

11/142

Zozulja, N.V., Karchu, V.A., Borovkov, V.P.

ANALYTISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES  
WÄRMEAUSTAUSCHES BEI DER DAMPFKONDENSATION AUF  
BERIPPTE OBERFLÄCHEN

Übersetzung aus:

Teploassoobmen - V (Materialy V (pjatoj) vsesojuznoj kon-  
ferencii po teploassoobmenu). Minsk: 1976, tom (Band) 3,  
čast' (Teil) 2 (Teploassoobmen pri fazovyh prevraščenijach),  
S. 105 - 109.

Russ.: АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО-  
ОБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА РЕБРИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Analitičeskoe i éksperimental'noe issledovanie teplo-  
obmena pri kondensacii para na rebristyh poverchnostjach

On the basis of the model developed the differential  
equation is composed for a condensate film moving between fins  
of the surface.

The relationship is obtained to determine heat trans-  
fer rate with vapour condensation on horizontal finned tubes  
which can be used for design of heat exchange facilities.

Der Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Kondensation  
von Dämpfen verschiedener Flüssigkeiten auf berippten Ober-  
flächen wird in letzter Zeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet  
[1 - 8]. Es muß jedoch betont werden, daß dabei hauptsächlich  
Kältemittel als Versuchsstoffe verwendet wurden. Diese haben  
ähnliche physikalische Eigenschaften, sodaß die erzielten Er-  
gebnisse nicht ohne weiteres auf andere Stoffe übertragen werden  
können.

Bei der Untersuchung des Wärmeübergangs gehen die meisten Autoren von der Annahme aus, daß das Strömungsfeld im Kondensatfilm im wesentlichen durch die Trägheits- und Reibungskräfte bestimmt ist.

Die im Institut für Technische Wärmephysik der Akademie der Wissenschaften der Ukrainischen SSR durchgeführten experimentellen Untersuchungen [10, 11] unterscheiden sich von den vorhergehenden sowohl dadurch, daß Dämpfe mit stark unterschiedlichen Eigenschaften gewählt wurden, als auch durch die Berippung der Kondensationsfläche. Verschiedene Geometrie der Kühlfläche soll vor allem ermöglichen, den Einfluß der Oberflächenspannung auf das Strömungsfeld genauer zu erfassen [8, 9].

Aus diesen Versuchen geht hervor, daß die Kräfte der Oberflächenspannung bei der Beschreibung der Gesetzmäßigkeiten des Wärmeaustauschs im Falle der Dampfkondensation an Rohren mit feingeriffeltem Profil zu berücksichtigen sind. Die Experimente dienen als Voraussetzung für eine entsprechende analytische Beschreibung der Strömung des zwischen den Rippen befindlichen Kondensats [10].

Für dieses Modell und die aufgestellten Annahmen [10] wurde die Differentialgleichung der laminaren Strömung des Kondensatfilms an der Rippe in der Rille aufgestellt (Abb. 1). Aus ihrer Lösung wurde die mittlere Strömungsgeschwindigkeit

$$\bar{w}_y = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w_y \alpha y = \frac{\sigma \delta^2 \cos \varphi}{3b\mu(1+\operatorname{tg} \varphi)(h-\Delta)} \quad (1)$$

und die örtliche Filmdicke an der Rippenseitenfläche ermittelt:

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{4\mu\lambda b x (t_s - t_w)(1+\operatorname{tg} \varphi)(h-\Delta)}{\gamma r \sigma \cos \varphi}} \quad (2)$$

In der Flüssigkeitsschicht  $\Delta$  in der Rippenrinne, die unter Einwirkung der Schwere  $q \sin \varphi$  abfließt, wird das halbparabolische Gesetz der Geschwindigkeitsverteilung nach der Filmhöhe angewandt. Die laminare Kondensatströmung an der Rippe sowie der Einfluß der Rippen werden dabei nicht berücksichtigt.

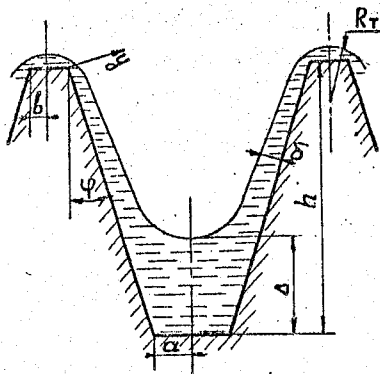


Abbildung 1. Schematische Darstellung der Kondensatströmung an einer berippten Oberfläche

Unter diesen Bedingungen erhält man die mittlere Geschwindigkeit des Kondensatfilms als Funktion des Winkels  $\psi$  :

$$\tilde{w}_\psi = \frac{\gamma \Delta^2}{3\mu} \sin \psi = \frac{\gamma h^2}{3\mu} z^2 \sin \psi .$$

Der Kondensatstrom in der Rille nach der Koordinate  $\psi$  (längs der Strömung) ist:

$$G_\psi = \gamma \tilde{w}_\psi F_{\text{Re}} = \frac{\gamma h^3 \sin \psi}{3\mu \cos \psi} z^3 , \quad (3)$$

mit

$$F_{\text{Re}} = \frac{a \Delta}{\cos \psi} = \frac{ahz}{\cos \psi} ; \quad z = \frac{\Delta}{h} .$$

Aus Gleichung (3) ergibt sich die Änderung des Kondensatstromes in der Rille:

$$dG_\psi = \frac{\gamma^2 h^3 a}{3\mu \cos \psi} (3z^2 \sin \psi dz + z^3 \cos \psi d\psi) . \quad (4)$$

Diese Änderung (Zu- oder Abnahme) kommt durch Abfließen des Kondensats von der Oberfläche der Rippe zustande. Die Strömungsfläche ist dabei durch den Bogen  $R_0 d\psi$  ( $R_0$  ist der Rohrradius) und durch die Kondensatdicke  $\delta$  (2) gegeben. Mit der Geschwindigkeit  $\tilde{w}_y$  (1) bekommt man:

$$dG\psi = \gamma \tilde{w}_y \delta R_o d\psi =$$

$$= \frac{0,94h^{1/2} \sigma^{1/4} \lambda^{3/4} \gamma^{1/4} R_o (t_s - \tilde{t}_w)^{3/4} \cos^{1/4} \psi}{b^{1/4} \mu^{1/4} r^{3/4} (1 + \operatorname{tg} \psi)^{1/4}} (1-z)^{1/2} d\psi \quad (5)$$

Aus der Mengenbilanz in der Rille zwischen den Rippen, Gleichungen (4) und (5), erhält man die Differentialgleichung der Kondensatströmung in der Rille zwischen den Rippen:

$$\frac{dz}{d\psi} = 0,935 \operatorname{Fi} \frac{(1-z)^{1/2}}{z^2 \sin \psi} - \frac{z}{3} \operatorname{ctg} \psi, \quad (6)$$

mit

$$\operatorname{Fi} = \frac{\sigma^{1/4} \lambda^{3/4} \mu^{3/4} R_o (t_s - \tilde{t}_w)^{3/4} \cos^{5/4} \psi}{a b^{1/4} r^{3/4} h^{5/2} \gamma^{3/4} (1 + \operatorname{tg} \psi)^{1/4}},$$

Gleichung (6) gestattet es, die an berippten Rohren gewonnenen Versuchsdaten, welche der Bedingung  $We \gg 1$  entsprechen, zu verallgemeinern und durch die einfache Beziehung darzustellen:

$$Z = f(\operatorname{Fi}). \quad (7)$$

Jetzt wollen wir die Frage untersuchen, wie man das an der Rippenhöhe mittlere Temperaturgefälle  $(t_s - \tilde{t}_w)$  findet; die Antwort darauf kann man aus der Gleichung der Wärmeleitung

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{\alpha U}{\lambda f} \cdot T \quad (8)$$

erhalten, mit  $T = t_s - t_w$  und den Grenzbedingungen:

$$\text{bei } x = 0 \quad \frac{dT}{dx}$$

$$\text{bei } x = h \quad T = T_o = t_s - t_o$$

Bei Aufstellung der Gleichung (8) geht man von der Annahme aus, daß die Temperatur der trapezförmigen Rippe nach ihrer Dicke in jedem Querschnitt auf der Koordinate  $x$  konstant ist.

Wir setzen in Gleichung (8) den Wert des Wärmeübergangs-

koeffizienten  $\alpha = l/\delta$  unter Berücksichtigung von (2) und die Größe  $U/f$  für eine Rippe mit variablem Querschnitt ein. Wir führen desweiteren die Bezeichnungen

$$\theta = \frac{t_s - t_w}{t_s - t_o}, \quad \xi = \frac{x}{h}, \quad \beta = \frac{htg}{b}, \quad n = \left[ \frac{\gamma_r \sigma \lambda^3 h^5}{4 \mu b^5 \lambda_p^4 T_o (1 + tg \varphi)} \right]^{1/4}$$

ein und bringen Gleichung (8) in dimensionslose Form:

$$\frac{d^2 \theta}{d \xi^2} = n \frac{\theta^{3/4}}{\xi^{1/4} (1 + \beta \xi)}; \quad (9)$$

die Grenzbedingungen sind:  $0 \leq \xi \leq 1$

bei  $\xi = 0 \quad \frac{d\theta}{d\xi} = 0$ ; bei  $\xi = 1, \quad \theta = 1$ .

Die Lösung der Randwertaufgabe (9) bei verschiedenen  $n$  und  $\beta$  wurde numerisch mit dem elektronischen Digitalrechner "Mir-1" durchgeführt, indem sie auf ein System endlicher Differenzquotienten reduziert wurde.

Die Bestimmung der mittleren Werte des Temperaturgefälles an der Rippe wurde durch numerisches Integrieren seiner örtlichen Werte nach der dimensionslosen Rippenhöhe  $0 \leq \xi \leq 1$  erreicht. Die Endergebnisse der Berechnung des mittleren Temperaturgefälles an der Rippe  $\bar{\theta}$  und als Funktion der Parameter  $n$  und  $\beta$  sind in Abb. 2 dargestellt.

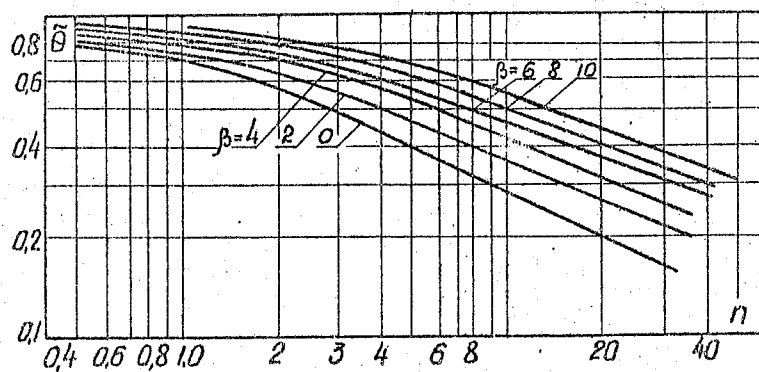


Abbildung 2. Die Abhängigkeit  $\bar{\theta} = f(n, \beta)$

Die Angaben von Abb. 2 nach den bekannten Koeffizienten  $n$

und  $\beta$  liefern den nach der Rippenhöhe gemittelten Temperaturgradienten, dessen Größe bei Berechnung des Ausdruckes  $Fi$  eingesetzt werden muß.

Zum Zwecke der Überprüfung, ob das vorgelegte Modell und die durchgeführte Analyse im Gesamten richtig sind, wurden die bekannten Angaben [1 - 9] an Rohren mit Rippen von sowohl trapezförmiger als auch rechtwinkliger Form (die der Forderung  $We > 1$  entsprechen) nach Formel (7) überarbeitet.

Die Ergebnisse der Überarbeitung zeigten, daß die Versuchsdaten der verschiedenen Autoren [1 - 9] in den Koordinaten  $Z = f(Fi)$  gut miteinander übereinstimmen und (mit einer Streuung von 15 %) durch die einheitliche Beziehung

$$Z = 1,8 Fi^{0,32} \quad (10)$$

dargestellt werden können.

Wir wollen unterstreichen, daß in der Verallgemeinerung (10) alle bekannten Angaben über die Kondensation der Dämpfe von Flüssigkeiten (Freon 11, 12, 21) an berippten Rohren aus verschiedenen Werkstoffen (Kupfer, Messing, Stahl) mit unterschiedlicher Form (rechtwinkliger, trapezförmiger) und Rippungsmaßen, die der Bedingung  $We > 1$  entsprechen, verwendet wurden.

Die im Institut für Technische Wärmephysik der Akademie der Wissenschaften der Ukrainischen SSR bei der Untersuchung der Wärmeabgabe bei der Dampfkondensation von Freon 113 und Wasser an verschiedenen berippten Rohren ermittelten Versuchsdaten werden ebenfalls gut durch die Beziehung (10) dargestellt. Der Versuch, eine analoge Verallgemeinerung der Untersuchungen an Rohren mit  $We < 1$  durchzuführen, verlief negativ. Im Zusammenhang damit wurde für die Bedingung, daß sich die Trägheitskräfte am stärksten auf das Strömungsfeld im Kondensatfilm auswirken, eine analytische Untersuchung durchgeführt, und es wurde eine rechnerische Abhängigkeit zur Bestimmung der Wärmeabgabeintensität bei der Dampfkondensation an Rohren ermittelt, wenn  $We < 1$ .

B e z e i c h n u n g e n

$\gamma$  - spezifisches Kondensatgewicht;  $\mu, \sigma, \lambda, \lambda_p$  - Koeffizient je nach dynamischer Viskosität, Oberflächenspannung, Wärmeleitfähigkeit des Kondensats und der Rippenwand;  $t_s, t_w, t_o$  - Temperatur je nach Dampfsättigung, Rippenwand, Rippenwand am Grund;  $U$  - Rippenumfang;  $f$  - Querschnittsfläche der Rippe;  $We$  - Webersche Zahl.

L i t e r a t u r

1. Гогонин И.И., Дорохов А.Р. Холодильная техника, 1970, II, 31-34.  
Gogonin, I.I., Dorochov, A.R.  
In: Cholodil'naja tehnika. 1970, Nr 11, S. 31 - 34.
2. Данилова Т.Н., Иванов О.П. Холодильная техника, 1969, II, 10-13.  
Danilova, G.N., Ivanov, O.P.: Sopostavlenie različnyh tipov teploperedajuščich poverchnostej kožuchotrubnyh kondensatorov.  
In: Cholodil'naja tehnika. Moskva, 1969, Nr 11, S. 10 - 13.  
<Vergleich verschiedener Arten wärmeleitender Oberflächen von Rohrmantelkondensatoren>
3. Кан К.Д., Сергеев С.А. Холодильная техника, 1971, 6, 12-14.  
Kan, K.D., Sergeev, S.A., Krotkov, V.N., Belkovskij, I.S., Dmitrieva, A.F.: Intensifikacija teploperedaci v freonovyh kožuchotrubnyh kondensatorach.  
In: Cholodil'naja tehnika. Moskva, 1971, Nr 6, S. 12 - 14.  
<Intensivierung der Wärmeübertragung in Kältemittelkondensatoren>
4. Слепян Е.Е. Журнал теоретической физики, 1952, 22, 7, 1109-1123.  
Slepjan, E.E.: Issledovanie teplootdači pri kondensacii freona-12 na gorizontaľnyh gladkich i rebristyh trubach.  
In: Žurnal tehničeskoj fiziki. Moskva, 22 (1952), Nr 7, S. 1109 - 1123.  
<Untersuchung der Wärmeabgabe bei Kondensation von Freon 12 an horizontalen glatten und berippten Rohren>
5. Хижняков В.С. Холодильная техника, 1971, I, 31-34.  
Chižnjakov, V.S.: Teploobmen pri kondensacii freonov-12 i 22 na gladkich i orebrennyh trubkach.  
In: Cholodil'naja tehnika. Moskva, 1971, Nr 1, S. 31 - 34.  
<Der Wärmeaustausch bei Kondensation von Freon 12 und 22 an glatten und berippten Rohren>

6. Katz, L., Young, Edwin H., Balekjian, Garen: Condensing Vapors on Finned Tubes.  
In: Petroleum Refiner. Houston, 33 (1954), Nr 11, S. 175 - bis 178.
7. Henrici, H.: Kondensation von R 11, R 12 und R 22 an glatten und berippten Rohren.  
In: Kältetechnik. Karlsruhe, 15 (1963), Nr 8, S. 251 - 256.
8. Солодов А.П., Исаченко В.П. Труды МЭИ, вып. 63, 81, 1965.  
Solodov, A.P., Isačenko, V.P. Nekotorye osobennosti mehanizma kapel'noj kondensacii.  
In: Trudy. Moskovskij ordena Lenina energetičeskij institut. Moskva, 63 (1965), S. 121 - 139.  
<Einige Besonderheiten des Vorgangs der Tropfenkondensation>
9. Зозуля Н.В., Боровков В.Л., Карху В.Х. В кн. Вопросы технической теплофизики, Киев, "Наукова думка", 1968, 3-7.  
Zozulja, N.V., Borovkov, V.L., Karchu, V.A.  
In dem Buch: Voprosy techničeskoj teplofiziki.  
Kiev: Verlag "Naukova dumka", 1968, S. 3 - 7.
10. Зозуля Н.В., Боровков В.Л., Карху В.А. Холодильная техника, 1969, 4, 25-28.  
Zozulja, V.V., Borovkov, V.L., Karchu, V.A.: Intensifikacija processa teplootdači pri kondensacii freona-113 na gorizontaľnych trubkach,  
In: Cholodil'naja tehnika. Moskva, 1969, Nr 4, S. 25 - 28.  
<Intensivierung des Vorgangs der Wärmeabgabe bei Kondensation von Freon 113 an horizontalen Rohren>
11. Карху В.А., Боровков В.Л. ИФЖ, 1970, 19, 4, 617-624.  
Karchu, V.A., Borovkov, V.L.  
In: Inženerno-fizičeskij žurnal. Minsk, 19 (1970), Nr 4, S. 617 - 624.  
Englische Übersetzung: Film Condensation of Vapor on Horizontal Corrugated Tubes.  
In: Journal of Engineering Physics. New York, 19 (1970), Nr 4, S. 1229 - 1234.

Institut für Technische Wärmephysik  
der Akademie der Wissenschaften der  
Ukrainischen SSR, Kiev

Stuttgart, den 25. Januar 1977

übersetzt von

*Ottmar Pertschi*  
(Ottmar Pertschi)  
Dipl.-Übersetzer