

**O2**

**Zagadnienia termomechaniki płynów**

**Problems of thermomechanics of fluid**



**O2/Z1 Zagadnienia aero- i termomechaniki, eksploatacji i diagnostyki cieplno-przepływowej turbin**

Prace wykonane w r. 2002 dotyczyły metod projektowania układów przepływowych turbin parowych przy zastosowaniu metod numerycznej mechaniki płynów CFD i co ważne weryfikowanych badaniami eksperymentalnymi.

Rozwijając możliwości obliczeń przepływowych w programie FlowER zbadano przepływ pary wodnej w 5 stopniowej turbinie niskoprężnej (od parametrów pary przegrzanej do pary mokrej) z wykorzystaniem zmodyfikowanych równań stanu gazu. W tym celu zastosowano zależności dla gazu doskonałego termicznie i niedoskonałego kalorycznie, ze zmiennymi wartościami ciepła właściwego w funkcji temperatury pary. Osiągnięto dość dobrą zgodność z wynikami własnych badań eksperymentalnych.

W ramach rozwijania technik optymalizacji sprawnościowej układów łopatkowych turbin zaproponowano modernizację dwóch ostatnich stopni starej turbiny 70 MW prod. ZAMECH. Koncepcję rozwiązania, która dotyczy zmiany kształtu 3D łopatek kierowniczych przedstawiono wspólnie z pracownikami BK ALSTOM Power z Elbląga.

Zaproponowano iteracyjną metodę obliczeń na płaszczyźnie zszycia ostatniego stopnia turbiny z króćcem wylotowym. Do tego celu wykorzystano możliwości jakie posiadają programy Fluent i FlowER.

**O2/Z1 Problems of aero- and thermomechanics, operation and thermal hydraulic diagnostics of turbines**

*The works carried out in 2002 focused on the design methods for steam turbine flow system using the CFD methodology and, which is very important, have been validated by experimented verification.*

*Extending the capabilities of the FloweER code for numerical 3D viscous and compressible flow analysis the flow in a  $5^{1/2}$  stage low-pressure large-power turbine was analysed where thermodynamic parameters changed from the superheated to wet steam using the modified equations of state for gases. Bearing that in mind applied have been the state equations for thermally perfect and calorically non-perfect gas with variable specific heats as functions of temperature. The obtained numerical results were found to agree well with own experimental data.*

*In the frame of development of optimisation techniques aiming at increasing efficiency of steam turbine blading systems proposed has been modernisation of two last stages of the old turbine of 70 MW power. A concept of design, which regarded 3D stator reblading has been presented in cooperation with design engineers from the ALSTOM Power Elbląg.*

*An iterative methods was proposed for calculation of parameters at the coupling plane between the last turbine stage and the exhaust hood. Two com-*

W zakresie badań przepływów niestacjonarnych przez stopnie turbinowe przeprowadzono analizy wpływu struktury wirowej śladu spływającego z kierownicy na przebieg jego oddziaływania z wirnikiem. W tym temacie wykonano też obliczenia niestacjonarnego przepływu przez stopnie turbinowe, które porównano z badaniami modelowymi prowadzonymi w IMP Politechniki Łódzkiej. Niektóre własne rozwiązania stopni opatentowano, prowadzi się akwizycję ich zastosowania w przemyśle.

W dziale dotyczącym diagnostyki cieplno-przepływowej rozpoznano metody oceny degradacji geometrycznej aparatów na podstawie niepełnych pomiarów cieplnych.

W ramach zadań dotyczących diagnostyki cieplnej turbin parowych zajęto się zagadnieniem jakości rozpoznawania różnych kombinacji degradacji aparatów pracujących w systemie obiegu. Zastosowane metody, oparte o sieci neuronowe, pozwalają na oceny zniszczeń z pomiarów, których ilość była niewystarczająca z punktu widzenia pojedynczego urządzenia. Rozpatrzono też szczegółowo niektóre błędnie realizowane pomiary.

### **O2/Z2 Przepływy transoniczne z silnymi oddziaływaniami**

W ramach działalności statutowej rozwijano badania nad falami uderzeniowymi i warstwami przyściennymi. W ramach tej tematyki zakończono i obroniono pracę doktorską (R. Szwaba).

*mercial codes – Fluent and FlowER – were used for this purpose.*

*Within the area of unsteady flows through turbine stages, the object of examination was the effect of vortex structure interaction in the stator wake with the rotor cascade. The unsteady flow through turbine stages was calculated and the results were compared with experimental data obtained on a model turbine at the Institute of Fluid-Flow Machinery of Technical University of Łódź. Some of the stage solutions were patented and attempts are made to use them on real steam turbines in operation.*

*The diagnostic research work was devoted to recognition of geometrical degradation of turbines on the basis of insufficient measured thermal data.*

*In the frame of the problems regarding thermal and flow diagnostics of steam turbines, the research work on quality of recognition of combinations of different apparatuses geometrical degradation was undertaken. The applied methods, based on artificial neural networks, permit recognition of defects from measurements in complex power systems, for which individual measurements could have been insufficient. Considered in detail have also been some wrongly conducted measurements.*

### **O2/Z2 Transonic flows with strong interactions**

*In the frame of statute activity the research on shock waves and boundary*

Badano również zastosowanie wirów wzdłużnych do kontrolowania oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną. W ramach tej tematyki prowadzono prace w Lozannie na EPFL, a w IMP PAN przebywał na stażu Klaus Hubrich (3 tygodnie), doktorant z EPFL. Dr Szwaba przebywał na stypendium w Korei (6 miesięcy), rozwijając również tą tematykę.

Prace związane z projektami badawczymi obejmowały:

- W grantie europejskim AITEB – badania numerycznie zachowania się chłodzenia szczelinowego z bocznej ścianki na przepływ w kanale palisadowym. Różne metody wdmuchu powodują różne zachowanie się przepływu wtórnego w palisadzie. W bieżącym roku rozpoczęto porównanie wyników CFD z eksperymentem prowadzonym w DLR w Getyndze.
- W grantie europejskim HELIX (jako subkontraktor na zlecenie Instytutu Lotnictwa) – badania efektywności metod zwiększenia siły nośnej profilu trójelementowego.
- W grantie KBN – pierwsze symulacje numeryczne budowy klastrów wody powstających przy kondensacji; zastosowano metody dynamiki molekularnej. Przeprowadzono również analizę fenomenologicznych modeli kondensacji oraz ich przekształcenie w celu umożliwienia porównania ich

*layers has been continued. Within this topic the doctor thesis by R. Szwaba was completed. Investigated was also an effect of streamwise vortices on shock wave – boundary layer interaction. The research was carried out in Lausanne (EPFL) and Mr Klaus Hubrich (PhD student from EPFL) visited IMP PAN for three weeks. Dr Szwaba was working on this subject during his stay in Korea (6 months).*

*The works connected with the research projects encompassed:*

- *European project AITEB – numerical investigations of the secondary slot cooling and its effect on the flow in a turbine cascade. Different configurations of leakage injection cause different effect of the secondary flow in the palisade. In the present year comparison between CFD and experiments conducted at DLR in Göttingen has started.*
- *European project HELIX (as a subcontractor to the Aviation Institute in Warsaw) – analysis of the lift enhancement devices. Analysis was concerned with a three element profile.*
- *KBN grant – the first numerical simulation of water cluster formation during condensation carried out by means of molecular dynamics methods. Carried out was also an analysis of phenomenological models of condensation and their transformation to enable comparisons with the results*

z wynikami symulacji numerycznych.

Spośród prac prowadzonych na zlecenie zewnętrzne wymienić należy:

- Zakończenie badań oraz rozliczenie kalibracji ścianek perforowanych, które było prowadzone na zlecenie CIRA (włoski Aerospace). Ścianki te zainstalowane są w tunelu transonicznym w Capua, który jest najnowszym w Europie. Zależności kalibrujące potrzebne są do korygowania wyników badań ze względu na obecność ścianek tunelu.
- Opracowanie koncepcji budowy rury uderzeniowej do badania szybkiej dekompresji wody na zlecenie OKG (elektrownia jądrowa w Oskarshamn, Szwecja). Stanowisko to mogłoby zostać zbudowane w IMP PAN, jeżeli nastąpi kontynuacja współpracy w tym względzie.
- Wykonanie dla OKG obliczeń przepływu i naprężeń termicznych w mieszaczu typu T gorącej i zimnej wody. Zaproponowano zmianę geometrii mieszacza, która powoduje zmniejszenie naprężeń.

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

Zadaniem zakładu O2/Z3 jest przygotowanie narzędzi numerycznych ze-

*of numerical simulations.*

*From the work contracted to the group the following must be mentioned:*

- *Completion of investigations on the calibration of perforated walls (contracted by CIRA (Italian Aerospace)). Such walls are used in the transonic wind tunnel at Capua, the most modern channel in Europe. Correlations are necessary for the correction of the measurement results due to the presence of the tunnel walls.*
- *Development of the concept of shock tube for studies of fast decompression of water, the contract by OKG (nuclear power plant in Oskarshamn, Sweden). Such experimental rig could have been built at the IMP PAN if the cooperation is continued.*
- *Numerical simulations of the flow and the thermal stresses in hot-cold water mixer of T-junction type contracted also by OKG. Modification of the mixer geometry was proposed which leads to the reduction of thermal stresses.*

### **O2/Z3 Modelling of the processes of pro-ecological combustion in power engineering systems**

*The objective of the group O2/Z3 preparation of numerical tools enabling numerical investigations of unknown phenomena accompanying modern power engineering technologies such as*

zwalających na numeryczne modelowanie nierozpoznanych zjawisk towarzyszących nowoczesnym technologiom energetycznym takim jak: czyste technologie węglowe, technologie z zerową emisją CO<sub>2</sub>, technologie oparte na paliwach odnawialnych, technologie energetyki rozproszonej, technologie turbin personalnych i ogniów paliwowych. Szczególnym nacisk kładzie się na procesy spalania i proekologicznej konwersji egzergii chemicznej paliwa oraz zjawiska im towarzyszące.

Rezultaty można pogrupować w trzech podtematach:

- Modelowanie proekologicznego spalania,
- Spalanie w kotłach fluidalnych,
- Proekologiczne problemy energetyki rozproszonej.

Zamodelowano – matematycznie i numerycznie – takie technologie jak: bezpłomieniowe spalanie węgla brunatnego, optymalną recyrkulację materiału inertnego w kotle CFB670, emisję NO<sub>x</sub> w komorze bezpłomieniowego spalania turbiny GT26, dyfuzyjne spalanie w palniku BERL, niskoemisyjne spalanie pyłu węglowego w palniku Babcocka 2.3 MW [5]. Modelowano i analizowano złożone obiegi czynników roboczych w systemach konwersji energii energetyki rozproszonej opartej o lokalne, odnawialne, źródła energii. Przedstawiono przykłady modelowania obiegów kombinowanych i jej egzergicznej analizy wykonane w oparciu o własny program Zakładu COM-GAS.

*as clean coal technologies, technologies with zero carbon dioxide emission, technologies based on renewable fuels, dispersed energy technologies, individual turbines and fuel cell technologies. A particular attention is paid to the combustion processes and pro-ecological conversion of chemical exergy of fuel and accompanying phenomena.*

*The results can be grouped in three sub-topics:*

- *Mathematical modeling of sustainable combustion,*
- *Fluidized-bed combustion process in atmospheric and pressurized boilers,*
- *Sustainable conversion for decentralized production.*

*In particular, the following technologies have been modeled, both mathematically and numerically: flameless combustion of lignite, the optimal recirculation of inert material within CFB670 fluidized-bed, emission of NO<sub>x</sub> due to flameless oxidation within the sequential turbine GT26, the low emission diffusive BERL burner, the low-emission Babcock burner of 2.3 MW [5]. Modelled and analysed have been complex cycles in dispersed energy conversion systems based on local, renewable sources of energy. Presented have been examples of modeling of combined cycles and their exergy analysis based on the in-house code COM-GAS.*

*It is important to note that due to modernization of a cyclone within the fluidized-bed boiler CFB670 at Power*

Pragniemy odnotować, iż w wyniku prac modernizacyjnych cyklonu kotła fluidalnego CFB670 w Elektrowni Turów została zmniejszona wydatnie emisja  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  (około 21-29%) co przelożyło się na zmniejszenie opłat z tytułu podatku proekologicznego.

### **O2/Z4 Badanie zjawisk i modelowanie przepływów dwufazowych**

Badania prowadzone w roku 2002 koncentrowały się głównie wokół dwóch zagadnień – modelowania nierównowagi termodynamicznej oraz opisu turbulencji w przepływach wielofazowych. Podstawowym celem prac związanych z modelowaniem nierównowagi termodynamicznej było poszukiwanie równań konstytutywnych dla ośrodka dwufazowego za pomocą metod oferowanych przez termodynamikę procesów nieodwracalnych. Natomiast prace dotyczące przepływów turbulentnych mają na celu stworzenie dokładniejszego narzędzia obliczeń takich przepływów, zwłaszcza w strefie przyściennej.

Modelowanie nierównowagi termodynamicznej jest największym wyzwaniem przed jakim staje współczesna termodynamika. W wielu praktycznych zagadnieniach nie można założyć, że istnieje tzw. lokalna równowaga termodynamiczna odnosząca się do punktu materialnego. W takich przypadkach proponuje się stosowanie rozszerzonej termodynamiki procesów nieodwracalnych, EIT, która oferuje metody zna-

*Plant Turów, the emissions of  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  have significantly been reduced (21-29%), which reduced the fees due to pro-ecological tax.*

### **O2/Z4 Investigation of phenomena and modelling of two-phase flows**

*Investigations conducted in 2002 focused mainly on two topics – modelling of thermodynamic nonequilibrium and physically-complex flows (turbulent, multiphase). The work considering the first topic was aimed at formulation of constitutive equations for two-phase medium by the method of Extended Irreversible Thermodynamics (EIT). The purpose of the work on turbulent flows was a development of more accurate tools for numerical simulation of such flows, particularly in the near-wall region.*

*Modelling of thermodynamic nonequilibrium is the greatest challenge for contemporary thermodynamics. In many practical problems, the existence of so-called local equilibrium for material point can not be assumed. In such cases applying of EIT is proposed, which offers methods to derive the state and constitutive equations that are necessary to close the set of physical equations for mass, momentum and energy balance. The constitutive equations obtained in this way possess an evolutionary character and take into account the history of the flow. As an example of applica-*

leżenia równań stanu i równań konstytutywnych, niezbędnych do zamknięcia układu równań fizyki, tj. bilansu masy, pędu i energii. Wyprowadzone zgodnie z jej metodą równania konstytutywne uwzględniają historię ruchu. Przykładem praktycznego zastosowania EIT w zagadnieniach przepływów nierównowagowych są obliczenia przepływu dwufazowego z gwałtownym odparowaniem (flashing) uzyskane przy pomocy modelu z rozszerzonym równaniem relaksacyjnym. Porównanie wyników obliczeń z danymi uzyskanymi w eksperymencie BNL wykazało dobrą zgodność.

Prace w zakresie modelowania przepływów dwuskładnikowych koncentrowały się na rozwinięciu i testowaniu opracowanego algorytmu obliczeniowego lagrange'owskiej metody cząstek rozmytych. Rozważono przypadek przepływu generowanego niestabilnością Rayleigha-Taylora oraz grawitacyjnego wznoszenia się pęcherza gazu w cieczy. W związku z badaniami zjawisk ciepło-przepływowych w komorach spalania silników wysokoprężnych, zaproponowano również prosty model obliczeniowy dla dynamiki i głębokości penetracji strugi aerozolu (sprayu) w przepływie turbulentnym; model ten daje dobre przewidywania w zestawieniu z wynikami eksperymentalnymi.

Prace z zakresu modelowania turbulencji metodą funkcji gęstości prawdopodobieństwa (PDF) dotyczyły obliczeń dynamiki przepływu oraz pola temperatury (traktowanej jako pasywna zmienna skalarna) w obszarze przyściennym. W pierwszym rzędzie uzys-

*tion of the EIT to the practical problem of the two-phase flow may be regarded a calculation of flashing flow described by homogeneous model with extended relaxation equation. Comparison of the obtained solution with data from BNL experiment showed good agreement.*

*The work concerning modelling of two-component flows focused on the development and testing of own numerical algorithm for Lagrangian method of Smoothed Particle Hydrodynamics. Two cases were considered: a flow generated by the Rayleigh-Taylor instability and gravitational rise of gas bubble in a liquid. In connection with investigation of flow and heat exchange in combustion chamber of Diesel engine, a simple numerical model for dynamics and penetration depth of spray in turbulent flow was proposed. The model predicts well experimental results.*

*The research within the scope of turbulence modelling by the method of Probability Density Function (PDF) concerned the calculations of flow dynamics and temperature field (thought to be a passive scalar variable) in the near-wall region. At first, a simplified model for near-wall zone (using wall functions) was solved for the turbulent flow and temperature field in a channel with heated walls. Subsequently, a model without additional simplifying hypotheses in the so-called logarithmic zone was developed and calculations using the PDF method with integration of conservation equations up to the wall surface were performed. A hybrid approach was also considered, where temperature*

kano wyniki przy uproszczonym modelu dla obszaru przyściennego (wykorzystano funkcję ścianki), przeprowadzając obliczenia przepływu turbulentnego i pola temperatury w kanale o grzanych ściankach. Następnie opracowano model przepływu bez dodatkowych hipotez upraszczających dotyczących warunków brzegowych stawianych w tzw. strefie logarymicznej i przeprowadzono obliczenia metodą PDF, z całkowaniem równań przepływu do ścianki. Rozważono także podejście hybrydowe z modelowaniem pola temperatury w obszarze przyściennym metodą PDF, przy danych z zewnątrz statystykach turbulencji przepływu.

### **O2/Z5/T1 Ruch i wymiana ciepła przy zmianach fazowych w obecności pól masowych**

Przedmiotem badań były zagadnienia związane z wymianą ciepła i masy, przepływami strug cieczy po powierzchni ciała stałego i stabilnością strug cieczy w otoczeniu gazowym. Prace dotyczyły zagadnień: intensyfikacji wymiany ciepła przy skraplaniu par czynników dielektrycznych (np. freonów) za pomocą pól elektrycznych (EHD), wymiany ciepła i masy w skraplaczach obiegów prawo i lewobieźnych w obecności gazów inertnych, zabrudzenia powierzchni jak i przegrzania pary, zwilżalności powierzchni przez strugi cieczy, stabilności strug cieczy wypływających z dysz ostrokrawędziowych i profilowanych do otoczenia gazowego (powietrza).

*field in the near-wall zone was modelled by the PDF method with the statistics for flow turbulence given beforehand.*

### **O2/Z5/T1 Motion and heat transfer during phase changes in the presence of mass fields**

*The topics of investigations were the problems connected generally with heat and mass transfer, hydrodynamics of liquid streams flowing over solid surface, stability of liquid jets issuing from nozzles. The particular topics concerned the following problems: enhancement of condensation heat transfer by means of EHD method (suitable for dielectric media), heat and mass transfer in condensers of heat engine and refrigeration cycles in the presence of inert gases, surface fouling or saturated as well as superheated steam, wettability of surface flowed over by gravity rivulets, stability of liquid jets issuing from profiled and sharp edged orifices into ambient air.*

*In the topic of enhancement heat transfer during condensation aided by electric field conducted have been experimental investigations of the condensate drainage flowing down smooth and finned tubes with different geometry and different voltage for two different electrodes, namely the cylindrical and sharp-edge ones. The obtained results confirmed the existence of significant improvements of heat transfer caused*

W pracach dotyczących intensyfikacji wymiany ciepła przy skraplaniu za pomocą pól elektrycznych przeprowadzono badania eksperymentalne drenażu skroplin spływających z rur gładkich oraz żebrowanych o różnej geometrii i przy różnym napięciu elektrycznym dla elektrody walcowej i ostrzowej. Potwierdziły one znaczną intensyfikację wymiany ciepła spowodowaną przyłożeniem pola elektrycznego. Zaproponowano również model zjawiska drenażu skroplin.

W pracach dotyczących wpływu gazu inertnego oraz zabrudzenia powierzchni na proces kondensacji par dokonano pewnego podsumowania dotychczasowych prac, wzbogacając je o nowe elementy związane z wpływem przegrzania pary na intensywność kondensacji. Przedstawiono model teoretyczny kondensacji z uwzględnieniem przegrzania.

Następna tematyka była związana ze zwilżaniem powierzchni przez strugi cieczy. Badania wykazały istnienie czterech form przepływu strug. Dla profilu symetrycznego strugi przedstawiono model teoretyczny kąta zwilżania strugi w funkcji natężenia przepływu. Dla celów praktycznych zaproponowano korelację na szerokość strugi cieczy w szerokim zakresie natężenia przepływu.

W pracach dotyczących stabilności strug cieczy wypływających z dysz otaczającego gazu skupiono się na wyznaczeniu długości rozpadu strugi (liczonej od wylotu z dyszy), na której struga traci ciągłość i rozpada się na

*by application of electric field. The model has been proposed for condensate drainage process driven by electric field.*

*In the works regarding the influence of inert gases content and surface fouling on condensation heat transfer the problem has been summed up with some extension concerning the influence of steam superheating on the phenomenon. A theoretical model of condensation with account of superheating has been proposed.*

*The next topic concerned the wetting of surface by a gravity driven rivulet flow. Four different flow patterns have been distinguished in respect to the mass flow rate. For the axial symmetrical rivulet profile the theoretical model of the contact angle has been developed. For the practical purpose experimental correlation of the rivulet width against the rivulet mass flow rate has been proposed.*

*In the works regarding the stability of liquid jets issuing from the nozzle into ambient gas (air) the attention was paid to the jet breakup length (calculated from the nozzle exit). After some distance from a nozzle (orifice) exit the jet loses its continuity and begins to spread into droplets. Based on own experimental data determined have been minimum and maximum breakup lengths for the profile and sharp edge orifices. Correlations have been compared against existing ones in the literature. Knowledge of the jet breakup length*

krople. Bazując na własnych badaniach eksperymentalnych wyznaczono minimalne i maksymalne wartości długości rozpadu strugi dla dyszy profilowanej i ostrokrawędziowej w postaci korelacji. Korelacje te porównano z innymi istniejącymi w literaturze przedmiotu. Znajomość długości rozpadu strugi jest bardzo ważna w wielu urządzeniach technicznych, np. w strumienicach dwufazowych.

### **O2/Z5/T2 Dynamika ośrodków wielofazowych w polu elektrycznym**

Celem pracy jest poznanie zjawisk fizycznych zachodzących w warstwie pyłu z elektrofiltru. W roku sprawozdawczym wykonano badania wyładowania wstecznego z elektrody biernej pokrytej warstwą pyłu z elektrofiltru oraz przeprowadzono analizę wtórniego unosu cząstek pyłu z elektrofiltru na modelu laboratoryjnym elektrofiltru dwustopniowego.

Wyznaczono zależność napięcia przebicia od grubości warstwy pyłu dla pyłu z elektrofiltru. Stwierdzono, że grubość warstwy nie wpływa na natężenie pola elektrycznego przebicia warstwy. Wyznaczono charakterystyki prądowo-napięciowe wyładowania wstecznego z warstwy pyłu. Przebicie warstwy pyłu i inicjacja wyładowania wstecznego zachodzi przy niższym napięciu niż zwykle wyładowanie koronowe. Stwierdzono występowanie histerezy na charakterystyce prądowo-napięciowej, która powoduje, że w ce-

*is important in several industrial applications, such as for example two-phase ejectors.*

### **O2/Z5/T2 Dynamics of multi-phase media in electric field**

*The research was aimed at the investigations of physical phenomena that take place in a fly ash layer, taken from an electrostatic precipitator. The investigations of back-corona discharge from a collection electrode covered with fly ash dust layer, and dust particle re-entrainment from this layer were carried out.*

*The dependence of the breakdown voltage for electrostatic precipitator dust on the dust layer thickness was determined. It has been concluded that the strength of the electric field at which the breakdown take place is independent of the dust layer thickness. The current voltage characteristics of back corona discharge for dust layer were determined. The breakdown voltage and the back corona onset voltage are lower than those for the corona discharge. A hysteresis on the current-voltage characteristics has been detected, which causes that the supply voltage have to be decreased to a half or lower for the discharge extinguishing. The spectral analysis of light emitted by the discharge was carried out. The back corona discharge causes an emission of the compounds present in the esp dust, and re-contamination of the gas. The effect of cohesion forces on the stability*

lu wygaszenia wyladowania wstecznego nalezy znacznie obnizyc napiecie zasilania. Przeprowadzono analize widmowa swiatla emitowanego przez wyladowanie wsteczne, korzystajac z metod spektroskopii emisyjnej. W wyniku wyladowania wstecznego nastepuje emisja skladnikow pyłu osadzonego na elektrodzie biernej, powodujac wtórne zanieczyszczenie gazu. Zbadano wplyw sil kohezji na stabilnosc warstwy pyłu na elektrodzie zbiorczej. Stwierdzono, ze dla pyłu o duzej spójności obserwuje sie duza stabilnosc warstwy, a dla pylów o malej spójności, jakim jest pyl z elektrofiltru, zarejestrowano latwe odrywanie sie pojedynczych czastek pyłu lub niewielkich klastrów, które wtórnie unoszone byly przez przeplywajacy gaz. Zbadano tez znaczenie sil elektrycznych dla spójności warstwy i wtórnego unoszenia pyłu.

### **O2/Z6 Transport ciepła w strugach i filmach**

Celem badan bylo opracowanie efektywnej metody chlodzenia powierzchni ciala stalego. Problem ten wystepuje w metalurgii, w wymiennikach ciepla typu ociekowego oraz ostatnio w elektronice. Efektywnym sposobem chlodzenia powierzchni ciala stalego jest jej chlodzenie za pomoca strug cieczy jedno- i dwufazowych uderzajacych o powierzchnie ciala stalego. Strugi te tworza na powierzchni ciala stalego film cieczowy. Film ten porusza sie glownie pod wplywem sil inercji, czym roznia sie od filmów cieczowych powstajacych podczas kondensacji na powierzchni

*of dust layer and particles re-entrainment was also investigated. For dust of high cohesion, the dust layer remains stable, while for dust of low cohesion, to which the esp dust belongs, the particles or their clusters are easily re-entrained. The role of electrical forces in dust layer stability and dust re-entrainment was also investigated.*

### **O2/Z6 Heat transport in jets and films**

*The conducted works were aimed at the development of the effective cooling model of a solid surface. This problem takes place in metallurgy, in heat exchangers of the draining (dripping) type, and recently, in electronics. The effective method of cooling of a surface is through the one- and two-phase liquid films resulting from impinging jets on such surface. The liquid film is moving under the influence of inertial forces mainly, contrary to the fluid films formed during condensation process on the solid surface.*

*In the part concerning the thermal motion in fluids, thermodynamic constraints on a non-monotonic heat transfer in the transition boiling regime were defined within the inertial theory of heat conduction. In order to account for the influence of local instability on the dynamic characteristics of heat transport, the thermodynamic state space was extended to include a material*

ciała stałego.

W części dotyczącej ruchu termicznego w cieczach, w ramach inercjalnej teorii przewodnictwa, ustalono ograniczenia termodynamiczne jakie mają miejsce w warunkach niestabilnego transportu ciepła w cieczy podgrzewanej od dołu. W celu uwzględnienia wpływu lokalnej nierównowagi procesu na dynamiczne charakterystyki transportu ciepła, rozszerzono termodynamiczną przestrzeń stanu o materialny wektor i pokazano jego wpływ na współczynnik przejmowania ciepła i wektor strumień ciepła.

Jednolitą koncepcję opisu niesprężystego zachowania się ośrodka, która uwzględnia wpływ ewolucji defektów i zmian gęstości masy, analizowano w ramach uogólnionego zorientowanego kontinuum. Wynikowe równania bilansu i równania konstytutywne zostały zapisane zarówno na poziomie mikrostrukturalnym, jak i na poziomie hydrodynamicznym ciała. Zasada dysypacyjna, uzyskana w ramach rozpatrywanego modelu, uwzględnia produkcję entropii jednocześnie na obu poziomach opisu.

W części aplikacyjnej tematu poddano analizie ograniczenia szkodliwej obecności gazów inertnych w powierzchniowych wymiennikach ciepła oraz określono ich wpływ na procesy kondensacji. Badania przeprowadzono na różnych obiektach przemysłowych, gdzie obecność powietrza w objętości skraplaczy jest kontrolowana i monitorowana.

W wyniku badań nad procesami

*vector. Its influence on the heat transfer coefficient and the heat flux vector was shown.*

*A unified concept of the analysis of continua with inelastic material behaviour was considered taking into account the evolution of defects and changes in the mass density. The resulting balance laws and constitutive equations were written both on the microstructure level and the hydrodynamic one. The dissipation principle obtained within the considered model includes the entropy production on both levels of the description.*

*In the application part, the efficient methods limiting the detrimental influence of inert gases on condensation processes in the surface heat exchangers were analysed. Practical tests were conducted on different industrial objects, where the presence of air inside condensers was controlled and monitored.*

*As a result of investigations on heat transport processes in the fluid streams the following results were obtained:*

- 1. two-dimensional heat transfer model of the turbulent flow in the liquid layer flowing on the solid surface, resulting from impinging jets on this surface, was developed;*
- 2. heat transfer model for the laminar liquid film resulting from impinging jets on the solid surface was presented;*

transportu ciepła w strugach uzyskano następujące wyniki:

1. opracowano dwuwymiarowy model przepływu turbulentnego w warstwie cieczy płynącej po powierzchni ciała stałego, utworzonej podczas uderzenia strugi cieczy o powierzchnię;
2. zaproponowano model przejmowania ciepła przez laminarny film utworzony podczas uderzenia strugi cieczy o powierzchnię;
3. zaproponowano analogię między skokiem hydraulicznym a przepływem krytycznym w dowolnym kanale.

W badaniach zagadnienia niestabilności wymiany ciepła podano:

4. warunki lokalizacji strumienia ciepła w niestabilnym procesie wrzenia cieczy;
5. zaproponowano uogólnienie prawa Fouriera o termiczny wkład, indukowany brakiem gradientu temperatury, w warunkach rozszerzonej przestrzeni stanu.

W analizie opisu zachowań niesprężystych ciała:

6. zaproponowano jednolitą koncepcję opisu na poziomie hydrodynamicznym i poziomie mikroskali, z uwzględnieniem ewolucji defektów i zmian gęstości masy.

W aplikacyjnej części badań:

7. określono wpływ obecności powietrza na kondensację pary wodnej w kondensatorach podstawowych bloków energetycznych w Polsce;

3. *analogy between hydraulic jump and critical flow in an arbitrary duct was proposed.*

*In the tests of the heat transfer instability in the transition boiling regime:*

4. *localisation conditions for the heat flux were defined in the unstable boiling;*
5. *generalised Fourier's law accounting for a thermal contribution induced by the lack of temperature gradient was proposed within the extended state space.*

*In the analysis of inelastic behaviour of continua:*

6. *unified conception of the analysis, both on the hydrodynamic and microscopic level, accounting for the defect evolution and changes in the mass density, was proposed.*

*In the application part:*

7. *influence of air on the condensation process of steam in the heat exchangers of power units in Poland was determined;*
8. *a number of projects and classified patents in the Patent Office of Poland were implemented.*

8. wdrożono szereg projektów i patentów zastrzeżonych w UP RP.

Dodatkowo zajmowano się badaniem dwufazowego obiegu termosyfonowego z asymetrycznym grzaniem. Analiza oparta na jednowymiarowym modelu homogenicznym została wykorzystana w analizie ciśnienia w relacji do sił inercji, wyporu i tarcia w warunkach ustalonego, homogenicznego dwufazowego transportu ciepła. Badano również zagadnienia wymiany ciepła przy przejściu z przepływu nadkrytycznego do przepływu krytycznego w obszarze uskoku hydraulicznego, jaki ma miejsce przy uderzeniu strugi powietrza i wody o płaską płytę.

Analizowano również wpływ nielokalności na fizyczne i materialne równania pola ośrodków heterogenicznych. Wykorzystując wariacyjną procedurę otrzymano fizyczne i materialne prawa bilansu, warunki brzegowe i warunki transwersalności dla makro- i mikrodeformacji ośrodków heterogenicznych. Przedstawiona nierówność dyssypacyjna zawiera człony relaksacyjne transportu pędu i ciepła. Równania konstytutywne zostały zdefiniowane w funkcji miar makro- i mikroodkształcenia, ich gradientów i przyrostów oraz tensora anizotropii. Przedstawiony w pracy model, poprzez wprowadzenie uproszczeń, umożliwia uzyskanie szeregu postaci nielokalnych i gradientowych teorii.

*Additionally conducted have been investigations of the two-phase thermosyphon loop with asymmetrical heating. The analysis based on a one-dimensional homogeneous model was used to define correlations between pressure, inertial, buoyancy, and friction forces for the steady, homogeneous two-phase heat transfer. The problems of heat transfer during transition from the supercritical to critical flow in the region of hydraulic jump during the impingement of the two-phase air-water jet on the flat plate were also investigated.*

*Moreover, the influence of non-locality on the physical and material field equations of heterogeneous media was investigated. Using a variational procedure the physical and material balance laws, boundary and transversality conditions were derived for macro- and micro-deformations of heterogeneous media. The dissipation inequality including relaxation terms for momentum and heat transport was presented. The constitutive equations were formulated in terms of macro- and micro-strain measures, their gradients and time rates, and the anisotropy tensor. The presented model enables one to derive various non-local and gradient theories by introducing simplifying assumptions.*

**O2/Z7 Przejście laminarno-turbulentne w maszynach przepływowych**

W r. 2002 wykonano pierwsze badania warstwy przyściennej na ogrzewanej płaskiej płycie opływanej jednorodnym strumieniem powietrza o niskim poziomie turbulencji,  $Tu < 0.08\%$ . Uruchomiono zatem eksperymentalne badania termicznej warstwy przyściennej na płaskiej płycie określając w niej obszary laminarnego, przejściowego i turbulentnego stanu przepływu wyznaczając zależność liczby Stanton od liczby Reynoldsa. Badania te wykonano dla różnych metod ogrzewania płaskiej płyty i dla różnych prędkości napływu na płytę. Po wykonaniu w latach poprzednich badań, tzw. zimnej warstwy przyściennej na płaskiej płycie, badania te goroczne są kolejnym krokiem w kierunku poznania zjawisk niestacjonarnych w warstwie przyściennej i ich modelowania dla potrzeb maszyn przepływowych.

Celem prac wykonanych w 2002 r. było zbadanie i przetestowanie wymiany ciepła pomiędzy przepływem a ogrzewaną płaską płytą dla przypadku jednorodnego napływu strumienia powietrza o niskim poziomie turbulencji. Badania wykonane w r. 2002 stanowią bazę do dalszych badań niestacjonarnych zjawisk w podgrzewanej warstwie przyściennej indukowanej śladami spływowymi lub strumieniem o podwyższonym poziomie turbulencji. Do badań termicznej warstwy przyściennej wykonano nową płytę z sekcjami grzewczymi wykonanymi z folii wysokooporowej. Z

**O2/Z7 Modelling of laminar-turbulent transition in fluid-flow machinery**

*In 2002 the first investigations of boundary layer on a heated flat plate flown around by a uniform stream of air at low turbulence level,  $Tu < 0.08\%$ , were carried out. Commissioned therefore have been experimental investigations of thermal boundary layer on a flat plate determining in such way regions of laminar, transition and turbulent state of the flow, determining in that way the Stanton number distributions versus Reynolds. The experiments were carried out for two different modes of plate heating and several flow velocities. This work is an extension to the previous investigation of the so-called cold boundary layer on a flat plate. The objective is gathering the knowledge on the unsteady phenomena in thermal boundary layer and its application to the thermal machinery.*

*The experiment aimed at the investigation of the heat transfer between the heated flat plate and air flow, for the case of uniform flow with low turbulence level. Investigations conducted in 2002 serve as a base for further investigations of non-stationary phenomena in a heated boundary layer induced by oncoming wakes or by flow of enhanced level of turbulence. A new flat plate was constructed for this investigation. The plate was covered with high-resistive heating sections, therefore it was necessary to repeat the cold*

powodu nowej konstrukcji płyty konieczne było powtórzenie badań zimnej warstwy przyściennej. Rezultaty tych badań jednakże nie różnią się od badań warstwy przyściennej na płycie bez sekcji grzewczych.

Dzięki jednoczesnym pomiarom wymiany ciepła, tj. liczby Stanton'a w funkcji liczby Reynoldsa i profili prędkości, dzięki którym możliwe było wyznaczenie lokalnego współczynnika tarcia  $C_f$  w funkcji liczby Reynoldsa, możliwe było wyznaczenie i potwierdzenie analogii Reynoldsa w termicznej warstwie przyściennej na płycie przy naturalnym przejściu laminarno-turbulentnym.

Ponadto wykonano badania niestacjonarnej wymiany ciepła: grzana płaska płyta i przepływ przy nagłej zmianie kąta napływu na płytę. Dla kąta napływu równego  $-0.8^\circ$  rozkład liczby Stanton'a wzdłuż płyty nie wykazywał żadnych oznak przejścia laminarno-turbulentnego, zaś przy zmianie kąta do wartości  $-0.6^\circ$  proces przejścia laminarno-turbulentnego można było obserwować w czasie od stanu laminarnego wzdłuż całej płyty przez stan przejściowy do turbulentnego, który został osiągnięty kilkanaście minut po zmianie kąta napływu.

Ponieważ celem dalszych prac jest wyznaczenie korelacji prędkość-temperatura w warstwie przyściennej, do których to badań konieczne jest opanowanie jednoczesnego pomiaru prędkości i temperatury, to w r. 2002 prowadzono przygotowania do tego typu pomiarów. W tym celu urucho-

*boundary layer measurements. However, their output does not differ basically from the measurements on an old-type non-heated plate.*

*Thanks to the measurements of heat transfer and velocity profiles along the plate, it was possible to determine the Stanton number and local friction coefficient  $C_f$  versus Reynolds number. On this basis the Reynolds analogy in thermal boundary layer at natural laminar-turbulent transition was confirmed.*

*Furthermore, non-stationary heat transfer measurements were carried out for the case of sudden change of the incidence angle of the plate. For the incidence angle of  $-0.8^\circ$ , the Stanton number distribution along the plate did not show any signs of the laminar-turbulent transition. After the sudden change to the angle  $-0.6^\circ$  the laminar-turbulent transition was developing on the plate gradually. The laminar-turbulent transition was completed after a several minutes.*

*Since one of the project objectives is the determination of the velocity-temperature correlation in the heated boundary layer – aimed at the investigation of mixing process – the simultaneous measurements of velocity and temperature are necessary. Appropriate preparations for these measurements were accomplished. A new stand for the two hot wire probes was constructed. Two different modes of probe wires supply were checked in 2002: first – both wires in the constant temperature*

miono nowe stanowisko pomiarowe umożliwiające dokładne wzorcowanie sond termooanemometrycznych dwuwłóknowych. Przebadano dwie różne metody grzania włókien pomiarowych: pierwsza metoda dotyczy jednego włókna pracującego w układzie stałoprądowym, a drugie włókno pracujące w układzie stałotemperaturowym, podczas gdy druga metoda dotyczy dwóch włókien pracujących jednocześnie w układach stałotemperaturowych.

*mode, second – one wire in constant temperature mode and second one in the constant current mode.*

Roman Kwidziński

*Translated by Dariusz Mikielwicz*