

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

## **Berechnung der Stufen von Dampf- und Gasturbinen nach statischen Untersuchungswerten**

§ 33. Methode der Wärmeberechnung der Stufen unter Heranziehung der aerodynamischen Werte des Atlas

§ 34. Rechenbeispiele für Turbinenstufen

Deutsche Vollübersetzung aus:

Dejč, M. E.; Filippov, G. A.; Lazarev, L. Ja.: Atlas profilej rešetok osevyh turbin.  
Moskva: Mašinstroenie, 1965, S. 42.

Russ.: Глава 5. Расчет ступеней паровых и газовых турбин по данным статических исследований. § 33. Методика теплового расчета ступеней с использованием аэродинамических характеристик атласа. § 34. Примеры расчета турбинных ступеней  
Glava 5. Rasčet stupenej parovych i gazovych turbin po danym statičeskich issledovanij. § 33. Metodika teplovogo rasčeta stupenej s ispol'zovanijem aerodinamičeskich charakteristk atlasa. § 34. Primery rasčeta turbinnych stupenej.

## 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 Stufenauslegung 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

5. Kapitel. Berechnung der Stufen von Dampf- und Gasturbinen nach statischen Untersuchungswerten

### § 33. Methode der Stufenauslegung unter Heranziehung der aerodynamischen Werte des Atlas

In der Praxis des Turbinenbaus sind zwei Verfahren zur Berechnung der Durchströmung von Turbinen am gebräuchlichsten.

Das erste Verfahren beruht auf dem Einsatz von verallgemeinerten Werten, ermittelt bei der Untersuchung eines bestimmten Typs von Modellstufen in Versuchsturbinen (Methode der Berechnung nach den Versuchangaben an Modellstufen). Dieses Verfahren besitzt zahlreiche Vorzüge, wodurch es in großem Umfang eingesetzt werden kann. Zu den wichtigsten Vorzügen gehören: einfache Berechnung und zuverlässige Ergebnisse für den untersuchten Stufentyp.

Das zweite Verfahren [47] beruht auf der Heranziehung der Verlustbeiwerte und Wirkungsgrade in den Leit- und Laufgittern, experimentell (unter statischen Bedingungen) und rechnerisch ermittelt. Die Berechnung erfolgt mit Geschwindigkeitsdreiecken. Diese Methode ist bislang noch nicht so zuverlässig wie die erste, ist jedoch anschaulicher und läßt den Einfluß der Verluste in den einzelnen Elementen der Turbinenstufe erkennen. Bei unterschiedlichen Betriebs- und geometrischen Werten kann man die Bereiche mit maximalen Verlusten und Möglichkeiten zur Erhöhung des Stufenwirkungsgrads aufzeigen.

Bei Anwendung eines neuen Beschauelungstyps in Turbinen sowie bei Berechnungen der Zustände zwischen Stufen bei veränderten Betriebsbedingungen (wo keine Daten vorliegen, die in Versuchsturbinen ermittelt wurden) ist die auf der Berechnung mit Geschwindigkeitsdreiecken beruhende Methode die einzige, mit der man eine annehmbare Genauigkeit ermitteln kann. Bei der Berechnung von Stufen mit langen Schaufeln (starke Fächerung  $d/l < u - 10$ ) scheint gegenwärtig nur die auf der Berechnung mit Geschwindigkeitsdreiecken beruhende Methode einsetzbar zu sein.

Das gesamte zusammengetragene Versuchsmaterial zu Stufen mit starker Fächerung ist für die Aufstellung von verallgemeinerten Abhängigkeiten unzureichend, deshalb erfolgt die Berechnung nach den Querschnitten. Außerdem ist aufgrund der Anschaulichkeit diese Methode zweckmäßiger bei der Darstellung des Sachverhalts im Unterricht.<sup>1</sup>

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades einer Stufe mit  $d/l > 10$  erfolgt die Berechnung nach dem mittleren Querschnitt unter Berücksichtigung der Endverluste in Gittern. Relativer innerer Wirkungsgrad:

$$\eta_{0i} = 1 - \xi_c - \xi_\wedge - \xi_{Sch.R.} - \xi_{Leck.} - \xi_{Austr.geschw.} \quad (79)$$

<sup>1</sup> Eine geeignete Darstellung des Verfahrens zur Berechnung der Turbinenstufen mit Geschwindigkeitsdreiecken kann man in Lehrbüchern über Dampf- und Gasturbinen finden. Insbesondere ist das Buch „Dampfturbinen“ von A. V. Ščegljaev [48] zu empfehlen.

mit den Verlusten in den Leit- und Laufgittern

$$\xi_c = \left( \frac{c_1}{c_a} \right)^2 \xi_c ; \quad \xi_{\wedge} = \left( \frac{w_{1t}}{c_a} \right)^2 \xi_n ; \quad (80)$$

der Austrittsgeschwindigkeit

$$\xi_{\text{Austr.geschw.}} = \left( \frac{c_2}{c_a} \right)^2 ; \quad (81)$$

der Scheibenreibung

$$\xi_{\text{Sch.R.}} = 10^{-3} \frac{dx_a^3}{el_1 \sin \alpha_{1\text{eff}}} \quad (82)$$

und der Leckage

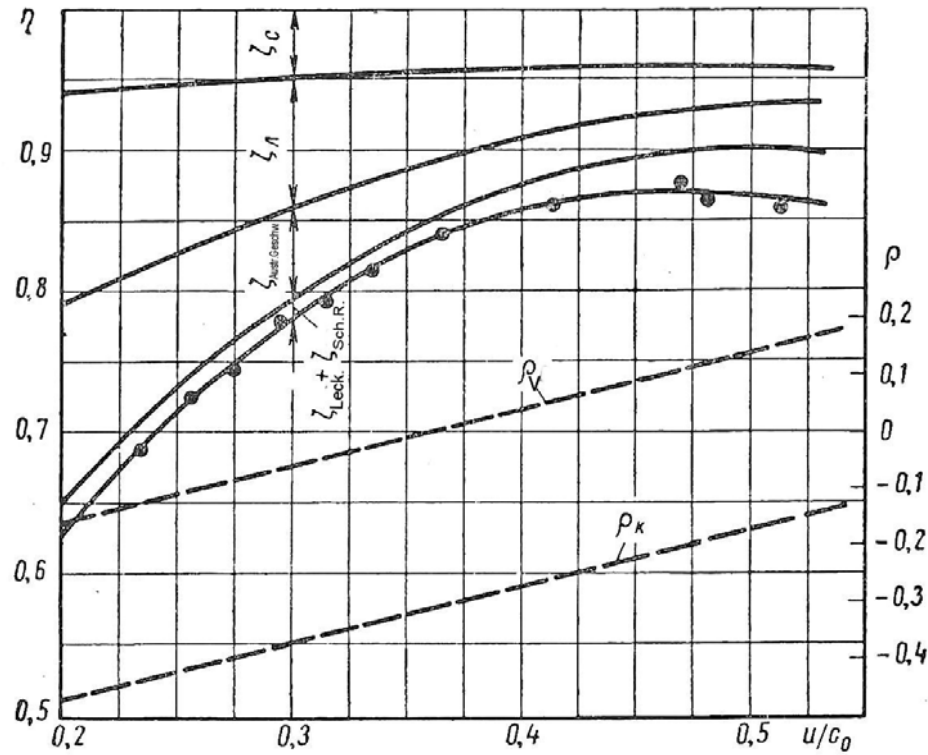
$$\xi_{\text{Leck.}} = \frac{\mu_y}{\mu_1} \cdot \frac{F_y}{F_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{z}} \sqrt{\frac{\rho_v}{1 - \rho_m}} . \quad (83)$$

Hier bezeichnen:  $c_a$  die fiktive Geschwindigkeit, berechnet nach der angenommenen Wärmeübertragung;  $\mu_y, \mu_1$  die Durchflußwerte für die Radialspalte oberhalb des Deckbands von Laufrad und Leitrad ( $\mu_y \approx 0,7$ ;  $\mu_1 = 0,98$ );  $z$  Anzahl der Labyrinth im Laufrad-Deckband;  $\rho_v, \rho_m$  Reaktion der Stufe Aussen- und Mittenschnitt;  $\xi_c, \xi_{\wedge}$  Verlustwerte, ermittelt bei statischen Gitteruntersuchungen;  $e$  Beaufschlagungsgrad;  $F_y$  Spaltfläche.

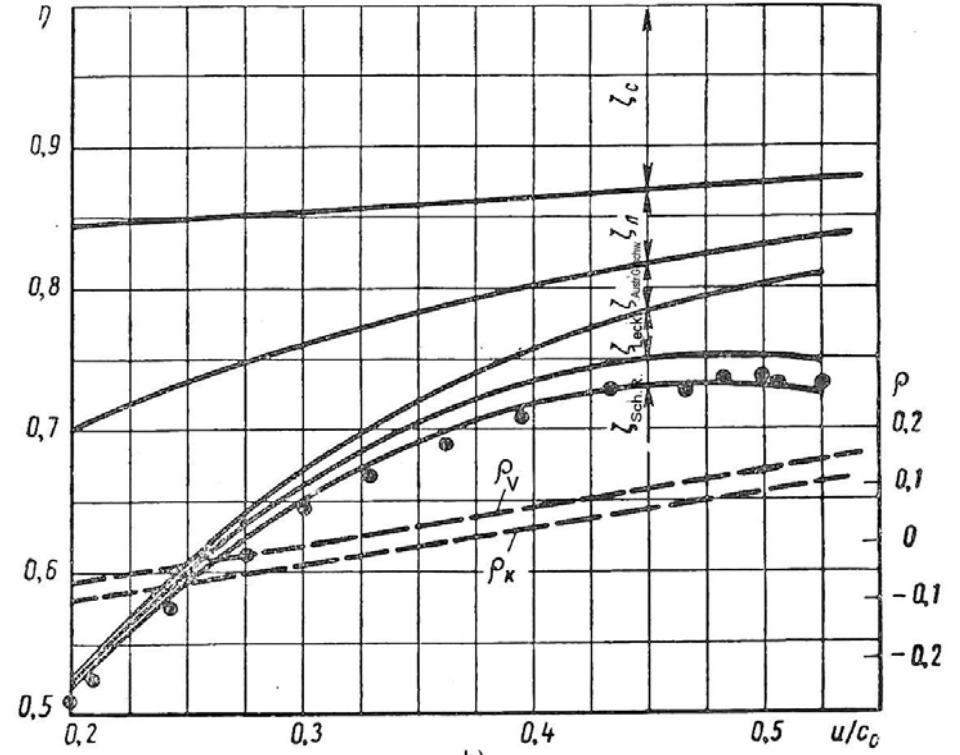
Die Koeffizienten  $\xi_c$  und  $\xi_{\wedge}$  werden aus den im Atlas enthaltenen Versuchskurven entnommen. Liegen im Atlas keine Versuchswerte vor, die den nach den verlangten geometrischen und Betriebswerten des zu berechnenden Systems entsprechen, dann werden verallgemeinerte Abhängigkeiten benutzt.

Von den geometrischen Eigenschaften muß man unbedingt folgende wegen ihres Einflusses berücksichtigen: Fertigungsfehler, Oberflächengüte, Dicke der Hinterkanten, Unterteilung, Staffelungswinkel, Fächerung, Schaufelneigung, meridionale Linienführungen, Überdeckungen und dgl. Bei geringen relativen Höhen verdient die Herstellungsart der Stufen und besonders der Leiträder von Impulsstufen große Aufmerksamkeit, ob sie gefräst, komposit, geschweißt oder gegossen sind. Von den Betriebsbedingungen müssen folgende berücksichtigt werden: Eintrittswinkel, Turbulenz, Ungleichmäßigkeit der Schaufel, M- und Re-Zahlen, Feuchtigkeit, Ablagerungen u.s.w.

Die Angaben zum Einfluß der geometrischen und Betriebswerte auf die Verluste und Austrittswinkel sind in den §§ 19 – 32 enthalten. Wie ihre Korrekturen berücksichtigt werden, ist ebenfalls dort angegeben. Die Geschwindigkeitsdreiecke werden nach den experimentellen oder rechnerischen Austrittswinkeln ( $\alpha_1$ ;  $\beta_2$ ) konstruiert, die Volumenströme durch die Stufen nach den minimalen Gitterquerschnitten und den effektiven Winkeln ( $\alpha_{1\text{eff}}$ ;  $\beta_{2\text{eff}}$ ).



a)



b)

Abb. 74. Vergleich der Versuchs- und Rechenwerte des Wirkungsgrades der Stufen:

a)  $\theta = 8,3$ ;  $\bar{l}_1 = 0,94$ ; b)  $\theta = 40,0$ ;  $\bar{l}_1 = 0,20$

### § 34. Rechenbeispiele für Turbinenstufen

Berücksichtigt man die im vorhergehenden Paragraphen genannten geometrischen und Betriebswerte, kann man nach den verallgemeinerten Graphiken des Atlas mit ausreichend hoher Genauigkeit die Wirkungsgrade und Durchflusswerte der Stufen errechnen. Eine besonders große Genauigkeit erhält man bei Stufen mittlerer Fächerung ( $d/l \approx 10$ ) mit großen relativen Schaufelhöhen ( $l/b > 1,0$ ). Die Fehlergröße liegt bei  $\Delta\eta_{oi} \approx \pm 1,5\%$ .

Mit abnehmender relativer Höhe nimmt auch die Rechengenauigkeit ab, da die Fertigungsgenauigkeit der Deckbänder, sowie die Leckagen, Überdeckungen, Strömungsungleichmäßigkeiten und dgl. einen höheren Einfluß bekommen. Große Abweichungen der Rechenwerte von den Versuchsergebnissen in Turbinen erhält man auch bei Stufen mit geringer  $d/l < 4$ , was hauptsächlich damit zusammenhängt, daß die Strömung in den Nabenquerschnitten abreißt, die Strömungslinie krummlinig wird, sowie von der Abweichung der Reaktion von der errechneten.

Als Beispiel sind in den Kurven von Abb. 74 die experimentellen und (nach den Werten des Atlas) errechneten Kurven für Stufen mit den nachfolgenden geometrischen und Betriebswerten angegeben:

a)  $\theta = 8,3$ ;  $\bar{l}_1 = 0,94$ ;  $M_o = 0,7$ ;  $Re_{clt} = 5 \cdot 10^5$ ;

b)  $\theta = 40,0$ ;  $\bar{l}_1 = 0,20$ ;  $M_o = 0,8$ ;  $Re_{clt} = 7 \cdot 10^5$ .

In den Kurven ist ebenfalls die Verlustbilanz in diesen Stufen angegeben.

Die Berechnungen von mehrstufigen Turbinen lieferten ebenfalls gute Übereinstimmungen mit den Daten, die mit Versuchsturbinen gewonnen wurden.

Weniger genaue Ergebnisse erhielten wir bei der Berechnung von Stufen im Überschallgeschwindigkeitsbetrieb. Dies läßt sich in erster Linie dadurch erklären, daß die geometrischen Gitterwerte einen starken Einfluß auf die Eigenschaften von Überschallstufen haben, was man bei den Berechnungen nicht immer genau berücksichtigen kann.

## Literatur

- [47] Щегляев, А. В.; Дейч, М. Е.; Филиппов, Г. А.: Расчет ступеней по результатам статических продувок решеток. – «Теплоэнергетика», 1962, № 3.  
Ščegljaev, A. V.; Dejč, M. E.; Filippov, G. A.: Rasčet stupenej turbin po rezul'tatam statičeskich produvok rešetok. – In: Теплоэнергетика. Moskva, (1962) Nr 3.  
<Berechnung der Turbinenstufen nach den Ergebnissen statischen Gitterdurchblasens; russ.>
- [48] Щегляев, А. В.: Паровые турбины. Госэнергоиздат, 1948.  
Ščegljaev, Andrej Vladimirovič: Parovye turbiny. Moskva: Gosénergoizdat, 1948, 251 S.  
<Dampfturbinen; russ.>

---

Stuttgart, den 15. November 2012

Übersetzt von  
Ottmar Pertschi  
(Dipl.-Übersetzer)