

Zeigarnik, Ju. A.; Kirillova, J. V.; Klimov, A.J.; Smirnova, E.G.

EINIGE MESSERGEBNISSE ZUM HYDRAULISCHEN WIDERSTAND BEIM  
UNTERKÜHLTEN SIEDEN VON WASSER

Deutsche Übersetzung aus:

Теплофизика высокых температур. Москва, 21 (1983), Nr.2, S.303-308

Russ.: НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ, НЕДОГРЕТОЙ  
ДО ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕНИЯ  
Nekotorye rezul'taty izmerenij gidravličeskogo  
soprotivlenija pri kipenii vody, nedogretoj  
do temperatury nasyščenija

Es werden Meßergebnisse des hydraulischen Widerstands beim Sieden von unterkühltem Wasser in einem Rohr mit 4 mm Durchmesser bei Drücken von 1 und 2 MPa und Massengeschwindigkeiten von  $(5-20) \cdot 10^3$  kp/(m<sup>2</sup>·s) beschrieben. Festgestellt wurde, daß die "Blasenrauigkeit" an der Rohrwand innerhalb einer bestimmten Wärmestromdichte keinen Einfluß auf den Widerstandswert hat: dieser ist gleich dem Widerstand bei nichtisothermer Flüssigkeitsströmung. Die Zunahme des Widerstandswertes hängt zusammen mit der Bildung von Dampf im Kern der Strömung. Festgestellt wurde auch, daß der Widerstand in den Rohrabschnitten vor dem kritischen Rohrquerschnitt abnimmt, was anscheinend mit einer Verringerung des Flüssigkeitsvolumens zwischen Kern und Wand zusammenhängt.

Die Zunahme der Einzelleistungen von Energieanlagen hängt mit den höheren Wärmestromdichten in den Kanalwänden zusammen. Häufig erweist sich unter diesen Bedingungen bei vielen Konstruktionen das unterkühlte Sieden als einzige zuverlässige Kühlmethode. Dieser Umstand ist einer der Gründe für das wiederaufkommende Interesse an der Untersuchung über Gesetzmäßigkeiten des kritischen Wärmeübergangs und des hydraulischen Widerstands beim Sieden von unterkühltem Wasser bei hohen Wärmestromdichten, großen Massengeschwindigkeiten der Strömung, sowie bei niedrigen und mittleren Drücken.

Es gibt einige Untersuchungen aus den 50er bis 70er Jahren [1-5] über die Gesetzmäßigkeiten des hydraulischen Widerstands beim Sieden von unterkühltem Wasser. Darin befaßten sich die Verfasser mit dem Einfluß von Strömungsgeschwindigkeit, Wärmestromdichte, Unterkühlung der Flüssigkeit und Druck auf den hydraulischen Widerstand. Festgestellt wurde, daß der Druckgradient im Rohr von der Wärmestromdichte in komplizierter Weise abhängt bei unveränderten Werten der Massegeschwindigkeit und der Temperatur der Flüssigkeit am Rohreintritt. Die Verfasser stellten drei Bereiche fest. Zum ersten Bereich (des konvektiven Wärmeübergangs einer einphasigen Flüssigkeit) nimmt der Druckgradient mit zunehmender Wärmestromdichte von null auf einen gewissen Wert ab. Hat die Rohrwand Sättigungstemperatur erreicht, beginnt das unterkühlte Sieden. Im zweiten Bereich, d.h. bereits beim unterkühlten Sieden, bleibt der Druckgradient bis zu einer bestimmten Wärmestromdichte praktisch konstant. Bei weiterer Zunahme der Wärmestromdichte, genau bis zum kritischen Sieden stellt man eine relativ schnelle Zunahme von  $\Delta p/\Delta l$  fest. Klar ist, daß die zulässige Wärmestromdichte der Heizfläche in den Fällen, wo der Widerstand im dritten Bereich recht abrupt zunimmt, nicht durch die kritische Wärmestromdichte  $q_{kr}$  bestimmt werden darf, sondern mit einer gewissen Wärmestromdichte  $q < q_{kr}$ , bei deren Erreichen  $\Delta p/\Delta l$  abrupt zuzunehmen beginnt. Somit ist das Problem, die Länge des zweiten Bereiches und der Gradient der Zunahme von  $\Delta p/\Delta l$  im dritten Bereich bei verschiedenen Kombinationen der Betriebswerte zu bestimmen, von großer praktischer Bedeutung.

Die Angaben über den Verlauf des hydraulischen Widerstandes beinhalten wertvolle Informationen über den Mechanismus des untersuchten Vorgangs. Dies hängt damit zusammen, daß der Widerstandskoeffizient gut auf die veränderte Strömungsstruktur eines Zweiphasengemisches reagiert. Untersuchen wir zum Beispiel das Problem des kritischen Wärmeübergangs beim Sieden einer unterkühlten Flüssigkeit. Gegenwärtig nehmen die meisten Wissenschaftler an, dieser sei hydrodynamischer Art und bedingt durch eine Störung, indem Wasser aus dem Strömungskern in die wandnahe Zweiphasenschicht eindringe. Man vermutet, daß die Unterbrechung der Wasserzufuhr je nach Erreichen einer bestimmten Intensität des Dampfstromes von der Wand eintritt. Die vermutete Verschlechterung der Flüssigkeitszirkulation in Radialrichtung müßte sich je nach Annäherung an den kritischen Wärmeübergang unweigerlich auf die hydraulischen Strömungseigenschaften auswirken. Somit müssen die hydraulischen Strömungseigenschaften den Beginn des Blasenabreißen von der Wand und das Auftreten von Dampf im Strömungskern sowie einige andere spezifische Merkmale des Siedens einer unterkühlten Flüssigkeit darstellen. Die im Institut

für Hochtemperatur der Akademie der Wissenschaften der UdSSR durchgeführten Messungen verfolgten das Ziel, insbesondere solche Informationen zu gewinnen. Diese Daten bekommen unter den Bedingungen hoher Wärmeströme einen besonderen Wert, wo die Möglichkeiten visueller Feststellungen des Blasenverhaltens wegen der großen Blasenzahl gleich null werden.

Die Versuche erfolgten in einem geschlossenen Kreislauf. Das Wasser wurde nach einer chemischen Zweistufen-Entsalzung über Kreiselpumpen aus einem Behälter in die Versuchsanlage gepumpt, dabei gefiltert und vorgewärmt. Die Meßstrecke stellten horizontal angebrachte, gezogene Rohre aus Messing der Marke L-62 mit 4,08 mm Innendurchmesser und 1 mm Wanddicke dar. Der Abschnitt der hydrodynamischen Stabilisierung betrug 0,2 m, die beheizbare Länge 0,2-0,25 m. Über die Länge des beheizbaren Abschnitts der Meßstrecke wurden im Abstand von 50 mm Löcher mit 0,5 mm Durchmesser als Druckentnahmestellen gebohrt. An diesen Stellen wurden an die Meßstrecke Röhren angelötet, die zu den Differentialdruckmessern führten. Damit konnte der Widerstand in den einzelnen Abschnitten einer begrenzten Strecke gemessen werden, innerhalb derer man annähernd unveränderliche Parameter des Mediums und einen gleichbleibenden Strömungsverlauf annehmen durfte. Am Anfang und am Ende des beheizbaren Bereiches wird der Druck mit geeichten Manometern kontrolliert.

In einem Teil der Versuche wurde eine Meßstrecke benutzt, bei der die Druckabfälle nicht nur innerhalb des Heizbereiches gemessen wurden, sondern auch am Ein- und Austritt. Zu diesem Zweck wurden im adiabatischen Rohrabschnitt hinter der ausgangseitigen Stromschiene in den Abständen 50, 150 und 399 mm von der Stromschiene Löcher als zusätzliche Druckentnahmestellen gebohrt. Aufgrund der Kondensation der Dampfblasen im unterkühlten Wasserstrom kam es im adiabatischen Abschnitt zu einem Druckrückgewinn. Vergleicht man die Meßergebnisse  $\Delta p$  unter diesen Bedingungen ( $\Delta p_{\text{druck}}$ ) mit den Angaben zum hydraulischen Widerstand ohne Sieden in der Meßstrecke, d.h. unter isothermen Bedingungen bei derselben mittleren Massentemperatur des Wassers ( $\Delta p_{\text{temp}}$ ), dann kann man die Druckgewinnungskomponente bestimmen und danach mit ihr die Werte des echten volumetrischen Dampfgehaltes der Strömung am Austritt aus dem beheizbaren Bereich bestimmen:

$$\varphi / (1 - \varphi) \cong \left( \Delta p_{\text{temp}} - \Delta p_{\text{druck}} \right) \rho / (\rho_w)^2. \quad (1)$$

Gleichung (1) ist approximativ. Ihre Genauigkeit liegt bei - 25%, d.h. sie liefert den Wert  $\varphi$  mit einer Reserve nach oben. Die Gleichung ergibt sich aus den allgemeinen Beziehungen zur Berechnung der Druckgefällekomponente, bezogen auf die Strömungsbeschleunigung, bei Massendampfgehalten von  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$ . Diese sind für Strömungen im Nichtgleichgewicht von stark unterkühlt siedendem Wasser charakteristisch.

Die Meßstrecke wurde durch direkte Zuführung von Wechselstrom beheizt. Die Stromstärke betrug einige tausend Ampere. Um mögliche größere Wärmeverluste an den Kontaktstellen der Stromschienen mit dem Messingrohr zu vermeiden, wurden diese Verbindungen mit Gallium

eingeschmiert. Das Gallium war bei den Betriebstemperaturen in flüssigem Zustand und füllte aufgrund der Kapillarkräfte alle Ritzen, wodurch ein sicherer elektrischer Kontakt an den Verbindungen gewährleistet war.

Der Wärmestrom wurde durch die der Meßstrecke zugeführte elektrische Leistung bestimmt. Die Wasserdurchflußmenge wurde über Turbinendurchflußgeber TDR mit dem Frequenzmesser F-599 gemessen, die Temperatur der Flüssigkeit am Ein- und Austritt der Meßstrecke mit Chromel-Alumel- Thermoelementen, angeschlossen an das Ampere-Volt-Ohmmeter F-30.

Die Versuche erfolgten bei Drücken von 1 und 2 MPa, Massengeschwindigkeiten  $\rho w = 5 \cdot 10^3, 10^4$  und  $1,9 \cdot 10^4$  kg/(m<sup>2</sup>·s) und Unterkühlungen von 25 - 130 °C. Die Wärmestromdichte variierte von Null bis  $0,7 q_{kr}$  (praktisch durchführbarer Bereich in Energieanlagen). In Einzelfällen lag die Wärmestromdichte näher an  $q_{kr}$ .

Vor den Versuchen mit Erwärmung und nach deren Beendigung wurden Kontrollmessungen des Druckgefälles über die Länge der Meßstrecke bei isothermer Wasserströmung durchgeführt. Die in diesen Versuchen ermittelten Werte des hydraulischen Widerstands wurden mit den nach der Blasius-Gleichung errechneten Werten verglichen. Die Versuchs- und Rechenwerte stimmen mit einer Fehlergröße von 3% im gesamten untersuchten Bereich der Massengeschwindigkeiten überein.

In Abb. 1 sind die in den Versuchen ermittelten Abhängigkeiten  $\xi/\xi_0$  als Funktionen der Wärmestromdichten bei verschiedenen Werten der Wassertemperatur am Eintritt  $t_{ein}$  und der Massengeschwindigkeit dargestellt;  $\xi = 2 \Delta p \rho' [(l/d)/(\rho w)^2]$ ;  $\xi_0$  Reibungszahl bei isothermer Wasserströmung (bei  $t_{ein}$ ). Die Zahlen bei den Punkten geben den Wert der Unterkühlung  $\Delta t_u$  zur Sättigungstemperatur  $t_s$  an. In den Wert  $\xi$ , berechnet anhand der Meßdaten, geht natürlich auch die Beschleunigungskomponente der Strömung ein. Angesichts des starken Nichtgleichgewichtes beim Sieden des unterkühlten Wassers ist es nicht möglich diese mit akzeptabler Genauigkeit zu berechnen. Deshalb wurde der Versuch unternommen, den volumetrischen Dampfgehalt  $\phi$  experimentell zu bestimmen (die Meßergebnisse sind weiter unten angegeben) und damit den Bereich herauszulösen, wo der Beitrag der Beschleunigungskomponente beträchtlich ist.

Schauen wir uns Abb. 1 an, dann erkennen wir, daß die Länge des horizontalen Abschnitts der Kurve  $\xi/\xi_0 = f(q)$  sowohl von der Massengeschwindigkeit als auch von der Unterkühlung abhängt. Mit Zunahme der beiden Parameter vergrößert sich auch die Länge des horizontalen Abschnitts. Eine 30%ige Steigerung des entsprechenden Wertes  $\xi/\xi_0$  auf dem horizontalen Plateau bei  $\rho w = 5000$  kg/(m<sup>2</sup>·s) stellt man nach Erreichen von  $q/q_{kr} = 0,35-0,45$  fest; bei  $\rho w = 10^4$  kg/(m<sup>2</sup>·s) bei Erreichen von  $q/q_{kr} = 0,4-0,5$ ; und bei  $\rho w = 1,9 \cdot 10^4$  kg/(m<sup>2</sup>·s) im Bereich  $q/q_{kr} = 0,5-0,6$ , wobei  $q_{kr}$  die kritische Wärmestromdichte bezeichnet, errechnet nach der Gleichung

$$q_{kr} = 6,5 \cdot 10^6 + 1,65 \cdot 10^4 (\rho w / 1000) \Delta t_u. \quad (2)$$

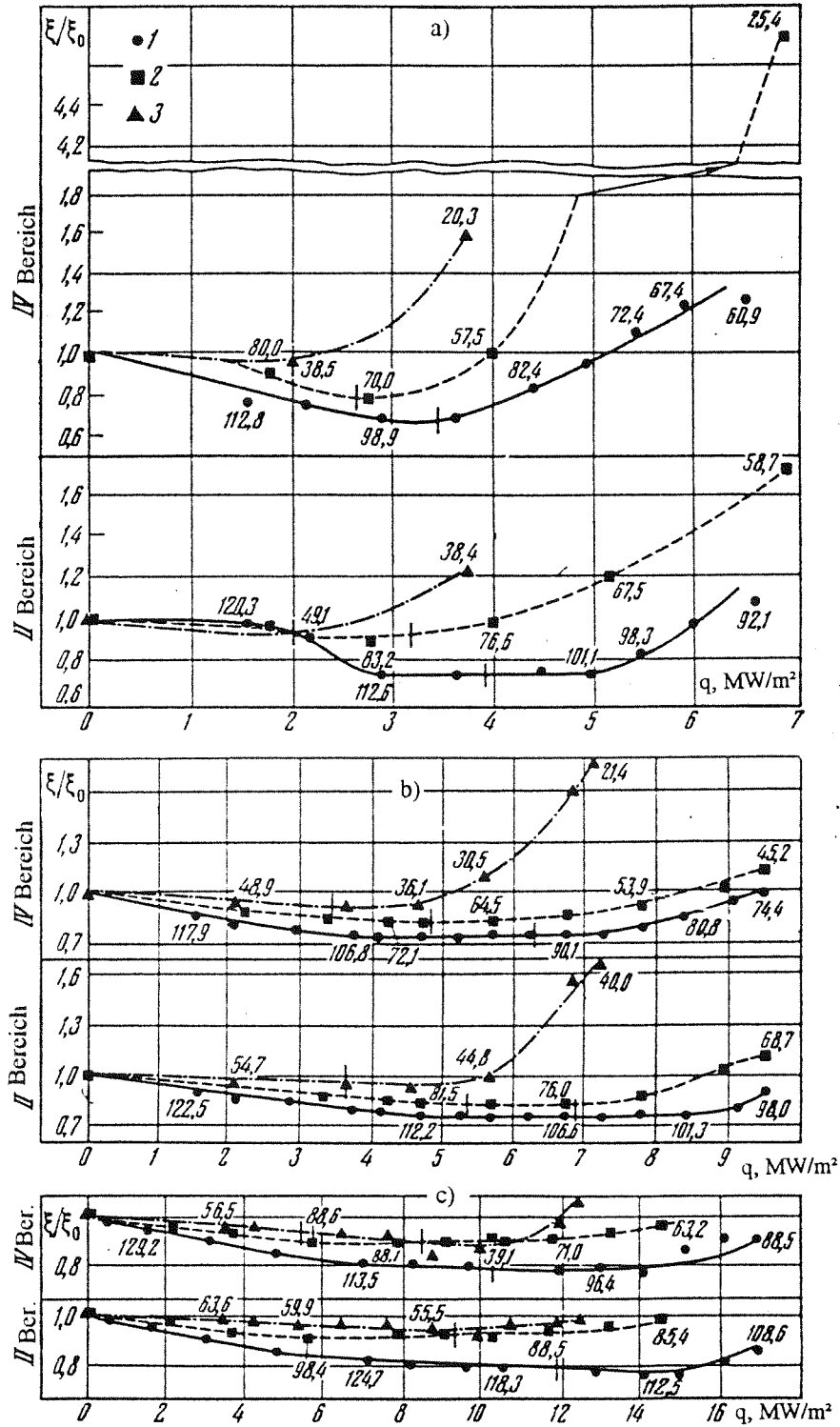


Abb.1.: Relativer hydraulischer Widerstandskoeffizient:

$p=1 \text{ MPa}$ ; 1)  $t_{\text{ein}}=50^\circ\text{C}$ ; 2)  $t_{\text{ein}}=80^\circ\text{C}$ ; 3)  $t_{\text{ein}}=120^\circ\text{C}$ ; a)  $\rho_w = 5 \cdot 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;

b)  $\rho_w = 10^4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; c)  $\rho_w = 18,8 \cdot 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Diese beschreibt die Versuchsdaten, die unter Bedingungen ähnlich dem Versuch in [6] ermittelt wurden. In Gleichung (2) ist  $q_{kr}$  in  $W/m^2$ ,  $\rho w$  in  $kg/(m^2 \cdot s)$  und  $\Delta t_u$  in  $^\circ C$ . Die Tendenz zur Verlängerung der horizontalen Fläche mit zunehmender Massengeschwindigkeit wird auch durch die Angaben in [7] bestätigt. In diesen Versuchen bei sehr großen Massengeschwindigkeiten der Strömung, bis  $6,5 \cdot 10^4 kg/(m^2 \cdot s)$  lag der hydraulische Widerstandskoeffizient  $\xi/\xi_0$  nicht über einer Einheit exakt bis zu den Werten  $q/q_{kr}=1$ .

Die Vergleichsergebnisse zeigen, daß die Werte  $\xi$  in den untersuchten horizontalen Abschnitten der Kurve  $\xi/\xi_0=f(q)$  bei Werten von  $\rho w > 10^4 kg/(m^2 \cdot s)$  mit den nach der bekannten Lafay-Gleichung berechneten Werten [8] für eine turbulente nichtisotherme Strömung einer einphasigen Flüssigkeit übereinstimmen. Bei  $\rho w = 5 \cdot 10^3 kg/(m^2 \cdot s)$  lag die Differenz zwischen Meß- und Rechenwerten nicht über 5-10%. Dies beweist insbesondere, daß die beim Sieden einer unterkühlten Flüssigkeit entstehenden Blasen sehr klein sind, praktisch nicht in der Strömung mitgerissen werden und den Rohrquerschnitt nicht verstopfen. Deshalb ist der echte Dampfgehalt der Strömung in diesem Bereich praktisch bei Null, das Vorkommen einer sogenannten "Blasenrauhigkeit" in diesem Bereich führt nicht zu einer Zunahme des Reibungswiderstandes. Daß eine vorkommende "Blasenrauhigkeit" in diesem Bereich keinen Einfluß besitzt, wird auch in der Arbeit [9] betont.

Einige Bemerkungen über die relative Lage der Orte des Siedebeginns und des Anfangs der horizontalen Fläche mit unverändertem Wert  $\xi$ . Es wurde vermutet, daß das Sieden einer unterkühlten Flüssigkeit beginne, wenn die Wandtemperatur Sättigungstemperatur erreicht habe. Angesichts dessen daß die Wärmeleitfähigkeit von Messing mit einer großen Fehlergröße bekannt ist und die Temperaturgefälle in der Rohrwand bei  $100^\circ C$  lagen, war es nicht möglich den Ort des Siedebeginns experimentell festzustellen. Deshalb ermittelten wir ihn durch Berechnungen, der Wärmeübergangskoeffizient wurde dabei nach den bekannten Gleichungen für den konvektiven Wärmeübergang einer einphasigen Flüssigkeit unter Berücksichtigung des Einflusses einer variablen Viskosität ermittelt [10]. Die Orte des Siedebeginns sind in Abb.1 durch senkrechte Streifen dargestellt. Ersichtlich ist, daß der Beginn der horizontalen Fläche wesentlich weiter links davon liegt.

Bekanntlich nimmt die Geschwindigkeit der Viskositätsabnahme von Wasser mit zunehmender Temperatur ab. Deshalb wird in den horizontalen Abschnitten der Kurve (Abb.1) links von den Serifen bei Zunahme von  $q$  die Viskositätsabnahme des Wassers aufgrund zunehmender mittlerer Massentemperatur der Flüssigkeit kompensiert durch einen geringeren Wert für die Korrektur des nichtisothermen Zustandes. Somit hängt der Übergang zu einem fast konstanten Wert  $\xi/\xi_0$  nicht mit einer Veränderung der Strömungsstruktur zusammen, sondern gehört zum Bereich des konvektiven Wärmeübergangs einer einphasigen Flüssigkeit. Oben war bereits darauf hingewiesen worden, daß die Relation  $\xi/\xi_0$  auch nach dem Siedebeginn in einem bestimmten Bereich der Werte  $q$  konstant bleibt.

Die Auswertung der Meßergebnisse über die Druckgefälle in den im Heizbereich liegenden adiabatischen Abschnitten ergab, daß diese Gefälle monoton abklingen je nach Zunahme der Wärmestromdichte im Heizbereich. Anhand von Berechnungen wurde festgestellt, daß bei  $\rho_w = 5000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  in allen diesen Abschnitten - mit Ausnahme des ersten, der direkt hinter der ausgangsseitigen Stromschiene liegt - die besagte Veränderung des Widerstandes völlig der Veränderung der Viskosität mit mit der Wassertemperatur am Austritt aus dem Heizbereich entspricht (die Versuche erfolgten bei  $\rho_w = \text{const.}$ ). Das Druckgefälle im ersten adiabatischen Abschnitt war wesentlich geringer, was beweist, daß in ihm aufgrund von Kondensation der im Stromkern folgenden Dampfblasen eine Druckgewinnung stattfindet. Ein ähnliches Bild ergab sich nur noch bei Überschreitung der Wärmestromdichte, die dem Beginn der ansteigenden Abhängigkeit  $\xi/\xi_0 = f(q)$  auf der Ausgangsseite des beheizbaren Abschnitts entsprach (Abb.1). Somit wird die Zunahme von  $\xi$  im Siedebereich hauptsächlich durch die Bildung von Dampf im Stromkern hervorgerufen, d.h. durch eine Zunahme des volumetrischen Dampfgehaltes und infolgedessen durch eine Zunahme des dynamischen Drucks und durch die Auswirkung der Druckgefällekomponente auf die Strömungsbeschleunigung.

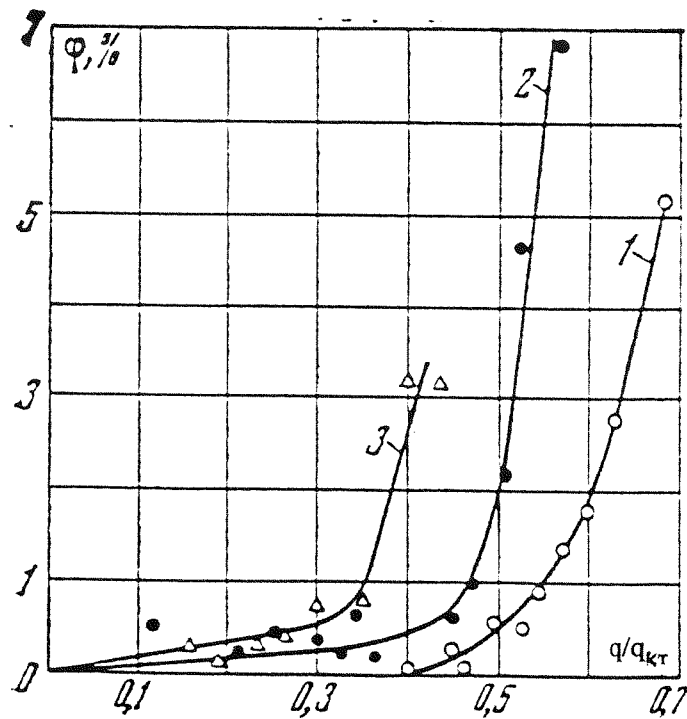


Abb.2: Volumetrischer Dampfgehalt am Austritt aus dem Heizbereich:

- 1)  $t_{ein} = 50^\circ\text{C}$ ; 2)  $t_{ein} = 80^\circ\text{C}$ ; 3)  $t_{ein} = 120^\circ\text{C}$ ;

In Abb.2 sind die Werte des volumetrischen Dampfgehaltes am Austritt aus dem Heizbereich angegeben. Sie werden nach den Meßergebnissen für den hydraulischen Widerstand mit der Gleichung (1) berechnet. Sie betragen einige Prozent, bei großen Werten von  $q$  kamen sie an 10% heran.

In [11] wurde zurecht besonders darauf hingewiesen, daß man bei der Berechnung des Druckgefälles die Komponente berücksichtigen müsse, die mit der Strömungsbeschleunigung zusammenhänge. Diese Komponente tritt jedoch nicht unmittelbar am Siedebeginn auf, sondern erst nach Erreichen eines gewissen Wertes  $q$ . Wie aus Abb.1 folgt, kann dabei die Differenz einige  $\text{MW/m}^2$  betragen.

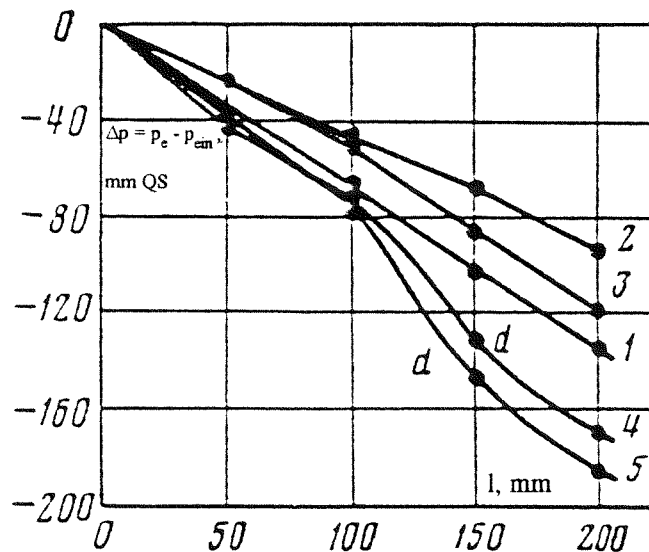


Abb.3: Veränderung des Drucks über die Meßstrecke

$p=2 \text{ MPa}$ ;  $t_{\text{ein}}=50^\circ\text{C}$ ;  $\rho_w = 5 \cdot 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

1)  $q/q_{\text{kr}}=0,0$ ; 2)  $q/q_{\text{kr}}=0,431$ ; 3)  $q/q_{\text{kr}}=0,613$ ; 4)  $q/q_{\text{kr}}=0,820$ ; 5)  $q/q_{\text{kr}}=0,924$

Abb.3 zeigt die in den Versuchen gemessene Druckveränderung über die Länge der Meßstrecke. An der Ordinate ist die Differenz der Drücke im untersuchten Querschnitt und am Eintritt in die Meßstrecke angegeben. Die Wärmestromdichte tritt als Parameter auf. Diese Daten sind deshalb interessant, weil bei ihnen die Wärmestromdichte bis  $q=q_{\text{kr}}$  geht. Der geringe Widerstand beim Übergang von Kurve 1 zu Kurve 2 ist dadurch bedingt, daß die Viskosität des Wassers aufgrund der höheren mittleren Massentemperatur der Flüssigkeit mit Zunahme von  $q$  abnimmt. Danach bekommt die Abhängigkeit  $\Delta p = f(l)$  eine Ausbauchung nach oben, was mit dem Siedebeginn zusammenhängt. Dabei fällt die Abhängigkeit ab, d.h. der Widerstand nimmt zu (Kurve 3). Bei Wärmeströmen nahe dem kritischen kommt es auf der Abhängigkeit  $\Delta p = f(l)$  zu einem Knick (die Punkte d auf den Kurven 4 und 5). Der linke Teil, der zu dem Bereich gehört, der recht weit von der kritischen Stelle entfernt ist (Austritt aus dem Kanal), bleibt nach oben ausgebaucht, während der rechte Teil eine Ausbauchung in entgegengesetzter Richtung bekommt. Somit ist die Ableitung  $\Delta p/\Delta l$  in den Abschnitten, die vor dem kritischen Querschnitt liegen, wesentlich geringer als in den Abschnitten, die recht weit von diesem Querschnitt entfernt sind. Dies beweist, daß der Impulsaustausch zwischen dem Kern und dem wandseitigen Bereich je nach Annäherung an den kritischen Zustand schwächer wird. Bislang wurde diese Tatsache in den Kurven  $\Delta p/\Delta l = f(q)$  anderer Wissenschaftler nicht gewürdigt.



Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen konnte folgendes festgestellt werden:

Der Übergang der Kurve  $\xi/\xi_0=f(q)$  in eine Horizontale entspricht nicht dem Beginn des unterkühlten Siedens, sondern liegt im Bereich des konvektiven Wärmeübergangs mit starkem Einfluß variabler Viskosität im Rohrquerschnitt.

In einem bestimmten Bereich der Wärmeströme ist der Widerstandskoeffizient beim unterkühlten Sieden gleich dem Widerstandskoeffizient bei der Strömung einer einphasigen Flüssigkeit unter Berücksichtigung der nichtisothermen Strömung. Der echte volumetrische Dampfgehalt der Strömung in diesem Bereich liegt bei Null, der Einfluß der "Blasenrauigkeit" ist unwesentlich. Mit zunehmender Massengeschwindigkeit und Unterkühlung wird die Länge der horizontalen Fläche größer.

Die Zunahme des hydraulischen Widerstandes je nach Erreichen eines bestimmten Wertes der Wärmestromdichte hängt mit der Bildung von Dampf im Stromkern zusammen. Bei den Berechnungen des hydraulischen Widerstandes muß man ab diesem Moment die Druckabfallkomponente auf die Strömungsbeschleunigung berücksichtigen.

In den vor dem kritischen Querschnitt liegenden Abschnitten nimmt der hydraulische Widerstand ab, was offensichtlich damit zusammenhängt, daß der Stoffaustausch zwischen dem Strömungskern und dem wandseitigen Bereich schlechter wird.

Institut für Hochtemperaturen  
der Akademie der Wissenschaften  
der UdSSR

Redaktionseingang 25.12.1981

## L i t e r a t u r

1. *Полежавкин П. Г.* Теплоэнергетика, 1959, № 12, с. 15.  
*Полежавкин, P.G.:* Gidravličeskoe soprotivlenie pri poverchnostnom kîpenii vody.  
In: *Teploénergetika*. Moskva, 1959, Nr 12, S. 13 - 18.  
/Hydraulischer Widerstand beim Oberflächensieden von Wasser; russ./
2. *Орнатский А. П., Кицигин А. М.* Теплоэнергетика, 1961, № 8, с. 56.  
*Ornatskij, A.P.; Kičigin, A.M.:* Issledovanie gidravličeskogo soprotivlenija pri tečenii nedogretoj vody v trubke malogo diametra i dol'sich teplovych potokach.  
In: *Teploénergetika*. Moskva, 1961, Nr 8, S. 56 - 60.  
/Untersuchung des hydraulischen Widerstands bei der Strömung von unterkühltem Wasser in einem Rohr mit geringem Durchmesser und hohen Wärmestromdichten; russ./

3. *Орнатский А. П., Глущенко Л. Ф.* Теплоэнергетика, 1966, № 4, с. 63.  
Ornatskij, A.P.; Gluščenko, L.F.: Gidravličeskoe soprotivlenie pri poverchnostnom kipeanii v uslovijach vynuždenogo dviženija židkosti.  
 In: Teploénergetika. Moskva, 1966, Nr 4, S. 63 - 66.  
 Engl.: Hydraulic resistance with surface boiling of liquid under forced circulation conditions.  
 In: Thermal engineering. New York, 13 (1966), Nr 4, S. 82 - 86.
  
4. *Орнатский А. П.* ПМТФ, 1965, № 3, с. 113.  
Ornatskij, A.P.: Obobščenie opytnych dannych po gidravličeskomu soprotivleniju pri poverchnostnom kipeanii.  
 In: Žurnal prikladnoj mekhaniki i tehničeskoj fiziki. Moskva, 1965, Nr 3, S. 113 - 116.  
 Engl.: Generalization of experimental data on flow friction in surface boiling.  
 In: Journal of applied mechanics and technical physics. New York, 1965, Nr 3, S. 80 - 82.
  
5. *Орнатский А. П., Глущенко Л. Ф., Чернобай В. А.* ТВТ, 1964, т. 2, № 6, с. 910.  
Ornatskij, A.P.; Gluščenko, L.F.; Černobaj, V.A.: o vlijanii davlenija na gidravličeskoe soprotivlenie pri poverchnostnom kipeanii.  
 In: Teplofizika vysokich temperatur. Moskva, 2 (1964), Nr 6, S. 910 - 914.  
 Engl.: On the effect of pressure on head losses during surface boiling.  
 In: High temperature. New York, 2 (1964), Nr 6, S. 821 - 824.
  
6. *Зейгарник Ю. А., Климов А. П., Привалов Н. П.* Теплоэнергетика, 1981, № 1, с. 48.  
Zejgarnik, Ju.A.; Privalov, N.P.; Klimov, A.I.: Kritičeskie teplovye potoki pri kipeanii nedogretoj vody v prjamougol'nyh kanalach s odnostoronnim podvodom tepla.  
 In: Teploénergetika. Moskva, 1981, Nr 1, S. 48 - 51.  
 Engl.: Critical heat flux with boiling of subcooled water in rectangular channels with one-sided supply of heat.  
 In: Thermal engineering. New York, 28 (1981), Nr 1, S. 43.
  
7. *Адамовский В. П., Кутателадзе С. С., Штоколов Л. С.* ПМТФ, 1967, № 3, с. 140.  
Adamovskij, V.P.; Kutateladze, S.S.; Štokolov, L.S.: Gidravličeskoe soprotivlenie pri kipeanii étilovogo spirta, ne dogretogo do temperatury nasyščeniija, v oblasti bol'šich skorostej tečenija.  
 In: Žurnal prikladnoj mekhaniki i tehničeskoj fiziki. Moskva, 1967, Nr 3, S. 140 - 143.  
 Engl.: Hydraulic resistance at high flow speeds in the boiling of ethanol below the saturation temperature.  
 In: Journal of applied mechanics and technical physics. New York, 1967, Nr 3, S. 98 - 99.
  
8. Lafay, J.: Influence de la variation de la viscosite avec le temperature sur le frottement avec transfert de chaleur en regime turbulent etabli.  
 In: Internation journal of heat and mass transfer. Oxford, 17 (1974), Nr 8, S. 815 - 834.

9. Saha, P.; Zuber, N.V.: Point of net vapor generation and vapor void fraction in subcooled boiling.  
In: Heat transfer 1974. Proceedings of the fifth International heat transfer conference. Tokyo, 4 (1974), S. 175 - 179.
10. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1974. 408 с.  
Petuchov, Boris/ Sergeevič/; Genin, L.G.; Kovalev, S.A.  
Teploobmen v jadernych énergetičeskich ustanovkach.  
Moskva: Atomizdat, 1974, 408 S.  
/Wärmeübergang in Kernkraftwerken; russ./
11. Чернобай В. А. В кн.: Теплофизика и теплотехника. Киев: Наукова думка, 1979, вып. 37, с. 80.  
Černobaj, V.A.: O račete gidravličeskogo soprotivlenija v kanalach pri kipenii nedogretoj židkosti.  
In: Teplofizika i teplotechnika. Kiev, 37 (1979), S. 80 - 84.  
/Zur Berechnung des hydraulischen Widerstands in Kanälen beim Sieden einer unterkühlten Flüssigkeit; russ./

Stuttgart, den 16. Juni 1993

übersetzt von

*Ottmar Pertschi*

(Ottmar Pertschi)  
Dipl.-Übersetzer