

Danilova, G.N., Bel'skij, V.K.

Kandidaten der technischen Wissenschaften  
Leningrader technologisches Institut der Kälteindustrie

UNTERSUCHUNG DES WÄRMEÜBERGANGS BEIM SIEDEN VON FREON 113 UND 12  
AN ROHREN MIT UNTERSCHIEDLICHER RAUHIGKEIT

Übersetzung aus:

Cholodil'naja tehnika. Moskva, 42 (1965),  
Nr 4, S. 24 - 28

Russ.: ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ФРЕОНОВ-113  
И 12 НА ТРУБКАХ РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

Issledovanie teplootdači pri kipenii freonov-113  
i 12 na trubkach različnoj šerochovatosti

Ermittelt wurden die Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden von Freon 113 an aufgerauhten und Rohren mit sandgestrahlter Oberfläche sowie von Freon 12 an sandgestrahlten Rohren. Sie lagen um annähernd das 2,4 - 2,7fache über denen bei polierten Rohren und um das 1,6fache bei Rohren, die nicht besonders vorbehandelt wurden. Durch das Aufrauhren oder durch eine Kugelregen- bzw. Sandstrahlbehandlung der Heizrohroberfläche läßt sich der Wärmeübergang verstärken. Diese Verfahren sind bei Wärmeüberträgern mit unberippten Rohren effektiv.

In verschiedenen Arbeiten [1 - 8] wird festgestellt, daß die Rauigkeit der Heizfläche den Wärmeübergang beim Behältersieden mit freier Strömung der Flüssigkeit beeinflusst. Versuche wurden durchgeführt mit Wasser, Äthanol und Methanol, Pentan, Äther, Tetrachlorkohlenstoff, Azeton und einigen anderen Flüssigkeiten.

Nach Berensons Angaben [6] änderten sich die Wärmeübergangskoeffizienten ein und derselben Flüssigkeit allein aufgrund der unterschiedlichen Rauigkeit der aus dem gleichen Material bestehenden Oberfläche in einigen Fällen um das 5 - 6fache. Um diesen Vorgang verstärken zu können und Angaben zu ermitteln, mit denen verallgemeinerte Berechnungsgleichungen aufgestellt werden können, ist es wichtig zu wissen, wie die Oberflächenbeschaffenheit den Wärmeübergangskoeffizient beim Sieden von Kältemitteln beeinflusst. Zu diesem Zweck wurden am Lehrstuhl für theoretische Grundlagen der Wärme- und Kältetechnik des LTICH<sup>1)</sup> Spezialuntersuchungen durchgeführt.

Als Arbeitsmittel wurde Freon 113 und 12 gewählt.

Versuchsanlage. Die Versuche mit Freon 113 wurden bei Umgebungsdruck in einer Versuchsanlage durchgeführt, wie sie in Abb. 1 schematisch dargestellt ist.

Den Siedekessel bildet ein rechteckiger emaillierter Stahlbehälter (Innenmaße 280 x 280 x 100 mm) mit zwei runden Schaugläsern (120 mm Durchmesser). Zwischen Deckel und Behälter ist als Dichtung ein Gummiband eingelegt. Die Außenwände wurden mit 32 mm starkem Schaumstoff isoliert.

Bei den Versuchen wurden Heizrohre aus Stahl und Kupfer benutzt; an ihren Enden waren für die Stromleitung Kabelschuhe aus Kupfer angelötet. Zum Einführen der Thermoelemente wurden in einem Kabelschuh eines jeden Rohres ein 3 mm großes Loch gebohrt. Die Rohre wurden mit Kupferschellen an den Stromschienen befestigt; diese wiederum waren aus 12 mm starkem Kupferstab gefertigt.

Die Heizrohre wurden aus einem Abspanntransformator (220 x 10 V) mit Wechselstrom gespeist. Die Stromstärke wurde im Arbeitsstromkreis mit einem UTT-6-Transformator der Klasse 0,2 und einem astatischen Amperemeter der Klasse 0,5 gemessen.

---

1) Leningradskij tehnologičeskij institut choolodil'noj promyšlennosti - Leningrader technologisches Institut der Kälteindustrie (Anm. d. Übers.).

Vor Beginn der Versuche, wurde der elektrische Widerstand eines jeden Rohres experimentell bestimmt und das Diagramm  $R = f(t)$  im Temperaturbereich von  $20 - 80^{\circ}\text{C}$  erstellt.

Um die elektrische Leistung an der Primärwicklung des Abspanntransformators (Heizleistung) verändern zu können, wurde ein LATR-2-Spartransformator angeschlossen

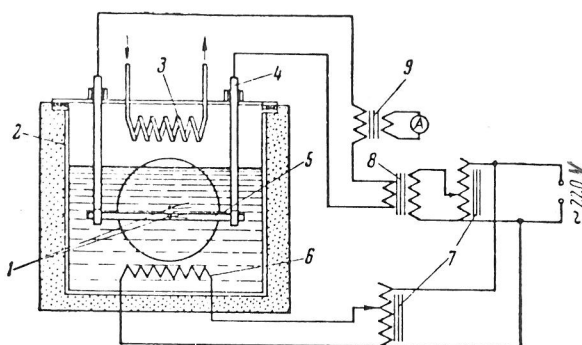


Abb. 1. Schematische Darstellung der Versuchsanlage:

1) Thermoelemente; 2) Versuchsverdampfer; 3) Kondensator; 4) Stromschienen; 5) Versuchrohr; 6) elektrische Zusatzheizung; 7) Spartransformator; 8) Abspanntransformator; 9) Meßstromwandler.

Durch die elektrische Heizung 6 konnte das Freon-113 bei vorgegebenem Druck bis auf Sättigungstemperatur aufgeheizt werden.

Um die Temperatur der Flüssigkeit und der Rohrwand messen zu können, wurden Kupfer-Konstantan-Thermoelemente benutzt; ihre EMK wurde mittels eines niederohmigen PPTN-1-Potentiometers mit einem M21/4-Spiegelgalvanometer bestimmt.

Das Thermoelement, mit dem die Wandtemperatur festgestellt wurde, befand sich in der Mitte der Meßstrecke, wodurch faktisch die Temperatur der inneren Rohroberfläche gemessen wurde. Die Temperatur der Außenfläche wurde nach einer Formel berechnet, die das Temperaturgefälle in der Rohrwand berücksichtigt.

Um die Temperatur der Flüssigkeit messen zu können, befand sich in der Flüssigkeit ein Thermoelement. Die Thermoelementlötstelle war 20 - 30 mm von der oberen Rohrverzweigung entfernt.

Die Abmessungen der Heizrohre und ihre Oberflächengüte<sup>1)</sup> sind in der Tabelle angegeben.

Die Oberflächenrauigkeit wurde nach GOST<sup>2)</sup> 2789-59 bestimmt. Als Rauigkeitskriterium wurde die Rauhtiefe  $R_z$  in Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) gewählt.

Je nach Güteklasse wurde entweder das Doppelmikroskop MIS-11 von Linnik oder das Mikrointerferometer MII-5 benutzt.

Rohre mit hoher Oberflächengüte (mit dem Buchstaben V bezeichnet) wurden an der Zylinderkreislinie in beiden Richtungen nacheinander mit immer feiner werdendem Karborundum-Schmirgelleinen (KZ-280, KZ-120, KZ-M-40, KZ-M-14, KZ-M-7, KZ-M-5, KZ-M-3) bearbeitet und danach mit GOI-Paste poliert.

Die Rohre mit mittlerer Rauigkeit wurden mit grobkörnigem Schmirgelleinen oder auf der Werkbank mit der Feile oberflächenbehandelt. Zwei Rohre ohne Sonderbehandlung (nach dem Walzen) wurden mit D bezeichnet.

Rohre mit großer Oberflächenrauigkeit wurden auf der Werkbank (A), durch Sandstrahlen (G) und durch Walzen (Chargieren) zwischen zwei Platten unterschiedlichen Härtegrades mit Schleifpulver (E) bearbeitet. Die Rauigkeit der meisten Rohre wurde nach den Versuchen bestimmt.

Versuchsablauf. Das mit Dichloräthan behandelte Heizrohr wurde in den Siedekessel verbracht. Darauf wurde die elektrische Zusatzheizung eingeschaltet. An das Rohr war Wechselstrom angelegt.

---

1) Die Oberflächengüte der Rohre wurde am Lehrstuhl für Metallkunde des LTICH P von Ing. M.E. Tomilov bestimmt.

2) GOST-Gosudarstvennyj obščesojuznyj standart - Staatlicher Unions-Standard (Anm. d. Übers.).

Um eine Hysterese auszuschließen, wurde bei den Versuchen zuerst die maximale Stromstärke aufgegeben, danach wurde sie von Versuch zu Versuch vermindert.

Sobald die Flüssigkeit Siedetemperatur erreicht hatte, wurde die Zusatzheizung ausgeschaltet. Nach einer geringen Wartezeit wurden der Arbeitsstrom gemessen und die Angaben der Thermoelemente abgelesen.

Bei einigen Rohren wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. In der Zwischenzeit wurden die Rohre entweder in der mit Freon gefüllten Anlage belassen oder wieder an die Luft gebracht. Die Angaben beider Versuchsreihen stimmen völlig überein.

Oberflächenbeschaffenheit	Rohrbezeichnung	Maße, mm		Länge		Werkstoff	Oberflächenbehandlung	Klasse der O.-Güte	Rauigkeitstiefe, m	Meßgerät
		Außen-durchm.	Wand-dicke	gesamte	Meß-stelle					
Grobbehandlung (starke Rauigkeit)	A <sub>s</sub>	10	0,5	100	90	Stahl St. 10	Drehmeißel	▽3	51,5	MIS-11
	G <sub>s</sub>	10	1	118	103	Stahl	Sandstrahl	▽3	53,5	MIS-11
	E <sub>s</sub>	10	0,5	100	90	Stahl St. 10	Schleifsand	▽5	20	"Kalibr"- Profil- schreiber
	G <sub>m</sub> <sup>ch</sup>	7	0,5	121,8	111,8	Rotkupfer	Sandstrahl	▽3	58	MIS-111
	E <sub>m</sub>	10	0,5	100	90	Rotkupfer	Schleifsand	▽5	11,4	MIS-11
Glatte Oberfläche (mittlere Oberflächen-güte)	B <sub>s</sub>	10	0,5	100	90	Stahl St. 10	Feilen	▽7	6,3	visuell
	B <sub>s1</sub>							▽7a	5,3	MIS-11
	B <sub>m</sub>	10	0,5	100	90	Kupfer	grobkörnig. Schmirgellein.	▽6b	8,04	MIS-11
	D <sub>m</sub> <sup>ch</sup>	7	0,5	121,8	111,8	Kupfer	Walzen ohne Sonderbehandlung	▽8c	1,93	MIS-11
Hohe Oberflächen-güte nach Schleifen und Polieren	V <sub>s</sub>	10	0,5	100	90	Stahl St. 10	Polieren	▽1b	0,3	MII-5
	V <sub>m</sub>	10	0,5	100	90	Stahl St. 10	Polieren	▽10c	0,45	MII-5

und Polieren

Der Wärmeübergangskoeffizient wurde nach der Formel

$$\alpha = \frac{I^2 R}{\pi d l_p \theta} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{grad)}$$

bestimmt, mit

$l_p$	Rohrmeßstrecke, m
R	Rohrwiderstand (Länge $l_p$ ), Ohm (die Größe R wurde aus dem Eichdiagramm für die mit dem im Rohr befindlichen Thermoelement gemessene Temperatur ermittelt)
d	Rohrdurchmesser, m.

Als  $\theta$  wurde die Differenz zwischen den Temperaturen der Wand und der Flüssigkeit eingesetzt:

$$\theta = t_{\text{Wand}} - t_{\text{Flüssigkeit}},$$

da Temperatur und Druck des Dampfes nicht gemessen wurden.

In den meisten Versuchen war  $t_{\text{Fl}} \approx 46,5 - 46,7^\circ\text{C}$ . Die größte Abweichung von der tabellarisch ermittelten Sättigungstemperatur  $46,6^\circ\text{C}$  von Freon 113 bei  $p = 1 \text{ ata}$  betrug  $\pm 0,35^\circ\text{C}$  (in einzelnen Versuchen).

Die Versuche mit Freon 12 wurden bei  $p = 5,9 - 6,3 \text{ ata}$  ( $t_o = 20,6 - 22,8^\circ\text{C}$ ) durchgeführt.

Die Versuche mit dem Rohr  $E_s$  wurden in der in [9] beschriebenen Versuchsanlage durchgeführt, die mit dem Rohren  $V_s$  und  $V_s$  in einer ähnlichen, die sich von der ersten nur dadurch unterschied, daß das Siedegefäß ein Glaszylinder war und der Thermostat eine Luftkammer.

Zum Nachweis des Zeiteinflusses auf den Wärmeübergangskoeffizient wurden am Rohr  $E_s$  zwei Versuchsreihen durchgeführt mit einem Jahr Zeitabstand. Das Rohr befand sich in der Zwischenzeit in der mit dem Kältemittel gefüllten Anlage.

Neben der Temperatur der Flüssigkeit wurden auch Temperatur und Druck des gesättigten Dampfes gemessen. Die Methode zur Bestimmung der Wärmestromdichte und des Wärmeübergangskoeffizienten war bei Freon 113 und 12 gleich.

Versuchsergebnisse. Die Versuchsergebnisse sind in den Abb. 2 und 3 als Funktion  $\alpha$  von  $q$  in doppelt logarithmischem Maßstab dargestellt. Die Auswertung dieser Angaben und die Beobachtungen während der Versuche lassen folgende Schlußfolgerungen zu.

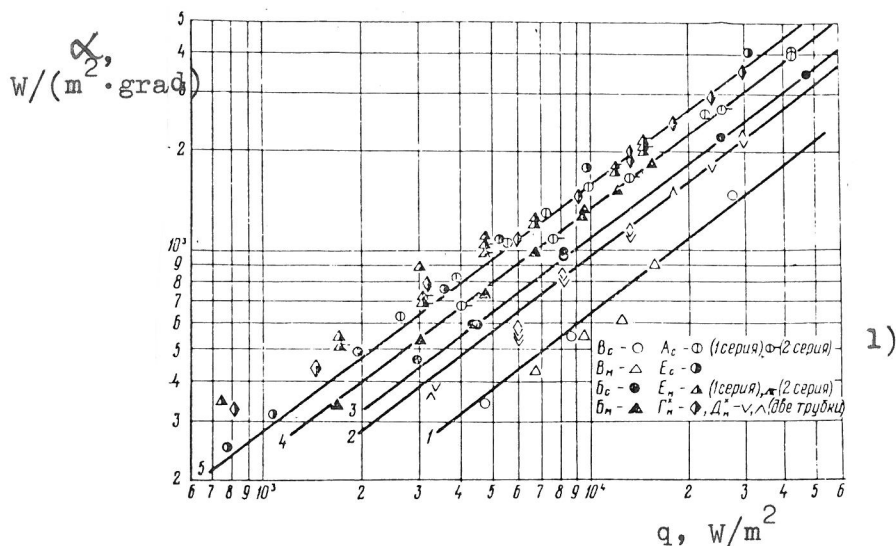


Abb. 2. Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden von Freon 113 an Kupfer- und Stahlrohren unterschiedlicher Rauigkeit:

1 —  $R_z = 0,3 \div 0,45$ ; 2 —  $R_z = 1,93$ ; 3 —  $R_z = 6,3$ ; 4 —  $R_z = S$ ;  
5 —  $R_z = 11,4 \div 58$ .

- 1)  $V_s$  ○  $A_s$  ○ (1. Versuchsreihe) ○- (2. Versuchsreihe)  
 $V_m$  ▲  $E_s$  ●  
 $B_s$  ●  $E_m$  ▲ (1. Versuchsreihe) ▲- (2. Versuchsreihe)  
 $B_m$  ▲  $G_m$  ◆  
 $D_m^{ch}$  ∨, ^ (zwei Rohre)

Nimmt die Rauigkeit der Heizfläche zu, was durch die größer werdende Höhe der Unebenheiten  $R_z$  ausgedrückt wird, dann führt dies zu einer Zunahme des Wärmeübergangskoeffizienten, und zwar in erster Linie aufgrund der sich ändernden Anzahl an aktiven Keimstellen, möglicherweise auch durch den Einfluß des Abreißdurchmessers der Dampfblasen.

Das Sieden an rauhen Rohren beginnt bei geringeren Wärmestromdichten, und es kommt in geringerem Maße zur Hysterese als beim Sieden an glatten Rohren.

Wie aus Abb. 2 hervorgeht, stimmen die Wärmeübergangskoeffizienten von Freon 113 an Stahl- und Kupferrohren mit gleicher Rauigkeit unter Berücksichtigung der Streuung der Versuchspunkte überein.

Die Wärmeübergangskoeffizienten an Rohren mit aufgerauhter ( $R_z = 11,4 - 20$ ) und sandstrahlbehandelter Oberfläche ( $R_z = 58$ ) sind annähernd gleich bei Freon 113 und bei Freon 12 am chargierten Rohr nur ein wenig niedriger. Dies läßt sich folgendermaßen erklären.

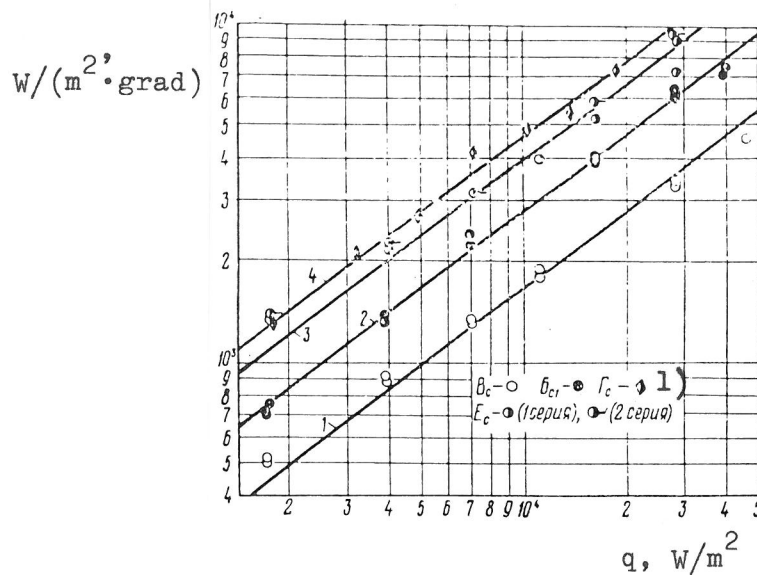


Abb. 3. Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden von Freon 12 an Stahlrohren unterschiedlicher Rauigkeit:

1 -  $R_z = 0,3$ ; 2 -  $R_z = 5,3$ ; 3 -  $R_z = 20$ ;  
4 -  $R_z = 53,5$ .

1)  $V_s$   $\circ$   $B_{s1}$   $\bullet$   $G_s$   $\blacklozenge$   
 $E_s$   $\bullet$  (1. Versuchsreihe),  $\bullet$  (2. Versuchsreihe)

Nimmt erstens die Rauigkeit über ein bestimmtes Grenzmaß zu, kann die Zahl der Keimstellen so groß werden, daß der Abstand zwischen ihnen geringer ist als der Abreißdurchmesser. Die Blasen treten miteinander in Wechselwirkung (z.B. Verschmelzung) und es kommt aufgrund der Rauigkeit zu keiner weiteren Verstärkung des Wärmeübergangs. Möglicherweise ist ein Wert von  $R_z$  von 11 - 20 m für Freon 113 eine solche Grenze.



Zm zweiten wird der Einfluß der Oberflächengüte nicht nur bestimmt durch die Rillentiefe, sondern auch durch ihre geometrische Form, den Krümmungsradius und ihre Verteilung auf der Oberfläche [4, 5]. Beim chargieren können diese Werte anders ausfallen als bei Sandstrahlbehandlung; bei letzterem kam es auch bei kleinen  $R_z$ -Werten zu einer verstärkten Dampfbildung.

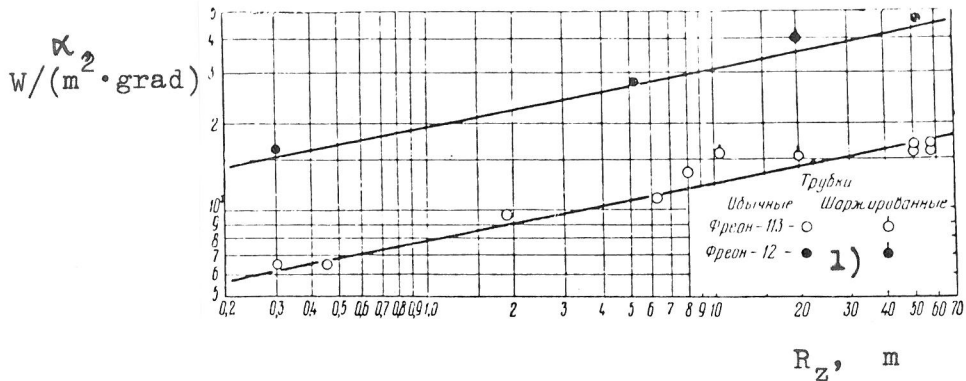


Abb. 4. Einfluß der Rauigkeitstiefe auf den Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden von Kältemitteln

1)

	Röhre	
	gewöhnliche	aufgerauhte
Freon 113	o	o
Freon 12	•	•

Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten von  $R_z$  bei  $q = 10^4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{h)}$  in logarithmischem Maßstab. Der Neigungswinkel der durch die Versuchspunkte gezogenen Geraden beträgt 0,2, folglich ist der Wärmeübergangskoeffizient proportional zu  $\alpha \sim R_z^{0,2}$ .

Stephan hat aufgrund von Versuchen mit Freon 11 festgestellt, daß der Wärmeübergangskoeffizient proportional ist zum Wert  $R_p^{0,133}$  [10]. Dieser Wert (die "Glättungstiefe") bezeichnet die mittlere Höhe der Unebenheiten des Profils,  $R_z$  hingegen die maximale. Deshalb ist  $R_p$  kleiner als  $R_z$ . Man könnte sich vorstellen, daß die numerischen Werte von  $R_p$  eher der mittleren arithmetischen Abweichung des Profils  $R_a$  (GOST 2789-59) entsprechen als  $R_z$ , auch wenn Zweck und Verfahren der Bestimmung von  $R_p$  (DIN Nr 4 763) und von  $R_a$  ebenfalls unterschiedlich sind. Da der Wert  $R_z$  direkt proportional ist zu  $R_a$ , erhalten wir aufgrund unserer Versuchsergebnisse  $\alpha \sim R_a^{0,2}$ . Nimmt man  $R_a = R_p$  an, so beträgt die quantitative Divergenz zwischen unseren Versuchen und Stephans Angaben ungefähr 20 %.

## Schlußfolgerungen

Die Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden von Freon 113 an sandstrahlbehandelten und aufgerauhten Rohren und von Freon 12 an sandstrahlbehandelten Rohren sind annähernd 2,4 - 2,7 mal größer als bei polierten und 1,6 mal größer als bei Rohren ohne Spezialbehandlung.

Die Versuchsergebnisse lassen die Annahme zu, daß eine Erhöhung des Wärmeübergangs in Kältemittelverdampfern durch Aufrauhnen, Kugelregen- oder Sandstrahlbehandlung der Oberfläche der Heizrohre möglich ist. Diese Verfahren können bei Anlagen mit unberippten Stahlrohren besonders effektiv sein.

## L i t e r a t u r

1. Аверин Е. К. Влияние материала и механической обработки поверхности на теплоотдачу при кипении воды. Известия АН СССР, ОТИ, 1954, № 3.  
Averin, E.K.: Vlijanie materialia i mehaničeskoj obrabotki poverchnosti na teplootdaču pri kipeonii vody. In: Izvestija. Akademija nauk SSSR. Otdelenie tehničeskich nauk. Moskva, 1954, Nr 3, S. 116 - 122.  
<Einfluß von Werkstoff und Oberflächenbehandlung auf den Wärmeübergang beim Sieden von Wasser; russ.>
2. Головин В. С., Колчугин Б. А., Лабунцов Д. А. ИФЖ, 1964, № 6.  
Golovin, V.S., Kolčugin, B.A., Labuncov, D.A.: Issledovanie teploobmena pri kipeonii étilovogo spirta i benzola na poverchnostjach iz različnych materialov. In: Inženerno-fizičeskij žurnal. Minsk, 7 (1964), Nr 6, S. 35 - 39.  
<Untersuchung des Wärmeübergangs beim Sieden von Äthylalkohol und Benzol an Oberflächen aus verschiedenen Werkstoffen; russ.>
3. Jakovč, Max  
Heat Transfer. Vol. 1.  
New York: Wiley, 1950, 2. Aufl.
4. Griffith, Peter, Wallis, John D.: The role of surface conditions in nucleate boiling. In: Chemical engineering progress. CEP. Symposium series. New York, 56 (1960), Nr 30, S. 49 - 63.

5. Kurihara, H.M., Myers, J.E.: The effects of superheat and surface roughness on boiling coefficients.  
In: AIChE. American Institute of chemical engineers. New York, 6 (1960), Nr 1, S. 83 - 91.
6. Berenson, P.J.: Experiments on pool boiling heat transfer.  
In: International journal of heat and mass transfer. Oxford, 5 (1962), S. 985 - 999.
7. Tien, C.L.: A hydrodynamical model for nucleate pool boiling.  
In: International journal of heat and mass transfer. Oxford, 5 (1962), S. 533 - 540.
8. Zuber, Novak: Nucleate boiling. The region of isolated bubbles and the similiarity with natural convection.  
In: International journal of heat and mass transfer. Oxford, 6 (1963), Nr 1, S. 53 - 78.
9. Данилова Г. Н., Бельский В. К., Куприянова А. В. «Холодильная техника», 1964, № 2.  
Danilova, G.N., Bel'skij, V.K., Kuprijanova, A.V.: Issledovanie processa kipenia freona-12 kinematografičeskim metodom.  
In: Cholodil'naja tehnika. Moskva, 41 (1964), Nr 2.  
<Kinematographische Untersuchung des Siedens von Freon 12; russ.>
10. Stephan, K.: Berechnung des Wärmeüberganges an siedenden Kältemitteln.  
In: Kältetechnik. Karlsruhe, 15 (1963), Nr 8, S. 231 - 234.

Stuttgart, den 26. März 1982

übersetzt von

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