

Kovalev, S.A., Derevjanko, D.Ja.,
Machalova, M.V. Dolgincev, I.I.
Sinel'nikov, V.S.

UNTERSUCHUNG DER KRITISCHEN WÄRMESTROMDICHTEN BEIM SIEDEN VON UNTERKÜHLTEM WASSER AN EINER BERIPPTEN OBERFLÄCHE BEI ZWANGSKONVEKTION

Übersetzung aus:

Teplomassoobmen - V. Materialy V Vsesojuznoj konferencii po teplomassoobmenu. Minsk: 1976, Bd 3, Teil 1 (Teplomassoobmen pri fazovyh prevraschenijach), S. 162 - 169.

Russ.: ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ НА РЕБРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ВЫНУЖДЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

Issledovanie krizisa teploobmena pri kipenii nedogretoj vody na rebristoj poverchnosti v uslovijach vynuzhdenogo dvizenija

The experimental method and results are presented on critical heat fluxes in water boiling on finned surfaces of various geometry in a wide range of subcooling and rates. The generalized dependences are proposed to describe the data on critical heat fluxes in pool and forced-motion boiling.

Gegenwärtig findet die Übertragung von Wärmeströmen mit hoher Dichte in der Wärmeenergie-technik und insbesondere beim Kühlen der Anoden von leistungsstarken Röhren [1] breite Anwendung. Sie basiert auf dem Einsatz des Siedens an berippten Oberflächen. Rechnerisch ist die Wärmestromdichte auf einer berippten Oberfläche dabei einige Male größer als der Wert $q_{kr 1}$ [1,2]. Eine zusätzliche Erhöhung des Wärmestroms, der auf diese Weise abgeführt wird, kann erreicht werden durch Zwangskonvektion der unterkühlten Flüssigkeit an der berippten Oberfläche [3].

Bislang wurden jedoch keine systematischen Untersuchungen der kritischen Wärmestromdichte an berippten Wänden, die von einer unterkühlten und von einer bis auf Sättigungstemperatur erwärmten Flüssigkeit umströmt werden, durchgeführt. In der Literatur kommen vereinzelt Angaben vor [4], mit denen man sich aber keine Vorstellung über die Gesetzmäßigkeiten der kritischen Wärmestromdichte machen kann, und nach denen man die Kühlelemente berechnen könnte.

In der vorliegenden Arbeit werden das Verfahren und die Ergebnisse einer Untersuchung über die kritischen Wärmeströme an berippten Oberflächen verschiedener Gestalt beim Sieden von unterkühltem Wasser bei Zwangskonvektion dargelegt.

Die Versuche wurden an Vakuumdioden mit berippten Anoden durchgeführt (Abb. 1). Letztere wiederum waren auf der Grundlage eines VJI-5/30-Kenotrons konstruiert. Der Anodenkörper der Diode war ein zylindrischer Kupferbecher mit der Länge $l = 62$ mm, dem Innendurchmesser $D = 37$ mm und mit einer berippten Außenfläche. Dadurch daß die Oberfläche mittels Elektronenstrahlen beheizt wurde, konnte man Wärmestromdichten bis zu $1,5 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$ erzielen (bezogen auf die Kernrohroberfläche). Die gleichmäßige Beheizung wurde sowohl durch Verwendung einer Basisröhre als auch durch eine Reihe von Veränderungen an der Konstruktion erreicht. Die Versuchsdioden waren nach einer Spezialtechnik hergestellt, die gewährleistete, daß die Dioden ein Vielfaches an Wärmeüberbelastungen aushalten konnten. Die Untersuchungen wurden an zwei verschiedenen Berippungen durchgeführt. Ihre Konstruktionsbesonderheiten und Abmessungen sind in Abb. 2 dargestellt. Die Berippung erster Art (Nr. 1 und 2 in Abb. 2) bildeten horizontale und vertikale Nuten mit der Breite $d = 2$ mm. Diese Abmessung wurde auf der Grundlage von Spezialuntersuchungen über die kritische Wärmestromdichte beim Behältersieden ausgewählt; diese Versuche wurden an vertikalen Invarbänderpaketen mit einem Spalt von 0,5 bis 10 mm durchgeführt. Eine merkliche Abnahme der kritischen Wärmestromdichte beobachtete man bei diesen Versuchen bei Spaltbreiten unter zwei Millimetern. Die Berippung zweiter Art (Nr. 3 in Abb. 2) wurde gewählt, um ein kleines Flächenverhältnis bei ausreichend großen Rippenabmessungen sicherzustellen.

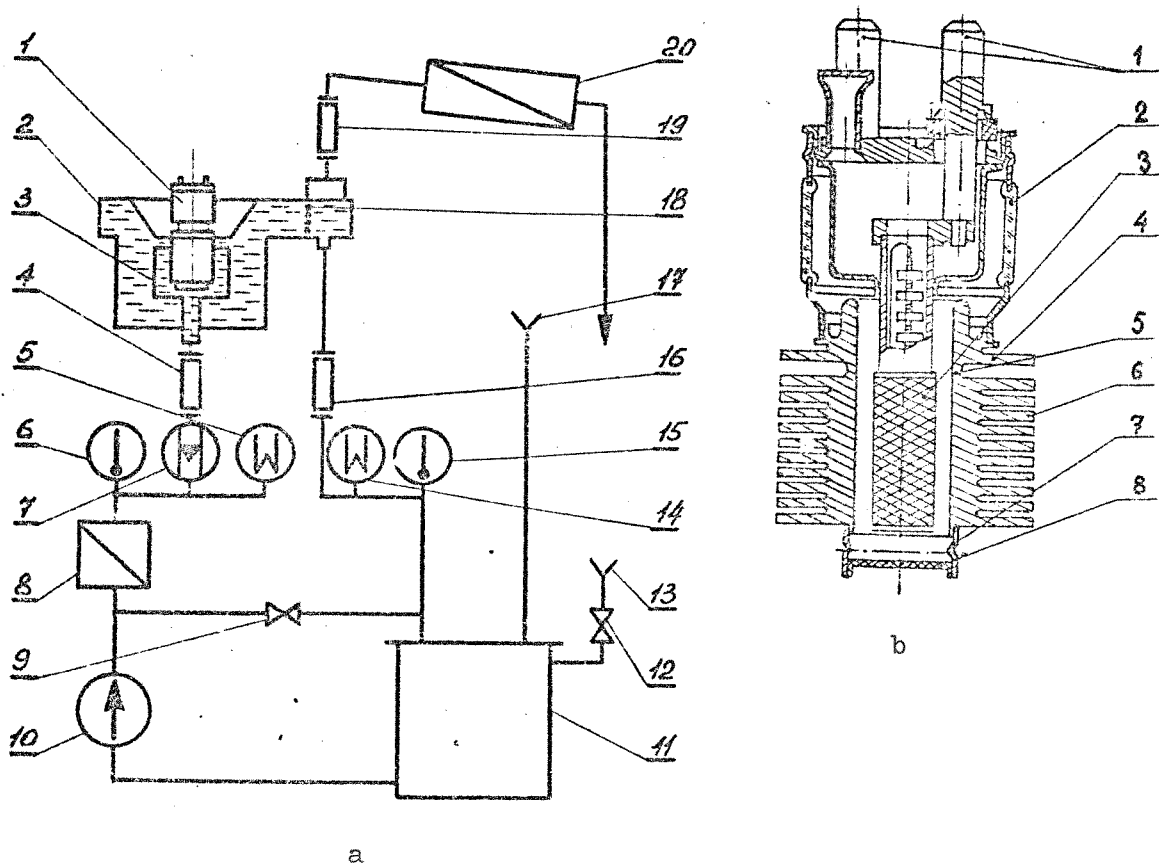


Abbildung 1.

a) Schematische Darstellung der Versuchsanlage.

b) Die Versuchsdiode:

- 1 - Heizanschlüsse; 2 - Glaskolben; 3 - Kathode; 4 - Flansch;
- 5 - Hals; 6 - Anodenkühlkörper; 7 - Schaft; 8 - Boden.

Abb. 1 illustriert die Arbeitsweise der Versuchsanlage. Die Pumpe 10 vom Typ 1,5ChO-4E drückt Wasser aus dem Ausdehnungsgefäß 11 in den Wärmeüberträger 8 und von dort in den Eingangsstutzen der Verdampfungskammer 2. Beim Durchgang durch den Spalt zwischen dem Glasbecher 3 und der Anode der Versuchsdiode 1 gelangt Wasser durch den Auslaßstutzen der Kammer in das Ausdehnungsgefäß. Die Wasserab- und zufuhr aus dem Ausdehnungsgefäß wird durch den Zulauf 13 und das Ventil 12 bewerkstelligt. Zur Verbindung mit der Umgebung ist der Stutzen 17 vorgesehen. Der Wasserdurchsatz wird durch das Bypassventil 9 geregelt. Die Verdampfungskammer, die sich unter der Anode befindet, ist durch die Isolierkörper 4, 16 und 19 elektrisch von allen übrigen Elementen der Versuchsanlage isoliert. Der Dampf, welcher sich an der wärmeabgebenden Oberfläche der Versuchsdiode bil-

det, gelangt zusammen mit dem Wasser in den Dampfauslaß. Bei negativem Dampfgehalt der Strömung kondensiert der Dampf völlig im unterkühlten Wasser und auf dem Spezialkondensationsgitter 18. Bei positivem Dampfgehalt gelangt der Dampf über die Dampfleitung in den Kondensator 20, aus dem das Kondensat durch den Entwässerungsstutzen abfließt.

Der Wasserdurchsatz wurde mit Hilfe eines Schwebekörperdurchflußmeßgerätes 7 vom Typ RS-7 gemessen und die Wassertemperatur mit den Alkoholthermometern 6,15. Der Überdruck im Kreislauf wurde mit den Manometern 5 und 14 kontrolliert; diese waren an den entsprechenden Punkten der Leitung angebracht. Der kritische Wärmestrom wurde bei Beginn des sichtbaren Glimmens der Anode und nach Veränderung der Volt-Ampere-Charakteristiken der Diode festgehalten.

Die Versuche wurden in dem folgenden Bereich durchgeführt:

- Unterkühlung des Wassers am Eintritt $\theta_{\text{ein}} = 15 - 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Wasserdruck im System bei Umgebungsdruck;
- Wassergeschwindigkeit im Spalt zwischen dem Leitbecher und den Rippenstirnseiten $w = 0,02 - 0,14 \text{ m/s}$.

Der Spalt zwischen dem Leitbecher und den Rippenstirnseiten betrug etwa 20 mm.

Die relativ großen Querschnitte der Kühlkanäle und die geringen Geschwindigkeiten des Wärmeträgers wurden deshalb gewählt, um die Versuchsbedingungen maximal den normalen Betriebserfordernissen anzunähern (geringe Drücke im Kühlsystem der Rohren, geringer Wärmeträgerverbrauch und hohes Temperaturniveau desselben beim Austritt aus der Kühlanlage).

Bekanntlich ist der Wert der kritischen Wärmestromdichte beim Sieden in Rohren eine Funktion des Dampfgehalts der Strömung am Austritt. Wie jedoch die Auswertung der Versuchswerte zeigte, besitzt diese Funktion beim Sieden an einer berippten Wand nicht eindeutigen Charakter. Gleichzeitig kann man im untersuchten Fall eine eindeutige Abhängigkeit erhalten, wenn man den Dampfgehalt der Strömung

am Eintritt benutzt; dies läßt sich wie folgt erklären. Beim Sieden an einer berippten Wand ist der Wert der kritischen Wärmestromdichte hauptsächlich bestimmt durch die Bedingungen, wie die Flüssigkeit in die Spalten zwischen den Rippen gelangt. Die Untersuchungen von [2] haben gezeigt, daß die Bedingungen der Flüssigkeitszufuhr in diese Spalten vom Fließcharakter der Strömung außerhalb des Spalts abhängen. Bei einer sich mit geringer Geschwindigkeit fortbewegenden Zweiphasenströmung sind Dampf und Flüssigkeit im Kanalquerschnitt ungleichmäßig verteilt. Die ungleichmäßige Verteilung der Geschwindigkeit und Dichte führt zu Schwankungen des dynamischen und des statischen Drucks im Kanalumfang. Durch Zeitlupenaufnahmen konnte festgestellt werden, daß solche Druckschwankungen die Ansammlung von Flüssigkeit in den Spalten zwischen den Rippen begünstigen. Die schlechtesten Bedingungen an diesen Spalten herrschen am Eintritt der Strömung in den Kanal, wo die Strömung einphasig ist. Gerade der Eintrittsabschnitt der Berippung bestimmt den Wert des kritischen Wärmestroms für die gesamte berippte Wand.

In Abb. 2 sind die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung in Gestalt der Abhängigkeiten

$$q_{\omega,kr} / q_{kr1} = \bar{q} = f(\theta_{\text{ein}}, \omega)$$

angegeben.

Durch diese Angaben konnte man auf eine einzige, für alle untersuchten Berippungen gültige Gleichung verallgemeinern:

$$\bar{q} = \bar{q}_0(K) + \bar{q}_1(x, \omega, K), \quad (I)$$

wobei

$$\bar{q}_0(K) = \frac{q_{0,kr}}{q_{kr1}} = \frac{7,5K}{K+6,5}, \quad (2)$$

$$\bar{q}_1(x, \omega, K) = \varphi(K) [x - x_0(K)]^4 \sqrt{1 + 2,5 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}, \quad (3)$$

$$\varphi(K) = -\frac{K+10}{K+6,5}, \quad x_0(K) = 0,0037 K - 0,05. \quad (4)$$

Gleichung (2) ist eine Approximation der Ergebnisse aus den Untersuchungen von [2] über die kritische Wärmestromdichte beim Behältersieden, die an verschiedenartigen Berippungen mit einem Flächenverhältnis K von 1 bis 15 durchgeführt wurden.

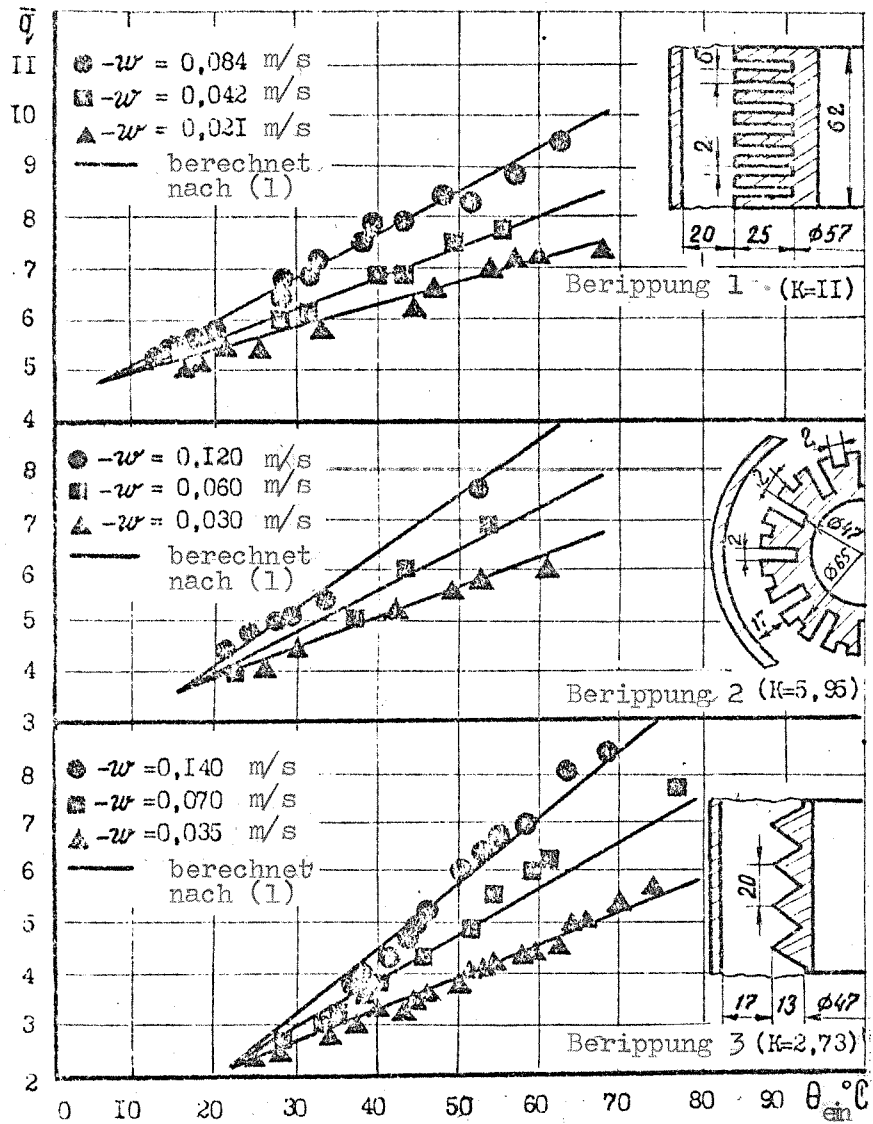


Abbildung 2. Kritische Wärmestromdichte beim Sieden von Wasser an berippten Oberflächen

Gleichung (3) gibt den Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die kritische Wärmestromdichte beim Sieden an einer berippten Wand wieder.

Ein Vergleich von Gleichung (I) mit der Gleichung von D.A. Labuncov [5] zeigt, daß die Abhängigkeit der kritischen Wärmestromdichte von der Strömungsgeschwindigkeit beim Sieden an einer berippten Wand derjenigen nahekommt, die beim Sieden in Rohren beobachtet wird.

Die nach Gleichung (I) errechneten Zahlenwerte werden in Abb. 2 mit den Versuchswerten verglichen. Für die meisten Versuchspunkte (bis 90 %) liegt die Abweichung vom Rechenwert nicht über 10 %.

Wie aus Abb. 2 ersichtlich ist, hängen die kritischen Wärmestromdichten in Bereichen mit geringen Unterkühlungen nicht von der Geschwindigkeit und der Unterkühlung ab, $\bar{q} \equiv \bar{q}_0$. Bei größeren Unterkühlungen hängt der Wert \bar{q} linear von der Unterkühlung und zu einem geringeren Grade von der Geschwindigkeit ab.

Die Maximalwerte der Wärmestromdichten, die an den dargestellten Berippungen erzielt wurden, sind in der Tabelle angegeben.

Berippung	K	w, m/s	$\theta_{\text{ein}}, ^\circ\text{C}$	x_{aus}	$q_{w,kr}, \frac{\text{Mw}}{\text{m}^2}$
I	II	0,084	62	-0,147	10,35
2	5,95	0,120	52	-0,140	8,47
3	2,73	0,140	68	-0,119	2,42

Somit kann man mit berippten Oberflächen, die durch zirkulierendes Wasser, das nicht ganz bis zur Sättigungstemperatur erwärmt wurde, gekühlt werden, Wärmeströme von sehr hoher Dichte erhalten; sie sind annähernd 10 mal größer als $q_{kr 1}$, und zwar bei relativ geringen Geschwindigkeiten und Unterkühlungen.

B e z e i c h n u n g e n

$q_{kr 1}$ - erste kritische Wärmestromdichte; $q_{o,kr}$ - kritische Wärmestromdichte (bezogen auf die Kernrohroberfläche) beim Behältersieden von Wasser an einer berippten Wand; $q_{w,kr}$ - kritische Wärmestromdichte (bezogen auf die Kernrohroberfläche) beim Sieden

an einer berippten Wand unter Zwangskonvektion; w - Strömungsgeschwindigkeit im Spalt zwischen dem Leitbecher und den Rippenstirnseiten, m/s; $w_0 = 0,021$ - Geschwindigkeitsmaßstab (Bezugsgeschwindigkeit), m/s; θ_{ein} - Unterkühlung des Wassers am Eintritt in den Kanal, °C; x - Dampfgehalt am Eintritt in den Kanal; K - Flächenverhältnis, gleich dem Verhältnis von berippter Oberfläche zur Kernrohroberfläche.

L i t e r a t u r

1. Деревянко Д.Я., Долгинцев И.И., Махалова М.В., Синельников В.С.
В сб. "Теплообмен в электронных приборах". Изд. СТУ, Саратов, № 3, 1974, с. 10.
Derevjanko, D.Ja., Dolgincev, I.I., Machalova, M.V., Sinel'nikov, V.S.: Issledovanie krisiza teploobmena pri kipenii vody na neizotermičeskoj poverchnosti.
In Sammelband: Teploobmen v elektronnych priborach. Saratov: Verlag der Staatlichen Universität Saratov, 3 (1974), S. 10 - 16.
<Untersuchung der kritischen Wärmestromdichte beim Sieden von Wasser an einer nichtisothermen Oberfläche>
2. Ковалев С.А., Гешеде В.Д., Деревянко Д.Я., Долгинцев И.И.
Теплофизика высоких температур, № 2, 1976.
Kovalev, S.A., Gešele, V.D., Derevjanko, D.Ja., Dolgincev, I.I.: Zakonomernosti teploobmena pri kipenii židkosti na orebrennoj stenke.
In: Teplofizika vysokich temperatur. Moskva, 14 (1976), Nr 3, S. 559 - 567.
Engl.: Heat-Transfer Investigation when a Liquid Boils at a Finned Wall.
In: High Temperature. New York, 14 (1976), Nr 3, S. 500 - 506.
3. Бертере Ш.А. В сб. "Тепло- и массоперенос", 9, Минск, ИТМО АН БССР, 1972.
Bertere, Š.A.: Teploobmen pri kompleksnom isparenii židkosti v slučae kontakta s neizotermičeskoj stenkoj.
In Sammelband: Teplo- i massoperenos. 3. Konferenz. Minsk: ITMO AN BSSR, 9 (1968), Teil 2, S. 190 - 230.
<Der Wärmeübergang bei vollständigem Verdampfen einer Flüssigkeit bei Kontakt mit einer nichtisothermen Wand>
4. Тиктин С.А. Вapотронная техника. Изд-во "Техника", Киев, 1975.
Tiktin, S.A.: Vapotronnaja tehnika.
Kiev: Verlag "Technika", 1975.
<Vapotron-Technik>
5. Лабунцов Д.А. Атомная энергия, 10, № 5, 1961, с. 523.

Labuncov, D.A.

In: Atomnaja Energija. Moskva, 10 (1961), Nr 5, S. 523 - 525.

Engl.: Critical Thermal Loads in Forced Motion of Water Which is Heated to a Temperature Below the Saturation Temperature.

In: Soviet Journal of Atomic Energy. New York, 10 (1962), Nr 5, S. 516 - 518.

Leningrader Vereinigung
elektronische Geräte für

"SVETLANA"

Institut für Hochtempera-
turen der Akad. d. Wissen-
schaften der UdSSR Moskau

Stuttgart, den 2. Juni 1978

übersetzt von

Ottmar Pertschi

(Ottmar Pertschi)

Dipl.-Übersetzer