

Bukin, V.G. (Doktor der techn. Wissenschaften),  
 Prof. G.N. Danilova,  
Djundin, V.A. (Kandidat der techn. Wissenschaften)

Leningrader technologisches Institut für Kälteindustrie

DER WÄRMEÜBERGANG BEIM VERDAMPFEN UND SIEDEN VON FREON-ÖLGEMISCHEN  
 IN BERIESELTEN VERDAMPFERN VON KÄLTEANLAGEN

Übersetzung aus:

Cholodil'naja tehnika. Moskva, 54 (1977),  
 Nr 1, S. 33 - 36.

Russ.: **Теплообмен при испарении и кипении смесей фреонов с маслом  
 в пленочных испарителях холодильных машин**

Teploobmen pri isparenii i kipenii smesej freonov s  
 maslom v plenocnych isparitel'jach cholodil'nych  
 mašin

In Untersuchungen, die in früheren Jahren im Leningrader technologischen Institut für Kälteindustrie<sup>1)</sup> durchgeführt wurden, wurden Ähnlichkeitsgleichungen ermittelt, mit denen der Wärmeübergang in Berieselungsverdampfern mit horizontalen Rohren, die auf der Basis reiner Kältemittel arbeiteten, berechnet werden konnten [1, 2].

Um die Berechnung der Wärmeübergangszahlen für die reinen Kältemittel leichter zu machen, können die Versuchsergebnisse auch mit folgenden dimensional Formeln beschrieben werden:

für den Einflußbereich der erzwungenen Konvektion

$$\alpha_w = C_1 r^{0.22} \left( \frac{s}{d} \right)^{0.48}, \quad (1)$$

1) LTICHП - Leningradskij tehnolgičeskij institut cholodil'noj promyšlennosti (Anm. d. Übers.)

für den Bereich des Blasensiedens

$$\alpha_q = C_2 q^{0,63} p^{0,27}, \quad (2)$$

mit  $\alpha_w, \alpha_q$  — Wärmeübergangszahlen des reinen Kältemittels  
beim Verdampfen und beim Blasensieden,  $W(m^2 \cdot K)$ ;  
C — Koeffizient, der die Eigenschaften der Kältemittel  
berücksichtigt:  
für Freon 12  $C_1 = 7,8 \cdot 10^3, C_2 = 0,162$ ;  
für Freon 22  $C_1 = 9,8 \cdot 10^3, C_2 = 0,187$ ;  
für Freon 113  $C_1 = 5,6 \cdot 10^3, C_2 = 0,135$ ;  
r — Berieselungsdichte,  $m^3/(s \cdot m)$ ;  
s — vertikale Rohrteilung, mm;  
d — Rohrdurchmesser, mm;  
q — Wärmestromdichte,  $W/m^2$ ;  
p — Druck, Pa.

Im Übergangsbereich zwischen Verdampfen und Blasensieden kann die  
Wärmeübergangszahl  $\alpha$  nach der Interpolationsabhängigkeit

$$\frac{\alpha}{\alpha_w} = 0,75 \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_q}{\alpha_w}\right)^2} \quad (3)$$

berechnet werden.

Der Beginn des Übergangsbereichs zeichnet sich durch eine Wärmestrom-  
dichte aus, die dem Siedebeginn des reinen Kältemittels entspricht,  
 $W/m^2$ :

$$q_{ns.} = C_3 l^{0,35} p^{-0,43} \left(\frac{s}{d}\right)^{0,76}, \quad (4)$$

dabei gilt für Freon 12  $C_3 = 18 \cdot 10^6$ ;  
für Freon 22  $C_3 = 16 \cdot 10^6$ ;  
für Freon 113  $C_3 = 13,8 \cdot 10^6$ .

Der Wärmestrom, der dem Beginn des Blasenverdampfens entspricht, wird  
bestimmt mit  $q \approx 3 q_{ns.}$

In Kälteanlagen mit Kolben-, Rotations- und Schneckenverdichtern ist  
das Arbeitsmittellein Freon-Ölgemisch. Es gibt keine Angaben über den  
Wärmeübergang beim Verdampfen und Sieden von Freon-Ölgemischen in  
Berieselungsverdampfern. Um dieses Problem zu untersuchen, wurde von  
uns eine Untersuchung an einer Anlage durchgeführt, und zwar nach  
der in [2] beschriebenen Methode.

Die Verlaufsparameter wurden in den folgenden Intervallen variiert:  
Sättigungstemperatur  $t_s = 10 \div -40^\circ C$ ; Wärmestromdichte  $q = (1-16) \cdot 10^3$

$W/m^2$ ; Berieselungsdichte  $\Gamma = (0,3-2,4) \cdot 10^{-4} m^3/(c \cdot m)$ ; Ölgehalt im Gemisch  $\xi_{\text{Ö}} = 0-0,2 \text{ kg/kg}$ .

Die Versuche wurden an horizontalen Kupferrohrbündeln mit  $20 \times 2 \text{ mm}$  Durchmesser und an Rohren aus Stahl 1Ch18N9T (0,1 % C; 18 % Cr; 9 % Ni;  $\leq 1$  % Ti) mit einem Durchmesser von  $18 \times 0,3 \text{ mm}$  und einer Oberflächenrauigkeit von  $R_z = 1 \mu\text{m}$  und  $\frac{s}{d} = 1,3$  durchgeführt.

Als Versuchsmedien wurden Gemische aus Freon 12 mit ChF-12-Öl und aus Freon 22 mit FM-5,6AP-Öl verwendet. Im Temperaturbereich, der für die Verdampfung in Kälteanlagen charakteristisch ist, sind die Öle vollständig im Kältemittel gelöst.

Die Konzentration des Öls wurde mit Hilfe eines Spezialgefäßes gemessen [2], welches durch eine Flüssigkeit vorgekühlt wurde. Die Ölversuchsproben wurden durch ein Ventil entnommen, das die Zufuhr des Kältemittels zum Verdampfer regulierte. Daß das Gemisch unter der Einwirkung der Umgebungswärme nicht siedete, wurde durch ein Sichtfenster kontrolliert. Nach Einspritzen der Flüssigkeit in den Konzentrationsmesser wurde das Kältemittel-Absaugventil geöffnet. Um ein Mitreißen von Schaum, der sich beim Sieden bildet, zu verhindern, war im Gefäß ein Dampftrockner vorgesehen. Nachdem ein großer Teil des Kältemittels ausgekocht war, wurde das Gemisch in ein offenes Gefäß gegossen; dabei verdampfte das restliche Kältemittel. Danach wurde die Konzentration des Öls bestimmt nach der Gleichung

$$\xi_{\text{Ö}} = \frac{G_{\text{Ö}}}{\left(Vc - \frac{G_{\text{Ö}}}{\rho_{\text{Ö}}}\right) \rho_{\text{Km}} + G_{\text{Ö}}}, \quad (5)$$

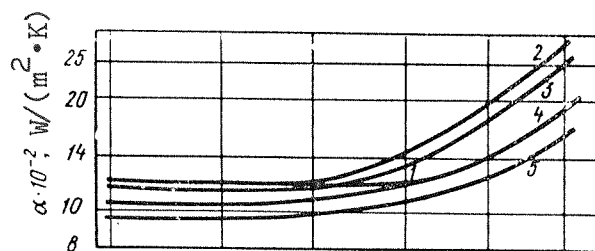
mit  $G_{\text{Ö}}$  - Ölmasse, kg;  
 $V$  - Volumen des Meßgefäßes,  $m^3$ ;  
 $\rho_{\text{Ö}}, \rho_{\text{Km}}$  - Dichte von Öl und Kältemittel,  $kg/m^3$ .

Die Beobachtungen des Siedevorgangs zeigten, daß die Filmbeweglichkeit mit zunehmender Ölkonzentration aufgrund der höheren Viskosität der Flüssigkeit abnimmt und daß sich die Hydrodynamik der Strömung beim Übergang von einem Rohr auf das andere verändert.

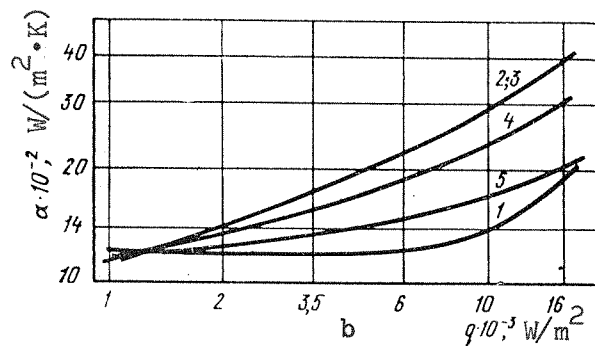
Beim Verdampfen wurde ein größerer Einfluß des Wärmestroms auf die

Hydrodynamik des Gemischs festgestellt als bei Verwendung von reinen Kältemitteln. Bei zunehmender Wärmebelastung nahmen Welligkeit und Beweglichkeit des Rieselfilms merklich zu, was beim Verdampfen von reinen Kältemitteln nicht der Fall war.

Außerdem wurde festgestellt, daß das Sieden von Freon-Ölgemischen unter vergleichbaren Bedingungen bereits bei niedrigeren Werten von  $q$  beginnt als das Sieden von reinen Kältemitteln. Bei  $\xi_0 = 0,1$  und  $t_s = -30^\circ\text{C}$  z.B. traten einzelne Freon 12-Dampfblasen bereits bei  $q = 2 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$  auf, wohingegen reines Kältemittel bei derselben Temperatur erst bei  $q = 4,5 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$  zu sieden begann. Folglich verbessert die Zugabe von Öl zum Kältemittel im Bereich der untersuchten Konzentrationen die Bedingungen der Dampfblasenbildung. Bei den Versuchen konnte ebenfalls beobachtet werden, wie beim Sieden der Gemische auf der Oberfläche des Films ein beständiger Schaum auftrat, dessen Menge von Reihe zu Reihe zunahm. Der Schaum veränderte die Hydrodynamik der Strömung und wirkte sich auf den Wärmeübergang aus.



a



b

Abbildung 1. Abhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten des Freon 12 - Öl  $\text{ChF-12}$ -Gemisches von der Wärmestromdichte bei verschiedenen Ölkonzentrationen: Versuchsbedingungen:  $t_s = -10^\circ\text{C}$ ,  $\Gamma = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ :  
 a - für die erste Reihe des Rohrbündels; b - für die sechste;  
 1 -  $\xi_0 = 0$ ; 2 - 0,02; 3 - 0,047; 4 - 0,11; 5 - 0,19.

Einige Ergebnisse der Versuche mit Freon 12-Öl ChF-12-Gemischen sind in Abb. 1 angegeben. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für Freon 22-Öl FM-5,6AP-Gemische im gesamten Bereich der Verlaufsparameter ermittelt.

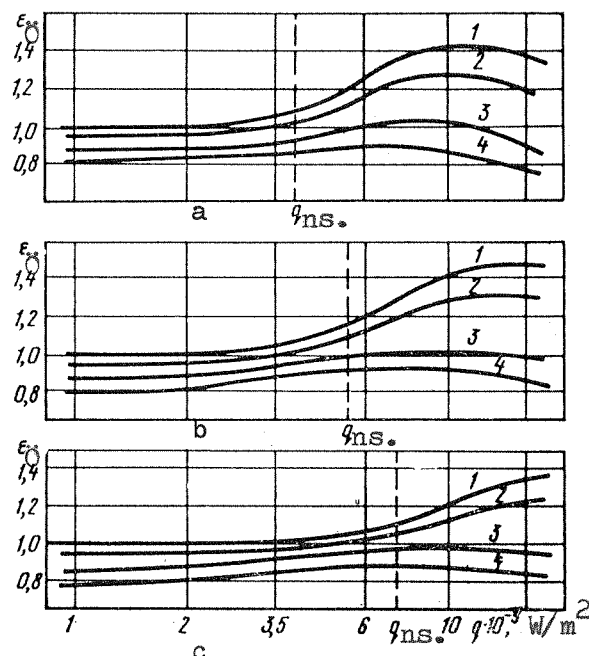


Abbildung 2. Abhängigkeit des Verhältnisses der Wärmeübergangskoeffizienten  $\epsilon_{\ddot{O}} = \frac{\alpha_{\text{Gem}}}{\alpha_0}$  beim Verdampfen und Sieden an einem einzelnen Rohr von Freon 12 - Öl ChF-12-Gemisch und reinem Kältemittel von der Wärmestromdichte und der Ölkonzentration bei verschiedenen Sättigungstemperaturen und  $\Gamma = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ :  
 a -  $t_s = \pm 0^\circ\text{C}$ ; b -  $t_s = -10^\circ\text{C}$ ; c -  $t_s = -30^\circ\text{C}$ ; 1 -  $\epsilon_{\ddot{O}} = 0,02$ ; 2 - 0,047; 3 - 0,11; 4 - 0,19.

In Abb. 2 ist das Verhältnis der Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden eines Freon-Ölgemisches und von reinem Kältemittel an einem einzelnen Rohr dargestellt:

$$\epsilon_{\ddot{O}} = \frac{\alpha_{\text{Gem}}}{\alpha_0}$$

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigte, daß die Intensität des Wärmeübergangs an einem Einzelrohr beim Verdampfen mit zunehmender

Ölkonzentration  $\xi_0$  abnimmt und  $\epsilon_0 = \frac{\alpha'_{\text{Gem}}}{\alpha_0} = 0,8$  bei  $\xi_0 = 0,2$  beträgt. Dies läßt sich hauptsächlich dadurch erklären, daß die Viskosität des Gemisches zunimmt, was wiederum dazu führt, daß der Rieselfilm dicker und seine Geschwindigkeit geringer wird.

Im Übergangsbereich zwischen erzwungener Konvektion und Blasenverdampfung ist der Wärmeübergangskoeffizient des Freon-Ölgemischs bei  $\xi_0 < 0,1$  größer als der Wärmeübergangskoeffizient von reinem Kältemittel. Dies beruht darauf, daß das Freon-Ölgemisch früher als das reine Kältemittel siedet.

Der Einfluß der Wärmestromdichte auf die Intensität des Wärmeübergangs ist bei Gemischen immer schwächer als bei reinen Substanzen, und er nimmt mit zunehmender Ölkonzentration ab. Deshalb nimmt das Verhältnis  $\frac{\alpha'_{\text{Gem}}}{\alpha_n}$  bei zunehmendem  $q$  im Bereich der Blasenverdampfung ab. Im Bereich höherer Ölkonzentrationen ist  $\alpha'_{\text{Gem}}$  bei  $\xi_0 \geq 0,1$  und bei allen angenommenen Wärmestromdichtewerten kleiner als  $\alpha_0$ , auch wenn sich auch hier ein früherer Siedebeginn des Gemischs andeutet.

Mit abnehmendem Druck verschiebt sich die Grenze zwischen dem Siede- und dem Verdampfungsbereich  $q_{\text{ns}}$  zugunsten größerer Wärmestromdichten, doch bleibt der Einfluß von  $q$  und  $\xi_0$  auf den Wärmeübergang innerhalb eines jeden Bereiches praktisch konstant.

Im Bereich des voll entfaltetes Blasensiedens kann der geringere Wärmeübergangskoeffizient des Freon-Ölgemischs  $\alpha'_{\text{Gem}}$ , verglichen mit dem Wärmeübergangskoeffizienten von reinem Kältemittel  $\alpha_0$ , dadurch erklärt werden, daß eine Zunahme der Ölkonzentration in der Grenzschicht beim intensiven Sieden möglich ist.

In Abb. 3 ist das Verhältnis  $\epsilon_R = \frac{\alpha'_{\text{Gem}}}{\alpha_{\text{Gem}}}$  der Wärmeübergangskoeffizienten beim Verdampfen und Sieden des Freon 12-Öl ChF-12-Gemisches an der i-ten Rohrbündelreihe und an einem Einzelrohr angegeben. Ähnliche Verhältnisse wurden auch für die Freon 22-Öl FM-5,6AP-Gemische im gesamten untersuchten Bereich der Verlaufparameter ermittelt.

Die Experimente ergaben, daß der Einfluß der Reihenzahl auf den Wärmeübergang beim Sieden mit höherer Ölkonzentration bis  $\xi_0 = 0,11$  zu-

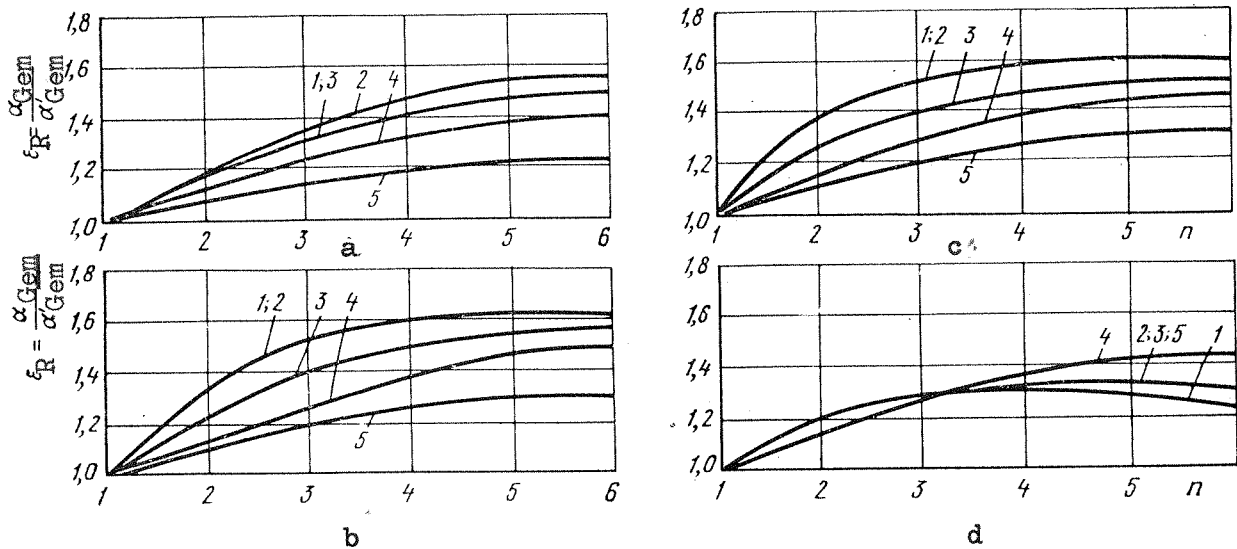


Abbildung 3. Abhängigkeit des Verhältnisses  $\epsilon_R = \frac{\alpha_{Gem}}{\alpha_{Gem}}$  von der Anzahl der Rohrbündelreihen, der Wärmestromdichte und der Ölkonzentration bei  $t_s = -10^\circ\text{C}$ ,  $\Gamma = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ :

a -  $\epsilon_0 = 0,02$ ; b -  $0,11$ ; c -  $0,047$ ; d -  $0,19$ ; 1 -  $q = 16\ 000 \text{ W/m}^2$ ;  
 2 -  $10\ 000$ ; 3 -  $6\ 000$ ; 4 -  $3\ 500$ ; 5 -  $2\ 000$ .

nimmt und bei  $\xi_0 > 0,11$  abnimmt; dies wird dadurch hervorgerufen, daß die Schaumbildung bei höheren Ölkonzentrationen schlechter wird. Aus demselben Grunde tritt eine Veränderung beim Einfluß der Wärmestromdichte  $q$  auf den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{Gem}$  des Freon-Ölgemischs an jeder Reihe des gesamten Rohrbündels auf. Der Grund dafür kann auch sein, daß bei intensivem Sieden von Freon-Ölgemischen mit hoher Ölkonzentration eine beträchtliche Zunahme von  $\xi_0$  in der Grenzschicht möglich ist.

Die Intensitätszunahme des Wärmeübergangs über das gesamte Rohrbündel läßt sich dadurch erklären, daß ein beständiger fein zerteilter Schaum vorhanden ist, dessen Menge von Reihe zu Reihe zunimmt. Dabei werden die unten liegenden Rohre nicht von einem dichten Flüssigkeitsstrom berieselt, sondern von einem Schaumgemisch, das eine große Anzahl von Dampfblasen enthält; diese stellen zusätzliche Dampfbildungszentren dar.

Während des Verdampfens, wenn die Dampfbildung an der Außenfläche des Films vonstatten geht, schäumt das Gemisch nicht; damit verän-

dert sich die Intensität des Wärmeübergangs von Reihe zu Reihe praktisch nicht.

Die größte Zunahme des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{\text{Gem}}$  der einzelnen Reihen des gesamten Rohrbündels wurde im Übergangsbereich zwischen freier Konvektion und Blasenverdampfung festgestellt, wo die Anzahl der aktiven Dampfbildungszentren aufgrund der Schaumbildung stark zunimmt. Es muß hinzugefügt werden, daß die Zunahme der Schaummenge sowie die Intensitätszunahme des Wärmeübergangs in der zweiten - vierten Reihe stark zutage tritt, wohingegen  $\alpha_{\text{Gem}}$  in den letzten Reihen beträchtlich langsamer zunimmt.

Desweiteren besteht ungeachtet der Vermischung des Rieselfilmes beim Übertritt von einem Rohr zum anderen die Möglichkeit, daß die Ölkonzentrationen über die Filmdicke ungleichmäßig sind, besonders beim Blasenverdampfen.

Die mittleren Wärmeübergangskoeffizienten für ein Rohrbündel mit sechs Reihen, die aufgrund der durchgeführten Versuche ermittelt wurden, können durch die folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$\bar{\alpha}_{\text{Gem}} = \alpha_0 \varepsilon_{\text{Ö}} \bar{\varepsilon}_{\text{R}} \quad (6)$$

bei  $0,02 \leq \xi_{\text{Ö}} \leq 0,1$  und  $q < q_{\text{ns}}$ :

$$\varepsilon_{\text{Ö}} = 1 - \xi_{\text{Ö}} \quad (7)$$

bei  $q_{\text{ns}} \leq q \leq q_{\text{s}}$ :

$$\varepsilon_{\text{Ö}} = C_4 \rho^{(0,15 - \xi_{\text{Ö}})} q^{2,3(0,11 - \xi_{\text{Ö}})} \quad (8)$$

mit:

bei $\xi_{\text{Ö}} = 0,02$	$C_4 = 0,041$ ;
bei $\xi_{\text{Ö}} = 0,047$	$C_4 = 0,093$ ;
bei $\xi_{\text{Ö}} = 0,10$	$C_4 = 0,430$ .

In den Formeln (6) - (8) bedeuten

$\bar{\alpha}_{\text{Gem}}$  - über das Rohrbündel mittlere Wärmeübergangskoeffizient des Freon-Ölgemischs,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  
 $\varepsilon_{\text{Ö}}$  - Koeffizient, der dem Einfluß des Öls berücksichtigt;  
 $\bar{\varepsilon}_{\text{R}}$  - Koeffizient, der den Einfluß des Rohrbündels mit n Reihen berücksichtigt.



Für  $0,1 \leq \xi_0 \leq 0,2$  wird  $\varepsilon_0$  im gesamten untersuchten Bereich nach Gleichung (7) bestimmt.

Der Koeffizient, der den Einfluß des Rohrbündels bei  $0,2 q_{ns} \leq q \leq q_s$  und  $\xi_0 = 0,02 \div 0,15$  berücksichtigt, wird nach der folgenden Abhängigkeit berechnet:

$$\bar{\varepsilon}_R = 0,59q^{0,1}. \quad (9)$$

Die Auswertung der ermittelten Angaben ergibt, daß Formel (6) zur Berechnung der berieselten Verdampfer von Kälteanlagen, die bei  $q = 3\ 000 - 6\ 000\ \text{W/m}^2$ ,  $n = 10 - 20$ ,  $t_s = 0 - -30\ ^\circ\text{C}$  mit Freon-Ölgemischen arbeiten, empfohlen werden kann. Dabei berechnet man die Werte der Koeffizienten, die den Einfluß des Öls und der Reihenzahl des Rohrbündels berücksichtigen, nach den Relationen (7), (9), den Wert  $\alpha_0$  je nach Betriebszustand nach den Gleichungen (1), (2), (3).

#### Verzeichnis der benutzten Literatur

1. Исследование теплообмена при кипении низкотемпературных жидкостей в условиях малых плотностей теплового потока. — В сб. V Всесоюзной конференции по теплообмену. Т. III, ч. I, Минск, 1976, с. 22—31. Авт: Г. Н. Данилова, Э. И. Гуйго, А. В. Боршанская, В. Г. Букни, В. А. Дюндин, А. А. Козырев, Л. С. Малков, Г. И. Малюгин.

Danilova, G.N., Gujgo, E.I., Borišanskaja, A.V., Bukin, V.G., Djundin, V.A., Kozyrev, A.A., Malkov, L.S., Maljugin, G.I.:  
Issledovanie teploobmena pri kipenii niskotemperaturnych židkostej v uslovijach malych plotnostej teplovogo potoka.  
In: Teplomassoobmen - V. Materialy V Vsesojuznoj konferencii po teplomassoobmenu. Minsk, 1976, Band III, Teil 1 (Teplomassoobmen pri fazovych prevraščenijach), S. 22 - 31.  
Deutsch: Intensivierung des Wärmeübergangs beim Verdampfen von Kältemitteln bei geringen Wärmestromdichten. - Übersetzung Nr. 160 der Übersetzungsstelle der Universitätsbibliothek Stuttgart, 12 Seiten.

2. Г. Н. Данилова, В. Г. Букин, В. А. Дюндин. Исследование теплоотдачи в элементах оросительных испарителей. — «Холодильная техника», 1976, № 6, с. 21—25.

Danilova, G.N., Bukin, V.G., Djundin, V.A.: Issledovanie teplootdači v élementach orositel'nych isparitelej.

In: Cholodil'naja tehnika. Moskva, 53 (1976), Nr 6, S. 21 - 25.  
(Untersuchung des Wärmeübergangs in Berieselungsverdampfern)

---

Stuttgart, den 11. Oktober 1978

übersetzt von

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