

Berman, L.D.

STOFF- UND WÄRMEÜBERGANG AN DER OBERFLÄCHE EINES
WASSERRIESELFILMS

Übersetzung aus:

Žurnal tehničkoj fiziki. Moskva, 9 (1939),
Nr 2, S. 148 - 159.

Russ.: **ИСПАРЕНИЕ И ТЕПЛОТДАЧА С ПОВЕРХНОСТИ ДВИЖУЩЕЙСЯ
ВОДЯНОЙ ПЛЕНКИ**

Isparenie i teplootdača s poverchnosti dvižuščesja
vodjanoj plenki

In der Wärme- und Kältetechnik sind verschiedene Apparate weit verbreitet, die zur Kühlung der Flüssigkeit neben dem konvektiven Wärmeübergang auch ihre Oberflächenverdampfung verwenden. Als Methode zur Vergrößerung der freien Flüssigkeitsoberfläche benutzt man die Möglichkeit, die Flüssigkeit in Form eines dünnen Filmes über irgendeine Oberfläche fließen zu lassen. Zu solchen Apparaten gehören insbesondere die Kühltürme mit Rieselfilmeinbauten, in denen das Wasser an den Wänden der senkrechten rechteckigen Kanäle herabfließt und durch die ihm entgegenströmende Luft gekühlt wird.

Aus der Literatur sind uns nur zwei ausführliche experimentelle Untersuchungen zum Stoff- und Wärmeübergang von der Oberfläche eines Flüssigkeitsfilms, der in senkrechten Kanälen herabfließt, bekannt. Es sind die Experimente von Gilliland und Sherwood¹⁾, die auf die Untersuchung der Verdunstung im beinahe isothermen Zustand

¹⁾ Gilliland, E.R., Sherwood. T.K.: Diffusion of Vapors into Air Streams.
In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C., 26 (1934), Nr 5, S. 516 - 523.

beschränkt waren, und die Versuche von Matousek²⁾, die zwar auch die nichtisothermen Bereiche umfassen, aber Ergebnisse lieferten, die von den Angaben von Gilliland und Sherwood stark abweichen (bis 50 %). Ergebnisse von sehr wenigen Versuchen (insgesamt fünf) wurden von Chilton und Colborn³⁾ veröffentlicht. All die oben genannten Versuche befaßten sich mit Flüssigkeitsfilmen bei innenberieselten runden Rohren.

Die beträchtliche Differenz der Ergebnisse aus den wenigen veröffentlichten Arbeiten untereinander sowie das Fehlen jeglicher Versuchangaben für den Fall einer Filmströmung in rechteckigen Kanälen hat das Interesse an einer experimentellen Untersuchung der Verdunstung und des Wärmeübergangs unter Bedingungen, die nach Möglichkeit den in Kühltürmen mit Rieselfilmeinbauten vorkommenden ähnlich sind, geweckt. Die Versuche wurden im Labor für Dampfturbinen des F.-E. Derschinski-Institut für Wärmetechnik der UdSSR^{3a)} in den Jahren 1936 - 1937 durchgeführt.

Die Versuchsanlage

Die Meßstrecke der Versuchsanlage war ein senkrechter rechteckiger Kanal, der aus zwei Glasplatten mit an den Rändern dazwischenliegenden Holzlatten gebildet wurde (Abb. 1). Die Abmessungen der Platten betragen 0,5 m in der Breite (zwischen den Latten) und in der Höhe 1 m.

Das auf die entsprechende Temperatur aufgeheizte Wasser trat aus dem Überlaufbehälter (Abb. 2) in die beiden Aufgaberinnen ein, die an der Plattenaußenseite befestigt waren. Das Wasser floß über den

²⁾ Matousek, Robert: Über die Wärmeübergangs- und Verdunstungszahl bei künstlich belüfteten Verdunstungskühlern mit senkrechten ebenen oder zylindrischen von Wasser berieselten Wände. Dissertation. Technische Hochschule München, 1933.

³⁾ Chilton, T.H., Colborn, A.P.: Mass Transfer (Absorption) Coefficients. Prediction from Data on Heat Transfer and Fluid Friction. In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C., 26 (1934), Nr 11, S. 1183 - 1187.

^{3a)} VTI - Vsesojuznyj ordena Trudovogo krasnogo Znameni teplotekhnicheskij institut F.E. Dzeržinskogo (Anm.d.Übers.).

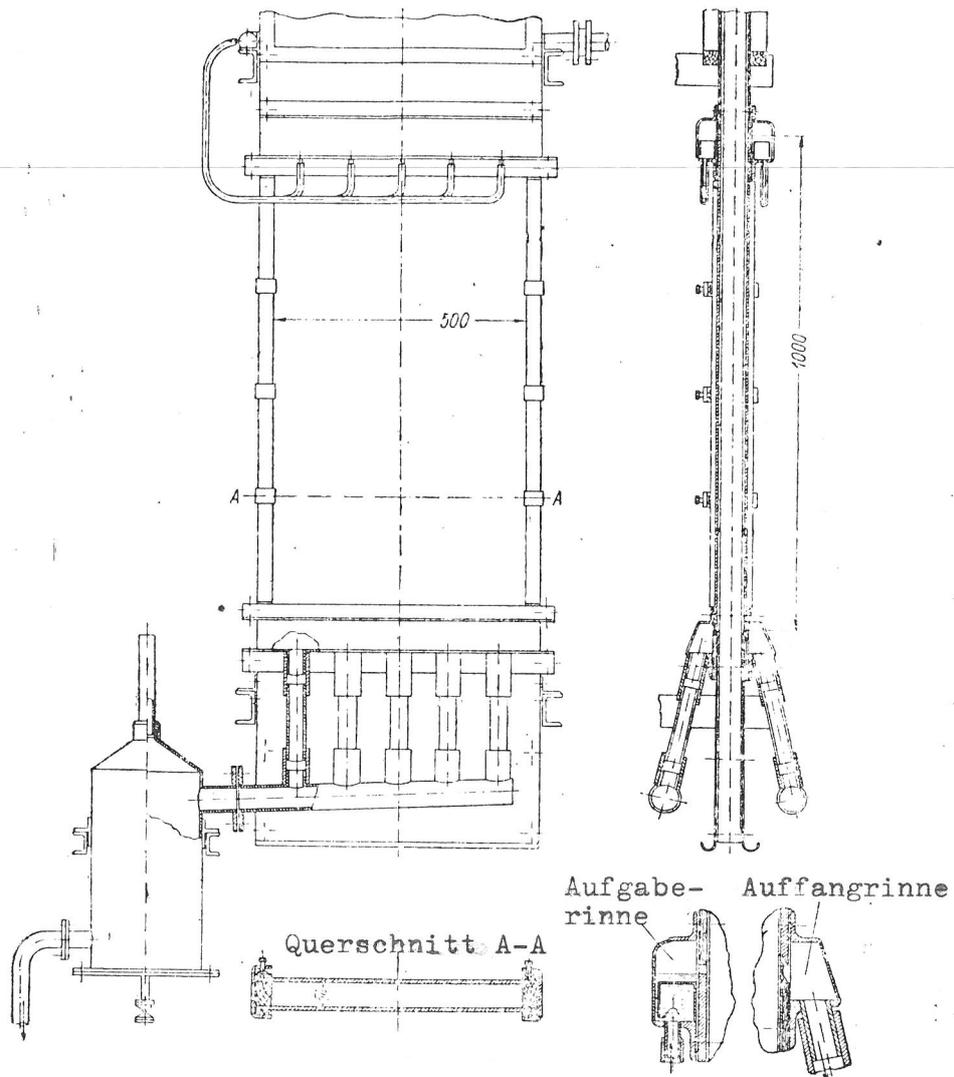


Abb. 1. Meßstrecke der Versuchsanlage

oberen Rand der Aufgaberinnen und danach in einem dünnen Film, der die gesamte innere Oberfläche der Platten benetzte, herab und wurde unten über abgeschrägte Kanten in die Auffangrinnen geleitet und aus diesen in den Meßbehälter. In den Versuchen mit erhitztem Wasser waren die Platten außen mit Asbestplatten isoliert. Mit Hilfe eines freistehenden Ventilators wurde Luft durch die Anlage gesaugt. Es gab keinen Beruhigungsabschnitt auf der Lufteintrittsseite.

Die Durchflußmenge des auf die Platten gelangenden Wassers wurde mit Hilfe einer geeichten gespannten Membrane und zwei parallel-geschalteten U-förmigen Wasserdifferenzdruckmessern bestimmt. Zur Bestimmung der Luftmenge wurden ebenfalls austauschbare gespannte Membranen verwendet, in denen das Druckgefälle über zwei Mikromanometer berechnet

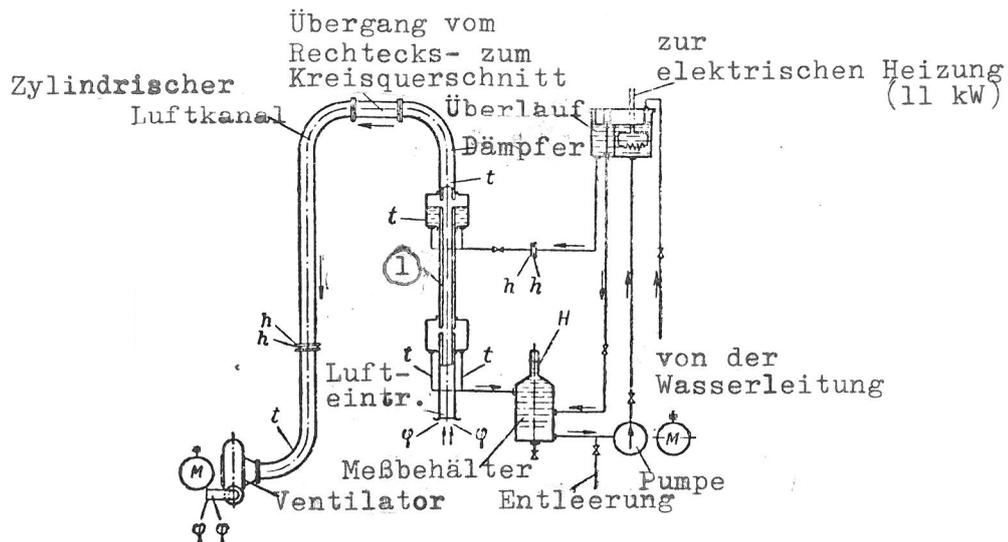


Abb. 2. Schematische Darstellung der Versuchsanlage:
1 - Meßstrecke (rechteckiger Kanal), siehe Abb. 1.

wurde. Die Verdunstungswassermenge wurde nach dem Flüssigkeitsstand im unteren Behälter mittels eines Meßzylinders bestimmt, der sich unter einem konischen Deckel befand. Der Meßfehler konnte dabei bis zu $\pm 5\%$ betragen.

Die Wassertemperatur vor und hinter der Meßstrecke wurde mit Quecksilberthermometern gemessen. Bei nichtisothermem Zustand wurde auch noch die Kühlzonenbreite mit zwei geeichten Differentialthermoelementen (Kupfer-Konstanten) gemessen. Mit den selben Thermoelementen wurden die Verteilung der Wassertemperatur über die gesamte Plattenhöhe und der Temperaturunterschied der ein- und austretenden Luft gemessen. Um die Verteilung der Wassertemperatur messen zu können, wurde eine der Glasplatten durch eine Holzplatte mit darauf angebrachten Thermoelementen ersetzt. Der mittlere Lufttemperaturunterschied wurde in etlichen Versuchen nach den Meßdaten von fünf Differentialthermoelementen, die gleichmäßig über die Länge der Kanalachse verteilt waren, bestimmt. In den restlichen Versuchen waren es nur noch zwei Thermoelemente, deren mittlere Werte ausreichend gut mit den Mittelwerten der vorgenannten fünf Thermoelemente übereinstimmten. Alle Thermoelemente waren nach dem Lindek-Rote-Schaltbild angeschlossen.

Temperatur und Feuchtigkeit der eintretenden Luft wurden mit zwei Assmann-Aspirationspsychrometern gemessen, die der austretenden Luft mit zwei August-Psychrometern. Die Quecksilberthermometer zur Messung der Lufttemperatur wurden bereits unmittelbar nach der Meßstrecke und vor dem Ventilator angebracht.

Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse wurden nach der Ähnlichkeitstheorie in Form einer Korrelation der Nusselt-Zahlen (Nu oder Nu') mit den Reynolds-Zahlen (Re) ausgewertet. Für den konvektiven Wärmeübergang ist dabei $Nu = \alpha d / \lambda$, wobei α in $\text{kal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$ die Wärmeübergangszahl, d in m den gleichwertigen Durchmesser, der als doppelter Plattenabstand bestimmt wurde, und λ in $\text{kal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}$ den Wärmeleitkoeffizient der Luft wiedergeben; für die Verdunstung ist $Nu' = \beta_p d / k_p$, mit β_p in $1/\text{h}$ als Stoffübergangskoeffizient und k_p in m/h als Diffusionskoeffizient des Systems Wasserdampf/Luft, bezogen auf den Gradienten der Dampfteildrücke. Die für die dimensionslosen Kennzahlen benötigten Stoffwerte wurden mit der mittleren Lufttemperatur gebildet. Der Diffusionskoeffizient wurde nach Mach bestimmt.

Die Stoff- und Wärmeübergangskoeffizienten wurden nach den folgenden Gleichungen berechnet:

$$\beta_p = \frac{G_v}{(P'' - P)_m F} \quad \text{und} \quad a = \frac{G_l \cdot c_{pl} \Delta \vartheta}{(t - \vartheta)_m \cdot F},$$

mit G_v Verdunstungswassermenge in kg/h ; $(P'' - P)_m$ mittlere Differenz der Dampfteildrücke an der Flüssigkeitsoberfläche und im Luftstrom in kg/m^2 ; G_l Luftmenge in kg/h ; c_{pl} spezifische Wärmekapazität der feuchten Luft in $\text{kal}/\text{kg} \cdot \text{C}$; $\Delta \vartheta$ Lufttemperaturänderung in der Meßstrecke in $^{\circ}\text{C}$; $(t - \vartheta)_m$ mittlere Temperaturdifferenz von Wasser und Luft in $^{\circ}\text{C}$ und F Plattenoberfläche in m^2 .

Da sich die Differenz der Teildrücke und der Temperaturen im Eintritts- und Austrittsquerschnitt der Meßstrecke nicht mehr als 20 % voneinander unterscheiden, wurden die Werte $(P'' - P)_m$ und $(t - \vartheta)_m$ als arithmetische Mittel aus den entsprechenden Differenzen in den besagten Querschnitten bestimmt. Die Werte P'' wurden aus den Tabellen

für gesättigten Wasserdampf in Abhängigkeit von der Wassertemperatur ermittelt, die Werte P hingegen nach der von Brooks⁴⁾ genauer gefaßten psychrometrischen Epjoin-Ferrel-Gleichung berechnet.

Bei der Berechnung der Reynoldszahl $Re = wd/\nu$ (ν Koeffizient der kinematischen Viskosität der Luft in m^2/s) wurde die relative Luftgeschwindigkeit w (m/s) zwischen der Rieselfilmoberfläche und der Luftströmung eingesetzt. Die Strömungsgeschwindigkeit des Films wurde dabei nach der Gleichung von Nusselt⁵⁾ bestimmt:

$$w_F = \sqrt[3]{\frac{g_w}{3\gamma\eta}}$$

hier bezeichnen g_w den auf die Plattenbreite bezogenen Wassermassenstrom in $kg/m \cdot h$; γ das spezifische Gewicht von Wasser in kg/m^3 und η den Koeffizienten der dynamischen Viskosität des Wassers in $kg \cdot s/m^2$.

Beobachtungen des Feuchtigkeitstransports

Die Genauigkeit der durchgeführten Messungen könnte stark beeinträchtigt werden, wenn es einen merklichen Transport der Wassertropfen gibt, die durch die strömende Luft von der welligen Filmoberfläche mitgerissen werden. Ein mit dem bloßen Auge sichtbares Mitreißen der Tropfen wurde bei Luftgeschwindigkeit über 3 - 4 m/s beobachtet; geringere Geschwindigkeiten entsprechen dabei einem höheren Wasserdurchsatz.

4) Brooks, D.B.: Psychrometric Charts for High and Low Pressures. In: Miscellaneous Publications. U.S. Department of Commerce. National Bureau of Standards. Washington, D.C., 146 (1935), S. 2 - 8.

5) Nusselt, Wilhelm: Der Wärmeaustausch am Berieselungskühler. In: VDI-Z. Düsseldorf, 67 (1923), Nr 9, S. 206 - 210. Das besagte Verfahren zur Bestimmung der Filmgeschwindigkeit gilt selbstverständlich nur näherungsweise, da die von Nusselt angegebene Gleichung erstens unter der Voraussetzung einer unbewegten angrenzenden Gasphase abgeleitet wurde und zweitens, den Wert der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und nicht die Geschwindigkeit an der freien Flüssigkeitsoberfläche angibt. Da die Geschwindigkeiten des Rieselfilms w_F und der Luftströmung einander entgegengerichtet sind, müssen ihre Beträge für die Bildung der Relativgeschwindigkeit mit verschiedenen Vorzeichen versehen werden. Weil die Oberflächengeschwindigkeit des Rieselfilms nicht bestimmt werden kann, ist auch die genaue Berechnung der relativen Luftgeschwindigkeit in der vorliegenden Arbeit nicht möglich.

Zur Feststellung des Transports bei niedrigeren Luftgeschwindigkeiten wurde folgendes Verfahren angewandt. Im Wasser wurde Eisen(III)-chlorid (1,25 %) aufgelöst, und im Luftkanal wurde nach der Meßstrecke ein Glasrohr untergebracht, das in Filterpapier eingeschlagen war; das Filterpapier wurde im voraus mit 4%iger Ammoniumrhodanidlösung getränkt und getrocknet. Wenn Tropfen auf das Papier fielen, bildete sich hellrotes Eisenrhodanid. Durch ein solches Verfahren ließen sich auch kleinste Tropfen feststellen. Die Beobachtungen zeigten, daß feine Tropfen auch bei Luftgeschwindigkeiten von 0,7 m/s transportiert werden. Je nach Zunahme von Luftgeschwindigkeit und Wasserdurchsatz werden Menge und Abmessungen der Wassertropfen größer (Abb. 3).

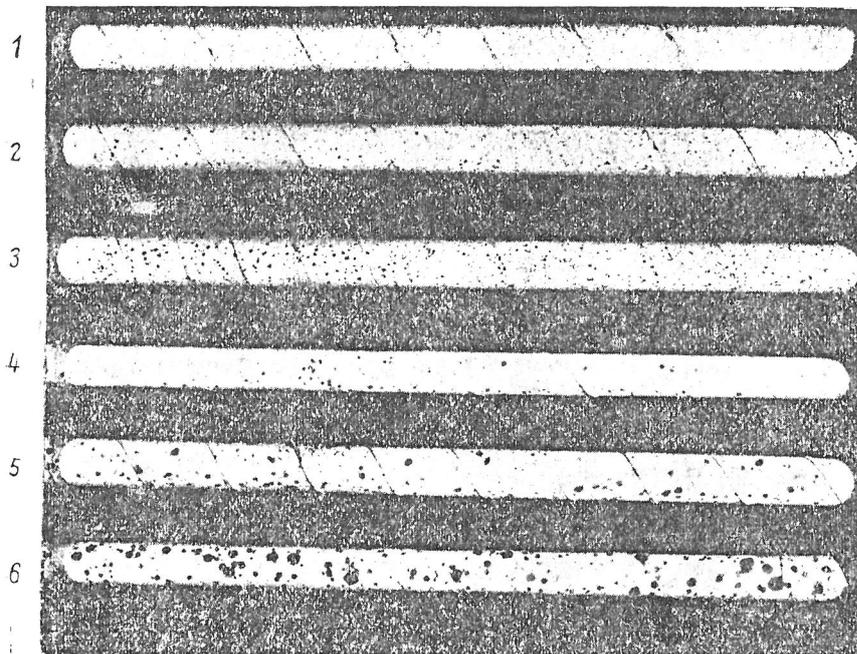


Abb. 3. Wassertropfen, die nach der Meßstrecke erfaßt wurden. Die Beobachtungen wurden unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

Nr. des Rohrs	1	2	3	4	5	6
Luftgeschwindigkeit m/s	0.74	0.10	1.10	1.90	2.25	3.92
Wasserdurchflußmenge, kg/m·h	400	400	740	400	400	400

Jedes Rohr war 30 min lang im Luftkanal.

Ausgehend von den beschriebenen Vorbeobachtungen wurde die maximale Luftgeschwindigkeit in den Versuchen auf 3,8 - 4,4 m/s bei einem Wasserdurchsatz von 400 - 450 kg/m.h beschränkt. Die quantitative Abschätzung des Transports läßt sich nur ziemlich grob durchführen. Diese ergäbe, nachdem sie aus Vorsicht mit bewußter Überbewertung des ermittelten Ergebnisses durchgeführt worden wäre, daß der Transport unter ungünstigsten Bedingungen (isothermer Zustand) bei der angenommenen maximalen Luftgeschwindigkeit nicht mehr als 0,5 % über der verdunsteten Wassermenge liegen darf. Der geringe Anteil an mitgerissenen Tropfen kann sich auch nicht wesentlich auf die Genauigkeit der Bestimmung des Dampfteildrucks in der austretenden Luft auswirken.

Ungünstigere Verhältnisse gab es bei der Temperaturmessung der austretenden Luft hinter der Meßstrecke. Um den Einfluß der mitgerissenen Tropfen zu verringern, wurden die Lötstellen der in den Luftkanal hinter der Meßstrecke eingebrachten Thermoelemente mit einer Vaselinschicht überzogen. Diese Maßnahme führte zu einem Teilerfolg jedoch konnte der Einfluß mitgerissener Tropfen auf das Ausgangssignal der Thermoelemente dadurch offensichtlich nicht völlig ausgeschlossen werden.

Versuchsergebnisse

Mit der beschriebenen Anlage wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Die I. Reihe wurde bei einem nahezu isothermen Verdunstungszustand durchgeführt; die II. Reihe bei nichtisothermem Zustand. Das aufzugebene Wasser wurde in der II. Versuchsreihe auf 40 und 50° aufgeheizt. In den ersten beiden Versuchsreihen betrug der Plattenabstand 54 mm ($l/d = 9,26$). Die III. Reihe sollte den Einfluß des Verhältnisses l/d erklären. Dafür wurde der Plattenabstand auf 20,5 mm ($l/d = 24,4$) verringert.

Die Bereiche der wesentlichen Versuchsparameter in den drei Versuchsreihen sind in Tab. 1 angegeben. Aufgrund des beträchtlichen Wassergehalts der austretenden Luft wurde die Temperatur des aufgegebenen Wassers in der III. Reihe auf etwa 30° begrenzt. Der

Wasserdurchsatz betrug 430 kg/m.h. Nur ein geringer Teil der Versuche der I. Reihe wurden bei anderen Wasserdurchsätzen durchgeführt.

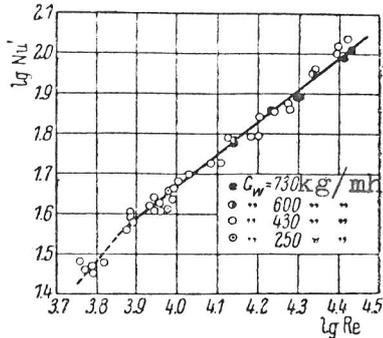


Abb. 4. I. Versuchsreihe. Abhängigkeit $Nu' = f(Re)$

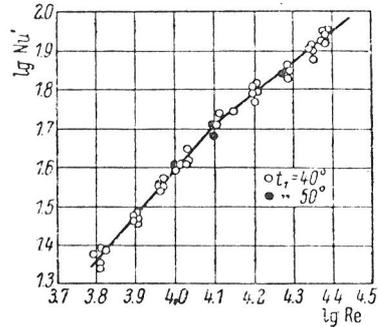


Abb. 5. II. Versuchsreihe. Abhängigkeit $Nu' = f(Re)$

In den Abb. 4 - 7 sind die ermittelten Abhängigkeiten der dimensionslosen Kennzahlen Nu und Nu' von Re nach logarithmischer Umwandlung dargestellt. Die Versuchspunkte für die Kennzahl des Stoffübergangs Nu' gelten mit wenigen Ausnahmen mit einer Abweichung, die nicht über $\pm 5\%$ liegt. Eine größere Abweichung stellt man bei den Versuchspunkten für die Kennzahl des Wärmeübergangs Nu fest. Letzteres läßt sich

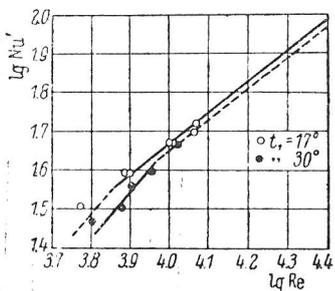


Abb. 6. III. Versuchsreihe. Abhängigkeit $Nu' = f(Re)$. Die obere Linie entspricht der ersten Versuchsreihe bei $l/d = 9,26$.

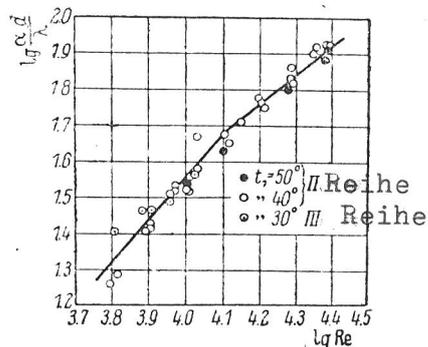


Abb. 7. II. und III. Versuchsreihe. Abhängigkeit $Nu = f(Re)$

durch die bereits genannte Schwierigkeit beim genauen Messen der Lufttemperatur nach der Meßstrecke erklären. Dies kommt auch in der Abweichung der Punkte für das Verhältnis α/β_p (Abb. 8) zum Ausdruck.

Die Meßergebnisse der Versuche zum Wassertemperaturverlauf über die gesamte Plattenhöhe sind in Abb. 9 angegeben.

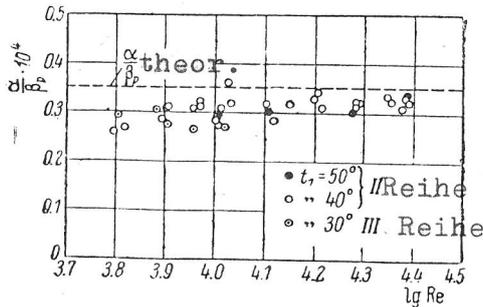


Abb. 8.. II. und III. Versuchsreihe. Verhältnis α/β_p .

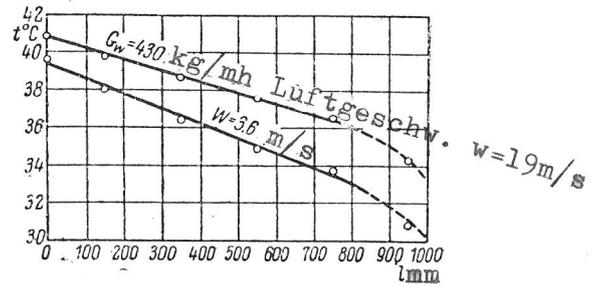


Abb. 9. II. Versuchsreihe. Abhängigkeit $t=f(l)$, wobei l der Abstand vom oberen Plattenrand ist.

Diskussion der Versuchsergebnisse

Die durchgeführten Versuche bestätigen die wesentlichen Schlußfolgerungen, die aus der Analogie zwischen den Erscheinungen der Wärmeleitfähigkeit und der Diffusion hervorgeht. Insbesondere wird die Schlußfolgerung bestätigt, daß die Korrelationsgleichungen zwischen den analogen Kennzahlen des Wärmeübergangs und des Stoffübergangs identisch sein müssen.⁶⁾ Für den Fall der erzwungenen Konvektion eines gasförmigen Stoffes können diese Gleichungen folgendermaßen dargestellt werden:

$$Nu = C \cdot Re^m; \quad Nu' = C_1 \cdot Re^{m_1}.$$

Für die Exponenten m und m_1 liefern die durchgeführten Versuche, in Übereinstimmung mit den theoretischen Schlußfolgerungen, untereinander übereinstimmende Werte. Für den Bereich der ausgebildeten turbulenten Luftströmung beträgt der ermittelte Wert m (wie auch m_1) 0,8; dieses Ergebnis stimmt auch mit den Versuchsangaben über den Wärmeübergang in Rohren mit festen Wänden gut überein.

⁶⁾ Schmidt, Ernst: Verdunstung und Wärmeübergang. In: Gesundheits-Ingenieur. gi. München, 52 (1929), Nr 29, S. 525 - 529.
Nusselt, Wilhelm: Wärmeübergang, Diffusion und Verdunstung. In: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. ZAMM. Berlin, 10 (1930), Nr 2, S. 105 - 121.

Bei der Verdunstung von der Oberfläche eines Rieselfilms ist der Koeffizient C_1 jedoch höher als zu erwarten wäre, wenn man von den Versuchen über den Wärmeübergang an ebenen Platten ausgeht (Abb. 10)⁷⁾. Dies wurde auch in den Versuchen von Gilliland und Sherwood festgestellt. Ackermann⁸⁾ erklärt ein solches Ergebnis damit, daß die tatsächliche Oberfläche des welligen Filmes größer ist als der für die Berechnungen herangezogene Wert für die Plattenoberfläche. Mit dieser Erklärung kann man jedoch kaum einverstanden sein. Wie theoretische Abhandlungen⁹⁾ sowie Beobachtungen der Abmessungen der Wellen auf der Filmoberfläche zeigen, kann sich eine Vergrößerung der Oberfläche nicht so stark auf die verdunstende Flüssigkeitsmenge auswirken. Als Erklärung von größerer Wahrscheinlichkeit kann der Unterschied im hydrodynamischen Aufbau der Strömung bei Bewegung eines Fluids entlang fester metallischer Oberflächen, die normalerweise technisch glatt sind, und entlang einer bewegten welligen Filmoberfläche angesehen werden.¹⁰⁾

Ein Ergebnis, das sich von dem genannten unterscheidet, wurde von Matousek ermittelt; nach seinen Angaben ist C_1 beträchtlich niedriger als aus den Versuchen über den Wärmeübergang an ebenen Platten hervorgeht (Abb. 10). Matouseks Angaben

⁷⁾ Bezieht sich auch auf den Koeffizienten C.

⁸⁾ Ackermann, G.: Diffusion von Dämpfen in schäumende Luft.
In: Forschung im Ingenieurwesen. Düsseldorf, 6 (1935), Nr 1,
S. 53 - 55.

⁹⁾ Melville, H.W.: A Note on Evaporation from Irregular Surfaces.
In: Transactions of the Faraday Society. Aberdeen, 32 (1936),
Teil 7, S. 1017 - 1020.

¹⁰⁾ Da der Zustand der Filmoberfläche von der Art der Flüssigkeit (ihren Stoffgrößen), der Strömungsgeschwindigkeit und -bedingungen abhängen muß, kann man den Versuch von Gilliland und Sherwood, die allgemeine Abhängigkeit $Nu' = f(Pr', Re)$ auf der Grundlage von Versuchen zu ermitteln, die mit verschiedenen Verdunstungsflüssigkeiten und bei unterschiedlichen Strömungsrichtungen der Luft durchgeführt wurden, für nicht genügend begründet halten. Von diesem Standpunkt aus kann der Unterschied der Ergebnisse aus den Versuchen mit Parallelströmung und Luftgegenströmung nur zwangsläufig erscheinen; dieses Ergebnis wurde von den beiden unter Verwendung der Luftgeschwindigkeit für die Bildung der Re-Zahl ermittelt. Möglicherweise lassen sich die im Vergleich mit dem Wärmeübergang an ebenen Platten höheren Exponenten bei Pr' und Re in der Gleichung von Gilliland und Sherwood auch durch eine derartige Verallgemeinerung der Versuchsangaben erklären.

können jedoch weder durch unsere Versuche noch durch die amerikanischen Forscher (Gilliland und Sherwood, Chilton und Colborn) bestätigt wurden.

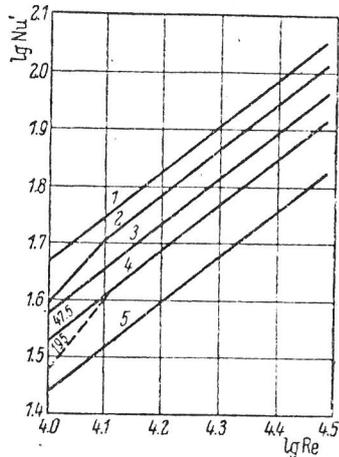


Abb. 10. Vergleich mit den Versuchsangaben über den Wärmeübergang an ebenen Platten (Kraussold - runde Rohre, Washington und Marks - rechteckige).

1 - I. Reihe: $l/d=9,26$; 2 - II. Reihe: $l/d=9,26$; 3 - Kraussold: $l/d=9,26$; 4 - Washington und Marks: $l/d=47,5$ bis $195,5$; 5 - Matousek: $l/d=14,2$ bis $49,8$.

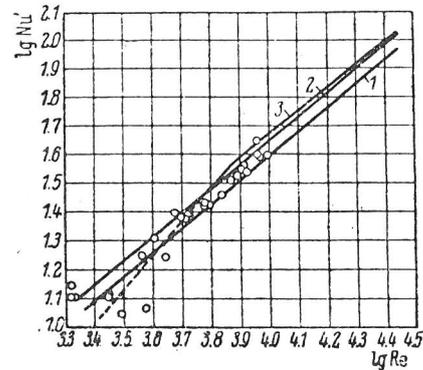


Abb. 11. Vergleich mit den Versuchsangaben von Gilliland und Sherwood.

1 - Gilliland und Sherwood: $Nu' = 0,23 Re^{0,83} Pr^{0,44}$ bei $l/d=43,8$; 2 - Gilliland und Sherwood, berechnet für $l/d=9,26$ mit einer Berichtigung um k_c ; 3 - eigene Versuche, II. Reihe: $l/d=9,26$.

Anmerkung: Die Punkte beziehen sich auf die Versuche von Gilliland und Sherwood an Wasser bei Luftgegenströmung unter Hinzunahme der Berichtigung um l/d und k_c .

Die ermittelten Werte α/β_p im Bereich der ausgebildeten turbulenten Luftströmung schwanken um einen praktisch konstanten Mittelwert (Abb. 8). Dieser liegt etwas unter dem theoretischen¹¹⁾, was da-

11) Der theoretische Wert α/β_p wurde nach Ackermann berechnet. Siehe: Ackermann, G.: Wärmeübergang und molekulare Stoffübertragung im gleichen Feld bei großen Temperatur- und Partialdruckdifferenzen. In: Forschung im Ingenieurwesen. Beil.: VDI-Forschungsheft. Düsseldorf, 382 (1937), S. 1 - 16.

durch erklärt werden kann, daß die mit den Thermoelementen gemessene Temperaturdifferenz der Luft aufgrund des Einflusses der durch die Luft transportierten feinen Tropfen geringer ist. Die Versuchspunkte für das Verhältnis α/β_p lassen keine irgendwie geartete deutliche Tendenz einer Abhängigkeit von der Wassertemperatur erkennen. Daraus geht hervor, daß die Versuche die beträchtlichen Abweichungen der Größe α/β_p von ihrem theoretischen Wert (2 - 3 mal größer), die bei Überarbeitung der Versuche an Kühltürmen ermittelt wurden¹²⁾ nicht bestätigt, aber auch nicht die Annahme, daß die merkliche Abnahme der Partialdrücke des Dampfes an der Flüssigkeitsoberfläche in Beziehung zur Temperatur steht¹³⁾.

Es sollte noch die enge Übereinstimmung der Versuchsdaten für die Verdunstung von der Filmoberfläche in einem engen rechteckigen Kanal und innerhalb eines runden Rohres erwähnt werden. Dies geht aus Abb. 11 hervor, wo die Ergebnisse unserer ersten Versuchsreihe mit der von G i l l i l a n d und S h e r w o o d ermittelten Kurve verglichen werden. In dieser Darstellung wurde die zweite Kurve nach G i l l i l a n d und S h e r w o o d gezeichnet, wobei bei der Konstruktion die Berichtigung um die Größe l/d berücksichtigt wurde; diese Größe weicht stark von der in unseren Versuchen geltenden ab (43,8 gegenüber 9,26); berücksichtigt wurde auch die Berichtigung um den Wert des Diffusionskoeffizienten¹⁴⁾. Bei Hinzunahme der Berichtigung um l/d wurde angenommen, daß Nu' proportional ist zu $(l/d)^{-0,054}$ (K r a u s s o l d). Wenn man nach R u b i n š t e j n¹⁵⁾ annimmt, daß Nu' proportional ist

¹²⁾ Robinson, C.S.: The Design of Cooling Towers.
In: Mechanical Engineering. Easton, Pa., 45 (1923), Nr 2, S. 99 - 102.
Merkel, Friedrich: Verdunstungskühlung.
In: Forschung im Ingenieurwesen. Beil.: VDI-Forschungsheft. Düsseldorf, 275 (1925).
Wolff, Friedrich: Untersuchungen über die Wasserrückkühlung in künstlich belüfteten Kühlwerken.
München/Berlin: Oldenbourg, 1928.

¹³⁾ Ackermann, G.: Theorie der Verdunstungskühlung.
In: Ingenieur-Archiv. Berlin, 5 (1934), S. 124 - 146.

¹⁴⁾ Der Wert des Diffusionskoeffizienten für das System Wasserdampf-Luft ist nach G i l l i l a n d um annähernd 4 % größer als nach M a c h .

¹⁵⁾ Я. М. Рубинштейн. Отчет ВТИ, № 1000, 1937 г.
Rubinštejn, Ja.M.
In: Otčet. Vsesojuzhyj Teplotečničeskij Institut. Moskva, 1000 (1937).

zu $1 + (1/d)^{-0,7}$, dann zeigt sich die Übereinstimmung der Kurve noch deutlicher. Mann sollte erwähnen, daß die Versuche von G i l l - l i l a n d und S h e r w o o d unter Verwendung eines Beruhigungsabschnitts durchgeführt wurden.

Im Unterschied zu den Versuchen von G i l l i l a n d und S h e r w o o d sowie auch von M a t o u s e k läßt sich bei unseren Versuchen ein Knick in der Kurve $Nu' = f(Re)$ feststellen, der besonders deutlich in der zweiten Versuchsreihe zum Vorschein kommt (Abb. 5). Einen entsprechenden Knick weist auch die Kurve für den Wärmeübergang auf (Abb. 7). Die Untersuchungen zum Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömungsform bei durchströmten Rohren¹⁶⁾ lassen den Schluß zu, daß dieser Knick den Übergangsbereich und den Bereich der ausgebildeten turbulenten Strömung gegeneinander abgrenzt. Mit abnehmender Re-Zahl fällt dabei die Nu'- (und auch die Nu-) Zahl im Übergangsbereich stärker ab als im turbulenten. Letzteres stimmt völlig mit der gegenwärtigen Vorstellung von der Struktur der Strömung in den besagten Bereichen überein und wird auch durch eine Reihe von Untersuchungen über den Wärmeübergang an ebenen Platten bestätigt¹⁷⁾.

- 16) Л. Шиллер. Движение жидкостей в трубах. ОНТИ. М.—Л. 1936.
Šiller, L.: Dviženie židkostej v trubach.
Moskva-Leningrad: Vereinigter wissenschaftlich-technischer Staatsverlag, 1936.
Übersetzung aus dem Deutschen:
Schiller, L.: Strömung in Rohren. Handbuch der Experimental-Physik. Hrsg. von W.Wien und F.Harms.
Leipzig, 1932.
- 17) Kraussold, H.: Die Wärmeübertragung an Flüssigkeiten in Rohren bei turbulenter Strömung.
In: Forschung im Ingenieurwesen. Düsseldorf, 4 (1933), Nr 1, S. 39 - 44.
А. Гухман. Физические основы теплопередачи, т. I, ОНТИ 1934;
Guchman, A.A.: Fizičeskie osnovy teploperedaci. T. 1.
Moskva-Leningrad: Vereinigter wissenschaftlich-technischer Staatsverlag, 1934.
[Physikalische Grundlagen der Wärmeübertragung, Band 1; russ.]
Л.Н. Ильин. Отчет ЦКТИ. № 1024, 1936;
Il'in, L.N.
In: Otčet. Central'nyj naučno-issledovatel'skij kotloturbinnyj institut. Moskva, 1936, Nr 1024.
Washington, Lawrence, Marks, William M.: Heat Transfer and Pressure Drop in Rectangular Air Passages.
In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C., 29 (1937), Nr 3, S. 337 - 345.

Aus der Sicht der hydrodynamischen Struktur der Strömung besteht der Unterschied zum Übergangsbereich darin, daß die bei ausgebildeter turbulenter Strömung sehr geringe laminare Schicht Ausmaße annimmt, die mit den Abmessungen eines turbulenten Kerns vergleichbar sind. Damit könnte die starke Intensitätsabnahme der Stoff- und Wärmeübergangsvorgänge im Übergangsbereich erklärt werden.

Die in Abb. 11 dargestellte Kurve nach Gilliland und Sherwood ist das verallgemeinernde Resultat aller Versuche dieser beiden Forscher. Es ist interessant festzustellen: wenn man nur jene Versuche heranzieht, die unter Bedingungen durchgeführt wurden, welche unseren Versuchsbedingungen nahekommen (Verdunstung von Wasser bei Luftgegenströmung), dann kann man im Bereich der Re-Werte unter $\sim 5\ 000$, ungeachtet der starken Streuung der Punkte¹⁸⁾ Abb. 11), ebenfalls eine stärkere Abnahme von Nu' beobachten, wie sie für den Übergangsbereich bezeichnend ist.

Die Abweichung der einzelnen Untersuchungen hinsichtlich der absoluten Re-Werte, bei denen der erwähnte Knick in der Kurve beobachtet wird, sowie der unterschiedliche Verlauf dieser Kurve im Übergangsbereich kann man durch den Einfluß der Flüssigkeits-(Luft-)Eintrittsbedingungen, der Kanalform und des Zustands seiner Wände erklären. In unseren Versuchen dürfte sich besonders der geringe Wert der Relation l/d auswirken. Daneben muß die Art des Übergangs von der einen Strömungsform zur anderen offensichtlich auch von der Größe und Richtung des Wärmestroms, und im Falle der Verdunstung auch vom Massenstrom abhängen. Damit kann man jenen Umstand in Verbindung bringen, daß unsere Versuche bei zunehmender Abweichung von isothermen Bedingungen des Vorgangs eine Verschiebung des Knicks in der Kurve $Nu' = f(Re)$ zugunsten der höheren Re-Werte ergaben (von $\sim 7\ 300$ in der ersten Versuchsreihe bis $\sim 12\ 500$ in der zweiten).

In früheren experimentellen Untersuchungen über die Verdunstung von der Oberfläche eines Rieselfilms wurden allein von M a t o u s e k Versuche bei verschiedenen Temperaturbedingungen durchgeführt; da-

¹⁸⁾ Beim Einsetzen dieser Punkte wurden die Re-Werte genommen, wie sie mit der relativen Luftgeschwindigkeit errechnet wurden; dabei wurden auch die oben genannten Berichtigungen um l/d und um den Diffusionskoeffizienten hinzugenommen.

bei hat er keinen Einfluß der nichtisothermen Bedingungen des Vorgangs auf seine Intensität festgestellt. Im Unterschied dazu zeigen unsere Versuche ganz deutlich, daß eine höhere Wassereintrittstemperatur einen Einfluß auf die Nu' -Werte hat. Aus Abb. 12, in der die Kurven für die Abhängigkeit Nu' von Re nach den Angaben aller drei Versuchsreihen dargestellt sind, geht hervor, daß sich die Kurve $Nu' = f(Re)$ mit zunehmender Wassereintrittstemperatur nach unten verschiebt¹⁹⁾; dabei ist die relative Abnahme der Nu' -Werte im Übergangsbereich wesentlich größer (bis zu 26 % für die erste und zweite Reihe) als im Bereich der ausgebildeten turbulenten Luftströmung (bis 9 %). Der Kurvenverlauf bleibt dabei unverändert, was allerdings für den Übergangsbereich noch nachgewiesen werden muß.

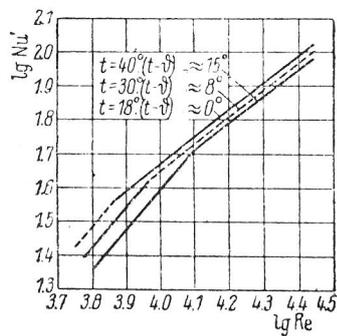


Abb. 12. Abhängigkeit $Nu' = f(Re)$ anhand von drei Versuchsreihen.

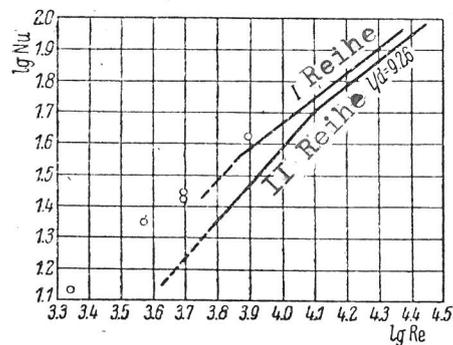


Abb. 13. Vergleich mit den Angaben von Chilton und Colborn.

Anmerkung: Die Punkte wurden nach den Versuchen von Chilton und Colborn eingesetzt bei Wasserkühlung der Luft und dem Verhältnis $l/d=64,6$.

Ein Vergleich mit den Angaben der Versuche von Chilton und Colborn²⁰⁾ (Abb. 13), die bei entgegengesetzter

¹⁹⁾ Wenn man die Nu' -Zahl mit den Stoff-Werten, die auf die "mittlere Temperatur der Grenzschicht" oder sogar zur Wandtemperatur bezogen sind (McIntire, Michееv u.a.), bilden würde, dann würde dies in unserem Fall zu einer stärkeren Verschiebung der Kurve führen.

²⁰⁾ Die Nu' -Werte wurden von uns nach den in Chiltons und Colborns Aufsatz enthaltenen Angaben errechnet. Die verdunstete Wassermenge wurde dabei nach den Psychrometerangaben bestimmt. Die Re -Zahl wurde mit der Luftgeschwindigkeit gebildet.

Richtung des Wärmestroms und niedrigeren Wassertemperaturen durchgeführt wurden, zeigt, daß die entsprechenden Versuchspunkte etwas über den in unseren ersten beiden Versuchsreihen ermittelten Kurven liegen²¹⁾. Dies stimmt mit den Ergebnissen der letzteren hinsichtlich der Verschiebungsrichtung der Kurve $Nu' = f(Re)$ überein. Die von uns ermittelten Nu -Werte (Abb. 7) lassen trotz der Streuung der Punkte und obwohl weniger klar ausgeprägt die Tendenz zur Abnahme bei Zunahme der Wassereintrittstemperatur feststellen.

In der Literatur wurde der Einfluß von Größe und Richtung des Wärmestromes auf den hydraulischen Widerstand der Rohre und die Intensität des Wärmeübergangs von festen Wänden bereits erwähnt²²⁾.

21) Das Verhältnis l/d betrug in C h i l t o n s und C o l - b o r n s Versuchen 64,6. Wenn man zu den ermittelten Nu' -Werten noch $l/d = 9,26$ hinzuzählte, dann würden die Punkte noch höher liegen.

22) B. Мак-Адамс. Теплопередача. ОНТИ. М.—Л. 1936;
MakAdams, V.: Teploperedatca.
Moskva-Leningrad: Vereinigter wissenschaftlich-technischer Staatsverlag, 1936.
Übersetzung aus dem Englischen:
McAdams, William Henry: Heat Transmission.
New York: McGraw-Hill, 1933.
Г. Гребер и С. Эрк. Основы учения о теплообмене, ОНТИ. М.—Л. 1935;
Greber, G., Erk, S.: Osnovy učeniya o teploobmene.
Moskva-Leningrad: Vereinigter wissenschaftlich-technischer Staatsverlag, 1936.
Übersetzung aus dem Deutschen:
Gröber, Heinrich, Erk, Siegmund: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung.
Berlin: Springer, 1933.

Kraussold, H. - siehe Anm. 17)

Л. Н. Ильин и М. А. Михеев. Ж. Т. Ф., вып. 4 и 8, 1933;

Il'in, L.N., Micheev, M.A.: Iskaženie gidravličeskogo soprotivlenija kanalov pri naličiji teploobmena.

In: Žurnal tehničeskoj fiziki. Moskva, 3 (1933), Nr 4, S. 509 bis 517.

<Verzerrung des hydraulischen Kanalwiderstands beim Wärmeübergang; russ.>

Il'in, L.N., Micheev, M.A.: Vlijanie teploobmena na gidravličeskoe soprotivlenie kanalov.

In: Žurnal tehničeskoj fiziki. Moskva, 3 (1933), Nr 8, S. 1301 bis 1309.

<Einfluß des Wärmeübergangs auf den hydraulischen Kanalwiderstand; russ.>

М. В. Кирпичев и М. А. Михеев. Моделирование тепловых устройств. Изд. Акад. Наук СССР. М.—Л. 1936

Kirpičev, M.V., Micheev, M.A.: Modelirovanie teplovych ustrojstv.
Moskva-Leningrad: Verlag der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, 1936.

[Modellierung thermischer Anlagen; russ.]

Und andere.

K e e v i l und M c A d a m s erklären diese Erscheinung mit dem Einfluß, welchen die Veränderung des Viskositätsfeldes und der Dichte des vorbeifließenden Stoffes auf das Geschwindigkeitsprofil und die Dicke der Grenzschicht hat. Bei uns in der Sowjetunion kamen I l ' i n und M i c h e e v zu denselben Schlußfolgerungen.

Bei Verdunstungskühlung einer Flüssigkeit kann man sich offensichtlich nicht darauf beschränken, allein den Einfluß der Temperaturdifferenz zu berücksichtigen, da auch der Massenstrom einen großen Einfluß auf die Viskositäts- und Dichteverteilung in der Feuchtluftströmung hat; und dieser Massenstrom wird durch die Partialdruckdifferenz bestimmt. Der Einfluß der Verdampfung auf die Dicke der Grenzschicht wurde theoretisch von A c k e r - m a n n ²³⁾ untersucht; da er von einem stark vereinfachten Schema ausgeht, kann man jedoch die von ihm ermittelten Abhängigkeiten nur als erste Näherung ansehen.

Der zweite zusätzliche und für die Verdunstungskühlung eines Riesel-films spezifische Faktor ist der Oberflächenzustand der strömenden Flüssigkeit, der außer von der Geschwindigkeit offenbar auch von ihrer Viskosität abhängt. Letztgenannter Umstand sagt aus, daß nicht nur der Einfluß der Temperatur- und Partialdruckdifferenzen, sondern der Wassertemperatur selbst möglich ist, die in unseren Versuchen in relativ breiten Bereichen bei gering sich verändernder Temperatur der eintretenden Luft variierte. Im Übergangsbereich der Strömung, der geringen Luftgeschwindigkeiten entspricht, kann auch noch die natürliche Luftkonvektion, die in unserem Fall nicht nur durch die Erwärmung der vorbeiströmenden Luft, sondern auch durch einen größeren Feuchtigkeitsgehalt derselben bedingt ist, von Einfluß sein.

Um aufzuklären, welchen Einfluß die oben genannten Faktoren haben und worin der Grund für die größere Abhängigkeit der Verdunstungskühlung des Filmes von den nichtisothermen Bedingungen des Vorganges, verglichen mit dem Wärmeübergang an ebenen Platten, besteht, sind noch weitere Untersuchungen notwendig. Solange sollte man sich da-

²³⁾ Ackermann, G. - siehe Anm. 11).

mit begnügen, auf den unzweifelhaften Unterschied in den Bedingungen bei der Verdunstungskühlung hinzuweisen, der aufgrund des vorhandenen Stoffübergangs und der besonderen Beschaffenheit der Filmoberfläche auftritt.

Es war nicht möglich, die Abhängigkeit der Stoff- und Wärmeübergangszahlen von der Größe der Relation l/d aus den durchgeführten Versuchen abzuleiten (Abb. 6 und 7). Die relativ engen Grenzen, innerhalb derer es möglich war, die Relation l/d zu verändern, gestatten es - wenn man von diesen Versuchen ausgeht - nicht, bestimmte Schlußfolgerungen über den Einfluß dieses Verhältnisses zu ziehen.

Aus dem vorher Gesagten geht hervor, daß die Gleichung $Nu' = f(Re)$ auch bei vorgegebenem Pr' und l/d für die Verdunstungskühlung eines Rieselfilms unzureichend ist, da einige unabhängige Variablen, die sich stark auf den Ablauf dieses Vorgangs auswirken, nicht mit eingeschlossen sind. Für den Wärmeübergang in Rohren mit festen Wänden gibt es Versuche²⁴⁾, diese Gleichung durch ein Glied zu ergänzen, das den Einfluß des Viskositätsfeldes des strömenden Films berücksichtigt. Ohne an dieser Stelle auf ähnliche Annahmen eingehen zu wollen, muß darauf hingewiesen werden, daß die Korrelationsbeziehung zwischen den Kennzahlen für den von uns untersuchten Fall offenbar Variablen miteinschließen muß, die die dafür spezifischen Verlaufsbedingungen widerspiegeln und insbesondere Stoffwerte und die Filmgeschwindigkeit beinhalten.

Bei Verwendung der Potenzabhängigkeit $Nu' = C_1 Re^m$ als rechnerische Gleichung zur Bestimmung des Stoffübergangskoeffizienten muß deshalb berücksichtigt werden, daß C_1 keine konstante Größe ist und je nach den gegebenen Bedingungen gewählt werden muß. Die in unseren Versuchen ermittelten Werte C_1 und m sind in Tab. 2 aufgeführt. Im Rahmen der in unseren Versuchen geltenden Re -Werte

²⁴⁾ Z.B.:

Sieder, E.N., Tate, G.E.: Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes.

In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C., 28 (1936), Nr 12, S. 1429 - 1435.

Kaye, W.A., Furnas, C.C.: Heat Transfer Involving Turbulent Fluids.

In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C., 26 (1934), Nr 7, S. 783 - 786.

kann die angegebene Abhängigkeit unter der Bedingung, daß C_1 und m entsprechend gewählt werden (Tab. 2), auch auf den Übergangsbereich der Strömung ausgedehnt werden. Es muß dabei berücksichtigt werden, daß sich die individuellen Besonderheiten der Versuchsanlage im Übergangsbereich in stärkerem Maß auf die Größen C_1 und m auswirken.

T a b e l l e 2

C_1 - und m -Werte

Versuchsbedingungen (mittl. Werte)			Re-Zahl		C_1	m
Wasser-temp., °C	Temp. differ. zw. Wasser u. Luft, °C	Diff. d. Dampf- u. teildrücke, ata	von	bis		
18	0	0.014	5000	7300	(0.001)	(1.18)
			7300	27000	0.0294	0.8
30	8	0.020	5000	9400	0.00086	1.18
			9400	27000	(0.0280)	0.8
40	15	0.050	5000	12500	0.00071	1.18
			12500	27000	0.0267	0.8

Hinsichtlich des Wärmeübergangskoeffizienten, dessen Bestimmungsgenauigkeit in praktischen Berechnungen von Kühlanlagen von geringerer Bedeutung ist, bestätigen die Versuche die Möglichkeit, diesen Wert berechnen zu können, wenn man von der Größe β_p ausgeht und dabei den theoretischen Wert der Relation $\alpha/\beta_p (\sim 0,35 \cdot 10^{-4})$ annimmt.

Zusammenfassung

Beschrieben wurde eine experimentelle Untersuchung über den Stoff- und Wärmeübergang von der Oberfläche eines Wasserrieselfilms bei erzwungener Konvektion innerhalb eines rechteckigen Kanals. Die Versuchsergebnisse sind als Korrelation zwischen den $N u$ $s e l t$ - und $R e y n o l d s$ - Zahlen dargestellt. Die Versuche zeigten, daß zwischen dem Verhalten der $N u'$ (Verdunstung) und $N u$ -Zahl (Wärmeübergang) als Funktion von Re im Übergangsbereich und bei ausgebildeter

turbulenter Luftströmung ein Unterschied vorliegt, wie auch daß sich die Werte dieser Kennzahlen bei zunehmender Wassereintritts-temperatur stark ändern. Zur Bestätigung der wichtigsten Schlußfolgerungen, die auf einer Analogie zwischen dem Wärme- und Stoffübergang basieren, zeigen diese Versuche ebenfalls, daß es bei einer Reihe von spezifischen Parametern, die sich auf die Intensität des Vorgangs auswirken, unter den Bedingungen der Verdunstungskühlung eines Rieselfilms nicht möglich ist, die Versuchsergebnisse über den Wärmeübergang in Rohren mit festen Wänden direkt auf diesen Fall zu übertragen.

Der Verfasser dankt Ja.M. R u b i n š t e j n für seine zahlreichen wertvollen Hinweise bei der Durchführung der Arbeit und dem Ingenieur A.V. P e r c e v, der mit Hilfe der Technikerin L.P. K r a p i v e n s k a j a und der Laborantin M.V. K u - z n e c o v a die umfangreiche Arbeit bewältigt hat, die mit der Durchführung und Auswertung der Versuche verbunden war.

Moskau
F.E.-Dersshinski-Institut
für Wärmetechnik der UdSSR
Dampfturbinen-Laboratorium

Redaktionseingang
27. September 1938

Stuttgart, den 30.März 1979

übersetzt von

Ottmar Pertschi
(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer