

Diss. ETH Nr. 6964

Lokaler Stoffaustausch im mechanisch beeinflussten Flüssigkeitsfilm (Wand - Fluid)

ABHANDLUNG

zur Erlangung

des Titels eines Doktors der Technischen Wissenschaften

der

**EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH**

vorgelegt von

DIETER WOSCHITZ

Dipl. Masch.-Ing. ETH
geboren am 12. Januar 1953
von Flurlingen (Kt. Zürich)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. F. Widmer, Referent
Dr. O. Dossenbach, Korreferent

9. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorangegangene Arbeit von P. Schweizer [2] lieferte eine vertiefte Untersuchung der Fluidodynamik des mechanisch beeinflussten Flüssigkeitsfilmes. Aufbauend auf dieser Grundlage untersucht diese Arbeit den verfahrenstechnischen Vorgang des Wärmeaustausches zwischen einer beheizten Wand und der anliegenden mechanisch beeinflussten Flüssigkeitsschicht, wie er in einem Dünnschichtverdampfer vorliegt. Die direkte örtliche Messung des periodisch schwankenden (Rotorumdrehung) Wärmeübergangskoeffizienten (Wand - Fluid) kann technisch nicht vernünftig realisiert werden, da z.B. Temperaturfühler bei hohen Frequenzen (500 Hz) keinen Realwert mehr anzeigen.

In der Verfahrenstechnik besteht zwischen Wärme- und Stoffaustausch eine Analogie, d.h. gewonnene Stoffübergangsergebnisse lassen sich auf den Wärmeübergang übertragen, oder umgekehrt, sofern bestimmte Randbedingungen eingehalten werden. Diesen Sachverhalt benutzt man, um mit einer elektrochemischen Methode lokale und mittlere Stoffübergangskoeffizienten (Wand - Fluid) zu messen, in Abhängigkeit der Dünnschichtparameter wie Rotordrehzahl, Belastung, Blattanzahl, Spaltweite, Blattbreite und Fluidzähigkeit.

Aus diesem Grunde wurden die experimentellen Untersuchungen an einem nicht-beheizbaren Dünnschichtapparat mit einem Innendurchmesser von 150 mm und mit Starrflügelrotor durchgeführt. Das segmentierte Dünnschichtverdampferrohr bestand aus reinstem Nickelwerkstoff. Jedes unterteilte Segment konnte je als Anode, Kathode oder elektrisch neutral betrieben werden. Als Versuchsmedium diente der wässrige Elektrolyt $2n \text{ NaOH} / 0.025 \text{ [kmol/m}^3\text{]} \text{ K}_3\text{Fe(CN)}_6 / 0.025 \text{ [kmol/m}^3\text{]} \text{ K}_4\text{Fe(CN)}_6$, der sich mittels Hydroxiethylcellulose bis zu einer Viskosität $\eta \approx 0.4 \text{ Pa s}$ eindicken lässt und dabei mehr oder weniger Newton'sches Verhalten zeigt.

Der Stoffübergang an lokalen Elektroden entsteht durch die Reduktion des Ferricyanids an der Kathode zu Ferrocyanid. An der Anode oxidiert das Ferrocyanid. Durch die Umladungsreaktion ergibt sich ein messbarer elektrischer Strom, der in erster Linie das Verhalten des Stoffüberganges und, in Analogie, des Wärmeüberganges rein qualitativ und lokal im Dünnschichtapparat aufzeigt.

Der erste Teil der Arbeit untersucht die Gültigkeit und Verwendbarkeit des erstmals so stark mit Hydroxiethylcellulose eingedickten Elektrolyten. Zwei Fälle wurden dabei besonders bearbeitet: Der erste betraf die Bestimmung der Stoffdaten, insbesondere des Diffusionskoeffizienten des diffundierenden Ions, der mittels dreier Messsysteme mit verschiedener Fluid-dynamik ermittelt wurde. Der zweite Fall untersuchte die Gültigkeit der Analogie des Wärme- und Stoffaustausches im laminaren Rieselfilm. Der eingedickte Elektrolyt sowie die Elektrodenkonfiguration liessen sich damit austesten. Das leicht viscoelastische Verhalten des stark eingedickten Elektrolyten ($\eta \approx 0.4 \text{ Pa s}$) beeinflusst die Fluid-dynamik im laminaren Bereich (bis $Re_{RF} = 800$) nicht.

Im zweiten Teil der Arbeit wird der lokale und mittlere Stoffübergang im Dünnschichtapparat qualitativ beschrieben. Dabei sind die hohen tangentialen Geschwindigkeiten in der Bugwellen- und Spaltzone massgebend verantwortlich für die starke Erhöhung des Stoffübergangskoeffizienten (Wand - Fluid). Treten Instabilitäten infolge der Zentrifugalkraft auf (Taylor-Görtler-Wirbel), so kann, sofern es sich um ein Newton'sches Fluid handelt, mit einer Verbesserung des mittleren Stoffüberganges gerechnet werden. Der Einfluss der Spaltweite (ausser "Null"-Spalt) und der Blattbreite ist von geringem Einfluss, sofern eine Bugwelle vorliegt.

Im dritten Teil der Arbeit werden aufgrund der Stoffübergangsergebnisse und der zahlreichen Messwerte Korrelationsgleichungen für die Berechnung des Stoffübergangskoeffizien-

ten angegeben, in Abhängigkeit der Drehzahl, des Massenstroms, der Zähigkeit und der geometrischen Apparateparameter. Das erweiterte, theoretische Penetrationsmodell erlaubt die einfache und genaueste Berechnung von Stoff- resp. Wärmeübergangskoeffizienten (Wand - Fluid) im Dünnschichtapparat im Vergleich mit den komplizierter aufgebauten Regressionsmodellen, in denen zusätzlich noch die Rotorgeometrie zu berücksichtigen ist. Die Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten mit der erweiterten Penetrationstheorie erfolgt mit einer Genauigkeit besser als 20 % für das untersuchte Apparate-Stoffsystem.

Den Abschluss dieser Arbeit bilden einige Gedanken zur Analogie des Wärme- und Stoffaustausches.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen sind:

- Die Eindickung des Elektrolyten (bis ~ 0.4 Pa s) ist möglich und erlaubt damit die Fluidzähigkeit um den Faktor 300 zu variieren.
- Der verbesserte mittlere Stoffübergangskoeffizient im Vergleich zum reinen Rieselfilm entsteht durch den grossen konvektiven Austausch in der Bugwellen- und Spaltzone.
- Rotordrehzahl, Blattanzahl und Zähigkeit sind die wichtigsten Parameter im DSA und beeinflussen den Stoffübergangskoeffizienten (Wand - Fluid) am stärksten.
- Sobald Instabilitäten aufgrund der Zentrifugalkraft im DSA auftreten (Taylor-Görtler-Wirbel), nimmt der Stoffübergangskoeffizient in Newton'schen Fluiden stark zu.

10. SUMMARY

In a mechanically agitated film heat exchanger, the liquid film is subjected to gravitational and centrifugal forces as the blades rotate. The fluid-dynamical and heat transfer phenomena (wall - fluid) occurring in such a system are very complex and hence any analysis of the heat transfer mechanism must be based on a simplified model for these phenomena (penetration theory model).

In a previous work P. Schweizer (at the same institute) developed some results of the fluid-dynamics of the mechanically agitated liquid film. That research is fundamental for the estimation of heat or mass transfer problems and serves as a foundation for this work.

The chief importance of this work concerns the indirect measurement of the local and average heat transfer rate (or coefficient) between a wall and a mechanically agitated liquid film. This was done using the electrochemical method developed for such studies. The main advantage of such a system is that it provides an instantaneous mass transfer rate, uncomplicated by thermal or mass capacity effects. The electrolyte was thickened till to 0.4 Pa s with a Hydroxiethylcellose-product. The flow properties were nearly Newtonian. The analogy between heat and mass transfer allows the translation of the mass transfer rate on heat transfer rate (or coefficient), primary qualitative.

The experimental part consists of three sections. The first one describes the determination of the fluid properties, especially of the thickened electrolyte. The second one examines a fluid dynamical model (falling film) to test the thickened electrolyte and the electrode configuration. In the third section local and average mass transfer coefficients in the mechanically agitated liquid film are examined as a function of the operating conditions (liquid rate, angular velocity of

the rotor, number of blades, width of the blade, clearance between the blade tips and the shell wall and viscosity of the fluid).

Based on the results of the mass transfer and the experience, a theoretical model and non-linear fitting equations to data for computation of the time averaged, local Sherwood numbers are presented. A modified penetration theory model indicates the best agreement with the experimental results in comparison with the complicated non-linear fitting equations. Finally there are some ideas to the analogy between heat and mass transfer represented.

The main conclusions are as follows:

- The great thickening of the electrolyte by a factor of 300 can be achieved.
- The great tangential velocities in the bow wave and split zone, because of the turning rotor, strongly increase the local and average mass transfer coefficient.
- Angular velocity of the rotor, number of blades and viscosity are the most important operating conditions, which influence the mass transfer coefficient.
- As soon as instabilities appear due to centrifugal forces (Taylor-Görtler vortices) the mass transfer rapidly increases in Newtonian fluids.