

Diss. ETH Nr. 7407

# DIE WAERMEÜBERTRAGUNG BEIM NATURUMLAUFVERDAMPFER

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels eines  
Doktors der Technischen Wissenschaften  
der  
EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZUERICH

vorgelegt von

KLAUS DIALER

Dipl. Masch.-Ing. ETH

geboren am 21. Dezember 1952

von Oesterreich

Angenommen auf Antrag von

Prof. A. Buck, Referent

Prof. Dr. F. Widmer, Korreferent

Zürich 1983

## 10. ZUSAMMENFASSUNG

Die Wärmeübertragung des Naturumlaufverdampfers (dampfbeheiztes, vertikales aussenliegendes Rohrbündel) lässt sich nur iterativ berechnen, da der Umlaufstrom a priori nicht bekannt ist. Ziel der vorliegenden Arbeit war ein Rechenmodell, das die neuesten Ergebnisse der Forschung über Zweiphasen-Strömungen beinhalten sollte.

Die Modellbildung mit verteilten Parametern erfordert die Lösung der 3 Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie (Kap. 3). Zu ihrer Lösung sind Angaben zum Wärmeübergang auf der Rohrrinnen- und -aussenseite ( $\alpha_i$ ,  $\alpha_a$ ), dem Reibungsdruckverlust ( $\Delta p_R$ ) sowie dem volumetrischen Dampfanteil ( $\epsilon$ ) nötig. Verschiedene halbempirische Gleichungen wurden untersucht. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse aus dem (Kern-)Kraftwerksbereich nicht immer auf verfahrenstechnische Verdampfer anwendbar sind (Kap. 4).

Zur Ueberprüfung des Rechenmodells wurden Messungen an einer Einrohr-Versuchsanlage (Kap. 5) durchgeführt. Folgende Parameter wurden variiert (Kap. 6):

Rohrlänge: 2 und 4 m; Rohrrinnendurchmesser: 20, 35 und 50 mm; Rohr aus Edelstahl oder Kupfer; Stoffe: Wasser und azeotropes Gemisch Wasser-Methoxypropanol; Siedetemperatur 100 bis 150°C; Heizedampf Temperatur 110 bis 170°C. Hauptmessgrößen waren der integrale Wärmedurchgangskoeffizient  $k_m$  und die Umlaufmassenstromdichte  $\dot{m}$ . Die Messdaten sind in den Abb. 91 bis 107 und im Anhang 4 zusammengestellt.

Die Nachrechnung der Versuche mit dem Rechenmodell ergab für die folgende Kombination der möglichen halbempirischen Gleichungen die beste Uebereinstimmung:

- Wärmeübergang auf der Rohrrinnenseite (Verdampfung) mit einer an 4 Zonen angepassten Gleichung von Bennett/Chen (284),

- Wärmeübergang auf der Rohraussenseite (Kondensation) mit 2 neu entwickelten Gleichungen (112, 118),
- Zweiphasen-Reibungsdruckverlust nach Friedel Gl. (175) und
- volumetrischer Dampfanteil nach Rouhani Gl. (194, 196).

Die Modellrechnung gibt die Messdaten von  $k_m$  mit einem mittleren Fehler von  $\pm 6\%$  und jene von  $m^*$  mit  $\pm 18\%$  wieder. Ein Vergleich ist in den Abb. 111 und 112 dargestellt (Kap. 7).

Das Rechenprogramm ist für Tischrechner geeignet und im Anhang 2 gelistet.

An der Versuchsanlage liessen sich auch Strömungsinstabilitäten beobachten (Kap. 8). Sie lassen sich phänomenologisch beschreiben, doch kann wegen der vielen Einflussparameter kein treffsicheres Stabilitätskriterium angegeben werden.

Für den Anwender sind in Kap. 9 einige Hinweise zur Auslegung von Naturumlaufverdampfern angeführt sowie Parametereinflüsse diskutiert. Für eine schnelle Abschätzung ist auch eine einfache Ueberschlagsformel (314) angegeben.

Die Arbeit wird von Peter Kaiser fortgeführt und auf binäre Gemische ausgedehnt.

SUMMARY of "HEAT TRANSFER OF VERTICAL THERMOSIPHON-REBOILERS"

Vertical Thermosiphon Reboilers (VTR) are in-tube boiling, external shell-and-tube evaporators with natural circulation. Heat is transferred by condensing steam or vapors. VTR are widely used in the process industry because they are cheap and compact and provide high heat transfer rates. No circulation-pumps are needed and fouling is poor.

Since heat transfer and circulation rate of VTR are interdependent, the thermohydraulic performance cannot be calculated straight-forward, but has to be fixed by trial-and-error methods. It was the object of this work to develop a design procedure using recent advances in two-phase flow and heat transfer in order to test it against own experimental results.

First the thermal and hydraulic processes inside a VTR are described. A model is formed by solving the conservation laws for mass, momentum and energy simultaneously with one-dimensional finite elements. The model converges to the desired solution if the pressure-balance at the exit of the evaporator tube is equalled. Required semi-empirical correlations in the model are:

- heat transfer inside the tube (evaporation)
- heat transfer outside the tube (condensation)
- two-phase friction pressure drop
- void fraction

Several reliable correlations of the literature are reviewed and checked. Calculations were carried out on a desktop computer (program list enclosed in an appendix).

Experimental work was performed on a one-tube VTR. Parameter ranges: tubelength: 2 and 4 m; tube inner-diameter: 20, 35 and 50 mm; tubewall: stainless steel and copper; testfluids: water and azeotropic mixture water-methoxypropanol; boiling point: 100 to 150°C; steam temperature: 110 to 170°C.

A comparison of the computed results with the test data showed best fit with following semi-empirical correlations :

- heat transfer inside the tube: modified Bennett/Chen-correlation for all the 4 heat transfer regimes
- heat transfer outside the tube: new correlation
- two-phase friction pressure drop: Friedel-correlation
- void fraction: Rouhani-correlation

Average error of the predicted overall heat transfer coefficient  $k_m$  is  $\pm 6 \%$ , that of the mass flow rate  $\pm 18 \%$ .

Several types of flow instabilities of the circulation loop have also been observed. According to the plotted records a classification has been made and the closed loop oscillations phenomenologically described. A generally applicable criterion for stable conditions is not yet available.

Guidelines for a proper thermohydraulic design are given and the influences of the more important parameters are discussed. Finally an over-all-estimation-formula is presented.

Investigations for binary mixtures are carried on by Peter Kaiser.