

perimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung

Von der Fakultät Energietechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Wen-Shih Chang
aus Taiwan

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Müller-Steinhagen
Tag der mündlichen Prüfung: : 2.4.2001

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik

Kurzfassung

Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies-Schüttung

In Rahmen dieser Arbeit wurde der Wärmeübergang an horizontalen Einzel- und sieben versetzt angeordneten Rohren, sowohl in Wasser als auch in der Kies/Wasser-Schüttung in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte untersucht. Als Schüttgut wurden drei verschiedene Steingrößen eingesetzt mit Korngrößenverteilung von 4 bis 8, 8 bis 16 und 16 bis 32 mm (Kies 4/8, Kies 8/16/32). Für die Versuche an Einzelrohren in Wasser allein wurde der Einfluß der Kühlplatte über dem Heizrohr zwischen $H = 5D$ und $H = 30D$ untersucht. Für die Versuche mit mehreren Rohren wurden die Versuche bei den drei Teilungsverhältnissen 1, 2 und 3 durchgeführt, alle Rohre wurden mit gleicher Wärmestromdichte betrieben. Das Ergebnis der Versuche mit Wasser allein zeigt, daß bei einer Höhe $H = 5D$ die Kühlplatte keinen Einfluß mehr auf den Wärmeübergangskoeffizienten hat. Ein Vergleich der Meßwerte mit berechneten Werten nach Korrelationsgleichungen aus der Literatur zeigt eine gute Übereinstimmung. Die maximale Abweichung beträgt 4 %.

Die Messungen an Einzelrohren in der Kies/Wasser-Schüttung ergaben drei untere Strömungsgebiete:

Darcy-Strömung:	$Gr_{max} \leq 7$
Forchheimer-Strömung:	$7 < Gr_{max} \leq 85$
Turbulente Strömung:	$85 < Gr_{max}$

Bei der Berechnung der Grashof-Zahl Gr_{max} ist die nicht wandkorrigierte Wärmestromdichte einzusetzen. Der Wärmeübergang nimmt mit steigender Wärmestromdichte und werdender Korngröße des Kieses zu. Es konnten drei neue Korrelationsgleichungen für den Wärmeübergang ermittelt werden. Sie geben die Meßwerte mit einer mittleren Abweichung von $\pm 10\%$ wieder.

Bei den Versuchen mit sieben versetzt angeordneten Rohren, erhält man außer den Messungen mit Kies 8/16 beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$ immer eine Verringerung der mittleren Nusselt-Zahl Nu_m gegenüber dem Einzelrohr (Bezug auf θ_{∞}). Mit steigender Wärmestromdichte nimmt die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 zu. In Wasser wird die größte mittlere Nusselt-Zahl bei $S/D = 5$ auf, während sich in der Kies/Wasser-Schüttung die größte mittlere Nusselt-Zahl zwischen den Verhältnissen $S/d = 1,47$ und $S/d = 2,95$ ergibt. Die Versuche mit drei übereinander liegenden Rohren ergaben ähnliche Ergebnisse wie die sieben versetzt angeordneten Rohren. Es wurde eine Erhöhung der mittleren Nu_m gegenüber den sieben versetzt angeordneten Rohren festgestellt. Die mittlere Erhöhung betrug zwischen 2,4 % und 10,0 %.

Experimental study of natural convection from tubes in the water-saturated pebble bed

The heat transfer from a horizontal single tube, three vertically spaced tubes and staggered tubes is investigated experimentally, both in water and in a water-saturated pebble bed. Three differently sized pebbles with the particle size distribution of 4 to 8 mm, 8 to 16 mm and 16 to 32 mm (pebble 4/8, pebble 8/16 and pebble 16/32), were used to create pebble beds. For the experiments on a single tube in the water, the effect of the distance H between the cooling plate on top of the vessel to the heated tube was examined between $H = 5D$ and $H = 15D$. For the multi-tube arrangements the experiments with the three pitch ratios $S/D = 3, 5$ and 7 were performed. All of the tubes were heated with the same heat flux.

The results of the experiments with the water alone shows that with a height of $H > 15D$ the distance H has no more influence on the heat transfer coefficient. A comparison of the measured H values with the calculated values according to the correlation equations from the literature shows good agreement. The maximum deviation amounts to 4%.

The measurements on single tubes in the water-saturated pebble bed have brought three different flow regimes:

Darcy flow:	$Gr_{max} \leq 7$
Forchheimer flow:	$7 < Gr_{max} \leq 85$
Turbulent flow:	$85 < Gr_{max}$

Calculating the Grashof number Gr_{max} , the porosity ϵ without wall effect correction was used. The heat transfer increases with increasing heat flux and increasing pebble size. New correlation equations were obtained. The mean deviation is $\pm 10\%$.

For the experiments in the water-saturated packed bed with pebble 8/16 at the pitch ratio $S/D = 5$, the experiments with seven-tube arrangements always gave a smaller average Nusselt number Nu_m in comparison to that of a single tube (in relation to θ_∞). The normalized

Nusselt number Nu_m/Nu_0 increases with increasing heat flux. In water the largest Nusselt number occurs at the pitch ratio $S/D = 5$, while in the water-saturated pebble bed the largest average Nusselt number was found between the ratios $S/d = 1.47$ and $S/d = 1.75$.

The experiments with the three-tube arrangement had similar results as with the seven-tube arrangement. An increase of the average Nusselt number in comparison to the seven-tube arrangement has been obtained. The mean increase of the average Nusselt number is between 15% and 19.8%. For all sizes of pebbles and all pitch ratios the normalized average Nusselt number Nu_m is almost independent of the heat flux at low heat fluxes. At high heat fluxes the normalized average Nusselt number increases slightly with increasing heat flux in the water-saturated pebble bed with pebble 16/32 and pebble 8/16, but decreases in the water-saturated pebble bed with pebble 4/8.

	5
zeichnung	6
chen	9
ung und Problemstellung	12
atur, Meßdatenerfassung und Versuchsdurchführung	15
beschreibung der Versuchsanlage	15
Leitrohre und Anordnungen	17
Kalibrierung der Thermoelemente und Temperaturmessung	19
Auswertung	19
Schätzung des Meßfehlers	20
5.1 Maximaler relativer Fehler der Wärmestromdichte q	21
5.2 Maximaler relativer Fehler der Temperaturdifferenz $\Delta\theta$	21
5.3 Maximaler relativer Fehler des Wärmeübergangskoeffizienten α	22
Versuchsdurchführung	22
Wärmetransport durch freie Konvektion	24
Grashof-, Rayleigh- und Nusselt-Zahl	24
Wärmeübergang an übereinander liegenden Rohren	26
Wärmetransport in porösen Medien	30
Strömung durch ein poröses Medium	30
Freie Konvektion in porösen Medien	35
4.2.1 Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl Ra_S und Nusselt-Zahl Nu_S	35
4.2.2 Klassifizierung der Strömungsform	35
4.2.3 Wärmeübergangsbeziehungen nach Fand und Yamamoto (1990)	36
Stoffwerte des Kiesel und der Schüttung	38
4.3.1 Zusammensetzung des Kiesel und Stoffwerte der Kieselbestandteile	38
4.3.2 Gleichwertiger Partikeldurchmesser	39
4.3.3 Porosität	40
4.3.4 Permeabilität	43
4.3.5 Stoffwerte des Kiesel	43
4.3.5.1 Dichte	43
4.3.5.2 Spezifische Wärmekapazität	44
4.3.5.3 Wärmeleitfähigkeit	44
4.3.6 Effektive Wärmeleitfähigkeit der Kiesel/Wasser-Schüttung	45

- 6 Ergebnisse der Versuche am Einzelrohr in der Kies/Wasser-Schüttung**
 - 6.1 Vergleich mit den Korrelationen aus der Literatur
 - 6.1.1 Vergleich mit der Korrelationsgleichung von Fand und Yamamoto
 - 6.1.2 Vergleich mit der Korrelationsgleichung von Streit (1996)
 - 6.2 Klassifizierung der Strömungsform
 - 6.3 Wärmeübergang am Einzelrohr in der Kies/Wasser-Schüttung
 - 6.4 Erweiterung des Anwendungsbereichs der Korrelationsgleichung
- 7 Ergebnisse der Versuche mit 3 Heizrohren**
 - 7.1 Wandtemperatur der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{∞})
 - 7.2 Wandtemperatur der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})
 - 7.3 Nusselt-Zahlen der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{∞})
 - 7.3.1 Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des Bündels (Bezug auf ϑ_{∞})
 - 7.3.2 Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des Bündels (Bezug auf ϑ_{∞})
 - 7.4 Nusselt-Zahlen der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})
 - 7.4.1 Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})
 - 7.4.2 Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})
- 8 Ergebnisse der Versuche mit 7 Heizrohren**
 - 8.1 Wandtemperatur der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{∞})
 - 8.2 Wandtemperatur der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})
 - 8.3 Nusselt-Zahlen der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{∞})
 - 8.3.1 Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des Bündels (Bezug auf ϑ_{∞})
 - 8.3.2 Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des Bündels (Bezug auf ϑ_{∞})
 - 8.4 Nusselt-Zahlen der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})
 - 8.4.1 Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})
 - 8.4.2 Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})
- 9 Zusammenfassung**

A: Zusammenstellung der Ergebnisse der Wärmeübergangsmessungen	132
B: Näherungsweise Berechnung der Zuströmtemperatur	143
C: Gleichungen zur Berechnung der Nusselt-Zahl Nu_{F1} aus der Wärmestromdichte	144
D: Gleichungen zur Berechnung der Nusselt-Zahl Nu_S aus der Wärmestromdichte	145
E: Berechnete Ergebnisse der Nusselt-Zahl-Verhältnisse bezogen auf die jeweilige Anströmtemperatur	146