

Tarasova, N. V. (Kand. d. techn. Wiss.); Orlov, V. M. (Ing.)

UNTERSUCHUNG DES HYDRAULISCHEN WIDERSTANDS BEIM UNTERKÜHLTEN
SIEDEN VON WASSER IN EINEM ROHR

Deutsche Vollübersetzung aus:

Теплоэнергетика. Москва, 1962, Nr. 6, S. 48 - 52.

Russ.: ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ КИПЕНИИ ВОДЫ В ТРУБЕ
Issledovanie gidravličeskogo soprotivlenija
pri poverchnostnom kipenii vody v trube

Es werden die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung über den hydraulischen Widerstand beim unterkühlten Sieden von Wasser in Rohren vorgestellt. Ermittelt wurden zahlenmäßige Abhängigkeiten zur Bestimmung des hydraulischen Widerstandes und des Beginns des unterkühlten Siedens.

Beim Kühlen einer extrem hoch belasteten Heizfläche mit vorbeiströmendem Wasser kann die Wandtemperatur über der Sättigungstemperatur liegen, obwohl die Flüssigkeit im Mittel noch keine Siedetemperatur erreicht hat. Unter diesen Bedingungen kommt es zum sogenannten unterkühlten Sieden, bei dem sich auf der Heizfläche Dampfblasen bilden, die in den noch nicht auf Sättigungstemperatur erhitzten Kernbereich der Strömung gelangen und darin vollständig kondensieren. Die Bildung und Kondensation der Dampfblasen an der Heizfläche erzeugt eine zusätzliche Turbulenz der Flüssigkeitsströmung, die deshalb einen wesentlichen Einfluß auf die Strömungseigenschaften und insbesondere auf ihren hydraulischen Widerstand hat.

In der Literatur findet man einige Angaben zum hydraulischen Widerstand beim unterkühlten Sieden. In /1, 2/ wurde aufgezeigt, daß je nach Zunahme der Wärmestromdichte bei sonst konstanten Bedingungen der Druckabfall im Rohr zunimmt, beginnend mit dem Auftreten des unterkühlten Siedens, wobei diese Zunahme mit fallendem Druck größer wird.

In /3/ wurde der hydraulische Widerstand beim unterkühlten Sieden untersucht und eine empirische Gleichung zur Berechnung des Druckverlustes ermittelt. Der Rohrquerschnitt, in dem das Sieden beginnt, wurde vom Verfasser anhand der Ergebnisse in anderen Arbeiten und insbesondere der von uns ermittelten Angaben über ein Rohr mit 5,77 mm Durchmesser, berechnet.

Die Verfasser der Arbeit /4/ führten Versuche zum hydraulischen Widerstand beim unterkühlten Sieden in einem Rohr mit kleinem Durchmesser bei großen Wärmestromdichten durch. In dieser Arbeit sind keine Messungen enthalten, mit denen man den Querschnitt bestimmen könnte, bei dem das unterkühlte Sieden beginnt.

In Abb. 1 ist die Versuchsanlage schematisch dargestellt. Dampf mit den überkritischen Parametern $p = 300 \text{ at}$, $t = 650 \text{ °C}$ gelangt durch ein System von Drosselventilen 1, die den Druck regulieren, in die Anlage. Mit dem System der Kühler 2, 3 kann man den Dampf kondensieren und gleichmäßig die Temperatur des untersuchten Wasserstroms in einem großen Bereich variieren.

Die Versuchsstrecke ist ein Rohr, das horizontal oder vertikal angebracht ist. Die Grunddaten des Rohres sind in der Tabelle enthalten.

Der Innendurchmesser der Rohre wurde gemessen, indem sie mit Wasser oder Quecksilber mit bis zu 0,2 % Genauigkeit gefüllt wurden. Die Innenfläche wurde sorgfältig geschliffen.

Das Rohr wurde mit Gleichstrom erwärmt, der durch Klemmkontakte zwischen den Druckentnahmestellen angeschlossen wurde. Der abgegebene Wärmestrom wurde durch Messungen der Stromstärke im Stromkreislauf und des Spannungsabfalls am Rohr mit bis zu 1 % Genauigkeit bestimmt. Die Differenz zwischen den gemessenen Werten der in die Wand abgegebenen und vom Wasser aufgenommenen Wärmemenge betrug maximal 3 %. Zur elektrischen Isolation der Meßstrecke und der Verbindungsleitungen zum Differenzdruckmesser wurde auf die Flansche eine Isolationsschicht 5 angebracht.

Rohr- stellung	Rohr- innen- durchmesser d mm	Abschnitt hydro- dynam. Stabilität mm	Abstand zwischen Druck- entnahmen l_T mm	beheizte Rohr länge l_{hz} mm	Abstand zwischen den Thermo- elementen in der Wand mm	Anzahl der Thermo- elemente
vertikal	5,77	359	578	508	100	5
vertikal und horizontal	6,34	350	580	525	50	9
horizontal	2,89	220	300	256	40	5

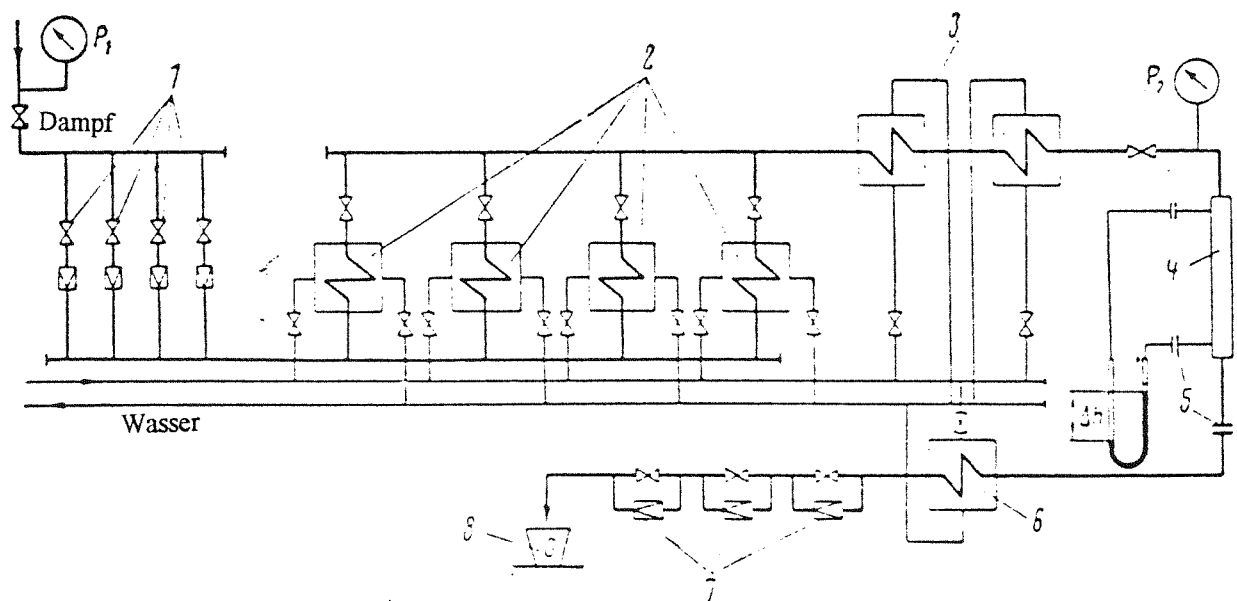


Abb. 1: Schematische Darstellung der Versuchsanlage

Um Wärmeverluste der Versuchsanlage auszuschließen, wurde mit Asbest isoliert. Über der Isolation wurde eine Schutz-Heizung angebracht. Die Heizleistung wurde so reguliert, daß die Anzeigen der Differential-Thermoelemente in der Isolationsschicht bei Null lagen.

Hinter der Meßstrecke wurde das Wasser im Kühler 6 abgekühlt und durch die Drosselstelle 7 ins Meßgefäß 8 geleitet.

Der Druck vor der Meßstrecke wurde mit einem Manometer der Klasse 0,35 für 400 at gemessen. Der Druckabfall in der Meßstrecke wurde mit dem Differential-Manometer DT-150, gefüllt mit Quecksilber oder Bromoform, gemessen.

Die Temperatur der Rohraußenfläche wurde mit Chromel-Alumel-Thermoelementen gemessen. Diese wurden mit Glimmer (Lage siehe Tabelle) von den Rohrwänden elektrisch isoliert. Die Wassertemperatur beim Ein- und Austritt der Meßstrecke wurde mit Chromel-Alumel-Thermoelementen gemessen, die sich in Nirosta-Hülsen befanden. Die EMK der Thermoelemente wurde mit dem Potentiometer PPTV gemessen. Damit die gemessene Temperatur am Rohraustritt der durchschnittlichen kalorimetrischen Temperatur entsprach, wurde vor der Hülse am Rohraustritt ein Strömungsmischer in Form eines Düsensatzes und zylindrischer Abschnitte angebracht. Der Wasserdurchsatz wurde durch Wiegen mit bis zu 1 % Genauigkeit bestimmt.

In den Versuchen wurde der Druck p von 50 bis 200 ata variiert, die Massenstromdichte γw von 1.300 bis 5.000 $\text{kp/m}^2\cdot\text{s}$, die Wärmestromdichte q von $0,5\cdot 10^6$ bis $1,5\cdot 10^6$ $\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}$.

Die Aufzeichnung der Meßwerte erfolgte bei stationärem Betrieb, wenn sich die Anzeigen aller Geräte zeitlich nicht mehr veränderten. Die Dauer eines jeden Betriebs betrug ca. 20 Min.

Die Versuchsdurchführung erfolgte in Serien, jede bestehend aus 10 - 12 Versuchen mit den Konstanten p , γw und q . In den Versuchen der einen Serie mit Veränderung der Wassertemperatur am Eintritt in die Meßstrecke wurden Verläufe ohne Sieden und solche mit unterschiedlich langem Bereich des unterkühlten Siedens erzielt. Die Serie schloß mit einem Verlauf, bei dem die durchschnittliche kalorimetrische Temperatur des Wassers beim Austritt aus dem Rohr gleich der Sättigungstemperatur war. Von Serie zu Serie wurden einmal Druck oder Wasserdurchsatz oder Wärmestromdichte verändert. Insgesamt wurde 270 Versuche durchgeführt, davon 54 mit Erwärmung ohne unterkühltes Sieden und 216 Versuche mit unterkühltem Sieden.

Vor einer jeden Serie wurden Eichversuche ohne Erwärmung durchgeführt. Die bei diesen Versuchen errechneten Werte des hydraulischen Widerstandskoeffizienten ξ_0 nach der Formel

$$\xi_0 = \frac{\Delta p_0}{\gamma w^2} \cdot \frac{2gd}{l} \quad (1)$$

stimmen mit bis zu ± 3 % Genauigkeit mit den Blasius-Nikuradze-Abhängigkeiten für eine isotherme Strömung in glatten Rohren überein. Der Druckabfall Δp_0 wurde bei vertikalem Rohr als Summe von Δp_1 (am Differenzdruckmanometer gemessener Druckabfall) und Δp_2 (durch die Differenz der Wasserdichten im Versuchsrohr und in den Verbindungsleitungen mit dem Differenzdruckmanometer bedingten Druckabfalls) errechnet. Beim horizontalen Rohr ist $\Delta p_0 = \Delta p_1$.

Bei der Berechnung der Werte des hydraulischen Widerstandskoeffizienten ξ_{hz} für Versuche mit Erwärmung sowohl beim unterkühlten Sieden als auch ohne wurde vom Gesamtdruckverlust Δp_0

der Druckverlust in den nichtbeheizten Rohrabschnitten $\Delta p'$ abgezogen. Letzteres wurde nach Gleichung (1) berechnet und betrug ca. 5 % vom Gesamtdruckverlust.

Die Größe ξ_{hz} in den Versuchen ohne unterkühltes Sieden hat etwas geringere Werte als bei isothermer Strömung. Die Werte stimmen innerhalb $\pm 3 \%$ gut mit den Abhängigkeiten in /5/ für die Strömung von Wasser in erwärmten Rohren überein.

$$\xi_{\text{hz}} = \xi_0 \left(\frac{\mu_{\text{wand}}}{\mu_{\text{Strö}}} \right)^{0,14} \quad (2)$$

wobei μ_{wand} und $\mu_{\text{Strö}}$ die Viskosität des Wassers bei auf die Rohrlänge bezogener durchschnittlicher Temperatur der Wand und der Flüssigkeitsströmung bezeichnen.

Die Werte ξ_{hz} in den Versuchen mit unterkühltem Sieden sind höher als bei isothermer Strömung, wobei diese Differenz mit abnehmender Unterkühlung des Wassers bis auf Sättigungstemperatur zunimmt.

Die Erscheinung des unterkühlten Siedens in einem Rohr könnte man nach der Veränderung der Wandtemperatur des Rohres in seiner Länge beurteilen. Wie bereits erwähnt, wurde die Wandtemperatur an ihrer Außenseite gemessen. Um die Temperaturwerte der Rohrinnenfläche zu erhalten, muß der gemessene Wert um das Temperaturgefälle in der Wand korrigiert werden. Diese Korrektur wurde nach einer Gleichung berechnet, die innere Wärmequellen berücksichtigt /6/.

Davon ausgehend, daß die Wandtemperatur in unseren Versuchen über die Länge nicht wesentlich variierte (bis 20 °C) und daß der elektrische Widerstand von nichtrostendem Stahl kaum temperaturabhängig ist, darf man annehmen, daß die Wärmestromdichte bezogen auf die Rohrlänge konstant ist. Infolgedessen wurde angenommen, daß sich die durchschnittliche kalorimetrische Wassertemperatur über die Rohrlänge linear verändert. Nach den auf diese Weise ermittelten Temperaturwerten der Rohrinnenfläche t_{wand} und der Wasserströmung $t_{\text{strö}}$ wurden die Graphiken ihrer Veränderung über die Rohrlänge konstruiert, wovon eine in Abb. 2 dargestellt ist.

Es wurde angenommen, das unterkühlte Sieden trete in dem Querschnitt ein, in dem die Wandtemperatur konstant zu bleiben beginnt. Die durchschnittliche kalorimetrische Temperatur der Wasserströmung in diesem Querschnitt, genannt Temperatur des Siedebeginns $t_{\text{anf.S}}$ wurde in den Versuchen unmittelbar aus der Graphik bestimmt (Abb. 2). Ebenso wurden die Längen der Rohrabschnitte ohne Sieden $l_{\text{o.S.}}$ und mit unterkühltem Sieden l_{siede} bestimmt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse über die Entstehung des unterkühlten Siedens zeigte, daß $t_{\text{anf.S}}$ abhängig ist von Druck, Wärmestromdichte, Massenstromdichte der Strömung und Rohrdurchmesser, aber nicht von der Wassertemperatur am Rohreintritt.

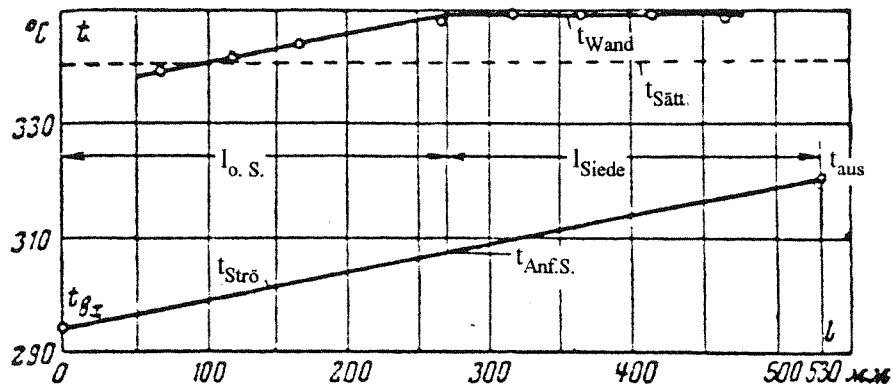


Abb. 2: Temperaturveränderung der Wand und der Wasserströmung über die Rohrlänge bei Versuchen mit $p = 150 \text{ at}$, $\gamma_w = 2.435 \text{ kp/m}^2 \cdot \text{s}$, $q = 913.000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$

Anhand dieser Auswertung wurde eine empirische Abhängigkeit zur Bestimmung der Temperatur bei Beginn des unterkühlten Siedens ermittelt:

$$\Delta i_{\text{Anf.S.}} = 135 \frac{q^{1.1} d^{0.2}}{(\gamma_w)^{0.9}} \cdot \left(\frac{\gamma''}{\gamma'} \right)^{0.3} \quad (3)$$

wobei $\Delta i_{\text{Anf.S.}} = i' - i_{\text{Anf.S.}}$ Differenz zwischen der Enthalpie des Wassers bei Sättigungstemperatur und der Temperatur bei Beginn des unterkühlten Siedens, kcal/kp;

q Wärmestromdichte kcal/m²·h;

γ_w Massenstromdichte, kp/m²·h;

d Rohrinne Durchmesser, m;

γ' und γ'' Spezifische Gewichte von Wasser und Dampf auf der Sättigungslinie, kp/m³.

In Abb. 3 sind die mittlere Abhängigkeit (3) und die Lage der Versuchspunkte dargestellt, deren Streuung innerhalb $\pm 15 \%$ liegt. In dieser Abbildung sind auch die Versuchsangaben aus der Arbeit /1/ enthalten. Der Vergleich zeigt, daß die bei 35 und 140 ata Druck, bei bis zu $1 \cdot 10^7 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ Wärmestromdichte und bei bis zu $11\,000 \text{ kp/m}^2 \cdot \text{h}$ Massenstromdichte ermittelten Angaben ebenfalls mit unserer Abhängigkeit (3) innerhalb $\pm 15 \%$ übereinstimmen.

Die in /3/ vorgestellten Abhängigkeit zur Berechnung der Anfangstemperatur des unterkühlten Siedens wurde anhand von Versuchen /1/ in einem Rohr mit 6,35 mm Durchmesser und anhand der von den Verfassern durchgeführten Versuche mit einem Rohr von 5,77 mm Durchmesser ermittelt. Die von den Verfassern an einem Rohr mit 2,89 mm ermittelten Versuchsergebnisse liegen durchschnittlich 20 % niedriger als nach der Abhängigkeit aus /1/.

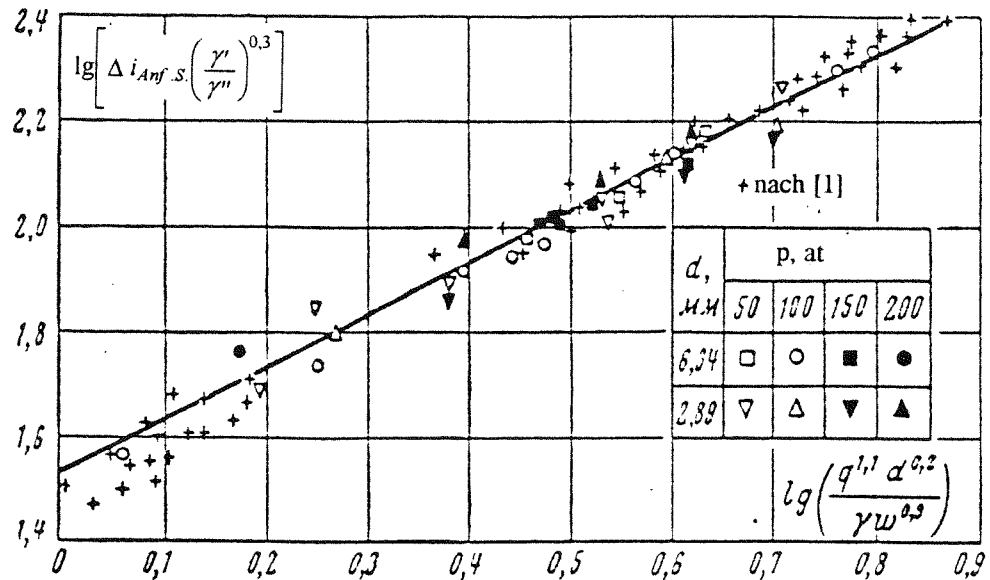


Abb. 3: Vergleich der Versuchsdaten über die Bedingungen des unterkühlten Siedens mit der Abhängigkeit (3).

Die Untersuchungen über den Mechanismus des unterkühlten Siedens [7] zeigten, daß mit geringerer Unterkühlung unter sonst gleichen Bedingungen die Anzahl der Keimstellen und der maximalen Blasendurchmesser größer werden. Folglich ist die Intensität des Vorgangs instabil und nimmt über die Rohrlänge zu.

Beim Experiment mit unterkühltem Sieden wurde der Mittelwert des hydraulischen Widerstandes im Abschnitt vom Siedebeginn bis zum Rohraustritt bestimmt. Auf folgende Weise wurde dabei der Druckverlust in diesem Abschnitt bestimmt.

In jeder Versuchsreihe stieg je nach Zunahme der Wassertemperatur beim Eintritt die Temperatur beim Rohraustritt t_{aus} und auch die Länge des Siedeabschnitts. Dabei wurden drei Fälle unterschieden:

1. Die Temperatur beim Rohreintritt ist geringer als die Temperatur zu Beginn des unterkühlten Siedens $t_{\text{ein}} < t_{\text{Anf.S.}}$. In diesem Fall wurde der Druckabfall im Siedeabschnitt vom Siedebeginn bis zum Rohraustritt Δp_{Siede} bestimmt als Differenz zwischen dem Druckabfall auf der gesamten beheizten Rohrlänge Δp_{heiz} und dem im Abschnitt ohne Sieden $\Delta p_{\text{o.s.}}$. Letzteres wurde nach Gleichung

$$\Delta p = \xi_{\text{o.s.}} \frac{\gamma w^2}{2g} \cdot \frac{l_{\text{o.s.}}}{d} \quad (4)$$

berechnet, wobei $\xi_{\text{o.s.}}$ hydraulischer Widerstandswert im beheizten Rohr ist, bestimmt nach Gleichung (2).

Die physikalischen Parameter γ und μ in Gleichung (4) beziehen sich auf die über die Rohrlänge durchschnittlich Temperatur im jeweiligen Rohrabschnitt.

2. Die Temperatur am Eintritt ist gleich der Anfangstemperatur des unterkühlten Siedens. In diesem Fall ist der Druckabfall Δp_{Siede} gleich dem gemessenen in der gesamten beheizten Rohrlänge Δp_{heiz} .

3. Die Temperatur am Rohreintritt ist größer als die Anfangstemperatur des unterkühlten Siedens. In diesem Fall lag der Siedebeginn vor dem Rohreintritt im Abstand l_{heiz} . Der Druckabfall Δp_{Siede} wurde bestimmt als Summe des Meßwertes in der beheizten Rohrlänge Δp_{heiz} und Δp , ermittelt nach der experimentellen Abhängigkeit $\Delta p_{\text{Siede}} = f(t_{\text{aus}})$ derselben Versuchsreihe und nach der Temperatur beim Rohreintritt in die Meßstrecke.

Nach den so ermittelten Werten Δp_{Siede} wurden seine Meßgraphiken aufgestellt in Abhängigkeit von t_{aus} bei den konstanten q und γw . In Abb. 4 sind derartige Graphiken dargestellt für ein Rohr mit $d = 6,34$ mm. Der Druckabfall Δp_{Siede} hat bei t_{aus} ein Maximum (t_{aus} entspricht der Sättigungstemperatur, die in Abb. 4 für einen jeden Druck als gestrichelte Linie dargestellt ist). Mit sinkender t_{aus} nimmt Δp_{Siede} ab und wird gleich Null bei $t_{\text{aus}} = t_{\text{Anf.S.}}$.

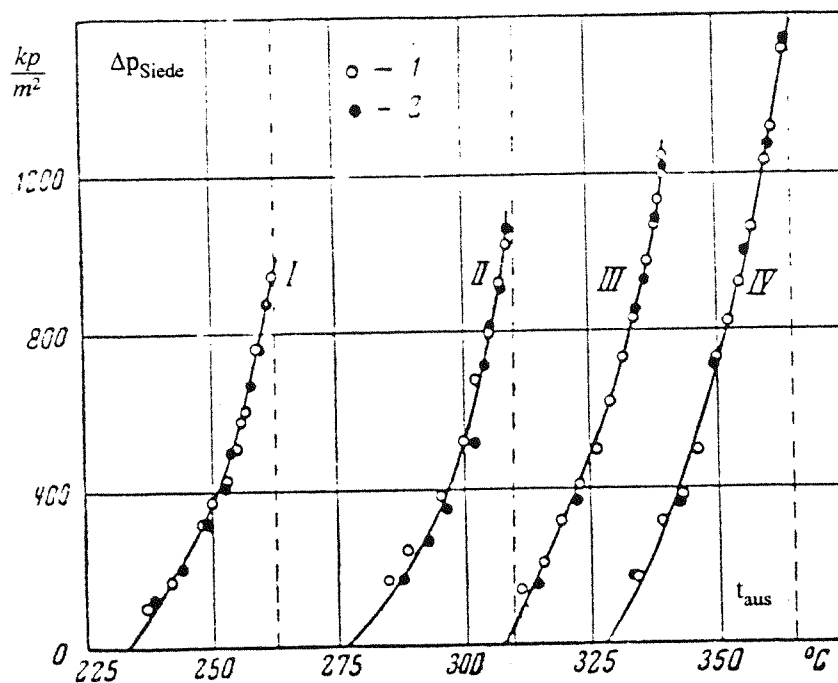


Abb. 4: Abhängigkeit des Druckabfalles im Rohrabschnitt vom Beginn des unterkühlten Siedens bis zum Rohraustritt von t_{aus} :

1) waagrechttes Rohr, 2) senkrechttes Rohr

I) $p = 50$ at, II) $p = 100$ at, III) $p = 150$ at, IV) $p = 200$ at

Das Druckgefälle Δp_{Siede} wird je nach Zunahme von t_{aus} deshalb größer, weil die Länge des Rohrabschnitts vom Beginn des unterkühlten Siedens bis zum Rohraustritt größer wird und weil die Intensität des Blasensiedens stärker wird. Letzteres ist auch der Grund dafür, daß diese Zunahme nichtlinear verläuft. Deshalb ist eine Bestimmung des durchschnittlichen Widerstandswertes nach dem an einem Versuchsrohr gemessenen Druckabfall, wie in /3, 4/ vorgenommen, ungenau, weil ein und demselben Durchschnittswert Δt_u aufgrund der nichtlinearen Abhängigkeit des Druckabfalles von der Unterkühlung Δt_u verschiedene Werte des durchschnittlichen Widerstands bei unterschiedlicher Länge des Versuchsrohres entsprechen.

Die Mittelwerte des hydraulischen Widerstands, bezogen auf die Länge vom Siedebeginn bis zum Rohraustritt, wurden von uns nach der Formel

$$\xi_{\text{Siede}} = \frac{\Delta p_{\text{Siede}}}{\gamma w^2} \cdot \frac{2gd}{l_{\text{Siede}}} \quad (5)$$

berechnet, in der das spezifische Gewicht von Wasser γ auf die über die Rohrlänge mittlere Temperatur in diesem Abschnitt bezogen ist.

Die Versuche ergaben ebenfalls, daß die Orientierung des Rohrs beim unterkühlten Sieden innerhalb der untersuchten Parameter keinen Einfluß auf den hydraulischen Widerstand hat (Abb. 4).

Nun befassen wir uns mit der relativen Zunahme des hydraulischen Widerstands beim unterkühlten Sieden ξ_{Siede} im Vergleich mit seinem Wert bei isothermer Strömung unter sonst gleichen Bedingungen.

Um aufzeigen zu können, welchen Einfluß die einzelnen Strömungskennwerte auf den hydraulischen Widerstand bei verschiedenen Unterkühlungen des Wassers haben, wurde von uns folgende dimensionslose Größe eingeführt, die die relative Unterkühlung des Wassers beim Rohraustritt repräsentiert:

$$\frac{\Delta i_{\text{aus}}}{\Delta i_{\text{Anf.S.}}} = \frac{i' - i_{\text{aus}}}{i' - i_{\text{Anf.S.}}}$$

Diese Größe ist gleich dem Verhältnis von Unterkühlung des Wassers beim Rohraustritt zur Unterkühlung des Wassers an der Stelle, wo das unterkühlte Sieden beginnt. Sie variiert von 0 bis 1 und bezeichnet die relative Intensität des unterkühlten Siedens beim Rohraustritt.

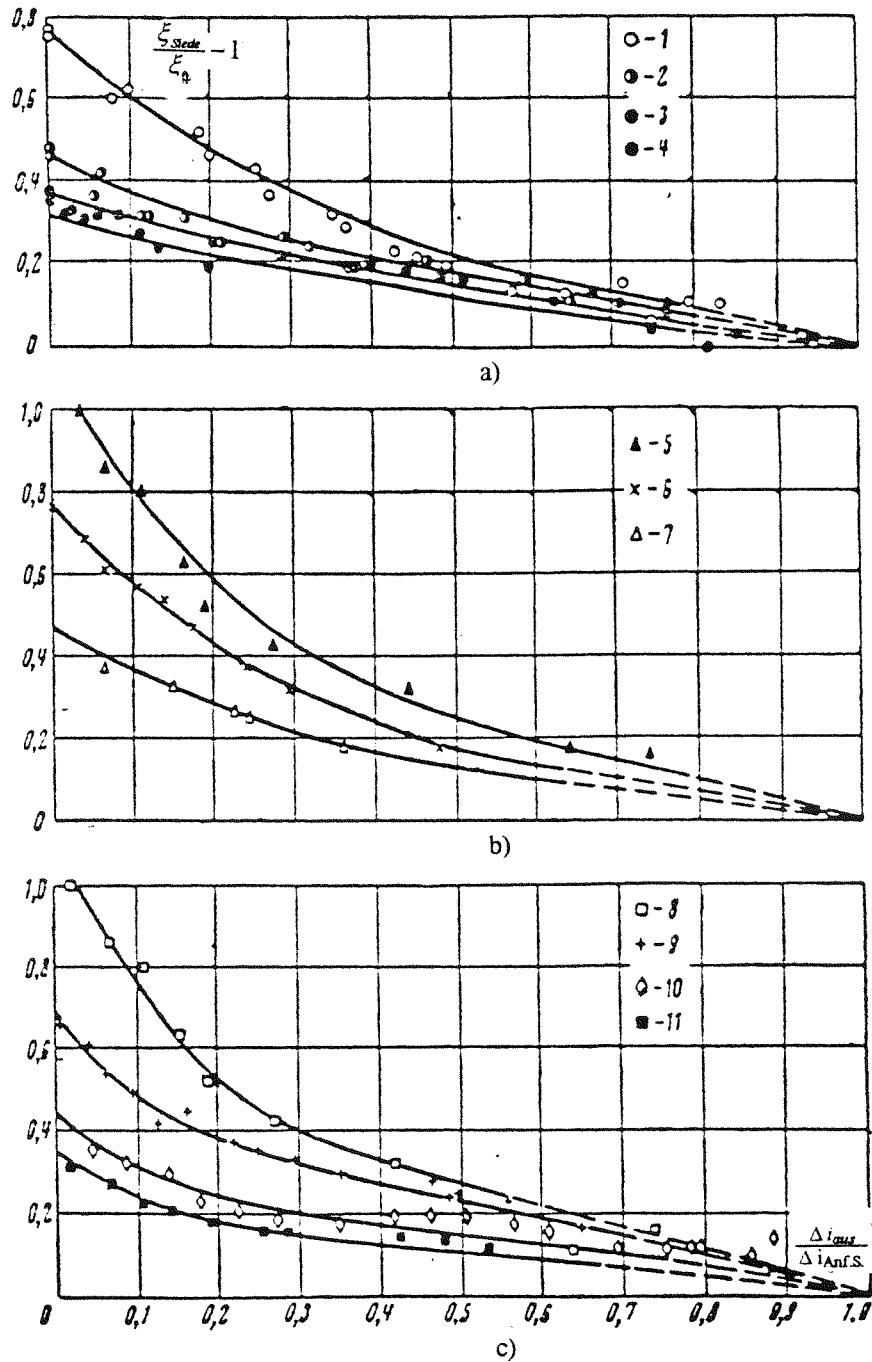


Abb. 5: Einfluß von Druck, Wärmestromdichte und Massenstromdichte auf die relative Zunahme des hydraulischen Widerstands beim unterkühlten Sieden:

a) $q = 1 \cdot 10^6 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$, $\gamma_w = 2.400 \text{ kp/m}^2 \text{ s}$;

b) $p = 100 \text{ at}$, $\gamma_w = 1300 \text{ kp/m}^2 \text{ s}$, c) $p = 100 \text{ at}$, $q = 1,5 \cdot 10^6 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$;

1) $p = 50 \text{ at}$; 2) $p = 100 \text{ at}$; 3) $p = 150 \text{ at}$; 4) $p = 200 \text{ at}$; 5) $q = 1,5 \cdot 10^6 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$;

6) $q = 1,9 \cdot 10^6 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$; 7) $q = 0,5 \cdot 10^6 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$; 8) $\gamma_w = 1.300 \text{ kp/m}^2 \text{ s}$;

9) $\gamma_w = 2.000 \text{ kp/m}^2 \text{ s}$; 10) $\gamma_w = 3.800 \text{ kp/m}^2 \text{ s}$; 11) $\gamma_w = 4.500 \text{ kp/m}^2 \text{ s}$

In Abb. 5 ist die Veränderung des relativen hydraulischen Widerstands ($\xi_{\text{Siede}}/\xi_0-1$) in Abhängigkeit von $\Delta i_{\text{aus}}/\Delta i_{\text{AnfS}}$ graphisch dargestellt. Diese Grafiken zeigen, daß mit Zunahme von Druck und Massenstromdichte der Einfluß des unterkühlten Siedens abnimmt, daß er aber mit zunehmender Wärmestromdichte steigt.

Man darf annehmen, daß der Einfluß des unterkühlten Siedens auf den hydraulischen Widerstand ausschlaggebend ist für das Verhältnis von Dampfbildungsgeschwindigkeit $q / r\gamma''$

(r Verdampfungsenthalpie) auf die durchschnittliche Wassergeschwindigkeit w in diesem Abschnitt. Wie weiter oben gezeigt wurde, hängt ($\xi_{\text{Siede}}/\xi_0-1$) außerdem von der relativen Unterkühlung des Wassers am Rohraustritt $\Delta i_{\text{aus}}/\Delta i_{\text{AnfS}}$ ab. Die ermittelte empirische Abhängigkeit zur Berechnung der hydraulischen Widerstandszahl beim unterkühlten Sieden sieht folgendermaßen aus:

$$\left(\frac{\xi_{\text{Siede}}}{\xi_0} - 1\right) = 3,09 \left(\frac{q}{r\gamma''w}\right)^{0,7} \left[7 - \left(1 + 48 \frac{\Delta i_{\text{aus}}}{\Delta i_{\text{Anf.S.}}}\right)\right] \quad (6)$$

Diese Abhängigkeit stimmt mit $\pm 6\%$ mit allen Versuchsdaten der Verfasser überein. Die experimentellen Werte anderer Autoren [1 - 4], welche diese bei Drücken in der Nähe des von uns untersuchten ermittelt hatten, stimmen mit $\pm 10\%$ mit unserer Abhängigkeit (6) überein. Bei Drücken unter 50 at kann eine solche Übereinstimmung nicht mehr festgestellt werden. So liegen bei $p = 7$ at die Versuchswerte $\Delta p_{\text{Siede}}/\Delta p_0$ [1] um ca. 40 % über dem Wert nach Abhängigkeit (6) und den Angaben in [3] bei demselben Druck um 40 % unter diesem Wert. Offensichtlich müssen im Niederdruckbereich noch zusätzliche experimentelle Untersuchungen angestellt werden.

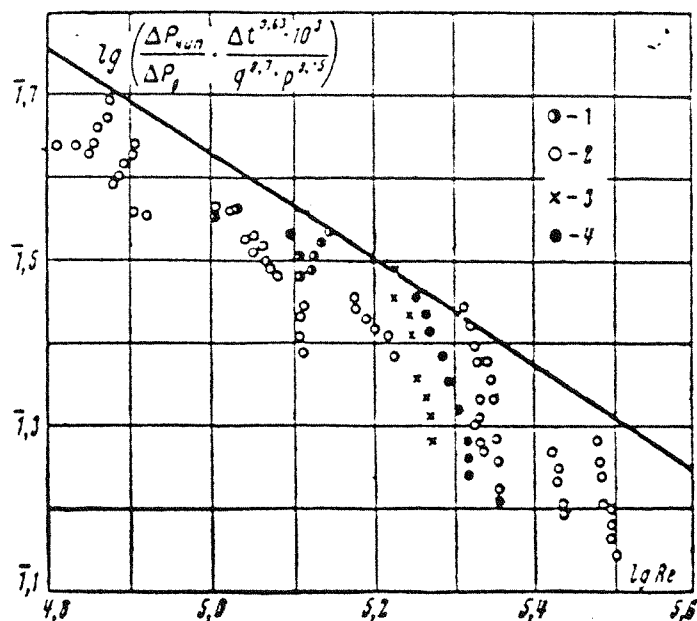


Abb. 6: Vergleich der Versuchsdaten der Verfasser zum hydraulischen Widerstand mit der Formel aus [3]

1) $p = 50$ at; 2) $p = 100$ at; 3) $p = 150$ at; 4) $p = 200$ at

Die durchgezogene Linie entspricht der Formel aus [3].

Zum Vergleich mit der Abhängigkeit in [3] wurden alle unsere Versuchsdaten zum hydraulischen Widerstand nach der Beziehung

$$\frac{\Delta p_{\text{Siede}}}{\Delta p_0} \cdot \frac{\Delta t_u^{0,63} \cdot 10^3}{q^{0,7} \cdot p^{0,15}} = f(Re)$$

umgerechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt. Daraus geht hervor, daß die Versuchswerte unterhalb dieser Abhängigkeit liegen, wobei ihre Abweichung mit zunehmender Unterkühlung bis auf 40 % ansteigt.

Nach der Abhängigkeit aus [3] nimmt der hydraulische Widerstand mit steigendem Druck beim unterkühlten Sieden zu. Die experimentellen Werte in [1, 4] und von den Verfassern (Abb. 4) bewiesen genau das Gegenteil. Der Grund für diese Differenz liegt möglicherweise darin, daß der Einfluß der Unterkühlung in der Abhängigkeit aus [3] durch den absoluten Wert der

Unterkühlung $\Delta t_u = t' - t_{\text{ström}}$ und nicht durch den relativen $\frac{i' - i_{\text{ström}}}{i' - i_{\text{Anf.S.}}}$ berücksichtigt wird. Es ist aber nicht möglich, den Einfluß des Drucks nach den zahlenmäßig geringen experimentellen Werten in [3] aufzuzeigen.

L i t e r a t u r

1. Buchberg, H.; Romie, F.; Lipkis, R.; Greenfield, M.: Heat transfer, pressure drop, and burnout studies with and without surface boiling for de-aerated and gassed water at elevated pressures in a forced flow system.
In: Proceedings of heat transfer and fluid mechanics Institute. Preprints of papers held at Stanford University, June 20 - 21, 1951. Stanford, Cal., 1951, S. 177 - 191.
2. Rohsenow, Warren M.; Clark, John A.: Heat transfer and pressure drop data for high heat flux densities to water at high sub critical pressures.
In: Proceedings of heat transfer and fluid mechanics Institute. Preprints of papers held at Stanford University, June 20 - 21, 1951. Stanford, Cal., 1951, S. 193 - 207.
3. П. Г. Полетавкин. «Теплоэнергетика» № 12, 1959.
Poletavkin, P.G.: Gidravličeskoe soprotivlenie pri poverchnostnom kipenii vody.
In: Teploénergetika. Moskva, 1959, Nr 12, S. 13 - 18.
/Hydraulischer Widerstand beim Oberflächensieden von Wasser; russ./

4. А. П. Орнатский, А. М. Кичигин. «Теплоэнергетика» № 8, 1961.

Ornatskij, A.P.; Kicigin, A.M.: Issledovanie gidravličeskogo soprotivlenija pri tečenii nedogretoj vody v trubke malogo diametra i bol'sich teplovych potokach.

In: Теплоэнергетика. 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./

5. Б. С. Петухов, Г. Ф. Мучник. Ж.Т.Ф., т. 27, вып. 5, 1957.

Petuchov, B.S.; Mučnik, G.F.: K voprosu o gidravličeskom soprotivlenii pri turbulentnom neizotermičeskom dviženii židkosti v trubach.

In: Žurnal tehničeskoj fiziki. Moskva, 27 (1957), Nr 5, S. 1095 - 1099.

Engl.: On the problem of the hydraulic resistance in turbulent nonisothermal flow of liquids in tubes.

In: Soviet physics. Technical physics. New York, 2 (1957), S. 996 - 1000.

6. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1956.

Micheev, M/ichail/ A/leksandrović/ Osnovy teploperedaci.

Moskva: Gosenergoizdat, 1956.

Dt.: Grundlagen der Wärmeübertragung.

Dt. Übers. Edgar Scheitz.

Berlin: VEB Technik, 1962, 376 S.

7. Г. Г. Трещов. Статья в сборнике «Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и других специальных условиях». Госэнергоиздат, 1959.

Treščev, G.G.: Eksperimental'noe issledovanie mehanizma processa poverchnostnogo kipeńija.

In: Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и других special'nych uslovijach. Moskva: 1959, S. 51 - 68.

/An experimental investigation of the mechanism of the process of surface boiling; russ./

Stuttgart, den 30. April 1993.

übersetzt von

Ottmar Pertschi

(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer