

Djundin, V. A. (Kand.d.techn.Wiss.)
Solov'ev, A. G.
Borišanskaja, A. V. (Kand.d.techn.Wiss.)
Vol'nych, Ju. A.

EINFLUSS DER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT AUF DIE INTENSIVIERUNG DES SIEDENS VON KÄLTEMITTELN

Deutsche Vollübersetzung aus dem Russischen

Quelle:

Cholodil'naja tehnika. Moskva, (1984) Nr 5, S. 37 – 40.

Russ.: Влияние вида поверхности на интенсификацию процесса кипения хлад-
агентов

Vlijanie vida poverchnosti na intensifikaciju processa kipeņija chladagentov

Die Intensivierung des Wärmeübergangs beim Sieden ist von großer praktischer Bedeutung.

Die Verfasser halten eine solche Intensivierung für möglich, indem die physikalisch-chemischen Eigenschaften sowie die Mikro- und Makrorauhigkeit der Oberfläche verändert werden, wodurch der Wärmewiderstand zwischen der Wärmeübergangsfläche und dem Kältemittel abnehmen muß.

Die bis heute bekannten Verfahren zur Intensivierung des Wärmeübergangs kann man in mehrere Gruppen einteilen [3]. Zur ersten gehören die in der Industrie sehr stark verbreiteten berippten Oberflächen, zur zweiten der Einsatz von Oberflächen mit Mikrogeometrie oder Mikroberippung (natürlicher oder künstlicher Rauigkeit), von Überhöhungen und Vertiefungen, die mit den Abmessungen der Blasen und der Grenzschichtdicke übereinstimmen. Bei einer regelmäßigen Mikrostruktur nimmt die Anzahl der Dampfbildungszentren zu und dadurch wird der Wärmeübergang intensiviert.

Zur nächsten Gruppe zählen Oberflächen mit unbenetzbaren Schichten, wobei zur Steigerung der Dampfbildung in den Mikrovertiefungen Oberflächen mit günstiger Mikrogeometrie und unbenetzbaren Schichten bevorzugt werden.

Am gebräuchlichsten sind die verschiedenartigsten porösen Beschichtungen, die insbesondere durch Sintern und Aufdampfen gewonnen werden. Poröse Oberflächen zeichnen sich besonders durch die Herstellungstechnik und Struktureigenschaften der porösen Schicht aus.

Wie die unterschiedlichen Faktoren, darunter auch die Oberflächenbeschaffenheit, das Kältemittelsieden beeinflussen, wurde in den Arbeiten [1 – 4] beschrieben. Bekannt ist desweiteren nur eine ähnliche Untersuchung, die beim Sieden von Ammoniak an einem Bündel beschichteter Rohre durchgeführt wurde [3].

Bei Temperaturgefällen von $\Delta T = 2 - 3$ K zwischen der Heizfläche und der siedenden Flüssigkeit treten Bedingungen ein, die die Blasenbildung im Ammoniak erschweren, verglichen mit der Blasenbildung beim Sieden von R22 und R12. Unter diesen Bedingungen ist für Ammoniak ein nicht ausgebildetes Sieden bereits am Anfang charakteristisch, wohingegen das Sieden bei den Freonen in diesem Fall ausgebildet ist. Dies hängt damit zusammen, daß der kritische Radius des Dampfkeims R_{min} bei gleichen Temperaturen von T_0 und ΔT beim Ammoniak annähernd zweimal größer ist als beim R22 und daß die für die Dampfkeimbildung im Volumen nötige Aktivierungsenergie L_{vol} etwa 20 mal größer ist.

Die Werte R_{min} und L_{vol} werden ermittelt nach den Gleichungen:

$$R_{min} = \frac{2\sigma T_s}{r\rho''\Delta T}; \quad (1)$$

$$L_{vol} = \Delta p V - \sigma F = \frac{16}{3} \frac{\pi\sigma^2}{(r\rho'')^2} \left(\frac{T_s}{\Delta T}\right)^2, \quad (2)$$

mit σ Oberflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Dampf, N/m;
 T_s Sättigungstemperatur, K;
 r Verdampfungsenthalpie, kJ/kg;
 ρ'' Dampfdichte, kg/m³;
 Δp Differenz der nach den Sättigungs- und Oberflächentemperaturen bestimmten Drücke, Pa;
 V Dampfblasenvolumen, m³;
 F Dampfblasenoberfläche, m².

Die Energie für die Dampfkeimbildung an einer festen Oberfläche wird bestimmt nach der Gleichung

$$L_{vol} = \Delta p + F\sigma \left[1 - \frac{F_c}{F}(1 - \cos \Theta)\right], \quad (1)$$

mit F_c Kontaktfläche Dampfblase / feste Oberfläche;
 Θ Kontaktwinkel, Grad.

Je größer Θ und je größer das Verhältnis F_{JF} , desto geringer ist die Dampfkeimbildungsenergie. Das Verhältnis F_{JF} charakterisiert den Anteil der Blasenoberfläche, mit dem sie die feste Oberfläche berührt, von der Blasenoberfläche. D.h. die wahrscheinlichsten Stellen für die Blasenbildung sind Nuten, Rillen und andere Vertiefungen, und dabei wiederum die Stellen, wo die Bedingungen für Benetzungen am schlechtesten sind (große Θ). Fremdkörper im Werkstoff der Oberfläche verringern die Benetzbarkeit.

Frühere Untersuchungen des Siedens von Freonen wurden an Kupferrohren mit porösen Bronze- oder Kupferbelägen durchgeführt. Hinsichtlich preiswerter Werkstoffe für Wärmeaustauschflächen und ihre Herstellung ist die Wirkungsweise von porösen Belägen aus Aluminium auf Stahlrohren interessant.

Entsprechend den obengenannten Bedingungen wurde der Wärmeübergang beim Sieden von Ammoniak und R22 an Stahlrohren (Baustahl 20) mit 20 x 2,5 mm Durchmesser und verschiedenen Oberflächen durchgeführt: glatt (Nr 1), poröser Belag aus Aluminium (Nr 2) und nach Vibrokontaktbehandlung (Nr 3 und 4). Die porösen Aluminiumbeläge wurden auf die Rohraußenfläche durch Aufdampfen aufgetragen. Die Dicke der Beläge betrug 0,3 mm, die Porosität 29 %, der äquivalente Porendurchmesser 0,037 mm (Abreißdurchmesser von R22 0,2 – 0,4 mm, von Ammoniak 0,5 – 1,0 mm). Diese poröse Schichtart wurde wegen der möglichen Herstellungstechnik der Oberfläche gewählt.

Die Oberflächen der Rohre Nr 3 und Nr 4 wurden spanbearbeitet. Dabei wurde eine Vibrokontakanlage benutzt, mit der man die vorgegebene Form der „Maserung“ mit größtmöglicher Genauigkeit wiederholen konnte. Die Außenfläche dieser Proben bestand aus rautenförmigen Abschnitten mit 3 mm Seitenlänge, die voneinander durch unregelmäßig geformte Rillen mit ~ 1,5 mm Breite und 1,0 mm Tiefe entfernt waren. Auf die Oberfläche von Rohr Nr 4 wurde nach der Vibrokontaktbehandlung eine feine Fluorkarbonschicht aus zufällig angeordneten 50 µm dicken Flecken aufgebracht.

In das 0,2 m lange Versuchsrohr wurde das Heizelement eingebracht. Im mittleren Querschnitt (bezogen auf die Heizelementlänge) befanden sich die Thermoelementlötstellen. Die lackisolierten Thermoelementlötstellen wurden in mit Spindelöl gefüllten langen Kapillaren gelagert, die vorab, vor der Beschichtung, in den Längsnuten oben, seitlich und unten am Rohr angelötet wurden.

Die Versuche erfolgten mit einem Versuchsaufbau, der einen geschlossenen Kreislauf darstellte (Temperaturbereich $T_0 = 253 - 293$ K, Wärmestromdichte $q = (2 - 25) \times 10^3$ W/m². Während der Versuche wurden die Betriebswerte durch ein automatisches Thermostatsystem konstant gehalten; dieses bestand aus Kältemaschine, Solebehälter und Pumpe.

Die elektrische Heizleistung wurde mit dem Wattmeter D6529 Klasse 0,1 gemessen, der Sättigungsdruck mit dem Probenmanometer MO-160 Klasse 0,4, die elektrodynamische Kraft der Thermoelemente mit dem Voltmeter F30 Klasse 0,1. Die maximale relative Meßfehlergröße bei der Bestimmung der Wärmeübergangszahl lag bei ± 17 %.

Alle Versuchsrohre wurden in den Verdampfer eingebracht. Bei der Durchführung der Versuche wurde immer nur ein einziges Prüfrohr untersucht, wobei die Abstände zwischen den Rohren ausreichend groß waren, um einen Einfluß der danebenliegenden Rohre auf die Hydrodynamik der Grenzschicht auszuschließen, wodurch man einen Siedevorgang in einem großen Behälter annehmen konnte.

Die beim Sieden von Ammoniak bei unterschiedlichen Siedetemperaturen an den Prüfrohren ermittelten und nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate überarbeiteten Versuchsergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt.

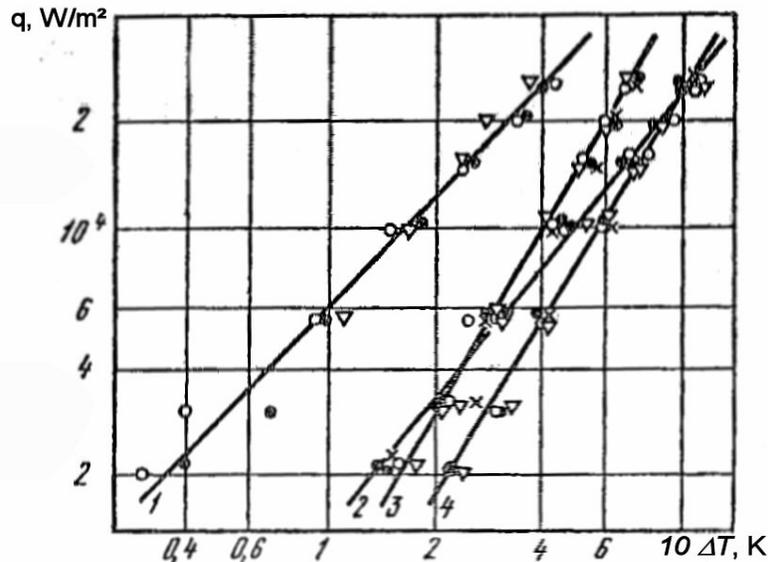


Abb. 1. Versuchsabhängigkeiten $q = f(\Delta T)$ beim Sieden von Ammoniak an den Untersuchungsrohren:

- 1) Rohr Nr 4, $q = 5800 (\Delta T)^{1,05}$; 2) Rohr Nr 3, $q = 1350 (\Delta T)^{1,25}$;
 3) Rohr Nr 2, $q = 900 (\Delta T)^{1,73}$; 4) Rohr Nr 1, $q = 565 (\Delta T)^{1,63}$;
 x $T_0 = 253 \text{ K}$; O $T_0 = 263 \text{ K}$; ∇ $T_0 = 283 \text{ K}$; • $T_0 = 293 \text{ K}$

Im Bereich der verallgemeinerten Linien befinden sich $\sim 80 \%$ der Versuchsdaten (Streuung $\pm 20 \%$).

Abb. 2 zeigt den Einfluß der verschiedenen Oberflächenarten auf den Wärmeübergang beim Sieden von Ammoniak und R22.

Der wesentliche Unterschied in den wärmetechnischen und thermodynamischen Eigenschaften von Ammoniak und R22 bestimmte auch die stark voneinander abweichenden Wärmeübergangswerte.

Wo die poröse Oberfläche (Rohr Nr 2) eine 2,5 – 8fache Zunahme der Wärmeübergangszahl beim Sieden von R22 sicherstellte, ergab dies beim Sieden von Ammoniak eine Zunahme von nur $\sim 40 \%$. Dies hängt damit zusammen, daß die Abreißdurch-

messer D_0 bei R22 um etwa eine Größenordnung kleiner sind als bei Ammoniak und daß die Wärmeaustauschfläche bei R 22 günstiger ist.

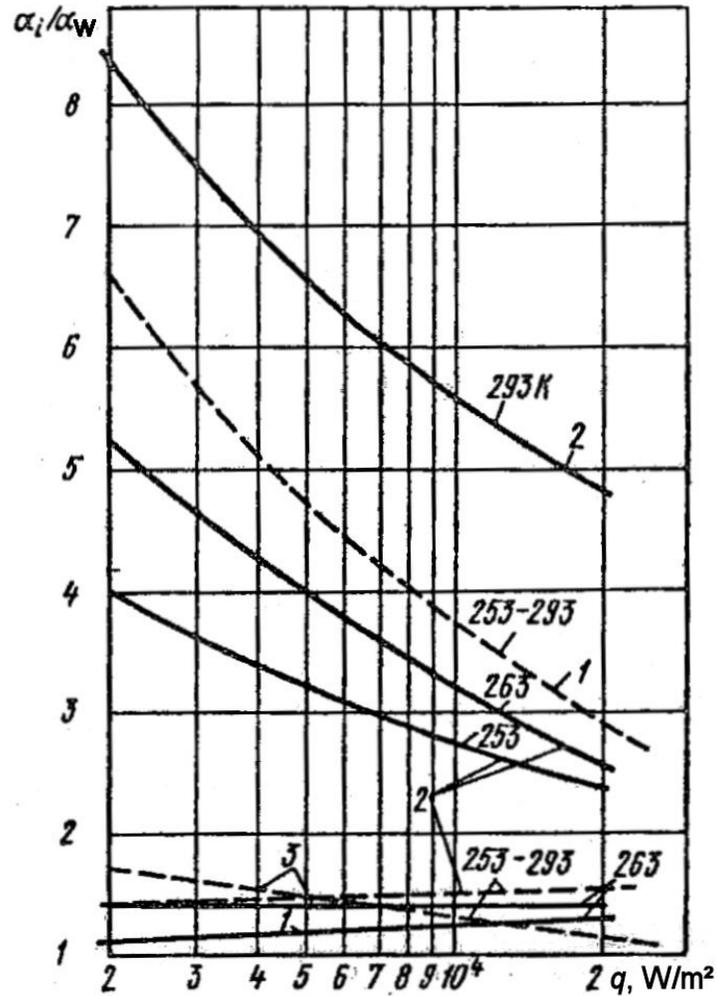


Abb. 2. Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf den Wärmeübergang beim Sieden von Ammoniak und R22:

— R 22; - - - - Ammoniak;
1) Rohr Nr 4; 2) Rohr Nr 2; 3) Rohr Nr 3

Eine geringe Zunahme der Wärmeübergangszahl (30 – 60 %) beobachtet man beim Sieden der beiden Kältemittel am Rohr Nr 3 mit vibrokontaktbehandelter Oberfläche. Es darf angenommen werden, daß die spanbearbeiteten Rillen beim R22 ungenügend breit sind: $S \sim 1,5 \text{ mm}$ ($D_0 \ll S$). Eine geringe Intensivierung beim Sieden von Ammoniak kann man durch die unzureichende Tiefe h erklären ($D_0 \sim h$). Dieselbe Oberfläche des Rohres Nr4, jedoch mit Fluorkarbonbeschichtung, ergab ein ganz anderes Resultat.

Den verschiedenartigen Wärmeübergang von Ammoniak und R22 am Rohr Nr 4 könnte man folgendermaßen erklären. Anscheinend ruft das 50 μm dicke Fluorkarbon beim

Sieden von R22 einen zusätzlichen Wärmewiderstand hervor, der die Benetzbarkeit der Heizfläche mit dem Kältemittel nicht wesentlich beeinflusst.

Beim Ammoniak überwiegt die geringere Benetzbarkeit den Einfluß des zusätzlichen Wärmewiderstands. Deshalb ist die Wärmeübergangszahl am Rohr Nr 4 beim Sieden von Ammoniak 3 – 4 mal höher als am Rohr Nr 1.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchung kann man folgende Schlußfolgerungen ziehen:

Verändert man die Art der Wärmeübergangsfläche, kann man eine Zunahme der Wärmeübergangszahl um das 5 – 7fache erreichen.

Kältemittel mit stark ausgeprägten wärmephysikalischen Eigenschaften wie R22 und Ammoniak verlangen ein spezielles Vorgehen bei der Auswahl der effektiven Wärmeübergangsfläche.

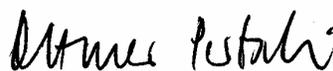
Die untersuchten Rohre mit porösem aufgedampftem Belag intensivieren den Siedevorgang von Ammoniak nur schwach. Dafür bräuchte man Rohre mit anderen geometrischen Werten der Beläge. Es muß also weiter untersucht werden, wie Werkstoff des Belags und Standzeit der Oberfläche den Wärmeübergang beeinflussen.

Literaturverzeichnis:

1. Nakayama, W.; Daikoku, T.; Kuwahara, H.; Nakajima, T.: Dynamic model of enhanced boiling heat transfer on porous surfaces. Part I: Experimental investigation. – In: Journal of heat transfer. New York, 102 (1980) august, S. 445 – 450.
2. Djundin, V. A.; Danilova, G. N.; Borišanskaja, A. V.: Teploobmen pri kipeanii chladagentov na poverchnostjach s poristymi pokrytjiami. – In: Teploobmen i gidrodinamika. Leningrad: Nauka, 1977, S. 15 – 30.
<Wärmeübergang beim Sieden von Kältemitteln an Oberflächen mit porösen Beschichtungen; russ.>
3. Intensifikacija teploobmena v isparitel'nych choolodil'nych mašin. Pod red. A. A. Gogolina. Moskva: Legkaja i piščevaja promyšlennost', 1982, 223 S.
<Intensivierung des Wärmeübergangs in Kältemittelverdampfern; russ.>
4. Young, R. K.; Hummel, R. L.: Improved nucleate boiling heat transfer. - In: Chemical Engineering Progress. Symposium series. New York, 59 (1965) S. 264 – 270.

Stuttgart, den 6. Mai 2008

übersetzt von



(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übers

тимальная геометрия структуры таких поверхностей должна быть изучена более подробно.

Для металловолоконистых покрытий наиболее эффективны толщина $\delta_{к.с} = 0,2$ мм и пористость $\epsilon = 50 \div 60$ %.

Список использованной литературы

1. Алешкевич Ю. В., Залетнев А. Ф., Тихонов А. В. Установка для измерения интенсивности теплоотдачи при кипении жидкостей. — Изв. вузов СССР. Приборостроение, т. 16, № 2, 1983, с. 90—93.
2. Залетнев А. Ф., Тихонов А. В. О применении тепломера стержневого типа для измерения теплоотдачи к кипящей жидкости. — Изв. вузов СССР. Приборостроение, т. 13, № 10, 1981, с. 90—94.
3. О теплообмене при кипении жидкостей на греющих поверхностях с капиллярно-пористыми покрытиями / Данилова Г. Н., Иоффе О. Б., Дюндин В. А. и др. — Температурный режим и гидравлика парогенераторов. Л.: Наука, 1978, с. 73—76.
4. Семена М. Г., Нишик А. П. Исследование структурных параметров металловолоконистых фитилей тепловых труб. — ИФЖ, т. 35, № 5, 1978, с. 777—781.
5. Rannenberg M., Beer H. — Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 7. 1980, pp. 425—436.
6. Sathe A. M., Mahajan S. P. — J. of Technology, Vol. 19, June, 1981, pp. 239—242.
7. Webb R. L. — Heat Transfer Engin., Vol. 2., p. 3—4, Jan., June, 1981, pp. 46—49.

УДК 621.565.93/.94:536.24.001.5

ВЛИЯНИЕ ВИДА ПОВЕРХНОСТИ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ ХЛАДАГЕНТОВ

Канд. техн. наук В. А. ДЮНДИН,
А. Г. СОЛОВЬЕВ,
канд. техн. наук А. В. БОРИШАНСКАЯ,
Ю. А. ВОЛЬНЫХ

Интенсификация теплообмена при кипении является важной практической задачей.

Авторы рассматривают возможность интенсификации теплоотдачи путем изменения физико-химических свойств, микро- и макрошероховатости поверхности, обеспечивающих снижение термического сопротивления между теплопередающей поверхностью и хладагентом.

Существующие в настоящее время способы интенсификации теплообмена можно разделить на несколько групп [3]. К одной следует отнести применение наиболее распространенных в промышленности оребренных поверх-

ностей, к другой — использование поверхностей с микрогеометрией или микрооребрением (естественной или искусственной шероховатостью), с размерами выступов и впадин, соизмеримыми с размерами пузырьков и толщиной пограничного слоя. Наличие регулярной микроструктуры увеличивает число центров парообразования и тем самым интенсифицирует теплообмен.

К следующей группе можно отнести применение поверхностей с несмачиваемыми покрытиями, причем для улучшения задержки пара в микровпадинах предлагаются поверхности, сочетающие благоприятную микрогеометрию и несмачиваемые покрытия.

Самая обширная группа охватывает все виды пористых покрытий, в частности, полученных методом спекания и напыления. Пористые покрытия различаются в основном технологией изготовления и структурными характеристиками пористого слоя.

Влияние на процесс кипения фреонов различных факторов, в том числе видов покрытий, описано в ряде работ [1—4]. Известно лишь одно аналогичное исследование, проведенное при кипении аммиака на пучке очехленных труб [3].

При температурных напорах $\Delta T = 2 \div 3$ К между поверхностью нагрева и кипящей жидкостью создаются условия, затрудняющие возникновение паровых пузырьков в аммиаке по сравнению с их образованием при кипении R22 и R12. При этих условиях для аммиака характерен режим неразвитого кипения в самом его начале, тогда как для фреонов в этом случае может начаться развитое кипение. Это обусловлено тем, что при одинаковых температуре кипения T_0 и ΔT критический радиус парового зародыша R_{min} для аммиака примерно в 2 раза больше, чем для R22, а энергия (работа) $L_{об}$, необходимая для образования парового зародыша в объеме, примерно в 20 раз больше.

Значения R_{min} и $L_{об}$ находят по формулам:

$$R_{min} = \frac{2\sigma T_H}{r_0'' \Delta T}; \quad (1)$$

$$L_{об} = \Delta p V - \sigma F = \frac{16}{3} \frac{\pi \sigma^3}{(r_0'')^2} \left(\frac{T_H}{\Delta T} \right)^2, \quad (2)$$

где σ — поверхностное натяжение между жидкостью и паром, Н/м;

T_n — температура насыщения, К;
 r — удельная теплота парообразования, кДж/кг;
 ρ'' — плотность пара, кг/м³;
 Δp — разность давлений, определенных по температурам насыщения и поверхности, Па;
 V — объем парового пузырька, м³;
 F — площадь поверхности парового пузырька, м².

Работу на образование парового зародыша на твердой поверхности определяют по уравнению:

$$L_{об} = -\Delta p V + F_c \left[1 - \frac{F_c}{F} (1 - \cos \Theta) \right], \quad (3)$$

где F_c — площадь контакта парового пузырька с твердой поверхностью, м²;
 Θ — краевой угол, град.

Чем больше Θ и чем больше отношение F_c/F , тем меньше работа на образование парового зародыша. Отношение F_c/F характеризует долю площади поверхности пузырька, которой он соприкасается с твердой поверхностью, от общей поверхности пузырька. Значит, наиболее вероятными местами возникновения пузырьков будут впадины, канавки и другие углубления, причем те, где имеются наихудшие условия смачиваемости (большие Θ). Инородные включения в материал поверхности уменьшают смачиваемость.

Предыдущие исследования процесса кипения фреонов проводили на медных трубах с бронзовым или медным пористым покрытием. С точки зрения поиска дешевых материалов для теплообменных поверхностей и разработки рациональной технологии их изготовления интересно выявить эффективность применения пористого покрытия из алюминия, нанесенного на стальные трубки.

В соответствии с вышесказанным исследовали теплообмен при кипении аммиака и R22 на стальных трубках (сталь 20) диаметром $20 \times 2,5$ мм с различными поверхностями: гладкой (№ 1), с пористым покрытием из алюминия (№ 2) и с виброконтактной обработкой (№ 3 и № 4). Пористое покрытие из алюминия было нанесено на наружную поверхность трубы методом газопламенного напыления. Толщина покрытия составляла 0,3 мм, пористость 29%, эквивалентный диаметр пор 0,037 мм (при этом отрывные диаметры для R22 были равны 0,2—0,4 мм, для аммиака 0,5—1,0 мм). Такая характеристика пористого слоя была выбрана исходя из технологичности изготовления поверхности.

Поверхности трубок № 3 и № 4 были обработаны резцом с помощью виброконтактного устройства, которое позволяет с большой точностью многократно повторять заданную форму «рисунка». Наружная поверхность этих образцов состояла из ромбических участков с длиной стороны 3 мм, отделенных друг от друга канавками неправильной формы с шириной у поверхности ~1,5 и глубиной ~1,0 мм. На поверхность трубки № 4 после виброконтактной обработки был нанесен дискретный слой фторопласта из хаотично расположенных пятен толщиной 50 мкм.

В экспериментальную трубку на длине 0,2 м помещали нагреватель. В среднем сечении (по длине нагревателя) заделывали измерительные спаи термомпар. Изолированные лаком спаи термомпар укладывали в заполненные веретенным маслом длинные капилляры, которые предварительно, до нанесения покрытия, были запаяны в продольные пазы по верхней, боковой и нижней образующим трубы.

Эксперименты проводили на стенде, представляющем собой замкнутый циркуляционный контур, в диапазоне температур кипения $T_0 = 253 \div 293$ К и плотностей теплового потока $q = (2 \div 25) \times 10^3$ Вт/м². Режимные параметры во время опытов поддерживали постоянными с помощью автоматизированной системы термостатирования, состоящей из холодильной машины, рассольного бака и насоса.

Мощность электронагревателей измеряли ваттметром Д529 класса 0,1; давление насыщения — образцовым манометром МО-160 класса 0,4; ЭДС термомпар — вольтметром Ф30 класса 0,1. Максимальная относительная погрешность измерения при определении коэффициента теплоотдачи составляла ± 17 %.

Все экспериментальные образцы были установлены в испарителе. При выполнении опытов обогревалась только одна исследуемая труба, причем межтрубные расстояния были достаточно велики, что исключало влияние соседних труб на гидродинамику пристенного слоя и позволяло считать, что процесс кипения происходит в большом объеме.

Результаты экспериментов, полученные при кипении аммиака на исследованных образцах для различных тем-

ператур кипения и обработанные методом наименьших квадратов, представлены на рис. 1.

В зоне у обобщающих линий с разбросом $\pm 20\%$ находится $\sim 80\%$ экспериментальных данных.

На рис. 2 показано влияние различных видов поверхности на теплообмен при кипении аммиака и R22.

Значительное различие в теплотехнических и термодинамических свойствах аммиака и R22 определило и неодинаковые теплообменные характеристики.

Так, если пористая поверхность (трубка № 2) обеспечивала увеличение коэффициента теплоотдачи при кипении R22 в 2,5—8 раз, то при кипении аммиака — только на $\sim 40\%$. Это связано с тем, что отрывные диаметры паровых пузырьков D_0 для R22 примерно на порядок меньше, чем для аммиака, и данная теплообменная поверхность по своей структуре оказалась более удачной для R22.

Незначительное увеличение коэффициента теплоотдачи (на 30—60%) наблюдали при кипении обоих хладагентов на трубке № 3 с поверхностью, обработанной виброконтактным способом. Можно предположить, что для R22 канавки, образованные резцом, имеют неудовлетворительную ширину $S \sim 1,5$ мм ($D_0 \ll S$). Малую интенсификацию при кипении аммиака можно объяснить недостаточной глубиной h и закругленностью дна канавок ($D_0 \sim h$). Такая же поверхность трубки № 4, но с дискретным слоем фторопласта, дала совсем иной результат.

Различный характер теплообмена при кипении аммиака и R22 на трубке № 4 предположительно можно объяснить следующим образом. По-видимому, при кипении R22 фторопласт толщиной 50 мкм создает дополнительное термическое сопротивление, не влияя существенно на смачиваемость фреоном поверхности нагрева.

Для аммиака уменьшение смачиваемости оказалось преобладающим по сравнению с влиянием дополнительного термического сопротивления. Поэтому коэффициент теплоотдачи при кипении аммиака на поверхности трубки № 4 оказался в 3—7 раз выше, чем на поверхности трубки № 1.

В результате проведенного исследо-

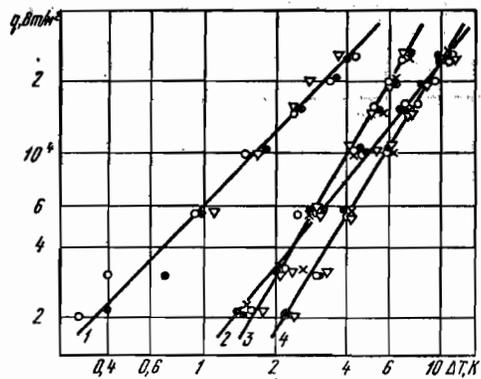


Рис. 1. Опытные зависимости $q=f(\Delta T)$ при кипении аммиака на исследованных образцах:
1 — трубка № 4, $q=5800 (\Delta T)^{1,05}$; 2 — трубка № 3, $q=1350 (\Delta T)^{1,26}$; 3 — трубка № 2, $q=900 (\Delta T)^{1,73}$; 4 — трубка № 1, $q=565 (\Delta T)^{1,63}$. X — $T_0=253$ К; O — $T_0=263$ К; ∇ — $T_0=283$ К; \bullet — $T_0=293$ К

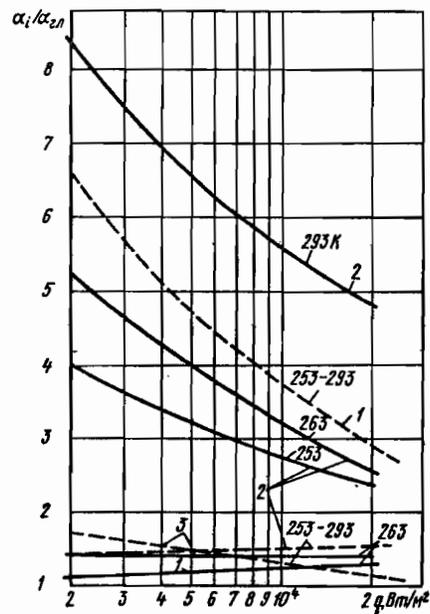


Рис. 2. Влияние поверхностных условий на теплообмен при кипении аммиака и R22:
— R22; - - - аммиак; 1 — трубка № 4; 2 — трубка № 2; 3 — трубка № 3

вания можно сделать следующие выводы.

Изменяя вид поверхности теплообмена, можно добиться увеличения коэффициента теплоотдачи при кипении в 5—7 раз.

Хладагенты с сильно отличающимися теплофизическими свойствами, такие как R22 и аммиак, требуют индивидуального подхода к выбору эффективной теплообменной поверхности.

Исследованные трубы с пористым покрытием, полученным методом газотермического напыления, слабо интенсифицируют процесс кипения аммиака. Для него необходимы трубы с покрытиями, имеющими другие геометрические параметры. Требуется дальнейшего изучения влияния на теплообмен материала покрытий и продолжительности эксплуатации поверхности.

Список использованной литературы

1. Динамическая модель интенсификации теплоотдачи при кипении на пористой поверхности / В. Накаяма, Т. Дайкоку, Х. Кувахара и др. — Теплопередача, 1980, № 3, с. 62—76.
2. Дюндин В. А., Данилова Г. Н., Боршанская А. В. Теплообмен при кипении хладагентов на поверхностях с пористыми покрытиями. Теплообмен и гидродинамика. Л.: Наука, 1977, с. 15—30.
3. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин / под ред. А. А. Гогулина. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 223 с.
4. Young R. K., Hummel R. L. — Chem. Progr. Symp. Ser., 1965, Vol. 61, № 59, pp. 264—270.

УДК 536.24.001.5:621.564.22.012.3

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ АММИАКА НА ПУЧКЕ ТРУБОК С ПРОВОЛОЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Канд. техн. наук В. Г. РИФЕРТ, Я. Е. ТРОКОЗ, В. Ю. ЗАДИРАКА

Эффективность работы аммиачных конденсаторов можно повысить, применяя профилированные трубки с проволочным оребрением. В ранее опубликованной работе [1] коэффициенты теплоотдачи α при конденсации пара на оребренных проволокой трубках были в 1,3—1,5 раза выше, чем на гладких. Однако экспериментальные значения α оказались сильно заниженными по сравнению с расчетными. Так, коэффициенты теплоотдачи гладких трубок были ниже расчетных, полученных по формуле Нуссельта, в ~ 3 раза. Причиной такого результата явилось наличие неконденсирующихся газов в паре. В настоящей работе этот недостаток устранен.

Цель работы — получение надежных данных по теплообмену при кон-

денсации чистых паров аммиака как на одиночных трубках, так и на пучках гладких и оребренных проволокой трубок для обоснования целесообразности применения последних в аммиачных конденсаторах.

Опыты проводили на экспериментальной установке, описанной в работе [1]. Использовали трубки из Ст.10 длиной $L=0,64$ м, наружным диаметром $d_n=16$ мм и толщиной стенки $\delta=1,5$ мм. К наружной поверхности трубок по спирали с различными шагами $S=4, 8, 16$ мм была приварена методом радиочастотной сварки стальная проволока диаметром $d_{пр}=1,5$ мм (рис. 1).

Оребренные трубки были изготовлены в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР.

Исследования проведены в диапазоне изменения плотности теплового потока $q=5\div 50$ кВт/м², скорости охлаждающей воды в трубках $w_w=1,73$ м/с, паров аммиака в межтрубном пространстве опытного конденсатора $w_n=0,02\div 0,03$ м/с, температуре насыщения конденсирующихся паров аммиака $t_n=26$ °С.

Значение t_n определяли по давлению, измеренному как манометром класса 0,4, так и термометрами, установленными в межтрубном пространстве опытного конденсатора.

Тепловой поток рассчитывали по изменению энтальпии охлаждающей воды. Расход воды измеряли ротаметром РС-5 или мерным баком, а ее температуру — дифференциальными термометрами. Для контроля тепловой поток Q периодически измеряли со стороны сконденсировавшегося пара. При этом расхождение с расчетом не превышало $\pm 5\%$.

По опытным данным находили коэффициент теплопередачи для гладкой и оребренных трубок:

$$k = \frac{Q}{F(t_n - \bar{t}_w)} \quad (1)$$

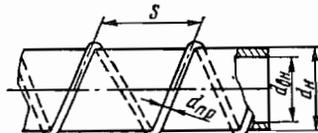


Рис. 1. Трубка со спирально-проволочным оребрением.