

2/357

Bezrodnyj, M.K. (Kandidat der technischen Wissenschaften)
Alabovskij, A.N. (Prof.Dr. der technischen Wissenschaften)
Mokljak, V.F. (Ingenieur)

UNTERSUCHUNG DES MITTLEREN VOLUMETRISCHEN DAMPFGEHALTS
DER DYNAMISCHEN ZWEIPHASENSCHICHT IN EINEM THERMOSYPHON

Deutsche Vollübersetzung aus:

Izvestija VUZov. Energetika. Minsk, 1981, Nr 9, S. 58-63.

Russ: **ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕГО ОБЪЕМНОГО ПАРСОДЕРЖАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКОГО ДВУХФАЗНОГО СЛОЯ В ЗАМКНУТЫХ
ТЕРМОСИФОНАХ**

Issledovanie srednego ob"emnogo parosoderžanija
dinamičeskogo dvuchfaznogo sloja v zamknutyx
termosifonach.

Wie bereits in verschiedenen Arbeiten gezeigt worden ist, können Thermosyphons erfolgreich für die Wärmeübertragung eingesetzt werden. Dabei wird dem zweiphasigen Arbeitsstoff in der Heizzone ein bestimmter Wärmestrom zugeführt. In diesem Zusammenhang ist die wahre Höhe der dynamischen Zweiphasenschicht (Gemisch aus Flüssigkeit und Dampfblasen) eine wichtige Größe für die Berechnung. Die Kenntnis der Einflüsse auf das Verhalten der Schicht gestattet eine optimale Wahl des Füllungsgrades, wodurch die günstigsten Bedingungen für den Wärmetransport im Thermosyphon geschaffen werden.

Zur Berechnung der wirklichen Höhe der Zweiphasenschicht benötigt man deren volumetrischen Dampfgehalt. Es gibt Untersuchungen über die Einflüsse auf diese Größe [1-3] in Blasensäulen für die Systeme Wasserdampf-Wasser und Luft-Wasser. Es ist jedoch recht schwierig, die Ergebnisse für die Berechnung der wahren Höhe der Zweiphasenschicht in einem Thermosyphon anzuwenden. Direkte Untersuchungen, die auf einen Thermosyphon anwendbar sind, fehlen in der Literatur.

Die hydrodynamischen Vorgänge in der dynamischen Zweiphasenschicht in einem Thermosyphon weisen gegenüber denjenigen in üblichen Blasensäulen wichtige Unterschiede auf. Im Thermosyphon wird die Gasphase seitlich eingeblasen, der Durchmesser der Zweiphasenschicht ist kleiner als ihre Höhe. Die Untersuchung

Übersetzungsstelle
der Universitätsbibliothek Stuttgart

der Gesetzmäßigkeiten dieser Vorgänge ist sehr interessant, verschiedene Arbeitsstoffe werden verwendet. Der mittlere volumetrische Dampfgehalt in der dynamischen Zweiphasenschicht in einem geschlossenen Thermosyphon wurde in der in [4, 5] beschriebenen Versuchsanlage untersucht. In die adiabate Transportzone der verwendeten senkrechten Thermosyphons wurden zur Strömungsbeobachtung Sichtfenstern eingebaut. Bei diesen Untersuchungen wurde eine elektrische Heizung und eine Kühlvorrichtung verwendet, besondere Vorrichtungen zum Evakuieren und Befüllen der Thermosyphons mit den Arbeitsstoffen waren angeschlossen, außerdem Kontroll- und Meßgeräte.

Die Höhe der dynamischen Zweiphasenschicht wurde visuell anhand der oberen Werte der Schwingungsamplitude der Schicht bestimmt. Die Innendurchmesser der verwendeten Thermosyphons betragen $d_{\text{innen}} = 14, 20, 36, 66$ mm. Als Arbeitsstoffe wurden Wasser, Ethanol, Methanol und R11 verwendet. Folgende Größen wurden variiert: Druck ($p = 1,0 - 10,0$ bar), Dampfgeschwindigkeit ($W_{\text{d0}} = 0,13 - 2,5$ m/sec), Füllungsgrad der Heizzone ($\epsilon_{\text{Hz}} = 50 - 100$ %), Länge der Heizzone $L_{\text{Hz}} = 0,3 - 1,2$ m. Die Abhängigkeit der Hauptkennzeichen der dynamischen Zweiphasenschicht - des mittleren volumetrischen Dampfgehaltes - von geometrischen, betrieblichen und physikalischen Größen wurde untersucht. Der mittlere volumetrische Dampfgehalt ist definiert als:

$$\varphi_{\text{gemittelt}} = 1 - H_f/H \quad (1)$$

Dabei ist H_f die Schichthöhe der reinen Flüssigkeit und H die wahre Gesamthöhe der dynamischen Zweiphasenschicht.

Die visuellen Beobachtungen der Struktur der dynamischen Zweiphasenschicht im untersuchten Thermosyphon zeigten, daß sich ein von Turbulenz beeinflusstes Dampf/Flüssigkeits-Gemisch unterschiedlicher Höhe mit Tropfenaustragung einstellt. Die Höhe hängt vom Wärmestrom und von der Schwingungsweise der Schicht ab. Diese wiederum werden von der Art der Flüssigkeit, dem Druck und dem Durchmesser des Thermosyphons bestimmt. Es wurden 2 wesentliche Bewegungsarten der Dampfphase festgestellt: Pfropfenströmung und Blasenströmung. Die Pfropfenströmung wird in den Thermosyphons mit kleinem Durchmesser bei relativ niedrigem Druck beobachtet; diese Bewegung ist unregelmäßig und wird von beträchtlichen Pulsationen begleitet. Eine Vergrößerung des Durchmessers des Thermosyphons und/oder des Drucks im Innenraum bewirken eine Stabilisierung der Dampfströmung, die in eine Blasenströmung mit einer verhältnismäßig gleichmäßigen Verteilung der Dampfblasen im Querschnitt des Thermosyphons übergeht.

In Abb.1 ist der gemessene mittlere volumetrische Dampfgehalt ($\varphi_{\text{gemittelt}}$) in abhängig von der Dampfgeschwindigkeit (W_{d0}) dargestellt. Diese Versuchsergebnisse wurden in Thermosyphons mit einem Innendurchmesser von 36 mm und Ethanol als Arbeitsstoff ermittelt. Aus Abb.1 ist ersichtlich, daß die Größe $\varphi_{\text{gemittelt}}$ mit steigender Geschwindigkeit des Dampfes zunimmt, außerdem mit steigendem Druck (innerhalb des untersuchten Bereiches der übrigen Parameter). Der Grund dafür liegt in der Verringerung der Aufstiegsgeschwindigkeit der Dampfblasen in der Flüssigkeit bei Steigerung des Drucks und ihrer gleichmäßigeren Verteilung über dem Querschnitt des Thermosyphons, wobei die Geschwindigkeit des Dampfstroms sich vergrößert.

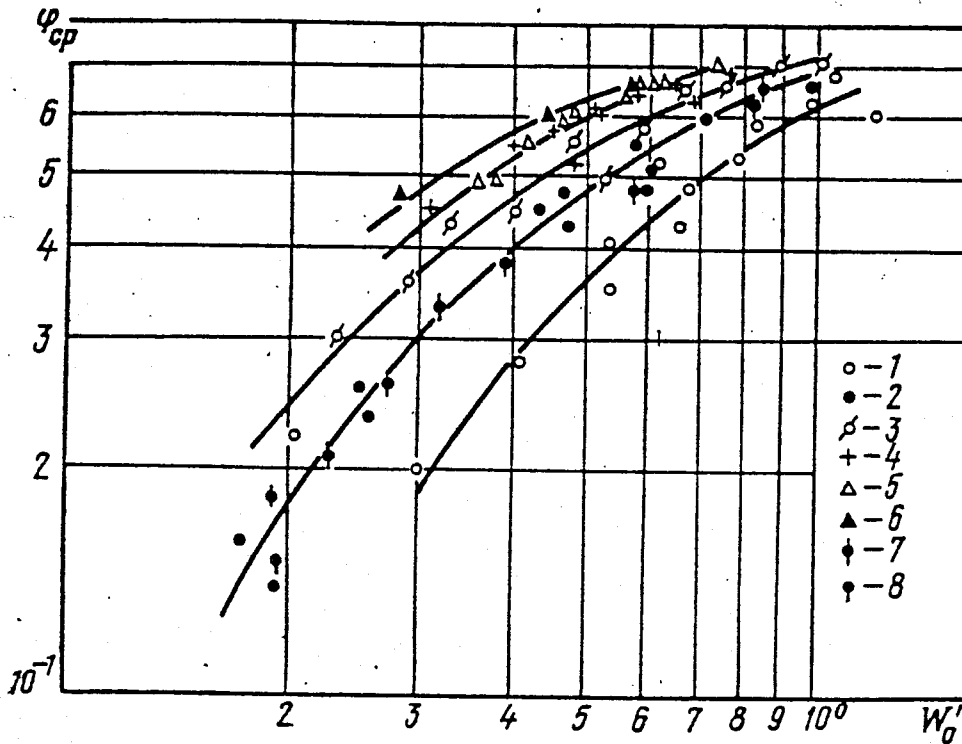


Abb.1:

Abhängigkeit des mittleren volumetrischen Dampfgehalts der Mischung von der Geschwindigkeit der Dampfphase für den Arbeitsstoff Ethanol ($d_{\text{innen}} = 36 \text{ mm}$)

2, 7, 8 — $p = 2,0 \text{ bar}$; 2 — $I_{\text{Hz}} = 0,64$; $\epsilon_{\text{HL}} = 90 \%$; 7 — 0,5; 100%; 8 — 0,91;
50%; 1 — $p = 1,0 \text{ bar}$; 3 — 3,0; 4 — 4,0; 5 — 5,0; 6 — 6,0

Bei den Versuchen wurde festgestellt, daß die Länge der Heizzone und der Füllungsgrad mit Arbeitsstoff praktisch keinen Einfluß auf den mittleren volumetrischen Dampfgehalt $\varphi_{\text{gemittelt}}$ in der durchströmten Zweiphasenschicht ausüben.

Die Untersuchung der hydrodynamischen Vorgänge in der Zweiphasenschicht führt zu dem folgenden System verallgemeinerter Variablen, die zur Beschreibung der gesuchten hydrodynamischen Kenngröße $\varphi_{\text{gemittelt}}$ dienen:

$$\varphi_{\text{gemittelt}} = f (Fr, Ar, Bo, K_p, L_{\text{Hz}}/d, \epsilon_{\text{Hz}}) \quad (2)$$

wobei $Fr = W_{d0} / (g \delta)^{0,5}$	Froude-Zahl
$Ar = (g \delta^3 / \nu_f^2) (\rho_f - \rho_d) / \rho_f$	Archimedes-Zahl
$Bo = d/\delta$	Bond-Zahl
$K_p = p \delta / \sigma$	Druck-Kennzahl
$\delta = (\sigma / (g(\rho_f - \rho_d)))^{0,5}$	Laplace-Konstante

Im untersuchten Bereich der Einflußparameter wurde keine Abhängigkeit der Größe $\varphi_{\text{gemittelt}}$ von der Länge der Heizzone L_{Hz} und dem Füllungsgrad der Heizzone ϵ_{Hz} festgestellt. Daher nimmt Gleichung (2) die folgende Form an:

$$\varphi_{\text{gemittelt}} = f (Fr, Ar, Bo, K_p) \quad (3)$$

Die Funktion (3) wurde zur Verallgemeinerung der Versuchswerte verwendet. Dabei wurden vor allem die Grenzen für die Existenz charakteristischer (visuell zu beobachtender) Strömungsformen der Dampfblasen im Bereich der dynamischen Zweiphasenschicht im Thermosyphon festgestellt. Die Druck-Kennzahl K_p charakterisiert die Verdichtbarkeit des bei allen verschiedenen Zweiphasenströmungsformen gleichen Stoffes. Daher sind in Abb.2 die gemessenen Werte von $\varphi_{\text{gemittelt}}$ auf eine Funktion von K_p und außerdem von Fr bezogen worden und so über der Bond-Zahl für Flüssigkeiten mit ungefähr gleichen Werten der Archimedes-Zahl dargestellt.

Wie aus Abb.2 ersichtlich, gibt es 3 Bereiche für die Bond-Zahl, die einem unterschiedlichen Verhalten des mittleren volumetrischen Dampfgehaltes der Zweiphasenschicht entspricht: der Bereich $Bo \leq 18$ bezieht sich auf den Arbeitsbereich bei relativ niedrigem Druck in Thermosyphons mit kleinem Durchmesser; $Bo \geq 30$ auf die Arbeitsweise als Blasensäule mit relativ gleichmäßiger Verteilung der Dampfblasen über dem Querschnitt des Thermosyphons.

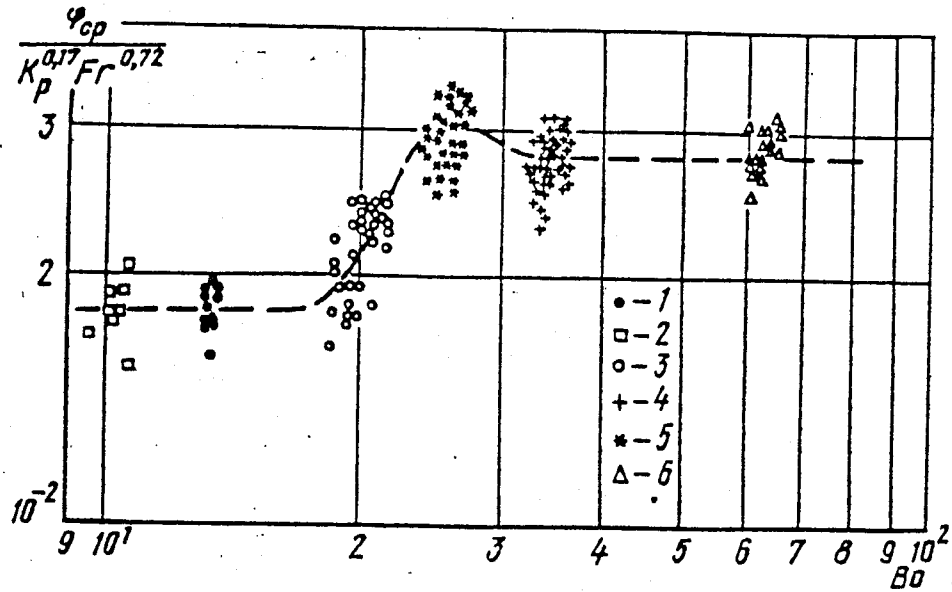


Abb.2:
 Einfluß der Bond-Zahl auf die Arbeitsweise des Thermosyphons
 1, 3, 4, 6 - R11; 2, 5 - Ethanol
 1, 2 - $d_{innen} = 14$ mm; 3 - 20 mm; 4, 5 - 36 mm; 6 - 66 mm

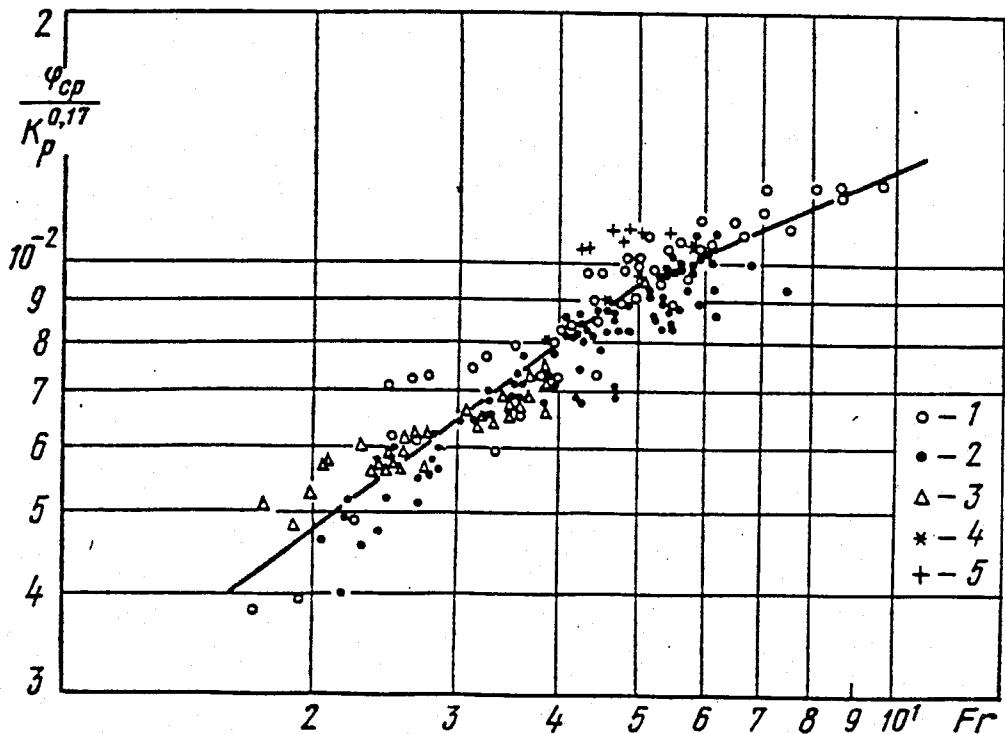


Abb.3:
 Verallgemeinerung der Versuchsergebnisse für den Bereich verhältnismäßig kleiner Drücke
 1 - Ethanol; 2 - Methanol; 3 - R11; 4, 5 - Wasser
 1 - $d_{innen} = 14$ mm; 2, 3, 4 - 20 mm; 5 - 36 mm

Die Existenz unterschiedlicher Arbeitsweisen kann damit erklärt werden, daß sich im Bereich kleiner Bond-Zahlen Dampfpfropfen bilden, deren Durchmesser von gleicher Größenordnung ist wie das Innere des Thermosyphons. Infolgedessen sind die Reibungskräfte an den Phasengrenzen zwischen Dampf und Flüssigkeit gering. Die Aufstiegsgeschwindigkeit der Dampfblasen ist demzufolge hoch. Eine Vergrößerung des Durchmessers des Thermosyphons (der Bond-Zahl) führt dazu, daß die Dampfblasen vergleichsweise kleiner werden. Dadurch nimmt die Zwischenphasenreibung zu, die Aufstiegsgeschwindigkeit der Dampfblasen wird kleiner, was schließlich zu einer Erhöhung des mittleren volumetrischen Dampfgehalts der Zweiphasenschicht führt.

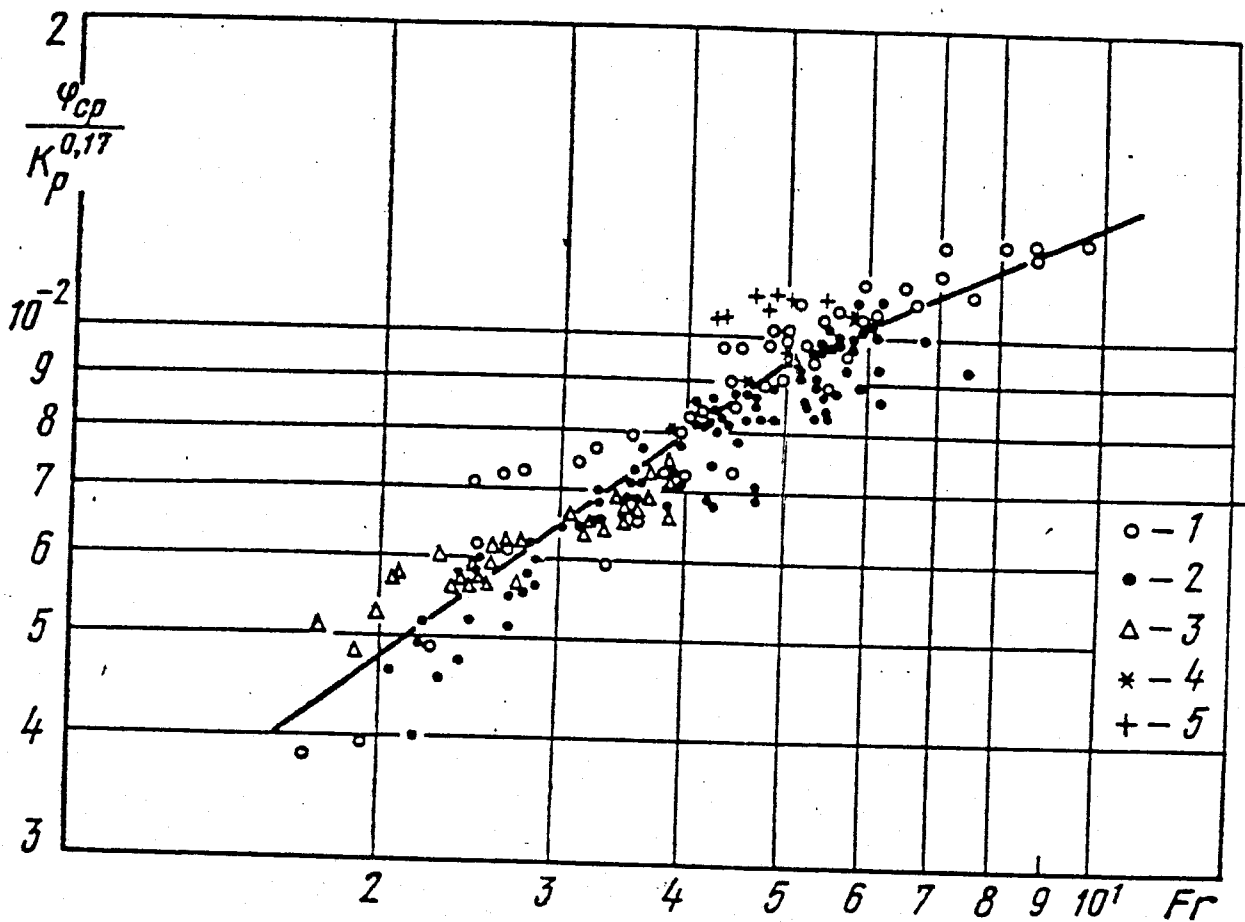


Abb.4:

Verallgemeinerung der Versuchsergebnisse für den Bereich der Blasenströmung
1, 5 - Ethanol; 2, 3 - R11; 4 - Wasser

1, 2 - $d_{innen} = 36 \text{ mm}$; 3, 4, 5 - 66 mm

Eine Verallgemeinerung der Versuchswerte für die beiden wichtigsten Bewegungsarten des Arbeitsstoffes in der Dampfphase (Dampffropfen bei geringem Druck bzw. Blasenströmung) wird in den Abb.3 und 4 dargestellt. Man erhält hier verallgemeinerte Abhängigkeiten, die eine Berechnung des Wertes von $\varphi_{\text{gemittelt}}$ ermöglichen:

Für den Betrieb bei geringem Druck:

$$\varphi_{\text{gemittelt}} = C Fr^n Ar^{0,18} K_p^{0,17} \quad (4)$$

mit:

$$C = 2,4 \cdot 10^{-3}; n = 0,72; Fr \leq 7,5$$

$$C = 1,03 \cdot 10^{-2}; n = 0,47; Fr \geq 7,5$$

Für den Betrieb mit Blasenströmung:

$$\varphi_{\text{gemittelt}} = C Fr^n K_p^{0,17} \quad (5)$$

mit:

$$C = 2,8 \cdot 10^{-3}; n = 0,72; Fr \leq 5$$

$$C = 9,6 \cdot 10^{-3}; n = 0,47; Fr \geq 5.$$

Aus Abb.4 geht hervor, daß für ein Zweiphasengemisch mit stark turbulenter Strömung, wie sie bei Blasenströmung anzutreffen ist, die Viskosität der Flüssigkeit keinen Einfluß auf die hydrodynamischen Kennwerte hat. Anhand der Gleichungen (4) und (5) läßt sich gemeinsam mit dem Verhältnis (1) die wahre Höhe der Zweiphasenschicht im Thermosyphon berechnen. Wenn die wahre Höhe vorgegeben ist, kann hierfür die notwendige Schichthöhe der reinen Flüssigkeit bestimmt werden, die eine störungsfreie und effektive Arbeitsweise eines Thermosyphons bei der Wärmeübertragung gewährleistet.

Literatur

I. Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании.— М.: Высшая школа, 1977.

Kutepov, A.M.; Sterman, L.S., Stjušin, N.G.
Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii.

Moskva: Vysšaja škola, 1977, 352 S.

/Hydrodynamics and heat transfer during steam generation; russ./

2. Бартоломей Г. Г., Алхутов М. С. Определение истинного паросодержания при барботаже на участке стабилизации.— Теплоэнергетика, 1967, № 12, с. 80—81.

Bartolomej, G.G.; Alchutov, M.S.:

Opredelenie istinnogo parosoderžanija pri barbotaže na učastke stabilizacii.

In: Teploenergetika, Moskva, 14 (1967), Nr 12, S. 80-81.

Engl.: Determination of true vapour content when there is bubbling in the stabilisation factor.

In: Thermal Engineering. New York, 14 (1967), S. 112-114.

3. Деметьев Б. А. О влиянии диаметра колонки и давления на паросодержание водяного объема устройств с барботажем пара через воду.— Теплоэнергетика, 1957, № 4, с. 45—49.

Dement'jev, B.A.:

O vlijanii diametra kolonki i davlenija na parosoderžanie vodjanogo ob"ema ustrojstv s barbotažem para čerez vodu.

In: Teploenergetika. Moskva, 1957, Nr 4, S. 45-49.

/Einfluß des Säulendurchmessers und -drucks auf den Dampfgehalt großvolumiger Wassersiedegeräte mit Durckluftmischung; russ./

4. Безродный М. К., Алексеенко Д. В. Исследование кризиса тепломассообмена при кипении ф-11 в испарительных термосифонах.— Вопросы радиоэлектроники, серия ТРТО, 1976. Вып. 1, с. 110—116.

Bezrodnyj, M.K., Alekseenko, D.V.:

Issledovanije krizisa teplomassoperenosa pri kipenii f-11 v isparitel'nych termosifonach.

In: Voprosy radioelektroniki, serija TRTO. Moskva, 1976, Nr 1, S. 110-116.

/Untersuchung des kritischen Wärmeübergangs beim Sieden im Verdampfungswärmesiphons; russ./

5. Алабовский А. Н., Безродный М. К., Мокляк В. Ф. Исследование теплообмена при конденсации паров в вертикальных термосифонах.— Изв. вузов СССР — Энергетика, 1979, № 7, с. 61—67.

Alabovskij, A.N., Bezrodnyj, M.K., Mokljak, V.F.:

Issledovanie teploobmena pri kondensacii parov v vertikal'nych termosifonach.

In: Izverstija Vuzov SSSR. Energetika. Minsk, 1979, Nr 7, S. 61-67.

/Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Kondensation von Dämpfen in vertikalen Thermosiphons; russ./

Stuttgart, den 1.7.1991

Übersetzt von

Andrea Ulrich-v. Oertzen

Andrea Ulrich-von Oertzen

(Dipl.-Übers.)

Übersetzungsstelle
der Universitätsbibliothek Stuttgart