

41/313

Rebrov, P.N., Bukin, V.G. (Kand.d.techn.Wiss.)

WÄRMEÜBERGANG BEIM SIEDEN VON R12 AN MEHRREIHIGEN
GLATTROHRBÜNDELN

Deutsche Vollübersetzung aus:

Cholodil'naja tehnika. Moskva, 61 (1984), Nr 12, S. 41 - 44.

Russ.: ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ
R12 НА МНОГОРЯДНОМ
ПУЧКЕ ГЛАДКИХ ТРУБОК

Теплоотдача при кипении R12 на многорядном пучке
гладких труб

The effect of satn. temp.,
heat-flux d., and no. of rows of tubes on the heat transfer was
studied in boiling of R-12. A correlation is presented for the
heat-transfer coeff. with the heat flux and satn. pressure. The exptl.
heat-transfer data for bundles with a vertical row are valid only for
fully developed boiling.

Noch gibt es keine verallgemeinerten Abhängigkeiten zur Beschreibung der komplizierten Wärmeübergangsvorgänge beim Sieden an mehrreihigen Glattrohrbündeln. Die vorhandenen Versuchsdaten beziehen sich hauptsächlich auf fünf- bis siebenreihige Rohrbündel. Deshalb ist eine weitere Untersuchung dieses Vorgangs unumgänglich. Um den Einfluß von Sättigungstemperatur, Wärmestromdichte und Anzahl der Reihen auf den Wärmeübergangskoeffizienten des Rohrbündels $\bar{\alpha}_R$ aufzuzeigen, wurde von den Verfassern der Wärmeübergang beim Sieden von reinem R12 an einem 1 m hohen Glattrohrbündel untersucht.

Übersetzungstelle
der Universitätsbibliothek Stuttgart

Die Versuchsanlage ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

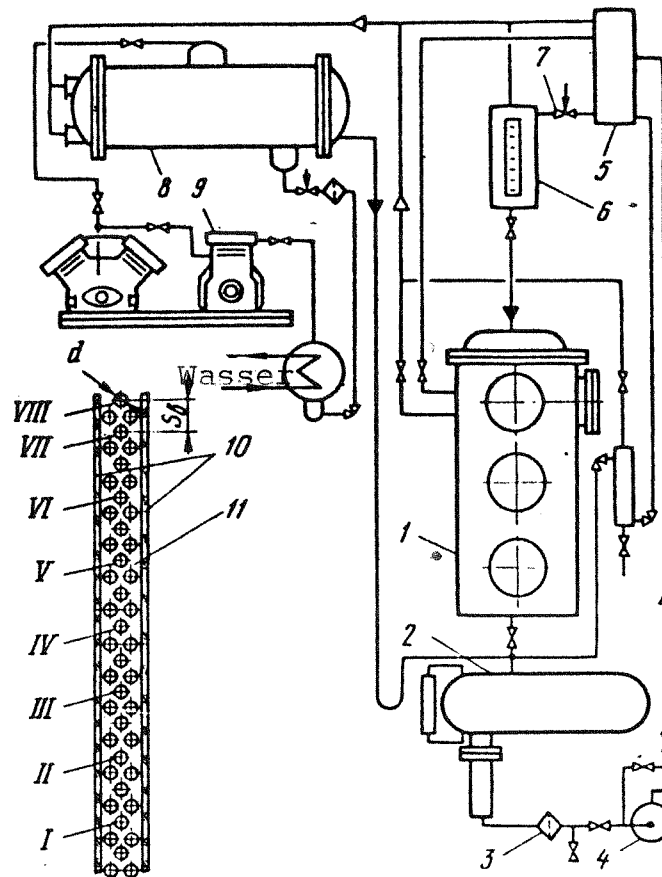


Abb. 1. Schematische Darstellung der Versuchsanlage:

- 1) Versuchsverdampfer; 2) Auffangbehälter;
- 3) Filter; 4) Pumpe; 5) Niveauregler; 6) Meßbehälter; 7) Regelventil; 8) Kondensator (Verdampfer); 9) Kältemaschine; 10) Glas-Scheiben; 11) Glattrohrbündel; I - VIII Rohre, für die der Wärmeübergangskoeffizient bestimmt wurde.

Das Gehäuse des Versuchsverdampfers besteht aus einem Stahlrohr mit 450 mm Innendurchmesser und 1200 mm Länge. Zu Beobachtungszwecken sind vier Sichtfenster mit 200 mm Durchmesser (drei von vorn und eins seitlich) daran angebracht. Im Verdampfer ist das Versuchsrohrbündel mit schachbrettförmig angebrachten Rohren untergebracht. Auf beiden Seiten des Rohrbündels befinden sich Glasscheiben. Der Rohrboden des Rohrbündels ist aus Textolit. Die industriell hergestellten Stahl-

rohre haben den Außendurchmesser $d = 22 \text{ mm}$ und die Länge $l = 350 \text{ mm}$. Die Gesamtzahl der Rohre im Rohrbündel beträgt 45, je 15 in senkrechter Anordnung. Die Anzahl der waagrechten Rohrreihen beträgt von oben nach unten $n = 30$. Der relative Abstand zwischen den Rohrachsen beträgt vertikal $(S_v/d) = 2,5$ (S_v Abstand zwischen den Rohren von oben nach unten). Der relative Mindestabstand zwischen den Rohrachsen ist $S/d = 1,44$ (S Mindestabstand zwischen den Rohren). Dies entspricht dem Abstand in den gültigen Rohrbündelverdampfern.

In den Versuchen wurden alle 45 Rohre des Rohrbündels beheizt. Die Wärmeübergangskoeffizienten wurden für acht Rohre in der Mittelreihe bestimmt (siehe Abb. 1).

Die Wandtemperatur eines jeden der acht Rohre wurde mit drei Thermoelementen gemessen. Sie waren gleichmäßig über die Länge des Rohrquerschnitts verteilt. Die Thermo-EMK wurde mit dem FZO-K-System bestimmt. Die Temperatur der Flüssigkeit für die gesamte Rohrbündelhöhe wurde an vier Stellen gemessen, zur Kontrolle war ein Quecksilberthermometer mit $0,1^\circ\text{C}$ -Gradeinteilung angebracht.

Die Versuche wurden im Meßbereich der Wärmestromdichte von $q = 1 - 20 \text{ kW/m}^2$ und der Sättigungstemperatur von $t_s = 10^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$ durchgeführt.

Durch in den Rohren angebrachte Heizleiter wurde in den Versuchen der Wärmestrom erzeugt. Die Heizleiter wurden über die Autotransformatoren RNO-250-10 aus dem Wechselstromnetz versorgt.

Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der ermittelten Ergebnisse wurden auf derselben Anlage Versuche mit einem einzigen Stahl-Glattrohr durchgeführt. Die Versuchsdaten stimmen mit den nach G.N. Danilovas Gleichung errechneten Ergebnissen /2/ gut überein.

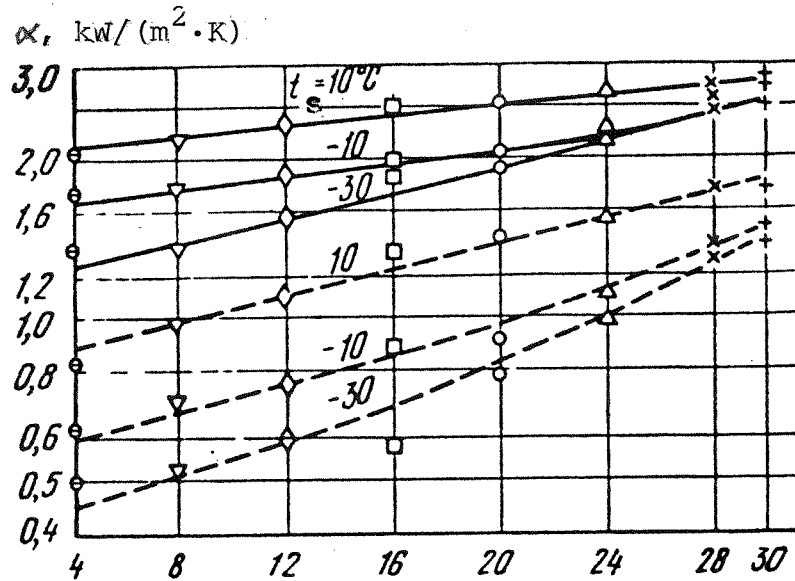
Die Beobachtungen ergaben, daß das Bild beim Sieden von R12 an einem mehrreihigen Rohrbündel von der Wärmestromdichte und der Sättigungstemperatur abhängt. So bildeten sich bei $q = 2 \text{ kW/m}^2$ und $t_s = -10^\circ\text{C}$ erste Dampfblasen nur in den oberen Rohren des Bündels. Mit zunehmendem q wurde die Blasenbildung intensiver und die Anzahl der Rohre, an denen sich Dampfblasen bildeten, wurde größer. Bei $q > 5 \text{ kW/m}^2$ war an allen Rohren des Bündels Blasenbildung zu beobachten. Festgestellt wurde, daß die nach oben steigenden Dampfblasen im unteren Teil des Rohrbündels ihre Abmessungen über eine gewisse Wegstrecke praktisch nicht veränderten. Die Länge dieser Wegstrecke hing von den Werten q , t_s ab und wurde bei deren Zunahme geringer, betrug bei $q = 20 \text{ kW/m}^2$ und $t_s = -10^\circ\text{C}$ jedoch noch immerhin annähernd 100 mm, ohne daß sich die Abmessungen der Blasen merklich veränderten. Diese Erscheinung hängt damit zusammen, daß die unteren Rohrreihen von gekühlter Flüssigkeit umspült wurden, wie auch die Messungen zeigten.

Der sich an den unteren Rohren bildende Dampf steigt mit der Flüssigkeit nach oben und bildet dabei ein Dampf-Flüssigkeitsgemisch mit kontinuierlich zunehmendem Dampfgehalt, wobei die Dichte des Gemisches stetig abnimmt. Infolgedessen werden die Kräfte, die die Dampfblasen heben, schwächer und gehen in chaotische Bewegungen über, wodurch ihr Weg und ihre Verweildauer innerhalb des Rohrbündels größer und die Dampf-abfuhr verzögert werden. Aufgrund dessen nimmt der Dampfgehalt des Dampf-Flüssigkeitsgemisches zu. Bei großer Rohrhöhe befinden sich deshalb die oberen Rohre gewissermaßen in einer Schaumschicht.

In einigen Arbeiten /1, 4/ wird darauf hingewiesen, daß ab 5 - 6 Reihen eine Stabilisierung der lokalen Wärmeübergangskoeffizienten eintritt, und daß unter bestimmten Bedingungen an den oberen Reihen eine fortschreitende Wärmeübergangsabnahme beobachtet werden kann /5/, hervorgerufen durch den "Verdampfungs"-Effekt.

Die Ergebnisse unserer Versuche zeigten im gesamten Veränderungsbereich von q und t_s weder eine Stabilisierung des Wärmeüber-

übergangs noch den "Verdampfungs"-Effekt.



Reihen des Rohrbündels in lfd Nr

Abb. 2. Abhängigkeit der lokalen (in Reihen) Wärmeübergangskoeffizienten α von der Anzahl der Reihen beim Sieden von R12 an einem 30reihigen Glattrohrbündel bei verschiedenen Sättigungstemperaturen:

———— $q = 10 \text{ kW/m}^2$; - - - - - $q = 2 \text{ kW/m}^2$

Wie aus Abb. 2 hervorgeht, nehmen die lokalen (in Reihen) Wärmeübergangskoeffizienten α von den unteren bis zu den oberen Reihen bei allen 30 Rohrbündelreihen zu.

Der Einflußgrad der Reihenzahl auf den Wert von α tritt bei niedrigen Sättigungstemperaturen und geringen Wärmestromdichten stärker zutage. Aus Abb. 2 geht auch hervor, daß der Einfluß der Sättigungstemperatur auf den Wärmeübergang im unteren Teil des Rohrbündels ausreichend groß und analog ist zum Einfluß beim Sieden an einem Einzelrohr. Im oberen Teil des Rohrbündels (Reihen Nr 28 und 30) hängt die Intensität des Wärmeübergangs praktisch nicht von der Sättigungstemperatur ab.

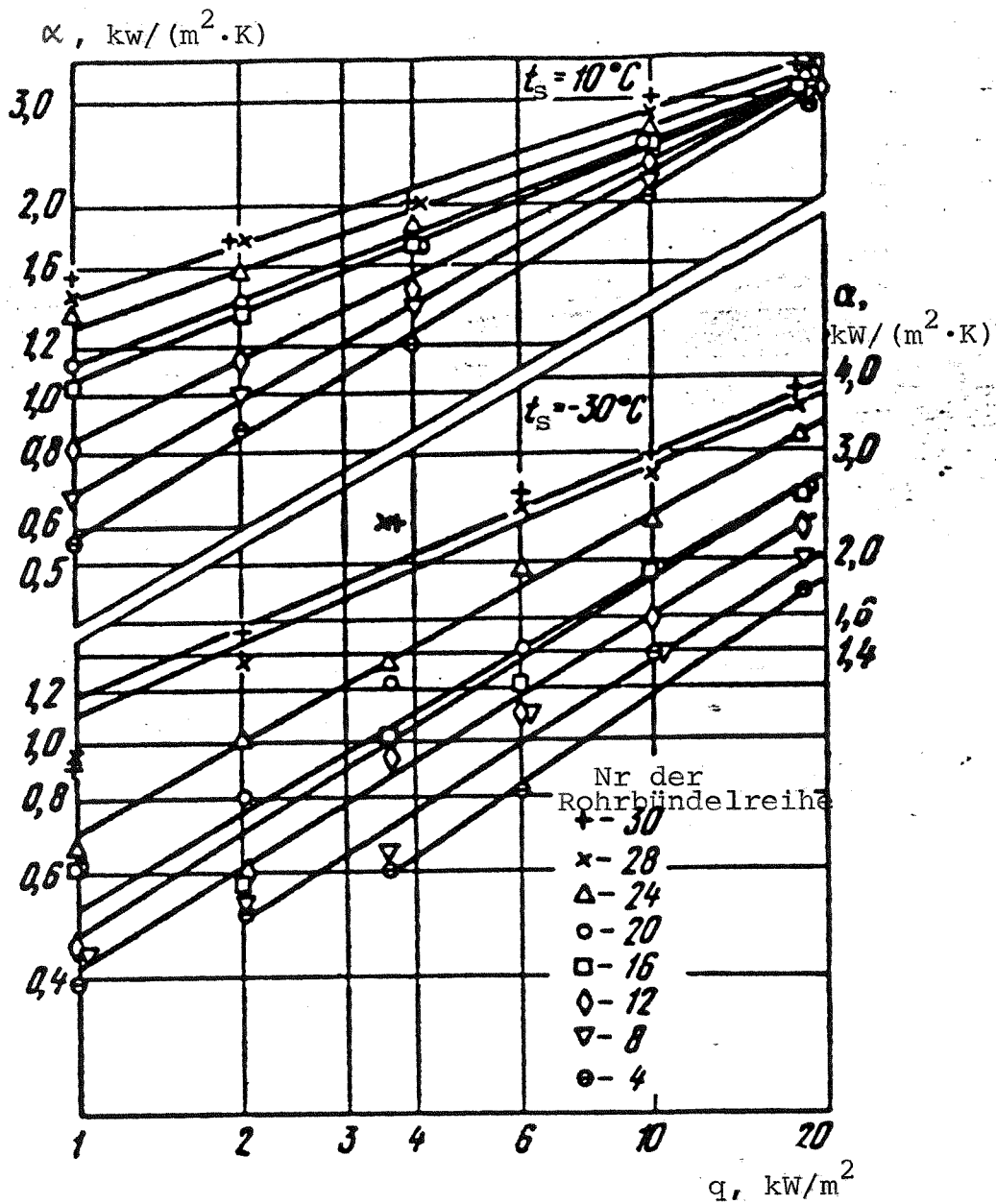


Abb. 3. Abhängigkeit der lokalen Wärmeübergangskoeffizienten α von der Wärmestromdichte q beim Sieden von R12 an einem 30reihigen Glattrohrbündel und $S/d = 1,44$

In Abb. 3 ist die Abhängigkeit des lokalen Wärmeübergangskoeffizienten von der Wärmestromdichte dargestellt. Die ermittelte Abhängigkeit ist für den oberen und unteren Teil des Rohrbündels qualitativ gleich, der Einflußgrad von q auf den Wärmeübergang wird in den oberen Reihen hingegen schwächer. Dies ist folgendermaßen bedingt: Die hochsteigenden

Blasen erzeugen nicht nur eine turbulente Strömung im Wandbereich, sondern verstärken auch den Wärmeaustausch. Mit zunehmendem q wird die Dichte der Dampfbildungszentren an der Rohroberfläche größer. Deshalb nimmt der Intensivierungseinfluß des hochsteigenden Dampf-Flüssigkeitgemisches ab.

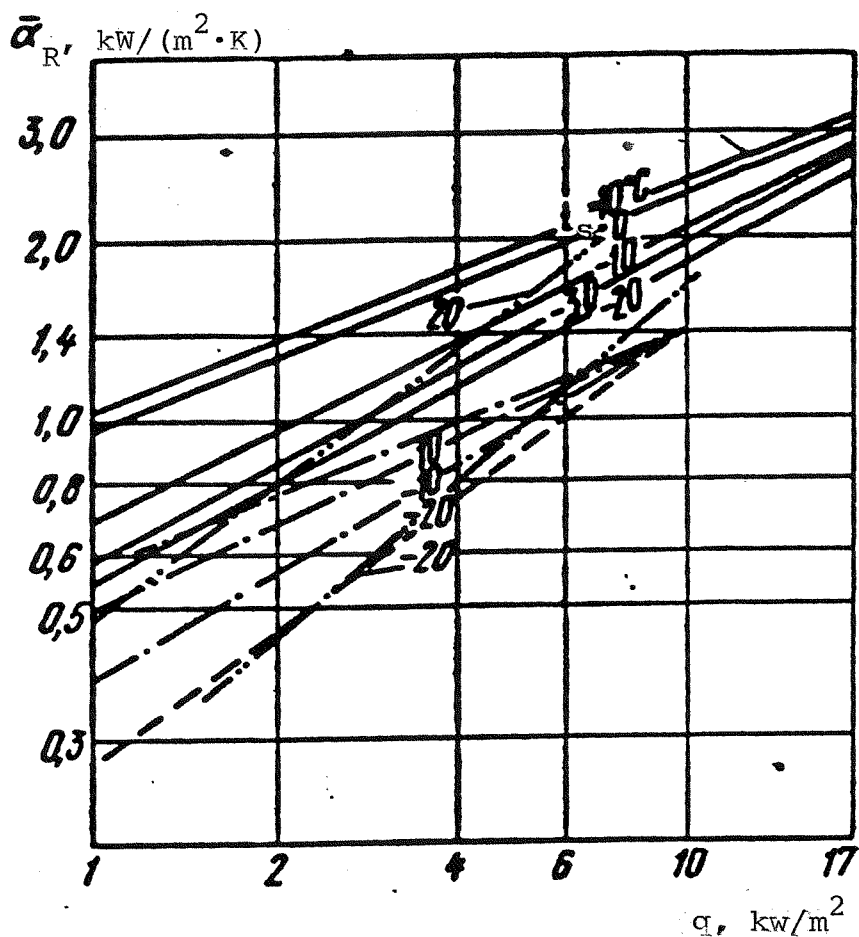


Abb. 4. Abhängigkeit des im Rohrbündel durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{\alpha}_R$ beim Sieden von R12 an einem 30reihigen Glattrohrbündel bei verschiedenen Werten von t_s :

— die Verfasser; - - - - - /1/;
 - . - . - /4/; - . - . - . - - - /3/

In Abb. 4 ist die Abhängigkeit des für das Rohrbündel durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{\alpha}_R$ von q dargestellt. Festgestellt wurde, daß der Unterschied in den Werten der durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten des Rohrbündels $\bar{\alpha}_R$ und eines Einzelrohres α mit abnehmender Sättigungstemperatur und geringerem q zunimmt. Beim Sieden in einem mehrreihigen Rohrbündel hat q weniger Einfluß auf $\bar{\alpha}_R$ als beim Sieden an einem Einzelrohr. So ist in unseren Versuchen $\bar{\alpha}_R \sim q^{0,4 - 0,5}$, dagegen bei einem Einzelrohr unter denselben Bedingungen $\alpha \sim q^{0,6 - 0,7}$. Der Einfluß von t_s auf den Wärmeübergang zeigt sich bei kleinen q und den unteren Rohrbündelreihen beinahe ebenso deutlich wie bei einem Einzelrohr. Je nach Zunahme der Rohrbündelhöhe wird dieser Einfluß schwächer. Bei den oberen Reihen kommt im Siedebereich praktisch kein Einfluß von t_s auf α vor.

Die in Abb. 4 angegebenen Abhängigkeiten zeigen, daß die ermittelten Versuchsdaten qualitativ mit den Angaben anderer Verfasser /3/ übereinstimmen. Der quantitative Einfluß der Reihenzahl des Rohrbündels fiel in unseren Versuchen bei niedrigen Werten von q und t_s wesentlich größer aus. Beim Vergleich mit den Angaben in Arbeit /4/ bei $t_s = -10^\circ\text{C}$ und $q = 3\text{kW/m}^2$ z.B. ist das Verhältnis der durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten eines 30reihigen und 6reihigen Rohrbündels $\bar{\alpha}_R^{30}/\bar{\alpha}_R^6 = 1,6$, und bei $q = 10\text{ kW/m}^2$ liegt dieses Verhältnis bei 1,4. Größere Werte der durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten des Rohrbündels in den Versuchen lassen sich mit einer größeren Anzahl an Rohrbündelreihen erklären.

Untersucht wurde auch, welchen Einfluß die Richtung der Kältemittelzufuhr in das Rohrbündel hat, ob von oben oder von unten. Die Versuchsergebnisse zeigten, daß die Strömungsrichtung der Flüssigkeit keinen Einfluß auf den Wärmeübergang hat. Eine gewisse Differenz in den Versuchsergebnissen wurde nur bei den oberen Rohren und geringen Werten von q festgestellt. Dies hängt damit zusammen, daß die lokale Turbulenz durch die Zufuhrströmung einen zusätzlichen Einfluß auf den Wärmeübergang hat.

Zur Überprüfung des Einflusses der Glasscheiben auf den Wärmeübergang des Rohrbündels wurden Versuche ohne die seitlichen Glasscheiben durchgeführt. Festgestellt wurde, daß das Vorhandensein der Glasscheiben, die eine gerichtete Zirkulation des R12 hervorrufen, sich nicht auf den Wärmeübergang der Mittelreihe des Rohrbündels auswirkt.

Um die Einwirkung der Dampfbildung an den Seitenreihen auf den Wärmeübergang der Mittelreihe bewerten zu können, wurden Versuche bei $t_s = -10^{\circ}\text{C}$ durchgeführt, wobei nur eine Mittelreihe beheizt wurde ($q_{\text{seit}} = 0 \text{ kW/m}^2$). Die Versuchsergebnisse zeigen, daß der Einflußgrad der Dampfbildung der Seitenreihen auf den Wärmeübergang der Mittelreihe von der Wärmestromdichte der Mittelreihe abhängt.

Bei geringen q ($2,0 \text{ kW/m}^2$) führt die fehlende Beanspruchung der Seitenreihen zu einer Abnahme des Wärmeübergangs durch die Mittelreihe des Rohrbündels um annähernd 20 %. Bei voll ausgebildetem Sieden hat die Wärmebelastung der Seitenreihen praktisch keinen Einfluß auf den Wärmeübergang der Mittelreihe.

Dies entspricht früheren Vorstellungen /2/, daß der Grad des Intensivierungseinflusses der aufsteigenden Dampfströmung auf den Wärmeübergang beim Sieden bei niedrigen Sättigungstemperaturen und geringen q in stärkerem Maße zutage tritt. Bei voll ausgebildetem Sieden, wo der Wärmeübergang ausreichend hoch ist, tritt eine Intensivierung durch die zusätzliche Dampfbildung in geringerem Maße zutage.

Auf der Grundlage der von uns durchgeführten Arbeit, kann man zu dem Ergebnis kommen, daß Versuchsangaben für Rohrbündel mit nur einer einzigen senkrechten Reihe nur beim voll ausgebildeten Sieden gültig sind. Im Bereich der freien Konvektion und bei nichtausgebildetem Sieden haben die Angaben für solche Bündel eine untergeordnete Bedeutung. Arbeitet man mit Rohrbündeln von wenigen Reihen als Modell für ein großes Rohrbündel, so kann man nicht einfach - wie dies häufig vorkommt - eine große Heizung unter das Rohr stellen, in der Erwartung, der im Rohr entstehende Dampf möge sich dabei in Reihen verteilen.

In /2/ wurde vorgeschlagen, die durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten von Rohrbündeln nach der Formel

$$\bar{\alpha}_R = \alpha_0 \epsilon_R \quad (1)$$

zu berechnen, wobei

α_0 Wärmeübergangskoeffizient beim Sieden an einem einzelnen Rohr und

ϵ_R Koeffizient zur Berücksichtigung des Unterschieds beim Wärmeübergang zwischen einem Rohrbündel und einem Einzelrohr ist.

Der Wert ϵ_R bei einem 30reihigen Rohrbündel in der Höhe ist in Abb. 5 dargestellt. Wie man sehen kann, hat er bei niedrigen Werten von q und t_s den höchsten Wert.

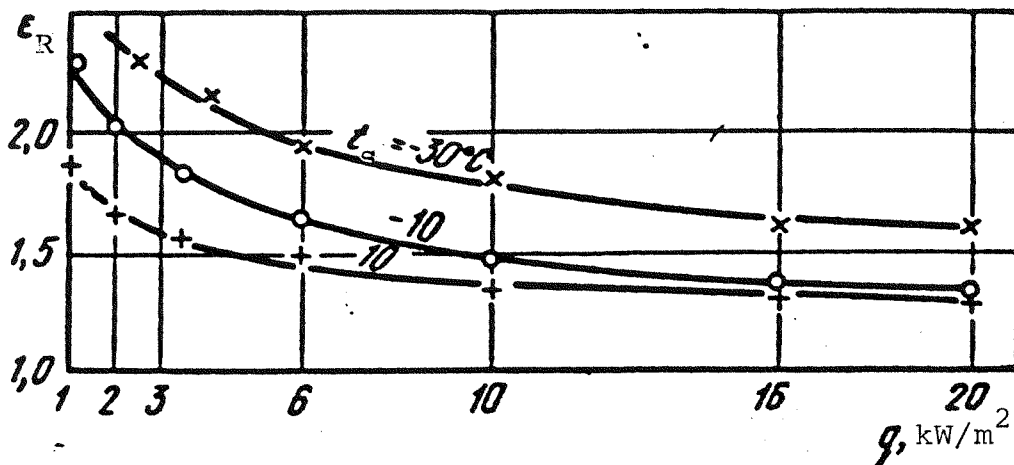


Abb. 5. Abhängigkeit des Koeffizienten ϵ_R von q beim Sieden von R12 und verschiedenen Sättigungstemperaturen t_s

Zur Berechnung von $\bar{\alpha}_R$ des untersuchten Rohrbündels empfiehlt sich folgende Formel, die durch Verallgemeinerung der Versuchsdaten ermittelt wurde:

$$\bar{\alpha}_R = 31,6 q^{0,45} p_s^{0,15} \quad (2)$$

In dieser Formel ist q durch kW/m^2 und p_s in Pa ausgedrückt. Die Versuchsergebnisse über das Sieden von R22 an einem 30-reihigen Glattrohrbündel zeigen eine qualitative Ähnlichkeit mit den Versuchen beim Sieden von R12 am gleichen Rohrbündel. Unter vergleichbaren Bedingungen ist der Wärmeübergangskoeffizient bei R22 durchschnittlich 25 % größer als bei R12.

Verzeichnis der benutzten Literatur

- 1. Бельский В. К. Исследование теплообмена при кипении фреона 12 на пучке труб и очехленных одиночных трубах.— Труды научной конференции, Л.: ЛТИХП, 1970, с. 153—156.**
Bel'skij, V.K.: Issledovanie teploobmena pri kipenii freona 12 na pučke trub i očehlennych odinočnych trubach.
In: Trudy naučnoj konferencii. Leningrad: Leningradskij tehničeskij institut cholodil'noj promyšlennosti, 1970, S. 153 bis 156.
auch in: Cholodil'naja tehnika. Moskva, 47 (1970), Nr 2, S. 40 - 44.
/Heat transfer during boiling of Freon-12 on a tube bundle and on a single jacketed tube; russ. - CA 73:36927d/
- 2. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин. Под редакцией А. А. Гоголина, М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 224 с.**
Intensifikacija teploobmena v ispariteljach cholodil'nych mašin.
Pod red. A.A. Gogolina, Gogolin, A.A., Danilova, G.N., Azarskov, V.M., Mednikova, N.M.
Moskva: Verlag "Legkaja i piščevaja promyšlennost'", 1982, 224 S.
/Improvement of heat transfer in condensers of refrigeration machines; russ. - CA 98:B5910e/
- 3. Куприянова А. В. Теплоотдача при кипении аммиака на горизонтальных трубах.— Холодильная техника, 1970, № 11, с. 40—44.**
Kuprijanova, A.V.: Teplootdača pri kipenii ammiaka na gorizontal'nych trubach.
In: Cholodil'naja tehnika. Moskva, 47 (1970), Nr 11, S. 40 bis 44.
Dt.: Die Wärmeübertragung beim Sieden von Ammoniak an waagrechteten Rohren. - Übersetzungsstelle der Technischen Informationsbibliothek Hannover, Nr Ü-800/3533, 14 Seiten.
- 4. Поволоцкая Н. М. О кипении фреонов на пучках труб.— Холодильная техника, 1969, № 11, с. 33—38.**
Povolockaja, N.M.: O kipenii freonov na pučkach trub.
In: Cholodil'naja tehnika. Moskva, 46 (1969), Nr 11, S. 33 bis 38.
/Über das Sieden von Kältemitteln an Rohrbündeln; russ./

5. Nakajima K., Morimoto K.— Refrigeration, 1069, Vol. 44, № 495, Jan. pp. 3—15.
/jap. Zeitschrift; nicht ermittelt/

Stuttgart, den 22. Dezember 1987

übersetzt von

Ottmar Pertschi
(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer