

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

ALLGEMEINES ZU DEN PROFILIERUNGSMETHODEN UND AERODYNAMISCHEN EIGENSCHAFTEN DER GITTERPROFILE VON AXIALTURBINEN

§ 1. Klassifikation der Gitter.

§ 2. Bezeichnung der Größen, Geometrie und Betriebswerte der Gitter.

§ 3. Experimentelle Bestimmungsmethode der aerodynamischen Gittereigenschaften.

§ 4. Allgemeine Tabelle der Turbinengitterprofile.

§ 5. Normenblätter für Gitterprofile

Deutsche Vollübersetzung aus:

Dejč, M. E.; Filippov, G. A.; Lazarev, L. Ja.: Atlas profilej rešetok osevyh turbin.

Moskva: Mašinostroenie, 1965, S. 7 – 11.

Russ.: Часть первая. Методы профилирования и аэродинамические характеристики решеток.

Глава 1. Общие сведения. § 1. Классификация решеток. § 2. Обозначения основных величин, геометрические и режимные параметры решеток.

§ 3. Методика опытного определения аэродинамических характеристик решеток. § 4. Общая таблица профилей турбинных решеток. § 5. Нормали на профили решеток.

Časť prvaja. Metody profilirovanija i aërodinamičeskie charakteristiki rešetok.

Glava 1. Obščie svedenija. § 1. Klassifikacija rešetok. § 2. Oboznačenija osnovnyh veličin, geometričeskie i režimnye parametry rešetok. § 3. Metodika opytnogo opredelenija aërodinamičeskich charakteristik rešetok. § 4. Obščaja tablica profilej turbinnyh rešetok. § 5. Normali na profili rešetok.

Der Atlas enthält die Profile der Leit- und Laufgitter von Axialturbinen, berechnet auf Unterschall-, schallnahe und Überschall-Geschwindigkeiten. Im Atlas sind die speziellen Schaufelprofile mit geringen Höhen, den charakteristischen Querschnitten der Stufen mit langen Schaufeln usw. angegeben. Außerdem wird untersucht, welchen Einfluß die verschiedenen Geometrien und Betriebswerte auf die Gittereigenschaften haben. Die Möglichkeiten zur Berechnung der Turbinenstufen nach den im Atlas angegebenen Werten werden analysiert.

Der Atlas ist ein Lehrbuch für Studenten der Energiewirtschaft an Technischen Hochschulen, kann aber auch für Ingenieure und Wissenschaftler in der Turbinenbauindustrie und an wissenschaftlichen Forschungsinstituten nützlich sein. (S. 2)

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	4
§ 33. Methode der Stufenauslegung unter Heranziehung der aerodynamischen Werte des Atlas	42	4
§ 34. Rechenbeispiele für Turbinenstufen	42	7
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. 8

1. Teil. Profilierungsmethoden und aerodynamische Eigenschaften der Gitter

1. Kapitel. Allgemeines

§ 1. Klassifikation der Gitter

Alle im Turbinenbau eingesetzten Gitter kann man in mehrere Gruppen unterteilen, klassifiziert nach den verschiedenen Merkmalen.

Nach ihrem Zweck teilt man die Turbinengitter ein in Reaktions- oder Überdruck-Leitgitter (unbeweglich) und -Laufgitter (rotierend), sowie in Impuls- oder Gleichdruck-Lauf- und Leitgitter.

Letztere kann man wiederum nach der Zahl M^1 beim Ein- oder Austritt in mehrere Gruppen unterteilen: A – Unterschall ($M < M^*$); B – schallnahe ($M^* < M < 1,2$); B – Überschall ($M > 1,2$).

Für die Reaktionsgitter ist eine klar ausgeprägte Düsenströmung in den Schaufelpassagen charakteristisch. Bei den Impulsgittern sind die durchschnittlichen statischen Drücke am Ein- und Austritt annähernd gleich groß und unterscheiden sich gewöhnlich nur durch die Größe des Druckverlusts in den Schaufelteilungen.

Man kann die Gitter auch nach ihrer Geometrie klassifizieren, d.h. hinsichtlich Höhe und Fächerung, deren Einfluß gemeinsam in Betracht gezogen werden muß.

Im Strömungsbereich von Gas- und Dampfturbinen werden Gitter mit geringer relativer Höhe $\left(\bar{l} = \frac{l}{b} < 1,0\right)$ und geringer Fächerung $\left(\theta = \frac{d}{l} > 20\right)$ eingesetzt, ebenso Gitter mittlerer Höhe $\left(\bar{l} = 1,0 - 3,0\right)$ und mittlerer Fächerung $\left(\theta = 10 - 20\right)$ und Gitter mit großer Höhe $\left(\bar{l} > 3,0\right)$ und großer Fächerung $\left(\theta < 10\right)$.

Ungeachtet der geringen Fächerung hat die Strömung in den Gittern der ersten Gruppe eine klar ausgeprägte räumliche Struktur wegen der geringen Höhe, die dazu führt, daß die sekundären Strömungen zusammenfließen. Wegen der geringen Fächerung kann man mit großer Sicherheit die Versuchsergebnisse für ebene Gitter verwenden.

Bei vereinfachter Untersuchung der zweiten Gruppe kann man die Strömung in den Gittern als eben ansehen, wobei Wurzel- und periphere Querschnitte ausgeschlossen sind, bei denen die Bewegung aufgrund von Sekundärströmungen, Querströmungen und aus zahlreichen anderen Gründen räumlich ist.

¹ Die Zahl $M = \frac{c}{\alpha}$ ist die Relation der Strömungsgeschwindigkeit c zur Schallgeschwindigkeit α ; M^* – die kritische Zahl M , bei der in einem bestimmten Punkt auf dem Profil $M_i = 1$ erreicht wird (siehe § 2).

Lange Schaufeln mit großer Fächerung gehören zur Gruppe der räumlichen Gitter. Den mittleren Querschnitt solcher Gitter kann man in erster Näherung nach den Eigenschaften ebener Gitter mit entsprechenden Profilen berechnen. Die Schaufeln der dritten Gruppe sind gewöhnlich mit in der Höhe variablem Profil ausgestattet. In diesem Fall ist die Verbindung der Querschnitte untereinander ein sehr bedeutendes Problem. Über die Schaufelhöhe muß eine gleichmäßige Veränderung der Isobaren des statischen Drucks an der Saug- und der Druckseite der Profile sichergestellt werden. Dabei müssen die Profilformen in den verschiedenen Querschnitten den jeweiligen M- und Re-Zahlen entsprechen.

Die Formen der wesentlichen Profile und Gitter sind mit Bezeichnung einiger Geometrie-Werte in Abb. 1 und Tab. 1 dargestellt.

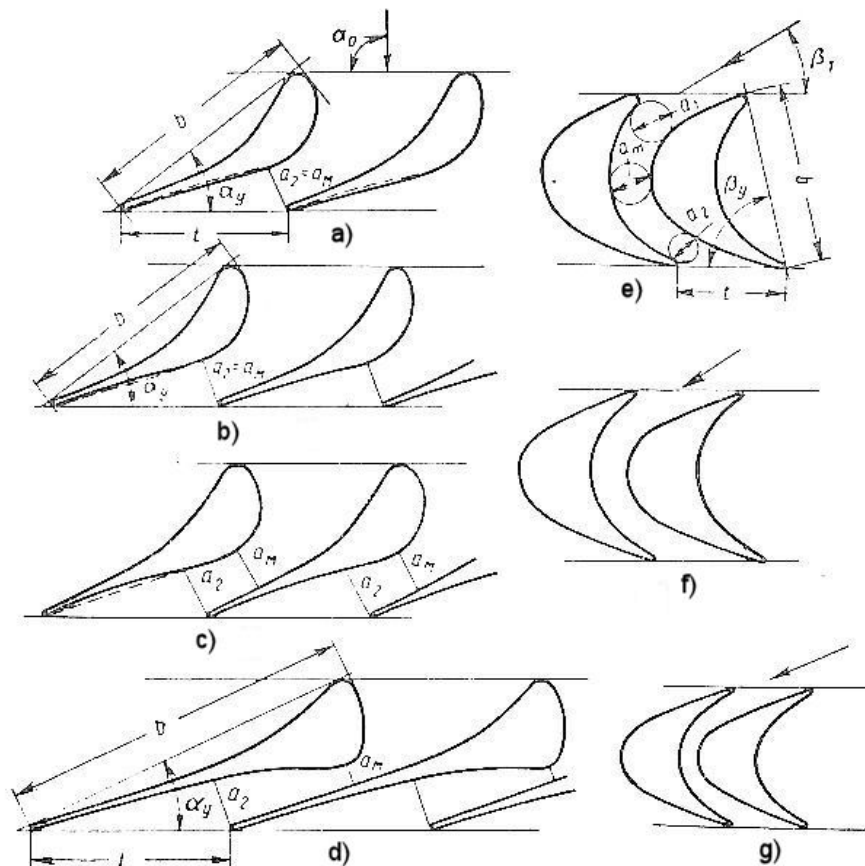


Abb. 1. Formen der Profile und Kanäle reaktiver und aktiver Gitter für verschiedene Zahlen von M:

- a) Reaktionsgitter für Unterschall- und schallnahe Geschwindigkeiten;
- b) Reaktionsgitter mit sich verengenden Kanälen und konkaver Rückseite im schrägen Stoß;
- c) und d) Reaktionsgitter mit konvergent-divergenten Kanälen für Überschallgeschwindigkeiten;
- e), f) und g) Impulsgitter für Unterschall-, schallnahe und Überschallgeschwindigkeiten.

Tabelle 1

Name	$\alpha_1^{exp.}$; $\beta_2^{exp.}$ in Grad	$\alpha_0^{exp.}$; $\beta_1^{exp.}$ in Grad	$\bar{t}^{exp.}$	$\alpha_y^{exp.}$; $\beta_y^{exp.}$ in Grad	$M^{exp.}$	Altär Name	Nr-der Liste
C-9009A	7—11	70—120	0,72—0,85	27—31	0,65—0,95	TC-0A	1
C-9012A	10—14	70—120	0,72—0,87	31—35	0,60—0,85	TC-1A	2—3
C-9015A	13—17	70—120	0,70—0,85	35—40	0,50—0,85	TC-2A	4—5
C-9018A	16—20	70—120	0,70—0,80	40—44	0,50—0,85	TC-3A	5
C-9022A	20—24	70—120	0,70—0,80	43—46	0,60—0,95	—	6
C-9027A	24—30	70—120	0,65—0,75	46—50	0,60—0,90	—	7
C-9033A	30—36	70—120	0,62—0,75	51—59	0,65—0,95	—	7
C-9038A	35—42	70—120	0,60—0,73	60—67	0,65—0,95	—	8
C-5515A	12—18	45—75	0,72—0,87	51—57	0,70—0,95	TC-1A-1	9
C-5520A	17—23	45—75	0,70—0,85	61—67	0,70—0,95	—	10
C-4525A	21—28	35—65	0,60—0,75	63—69	0,65—0,95	—	11
C-6030A	27—34	45—85	0,52—0,70	68—73	0,65—0,95	—	12
C-6035A	32—38	45—85	0,42—0,65	70—75	0,70—0,95	—	13
C-6520A	17—23	50—85	0,60—0,70	50—56	0,70—0,95	—	14
C-7025A	22—28	55—90	0,50—0,67	57—63	0,70—0,95	—	15
P-2314A	12—16	20—30	0,60—0,75	75—80	0,75—0,95	TP-0A	16—17
P-2617A	15—19	23—35	0,60—0,70	75—80	0,75—0,95	TP-1A	17—18
P-3021A	19—24	25—40	0,58—0,68	77—81	0,70—0,90	TP-2A	19—20
P-3525A	22—28	30—50	0,55—0,65	78—82	0,60—0,85	TP-3A	20—21
P-4629A	25—32	44—60	0,45—0,58	75—80	0,55—0,85	TP-4A	22
P-5033A	30—36	47—65	0,43—0,55	76—80	0,55—0,85	TP-5A	23
P-5535A	32—38	50—70	0,42—0,52	77—81	0,55—0,85	TP-6A	24
P-6038A	35—42	55—75	0,41—0,51	75—80	0,55—0,85	TP-7A	24
P-2314A _K	12—16	20—30	0,60—0,75	75—80	0,70—0,95	TP-0A _K	25—26
P-2617A _K	15—19	23—45	0,60—0,70	77—81	0,70—0,95	TP-1A _K	26—27
P-3021A _K	19—24	25—40	0,58—0,68	78—82	0,70—0,90	TP-2A _K	28—29
P-3525A _K	22—28	30—50	0,55—0,65	78—82	0,60—0,85	TP-3A _K	29—30
C-9012B	10—14	70—120	0,72—0,87	31—35	0,85—1,10	TC-1B	31
C-9015B	13—17	70—120	0,70—0,85	35—40	0,85—1,10	TC-2B	32
C-9018B	16—20	70—120	0,70—0,80	40—44	0,85—1,10	TC-3B	31
P-2717B	15—19	23—45	0,57—0,65	76—81	0,80—1,10	TP-1B	33—34
P-2717B _K	15—19	23—45	0,57—0,68	76—81	0,85—1,10	—	34—35
P-3021B	19—24	25—40	0,55—0,65	77—81	0,85—1,10	TP-2B	36
P-3525B	22—28	30—50	0,55—0,65	77—81	0,85—1,10	TP-3B	37
P-4629B	25—32	44—60	0,53—0,62	77—81	0,85—1,10	TP-4B	37
C-9008B	7—10	70—120	0,60—0,70	27—31	1,4—1,80	—	38
C-9012B	10—14	70—120	0,58—0,68	39—43	1,4—1,70	—	39
C-9015B	13—17	70—120	0,55—0,65	38—42	1,4—1,70	—	40
C-9022B	18—24	70—120	0,55—0,65	47—52	1,4—1,70	—	41
P-2118B	16—20	19—24	0,60—0,70	86—89	1,3—1,60	TP-1B	42
P-2522B	20—24	23—27	0,54—0,65	87—90	1,35—1,60	TP-2B	43
P-2926B	23—27	26—32	0,53—0,63	87—90	1,35—1,60	TP-3B	44
P-3330B	28—32	30—36	0,51—0,61	87—90	1,35—1,60	TP-4B	44
P-3025B	23—27	28—36	0,48—0,58	87—90	1,35—1,75	—	45
C-9013Π	10—16	70—120	0,41—0,50	42—47	—	—	46
C-9013ΠP	10—16	70—120	0,55—0,67	41—48	—	—	47
P-2729B	26—33	25—35	0,42—0,50	84—88	0,95—1,30	—	48
P-5530B	26—34	40—65	0,50—0,70	70—74	0,90—1,20	—	49
P-9025B	22—28	70—120	0,55—0,72	41—46	0,90—1,20	—	49
P-14520B	17—23	125—160	0,65—0,90	27—32	1,10—1,50	—	50
P-16017B	15—20	130—162	0,80—0,95	19—28	1,15—1,45	—	50
P-16017A	15—20	135—162	0,80—1,00	20—24	0,85—1,15	—	51
P-16017B	15—20	135—162	0,85—1,00	16—20	1,55—1,80	—	52

§ 2. Bezeichnung der Größen, Geometrie und Betriebswerte der Gitter

Die Gitter werden bestimmt durch die Form des Profils und der Schaufelteilung. Die Profilform wird durch Koordinaten¹ im rechteckigen Koordinatensystem (x, y) vorgegeben, wobei die x-Achse mit der Flügeltiefe kongruent ist (Abb. 2). Der Koordinatenanfang liegt bei der Profilverdkernte.

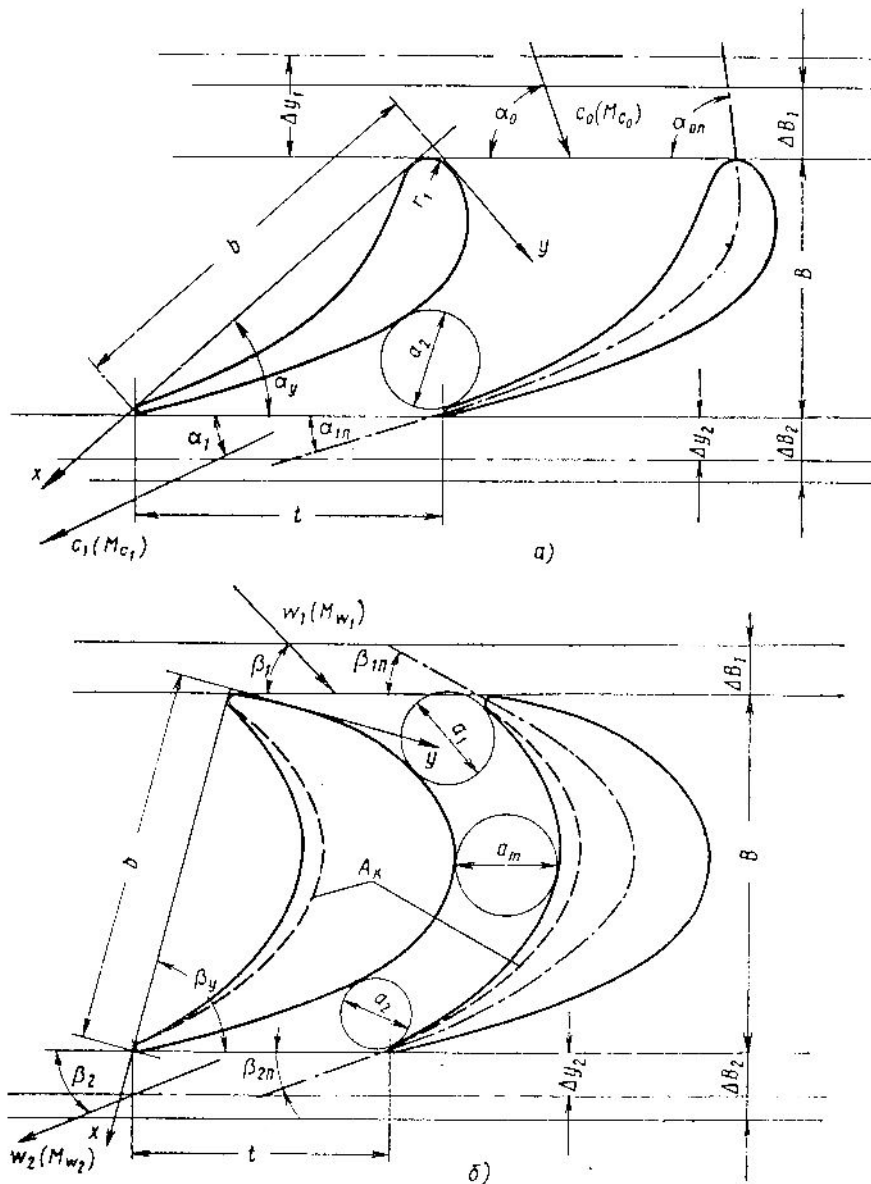


Abb. 2. Bezeichnungen der Geometrie- und Betriebswerte der Turbinengitter:

a) Leitgitter; b) Laufgitter.

¹ In der Praxis geben einige Werke und Forschungsinstitute Profil- und Kanalform auch durch den Kreisbogen an.

Bei gegebener Profilform hängen Abmessungen und Form der Schaufelpassagen von den wichtigsten geometrischen Werten des Gitters ab. Hierzu zählen (vgl. Abb. 1 und 2):

b – Sehnenlänge

t – Teilungsabstand (der Gitter)

B – Gitterbreite (des Profils)

l – Schaufelhöhe (des Gitters)

$\alpha_y; \beta_y$ – Einstellwinkel der Profile

d – mittlerer Gitterdurchmesser (ringförmig)

$a_1; a_m; a_2$ – Kanalbreite am Eintritt, im mittleren Querschnitt und am Austritt

δ – Dicke der Hinterkante

R – Ausrundungsradius der Vorder- und Hinterkanten des Profils

$\alpha_{on} (\beta_{in})$ – Skelettwinkel¹ der Profilverkanten

$\alpha_{in} (\beta_{2n})$ – Skelettwinkel der Profilhinterkanten

$\alpha_{\text{eff}} = \arcsin \frac{a_2}{t_1}; \beta_{\text{eff}} = \arcsin \frac{a_2}{t_2}$ – effektive Gitterwinkel

$x; y$ – Profilkordinaten, gleichzeitig Koordinaten der Kanaloberflächen

$\Delta B_1; \Delta B_2$ – Differenz zwischen der Gitterbreite und den Bändern am Ein- und Austritt (Überstehen der Bänder)

$\Delta y_1; \Delta y_2$ – normale Abstände zwischen dem Gitter und den Messebenen am Ein- und Austritt

s – Abstand von der Eintrittskante bis zum Sollquerschnitt auf der Profilführung

s_{sum} – Gesamtlänge des Profils an der Rückseite und der konkaven Profiloberfläche

Entsprechend den Vorschriften der Ähnlichkeits- und Modelltheorie sowie nach unserer Rechenmethode geht die Gitterstruktur in dimensionslose (relative) geometrische Werte über:

$$\bar{t} = \frac{t}{b} \text{ – relative Teilung}$$

$$\bar{l} = \frac{l}{b} \text{ – relative Höhe}$$

$$\theta = \frac{d}{l} \text{ – Fächerung des Gitters}$$

$$\bar{a}_m = \frac{a_m}{a_1}; \bar{a}_2 = \frac{a_2}{a_1} \text{ – relative Kanalbreiten}$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{a_2} \text{ – relative Kantendicke}$$

$$\bar{x} = \frac{x}{b}; \bar{y} = \frac{y}{b} \text{ – relative Profilkordinaten}$$

$$\bar{\kappa}_{\text{rauh}} = \frac{\kappa_{\text{rauh}}}{b} \text{ – relative Rauhgigkeit der Profiloberflächen (des Kanals)}$$

¹ Die Skelettwinkel des Profils sind die Winkel zwischen den Tangenten zur mittleren Profillinie an der Ein- und Austrittskante und der Gitterfront (Abb. 2).

$$\bar{s} = \frac{s}{s_{sum}} - \text{relativer Profillänge.}$$

Bei der Untersuchung des Zusammenwirkens von zwei Gittern (Leit- und Laufgitter), d.h. bei der Planung einer Stufe, kommen noch weitere geometrische Werte hinzu.

Δ_n – obere (periphere) Überdeckung, die die Vergrößerung der Laufgitterhöhe an der Peripherie angibt

Δ_k – untere (Wurzel-)Überdeckung

$\Delta = l_2 - l_1$ – volle Überdeckung

Δ_a – Axialspalt: Abstand zwischen den Austrittskanten der Leit- und Eintrittskanten der Laufgitter.

Die Strömung durch die Turbinengitter wird bestimmt durch die Gesamtheit der Parameter, die nach der Ähnlichkeitstheorie und den Modellierungsvorschriften festgelegt wurden. Zur Gruppe der Betriebswerte der Gitter gehören:

α_0 ; β_1 – Eintrittswinkel der Strömung ins Gitter

$M = \frac{c}{a}$; $\lambda = \frac{c}{a_*}$; $\xi = \frac{c}{c_{max}}$ – dimensionslose Geschwindigkeiten am Eintritt ins

Gitter bzw. hinter dem Gitter

c ; w – Geschwindigkeit am Eintritt bzw. am Austritt aus dem Leitgitter und entsprechend aus den Laufgittern

a – Ausdehnungsgeschwindigkeit schwacher Störungen (Schallgeschwindigkeit)

a_* – kritische Geschwindigkeit

c_{max} – maximale Ausströmungsgeschwindigkeit in Vakuum

$Re = \frac{cb}{\nu}$ – Reynolds-Zahl

ν – kinematische Viskosität

$x_a = \frac{u}{c_a}$ – relative Umfangsgeschwindigkeit

u – Umfangsgeschwindigkeit

c_a – fiktive Geschwindigkeit, gleich der in der Stufe verfügbaren Wärmeübertragung

$E_0 = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int c'^2 dt}$ – Turbulenzgrad der Strömung vor dem Gitter (anfänglicher

Turbulenzgrad)

c' – Schwankungsanteil der Geschwindigkeit

Δt – Zeitabschnitt der Geschwindigkeitsmittelung.

Die dimensionslosen Geschwindigkeit M ; λ ; ξ und die Reynolds-Zahl werden nach den Strömungswerten am Eintritt oder hinter dem Gitter berechnet. Diese Größen können nach den absoluten oder relativen Geschwindigkeiten ermittelt werden. Dementsprechend werden für die Größen folgende Indizes verwendet:

1 – beim Eintritt ins Gitter

2 – hinter dem Gitter

c – für die absolute Strömung

w – für die relative Strömung.

So sind z. B. bei M_{c_1} (Re_{c_1}) die Zahlen M und Re beim Eintritt in das Laufgitter bei absoluter Geschwindigkeit; M_{w_1} , Re_{w_1} dasselbe bei relativer Geschwindigkeit usw.

Die aerodynamischen Gittereigenschaften bezeichnen folgende Größen:

- ζ – Energieverlustkoeffizient im Gitter
- α_1 ; β_2 – Strömungsaustrittswinkel aus dem Gitter
- μ – Durchflußkoeffizient.

Zur Bezeichnung der Koeffizienten der Energieverlustkomponenten wurden folgende Indizes gewählt:

- pr – Profilverluste
- end – Endverluste
- kant – Kantenverluste
- reib – Reibungsverluste
- sum – Gesamtverluste.

Im Turbinenbau und Forschungslaboren werden unterschiedliche Bezeichnungen für die Profile und Gitter verwendet. Bei der Wahl des Bezeichnungssystems für die Gitter im vorliegenden Atlas wurden Geometrie und Betriebswerte, Düsenart der Gitterkanäle, optimale Ein- und Austrittswinkel der Strömung sowie die rechnerischen dimensionslosen Geschwindigkeiten berücksichtigt. Früher galt ein System von Bezeichnungen, in dem der erste Buchstabe T auf die Gittergruppe (Turbine) verwies, der zweite Buchstabe C oder P auf den Gittertyp (Leitgitter, Reaktions- oder Impuls-Laufgitter). Die Zahlen $0, 1, 2, 3...$ usw. bezeichneten die Ein- und Austrittswinkel der Strömung (0 für ganz kleine Austrittswinkel). Der letzte Buchstabe im Bezeichnungssystem verweist auf die rechnerische Zahl M : A – Unterschallgeschwindigkeiten, B – schallnahe und C – Überschallgeschwindigkeiten.

Um die Anschaulichkeit im Atlas zu erhöhen, wurde das Bezeichnungssystem verändert. Bei den neuen Bezeichnungen gibt der erste Buchstabe den Gittertyp an (C – Reaktions-Leit- oder Laufgitter, P – Impuls-Laufgitter). Das erste Ziffern paar bezeichnet den Eintrittswinkel, das zweite den optimalen Austrittswinkel (für Profile mit Eintrittswinkeln über 100° bezeichnen drei Ziffern den Eintrittswinkel). Es muß darauf hingewiesen werden, daß für jedes Gitter ein bestimmter, ausreichend großer Ein- und Austrittswinkelbereich gilt; bei der Profilbezeichnung werden die Winkelmittelwerte des optimalen Bereichs angegeben, wie in der Profiltabelle enthalten (siehe Tab. 1).

Wie bei den alten Bezeichnungen bestimmt der letzte Buchstabe den rechnerischen Betrieb nach der Mach-Zahl.

Die Indizes für letzteren Buchstaben bezeichnen:

- m – Meridionalprofilierung
- κ – Gitter mit geringer Höhe
- n – Regelstufengitter
- p – Gitter mit breiter werdenden Kanälen.

So ist z.B. das Gitter C-9015A_M ein Reaktionsgitter (Leit- oder Laufgitter), berechnet auf den Eintrittswinkel $\alpha_0 = 90^\circ$, Austrittswinkel $\alpha_1 = 15^\circ$, Unterschallgeschwindigkeiten, mit Meridionalprofilierung; das Gitter P-3021A_K ein Impuls-Laufgitter, berechnet auf den Eintrittswinkel $\beta_1 = 30^\circ$ und Austrittswinkel $\beta_2 = 21^\circ$, Unterschallgeschwindigkeit, geringe Höhe.

§ 3. Experimentelle Bestimmungsmethode der aerodynamischen Gittereigenschaften

Die wichtigsten aerodynamischen Eigenschaften, wie im Atlas angegeben, sind die Energieverlustwerte in den Gittern ζ und die Strömungsaustriittswinkel α_1, β_2 in Abhängigkeit von den verschiedenen Betriebskennwerten ($M; Re; \beta_1; E_0$ u.a.) und den Geometrien ($\bar{t}; \bar{l}; \alpha_y; \beta_y; \delta; \theta$ u.a.).

Mit Ausnahme von $\alpha_{2\text{eff}} = f(\bar{t}; \alpha_y)$ und $\beta_{2\text{eff}} = f(\bar{t}; \beta_y)$ wurden alle Eigenschaften experimentell ermittelt: Untersuchung von ebenen runden Gittern in Windkanälen mittels Traversierung der Strömung durch Sonden. Ein großer Teil der Versuchsdaten bezieht sich auf Untersuchungen der Gitter an Luft. Einige Eigenschaften wurden in Dampfwindkanälen ermittelt, die mit Wasserdampf arbeiten. Verwendet man Wasserdampf, kann man den Meßbereich der Re- und M-Zahlen wesentlich vergrößern, die Durchflußmenge der Gitter zuverlässig messen und die Gitter bei Nassdampfströmung untersuchen.

Voruntersuchungen zeigten, daß die Tests der Gitter an Luft und mit erhitztem Dampf ziemlich übereinstimmende Ergebnisse liefern: die Verteilung der Drücke über das Profil, die Verlustwerte und Durchflußmengen, ermittelt in Luft- und Dampfversuchen, stimmen gut überein.

Die Konstruktionszeichnungen für die eingesetzten Windkanäle zur Untersuchung der Gitter sind sehr verschieden. Häufig werden im Moskauer Energieinstitut (MÉI) Luft- und Dampfwindkanäle mit Drehwänden der Anschlußdüse, geschlossenem (bzw. offenem) Arbeitsbereich und Diffusor verwendet.

Das Grundschema eines Windkanals mit geschlossenem Arbeitsbereich ist in Abb. 3 dargestellt. Die Gitter werden in einem solchen Kanal an Dampf oder Luft untersucht. In den Arbeitsbereich werden Schaufelpakete mit bis zu 100 mm Höhe und einer Frontlänge bis 350 mm eingebracht. Der Eintrittswinkel der Strömung ins Gitter wird zwischen 15 und 165° variiert. Der Strömungsaustriittswinkel kann zwischen 8 und 50° variieren.

Am Eintritt in den Arbeitsbereich ist der Konfusor 1 angebracht. Die Druckkammer des Arbeitsbereichs gewährleistet ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsfeld der Strömung am Eintritt in die Leitdüse 2, die vor dem Gitter liegt. In der Druckkammer befindet sich ein System von Druckbohrungen zur Bestimmung der statischen und der Ruhedrucke. Mit dieser Konstruktion des Arbeitsbereichs kann man Feinmessungen der Strömungsrichtung am Gittereintritt vornehmen.

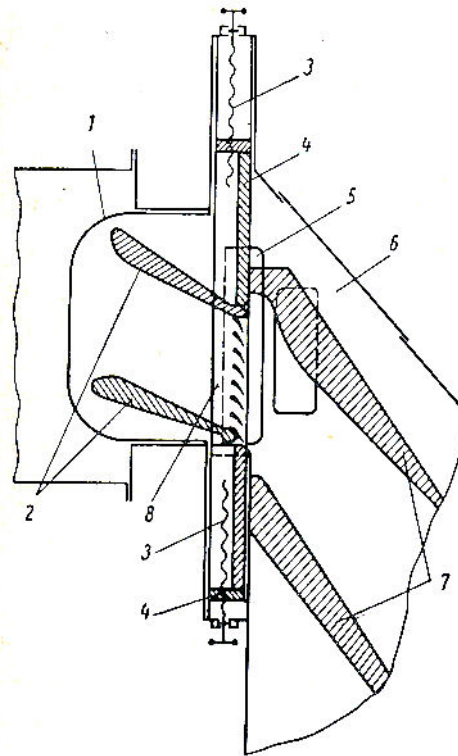


Abb. 3. Schematische Darstellung eines Gitterwindkanals am M&E I:

1) Konfusor; 2) Leitdüse; 3) Schieberantriebe; 4) Schieber; 5) Öffnung für Sondenverstellgerät; 6) Auslaßkammer; 7) Diffusor; 8) Bandplatten des Pakets.

Der Strömungseintrittswinkel ins Gitter wird durch die Lenkdüse 2 vorgegeben, die im vorgegebenen Bereich von Eintrittswinkel und Zahl M speziell profiliert wird. Die Drehwände der Düse werden fest an den Bandplatten 8 des Schaufelpakets befestigt und zusammen mit diesen in den Arbeitsbereich verbracht. Im Arbeitsbereich wird das Paket durch die Schieber 4 mit den Schraubenantrieben 3 eingespannt. Am Austritt aus dem Gitter befindet sich der Diffusor 7, mit dem sich die Mach-Zahl M am Austritt aus dem Gitter stark vergrößern läßt.

Die Auslaßkammer besitzt ein System zum Messen der statischen Drücke. Hier befinden sich Sonden zur Untersuchung der Strömung hinter dem Gitter. Die Sonden liegen in einer speziellen Öffnung für das Sondenverstellgerät 5; das Meßgerät ist auf einem abgedichteten Meßstab mit vier Freiheitsgraden angebracht.

Die Steuerung des im Arbeitsbereich untergebrachten Sondenverstellgeräts ist völlig automatisiert. Vorhanden ist auch ein Schutzsystem durch Verdoppelung, wodurch ein Bruch der Sonde während des Versuches ausgeschlossen wird.

Als direkte Verlängerung des Arbeitsbereiches dient ein Diffusor, angelegt im Verhältnis der Querschnitte von Ein- und Austritt, somit $2,0 - 2,5$. Der Diffusor ist mit der in den Kondensator führenden Abluftstrecke verbunden.

Bei der Bestimmung sämtlicher Gittereigenschaften wurde die Grenzschicht am Eintritt ins Gitter nicht abgeschnitten, ihre Dicke beträgt $\delta = 1,5 - 2,5$ mm je nach Betrieb (Re- und M-Zahlen). Somit war das Geschwindigkeitsfeld am Eintritt über die Gitterhöhe bei den Versuchen ungleichmäßig. Der offene Axialspalt (Spalt zwischen Leitdüse und Gitterbändern) wurde gleich Null angenommen. Die Überdeckung war in den Versuchen unterschiedlich: Leitgitter wurden ohne, Laufgitter mit Überdeckung von 1,5 bis 3 mm seitlich untersucht. Die Zahl der Schaufeln pro Paket betrug $z = 6 - 12$.

Die Strömungsmessung erfolgte in einem Abstand $(o_{,1} - o_{,2})$ b (b für die Sehnenlänge) durch pneumatische Meßsonden für Totaldruck und statischen Druck und durch Winkelmesser. Der Außendurchmesser der Druckmessrohre betrug 0,5 - 0,8 mm.

Die Versuchsdaten wurden nach der allgemein üblichen Methode [6] analysiert. Zur Bestimmung der lokalen Verluste ζ_i wurden der konstante Totaldruck vor dem Gitter p_o , die Veränderung des Totaldrucks in jedem Punkt hinter dem Gitter Δp_i und der statische Druck hinter dem Gitter p_i gemessen.

Der Energieverlustwert in diesem Punkt wird bestimmt nach der aus [6] bekannten Gleichung

$$\zeta_i = 1 - \frac{\lambda_i^2}{\lambda_{it}^2} = \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \frac{1 - \left[1 - \frac{\Delta p_i}{p'_o} (1 - \varepsilon) \right]^{\frac{k-1}{k}}}{\left(1 - \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \right) \left[1 - \frac{\Delta p_i}{p'_o} (1 - \varepsilon) \right]^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (1)$$

mit

$\varepsilon = \frac{p_i}{p_o}$ - Relation der Drücke im Punkt hinter dem Gitter

$\Delta p_i = (p_o - p_{oi})$ - Veränderung des Totaldrucks im Gitter

$p'_o = (p_o - p_i)$ - anfänglicher Überdruck.

Vor dem Sondenkopf bildet sich bei Überschallgeschwindigkeiten eine gerade Stoßwelle; die Korrektur zur Berücksichtigung der Ruhedruckveränderung durch die Stoßwelle läßt sich leicht in Gleichung (1) einbringen.

Es sei:

$$\Delta p_i = \Delta p_m - \Delta p_{\text{stoß}},$$

mit Δp_m - Manometeranzeige

$\Delta p_{\text{stoß}}$ - Totaldruckveränderung in der geraden Stoßwelle, bestimmt nach Gleichung

$$\Delta p_{\text{stoß}} = p_o \left[1 - \frac{\left(\frac{k+1}{k-1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} M_1^2 \frac{2k}{k-1}}{\left(M_1^2 + \frac{2}{k-1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \left(\frac{2k}{k-1} M_1^2 - 1 \right)^{\frac{1-k}{k}}} \right]. \quad (2)$$

Hier bezeichnen: M_1 – Machzahl vor der Stoßwelle;
 k – Isentropenexponent.

Die Mittelwertbildung der Verluste hinter dem Gitter wurde direkt in der Fläche durchgeführt durch graphische Integration ohne Berücksichtigung der Massenstromdichte. Eine derartige Mittelwertbildung führt zu einer gewissen Erhöhung der Verlustwerte.

Die Druckmessungen erfolgten mit U-förmigen Wasser- oder Quecksilbermanometern. Bei starken, den Überschallgeschwindigkeiten hinter dem Gitter entsprechenden Druckgefällen wurden die Messungen mit Proben-Federmanometern durchgeführt. Die Temperaturen wurden mit Platin-Widerstandsthermometern und Quecksilber-Thermometern mit $0,1^\circ$ C-Unterteilung gemessen. Bei der Untersuchung der Gitter in Wasserdampf wurden alle Verbindungen der Druckmesser waagrecht hinausgeleitet, um einen Einfluß von kondensierendem Dampf auf die Manometer-Anzeigen auszuschließen. Der Strömungsaustrittswinkel wurde mit einer Winkelmesssonde gemessen, deren Aufnehmer übereinander lagen. Durch eine solche Anordnung konnte der Meßfehler des Strömungsaustrittswinkels im Punkt, der sich je nach Gitterabstand stark verändert, wesentlich verringert werden.

Durch die methodische Untersuchung und sorgfältiges Eichen der Geräte konnte eine hohe Versuchsgenauigkeit erreicht werden. Die Bestimmungsgenauigkeit des Verlustwertes ζ im Profilgitter kann man bei statischen Untersuchungen abschätzen, indem man einen allgemeinen Ausdruck zur Berechnung der relativen Fehlergrenze benutzt:

$$\delta_{\text{grenz}} = \frac{\Delta\zeta_i}{\zeta} = \pm \frac{k-1}{k} \times \left[\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{d\varepsilon}{\varepsilon^k + 1} + \frac{d\left(\frac{\Delta p_i}{p'_0}\right)(1-\varepsilon) - \frac{\Delta p_i}{p'_0} d\varepsilon}{\left[1 - \frac{\Delta p_i}{p'_0}(1-\varepsilon)\right] - \left[1 - \frac{\Delta p_i}{p'_0}(1-\varepsilon)\right]^{\frac{2k-1}{k}}}, \quad (3)$$

mit

$$d\left(\frac{\Delta p_i}{p'_0}\right) = \pm \left(\frac{d\Delta p_i}{\Delta p_i} + \frac{\Delta p'_0}{p'_0} \right) \frac{\Delta p_i}{p'_0};$$

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = \pm \left(\frac{dp_1}{p_1} + \frac{dp'_0}{p'_0} \right).$$

Die Ablesegenauigkeit der in die Gleichung eingehenden Größen beträgt: $d\Delta p_i = dp'_0 = dp_1 = 0,5$ mm Quecksilbersäule (in Versuchen mit Quecksilbermanometern).

Untersuchen wir den konkreten Fall eines praktisch minimalen Druckgefälles im Gitter bei Untersuchung mit Quecksilbermanometern: $p'_0 = 250$ mm Quecksilbersäule; die übrigen Meßwerte sind: $p_1 = 750$ mm Quecksilbersäule; $\Delta p_i = 11$ mm Quecksilbersäule. Das Druckverhältnis im Gitter beträgt $\varepsilon = 0,75$ und der Verlustwert $\zeta = 4$ %.

Die Berechnung für diesen Betrieb liefert die maximale relative Fehlergröße:

$$\delta_{\text{grenz}} = \frac{\Delta\zeta}{\zeta} = 0.04.$$

Die absolute Fehlergröße bei der Bestimmung von ζ beträgt in diesem Fall $\Delta\zeta \pm 0,16 \%$.

Es ist darauf hinzuweisen, daß der größte experimentelle Fehler bei statischen Gitteruntersuchungen mit der relativen Fehlergröße bei der Bestimmung des Wertes Δp_i zusammenhängt. Der mittlere quadratische Versuchsfehler, charakteristisch für die Größe der Zufallsfehler beim Bestimmen von ζ , beträgt $\pm(0,3, - 0,6) \%$. Die Meßgenauigkeit der Strömungsaustrittswinkel aus den Gittern betrug in den Versuchen $0,3 - 0,5^\circ$.

Bei der Bestimmung der Durchflußmengen μ in den Leit- und Laufgittern läßt sich der tatsächliche Massenstrom mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5 \%$ bestimmen, und bei der Untersuchung von Gittern an Wasserdampf mit Meßbehältern mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \%$. Der theoretische Durchfluß berechnet sich nach Gleichung:

$$G = F_1 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{v_0}} \sqrt{\varepsilon^{\frac{2}{k}} - \varepsilon^{\frac{k+1}{k}}}, \quad (4)$$

mit F_1 – Fläche des minimalen Düsenquerschnitts.

§ 4. Allgemeine Tabelle der Turbinengitterprofile.

Die in diesem Atlas angegebenen Reaktions- (Überdruck-) und Impuls- (Gleichdruck-) Gitter unterteilen sich in 3 Gruppen:

- 1) Unterschallgitter $M_{\text{opt}} = 0,4 - 0,9$ (Gruppe A),
- 2) schallnahe $M_{\text{opt}} = 0,9 - 1,2$ (Gruppe B) und
- 3) Überschallgitter $M > 1,2$ (Gruppe C).

Die Profile der Gruppe A haben Profile mit sich gleichmäßig verändernder Krümmung, wobei die Ein- und Austrittskanten abgerundet sind. Die Schaufelpassagen verengen sich gleichmäßig zum Austritt hin. Eine maximale Düsengestaltung entspricht den Kanälen von Leit- und Überdruck-Laufgittern, eine minimale den Kanälen von Gleichdruck-Laufgittern.

Bei geringen relativen Höhen empfiehlt es sich, die Impulsgitter mit divergent-konvergenten Kanälen auszustatten (Gruppe A_k), bei Leitgittern sollte eine räumliche, meridionale Profilierung verwendet werden (Gruppe A_m).

Die Profile von Leitgittern sind bei schallnahen Geschwindigkeiten (Gruppe B) mit rechteckigen Abschnitten auf der Rückseite mit Abschrägung ausgestattet. Die Gleichdruck-Laufgitter der Gruppe B haben gerade Profilverläufe auch am rückseitigen Eintrittsabschnitt. Die Gitterkanäle dieser Gruppe verengen sich gleichmäßig. Der Rundungsradius der Eintrittskanten ist geringer.

Die Leitgitter sind bei Überschallgeschwindigkeiten mit konkaver Oberfläche am rückseitigen Austrittsabschnitt mit Abschrägung ausgestattet. Bei großen Überschallgeschwindigkeiten verengen und verbreitern sich die Schaufelpassagen. Impulsgitter sind bei $M > 1,5$ ebenfalls mit sich verengenden und verbreiternden Kanälen ausgestattet.

Im Atlas sind die Profile der charakteristischen Querschnitte von Stufen mit großer Fächerung wiedergegeben. Die Wurzelquerschnitte sind für einen Betrieb gedacht, wo die Strömungseintrittswinkel β_1 gleich oder kleiner sind als der Austrittswinkel β_1 aus dem Gitter. Die peripheren Querschnitte sind für Eintrittswinkel β_1 wesentlich über 90° berechnet.

Gesondert betrachtet werden die Profile von Leitgittern, die für Zwischenstufen gedacht sind und bei geringen Relationen $\frac{u}{c_a}$ betrieben werden; Überdruck-Gitter mit geringem Eintrittswinkel $\alpha_0 < 90^\circ$.

Alle im Atlas genannten Profile und ihre wichtigsten Geometrie- und Betriebswerte sind in Tab. 1 angegeben.

§ 5. Normenblätter für Gitterprofile

Die zur Zeit von Turbinenbauern verwendeten Turbinengitterprofile haben geringe Profil- und Endverluste. Die Nomenklatur dieser Profile ist riesig.

Um die Anzahl der Profile und ihre Typengrößen einzugrenzen, wurde ein Teil der Profile von Leit- und Laufgittern genormt. In den Normenblättern sind nur die Profile für Überschallgeschwindigkeiten erfasst (Gruppe A). In Tab. 2 sind die wichtigsten Werte der genormten Profile angegeben.

Das Normenblatt enthält vier Profile von Leitschaufeln und neun Profile von Laufschaufeln mit Impulsbauart. Die Profile der Leit-Gitter H-1, H-2 und H-4 haben annähernd gleiche Bereiche der Strömungsaustrittswinkel $\alpha_1 = 9 - 15^\circ$ (20°), aber unterschiedliche mechanische Eigenschaften. Die Profile der Laufgitter umfassen Austrittswinkel $\beta_2 = 17 - 34^\circ$. Die optimalen Eintrittswinkel liegen im Bereich $\beta_1 = 20 - 50^\circ$.

Bei den Laufgittern bezeichnen die Ziffern vor dem Buchstaben P den Umlenkwinkel, d.h. die Profilgeometrie im Geschwindigkeitsdreieck. Mit steigender Zahl nehmen Aus- und Eintrittswinkel zu, der Umlenkwinkel wird entsprechend kleiner. Die zweite Zahl in der Bezeichnung der Leitgitter und die dritte bei den Laufgittern bezeichnen die Dicke der Austrittskante. Der Buchstabe B gibt die Profildicke in mm an. Alle Profile der Leit- und Laufgitter unterteilen sich in Gruppen je nach der Dicke der Austrittskante δ .

Tabelle 2

Profile normierter Leit- und Laufgitter

In Normenblättern verwendete Profil- bezeichnungen	Winkel in Grad		F	Festigkeitseigenschaften*				J _x	J _y	Alte Profil- bezeichnung	Profilhersteller (Organisation)
	Austritt α ₁ ; β ₂	Eintritt α ₀ ; β ₁		w _x kante	w _x rück	w _y kant ein	w _y kant aus				
H-1	9—15	70—110	2,403	0,313	0,365	1,678	0,905	0,1976	2,127	C-1	Krylov-Institut ¹⁾
H-2	12—20	70—110	1,46	0,135	0,184	0,770	0,455	0,0916	1,069	TH-2	CKTI ²⁾
H-3	9—15	70—110	2,42	0,320	0,360	1,660	0,850	0,2185	2,401	2324	LMZ ³⁾
H-4	10—17	70—110	2,168	0,232	0,288	1,525	0,760			TC-1A	MÉI ⁴⁾
1P-1	17	20	7,195	1,831	2,305	5,895	3,832	2,94	12,61	A-20	Krylov-Institut
3P-1	24	28	7,091	1,895	2,116	5,108	3,662	2,697	11,09	A-24	
4P-1	31	45	6,106	1,396	1,617	4,681	3,195	1,804	10,06	A-26	
1P-2	17	20	7,437	2,039	2,652	5,215	4,177	3,692	11,88	T-1	
2P-2	20	25	7,131	1,827	2,312	5,087	3,749	3,063	11,08	T-2A	CKTI
3P-2	24	28	5,694	1,218	1,607	3,967	3,013	1,777	8,784		
2P-4	20	20	7,368	1,897	2,406	5,208	3,758	3,237	11,18	TP-2A	
4P-4	31	45	4,853	0,896	1,125	8,397	2,496	1,069	7,340	TP-4A	MÉI
5P-4	34	50	4,113	0,6607	0,8656	2,978	2,186	0,7214	6,450	TP-5A	

* Angaben für Leitgitter mit der Breite $B = 25$ mm und für Laufgitter mit der Breite $B = 50$ mm; w_x ; w_y (cm²) – Widerstandsmoment des Profils bezüglich der Achsen $x - x$ und $y - y$ (Abb. 4); J_x ; J_y – Trägheitsmomente bezüglich der Achsen $x - x$ und $y - y$ (cm⁴); F – Schaufelquerschnittsfläche (cm²).

1) Zentrales Wissenschaftliches Krylov-Forschungsinstitut – 2) Zentrales Wissenschaftliches I. I. Polzunov-Forschungs- und Planungsinstitut für Kessel- und Turbinenbau – 3) Leningrader (heute: Sankt-Petersburger) Metallfabrik – 4) Moskauer Energieinstitut (Anm.d.Übers.)

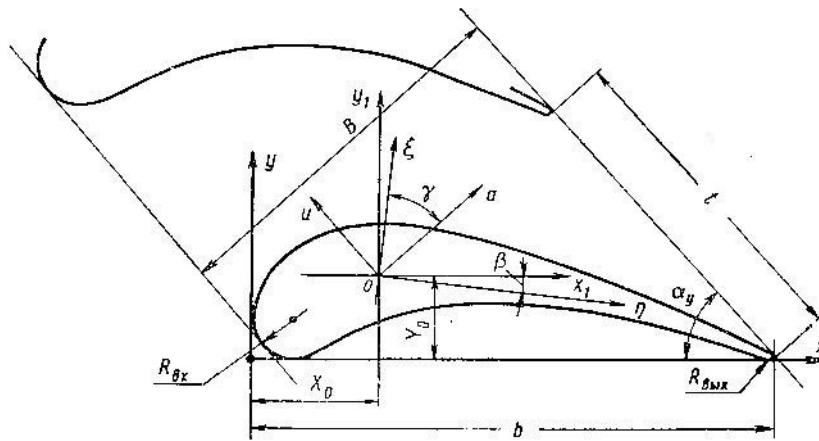


Abb. 4. Zur Berechnung der Gittergeometrie

Die aerodynamischen Eigenschaften umfassen auch die Werte der Energieprofil- und -endverluste sowie der Strömungsaustrittswinkel von den Geometrie- und Betriebswerten des Gitters. Diese Eigenschaften wurden experimentell ermittelt, in Versuchen an ebenen Gittern mit Windkanälen durch Traversierung, mit Abschneiden der Grenzschicht der Einlaßdüsen der Arbeitsbereiche.

Die aerodynamischen Eigenschaften können bei der Wahl der optimalen Gittervariante zuverlässig herangezogen werden, um Stufen auszulegen, sowie auch bei der Bewertung, welchen Einfluß die beabsichtigten Veränderungen der Geometrie- und Betriebswerte haben.

Literatur

- [1] Алексеева, Р. Н.; Ляховицкий, И. Д.; Ржезников, Ю. В.: Методика испытания относительно коротких турбинных лопаток и их профилирование. – Теплоэнергетика. Москва, 1956, № 6.
Alekseeva, R. N.; Ljachovickij, I. D.; Ržeznikov, Ju. V.: Metodika ispytaniya odnositel'no korotkich turbinných lopatok i ich profilirovanija. – In: Teploénergetika. Moskva, (1956) Nr 6, S. 54 – 57.
<Prüfmethode für relativ kurze Turbinenschaufeln und ihre Profilierung; russ.>
<89: ZZ 187>
- [2] Врублевская, В. А.: О влиянии начальной степени турбулентности потока на характеристики направляющих и рабочих решеток турбин. – Теплоэнергетика. 1960, № 2.
Vrublevskaĵa, 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>
- [3] Губарев, А. В.: Исследование рабочих решеток турбин при сверхзвуковых скоростях. – Известия вузов. Авиационная техника. Москва, 1962, № 2.
Gubarev, A. V.: Issledovanie rabočich rešetok turbin pri sverchzvukovyh skorostjach. – In: Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. Moskva, (1962) Nr 2, S. 102 – 112.
<Untersuchung der Turbinenlaufgitter bei Überschallgeschwindigkeiten; russ.>
<89: ZZ 21/AVIA>
- [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>
- [5] Губарев, А. В.; Сян и Мин; Лазарев, Л. Я.: Влияние толщины выходных кромок на характеристики направляющих решеток турбин. – Теплоэнергетика. 1963, № 8.
Gubarev, A. V.; Sjan i Min; Lazarev, L. Ja.: Vlijanie tolščiny vychodnych kromok na charakteristiki napravljajuščich rešetok turbin. – In: Teploénergetika. Moskva, (1963) Nr 8, S. 24 – 29.
<Einfluß der Austrittskantendicke auf die Eigenschaften der Turbinen-Leitgitter; 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.>
- [10] Дейч, М. Е.; Губарев, А. В.; Лазарев, Л. Я. и др.: Исследование новых сопловых решеток МЭИ для сверхзвуковых скоростей. – Теплоэнергетика. 1962, № 10.
Dejč, M. E.; Gubarev, A. V.; Lazarev, L. Ja. u.a.: Issledovanie novych soplovykh rešetok MĖI dlja svercizvukovykh skorostej. – In: Teploénergetika. Moskva, (1962) Nr 10, S. 47 – 52.
<Untersuchung neuer MĖI-Leitgitter für Überschallgeschwindigkeiten; russ.>
<89: ZZ 187>
- [11] Дейч, М. Е.; Губарев, А. В.: Исследование рабочих решеток при больших скоростях. – Теплоэнергетика. Москва, 1958, № 12.
Dejč, M. E.; Gubarev, A. V.: Issledovanie rabočich rešetok pri bol'sich skorostjach. – In: Teploénergetika. Moskva, (1958) Nr 12, S. 56 – 62.
<Untersuchung von Laufgittern bei hohen Geschwindigkeiten; russ.>
<89: ZZ 187>
- [12] Дейч, М. Е.; Зарянкин, А. Е.: Приближенный метод расчета концевых потерь в турбинных решетках. – Теплоэнергетика. 1958, № 9.
Dejč, M. E.; Zarjankin, A. E.: Približennyj metod rasčeta koncevych poter' v turbinných rešetkach. – In: Teploénergetika. Moskva, 5 (1958) Nr 9, S.
<Näherungsweise Lösung der Endverluste in Turbinengittern; russ.>
<89: ZZ 187>
- [15] Дейч, М. Е.; Баранов, В. А.; Розанов, К. А.: Исследование решеток турбинных профилей методом взвешивания реактивной силы. – Научные доклады ВУЗ. Энергетика. 1958, № 3.
Dejč, M. E.; Baranov, V. A.; Rozanov, K. A.: Issledovanie rešetok turbinných profilej metodom vzvešivanija reaktivnoj sily. – In: Naučnye doklady Vyššich učebnykh zavedenij. Énergetika. Moskva, (1958) Nr 3, S. 139 – 148.
<Untersuchung der Gitter von Turbinenprofilen durch Schubkraftwägung; russ.>
<84: Ha-1737>
- [16] Дейч, М. Е.; Лазарев, Л. Я.: Исследование перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный. – Инженерно-физический журнал. 1964, № 4.
Dejč, M. E.; Lazarev, L. Ja.: Issledovanie perechoda turbulentnogo pograničnogo sloja v laminarnyj. – In: Inženerno-fizičeskij žurnal. Moskva, (1964) Nr 4.
<Untersuchung des Übergangs der turbulenten Grenzschicht in die laminare; russ.>
<93: 2Za 4483>

- [17] Елизаров, В. С.: О расчете профильных потерь решеток профилей судовых турбин с выходными кромками конечной толщины. – Судостроение. 1957, № 8.
Elizarov, V. S.: O rasčete profil'nych poter' rešetok profilej sudovych turbin s vychodnymi kromkami konečnoj tolščiny. – In: Sudostroenie. Moskva, (1957) Nr 8, S. 24 – 29.
<Über die Berechnung der Profilverlust der Profilverluster von Schiffsturbinen mit endlich dicken Austrittskanten; russ.>
<1: 4" Ona 70/3>
- [24] Жуковский, М. И.; Скнар, Н. А.: К вопросу о применении утолщенных кромок направляющих решеток. – Энергомашиностроение. 1957, № 2.
Žukovskij, M. I.; Sknar', N. A.: K vorprosu o primenenii utolščennykh kromok napravljajuščich rešetok. – In: Énergomašinoostroenie. Moskva, (1957) Nr 2.
<Zur Anwendung verdickter Kanten in Leitgittern; russ.>
<89: ZZ 28>
- [25] Калихман, Л. Е.: Газодинамическая теория теплопередачи. – Прикладная математика и механика. Т. 10, 1956.
Kalichman, L. E.: Gasodinamičeskaja teorija teploperedaci. – In: Prikladnaja matematika i mehanika.
<Gasdynamik-Theorie der Wärmeübertragung; 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 poter' aktivnych lopatok. – In: Izvestija. Vsesojuznyj Teplotečničeskij 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 techničeskich nauk. Moskva, (1954) Nr 6.
<Abhängigkeit der Profilverluste im Gitter vom Anströmwinkel; russ.>
<93: 2 Za 1080>
- [28] Лойцянский, Л. Г.: Аэродинамика пограничного слоя. Гостехиздат, 1941.
Lojčjanskij, Lev G.
Aérodinamika pograničnogo sloja.
Moskva: Gostechizdat, 1941.
<Aerodynamik der Grenzschicht; russ.>

- [29] Лойцянский, Л. Г.: Ламинарный пограничный слой. ГИФМЛ, 1962.
 Lojczanskij, Lev G.
 Laminarnyj pograničnyj sloj.
 Moskva: GIFML, 1962.
 Dt.: Laminare Grenzschichten. Ü: Helmut Limberg. Berlin: Akademie-Verlag, 1967,
 531 S.
 <93: LS V Ge 261>
- [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 Teplotechničeskij naučno-issledovatel'skij Institut imeni F. E. Dzeržinskogo. Moskva, (1950) Nr 5.
 <Strömungsturbulenz in der Turbinenstufe und Profilverluste von Laufschaufeln; russ.>
 <89: ZZ 724>
- [31] Марков, Н. М.: Расчет аэродинамических характеристик плоской решетки профилей осевых турбомашин. Машгиз, 1952.
 Markov, N. M.: Rasčet aërodinamičeskich charakteristik ploskoj rešetki profilej osevych turbomašin. [Moskva:] Mašgiz, 1952.
 Engl.: Calculation of the aerodynamic characteristics of turbine blading. Glen Ridge, N. J.: Associated Technical Services, 1958, 114 S.
 <93: 2Ma 5436>
- [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 ploskikh turbinnyh rešetkach pri nerasčetnyh uglach vchoda. – In: Izvestija. Akademija nauk SSR. Moskva, (1963) Nr 6.
 <Abhängigkeit der Profilverluste im Gitter vom Anströmwinkel; russ.>
- [39] Наталевич, А. С.: Течение газа в косом срезе единичных сопел и и сопловых аппаратов турбин. – Труды МАИ. Вып. 95. 1958.
 Natalevič, A. S.: Tečenie gaza v kosom sreze ediničnyh sopel i spolovych apparatov turbin. – In: Trudy. Moskovskij Aviacionnyj Institut. Moskva, 95 (1958).
 <Gasströmung im Schrägschnitt einzelner Düsen und Turbinenleitapparate; russ.>
 <89: ZZ 117>
- [39] Степанов, Г. Ю.: Газодинамические методы расчета установившегося обтекания решеток турбомашин. – Вестник АН СССР. 1958, № 4.
 Stepanov, G. Ju.: Gazodinamičeskije metody rasčeta ustanovivšegosja obtekanija rešetok turbomašin. – In: Vestnik Akademii nauk SSSR. Moskva, 28 (1958) Nr 4.
 <Gasdynamische Berechnungsmethoden der eingeschwungenen Umströmung der Gitter von Turbomaschinen; russ.>
 <16: H 238-2; 21: ZA 2863; 291: 4 Z 2589; 352; sci 2/v39: in Nr 1 – 6 nicht enthalten>

- [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 turbinnyh 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.>
- [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: Teploénergetika. 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.>
- [49] Boxer, Emanuel; Sterrett, James R.; Wlodarski, John
Application of supersonic vortex-flow theory to the design of supersonic impulse compressor- or turbine-blade sections.
National advisory committee for aeronautics. Research memorandum. London, (1952), NACA RM L52Bo6, 72 S.
<http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc59156/m1/1/>
- [50] Luksch et Quick: Essais de grille d'accélération dans un fluide compressible.
Bulletin de l'Association technique maritime et aéronautique. Paris, 52 (1953) S. 513 - 542.
<93: 2Za 997>
- [52] Oswatitsch, Klaus: Über die Strömung in einem Schaufelgitter. – In: Allgemeine Wärmetechnik. 6 (1955) Nr 1, S. 9 – 11.
<93: 2Za 1908 >
- [51] Nippert, Hans
Über den Strömungsverlust in gekrümmten Kanälen.
Berlin: VDI-Verlag, 1929, 67 S.
(Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. 320)
<93: XIX/825.4-320>
- [53] Oswatitsch, Klaus (Stockholm): Potentialwirbel-Gitter für Überschallgeschwindigkeiten. (Zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. A. Betz). – In: Zeitschrift für Flugwissenschaften. Braunschweig, 4 (1956) Nr 1/2, S. 53 – 57.
<93: 2Za 971>

Stuttgart, den 9. Januar 2014

Übersetzt von
Ottmar Pertschi
(Dipl.-Übersetzer)