

Kuprijanova, A. V.
(Leningrader Technologisches Institut für Kältetechnik¹)

Wärmeübergang beim Sieden von Ammoniak an horizontalen Rohren

Deutsche Vollübersetzung aus dem Russischen

Quelle:

Cholodil'naja tehnika. Moskva, (1970) Nr 1, S. 40 – 44.

Russ.: Теплоотдача при кипении аммиака на горизонтальных трубах
Теплоотдача при кипении аммиака на горизонтальных трубах

Ammoniak findet starken Einsatz in den Kälteanlagen von Groß- und Mittelbetrieben, wo als Verdampfer Rohrbündelverdampfer mit glatten Rohren dienen.

Es wurden zwei Arbeiten [1, 2] veröffentlicht, die sich mit dem Wärmeübergang in Ammoniak-Rohrbündelverdampfern befassen und in denen Angaben zum Wärmeübergang des Siedemittels enthalten sind.

Consley [1] hat einen industriellen Verdampfer bei Siedetemperaturen von $t_0 = -9 \div -23^\circ\text{C}$ und Wärmebelastungen von $q = 500 \div 5000 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ untersucht. Die rechnerisch aus den Wärmedurchgangszahlen ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten hingen nicht von der Siedetemperatur ab. Bei Rohren mit $\varnothing 37,7 \text{ mm}$ wurden größere Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt als bei Rohren mit $\varnothing 50,8 \text{ mm}$.

Gogolin [2] hat die Wärmeabgabe und den Wärmeübergang in einem 14-Reihen-Rohrbündelverdampfer bei $t_0 = 0 \div -25^\circ\text{C}$ und $q = 750 \div 3600 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ experimentell untersucht. Der Rohrdurchmesser betrug 50/57 mm. Zur Bestimmung der Wärmeabgabe wurden auf der Sole- und Ammoniakseite Thermolemente angebracht, mit denen das Temperaturgefälle zwischen Ammoniak und Rohrwand und zwischen Sole und Rohrwand gemessen werden konnten. Die durchschnittlichen Wärmeübergangszahlen wurden rechnerisch ermittelt aus den gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten. Mit abnehmender Siedetemperatur nahmen die Wärmeübergangszahlen in den Gogolin-Versuchen zu.

¹ Leningradskij Technologičeskij Institut Cholodil'noj Promyšlennosti, Leningrad (LTICHP) – Anm.d.Übers.

Die Ergebnisse dieser beiden Untersuchungen sind auf die genannten Größenordnungen der Werte t_0 und q beschränkt, außerdem widersprechen sie sich in gewissem Maße hinsichtlich des Einflusses der Siedetemperatur auf die Wärmeübergangszahlen. Da die Angaben zum Wärmeübergang von Ammoniak unzureichend sind, ist eine weitere Untersuchung dieser Frage unerlässlich. Um mögliche Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Wärmeübergangszahlen aus den Wärmedurchgangskoeffizienten auszuschließen, die mit der Fehlergröße bei der Bestimmung des Wärmewiderstands durch Verschmutzungen und der Wärmeübergangszahl aufgrund der Sole zusammenhängen, muß der Wärmeübergang vom siedenden Kältemittel als eigenständiger Prozeß betrachtet werden.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Untersuchung des Wärmeübergangs beim Sieden von technisch reinem Ammoniak an einzelnen Rohren und an einem Rohrbündel, um den Einfluß von Siedetemperatur, Wärmestrom und Anzahl der Reihen im Rohrbündel auf den Wärmeübergangskoeffizienten aufzuzeigen.

Die Versuchsanlage, mit der die Experimente an Einzelrohren durchgeführt wurden, unterscheidet sich von der in Arbeit [3] beschriebenen dadurch, daß Erhitzer, Kondensator und Verbindungsrohre aus rostfreiem Stahl bestanden. Zur Untersuchung des Wärmeübergangs am Rohrbündel wurde die in [4] beschriebene Anlage nachgebaut. Alle Kupferteile und -verbindungen bestehen hier aus Stahl. Als Kondensator wurde eine in einen Behälter mit wässriger Äthylenglykollösung eingebrachte Stahlrohrschlange eingesetzt. Als Wärmeübergangsflächen dienten in allen Versuchen Direktheizrohre. Der Kondensator wurde mit Ammoniakdampf aus einer waagrecht gelagerten Flasche beschickt.

Wärmeübergangsfläche	Werkstoff	Äußerer Rohrdurchmesser, d , mm	Rohrwanddicke, mm	Rohrlänge, mm	Oberflächenrauigkeit, R_z , μ	q , W/m ²	t_0 , °C
Einzelrohr Nr 1	Baustahl 3	5	0,3	90	6,02	600 - 72000	-40 ÷ +20
Einzelrohr Nr 2	Rostfreier Stahl	6	0,2	92	2,6	440 - 91400	-40 ÷ +20
Rohrbündel (quadratisch), Rohrabstand $s = 24,1$ mm	Rostfreier Stahl	17,7	0,3	290	0,95	680 - 11000	-25 ÷ +20

Einzelrohre. Am Rohr Nr 1 wurden zwei Versuchsreihen zur Bestimmung der Wärmeübergangszahl $\alpha = f(q)$ bei verschiedenen Werten von t_0 durchgeführt.

Nach Abschluß der ersten Versuchsreihe wurde das Ammoniak aus der Anlage abgelassen, die Anlage wurde zur Durchführung der zweiten Versuchsreihe erneut mit Ammoniak gefüllt.

Am Rohr Nr 2 wurde außer den Versuchen zur Bestimmung von $\alpha = f(q)$, t_0 auch der Einfluß der Veränderung der Wärmestromrichtung auf den Wärmeübergang untersucht.

Zur zeitlichen Stabilisierung des Siedevorgangs wurde die Anlage 24 – 36 h lang vor Beginn der Messungen betrieben.

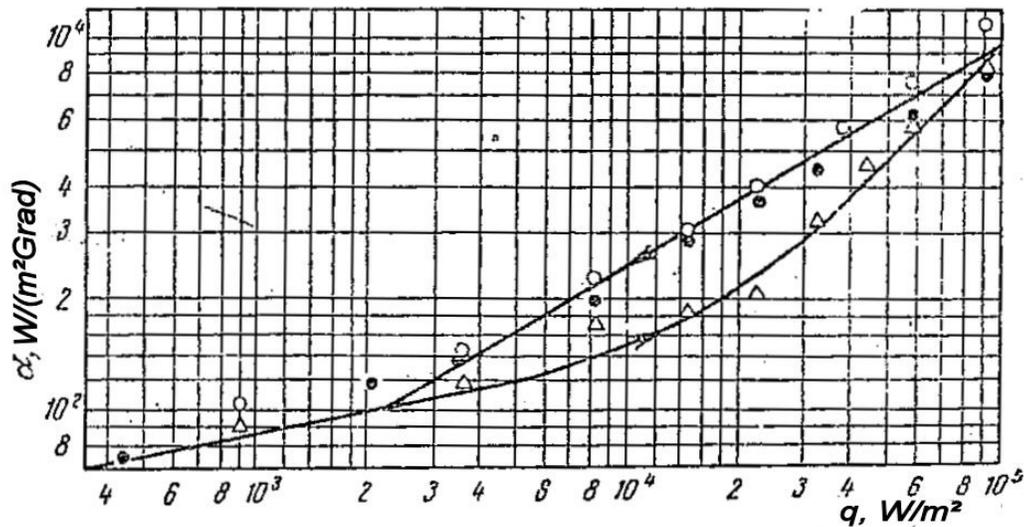


Abb. 1. Einfluß der Veränderung der Wärmestromdichte auf den Wärmeübergang beim Sieden von Ammoniak ($t_0 = +20$):

○, ● Abnahme von q (erste und zweite Versuchsreihe); Δ Zunahme von q .

Durch Beobachtungen und Messungen konnte Hysterese beim Übergang vom Sieden zur freien Konvektion und von der freien Konvektion zum Sieden festgestellt werden. Die Wärmeübergangskoeffizienten fielen bei ein und derselben Wärmestromdichte recht unterschiedlich aus, wenn q während des Vorgangs zu- oder abnahm (Abb. 1). Eine solche Differenz ließ sich bis $q = 50000 \div 100000 \text{ W/m}^2$ feststellen.

Die Wärmestromdichte, bei der es zu Sieden aufhört und zu einzelnen Dampfbildungszentren kommt, hängt von der Siedetemperatur ab und beträgt $4200 \div 12000 \text{ W/m}^2$ bei $t_0 = +20 \div -40^\circ\text{C}$ (Abb. 2).

Die mit den Rohren Nr 1 und 2 durchgeführten Versuche stimmen gut überein. Deshalb darf angenommen werden, daß die Oberflächenrauigkeit im untersuchten Bereich von R_z keinen bedeutenden Einfluß auf den Wärmeübergangskoeffizienten von Ammoniak hat.

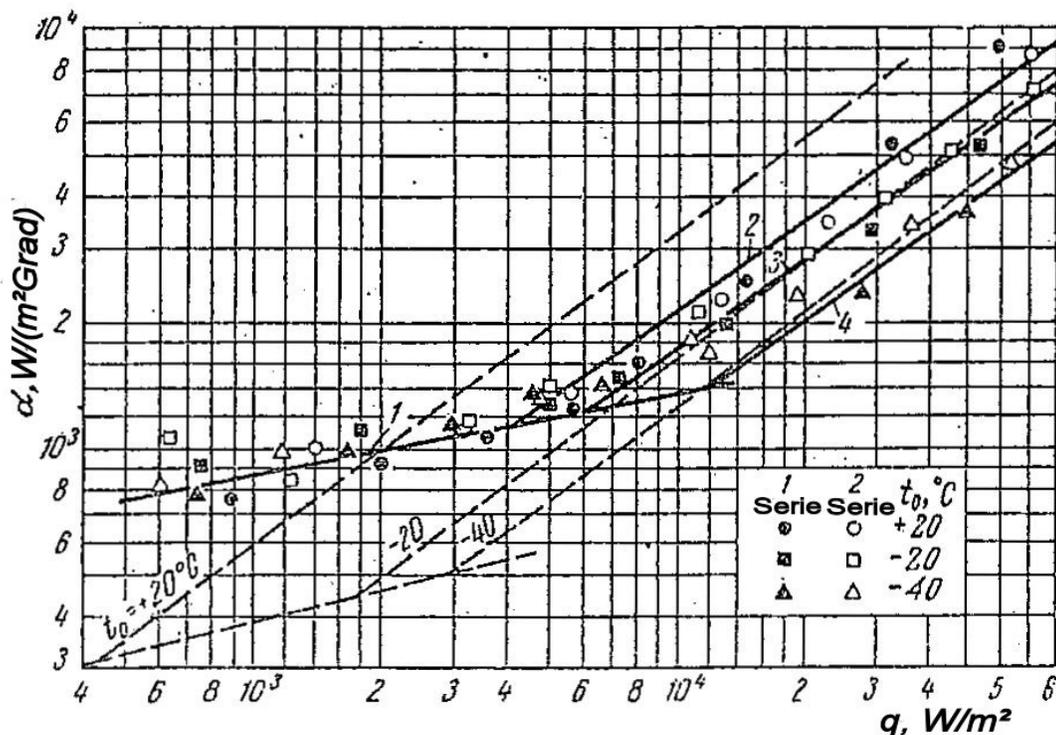


Abb. 2. Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden von Ammoniak am Einzelrohr Nr 1:
 1) $\alpha = 215 q^{0.2} \text{ W/(m}^2\text{Grad)}$; 2) $\alpha = 3,4 q^{0.7}$; 3) $\alpha = 2,7 q^{0.7}$; 4) $\alpha = 2,0 q^{0.7}$;
 ————— Ammoniak; - - - - - Freon-22.

Abb. 2 zeigt die Versuchsergebnisse der zwei Versuchsreihen mit dem Einzelrohr Nr 1 bei Siedetemperaturen von -40, -20 und +20°C. Die Versuche erfolgten unter abnehmender Veränderung von q . Die gestrichelten Linien stellen die gemittelten Werte für Freon-22 dar, wie sie im Leningrader Technologischen Institut für Kältetechnik (LTICH P) ermittelt wurden [5] (Rohr mit gleichem Durchmesser und an derselben Anlage wie bei den Versuchen mit Ammoniak).

Wie aus Abb. 2 hervorgeht, können die Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich der freien Konvektion und des schwachen Siedens bei $t_0 = -40 \div +20^\circ\text{C}$ durch die Linie 1) verallgemeinert werden, bei der $\alpha \approx q^{0.2}$. Im Bereich des voll ausgebildeten Siedens nimmt die Intensität des Wärmeübergangs mit steigender Siedetemperatur zu und kann als $\alpha \approx q^{0.7}$ angesetzt werden (Linien 2) – 4)). Im zweiten Fall verlaufen die Versuchspunkte in der Nähe der freien Konvektion bei $t_0 = +20^\circ\text{C}$ steiler und bei $t_0 = -40^\circ\text{C}$ flacher als die gemittelten Linien. Anscheinend hängt dies damit zusammen, daß im Bereich $q = (5 \div 20) \cdot 10^3$ das ausgebildete Sieden noch nicht stabilisiert ist.

Bei der freien Konvektion von Flüssigkeiten in einem horizontalen Rohr empfiehlt Micheeva [6] eine Abhängigkeit, die in dimensionsbehafteter Form bei geringen Temperaturgefällen zum Ausdruck

$$\alpha = 74,5q^{0,2}d^{-0,2} \text{ W/(m}^2\cdot\text{Grad)} \quad (1)$$

führt, wonach wir für ein Rohr mit $d = 5,1 \text{ mm}$

$$\alpha = 215q^{0,2} \text{ W/(m}^2\cdot\text{Grad)} \quad (2)$$

erhalten.

Gleichung (2) entspricht der Linie 1) in Abb. 2 und ergibt einen ausreichend guten Mittelwert unserer Versuchsdaten. Folglich läßt sich Gleichung (1) zur Berechnung von α bei Ammoniak unter freier Konvektion anwenden.

Beim ausgebildeten Sieden wird der Einfluß von Druck und Wärmestromdichte, der den Linien 2) – 4) entspricht, ausgedrückt durch die Formel

$$\alpha = 2,2q^{0,7}p^{-0,21} \text{ W/(m}^2\cdot\text{Grad)}. \quad (3)$$

Die Versuchsergebnisse im Bereich des ausgebildeten Siedens ergaben sich aus den Rechenergebnissen nach den verallgemeinerten Gleichungen von Kružilin, Kutateladze und Labunov. Die Berechnung nach all diesen Gleichungen liefert höhere Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten als nach den Versuchsergebnissen.

Die Versuchsergebnisse, ausgewertet nach dem Kutateladzes Kennzahlensystem, ergeben eine Gleichung mit dem konstanten Faktor $5,9 \cdot 10^{-4}$, also kleiner als bei Wasser ($7 \cdot 10^{-4}$).

$$Nu_* = 5,9 \cdot 10^{-4} Re_*^{0,7} Pr^{0,35} K_p^{0,7}, \quad (4)$$

mit

$$Nu_* = \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}};$$

$$Re_* = \frac{q}{r\gamma''\nu} \sqrt{\frac{\alpha}{\gamma'' - \gamma'}};$$

$$K_p = \frac{p}{\sqrt{\sigma(\gamma' - \gamma'')}};$$

λ	Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit;
σ	Koeffizient der Oberflächenspannung;
γ'	spezifisches Gewicht der gesättigten Flüssigkeit;
γ''	spezifisches Gewicht des gesättigten Dampfes;
r	Verdampfungsenthalpie;
ν	kinematische Viskosität der Flüssigkeit.

Der Siedevorgang von Freon-22 beginnt und endet bei geringeren Wärmestromdichten als bei Ammoniak, was hauptsächlich durch die geringere Oberflächenspannung des Freons bedingt ist. Ungeachtet dessen ist die Intensität des Wärmeübergangs von Ammoniak – wie aus Abb. 2 hervorgeht – bis zu einem bestimmten Wert von q größer als bei Freon-22. Flüssiges Ammoniak besitzt eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Freon-22, weshalb der Wärmeübertragungsvorgang bei geringen Werten von q , wo das Sieden des Freons schwach entwickelt ist, bei Ammoniak wesentlich intensiver ist.

Wenn das Sieden des Freons stark ausgebildet ist, sind die Wärmeübergänge von Freon und Ammoniak gleich, und bei $t_0 = +20^\circ\text{C}$ übersteigt der Wärmeübergang von Freon-22 sogar den des Ammoniaks. Hier wirkt sich auch der größere Einfluß des Drucks auf den Wärmeübergang beim Sieden von Freon-22 aus (bei gleichen Werten von t_0 ist der angegebene Druck beim Freon größer als bei Ammoniak).

Im Bereich $t_0 = -20 \div -40^\circ\text{C}$ und $q = 1000 \div 5000 \text{ W/m}^2$ ist α_{Am} um 1,2 – 2,2 mal größer als $\alpha_{\text{F-22}}$, bei $q = 8000 \div 13000 \text{ W/m}^2$ sind die Wärmeübergangskoeffizienten gleich.

Bei $t_0 = +20^\circ\text{C}$ und $q \geq 5000 \text{ W/m}^2$ ist $\frac{\alpha_{\text{F-22}}}{\alpha_{\text{Am}}} > 1,5$.

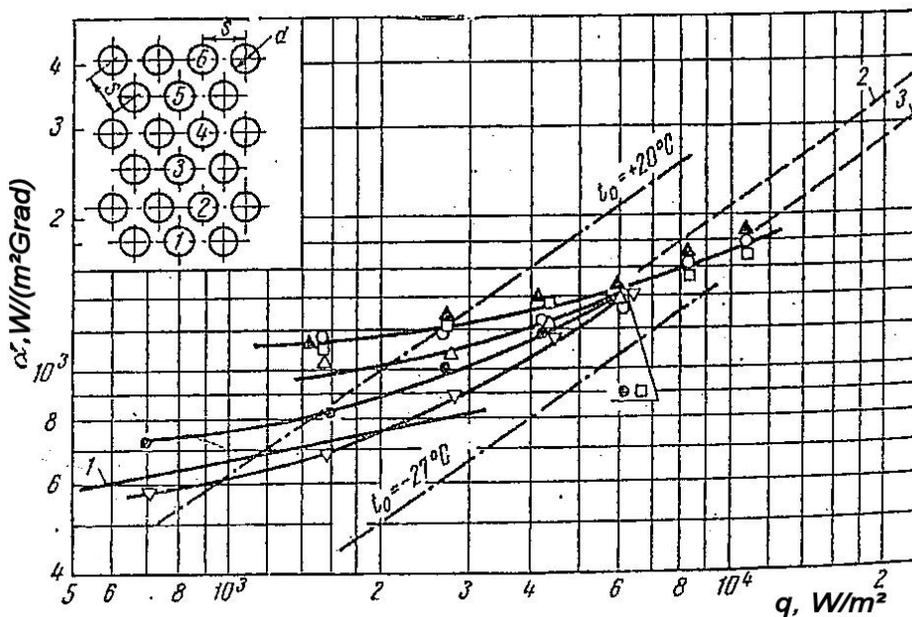


Abb. 3. Mittlere Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden von Ammoniak an einem Rohrbündel:

▲ $t_0 = -25^\circ\text{C}$; ○ $t_0 = -20^\circ\text{C}$; □ $t_0 = -10^\circ\text{C}$; △ $t_0 = 0^\circ\text{C}$; ● $t_0 = +10^\circ\text{C}$;
 ▽ $t_0 = +20^\circ\text{C}$;

1) – 3) Einzelrohre, Ammoniak (1) $\alpha = 167 q^{0,5}$; 2) $t_0 = +20^\circ\text{C}$; 3) $t_0 = -20^\circ\text{C}$;
 —•— Rohrbündel, Freon-22.

Rohrbündel. In den Versuchen wurden 20 Rohre im Bündel beheizt. Die Wärmeübergangskoeffizienten wurden für sechs Rohre bestimmt, wie in Abb. 3 dargestellt (Schema über die Anordnung der Rohre im Bündel).

Die Thermoelemente zur Messung der Wandtemperatur wurden an vier Punkten im mittleren Querschnitt eines jeden Rohres (bezogen auf seine Länge) auf der Oberfläche angebracht und lagen somit dicht an der Rohrrinnenseite. Zum Vergleich wurden am jeweils gleichen Rohrbündel Versuche mit Freon-22 durchgeführt. Die Meßergebnisse zeigen, daß der Siedevorgang von Ammoniak – wie bei den Einzelrohren – im untersuchten Bereich von q und t_0 weniger intensiv war als der mit Freon-22 und daß er eine geringere Anzahl aktiver Dampfbildungszentren ausweist.

Der Einfluß der Reihen auf die Intensität des Wärmeübergangs von Ammoniak erwies sich als sehr schwach, wobei er – wie auch bei Freon-22 – bei $t_0 = -25^\circ\text{C}$ und geringsten Versuchswerten von q noch am stärksten war.

Bei $t_0 = +20^\circ\text{C}$ haben die mittleren Wärmeübergangskoeffizienten des Rohrbündels ihre stärkste Abweichung von α der Einzelrohre: $\pm 10\%$.

Bei $t_0 = -25^\circ\text{C}$ und $q < 6000\text{ W/m}^2$ ist die Veränderung von α aufgrund der Reihen am stärksten.

In Abb. 3 sind die durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten für das Rohrbündel dargestellt. Sie wurden bestimmt als mittlere arithmetische Werte aus den Versuchsdaten von α einer jeder der sechs Reihen des Rohrbündels. Linie 1) entspricht Gleichung (1), die für ein Rohr mit $d = 17,7\text{ mm}$ folgendermaßen aussieht:

$$\alpha = 167q^{0,2}\text{ W/(m}^2\cdot\text{Grad)}. \quad (5)$$

Die Linien 2) und 3) stellen die Versuchsdaten für ein Einzelrohr bei ausgebildetem Sieden dar.

Für $t_0 = +20^\circ\text{C}$ stimmen die Durchschnittswerte von α bei $q \leq 2000\text{ W/m}^2$ mit der Linie 1) überein, bei $q > 2000\text{ W/m}^2$ mit der Linie 2). Im Bereich $q < 6000\text{ W/m}^2$ nehmen die durchschnittlichen Wärmeübergangszahlen mit steigender Siedetemperatur zu. Im Bereich $t_0 = -25 \div -10^\circ\text{C}$ ist die Veränderung der Wärmeübergangszahl relativ schwach und sie kann bei diesen Siedetemperaturen als annähernd gleich angesehen werden (Abweichung 6 %).

Wie oben bereits erwähnt, hat Consley bei $t_0 = -9 \div -23^\circ\text{C}$ ein entsprechendes Ergebnis erzielt [1]. Bei Zunahme der Siedetemperatur von 0 auf 20°C ist ihr Einfluß auf den Wärmeübergang am stärksten.

Eine Abnahme des Wärmeübergangs mit zunehmendem t_0 stellte Gogolin fest [2].

Umgekehrt hängt die Abhängigkeit zwischen Siedetemperatur und Wärmeübergangszahl offensichtlich mit der zunehmenden Intensität des konvektiven Wärmeübergangs bei niedrigen Siedetemperaturen und ihrer größeren Bedeutung im Gesamtprozeß des Wärmeübergangs bei schwachen Wärmestromdichten zusammen.

Tatsächlich läßt sich die bei bestimmter Wärmebelastung und Siedetemperatur t_0 gewonnene Dampfmenge durch die Größe

$$G_n = \frac{qv''}{r} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

bestimmen, wobei v'' das spezifische Volumen des gesättigten Dampfes bezeichnet.

Bleibt die Wärmebelastung konstant, dann ist

$$\frac{G_{k, -20^\circ\text{C}}}{G_{k, +20^\circ\text{C}}} = \frac{v''_{-20} r_{-20}}{v''_{+20} r_{-20}} = \frac{0,6236 \cdot 283,6}{0,149 \cdot 317,3} = 3,74,$$

d.h. bei abnehmender Siedetemperatur von +20 auf -20°C nimmt das auf die Oberflächeneinheit kommende Dampfvolumen um annähernd das Vierfache zu. Berücksichtigt man, daß die Anzahl der Dampfbildungszentren bei sinkendem t_0 stark abnimmt, dann muß die Anzahl der Blasen und ihre Steiggeschwindigkeit zunehmen, was auch zu einer stärkeren Turbulenz der Flüssigkeit durch die Dampfblasen und zu einer Zunahme der Zirkulationsgeschwindigkeit führt.

Mit zunehmender Wärmebelastung verringert sich der Einfluß der Siedetemperatur auf den Wärmeübergang, und die Kurven $\alpha = f(q)$ nähern sich bei verschiedenen Werten von t_0 an. Man darf annehmen, daß (ausgehend vom Verlauf der Kurven in Abb. 3) die Abhängigkeit α von t_0 bei $q > 10^4$ eine Gerade darstellt.

Unter diesen Bedingungen wird der eigentliche Prozeß der Dampfbildung bestimmend, der Einfluß der Konvektion verliert an Bedeutung und der Wärmeübergang eines Rohrbündels kann den allgemeinen Gesetzmäßigkeiten des Wärmeübergangs beim Sieden an einem Einzelrohr untergeordnet werden.

Zur Verifizierung dessen benötigt man eine recht große Anzahl von Daten über die Abmessungen und Steiggeschwindigkeit von Ammoniakblasen sowie ein Mehr an Versuchsdaten für Rohrbündel im Bereich $q > 10^4$ W/m².

In Abb. 4 ist die Abhängigkeit der Durchschnittswerte des Wärmeübergangskoeffizienten von Ammoniak (Linie 1) und Freon-22 (Linie 3) von der Siedetemperatur bei $q = 2000$ W/m² dargestellt. Die Art des Einflusses der Siedetemperatur bei Ammoniak stimmt mit den Angaben überein, die nach der Gogolin-Gleichung [2] bei einem Rohrdurchmesser von 38 mm ermittelt wurden (Linie 2).

Die Versuchsdaten zum Sieden von Freon-22 an einem Rohrbündel bei ausgebildetem Sieden bis $q > 10^4 \text{ W/m}^2$ werden verallgemeinert durch die Gleichung

$$\alpha = 1,88q^{0,7} p^{0,42} \text{ W/(m}^2\cdot\text{Grad)}. \quad (6)$$

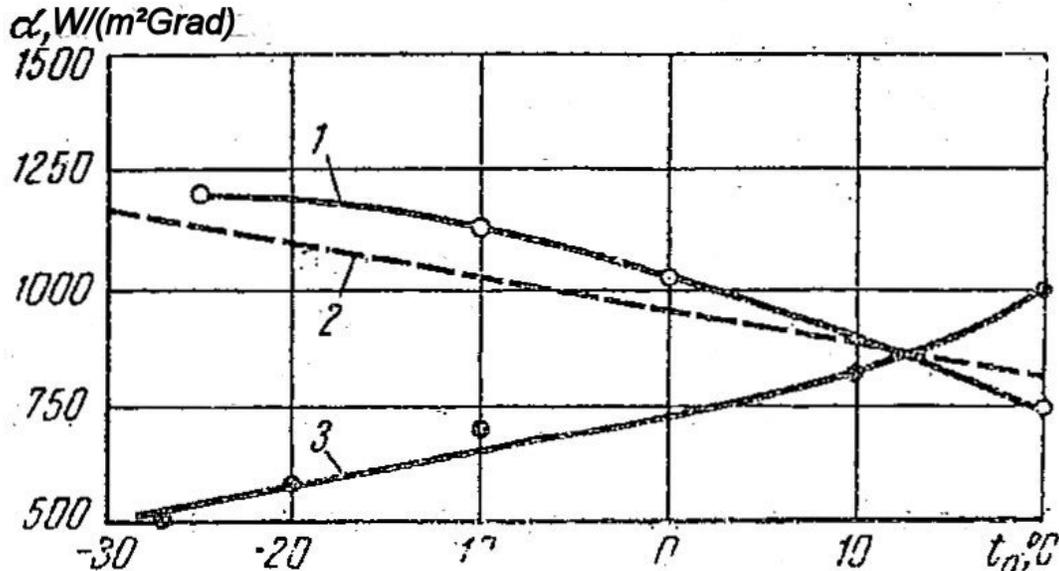


Abb. 4. Einfluß der Siedetemperatur auf den Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden von Ammoniak und Freon-22 an einem Rohrbündel bei $q = 2000 \text{ W/m}^2$:
 $t_0 = -25^\circ\text{C}$; $t_0 = -20^\circ\text{C}$; $t_0 = -10^\circ\text{C}$; $t_0 = 0^\circ\text{C}$; $t_0 = +10^\circ\text{C}$; $t_0 = +20^\circ\text{C}$;
 1) Ammoniak, Daten der Verfasserin; 2) Ammoniak, Daten Gogolins [2];
 3) Freon-22, Daten der Verfasserin.

Der untere Grenzwert von q hängt von der Siedetemperatur ab und beträgt 1700 W/m^2 bei -27°C und 350 W/m^2 bei $+20^\circ\text{C}$. Die experimentellen Durchschnittsgrößen von α für Freon-22 bei $t_0 = -27$ und $+20^\circ\text{C}$ sind in Abb. 3 angegeben. Bei $t_0 = -25^\circ\text{C}$ und Wärmestromdichten von $q = 700 \div 3500 \text{ W/m}^2$, die für den Betrieb von Kältemaschinen charakteristisch sind, ist die Wärmeabgabe beim Sieden von Ammoniak im Rohrbündel um das 1,5 – 2fache höher als beim Sieden von Freon-22. Mit Zunahme von q und t_0 nimmt der Unterschied in den Wärmeübergangskoeffizienten von Ammoniak und Freon-22 ab. Bei $t_0 = +20^\circ\text{C}$ wird die Intensität des Wärmeübergangs für Freon-22 sogar im Bereich geringer Werte von q größer als beim Ammoniak. Bei $q > 6000 \text{ W/m}^2$ nähern sich die Wärmeübergangszahlen dieser Kältemittel auch bei niedrigen Siedetemperaturen an. Zum Teil wurden die Gründe für die verschiedenen Beziehungen zwischen ihren Wärmeübergangskoeffizienten unter differierenden Bedingungen bei der Analyse der Versuchsergebnisse mit Einzelrohren oben erörtert. Hier ist noch hinzuzufügen, daß der Einfluß des Rohrbündels auf das Sieden dieser Flüssigkeiten aufgrund der großen Anzahl aktiver Dampfbildungszentren und wegen der kleineren Blasenabmessungen von Freon-22 anders ist als beim Ammoniak.

Schlußfolgerungen

Die Wärmeübergangskoeffizienten von Ammoniak an einem Einzelrohr im Bereich der freien Konvektion und des schwach ausgeprägten Siedens folgen Gleichung (1), im Bereich des ausgebildeten Siedens Gleichung (3).

Hystereseeinfluß beim Sieden von Ammoniak umfaßt bei allen untersuchten Werten von t_0 den Bereich von $q = 50000$ bis $q = 5000 \div 10000 \text{ W/m}^2$. Siedebeginn und -ende entsprechen größeren Werten von q als bei Freon-22.

Beim Sieden von Ammoniak am Rohrbündel ist die Veränderung der Wärmeübergangszahl nach den Rohrreihen weniger stark als beim Sieden von Freon 22 und wirkt sich am stärksten bei niedrigen Siedetemperaturen und geringen Wärmestromdichten aus.

Im Bereich $700 < q < 6000$ steigen die Durchschnittswerte von α beim Rohrbündel mit Zunahme von t_0 , wobei die größte Temperaturbeeinflussung im Intervall $0 - 20^\circ\text{C}$ vorkommt. Der Einfluß von t_0 auf α nimmt mit Zunahme von q ab.

Bei normalen Arbeitsbedingungen für Kälteverdampfer ($t_0 = -25 \div -10^\circ\text{C}$ und $q = 700 \div 3500 \text{ W/m}^2$) ist die Wärmeabgabe von Ammoniak um das 1,5 – 2fache größer als bei Freon-22. Mit Zunahme von q und t_0 wird der Unterschied bei α geringer, und unter bestimmten Bedingungen sind die Werte von $\alpha_{\text{F-22}}$ höher als die Werte von α_{Am} .

Literaturverzeichnis:

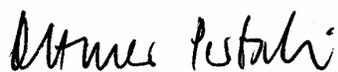
1. Consley, I. C.: – In: Refrigerating engineering including air conditioning. New York, 35 (1938) Nr 6, S. 409
2. Cydzik, V. E.; Barmin, V. P.; Vejnberg, B. S.: Chłodil'nye mašiny i aparaty. Moskva: Mašgiz, 1946, 671 S.
<Kältemaschinen und –apparate; russ.>
3. Danilova, G. N.; Kuprijanova, A. V.: Teploobmen pri kypenii freonov-C318 i 21. – In: Chłodil'naja tehnika i tehnologija. Kiev: Technika, 8 (1969), S. ²
<Wärmeübergang beim Sieden von Freon-C318 und –C21; russ.>
4. Bel'skij, V. K.: Issledovanie teploobmena pri kypenii freona-12 na pučke trubok i odinočnych očechlennykh trubkach. – In: Chłodil'naja tehnika. Moskva: (1970) Nr 2, S.
<Untersuchung des Wärmeübergangs beim Sieden von Freon-12 an einem Rohrbündel und an Einzelrohren mit Beschichtungen; russ.>
5. Danilova, G. N.: Teploobmen pri kypenii freonov. Doktorskaja dissertacija. Leningrad, Leningradskij Tehnologičeskij Institut Chłodil'noj Promyšlennosti, 1968.
<Der Wärmeübergang beim Sieden von Kältemitteln; russ.>
6. Micheeva, I. M.: Teplootdača pri svobodnom dviženii različnykh židkostej. – In: Teploperedatča i teplo-voe modelirovanie. Moskva: Akademija nauk SSSR, 1959, S.
<Der Wärmeübergang bei freier Bewegung verschiedener Flüssigkeiten; russ.>

² Vorgängertext: Danilova, G. N.; Kuprijanova, A. V.: Koefficienty teplootdaci pri kypenii freonov C-318 i 21 na gorizontaľnoj trubke. – In: Chłodil'naja tehnika. Moskva, 44 (1967) Nr 11, S. 15 – 21. < Wärmeübergang beim Sieden von Freon C-318 und 21 an einem horizontalen Rohr. – Dt. Vollübersetzung aus dem Russ.: Übersetzungsstelle der Universitätsbibliothek Stuttgart, Nr. Ü/254, 14 Seiten>

7. Kutateladze, Samson Semenovič: Osnovy teorii teploobmena. Moskva / Leningrad: Mašgiz, 1962.
<Engl.: Fundamentals of heat transfer. London: Arnold, 1963, 485 S.>

Stuttgart, den 7. Mai 2008

übersetzt von



(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übers

испаритель, тем больше коэффициент теплопередачи. Как видно из рис. 4, при $h=1$ м, характерной для холодильных шкафов, коэффициент теплопередачи почти в 1,5 раза выше, чем при $h=0,2$ м, характерной для открытых витрин.

Полученные в опытах значения коэффициентов теплопередачи были сопоставлены с результатами работ [1] и [2].

Величины коэффициентов теплопередачи, полученные Гачиловым (положение VIII) для сопоставимых условий, ниже опытных (положение II) примерно на 8%, что связано с более высоким паросодержанием фреона на выходе из испарителя (у Гачилова $x=1$, в опытах $x=0,6$). Значения, найденные Гершзоном, ниже полученных авторами (положение I) примерно на 20%. Это объясняется наличием в исследованиях [2] перегрева пара фреона после испарителя на 4—5°C.

Зависимость коэффициента теплопередачи k от перепада температур θ между воздухом и температурой кипения показана на рис. 5. Здесь же пунктиром дана аналогичная зависимость, построенная по опытам Гачилова. Опытные кривые авторов имеют в два раза меньший уклон, чем Гачилова, что, очевидно, является результатом затрудненной циркуляции воздуха в сравнительно небольшом объеме шкафа. Путем измерения термометрами температуры стенки трубки общий коэффициент теплопередачи был расчленен на отдельные составляющие по уравнению

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n E_n} + \frac{\beta}{\alpha_a}},$$

где α_n — коэффициент теплоотдачи, отнесенный к наружной поверхности и к средней ее температуре, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$;

E_n — коэффициент эффективности ребристой поверхности (определяли по методике [3]; он оказался равным 0,91);

β — степень оребрения испарителя, равная 21,6;
 α_a — коэффициент теплоотдачи от стенки трубки к кипящему фреону-12, отнесенный к внутренней поверхности, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$.

Полученные таким образом величины коэффициентов α_a составляли 200—250 $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$, что примерно соответствует опытным данным Богданова [4] для вековой скорости фреона-12 около 20 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ и удельных тепловых нагрузок 450—1000 $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, полученных в опытах авторов.

Математическая обработка результатов исследований приводит к следующей зависимости:

для центрального расположения испарителя

$$k = 1,64 + 0,05 \theta - 0,65 h + 1,12 h^2;$$

для бокового расположения испарителя

$$k = 1,49 + 0,05 \theta - 0,65 h + 1,12 h^2.$$

Таким образом, в торговом холодильном оборудовании коэффициенты теплопередачи и наружной теплоотдачи испарителя существенно зависят от высоты его расположения: с увеличением высоты теплообмен в испарителях улучшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гачилов Т. С. Исследование теплообмена в испарителях малых холодильных машин, работающих при естественной конвекции воздуха. Диссертация, ЛТИХП, 1968.
2. Гершзон Д. Е. Испытание шкафа ШХ-0,8. Отчет ВНИИИ, 1965.
3. Schmidt T. Die Wärmeleistung von berippten Oberflächen. Abhandl. des DKV. Karlsruhe, 1950.
4. Богданов С. Н. Теплообмен при кипении фреона внутри горизонтальной трубы. «Холодильная техника», 1964, № 4.

Теплоотдача при кипении аммиака на горизонтальных трубах

А. В. КУПРИАНОВА

Ленинградский технологический институт холодильной промышленности

536.24

Аммиак широко применяется в холодильных установках крупной и средней производительности, где испарителями служат кожухотрубные аппараты с гладкими трубами.

В печати опубликованы две работы [1, 2], посвященные процессу теплопередачи в аммиачных кожухотрубных испарителях, в которых содержатся сведения о теплообмене кипящего агента.

Консли [1] испытывал испаритель промышленной установки при температурах кипения $t_0 = -9 \div -23^\circ\text{C}$ и

тепловых нагрузках $q = 500 \div 5000 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Коэффициенты теплоотдачи, найденные пересчетом из коэффициентов теплопередачи, не зависели от температуры кипения. Для труб $\varnothing 31,7$ мм были получены большие коэффициенты теплоотдачи, чем для труб $\varnothing 50,8$ мм.

Гоголин [2] выполнил подробное экспериментальное исследование процессов теплопередачи и теплоотдачи в кожухотрубном четырнадцатирядном (по высоте) испарителе при $t_0 = 0 \div -25^\circ\text{C}$ и $q = 750 \div 3600 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Диаметр труб 50/57 мм. Для определения коэффициентов теплоотдачи на стороне рассола и аммиака были применены термометры, позволявшие измерять перепад температур между аммиаком и стенкой трубы и между рассолом и стенкой трубы. Средние коэффициенты теплоотдачи были найдены пересчетом по измеренным коэффициентам теплопередачи. С понижением температуры кипения коэффициенты теплоотдачи в опытах Гоголина увеличивались.

Материалы этих двух работ ограничены исследованными пределами изменения величин t_0 и q , к тому же в отношении влияния температуры кипения на коэффициент теплоотдачи они в некоторой степени противоре-

чивы. В связи с недостаточностью сведений о теплообмене аммиака представляется необходимым дальнейшее изучение этого вопроса. При этом для того, чтобы исключить возможные неточности определения коэффициента теплоотдачи по коэффициенту теплопередачи, связанные с погрешностями определения термического сопротивления загрязнений и коэффициента теплоотдачи со стороны рассола, процесс теплоотдачи со стороны кипящего агента должен быть исследован самостоятельно.

Настоящая работа посвящена исследованию процесса теплообмена при кипении технически чистого аммиака на одиночных трубах и на пучке труб с целью выявить влияние температуры кипения, теплового потока и числа рядов в пучке на коэффициент теплоотдачи.

Экспериментальная установка, на которой проводились опыты с одиночной трубой, отличалась от описан-

ной в работе [3] тем, что кипятильник, конденсатор и соединительные трубопроводы были изготовлены из нержавеющей стали. Для исследования теплообмена на пучке была реконструирована установка, описанная в статье [4]. Все медные детали и узлы были заменены стальными. В качестве конденсатора был использован стальной змеевик, опущенный в бак с водным раствором этиленгликоля. Конденсация аммиака осуществлялась внутри труб. Поверхностями теплообмена во всех опытах служили трубки непосредственного нагрева. Установку заполняли аммиачным паром, поступающим в конденсатор из находящегося в вертикальном положении баллона.

Условия проведенных опытов и характеристика использованных поверхностей нагрева приведены в таблице.

Поверхность теплообмена	Материал	Наружный диаметр трубы, мм	Толщина стенки трубы, мм	Длина трубы, мм	Шероховатость поверхности R_z , м	q , $вт/м^2$	t_0 , °C
Одиночная труба № 1	Ст. 3	5	0,3	90	6,02	600—72000	-40 ÷ +20
Одиночная труба № 2	Нержавеющая сталь	6	0,2	92	2,6	440—91400	-40 ÷ +20
Пучок труб (шахматный), шаг в пучке $s = 24,1$ мм	Нержавеющая сталь	17,7	0,3	290	0,95	680—11000	-25 ÷ +20

Одиночные трубы. На трубе № 1 было проведено две серии опытов с целью определить коэффициент теплоотдачи $\alpha = f(q)$ при разных значениях t_0 .

После окончания первой серии аммиак был выпущен из установки и последняя была заново заполнена аммиаком для проведения второй серии опытов.

На трубе № 2, кроме экспериментов по определению зависимости $\alpha = f(q, t_0)$, было исследовано влияние направления изменения теплового потока на теплоотдачу.

Для стабилизации по времени процесса кипения до начала измерений установка работала в течение 24—36 ч.

Визуальные наблюдения и измерения позволяют отметить наличие гистерезиса при переходе от кипения к свободному движению и от свободного движения к кипению. Коэффициенты теплоотдачи при одном и том же тепловом потоке существенно различны в случае ведения процесса в сторону увеличения или уменьшения q (рис. 1). Причем это различие отмечается вплоть до $q = 50000 \div 100000$ $вт/м^2$.

Тепловой поток, при котором кипение прекращается или имеются единичные центры парообразования, зависит от температуры кипения и составляет 4200—12000 $вт/м^2$ при $t_0 = +20 \div -40^\circ C$ (рис. 2).

Опыты, проведенные с трубами № 1 и 2 согласуются между собой. На основании этого можно предположить, что шероховатость поверхности в рассмотренном интервале R_z не влияет существенно на коэффициент теплоотдачи кипящего аммиака.

На рис. 2 представлены результаты двух серий экспериментов с одиночной трубой № 1 при температурах кипения -40, -20 и +20°C. Опыты проводились при из-

менении q от больших величин к меньшим. Пунктирные линии представляют собой усредняющие данные для фреона-22, полученные в Ленинградском технологическом институте холодильной промышленности [5] на трубе такого же диаметра и в той же экспериментальной установке, что и в опытах с аммиаком.

Как видно из рис. 2, в области свободного движения и слабого кипения коэффициенты теплоотдачи при $t_0 = -40 \div +20^\circ C$ могут быть обобщены линией 1, для ко-

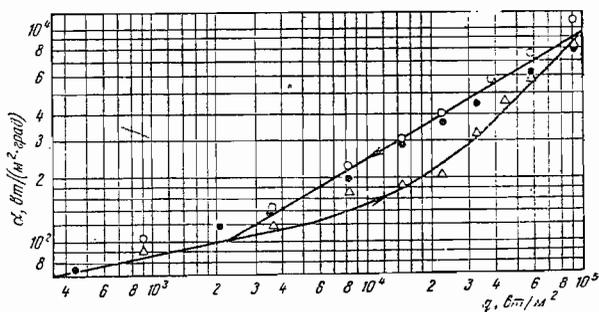


Рис. 1. Влияние направления изменения теплового потока на теплоотдачу при кипении аммиака ($t_0 = +20^\circ C$):

○, ● — уменьшение q (первая и вторая серии опытов); △ — увеличение q .

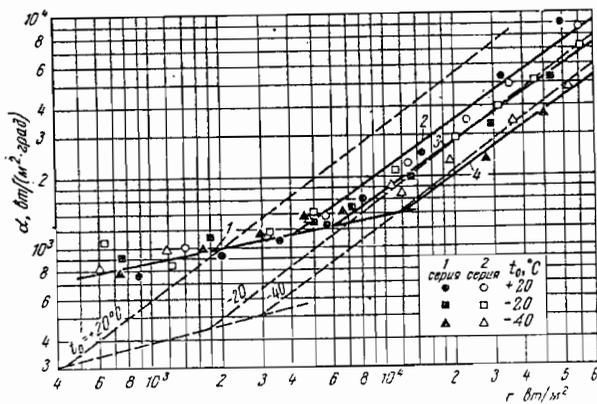


Рис. 2. Коэффициенты теплоотдачи при кипении аммиака на одиночной трубе № 1:

1 — $\alpha = 215 q^{0,2} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 2 — $\alpha = 3,4 q^{0,7}$; 3 — $\alpha = 2,7 q^{0,7}$; 4 — $\alpha = 2,0 q^{0,7}$; — аммиак; - - - - - фреон-22.

второй $\alpha \approx q^{0,2}$. В области развитого кипения интенсивность теплообмена растет с повышением температуры кипения и можно принять $\alpha \approx q^{0,7}$ (линии 2—4). Во втором случае опытные точки вблизи линии свободного движения при $t_0 = +20^\circ\text{C}$ идут круче, а при $t_0 = -40^\circ\text{C}$ положение усредняющих линий. По-видимому, это связано с тем, что в области $q = (5 \div 20) \cdot 10^3$ еще нет стабилизированного режима развитого кипения.

Для свободного движения капельных жидкостей у горизонтальной трубы Михеева [6] рекомендует критериальную зависимость, которая в размерном виде при небольших перепадах температур приводится к выражению

$$\alpha = 74,5 q^{0,2} d^{-0,2} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}), \quad (1)$$

из которого для трубы $d = 5,1 \text{ мм}$ получаем

$$\alpha = 215 q^{0,2} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}). \quad (2)$$

Уравнение (2) соответствует прямой 1 на рис. 2, достаточно хорошо усредняющей наши опытные данные. Следовательно, для расчета α аммиака при свободном движении можно рекомендовать уравнение (1).

Для области развитого кипения влияние давления и теплового потока, соответствующее линиям 2—4, выражается формулой

$$\alpha = 2,2 q^{0,7} p^{0,21} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}). \quad (3)$$

Результаты опытов в области развитого кипения сопоставлялись с результатами расчетов по обобщенным критериальным уравнениям Кружиллина, Кутателадзе, Лабунцова. Расчет по всем перечисленным уравнениям дает более высокие значения коэффициентов теплоотдачи по сравнению с опытными.

Опытные данные, обработанные в системе критериев Кутателадзе, дают уравнение с постоянным множителем $5,9 \cdot 10^{-4}$, меньшим, чем для воды ($7 \cdot 10^{-4}$ [7]).

$$\text{Nu}_* = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{Re}_*^{0,7} \text{Pr}^{0,35} K_p^{0,7}, \quad (4)$$

где

$$\text{Nu}_* = \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}};$$

$$\text{Re}_* = \frac{q}{r \gamma''} \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}};$$

$$K_p = \frac{p}{\sqrt{\sigma (\gamma' - \gamma'')}};$$

- λ — теплопроводность жидкости;
- σ — коэффициент поверхностного натяжения;
- γ' — удельный вес насыщенной жидкости;
- γ'' — удельный вес насыщенного пара;
- r — скрытая теплота парообразования;
- ν — кинематическая вязкость жидкости.

Процесс кипения фреона-22 начинается и прекращается при меньших тепловых потоках, чем у аммиака, что обусловлено, главным образом, меньшим поверхностным натяжением фреона. Несмотря на это, интенсивность теплообмена аммиака, как видно из рис. 2, до определенного значения q выше, чем у фреона-22. Жидкий аммиак имеет более высокую теплопроводность, чем фреон-22, поэтому при малых значениях q , когда кипение фреона развито слабо, процесс передачи тепла в аммиаке идет более интенсивно.

Когда процесс кипения фреона становится весьма значительным, теплоотдача фреона и теплоотдача аммиака сравниваются, а при $t_0 = +20^\circ\text{C}$ теплоотдача фреона-22 даже превышает теплоотдачу аммиака. Здесь сказывается также большая степень влияния давления на теплоотдачу при кипении фреона-22 (при равных значениях t_0 приведенное давление у фреона больше, чем у аммиака).

В области $t_0 = -20 \div -40^\circ\text{C}$ и $q = 1000 \div 5000 \text{ вт}/\text{м}^2$ $\alpha_{\text{ам}}$ больше $\alpha_{\text{ф-22}}$ в 1,2—2,2 раза, при $q = 8000 \div 1300 \text{ вт}/\text{м}^2$ коэффициенты теплоотдачи сравниваются.

При $t_0 = +20^\circ\text{C}$ и $q \geq 5000 \text{ вт}/\text{м}^2$ $\frac{\alpha_{\text{ф-22}}}{\alpha_{\text{ам}}} > 1,5$.

Пучок труб. В опытах обогрели 20 труб пучка. Коэффициенты теплоотдачи определяли для шести труб, указанных на представленной на рис. 3 схеме расположения труб в пучке.

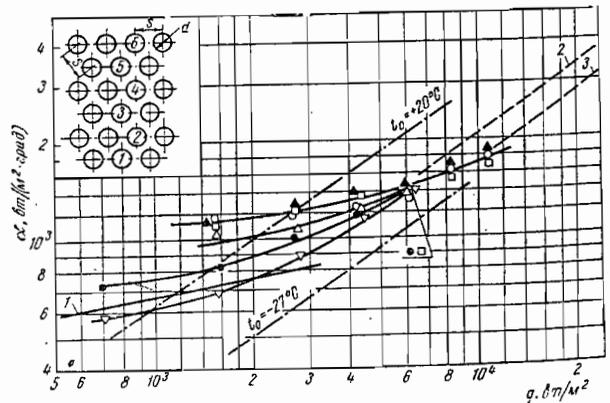


Рис. 3. Средние коэффициенты теплоотдачи при кипении аммиака на пучке труб:

- ▲ — $t_0 = -25^\circ\text{C}$; ○ — $t_0 = -20^\circ\text{C}$; □ — $t_0 = -10^\circ\text{C}$; △ — $t_0 = 0^\circ\text{C}$; ● — $t_0 = +10^\circ\text{C}$;
- ▽ — $t_0 = +20^\circ\text{C}$; 1, 2, 3 — одиночная труба, аммиак [$1 - \alpha = 167 q^{0,2} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$]; 2 — $t_0 = +20^\circ\text{C}$; 3 — $t_0 = -20^\circ\text{C}$]; - - - - - пучок труб, фреон-22.

Термопары для измерения температуры стенки были установлены в четырех точках среднего (по длине) сечения каждой трубы на поверхности поршней, плотно прилегающих к ее внутренней поверхности. Для сопоставления на этом же пучке были проведены опыты с фреоном-22. Результаты измерений показывают, что так же, как и для одиночной трубы, процесс кипения аммиака на исследованном пучке и в рассмотренном интервале q и t_0 был менее интенсивен, чем процесс кипения фреона-22, и характеризовался небольшим числом действующих центров парообразования.

Влияние рядов на интенсивность теплоотдачи аммиака проявлялось очень слабо, причем так же, как и для фреона-22, оно оказалось наиболее существенным при $t_0 = -25^\circ\text{C}$ и наименьших опытных значениях q .

При $t_0 = +20^\circ\text{C}$ средние коэффициенты теплоотдачи пучка имеют максимальное отклонение от α отдельных рядов $\pm 10\%$.

При $t_0 = -25^\circ\text{C}$ и $q < 6000 \text{ вт/м}^2$ изменение α по рядам оказалось более существенным.

На рис. 3 приведены средние для пучка коэффициенты теплоотдачи аммиака. Они определены как средние арифметические из опытных значений α для каждого из шести рядов пучка. Линия 1 соответствует уравнению (1), которое для трубы $d = 17,7 \text{ мм}$ приобретает вид

$$\alpha = 167q^{0,2} \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{град)}. \quad (5)$$

Линии 2 и 3 представляют собой опытные данные для одиночной трубы в области развитого кипения.

Для $t_0 = +20^\circ\text{C}$ средние значения α удовлетворительно согласуются при $q \leq 2000 \text{ вт/м}^2$ с линией 1, а при $q > 2000$ с линией 2. В области $q < 6000 \text{ вт/м}^2$ средние коэффициенты теплоотдачи растут с понижением температуры кипения. При этом в интервале $t_0 = -25 \div -10^\circ\text{C}$ изменение коэффициента теплоотдачи сравнительно невелико и его можно принимать для этих температур кипения приблизительно одинаковым (неточность 6%).

Как указывалось выше, подобный результат был получен Консли [1] для $t_0 = -9 \div -23^\circ\text{C}$. При повышении температуры кипения от 0 до 20°C ее влияние на теплоотдачу становится более сильным.

Уменьшение теплоотдачи с повышением t_0 было отмечено Гоголиным [2].

Обратная зависимость между температурой кипения и коэффициентом теплоотдачи, видимо, связана с ростом интенсивности конвективного теплообмена при низких температурах кипения и большей его относительной роли в общем процессе теплообмена при малых тепловых потоках.

Действительно, количество пара, получающееся при определенной тепловой нагрузке и температуре кипения t_0 определяется величиной

$$G_n = \frac{qv''}{r} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}),$$

где v'' — удельный объем насыщенного пара.

Если тепловая нагрузка остается постоянной, то

$$\frac{G_n, -20^\circ\text{C}}{G_n, +20^\circ\text{C}} = \frac{v''_{-20} r_{+20}}{v''_{+20} r_{-20}} = \frac{0,6236 \cdot 283,6}{0,149 \cdot 317,3} = 3,74,$$

т. е. при понижении температуры кипения с $+20$ до -20°C объем пара, приходящийся на единицу поверхности, увеличивается приблизительно в 4 раза. Если учесть, что число центров парообразования при понижении t_0 резко уменьшается, то, очевидно, размеры пузырей и их скорость подъема должны возрасти, что и приводит к большей турбулизации жидкости паровыми пузырями и росту скорости циркуляции.

С ростом тепловой нагрузки влияние температуры кипения на теплоотдачу уменьшается и кривые $\alpha = f(q)$ при разных значениях t_0 сближаются. Можно предполо-

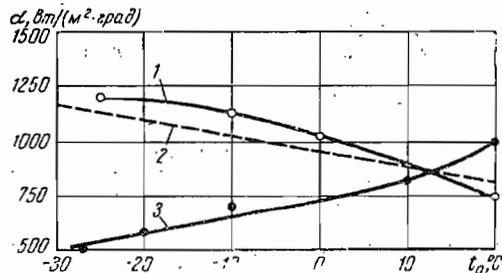


Рис. 4. Влияние температуры кипения на коэффициент теплоотдачи при кипении аммиака и фреона-22 на пучке труб при $q = 2000 \text{ вт/м}^2$.

1 — аммиак, данные автора; 2 — аммиак, данные Гоголина [2]; 3 — фреон-22, данные автора.

жить (судя по характеру кривых на рис. 3), что при $q > 10^4$ зависимость α от t_0 станет прямой.

В этих условиях роль процесса собственно парообразования становится определяющей, влияние конвекции менее существенным и теплоотдача пучка может подчиняться общим закономерностям теплообмена при кипении на одиночной трубе.

Для проверки вышесказанного необходимо иметь количественные данные о размерах и скорости подъема аммиачных пузырей, а также расширить экспериментальные сведения для пучков на область $q > 10^4 \text{ вт/м}^2$.

На рис. 4 представлена зависимость средних величин коэффициентов теплоотдачи аммиака (линия 1) и фреона-22 (линия 3) от температуры кипения при $q = 2000 \text{ вт/м}^2$. Характер влияния температуры кипения для аммиака согласуется с данными, полученными по формуле Гоголина [2] при диаметре трубок 38 мм (линия 2).

Опытные данные по кипению фреона-22 на пучке труб в области развитого кипения до $q = 10^4 \text{ вт/м}^2$ обобщаются уравнением

$$\alpha = 1,88q^{0,7} p^{0,42} \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{град)}. \quad (6)$$

Нижний предел q зависит от температуры кипения и при -27°C составляет 1700 вт/м^2 , при $+20^\circ\text{C}$ — 350 вт/м^2 . Средние опытные величины α для фреона-22 при $t_0 = -27$ и $+20^\circ\text{C}$ даны на рис. 3. При $t_0 = -25^\circ\text{C}$ и тепловых потоках $q = 700 \div 3500 \text{ вт/м}^2$, характерных для работы холодильных аппаратов, теплоотдача при кипении аммиака на пучке в 1,5—2 раза выше, чем при кипении фреона-22. С увеличением q и повышением t_0 различие в коэффициентах теплоотдачи аммиака и фреона-22 уменьшается. При $t_0 = +20^\circ\text{C}$ интенсивность теплообмена у фреона-22 даже в области малых значений q становится большей, чем у аммиака. При $q > 6000 \text{ вт/м}^2$ коэффициенты теплоотдачи этих агентов сравниваются и для низких температур кипения. Частично причины различных соотношений между их коэффициентами теплоотдачи в разных условиях были рассмотрены выше при изложении результатов экспериментов с одиночной трубой. Здесь еще добавляется различное влияние пучка на кипение этих жидкостей из-за большого числа действующих центров и меньших отрывных размеров пузырей фреона-22 в сравнении с аммиаком.

Выводы

Коэффициенты теплообмена аммиака на одиночной трубе в области свободного движения и слабого кипения подчиняются уравнению (1), а в области развитого кипения уравнению (3).

Влияние гистерезиса при кипении аммиака проявляется при всех исследованных значениях t_0 и охватывает область от $q=5000$ до $q=50000\div 100000$ $вт/м^2$. Начало и прекращение кипения соответствует большим величинам q , чем для фреона-22.

При кипении аммиака на пучке труб изменение коэффициента теплоотдачи по рядам менее значительно, чем при кипении фреона-22 и в наибольшей степени сказывается при низких температурах кипения и малых тепловых потоках.

В области $700 < q < 6000$ средние значения α пучка увеличиваются с понижением t_0 , причем наибольшее влияние температуры проявляется в интервале $0-20^\circ\text{C}$. Влияние t_0 на α уменьшается с ростом q .

Для условий работы холодильных испарителей ($t_0 = -25\div -10^\circ\text{C}$ и $q=700\div 3500$ $вт/м^2$) теплоотдача аммиака в 1,5—2 раза выше, чем у фреона-22. С увеличением q и t_0 различие в α уменьшается и при определенных условиях величины $\alpha_{\text{ф.22}}$ оказываются более высокими, чем величины $\alpha_{\text{ам}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Consley I. C. «Refr. Engng.», 1938, Vol. 35, No. 6, p. 409.
2. Цыдзик В. Е., Бармин В. П., Вейнберг Б. С. Холодильные машины и аппараты. М., Машгиз, 1946.
3. Данилова Г. Н., Куприянова А. В. Теплообмен при кипении фреонов-С318 и 21. В сб. «Холодильная техника и технология», вып. 8. Киев, «Техника», 1969.
4. Бельский В. К. Исследование теплообмена при кипении фреона-12 на пучке трубок и одиночных очеленных трубах. «Холодильная техника», 1970, № 2.
5. Данилова Г. Н. Теплообмен при кипении фреонов. Докторская диссертация. Л., ЛТИХП, 1968.
6. Михеева И. М. Теплоотдача при свободном движении различных жидкостей. Теплопередача и тепловое моделирование. М., Изд-во АН СССР, 1959.
7. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.—Л., Машгиз, 1962.

Уважаемые читатели!

**ВСЕСОЮЗНЫЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗДАЕТ
ИНФОРМАЦИОННУЮ ЛИТЕРАТУРУ ПО ВСЕМ ОСНОВНЫМ ВОПРОСАМ НАУКИ
И ТЕХНИКИ.**

В изданиях ВИНТИ — Реферативном журнале, Экспресс-информации, сборниках «Итоги науки и техники», Сигнальной информации и других — помещаются рефераты, аннотации, обзоры, библиографические и патентные описания, охватывающие мировую литературу по естественным и техническим наукам, издающуюся в 117 странах мира на 65 языках.

ЧИТАЙТЕ, ВЫПИСЫВАЙТЕ, ИСПОЛЬЗУЙТЕ!

Реферативные журналы: «Насосостроение и компрессоростроение», «Холодильное машиностроение», «Оборудование пищевой промышленности», «Вопросы технического прогресса в машиностроении», «Коммунальное, бытовое и торговое оборудование», «Экономика промышленности» (6 выпусков) и др.

Индексы Союзпечати: 71884—887; 171894—897; 71784—787; 71832—835; 71646—649 и др.

Экспресс-информацию: «Мясная и молочная промышленность»; «Надежность и контроль качества»; «Пищевая промышленность»; «Рыбная промышленность» и другие серии.

Индексы Союзпечати: 72148—149; 72150—151; 72164—165; 72212—213 и др.

«Итоги науки», серия «Оборудование пищевой промышленности», 1970 г.

Заказы на Сигнальную информацию, «Итоги науки и техники», реферативную и библиографическую картотеки, труды по научной информации и другие издания принимаются по адресу: г. Люберцы-10, Московской обл., Октябрьский проспект, 403, Производственно-издательский комбинат ВИНТИ, отдел распространения. Тел. 271-90-10, доб. 26—27.

Там же можете подробно ознакомиться со всей интересующей Вас литературой по своей специальности и получить проспекты.