

**Diss. ETH 5533**

**Dynamik der adiabaten Expansion von vertikaler  
Dreiphasen-Zweikomponentenströmung**

ABHANDLUNG

zur Erlangung  
des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH

vorgelegt von

KARL HILFIKER  
Dipl. Masch. Ing. ETH  
geboren am 4. Juni 1941  
von Boswil (Kt. Aargau)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Dr. E. h. P. Grassmann  
Prof. Dr. F. Widmer

Juris Druck + Verlag Zürich  
1975

## Z u s a m m e n f a s s u n g

Die vertikale Dreiphasen-Zweikomponentenströmung, namentlich die Entspannungsverdampfung einer Suspension, erhält in der Verfahrenstechnik zunehmend Anwendungsgebiete; deren wissenschaftliche Erforschung ist neu.

Vorerst werden die wirkenden Phänomene bei der Entspannungsverdampfung und der Einfluss des Feststoffes aufgezeigt: Steighöhe, kritischer Durchsatz, Schlupf zwischen den Phasen und Dissipation durch den Feststoff.

Einschlägige Literatur der Zweiphasenströmung wird diskutiert: Keimbildung und Phasenwachstum bei Entspannungsverdampfung, Reibungsdruckabfall und Schlupfmodelle.

Eine Versuchsanlage ist aufgebaut worden mit einem 8 m hohen vertikalen Rohr von 50 mm Innendurchmesser zur Messung des Druckverlaufes. Der Feststoffanteil wurde mit isokinetischer Probeentnahme bestimmt. Die Versuche wurden mit Wasser und Quarzsand im Bereich von 75 °C bis 150 °C und bis zu 12 Volumenprozent Feststoffgehalt durchgeführt. Die Versuchsergebnisse geben Durchsatz und dazugehöriger Druckverlauf bis ins Gebiet der kritischen Strömung an. Der gemessene Einfluss des Feststoffes ist eine Verminderung des kritischen Durchsatzes und eine Vergrößerung des Druckabfalles.

Die Theorie der vertikalen Dreiphasen-Zweikomponentenströmung ist mit Kontinuitäts-, Impuls- und Energiegleichungen für adiabate Zustandsänderung entwickelt worden. Die Flüssigkeit ist das Trägerfluid des Feststoffes. Transformationen sind eingeführt worden, um die Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Gas mittels existierender Schlupfmodellen zu berechnen. Aus der Impulsgleichung für die Feststoffphase wird die

Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Feststoff bestimmt. Mit der sogenannten Hauptgleichung kann der Druckverlauf entlang des Steigrohres und daraus das Durchsatzvermögen von Anlagen explizit berechnet werden.

Zum Angleichen der Theorie mit der Messung wurde einzig der "Koeffizient des Reibungsdruckverlustes" mittels Regression bestimmt. Die Wiedergabe der Messungen des Druckgradienten mit der dargelegten Theorie liegt für den gesamten untersuchten Bereich innerhalb der Genauigkeit von  $\pm 8\%$  mit Ausnahme der untersten Messstelle, wo der gemessene Druckgradient bis  $20\%$  von der Messung abweicht.

S u m m a r y

Many new processes in chemical engineering involve three-phase two-component flow; research activities are just starting.

At the beginning of this study the phenomena occurring when flashing slurries are discussed: available riser height, slip between the phases and dissipation by the solids.

The relevant literature of two-phase flow is reviewed: mechanism of phase growth, frictional pressure drop and slip models.

A test unit has been designed and erected to measure the pressure along a vertical tube of a height of 8 m and 50 mm inside diameter. The solids content across the pipe has been determined by isokinetic sampling. The experiments have been carried out with boiling water and quartz sand in the region of 75 °C to 150 °C and up to 12 % solids by volume. - The test results show that the solid particles in a flashing flow decrease the critical flow and increase the pressure drop.

By the equations of continuity, momentum and energy, the theory of the vertical three-phase two-component flow has been developed. The solids are suspended in the liquid phase. Transformations for the concentrations have been introduced permitting to determine the relative velocity between gas and liquid by existing slip models. The relative velocity between the solid particles and the liquid is obtained by the momentum balance for the solid phase. - An equation has been provided by which the pressure gradient in the riser tubes and the throughput of a plant can be calculated explicitly.

The theory is compared with the experimental results and adjusted by only one empirical coefficient  $n$  in the model for the frictional pressure drop. The theoretical pressure gradients deviate less than 8 % from those measured, except at the bottom pressure tap, where deviations up to 20 % occur.