



Doctoral Thesis

Transport mechanisms in mixed convective flow over complex surfaces

Author(s):

Kuhn, Simon

Publication Date:

2008

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005547348> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 17627

TRANSPORT MECHANISMS IN MIXED CONVECTIVE FLOW OVER COMPLEX SURFACES

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Simon Kuhn

Dipl.-Ing.

(Technical University of Munich)

born on December 13, 1977

in Speyer (Germany)

citizen of

Federal Republic of Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr., Dr. h.c. Philipp Rudolf von Rohr (ETH Zürich), examiner

Prof. Dr. Thomas Rösgen (ETH Zürich), co-examiner

Dr. ir. Saša Kenjereš (TU Delft), co-examiner

Zurich, 2008

Abstract

In this thesis transport mechanisms in forced and mixed convective flows over complex surfaces are addressed by experiments and numerical simulations. Compared to classical channel flow the surface structure adds a degree of complexity to the flow by inducing streamline curvature, flow separation and flow reattachment, thus leading to flow situations which are often present in relevant technical and geophysical applications. In order to achieve homogeneous and inhomogeneous reference flow situations two different well-defined types of bottom surfaces are considered: (i) three two-dimensional wavy walls with amplitude-to-wavelength ratios of $\alpha = 2a/\Lambda = 0.1$ ($\Lambda = 30$ mm), $\alpha = 0.2$ ($\Lambda = 30$ mm), and $\alpha = 0.2$ ($\Lambda = 15$ mm), and (ii) a three-dimensional profile consisting of two superimposed sinusoidal waves.

Measurements are carried out in a wide water channel facility (aspect ratio 12:1) where the bottom surface is heated with an incorporated electrical heat foil. Digital particle image velocimetry (PIV) is performed to examine the spatial variation of the streamwise, spanwise and wall-normal velocity components in three different measurement planes. Planar laser induced fluorescence (LIF) is used to measure the concentration of a species emanating from a point source, or to determine the temperature field in the heated cases. In case of forced convection measurements are performed at Reynolds numbers ranging from 5600 to 40000, defined with the channel height H and the bulk velocity U_B . For the mixed convection, which is obtained by applying a large temperature gradient between the top and bottom wall, the measurements are conducted at Reynolds numbers of $Re_H = 1100$ and Grashof numbers of $Gr_H = 1.94 \cdot 10^6$, respectively $Re_H = 2120$ and $Gr_H = 1.30 \cdot 10^6$. The numerical simulations are performed employing a large eddy simulation (LES) with a dynamic subgrid scale model.

The resulting momentum fields and scalar fields are characterized by calculating turbulence statistics and the scalar fluxes. Structural information is obtained by performing a proper orthogonal decomposition (POD) of the velocity components to extract the most energetic flow

structures, and additionally by calculating the swirling strength.

Our results show a good agreement between experiment and numerical simulation. In the case of forced convection the transport of a scalar species is enhanced by the presence of the wavy surfaces. Comparing the influence of the different types of surfaces the superimposed waves promote the spreading of the scalar plume most. These enhanced transport properties are attributed to large-scale structures present in the flow field. These coherent structures exhibit a dependency in their spatial organization and their energy contribution on the wavy surfaces. Advancing to mixed convective flows the transport of momentum and scalars is additionally enhanced through buoyancy induced fluid motions. This leads to an augmentation of the transport of heat away from the heated wavy surface, which is expressed by increased Nusselt numbers compared to theoretical predictions. The patterns of the Nusselt number on the heated surface and the magnitude of the heat flux exhibit a correlation on the spatial distribution of coherent structures. Characterizing the state of isotropy of the flow it is found that the turbulence state in the center of the flow channel is more anisotropic than in classical channel flow, resulting in an increased transport normal to the mean flow direction.

The major finding is the presence of longitudinal, coherent flow structures which are found for each flow case and which are directly linked to the transport mechanisms for momentum and scalars. These results suggest that ‘controlling’ these large-scale structures provides means to directly influence transport properties in technical applications.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Transportmechanismen in Zwangs- und Mischkonvektion über komplexen Oberflächen und untersucht diese mittels experimenteller und numerischer Methoden. Im Vergleich zur klassischen Kanalströmung erhöht die Struktur der Oberflächen die Komplexität des betrachteten Systems: die Stromlinien werden gekrümmt, es kommt zu Strömungsablösung und Wiederanlagerung. Diese Phänomene zeichnen viele in der Technik und Geophysik vorkommende Strömungen aus. Um sowohl homogene als auch inhomogene Strömungszustände zu erreichen werden folgende Arten von Bodengeometrien betrachtet: (i) drei zwei-dimensionale gewellte Wände mit einem Amplituden-zu-Wellenlängenverhältnis von $\alpha = 2a/\Lambda = 0.1$ ($\Lambda = 30$ mm), $\alpha = 0.2$ ($\Lambda = 30$ mm), und $\alpha = 0.2$ ($\Lambda = 15$ mm), sowie (ii) eine drei-dimensionale Oberflächenstruktur die durch die orthogonale Überlagerung zweier Sinuswellen gebildet wird.

Die Experimente wurden in einem Strömungskanal mit einem Seitenverhältnis (Breite zu Höhe) von 12:1 durchgeführt, dessen Bodenwand durch eine eingebettete Heizfolie beheizt wurde. Die räumliche Änderung der Geschwindigkeitskomponenten in allen Raumrichtungen wurde mittels digitaler Particle-Image-Velocimetry (PIV) in drei Messebenen bestimmt. Mit der Methode der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) wurde die Konzentrationsverteilung einer Spezies, die dem Strömungskanal über eine Punktquelle zugeführt wurde, ermittelt, bzw. im Falle der Mischkonvektion das Temperaturfeld bestimmt. Die Messungen in Gebiet der Zwangskonvektion umspannten einen Bereich der Reynoldszahl (bestimmt mit der Kanalhöhe und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit) von 5600 bis 40000. Im Falle der Mischkonvektion wurden die Experimente für die Reynoldszahl $Re_H = 1100$ und die Grashofzahl $Gr_H = 1.94 \cdot 10^6$, bzw. $Re_H = 2120$ und $Gr_H = 1.30 \cdot 10^6$, durchgeführt. Der Strömungszustand der Mischkonvektion wurde durch das Aufbringen eines Temperaturgradienten zwischen Boden- und Deckelplatte des Kanals erreicht. Die Simulationen wurden mit der Methode der Grobstruktursimulation (LES) mit dynamischen Modell zur Bestimmung der

Feinstrukturanteile durchgeführt.

Die resultierenden Impuls- und Skalarfelder werden durch die Bestimmung von Turbulenzgrößen und skalaren Transporttermen charakterisiert. Eine Eigenwertzerlegung (POD; proper orthogonal decomposition) wird verwendet um strukturelle Information über die energiereichsten Strukturen der Strömung zu gewinnen, desweiteren wird zur zusätzlichen Charakterisierung die Wirbelstärke (swirling strength) berechnet.

Die erhaltenen Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Im Falle der Zwangskonvektion wird der Skalartransport durch die Anwesenheit der komplexen Oberflächen verstärkt. Vergleichend wird festgestellt, dass die drei-dimensionale Oberflächenstruktur die Aufweitung der Rauchfahne der skalaren Spezies am meisten erhöht. Diese Erhöhung des Skalartransports wird auf die Gegenwart von Grobstrukturen im Strömungsfeld zurückgeführt. Deren räumliche Anordnung und die Energieverteilung dieser kohärenten Strukturen weist eine Abhängigkeit von der überströmten Oberfläche auf. Im Bereich der Mischkonvektion werden die Transportvorgänge zusätzlich durch Fluidbewegungen, hervorgerufen durch die lokal verringerte Dichte, verstärkt. Dies führt zu einer Erhöhung des Wärmetransports von der geheizten Wand auf das Fluid, dies spiegelt sich in höheren Werten für die Nusseltzahl im Vergleich zu theoretischen Vorhersagen wieder. Die räumliche Verteilung der Nusseltzahl sowie das Maximum des Wärmetransports ist korreliert mit der räumlichen Organisation der Grobstrukturen. Die Bestimmung der Anisotropie der Strömung im Bereich der Mischkonvektion zeigt, dass diese in der Kanalmitte im Vergleich zur klassischen Kanalströmung erhöht ist. Hieraus resultiert ein erhöhter Transport von Impuls senkrecht zur Hauptströmungsrichtung.

Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen ist das Auffinden von strömungsorientierten Grobstrukturen, die einen direkten Einfluss auf den Impuls- und Skalartransport haben. Diese Resultate deuten auf die Möglichkeit hin, dass eine 'Kontrolle' dieser Grobstrukturen eine direkte Beeinflussung von Transportvorgängen in technischen Anwendungen erlaubt.