

Dejč, M. E.
Filippov, G. A.
Lazarev, L. Ja.

EINFLUß DER BETRIEBSWERTE AUF DIE GITTERLEISTUNG (4. Kapitel)

§ 29. Strömungseintrittswinkel in die Leit- und Laufgitter. Berechnung der Verluste bei unberechenbaren Eintrittswinkeln.

§ 30. Einfluß der Reynolds-Zahl und Kompressibilität (Machzahl) auf die Eigenschaften von Turbinengittern.

§ 31. Einfluß der Strömungsturbulenz auf die Profil- und Gesamtverluste in den Leit- und Laufgittern.

§ 32. Unregelmäßigkeit der Geschwindigkeitsfelder in Turbinengittern. Berücksichtigung des Unregelmäßigkeitseinflusses auf die Verluste in den Gittern.

Deutsche Vollübersetzung aus:

Dejč, M. E.; Filippov, G. A.; Lazarev, L. Ja.: Atlas profilej rešetok osevyh turbin.
Moskva: Mašinstroenie, 1965, S. 38 – 41.

Russ.: Глава 4. Влияние режимных параметров на эффективность решеток. § 29. Угол входа потока в сопловые и рабочие решетки. Расчет потерь при нерасчетных углах входа. § 30. Влияние числа Рейнольдса и сжимаемости (числа М) на характеристики турбинных решеток. § 31. Влияние турбулентности потока на профильные и суммарные потери в сопловых и рабочих решетках. § 32. Неравномерность полей скоростей в турбинных решетках. Учет влияния неравномерности на потери в решетках.

Glava 4. Vlijanie režimnyh parametrov na éffektivnost' rešetok. § 29. Ugol vchoda potoka v soplovye i rabočie rešetki. Rashet poter' pri nerascetnyh uglach vchoda. § 30. Vlijanie čisla Rejnol'dsa i sžimaemosti (čisla М) na charakteristiki turbinyh rešetok. § 31. Vlijanie turbulentnosti potoka na profil'nye i summarnye poter' v soplovyh i rabočih rešetkach. § 32. Neravnomernost' polej skorostej v turbinyh rešetkach. Učet vlijanja neravnomernosti na poter' v rešetkach.

Inhaltsverzeichnis (S. 3):

	S. im russ. Original	Stelle in der Übersetzung Ü/634
Vorwort	4	—
1. Teil.		
Profilierungsmethoden und aerodynamische Eigenschaften der Gitter		
1. Kapitel. Allgemeines	7	4
§ 1. Klassifikation der Gitter	7	4
§ 2. Bezeichnung der Größen, Geometrie und Betriebswerte der Gitter	7	7
§ 3. Experimentelle Bestimmungsmethode der aerodynamischen Gittereigenschaften	8	11
§ 4. Allgemeine Tabelle der Turbinengitterprofile	10	15
§ 5. Gitterprofil-Senkrechte	10	16
§ 6. Festigkeitswerte der Profile	11	—
		Ü/635
2. Kapitel. Berechnung und Profilierung der Gitter	13	—
§ 7. Wahl des Gittertyps und seine wichtigsten Eigenschaften	13	—
§ 8. Berechnung der Potentialströmungen und Methoden der Gitterprofilierung bei Unterschallgeschwindigkeiten	13	—
§ 9. Aproximative Verfahren zum Bau von Unterschallgittern. Schleifenlinien-Methode	14	—
§ 10. Profilierung der Leitgitter für schallnahe Geschwindigkeiten	16	—
§ 11. Profilierung der Überschall-Leitgitter	18	—
§ 12. Profilierung der Laufgitter bei schallnahen und Überschall-Geschwindigkeiten. Profilierung der Gitter nach der Potentialwirbel-Methode	19	4
§ 13. Profilierung der Leitgitter mit geringen relativen Schaufelhöhen	22	—
§ 14. Effiziente Formen der Kanäle von Gleichdruck-Laufgittern mit geringen Schaufelhöhen	24	12
§ 15. Profilierung der Leit- und Laufgitter für Stufen mit geringen Relationen u/c_a	26	—
§ 16. Profilierung der Leitgitter von Regelstufen	26	—
§ 17. Besonderheiten der Planung und Berechnung der Gitterquerschnitte mit großer Fächerung	27	—
		Ü/636
3. Kapitel. Berechnung der aerodynamischen Gittereigenschaften. Einfluß mancher geometrischer Werte auf die aerodynamischen Gittereigenschaften	28	4
§ 18. Reibungsverluste in den Gittern. Berechnung der Grenzschicht	28	4
§ 19. Einfluß der Dicke und Form der Austrittskante auf die Gitterleistung. Berechnung der Kantenverluste	29	9
§ 20. Profilverluste in den Gittern	31	13
§ 21. Strömungsaustrittswinkel bei Unterschall- und Überschall-Geschwindigkeiten	31	14
§ 22. Durchflußmengen der Turbinengitter	32	—
§ 23. Einfluß der relativen Höhe auf den Wirkungsgrad der Gitter. Berechnung der Endverluste	33	18
§ 24. Wahl des optimalen Gitterabstands und des Profileinstellwinkels	33	21
§ 25. Berücksichtigung des Einflusses der Überdeckung auf die Endverluste in Leit- und Laufgittern bei variablem Eintrittswinkel	34	22
§ 26. Einfluß der Fächerung auf die Verteilung der Verluste über die Höhe der Kreisgitter. Berücksichtigung der Schaufelneigung und -krümmung in radialer Ebene	34	—

§ 27. Einfluß der Gehäuse- bzw. Deckbandneigung (Überdeckung des Strömungsabschnitts) auf die Leistung der Leit- und Laufgitter	35	25
§ 28. Einfluß von Rauigkeit und technischer Defekte auf die Gitterleistung	36	—
		Ü/643
4. Kapitel. Einfluß der Betriebswerte auf die Gitterleistung	38	4
§ 29. Strömungseintrittswinkel in die Leit- und Laufgitter. Berechnung der Verluste bei unberechenbaren Eintrittswinkeln	38	4
§ 30. Einfluß der Reynolds-Zahl und Komprimierbarkeit (Zahl M) auf die Eigenschaften von Turbinengittern	39	7
§ 31. Einfluß der Strömungsturbulenz auf die Profil- und Gesamtverluste in den Leit- und Laufgittern	40	11
§ 32. Unregelmäßigkeit der Geschwindigkeitsfelder in Turbinengittern. Berücksichtigung des Unregelmäßigkeitseinflusses auf die Verluste in den Gittern	40	13
		Ü/645
5. Kapitel. Berechnung der Stufen von Dampf- und Gasturbinen nach statischen Untersuchungswerten	42	2
§ 33. Methode der Wärmeberechnung der Stufen unter Heranziehung der aerodynamischen Werte des Atlas	42	2
§ 34. Rechenbeispiele für Turbinenstufen	42	5
2. Teil. Profile. Aerodynamische und Festigkeitswerte der Gitter		
Blätter 1 - 52	44 - 95	—
Literatur	96	Ü/634 S. 20 Ü/635 S. 16 Ü/636 S. 28 Ü/643 S. 15 Ü 645 S. 6

§ 29. Strömungseintrittswinkel in die Leit- und Laufgitter. Berechnung der Verluste bei unberechenbaren Eintrittswinkeln

Zur Berechnung des variablen Betriebs der Stufen von Dampf- und Gasturbinen muß man unbedingt den Einfluß des Strömungseintrittswinkels in den Leit- und Laufgittern auf deren Verluste kennen. Bei Profilen, berechnet auf $\beta_{ip} < 90^\circ$, sind Betriebszustände mit geringen Eintrittswinkeln ($\beta_1 < 45^\circ$) besonders ungünstig, wo am Eintrittsbereich des Schaufelrückens eine stark verzögerte Strömung eintritt. Bei Profilen mit $\beta_{ip} > 120^\circ$ sind Abläufe mit großen Eintrittswinkeln ($\beta_1 > 45^\circ$) ungünstiger. Weicht der Eintrittswinkel vom rechnerischen ab, verändern sich die Druckverteilungsfiguren über das Profil, es kommt zu divergenten Abschnitten, in deren Verlauf die Grenzschichtdicke intensiv zunimmt, in einigen Fällen kommt es sogar zu einem Strömungsabriß. Als Beispiel sind in Abb. 63 die Druckverteilungskurven über das Profil von einem Überdruck- und einem Gleichdruckgitter bei optimalen Abständen, Einstellwinkeln und Mach-Zahlen angegeben.

Die Profilverluste bei variablen Eintrittswinkeln zu berechnen ist schwierig, da die Strömungsstruktur im Gitter bei variablen $\alpha_o(\beta_1)$ durch die große Anzahl geometrischer und Betriebskennwerte beeinflusst wird: relativer Abstand \bar{t} , Form und Dicke der Vorderkante, Konvergenzgrad des Kanals, geometrische Eintrittswinkel β_{in} und Austrittswinkel β_{2n} , Zahlen M und Re u.a. Zur näherungsweisen Bewertung der Verluste bei Fehlanströmung mit den Winkeln $\alpha_o(\beta_1)$ kann man die Gleichung aus [46] benutzen:

$$\zeta = \zeta_{\min} + 0,22 \left(\frac{\sin \Delta\beta \sin \beta_2}{\sin \beta_1 \sin \beta_{1opt}} \right), \quad (76)$$

mit ζ_{\min} - Koeffizient der geringsten Verluste im Gitter bei β_{1opt} und \bar{t}_{opt} .

Berücksichtigt man, daß die geringsten Verluste in den Gittern ζ_{\min} den optimalen Eintrittswinkeln β_{1opt} entsprechen, welche von den geometrischen abweichen, erhält man die in Abb. 6 dargestellte Kurve; sie gibt die Abweichung des optimalen Eintrittswinkels β_{1opt} vom geometrischen Eintrittswinkel β_{in} an. Bei Gittern mit $\beta_{in} < 110^\circ$ liegen die geringsten Verluste bei $\beta_1 > \beta_{in}$, und bei $\beta_{in} > 110^\circ$ bei $\beta_1 < \beta_{in}$. Es muß noch hinzugefügt werden, daß die Abhängigkeit der Verluste vom Eintrittswinkel bei Überschallgeschwindigkeiten stark vom angegebenen abweichen kann.

Zur Berechnung der Verluste kann man auch andere Gleichungen aus [27; 38] heranziehen, von denen die Gleichung aus [38] am genauesten ist:

$$\zeta = A + B \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right)^2 + C \left(\frac{\sin \Delta\beta \sin \beta_2}{\sin \beta_1 \sin \beta_{1n}} \right), \quad (77)$$

mit $A = (0,4 - 0,6)$ B; $C = 0,265$; $B = 0,058$.

Hauptmangel der Gleichungen (76) und (77) ist, daß sie den Einfluß von Teilung und Mach-Zahl unberücksichtigt lassen. Aus den Versuchen wissen wir, daß mit abnehmender relativer Teilung der Einfluß der Fehlanströmung geringer wird. Mit abnehmendem Eintrittswinkel wird der optimale Wert der Mach-Zahl größer.

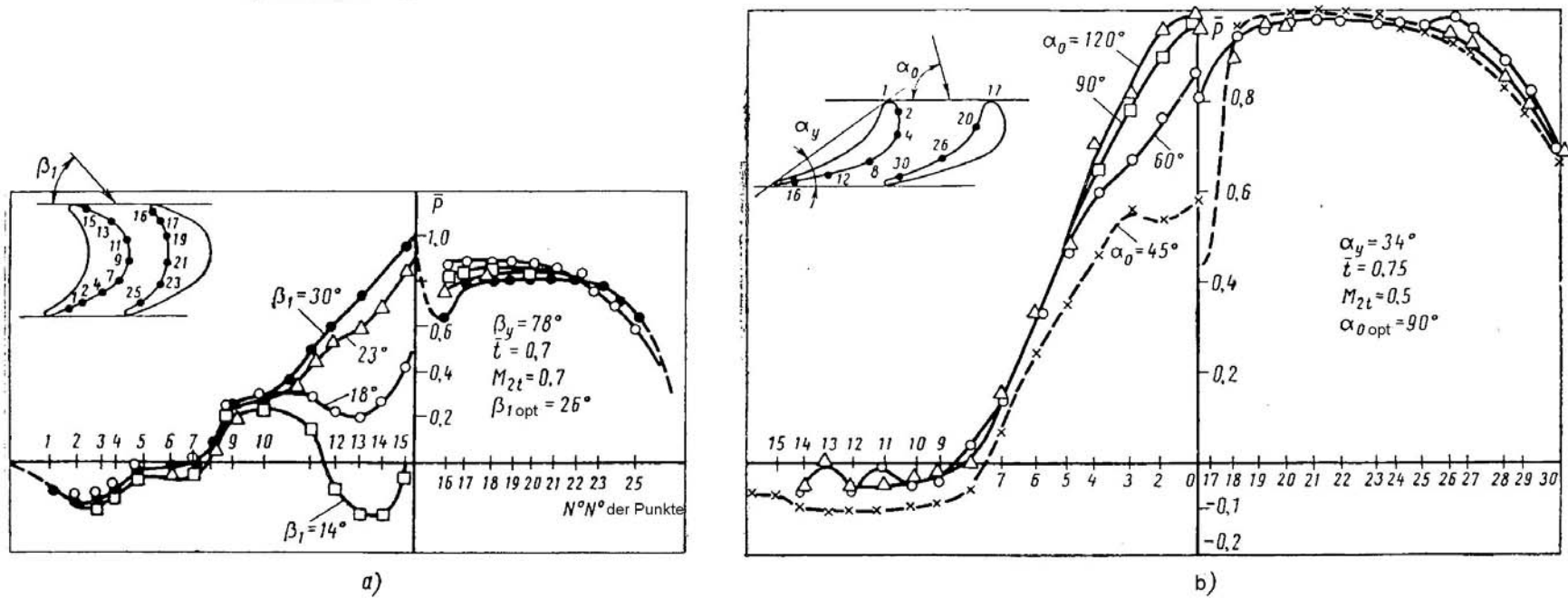


Abb. 63. Einfluß des Eintrittswinkels auf die Druckverteilung längs der Profilführungen

a) Gleichdruckgitter; b) Überdruckgitter

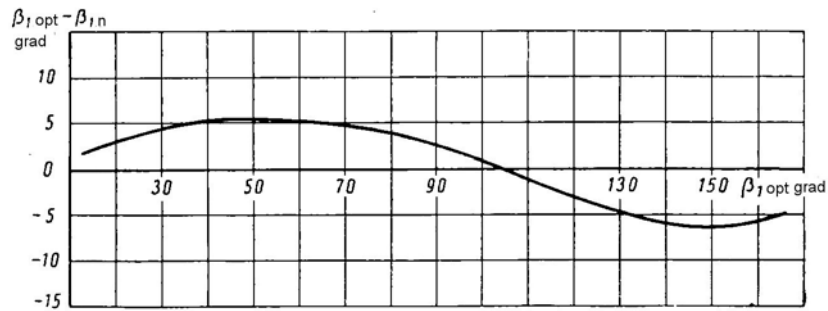


Abb. 64. Differenz zwischen den optimalen und geometrischen Eintrittswinkeln in verschiedenartigen Gittern (berechnet für verschiedene Eintrittswinkel)

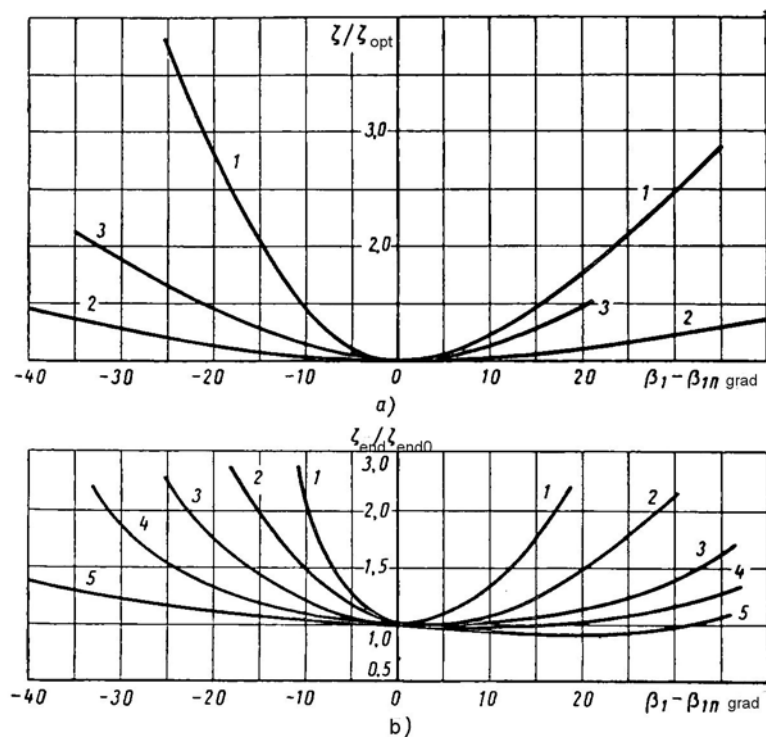


Abb. 65. Einfluß des Strömungseintrittswinkels auf die Gitterverluste:

- a) Profilverluste: 1) Gleichdruck-Laufgitter; 2) Überdruck-Leitgitter; 3) periphere und mittlere Querschnitte der Längsschaufeln;
b) Endverluste: 1) Strömungsumlenkwinkel $\Delta\beta = 180^\circ - (\beta_{1,opt} + \beta_2) = 150^\circ$; 2) $\Delta\beta = 120^\circ$; 3) $\Delta\beta = 110^\circ$; 4) $\Delta\beta = 100^\circ$; 5) $\Delta\beta = 75^\circ$.

Zur näherungsweise Bewertung der Profilverluste bei variablen Eintrittswinkeln kann man auch Graphiken benutzen (Abb. 65a). Kurve 1 wurde konstruiert nach den Versuchangaben für Gleichdruck-Laufgitter mit großen Strömungsumlenkwinkeln $\Delta\beta = 150 - 120^\circ$. Kurve 2 stellt die Veränderung der Profilverluste in Überdruckgittern mit

großen Rundungsradien der Vorderkante dar. Kurve 3 steht für die peripheren Querschnitte von Laufschaufeln mit starker Fächerung dar, berechnet für Eintrittswinkel von $\beta_1 = 140 - 160^\circ$.

Besonders stark wirkt sich der Eintrittswinkel auf die Endverluste in Gittern aus, was hauptsächlich damit zusammenhängt, daß sich die Querdruckgefälle in den Kanälen und entsprechend die Intensität der Sekundärströmungen verändert. Anhand der Versuchsdaten für Reaktions- und Impulsgitter sind in Abb. 65b die Kurven dargestellt, wie die Endverluste ζ_{end} im Vergleich mit den Endverlusten mit dem rechnerischen Eintrittswinkel ζ_{end0} bei verschiedenen Strömungsumlenkwinkeln im Gitter zunehmen: $\Delta\beta = 180^\circ - (\beta_{1\text{opt}} + \beta_2)$. Die Kurven 1, 2 ($\Delta\beta = 120 - 150^\circ$) beziehen sich auf Gleichdruck-Laufgitter, 3, 4 auf Leitgitter mit geringen Eintrittswinkeln und 5 auf Überdruck-Leitgitter mit großem Rundungsradius der Vorderkante und $\Delta\beta = 70^\circ$.

§ 30. Einfluß der Reynolds-Zahl und Kompressibilität (Mach-Zahl M) auf die Eigenschaften von Turbinengittern

Die im Atlas angegebenen Gittereigenschaften wurden in der Regel bei gleichmäßiger Veränderung der Mach- und Reynoldszahlen ermittelt, was natürlich die Bewertung der Verluste in den Gittern bei anderen Werten der wichtigsten Betriebskennwerte schwierig macht. Für praktische Berechnungen muß man in diesem Zusammenhang über die Eigenschaften verfügen, mit denen man den selektiven Einfluß der Re- und Mach-Zahlen berücksichtigen kann.

Die Art der Verluste in den Gittern und der Strömungseintrittswinkel von der Reynolds-Zahl Re hängt in großem Maße von den geometrischen Abmessungen (Konvergenz und Krümmung der Profilverläufe, Vorderkantendicke, Profilform, Rauigkeit) und den Betriebswerten (Eintrittswinkel, Turbulenzgrad, Mach-Zahl M) ab¹.

Folglich muß man den Einfluß der Reynolds-Zahl auf die aerodynamischen Eigenschaften gesondert betrachten, um die Intervalle der Mach-Zahlen M , des Turbulenzgrades E_0 sowie hinsichtlich der verschiedenen Gittergruppen (A, B und C) bestimmen zu können.

Bislang wurden die meisten Versuchsergebnisse für Unterschallgeschwindigkeiten ($M \leq 0,4$) bei geringen Turbulenzgraden ($E_0 \leq 1 - 2 \%$) ermittelt, wo man den Einfluß der Kompressibilität vernachlässigen kann.

Bei kontinuierlicher Unterschallströmung ($M \leq 0,4$) nehmen die Profil- und Endverluste im Gitter mit zunehmender Reynoldszahl Re kontinuierlich ab, ganz stark im Bereich kleiner Reynoldszahlen (bei Profilen mit relativ dünner Vorderkante). Mit zunehmender Reynoldszahl Re wird die Grenzschicht dünner, der Übergangsbereich von der laminaren Schicht zur turbulenten verschiebt sich entgegen der Strömungsrichtung und die Ladung des Geschwindigkeitsprofils im turbulenten Schichtabschnitt

¹ Der Einfluß der Reynolds-Zahl Re wird speziell in § 28 abgehandelt.

wird stärker. Durch die Verschiebung des Übergangsbereichs nimmt die Abnahmestärke der Verluste mit zunehmender Reynolds-Zahl ab; der Beginn der Zone mit praktischer Unabhängigkeit von der Reynoldszahl verschiebt sich bei diesen Gittern jedoch zu großen Reynoldszahlen hin: $Re_{\text{aut}} \geq (6 - 10) \cdot 10^5$. Der Austrittswinkel aus dem Gitter wird mit Zunahme von $Re \leq Re_{\text{aut}}$ größer.

Besonders groß ist der Einfluß der Reynolds-Zahl auf die Verluste und den Strömungsaustrittswinkel beim Abreißen der Strömung auf der Saugseite und bei Profilen mit relativ dicker Hinterkante, wo das Abreißen auf der Druckseite oder der Kante bis zu jenem Punkt erfolgt, wo die laminare Schicht in die turbulente übergeht. In diesem Fall kommt es bei zunehmender Reynolds-Zahl zu einer Energetisierung der Schicht in der Abreißzone und das Abreißen verschiebt sich in Strömungsrichtung: die Verluste nehmen stark ab. Der Beginn der Zone der praktischen Unabhängigkeit nach der Reynolds-Zahl hängt von vielen geometrischen und Betriebskennwerten ab. Insbesondere nimmt der Wert Re_{aut} mit zunehmender Turbulenz am Eintritt und abnehmendem Eintrittswinkel $\beta_1 < \beta_{1p}$ ab.

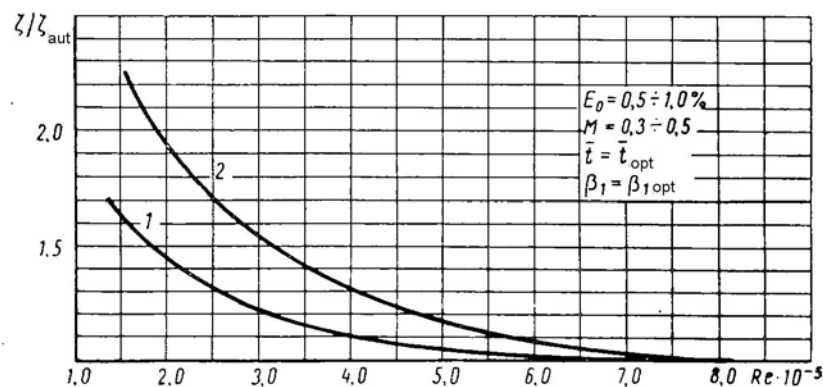


Abb. 66. Einfluß der Reynoldszahl Re auf die Profilverluste:

1) in Gleichdruck-Laufgittern; 2) in Überdruck-Leitgittern.

Bei aerodynamisch vollkommenen Leit- und Laufgittern kann bei niedriger Eintrittsturbulenz $E_0 \leq 0,5 - 1,5 \%$ und Unterschallgeschwindigkeiten der Strömung ($M = 0,3 - 0,5$) die näherungsweise Bewertung des Einflusses der Reynolds-Zahl nach den in Abb. 66 wiedergegebenen Kurven durchgeführt werden (wobei ζ/ζ_{aut} das Verhältnis des Energieverlustfaktors bei veränderlichem Re -Wert zum Verlustfaktor bei Re_{aut} bezeichnet).

Der Einfluß der Profilform auf die Reaktion der Energieverlustfaktoren und das Eintreten von Reynoldsunabhängigkeit bei veränderlichen Reynolds- und Machzahlen ist in den Abb. 67, 68 und 69 angegeben. Detaillierte Untersuchungen des Überdruck-Profils der Gruppe A (C-9012A) mit verschiedenen Hinterkantendicken (Abb. 67) zeigten, daß die Reynoldsunabhängigkeit bei Unterschallgeschwindigkeiten bei $Re_{\text{aut}} \approx (6 - 10) \cdot 10^5$ eintritt. Mit zunehmender Mach-Zahl nimmt Re_{aut} im Überschallbereich ($M > 1$) zu. Beim Gleichdruck-Laufgitter der Gruppe B – mit den geometrischen Werten: $\bar{t} = 0,62$, $\alpha_{\text{eff}} = 12^\circ$, $\bar{f} = 1,07$ – ist die Veränderung der Profilverlustwerte nach

der Machzahl bei verschiedenen Reynolds-Zahlen in Abb. 68 dargestellt. Wie auch beim Profil der Gruppe A steigt der Wert Re_{aut} mit zunehmendem M-Wert an. Wichtig ist hier der Hinweis auf eine andere Besonderheit im Verhalten der Kurven ζ_{pr} bei der Untersuchung dieses Gitters: mit zunehmender Reynolds-Zahl nimmt der Wert der optimalen Mach-Zahl $M_{1\text{opt}}$ ab. Bei $Re = 7 \cdot 10^5$ ist $M_{1\text{opt}} = 1,7$, und bei $Re = 2,8 \cdot 10^5$ $M_{1\text{opt}} = 1,45$. Dies hängt damit zusammen, daß mit abnehmender Reynolds-Zahl die Dicke der Grenzschicht im Kanaleintrittsquerschnitt größer wird und folglich die tatsächliche Relation $\bar{f} = \alpha_1 / \alpha_{\text{kr}}$ abnimmt.

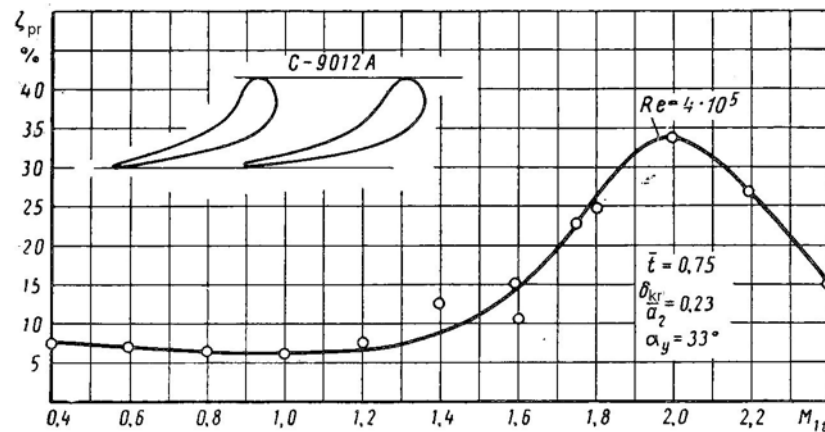


Abb. 67. Abhängigkeit der Profilverluste im Gitter C-9012A von den Reynolds- und Machzahlen Re und M

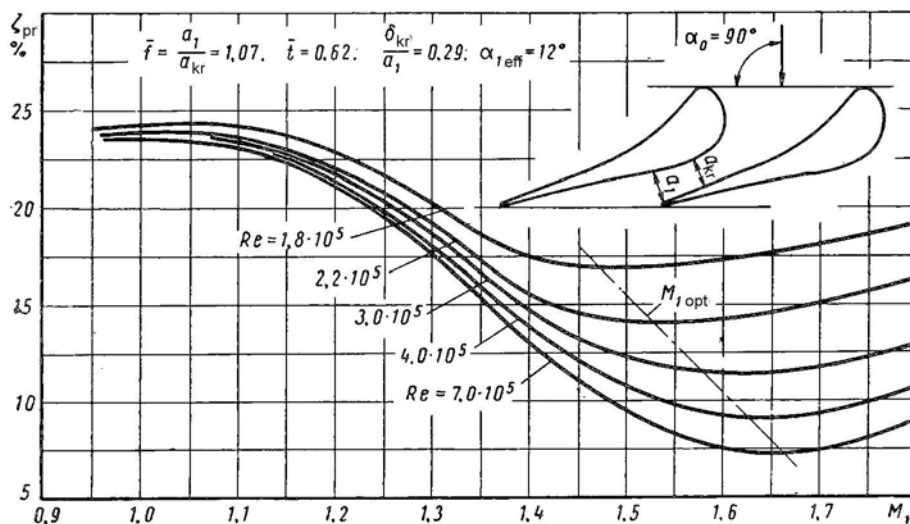


Abb. 68. Abhängigkeit der Profilverluste in einem Gitter mit divergentem Kanal von den Reynolds- und Mach-Zahlen Re und M

Bei einem Profilvergitter, das den oberen Querschnitten der Längsschaufeln entspricht, ist die Abhängigkeit ζ_{pr} von Re und M ähnlich. Dieses Gitter wurde mit konvergen-ten Kanälen und mit großer relativer Teilung $\bar{t} = 0,895$ ausgelegt; rechnerischer Strömungseintrittswinkel $\beta_{ip} = 135^\circ$, Austrittswinkel $\beta_{2eff} = 14^\circ$. Die Verlustwerte in diesem Gitter sind in Abhängigkeit von Re und M in Abb. 69 angegeben.

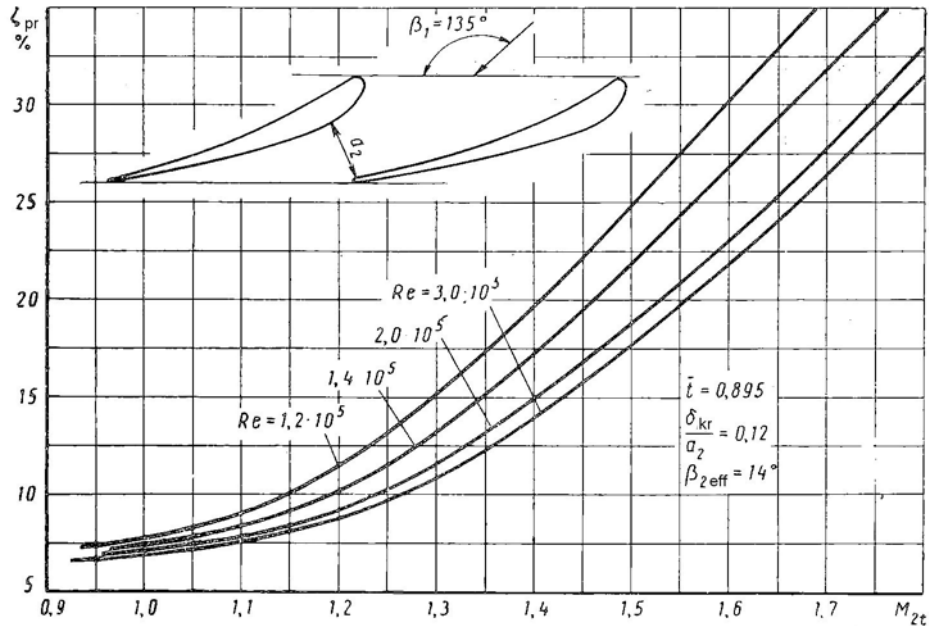


Abb. 69. Abhängigkeit der Profilverluste in Spitzenschnitt-Gitter

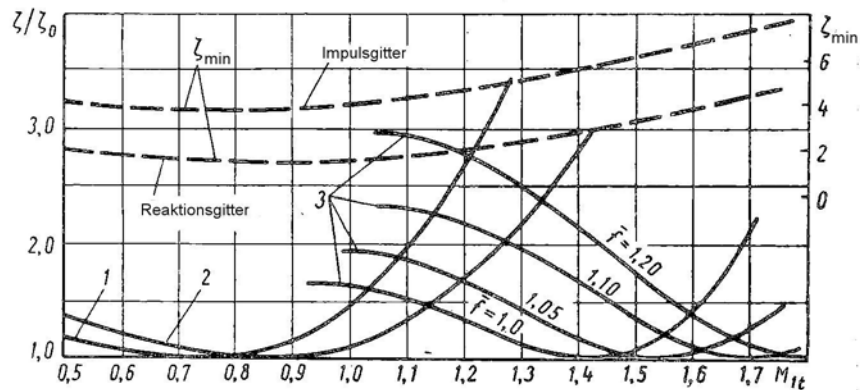


Abb. 70. Einfluß der Machzahl M auf die Profilverluste in Impuls- und Reaktionsgittern:

- 1) Gitter der Gruppe A; 2) Gitter der Gruppe B; 3) Gitter der Gruppe C.

Bei konstanter Reynolds-Zahl ist der Einfluß der Kompressibilität (Mach-Zahl M) bei $M \leq 0,8$ unbedeutend (bei Gittern der Gruppe A). Mit zunehmender Mach-Zahl nehmen die Profilverluste etwas ab. Die Endverluste in Leit- und Laufgittern nehmen

im Unterschallbereich bei zunehmender Mach-Zahl ebenfalls ab. Eine merkliche Zunahme der Verluste stellt man im schallnahen Bereich fest ($M > 0,9$). Die weitere Zunahme der Machzahl führt zu einer gewissen Zunahme der Profilverluste.

Bei den Gittern der Gruppe B (Druckseite mit umgekehrter Konkavität, divergente Schaufelpassagen) fällt der Einfluß der Machzahl M anders aus. Minimale Verluste beobachtet man in einem engen rechnerischen Überschallbereich, maximale bei schallnahen Geschwindigkeiten.

Einer näherungsweisen Bewertung des Einflusses der Mach-Zahl auf die Profilverluste in Impuls- und Reaktionsgittern dienen die Kurven (Abb. 70) der maximalen Verluste in speziell für unterschiedliche optimale Machzahlen M profilierten Gittern. Abb. 70 enthält auch die Kurven für die Veränderung der Verluste bei Abweichung von M_{opt} bei Gittern mit verschiedenen geometrischen Werten.

§ 31. Einfluß der Strömungsturbulenz auf die Profil- und Gesamtverluste in den Leit- und Laufgittern

Die im Atlas angegebenen aerodynamischen Eigenschaften der Profilhüter wurden in Windkanälen bei geringen Turbulenzgraden der auflaufenden Strömung ermittelt ($E_0 = 0,01 - 0,02$). Die Strömung in der Turbine zeichnet sich durch eine hohe Turbulenz aus. Die in verschiedenen Stufen durchgeführten Messungen zeigten, daß der Turbulenzgrad zwischen den Stufen Werte von $E_0 = 18 - 35 \%$ erreicht. Unter Turbulenzgrad E_0 verstehen wir in diesem Fall die Relation der mittleren quadratischen Schwankungsgeschwindigkeit $\overline{\Delta c}$ zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{c} (siehe § 2):

$$E_0 = \frac{\overline{\Delta c}}{\bar{c}} = \frac{1}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^t c'^2 dt}.$$

Berücksichtigt man, daß die Schwankung in allen drei Richtungen zu beobachten ist, erhält man für die Turbulenzcharakteristik das arithmetische Mittel aus den mittleren quadratischen Werten der Schwankungskomponenten.

Zahlreiche experimentelle Daten zeigen, daß die Veränderung des Turbulenzgrades zu einer Verschiebung des Übergangsbereichs der laminaren Grenzschicht zur turbulenten an der umströmten Oberfläche führt und dadurch den Profilwiderstand beeinflusst.

Es muß noch darauf hingewiesen werden, daß eine Zunahme des Turbulenzgrades unterschiedlich auf die Eigenschaft eines gut oder schlecht umströmten Profils wirkt [2; 30; 4].

Gegenwärtig gibt es eine begrenzte Anzahl von Versuchsdaten über den Einfluß des Turbulenzgrades auf die Leistung der Turbinengitter. Die vorliegenden Daten beziehen sich hauptsächlich auf Leit- und Laufschaufeln mit Impulsbauart, berechnet für Unterschallgeschwindigkeiten.

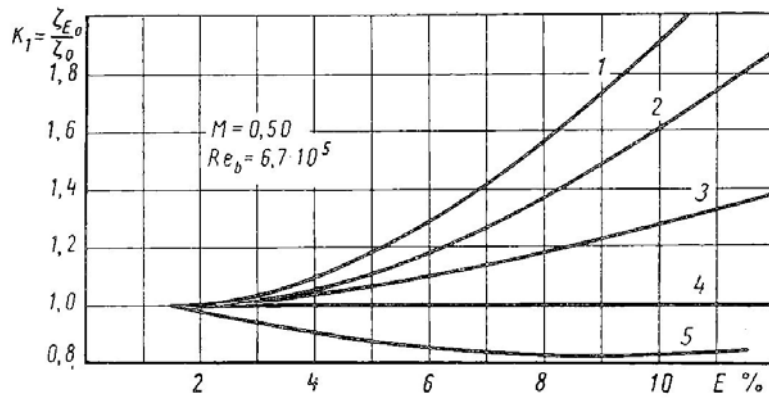


Abb. 71. Einfluß des Turbulenzgrades auf die Profilverluste (1, 2) und die Endverluste (3, 4, 5), bei Reaktionsgittern (2, 5) und Impulsgittern (1, 3, 4)

Zur Berechnung der Profil- und Gesamtverluste in Turbinengittern bei unterschiedlichen Werten von E_0 sind in Abb. 71 Kurven angegeben, die nach Überarbeitung der Versuchsdaten aus verschiedenen Einrichtungen konstruiert wurden [2; 30; 4]. Die Bewertung des Einflusses der Turbulenz auf die Profilverluste erfolgt bei Gleichdruck-Laufschauflern nach Kurve 1 und bei Überdruckschauflern nach Kurve 2. Die Veränderung der Endverluste je nach Turbulenz bestimmt sich bei Laufgittern mit großen Umlenkwinkeln ($\Delta\beta \approx 150^\circ$) nach Kurve 3, bei $\Delta\beta \approx 120^\circ$ nach Kurve 4. Bei Überdruckgittern sind die Endverluste mit zunehmender Turbulenz etwas geringer (Kurve 5).

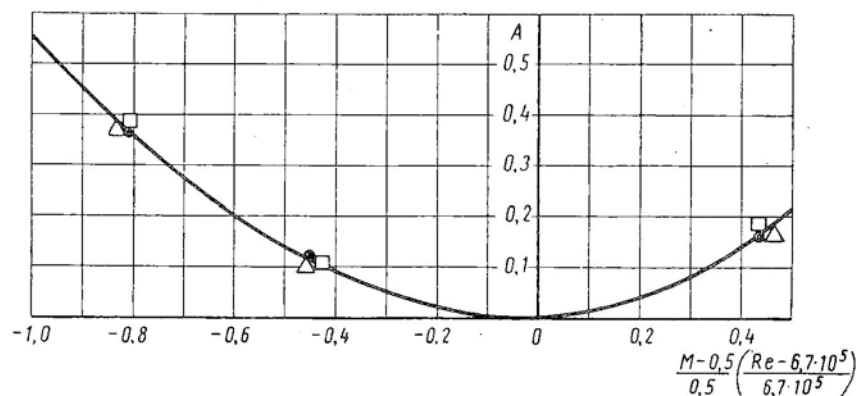


Abb. 72. Zur Berechnung des Einflusses der Turbulenz bei unterschiedlichen Mach-Zahlen

Die in Abb. 71 enthaltenen geglätteten Kurven sind für konstante Werte der Mach- und Reynoldszahlen konstruiert: $M = 0,5$ und $Re = 6,7 \cdot 10^5$. Bei anderen Werten von Re und M fällt der Einfluß der Turbulenz qualitativ anders aus. Bei Ab- und Zunahme der Reynolds- und Machzahlen stellt man eine Verlustzunahme fest; in Abb. 72 ist die entsprechende Korrekturkurve für die Profil- und Endverluste bei variierendem Betrieb

angegeben. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Kurve in Abb. 72 anhand von Versuchsdaten konstruiert wurde, die bei $M < 0,9$ ermittelt wurden.

Die Berechnung der Verluste bei zunehmender Turbulenz ζ_{E_0} erfolgt folgendermaßen: nach den bekannten Profil- und Endverlusten im Gitter ζ_0 bei geringem Turbulenzgrad ($E_0 = 1 - 2\%$) und der Mach-Zahl $M = 0,5$, beide dem Atlas entnommen, und dem Korrekturfaktor K_1 (siehe Abb. 71) ermittelt man die Verluste ζ_{E_0} :

$$\zeta_{E_0} = K_1 \zeta_0 .$$

Bei Veränderung der Mach-Zahl um den Wert $\frac{M - 0,5}{0,5}$ ergibt sich die Korrektur A :

$$A = \frac{\left(\frac{\zeta_{E_0}}{\zeta_0}\right)_M - \left(\frac{\zeta_{E_0}}{\zeta_0}\right)_{M=0,5}}{\left(\frac{\zeta_{E_0}}{\zeta_0}\right)_{M=0,5}} = \frac{(\zeta_{E_0} / \zeta_0)_M - K_1}{K_1}$$

(Abb. 72), und die Verluste im jeweiligen Betrieb werden berechnet nach der Formel

$$(\zeta_{E_0})_M = (AK_1 + K_1)(\zeta_0)_M . \quad (78)$$

§ 32. Ungleichmäßigkeit der Geschwindigkeitsfelder in Turbinengitter. Berücksichtigung des Unregelmäßigkeitseinflusses auf die Verluste in den Gittern

Bekanntlich besitzt die Strömung am Eintritt in die Lauf- und Leitgitter eine recht große Ungleichmäßigkeit der Strömungen, Winkel und Drücke über Teilung und Höhe, bedingt durch die Hinterkantenwirbel und Sekundärströmungen an den Schaufelenden der vorhergehenden Reihe, durch Überdeckungen, sowie durch Leckageströmungen an Nabe und Gehäuse. Eine Ungleichmäßigkeit der Geschwindigkeitsfelder führt selbstverständlich zu einer beträchtlichen Veränderung der Gittereigenschaften, verglichen mit den unter idealen Bedingungen ermittelten Werten. Je nach Geschwindigkeitsprofil am Eintritt können die Gesamtverluste sowohl ab- als auch zunehmen.

Der Einfluß der Ungleichmäßigkeit der Geschwindigkeitsfelder in Umfangsrichtung auf die Verluste ist nach den Ergebnissen statischer Untersuchungen [26], wo die Düsen innerhalb einer einzigen Teilung angebracht und auf verschiedenen Positionen bezüglich des untersuchten Kanals des Laufgitters fixiert sind, eigentlich unbedeutend. Die durchschnittlichen Verluste lagen in solchen Versuchen nahe bei den Verlusten, die bei Tests in gleichmäßiger Strömung ermittelt wurden. Einige Versuchsergebnisse an Zirkulationsmodellen zeigten, daß die Verluste in den Laufgittern etwas zunehmen.

Eine Ungleichmäßigkeit des Geschwindigkeitsfeldes, bedingt durch die Grenzschicht an den Seitenwänden (Typ 1 in Abb. 73a), führt zur Zunahme der Gesamtverluste [4]. Eine näherungsweise Bewertung der Veränderung der Gesamtverluste bei einer Geschwindigkeitsparabel am Eintritt kann nach der in Abb. 73b) enthaltenen Graphik

durchgeführt werden, wo auf der x-Achse der Ungleichmäßigkeitsgrad $l = \left(l - \frac{c_{\text{mitt}}}{c_{\text{max}}} \right)$

100% (c_{mitt} und c_{max} für die auf die Höhe bezogene mittlere und maximale Geschwindigkeit der Zuströmung) und auf der y-Achse die Relation der Gesamtverluste ζ bei einem ungleichmäßigen Geschwindigkeitsfeld zu den Gesamtverlusten ζ_0 bei gleichmäßig verteilten Geschwindigkeiten über die Gitterhöhe am Eintritt bezeichnen ($f = 0$).

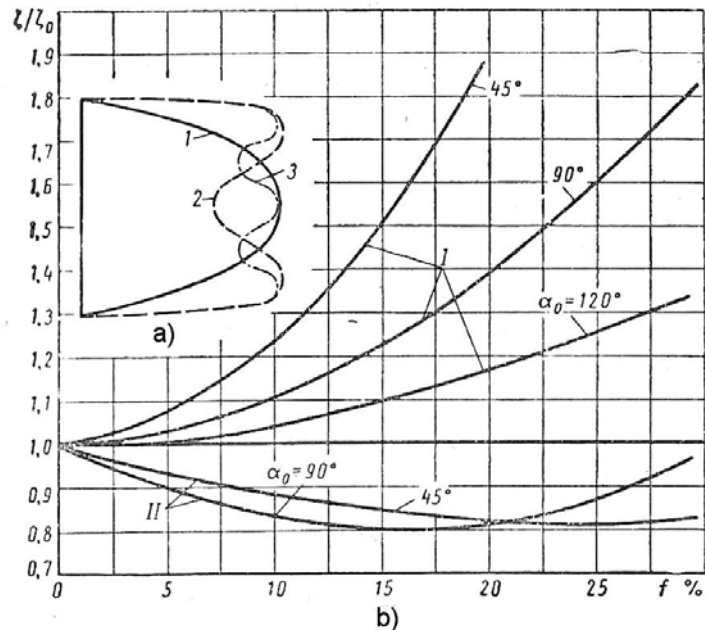


Abb. 73. Einfluß von Ungleichförmigkeitsgrad und Eintrittswinkel auf die Profilverluste I und Gesamtverluste II ($l = 0,4$) in Leitgittern

In Turbinengittern kommt häufig eine Ungleichförmigkeit vom Typ 2 (Abb. 73a)) vor, mit einem lokalen Geschwindigkeitsminimum in einem gewissen Abstand vom Gehäuse, und vom Typ 3 (Abb. 73a) mit einem Geschwindigkeitsdefizit in den mittleren Gitterquerschnitten (bedingt durch Sekundärströmungen in den Gittern). Die Geschwindigkeitskurve vom Typ 3 kommt bei geringen Eintrittswinkeln ins Gitter vor, wo die größten Verluste in den mittleren Querschnitten vorkommen.

Eine Bewertung des Einflusses der Ungleichförmigkeit vom Typ 2 und 3 auf den Wirkungsgrad der Gitter ist komplizierter als bei der Kurve vom Typ 1. Dies hängt damit zusammen, daß sich die Ungleichförmigkeit unterschiedlich auf die Profil- und Endverluste auswirkt. Bei jeder relativen Gitterhöhe gibt es einen optimalen Ungleichförmigkeitswert, bei dem die Gesamtverluste minimal sind.

In Abb. 73b) ist die Abhängigkeit der Relation der Gesamtverluste ζ bei einer ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung vom Typ 3 zu ζ_0 bei $f = 0$ dargestellt. Aus dem Kurvenverlauf geht hervor, daß in einem Reaktionsgitter ($l = 0,4$, $l = 25 \text{ mm}$) mit einem Eintrittswinkel $\alpha_0 = 90^\circ$ minimale Gesamtverluste bei $f \approx 15 \%$ auftreten. Beim

Eintrittswinkel $\alpha_0 = 45^\circ$, wo die Endverluste höher ausfallen, nimmt die optimale Ungleichmäßigkeit auf $f \approx 30\%$ zu (Abb. 73b)). Die angegebenen Kurven sind für Mach-Zahlen von $M \approx 0,7$ konstruiert. Mit Veränderung der Mach-Zahl fällt der Einfluß der Ungleichmäßigkeit qualitativ anders aus. Für eine näherungsweise Bewertung kann man die in Abb. 73 angegebenen Kurven in einem Mach-Zahlenbereich von $M = 0,5 - 0,9$ verwenden.

Literatur

- [2] Врублевская, В. А.: О влиянии начальной степени турбулентности потока на характеристики направляющих и рабочих решеток турбин. – Теплоэнергетика. 1960, № 2.
Vrublevskaĭa, V. A.: O vlijanii načal'noj stepeni turbulentnosti potoka na charakteristiki napravljajuščich i rabočich rešetok turbin. – In: Teploénergetika. Moskva, (1960) Nr 2.
<Über den Einfluß des Anfangsgrades der Strömungsturbulenz auf die Eigenschaften der Leit- und Laufgitter von Turbinen; russ.>
<89: ZZ 187 – in Nr 00>
- [4] Губарев, А. В.: Ли Цай Сю: О влияние неравномерности потока на характеристики решеток. – Теплоэнергетика. 1963, № 6.
Gubarev, A. V.; Li Caj Sju: O vlijanii neravnomernosti potoka na charakteristiki rešetok. – In: Teploénergetika. Moskva, (1963) Nr 6.
<Über den Einfluß der Strömungsungleichmäßig auf die Gitter-Eigenschaften; russ.>
<89: ZZ 187>
- [6] Дейч, М. Е.
Техническая газодинамика.
[Москва:] Госэнергоиздат, 1953, 1961.
Dejč, M. E.
Techničeskaja gazodinamika.
[Moskva:] Gosenergoizdat, 1953, 1961², 670 S.
<Technische Gasdynamik; russ.>
- [26] Кромов, В. Г.: Влияние периодической нестационарности потока в турбинной ступени на потери активных лопаток. – Известия ВТИ. 1950, № 5.
Kromov, V. G.: Vlijanie periodičeskoj nestacionarnosti potoka v turbinnoj stupeni na poteri aktivnych lopatok. – In: Izvestija. Vsesojuznyj Teplotechničeskij naučno-issledovatel'skij Institut imeni F. E. Dzeržinskogo. Moskva, (1950) Nr 5.
<Einfluß eines periodischen instationären Strömungsverhaltens in der Turbinenstufe auf die Verluste von Schaufeln mit Impulsbauart; russ.>
<89: ZZ 724>
- [27] Локай, В. И.: Зависимость профильных потерь в решетке от угла атаки. – Известия АН СССР. ОТН. 1954, № 6.

- Lokaj, V. I.: Zavisimost' profil'nych poter' v rešetke ot ugla ataki. – In: Izvestija. Akademija nauk SSR. Otdelenie tehničeskich nauk. Moskva, (1954) Nr 6.
<Abhängigkeit der Profilverluste im Gitter vom Anströmwinkel; russ.>
<93: 2 Za 1080>
- [30] Лиховицкий, И. Д.: Турбулентность потока в турбинной ступени и профильные потери активных лопаток. – Известия ВТИ. 1950, № 5.
Lichovickij, I. D.: Turbulentnost' potoka v turbinnoj stupeni i profil'nye poteri aktivnych lopatok. – In: Izvestija. Vsesojuznyj Teplotehničeskij naučno-issledovatel'skij Institut imeni F. E. Dzeržinskogo. Moskva, (1950) Nr 5.
<Strömungsturbulenz in der Turbinenstufe und Profilverluste von Laufschaufeln; russ.>
<89: ZZ 724>
- [38] Степанов, Г. Ю.; Шерстюк, А. Н.: К вопросу об определении потерь в плоских турбинных решетках при нерасчетных углах входа. – Известия АН СССР. 1963, № 6.
Stepanov, G. Ju.; Šerstjuk, A. N.: K voprosu ob opredelenii poter' v ploskich turbinnych rešetkach pri nerasčetnyh uglach vchoda. – In: Izvestija. Akademija nauk SSR. Moskva, (1963) Nr 6.
<Abhängigkeit der Profilverluste im Gitter vom Anströmwinkel; russ.>
- [46] Шерстюк, А. Н.: К определению потерь в турбинных решетках при нерасчетных углах атаки. – Энергетика и автоматика. 1960, № 2.
Šerstjuk, A. N.: K opredeleniju poter' v turbinnych rešetkach pri nerasčetnyh uglach ataki. – In: Énergetika i avtomatika. Moskva, (1960) Nr 2, S. 177 – 180.
<Zur Bestimmung der Verluste in Turbinengittern bei Fehlanströmungen; russ.>
-

Stuttgart, den 21. März 2012

Übersetzt von
Ottmar Pertschi
(Dipl.-Übersetzer)