

Diss. ETH No. 22104

VALIDATION OF MULTIPHASE FLOW SIMULATIONS IN VIEW OF ABRASIVE WATER JET CUTTING

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Yvonne Reinhardt

Dipl.-Ing., Universität Stuttgart
born on December 12, 1983
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. L. Kleiser, examiner
Prof. Dr. P. Jenny, co-examiner
Dr. A. Haselbacher, co-examiner

2014

Abstract

Flows found in nature and industrial applications often consist of multiple phases. The behavior of such flows is largely determined by complex interactions between the phases which makes predictions challenging. Especially with respect to industrial applications, gaining a deeper understanding about the behavior of multiphase flows is of high interest. The present work is motivated by the three-phase flow of water, air and particles in the mixing head of abrasive water jet cutting (AWJC) devices. We examine separately different flow regimes prevailing within the mixing head by means of numerical simulations. We mainly focus on particle-laden air flow and the flow of high-speed water jets emerging into air and develop two codes within the framework of OpenFOAM[®], `dpaFoam` and `wjaFoam`. They are based on the incompressible Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations applying the Eulerian two-fluid approach. The turbulence of the fluid phases is modeled using standard $k - \varepsilon$ turbulence models. The turbulence of the particle phase is calculated via the granular temperature model. Turbulence modulation by particles is accounted for.

We investigate turbulence modeling for single-phase round jets to overcome deficiencies of RANS models in simulating round jets. We suggest values for a model coefficient in the ε -equation adapted to the three most important nozzle designs used in industry, which are the long pipe nozzle, the smoothly converging nozzle and the sharp-edged nozzle. For wall-bounded particle-laden flows, we suggest a new empirical model to account for turbulence modulation in the four-way coupling regime for predicting turbulence augmentation and attenuation behavior. Moreover, the dependency of the fluid velocity profile on mass loading is investigated. Empirical relations for the dependency of the centerline Reynolds number and the wall shear Reynolds number on characteristic parameters of the flow are derived.

We validate `dpaFoam` for particle-laden air flows of wall-bounded and free configurations throughout the one-, two- and four-way coupling regime covering a broad range of values of representative non-dimensional parameters such as the mass loading, the particle Reynolds number, the Stokes number and the ratio of particle to turbulence length scale. `wjaFoam` is validated for single-phase jets and two-phase jet flows of immiscible fluids. The two validated codes provide an essential basis for future three-dimensional, three-phase simulations of flow processes in the mixing head of AWJC devices.

Kurzfassung

Die in der Natur und in industriellen Anwendungen vorkommenden Strömungen bestehen häufig aus mehreren Phasen. Das Verhalten solcher Strömungen wird zum Grossteil durch komplexe Interaktionen zwischen den Phasen bestimmt, was Vorhersagen schwierig macht. Besonders in Hinblick auf industrielle Anwendungen ist es von grossem Interesse, ein tiefergehendes Verständnis für das Verhalten von Mehrphasenströmungen zu erlangen.

Die Motivation zu der vorliegenden Arbeit basiert auf der dreiphasigen Strömung aus Wasser, Luft und Partikeln in der Mischkammer von Abrasiv-Wasserstrahlschneidanlagen. Mit Hilfe numerischer Simulationen untersuchen wir verschiedene Strömungszustände, die in Teilbereichen der Mischkammer vorkommen. Wir konzentrieren uns dabei vor allem auf partikelbeladene Luftströmungen und das Verhalten von Hochgeschwindigkeits-Wasserstrahlen in Luft. Dafür entwickeln wir zwei Codes im Rahmen von OpenFOAM[®], dpaFoam und wjaFoam. Diese basieren auf den inkompressiblen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen (RANS) unter Anwendung des Eulerschen Zweifluid-Ansatzes. Die Turbulenz der Fluidphasen wird mit Hilfe etablierter $k-\varepsilon$ -Modelle unter Berücksichtigung von Turbulenzmodulation durch Partikel modelliert. Die Turbulenz der Partikelphase wird durch das Granulartemperatur-Modell beschrieben.

Wir untersuchen die Turbulenzmodellierung von einphasigen runden Freistrahlen, um deren Simulation mittels des RANS-Ansatzes zu optimieren. Wir schlagen jeweils einen modifizierten Wert für einen Modellkoeffizienten der ε -Gleichung vor, der für die drei in der Industrie am häufigsten vorkommenden Düsengeometrien am besten geeignet ist. Bei den Düsen handelt es sich um eine Düse bestehend aus einem langen Rohr, eine konische Düse und eine scharfkantige Düse (Staurand). Für partikelbeladene Strömungen, die durch Wände begrenzt sind, entwickeln wir ein neues empirisches Modell, das die Turbulenzmodulation im Bereich der Vierwegkopplung beschreibt, um Turbulenzerhöhung und -reduktion vorherzusagen. Daneben untersuchen wir die Abhängigkeit des Fluidgeschwindigkeitsprofils von der Massenbeladung. Empirische Beziehungen für die Abhängigkeit der mit der Mittengeschwindigkeit gebildeten Reynoldszahl und der Wandschubspannungs-Reynoldszahl von charakteristischen Strömungsparametern werden hergeleitet.

Wir validieren dpaFoam für partikelbeladene Luftströmungen in offenen und wandbegrenzten Konfigurationen im Bereich der Ein-, Zwei- und Vierwegekopplung. Dabei decken wir einen grossen Wertebereich charakteristischer Strömungsparameter wie Massenbeladung, Partikel-Reynoldszahl, Stokeszahl und Verhältnis der Partikel-Längenskala zur turbulenten Längenskala ab. Ebenso validieren wir wjaFoam für die Simulation von einphasigen Freistrahlen und zweiphasigen unmischbaren Fluiden im Freistrah. Die zwei getesteten Codes stellen eine wesentliche Grundlage zur künftigen dreidimensionalen, dreiphasigen Simulation von Strömungsprozessen in der Mischkammer von Abrasiv-Wasserstrahlschneidanlagen dar.