczyły teoretycznych analiz opracowanej w Zakładzie ciepłoprzepływowej diagnostyki off-line dla obiegów cieplnych turbin parowych, łącznie z prognozowaniem remontu aparatów. Ponadto szczegółowo wyjaśniono metodykę ocen degradacji niektórych obiektów energetycznych.

### **O2/Z2 Przepływy pod- i nad- dźwiękowe z silnymi oddziaływaniami**

Badania prowadzone w ramach działalności naukowej obejmowały następujące zasadnicze kierunki:

- wymiana ciepła przy chłodzeniu ścianki ograniczającej palisadę kierowniczą turbiny gazowej,
- przeciwdziałanie oderwaniu na podciśnieniowej stronie łopatki turbinowej przez zastosowanie generatorów strumieniowych,
- analiza i implementacja modelu przepływu przez perforowane ścianki,
- wpływ efektów mikroprzepływowych na charakterystykę perforowanych ścian,
- pomiary wirów wzdłużnych generowanych przez skośną strugę,
- wdrożenie metody pomiaru ciśnienia przy pomocy farby (PSP),
- wdrożenie metody SPECKLE umożliwiającej ilościowy pomiar gradientów gęstości w przepływie,

*The works in the area of diagnostics in 2006 regarded theoretical analyses of developed in the department thermal hydraulic off-line diagnostics for thermal cycles of steam turbines together with scheduling the overhauls of apparatus. Additionally in detail explained has been the methodology of degradation assessment of selected energy conversion objects.*

### **O2/Z2 Sub- and supersonic flows with strong interactions**

*Investigations carried out in the frame of statute activity encompassed the following principal directions:*

- *heat transfer during cooling of a wall separating the guide palisade of gas turbine,*
- *counteraction of separation on the subpressure side of turbine blade by application of ejector generators,*
- *analysis and implementation of flow model through perforated walls,*
- *influence of microflow effects on the characteristics of perforated walls,*
- *measurements of axial vortices generated by a skewed jet,*
- *implementation of pressure measurement method by means of a pressure sensitive paint (PSP),*

- oprogramowanie metody skończonego prążka do pomiarów interferometrycznych rozkładu gęstości w przepływie,
- wdrożenie automatycznej generacji siatek obliczeniowych typu „Chimera” do symulacji opływu modelu samolotu w Europejskim Tunelu Transonicznym (ETW).
- zaprojektowanie i zbudowanie komór pomiarowych do pomiarów redukcji oderwania wywołanego falą uderzeniową przy pomocy strumieniowych generatorów wirów.
- *implementation of the SPECKLE method enabling quantitative measurement of density gradients in the flow,*
- *coding of a method of finite fringe for interferometric measurements of density distribution in the flow,*
- *implementation of automatic generation of calculation meshes of “Chimera” type for simulation of a flow around a model of a plane in European Transonic Tunnel (ETW),*
- *design and development of measurement chambers for measurements of reduction of separation induced by the shock wave by means of ejector generation of vortices.*

Istotnym elementem prac badawczych było kontynuowanie trzech projektów europejskich. Do prac związanych z tymi projektami należała numeryczna symulacja przepływu z uwzględnieniem procesu odparowania kropel paliwa. Badano także wpływ kształtu zamocowania połowkowego modelu samolotu na wyniki pomiarów w Europejskim Tunelu Transonicznym. Ponadto kontynuowano projekt dotyczący chłodzenia łopatek turbin gazowych. Jednym z nowych tematów jest tutaj tzw. ‘effusive cooling’, w którym stosuje się bardzo małe otworki, o średnicy 0,07 mm. Przedmiotem badań są tu efekty mikroprzepływowe oraz analiza możliwości przeciwdziałania oderwaniu na podciśnieniowej stronie łopatki.

Kontynuowano również prace nad zastosowaniem wirów wzdłużnych do kontrolowania oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną. Wiry te generowane są przez odpowiednio

*An important element of research activities was continuation of three European projects. Activities related to these projects encompassed numerical simulation of flows with account of a process of fuel droplets evaporation. Investigated also was the influence of a fixing of a half-span aircraft model on the results of measurements in the European Transonic Tunnel. Additionally continued was a project related to cooling of gas turbine blades. One of the new topics here is so called “effusive cooling”, where very small holes are applied, with a diameter of 0.07 mm. The merit of investigations are here microflow effects together with analysis of possibilities of counteraction to separation on the subpressure part of a blade.*

wprowadzone strugi powietrza. Prowadzone są też badania drgań płytki pod działaniem niestacjonarnych sił aerodynamicznych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu sztywności płytki na ich charakter.

### **O2/Z3 Modelowanie procesów proekologicznego spalania w urządzeniach energetycznych**

Prace prowadzone w Zakładzie 3 mają na celu modelowanie numeryczne nierozpoznanych zjawisk towarzyszących zrównoważonym technologiom energetycznym, charakteryzujących się m.in. brakiem emisji CO<sub>2</sub>, wykorzystaniem paliw odnawialnych lub ogniwo paliwowych. Badania koncentrują się w trzech podtematach:

- modelowanie proekologicznego i elektrochemicznego spalania gazów,
- spalanie w kotłach pyłowych, olejowych i fluidalnych,
- zasady zrównoważonej konwersji energii ze szczególnym uwzględnieniem energii chemicznej.

W ramach pierwszej grupy tematycznej kontynuowano badania nad modelowaniem matematycznym elektrochemicznej reakcji spalania wodoru powstałego w procesie reformingu paliwa w tlenkowym ogniwo paliwowym (SOFC) typu rurkowego. Zaproponowano model matematyczny reakcji elektrochemicznej i zaimplementowano go (po raz pierwszy w Polsce) do kodu Fluent. Uzupełniono

*Continued were also works on application of axial vortices in control of interaction of a shock wave with a boundary layer. These vortices are generated by specially introduced air jets. Continued also are investigations of vibration of a plate under a thrust of non-stationary aerodynamical forces with a particular account of the influence of plate stiffness on their character.*

### **O2/Z3 Modelling of proecological processes of combustion in energy conversion devices**

*Activities carried out in Department 3 are aimed at numerical modeling of non recognized phenomena accompanying sustainable energy conversion technologies, characterized by lack of CO<sub>2</sub> emissions, utilization of renewable fuels or fuel cells. Investigations are concentrated in three subtopics:*

- *modelling of proecological and electrochemical gas combustion,*
- *combustion in pulverised coal, oil and fluidic boilers,*
- *principles of sustainable energy conversion with particular focus on chemical energy.*

*In the frame of the first topic group continued were investigations on mathematical modelling of electrochemical combustion reaction of hydrogen formed during fuel reforming in the solid oxide fuel cell (SOFC) of the tubular type. Proposed has been a mathematical model of electrochemical reaction which has been implemented*

również modelowanie reakcji chemicznych w ogniwie o spalaniu elektrochemiczne CO, reforming metanu oraz reakcję gazu wodnego. Wykonano także prace podstawowe nad implementacją różnych modeli spalania nafty lotniczej w warunkach przepływów turbulentnych i złożonej wymiany ciepła.

Prace z drugiej grupy tematycznej dotyczyły numerycznego modelowaniem emisji  $\text{NO}_x$ , pyłów i sadzy w trakcie spalania pyłu węglowego. Zrealizowano obliczenia kotła wodnego opalanego węglem w celu oszacowania poziomu emisji pyłów węglowych w spalinach. We współpracy z przemysłem energetycznym rozwijano także własny model korozji naprężeniowej, kalibrując go do opisu tego rodzaju korozji naprężeniowej występującej w wyniku współspalania pyłu węglowego i mokrej biomasy (zmarzniętych trocin).

W roku 2006 kontynuowano szereg prac studialnych dotyczących miar zrównoważonej konwersji energii, regeneracji egzergii, odzysku energii odpadowej, trójgeneracji oraz modelowania matematycznego ziębiarek bromowo-litowych. Praktycznym aspektem prowadzonych prac jest analiza energetyczno-egzergetyczna projektów modernizacji sieci ciepłowniczej miasta Słupsk, konwersji ciepłowni w Ustce oraz dociążania cieci ciepłowniczej we Władysławowie.

Nowym tematem badawczym jest modelowanie osiągow ogniw paliwowego SOFC. Skoncentrowano się na wysokotemperaturowym i wysokociś-

*(for the first time in Poland) into the FLUENT code. Modelling of chemical reactions in the cell has also been supplemented for electrochemical combustion of CO, methane reforming and aqueous gas reaction. Carried out were also fundamental works on implementation of different models of combustion of kerosene under conditions of turbulent and complex heat transfer.*

*The works from the second thematic group regarded numerical modelling of  $\text{NO}_x$  emissions and soot during combustion of pulverised coal. Completed were calculations of a coal fired water boiler with the view to estimate the level of emissions of coal dust in flue gases. In cooperation with the power industry developed also was in-house model of stress corrosion which was calibrated to description of that type of stress corrosion occurring as a result of co-combustion of pulverized coal and wet biomass (frozen saw dust).*

*In 2006 continued were a series of study activities regarding measures of sustainable energy conversion, exergy regeneration, recovery of waste energy, trigeneration and mathematical modeling of bromium-lithium chillers. A practical aspect of carried out activities is energy and exergy analysis of modernization projects of district heating network in Słupsk, conversion of thermal plant in Ustka and loading of district heating network in Władysławowo.*

*A new research topic is modelling of the performance of SOFC fuel cell. Efforts were concentrated on a high tem-*

nieniowym tlenkowym ogniwie, w którym nośnikiem prądu są jony tlenu transportowane z katody na anodę. Opracowano i przetestowano model matematyczny takiego ogniwa oraz wykonano pierwsze obliczenia obiegów hybrydowych z turbiną gazowo-parową i ogniwem paliwowym.

Czołowym, zespołowym osiągnięciem Zakładu 3 w roku 2006 było praktyczne wykorzystanie narzędzi badawczych wykonywanych w Zakładzie do złożonego zadania cieplno-przepływowego i wytrzymałościowo-dynamicznego, jakim było rozpoznanie przyczyn występowania degradacji turbiny 103JT pracującej w Odessie. Stało się to w wyniku pełnej symulacji trójwymiarowej pracy obu zniszczonych stopni i poprzez ocenę żywotności zaprojektowanych nowych stopni.

### **O2/Z5 Ruch i wymiana ciepła przy zmianach fazowych w obecności pól masowych**

Badania prowadzone w roku 2006 koncentrowały się przede wszystkim na zagadnieniach związanych ze zjawiskami fizycznymi zachodzącymi w strumieniach dwufazowych. Przedmiotem zainteresowania były strumienice cieczowo-parowe dla czynników chłodniczych oraz nadkrytyczne strumienice parowo-wodne. Inne prace dotyczyły zagadnień modelowania wymienników ciepła, a także termodynamiki i własności fizycznych czynników roboczych dla urządzeń chłodniczych.

Prace dotyczące modelowania stru-

*perature and high pressure oxide fuel cell, where the current is carried by oxygen ions transported from cathode to anode. Developed and tested was a mathematical model of such fuel cell and performed were first calculations of hybrid cycles with a gas and steam turbine and fuel cell.*

*The primary group achievement of Department 3 in 2006 was a practical utilization of research tools developed in the department for complex thermal-hydraulic and strength-dynamical problem in the form of recognition of causes of turbine 103JT degradation in Odessa. That was possible as a result of a full three dimensional simulation of operation of damaged turbine stages and by assessment of life span of designed new stages.*

### **O2/Z5 Motion and heat transfer during phase changes in the presence of mass fields**

*Investigations carried out in 2006 were concentrated primarily on the problems related to physical phenomena taking place in two-phase ejectors. The topic of interest were liquid-steam ejectors for refrigerating fluids and supercritical steam-water ejectors. Other works regarded problems of modeling of heat exchangers including thermodynamics and physical properties of working fluids for refrigeration devices.*

*The works related to modelling of liquid-steam ejectors operating with low boiling point fluids encompassed systematic experimental investigations*

mienic cieczowo-parowych, pracujących z czynnikami łatwoprężnymi (czynnikami chłodniczymi) obejmowały systematyczne badania eksperymentalne charakterystyk pracy strumienicy pracującej z czynnikiem chłodniczym R-123. Badania te koncentrowały się na zagadnieniach wpływu geometrii dyszy napędowej oraz komory mieszania na charakterystyki pracy strumienicy, obejmujące spręż, stosunek zasysania oraz sprawność. Dokonywano również pomiarów rozkładów ciśnień i temperatur w komorze ssawnej, komorze mieszania oraz w dyfuzorze. Efektem tych prac było określenie warunków pozwalających uzyskać optymalną sprawność urządzenia.

W zakresie badań nadkrytycznych, dwufazowych strumienic parowo-cieczowych podjęto badania wpływu średnicy gardła komory mieszania na globalny spręż w strumienicy. Stwierdzono, że można uzyskać znaczący wzrost ciśnienia wylotowego ze strumienicy w stosunku do ciśnienia pary napędowej poprzez odpowiednie zmniejszenie pola przekroju gardła. Do regulacji rozmiaru gardła wykorzystano ruchomą "igłę" o stożkowym ostrzu. Kontynuowano również prace dotyczące nieodwracalnych strat związanych z przemianami fazowymi i tarciami przepływu w strumienicy.

W ramach prac eksperymentalnych, związanych z modelowaniem wymienników ciepła, zajmowano się zagadnieniami pomiaru temperatury oraz degradacji termicznej. Wykonano również obliczenia numeryczne

*of operation characteristics of ejector working with refrigerant R-123. These investigations were concentrated on the problems of the influence of driving nozzle and mixing chamber geometry on characteristics of ejector operation encompassing the compression ratio, injection parameter and efficiency. Carried out also were measurements of pressure and temperature distributions in suction chamber, mixing chamber and diffuser. The effect of these works was determination of conditions ensuring optimal efficiency of the device.*

*In the range of supercritical investigations of two-phase steam-liquid ejectors commenced were investigations of the influence of the mixing chamber throat diameter on a global compression ratio in the ejector. It has been concluded that it is possible to obtain a significant increase of outlet pressure from the ejector with respect to pressure of driving steam by adequate reduction of throat cross section area. For the purpose of control of the throat size a movable tapered "needle" was applied. Continued also were activities regarding irreversible losses related to phase changes and flow friction in the ejector.*

*In the frame of experimental works, related to modelling of heat exchangers, activities were focused on the problems of temperature measurements and thermal degradation. Carried out were also numerical calculations of caps for measurements of a mean temperature of working fluid aimed at attaining significantly higher accuracy of measurements*

zbiorników do pomiaru średniej temperatury czynnika roboczego, mające na celu uzyskanie znacznie wyższej dokładności pomiarów średniej temperatury w wymiennikach ciepła. Ponadto opracowano model wymiany ciepła w skraplaczu zasilanym parą przegrzaną oraz przeprowadzono analizę degradacji termicznej skraplaczy spowodowaną zanieczyszczeniem powierzchni wymiany ciepła.

W zakresie zagadnień techniki chłodniczej wykonano ekspertyzę, w której poddano analizie szereg kluczowych zagadnień termodynamicznych związanych z poprawą efektywności energetycznej oraz egzenergetycznej urządzeń realizujących obiegi lewobieżne. Ponadto wykonano uproszczoną analizę prędkości dźwięku w ośrodkach dwufazowych, ze szczególnym uwzględnieniem naturalnych czynników chłodniczych.

### **O2/Z6 Chłodzenie ciał stałych przy pomocy przepływu jedno- lub dwufazowego w strugach swobodnych lub minikanalach**

Przedmiotem badań prowadzonych w 2006 roku były zagadnienia dotyczące chłodzenia powierzchni ciała stałego przy pomocy strug cieczy, przepływów dwufazowych w termosyfonie oraz kondensacji pary wodnej i mieszaniny parowo-powietrznej.

Celem prac odnoszących się do pierwszego z wymienionych zagadnień było opracowanie efektywnej metody chłodzenia powierzchni ciała stałego

*of mean temperature in heat exchangers. Additionally developed has been a model of heat transfer in a condenser fed with superheated steam as well as conducted was analysis of thermal degradation of condensers rendered by contamination of heat transfer surface.*

*In the range of problems of refrigeration technology carried out was the expertise where analysed were a series of key thermodynamical problems related to increase of energy and exergy effectiveness of devices realizing refrigeration cycles. Additionally carried out was simplified analysis of sound velocity in two-phase media with a particular account of natural refrigerants.*

### **O2/Z6 Cooling of solids by means of a single or two-phase flow in free jets or microchannels**

*The subject of carried out in 2006 were the problems related to cooling of solid surfaces by means of liquid jets, two-phase flows in thermo-siphon loop and condensation of steam and steam air mixture.*

*The objective of works related to the first of the mentioned above problems was development of the effective method of cooling of solid surface by impingement of single phase jets. Developed has been a numerical model of heat transfer in microchannels, jets and liquid films. Developed has been a numerical model of liquid film spreading on a flat surface which, by account of surface tension forces in the force*

przez natrysk strug jednofazowych. Badania dotyczyły wymiany ciepła w mikrokanałach, strugach i filmach cieczowych. Opracowano model numeryczny rozprysku filmu cieczowego po powierzchni płaskiej, który - poprzez uwzględnienie w równaniach sił napięcia powierzchniowego - umożliwia wyznaczenie podstawowych parametrów filmu powstałego w wyniku uderzenia strugi o powierzchnię płyty. Wykonano także badania eksperymentalne chłodzenia powierzchni przez strugę cieczy, wyznaczając m.in. rozkład temperatury wzdłuż promienia rozprysku cieczy, promień uskoku hydraulicznego i grubość filmu cieczowego.

Innym sposobem chłodzenia powierzchni lub elementów urządzeń (zwłaszcza elektronicznych) jest termosyfon, będący zamkniętym obiegiem, w którym cyrkuluje czynnik chłodzący mogący podlegać przemianom fazowym. Rozpatrywano termosyfon dwufazowy z niecałkowitym odparowaniem i z ogrzewaniem bocznym, w tym także nowy wariant z chłodzeniem od góry. Opracowano dwa modele teoretyczne przepływu: homogeniczny i rozdzielony, które opisują wymianę ciepła i ruch płynu w takim termosyfonie. Rozwiązania numeryczne równań tych modeli dostarczyły informacji o masowym natężeniu czynnika dwufazowego cyrkulującego w pętli termosyfonu oraz o wpływie na prędkość przepływu parametrów geometrycznych termosyfonu i strumienia ciepła dostarczonego do obiegu. W modelu uwzględniono

*balance, enables determination of fundamental parameters of the film formed as a result of impingement of a jet on a plane surface. Carried out were also experimental investigations of surface cooling by liquid jet, determining amongst the others temperature distribution along the radius of liquid spreading, radius of hydraulic jump and thickness of liquid film.*

*Another way of surface element cooling (especially the electronic ones) is a thermo-siphon, which is a closed loop where cooling fluid circulates and can undergo phase changes. Considered has been a two-phase thermo-siphon with incomplete evaporation and side heating as well as a new case of cooling from the top. Developed were two theoretical models of the flow, namely homogeneous and separated flow models which describe heat transfer and fluid motion in such thermo-siphon. Numerical solutions of equations governing these models provided information about a mass flow rate of two-phase fluid circulating in thermo-siphon loop as well as on the influence of geometrical parameters of the thermo-siphon and heat flux supplied to the cycle on flow velocity. In the model the friction losses were taken into account.*

*The works related to condensation encompassed development of a two-phase model of steam condensation from air-steam mixture occurring on a single unflooded tube of a real condenser. Considered there was overall heat transmission through the thermal boundary layer consisting of condensate*

straty tarcia.

Prace dotyczące kondensacji obejmowały opracowanie dwuwymiarowego modelu kondensacji pary wodnej z mieszaniny parowo powietrznej, mającej miejsce na pojedynczej niezaizolowanej rurce rzeczywistego skraplacza. Uwzględniono w nim przenikanie ciepła przez termiczną warstwę przyścienną złożoną z filmu kondensatu i części gazowej w postaci warstwy mieszaniny parowo-powietrznej. Model został wykorzystany w analizie mającej na celu usprawnienie pracy kondensatorów w blokach energetycznych.

### **O2/P1 Modelowanie przepływów dwufazowych i wieloskładnikowych**

W tematyce badawczej Pracowni w roku 2006 znaczny udział miały prace poświęcone rozwojowi modeli obliczeniowych dla turbulentnych przepływów dwufazowych z fazą dyspersyjną w postaci kropelek cieczy lub cząstek stałych. Prowadzono także prace nad rozwojem modeli dla przyściennej wymiany ciepła w przepływie turbulentnym oraz badano własności nierównowagowych modeli opisujących mieszaniny, gdy pole przepływu ma wpływ na własności termodynamiczne płynów. Inny kierunek prac stanowiło modelowanie spalania oraz korozji siarkowej.

Prowadzone w bieżącym roku prace dotyczące modelowania przepływów dwufazowych z fazą dyspersyjną koncentrowały się przede wszystkim na rozwoju programu numerycznego do

*film and gaseous part in the form of a layer of air-steam mixture. The model has been utilized in analysis aimed at modification of operation of condensers in power engineering units.*

### **O2/P1 Modelling of two-phase and multi-component flows**

*In the research activities of the group in 2006 an important contribution came from works devoted to development of calculation models for turbulent two-phase flows with a disperse phase in the form of liquid droplets or solid particles. Some work was also done on the development of models for near-wall heat transfer in turbulent flow as well as investigated were non-equilibrium properties of models describing mixtures where the flow field has an influence on thermodynamical properties of fluids. Another direction of work was modeling of combustion and sulphur corrosion.*

*Carried out in current year activities related to modelling of two-phase flows with dispersed phase were concentrated primarily on the development of numerical code for calculation of flows using the Large Eddy Simulation (LES) method. Conducted have been LES calculations of turbulent flows in a plane channel obtaining good consistency of statistics of velocity field with reference data. Additionally carried out were calculations of the flow with a disperse phase on the basis of which determined were statistics of position and particle velocity with different values of the Stokes number (inertia parameter related to mass/diameter of particles).*

obliczeń przepływu przy zastosowaniu metody dużych wirów (LES). Przeprowadzono obliczenia LES przepływu turbulentnego w kanale płaskim, uzyskując dobrą zgodność statystyk pola prędkości przepływu z danymi referencyjnymi. Ponadto prowadzono obliczenia przepływu z fazą dyspersyjną, na podstawie których wyznaczono statystyki położenia i prędkości cząstek o różnych wartościach liczby Stokesa (parametr bezwładności związany z masą/średnicą cząstek).

W części dotyczącej turbulencji przyściennej kontynuowano prace z zakresu modelowania pola temperatury, korzystając z połączenia metody LES z metodą filtrowanej funkcji gęstości prawdopodobieństwa (FDF) dla pasywnej zmiennej skalarnej w przepływie. Przeprowadzono szereg testów numerycznych, badając zależność wyników od wartości stałych modelu, kroku czasowego oraz liczby cząstek stochastycznych w przepływie. Zaproponowano również nowy model transportu molekularnego do obliczeń FDF, który poprawia wyniki dla statystyk skalara w pobliżu ścianki.

Prace związane z opisem wieloskalowych struktur turbulencji dotyczyły także alternatywnego do LES podejścia POD. Pozwala ono na uzyskanie chwilowego pola prędkości najbardziej energetycznych struktur pola prędkości i wyznaczenie ich ewolucji w czasie, jako wyniku całkowania niskowymiarowego układu dynamicznego. W tak modelowanym polu prędkości całkować można tra-

*In the part related to near-wall turbulence continued were activities from the area of modeling of temperature field, using combination of LES with a method of filtering of probability density function (FDF) for the case of passive scalar variable in the flow. Carried out were a series of numerical tests by investigating the relation between the results and model constants, time step and a number of stochastic particles in the flow. Postulated also has been a new model of molecular transport for FDF calculations, which improves the results in the case of statistics near the wall.*

*The works related to description of multi-scale turbulence structure regarded also alternative to LES approach, namely the POD method. It enables obtaining of instantaneous velocity field and determination of its evolution in time as a result of integration of low-dimensional dynamical system. In the velocity field modeled in such a way the trajectories of solid particles or droplets in the near wall region can be integrated which enables determination of correlation with different flow structures and a number of particles undergoing separation on walls.*

*In the group continued were activities related to the development of non-equilibrium flows as well as implementation of multiphase flows and flows with chemical reactions in energy conversion devices. In the frame of that topic, amongst the others, investigated were wave properties of two-phase models containing evolution equation for*

jektorie cząstek stałych lub kropeł w obszarze przyściennym, wyznaczając ich korelację z różnymi strukturami przepływu oraz liczbę cząstek ulegających separacji na ściankach.

W Pracowni kontynuowano rozwój opisu przepływów nierównowagowych, jak również zastosowania przepływów wielofazowych i przepływów z reakcjami chemicznymi w urządzeniach energetycznych. W ramach tej tematyki m.in. zbadano własności falowe modelu dwufazowego, który zawierał równanie ewolucyjne na naprężenia normalne.

W r. 2006 w podjęto również prace związane z modelowaniem spalania i zgazowania biomasy, uczestnicząc w przygotowaniu projektu budowy laboratorium mikrosiłowni. Wykonano także analizę zjawiska korozji siarkowej w kotłach węglowych, identyfikując czynniki wpływające na jej intensyfikację.

### **O2/P2 Dynamika ośrodków wielofazowych w polu elektrycznym. W kierunku nanotechnologii**

Problematyka prac badawczych w Pracowni obejmuje zagadnienia wytwarzania naelektryzowanych aerozoli oraz ich ruchu w polu przepływu pod wpływem sił elektrycznych. W roku 2006, oprócz tradycyjnych zainteresowań dotyczących badania makroskopowych zjawisk elektrohydrodynamicznych – takich jak dynamika naelektryzowanych aerozoli – i ich zastosowań w tradycyjnych procesach technologicznych (głównie w dziedzinie oczyszczania gazów odłotowych), podjęto nowe zagadnienia z

*normal stresses.*

*In 2006 commenced were activities related to modelling of combustion and gasification of biomass as well as participating in development of a project of development of micro CHP laboratory. Carried out were analyses of sulphur corrosion phenomenon in coal fired boilers, identifying the factors influencing its intensification.*

### **O2/P2 Dynamics of multiphase media in electrical field. Towards nanotechnology**

*The topic of research works in the group encompasses problems of production of charged aerosols and their motion in the flow field under the influence of electrical forces. In 2006, apart from traditional interests regarding macroscopic investigations of electrohydrodynamical phenomena such as dynamics of charged aerosols and their application in traditional technological processes (mainly in the area of purification of flue gases) commenced were new activities focused on nanotechnology applications. That scope of works relates to utilization of electrohydrodynamical methods for production of nanoparticles, nanofibres and thin layers. Commenced also were works on investigating the possibility of production of carbon micro and nanostructures by means of electrical discharges in gases containing carbohydrates. The objective of these works was development of electrohydrodynamical method of production of nanoparticles and their coating on flat surfaces or nanofibres.*

ukierunkowaniem na zastosowania nanotechnologiczne. Problematyka ta dotyczy wykorzystania metod elektrohydrodynamicznych do wytwarzania nanocząstek, nanowłókien i cienkich warstw. Rozpoczęto również prace nad zbadaniem możliwości wytwarzania mikro- i nanostruktur węglowych za pomocą wyładowań elektrycznych w gazach zawierających węglowodory. Ich celem było opracowanie elektrohydrodynamicznej metody wytwarzania nanocząstek i ich nanoszenia na powierzchnie płaskie lub na nanowłókna.

W r. sprawozdawczym przeprowadzono badania wstępne elektrohydrodynamicznej metody nanoszenia nanocząstek na powierzchnię blachy stalowej i włókno poliamidowe. Wyniki badań mogą znaleźć zastosowanie w produkcji nowych filtrów membranowych o właściwościach katalitycznych przeznaczonych do filtrowania powietrza lub wody. W wyniku badań stwierdzono, że elektrohydrodynamiczna metoda rozpylania zawiesiny umożliwia równomierne rozłożenie nanocząstek na powierzchni płaskiej oraz na powierzchni włókna. W danych warunkach eksperymentalnych, modem rozpylania najlepiej spełniającym założone wymagania okazał się mod precesyjny. Otrzymane warstwy wykazywały dobrą przyczepność do podłoża.

Drugim realizowanym zagadnieniem były badania formowania się struktur węglowych powstających w gazach zjonizowanych w atmosferze węglowo-

*In the reporting year conducted were preliminary investigations of electrohydrodynamical method of coating of nanoparticles on a layer of steel sheet and polyamide fiber. The results of investigations can find application in production of new membrane filters with catalytic properties corresponding to filtering of air or water. As a result of investigations it has been concluded that electrohydrodynamical method of spraying the colloid enables uniform distribution of nanoparticles on a flat surface as well as the fiber surface. Under conditions of experiments the mode of spraying best conforming to assumed requirements is the precession mode. Obtained layers showed a good adhesion to the foundation.*

*The second realised problem were investigations of formation of coal structures formed in ionized gases in atmosphere of hydrocarbons. The objective of activities was better understanding on experimental path of physical phenomena ruling the formation of coal structures during electrical discharge. Additionally the objective of these investigations was determination of conditions under which different structures consisting of coal atoms are formed as well as pointing out what kind of influence have developed structures on the course of the discharge itself. Investigations were carried out in different neutral gases ( $N_2$ , Ar,  $CO_2$ ), which were supplemented by hydrocarbons (n-heptane and cyclohexane) in gaseous phase. For the case of different forms*

dorów. Celem pracy było lepsze poznanie na drodze eksperymentalnej zjawisk fizycznych rządzących formowaniem się struktur węglowych podczas wyładowania elektrycznego. Ponadto celem tych badań było określenie warunków, w jakich powstają różne struktury złożone z atomów węgla, a także wskazanie jaki wpływ powstałe struktury mają na przebieg samego wyładowania. Badania przeprowadzono w różnych gazach obojętnych ( $N_2$ , Ar,  $CO_2$ ), do których wprowadzono węglowodory (n-heptan i cykloheksan) w fazie gazowej. Dla różnych form wyładowań określono morfologię powstających struktur węglowych. Przeprowadzone badania wskazały, że możliwa jest synteza różnych struktur węglowych poprzez plazmową pirolizę węglowodorów w atmosferze gazów obojętnych. W otrzymanych produktach stwierdzono również obecność wielościennych nanorurek węglowych.

### **O2/P3 Przejście laminarno-turbulentne w maszynach przepływowych**

Przedmiotem badań prowadzonych w Pracowni jest aerotermiczna warstwa przyścienna na płaskiej, nieogrzewanej lub ogrzewanej płycie oraz zjawiska w niej zachodzące, wywołane różnymi typami zaburzeń generowanych w przepływie. Wykonane prace można podzielić na dwie grupy, w których badano wpływ:

1. gradientu ciśnienia na wymianę pędu i ciepła przy niestacjonarnym opływie grzanej płyty,
2. skali turbulencji na przejście laminarno-turbulentne typu by-pass

*of discharge determined was morphology of developed coal structures. Conducted investigations indicated that possible is synthesis of different coal structures through plasma pyrolysis of hydrocarbons in the atmosphere of neutral gases. In obtained products it has been concluded was also a presence of multi-walled coal nanotubes.*

### **O2/P3 Laminar-turbulent transition in fluid-flow machinery**

*The topic of investigations carried out in the group is aerothermal boundary layer on a flat, unheated or heated surface as well as phenomena taking place there which are induced by different types of disturbances generated in the flow. Carried out works were divided into two groups where the influence was investigated:*

1. *pressure gradients on momentum and heat transfer in non-stationary flow around heated plate,*
2. *turbulence scale on laminar-turbulent transition of by-pass type in aerothermal boundary layer.*

*In the group continued were investigations of heat and momentum transfer in the boundary layer of heated plate. The influence of velocity gradient along the plate during simultaneous non-stationarity of the onflow is little recognized up to date. That relates*

w aerotermicznej warstwie przyściennej.

W Pracowni kontynuowano badania transportu ciepła i pędu w warstwie przyściennej ogrzewanej płyty. Wpływ gradientu prędkości wzdłuż płyty, przy jednoczesnej niestacjonarności napływu na płytę, jest dotychczas mało zbadany – dotyczy to w szczególności pojawienia się turbulencji w obszarze laminarnej warstwy przyściennej. W ramach tego tematu wykonano pomiary gradientu prędkości wzdłuż płyty w zależności od kąta ustawienia płyty w przepływie. Za płytą był umieszczony tzw. interceptor, mający za zadanie modyfikowanie przepływu w rejonie krawędzi natarcia płyty, celem uniknięcia oderwania przepływu.

W roku 2006 wykonano również pomiary współczynnika przyspieszenia w warstwie przyściennej przy zmiennym kącie ustawienia płyty i w obecności interseptora. Prace te stanowią kontynuację badań przejścia laminarno-turbulentnego w warstwie przyściennej na grzanej płycie, a stanowią jednocześnie etap wstępny do przygotowywanych badań przejścia laminarno-turbulentnego przy zmiennym gradiencie ciśnienia wzdłuż płyty.

Ponadto wykonano obliczenia numeryczne rozkładu powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniach. Celem tych obliczeń, w których wykorzystano komercyjny program FloVent, było sprawdzenie różnych opcjonalnych rozwiązań rozdziału powietrza zmierzających do optymalnego zaprojektowania otworów nawiewnych i wywiewnych.

Roman Kwidziński

*primarily to appearance of turbulence in the region of laminar boundary layer. In the frame of that topic carried out were measurements of velocity gradient along the plate in relation to the inclination angle of the plate in the flow. Beyond the plate a so called interceptor was located aimed at modification of flow in the region of the plate leading edge to refrain flow separation.*

*In 2006 carried out were also measurements of acceleration coefficient in the boundary layer at variable angle of the plate location and presence of interceptor. These works serve as continuation of investigations of laminar-turbulent transition in the boundary layer on a heated plate, and are at the same time a preliminary stage for laminar-turbulent investigations under preparation at variable pressure gradient along the plate.*

*Additionally, carried out were numerical calculations of ventilation air distribution in rooms. The purpose of these calculations, which were carried out using the FloVent code was testing of different optional solutions of air distribution aimed at optimal design of inflow and outflow apertures.*

*Translated by Dariusz Mikielwicz*