

Vysoká škola strojní a textilní
LIBEREC

Uložení vysokootáčkových rotorků
kuželového tvaru na vzduchovém polštáři
Díl II. - přílohy

Kandidátská disertační práce

Ing. Jaroslav Matějka

Kandidátská disertační práce

ULOŽENÍ VYSOKOOTÁČKOVÝCH ROTORKŮ KUŽELOVÉHO TVARU
NA VZDUCHOVÉM POLŠTÁŘI

DÍL II. - přílohy

Aspirant : Ing.Jaroslav Matějka

Školitel : Prof.Ing.Jiří Mayer

Pracoviště : Vysoká škola strojní a textilní Liberec
Katedra tepelné a provozní techniky

SEZNAM PŘÍLOH.

	List
1) Literatura z oboru plynových ložisek	1 ÷ 6
2) Pokusné zařízení pro tvarování vláken	7
3) Prototyp stroje pro tvarování vláken	8 ÷ 9
4) Tvarované silonové vlákno	10
5) Pletenina z tvarovaného vlákna	11 ÷ 12
6) Vývoj rotorku	13
7) Zakrucovací zařízení se zmenšenými ventilač. ztrátami	14
8) Zakřivení lopatek pro různý počet otáček	15
9) Obraz proudění vytvořený po 14denním provozu	16
10) Odvození tlakové funkce pomocí Lagrangeových rovníc	17 ÷ 22
11) Měření dynamického tlaku pro výpočet přisávan- ného vzduchu M	23
12) Tabulární zpracování výsledků řešení tlakové funkce (funkce v implicitním tvaru)	24 ÷ 28
13) Tabulární a grafické zpracování výsledků řeše- né tlakové funkce (funkce v explicitním tvaru)	29 ÷ 52
14) Celková nosnost aerostatického ložiska, kde vzduch nese a pohání (komplex. řešení tlak. funkce)	53
15) Tabulární zpracování numerických výpočtů tla- ku. $p = f(r_e)$	54
16) Závislost tlaku v mezeře $p = f(r; r_e)$ při $r_a = 12,5 \text{ mm}$.	55 ÷ 68
17) Závislost tlaku v mezeře $p = f(r; r_e)$ při $r_a = 25 \text{ mm}$	69 ÷ 80
18) Matematické řešení nosnosti aerostat. ložiska	81 ÷ 85
19) Tabulární zpracování nosnosti v závislosti na poloměru trysky	86
20) Výsledky nosnosti vypočítané na počítači MINSK 22	87 ÷ 89
21) Tabulární zpracování nosnosti z počítače MINSK 22	90 ÷ 95
22) Pokusná zařízení	96 ÷ 98
23) Výsledky měření tlaku v mezeře $p = f(p_{(o)})$	99 ÷ 105
24) Výkresy zakrucovacího zařízení optimálních rozměrů	106 ÷ 107

Literatura z oboru plynových ložisek většinou
v překladu k dispozici na katedře tepelné a
provozní techniky VŠST.

- 1/ Artobolevski - Šejnberg: Rychlostní kluzná ložiska se vzduchovým mazáním.
- 2/ Ausman - Downey: Aerodynamické teorie ložisek mazaných plynem.
Transactions of the ASME 1957 sv.79
- 3/ Ausmann: An IMPROVED Analytical Solution for Self - Acting, Gas - Lubricated Journal Bearings of Finite Length.
TRANSACTIONS OF THE ASME, series D, Journal of Basic 1961, str.188-194
- 4/ Allais: The Design of Externally Pressurized Gas Thrust Bearings for Maximum Stiffness and Stability.
ASLE TRANSACTIONS 1962, Volume 5, str.254-260
- 5/ Babajeva - Evofejev: Konstrukcii gidravličeskich i gazovykh opor. podvěsa.
Rasčet gidravličeskich i gazovykh opor podvěsa.
K - Babajeva: Dětali i elementy giroskopičeskich probora. Leningrad 1962, str.100-126 (§ II-5,6)
- 6/ Bain - Sullivan: Konstrukce ultracentrifugy.
Jornal of the American chemical Society. 1935 č.7
- 7/ Bein - Carroll - Sullivan: Ultracentrifuga
- 8/ Beans - Weed - Pickels: Ultracentrifuga
- 9/ Beans - Pickels: Vytváření vysokých rotačních rychlostí.
- 10/ Beams: High Rotational Speeds
JORNAL OF APPLIED PHYSICS, Volume 8, January-December 1937 str. 795 - 806
- 11/ Brix: Shaft Stability in Gas Film Bearings
ENGINEERING, February 6, 1959 str. 178 - 182
- 12/ Brunner, Harker, Haughton, Osterhund: A Gas Film Lubrication Study, Part III. Experimental Investigation of pivoted Slider Bearings.
IBM-Jornal of Research and Development Vol.3/1965. str. 260-274

- 13/ Brunzel: Druckgeschmierte Gleitlager /Querlager/
Radiální ložiska, mazaná tlakem vzduchu.
Reibung und Schmierung. str.123-131
- 14/ Cole - Kerr: Pozorování chování ložisek mazaných vzduchem.
- 15/ Cooper: An Assessment of the Value of Theory in Predicting Gas-Bearing Performance.
Teorie předběžného stanovení výkonu aerodynamických ložisek.
TRANSACTIONS OF THE ASME, series D, Journal of Basic Engineering 1961 str.195-200
- 16/ Corey T.L., Tyler C.M., Rowand H.H., Kipp E.M.: Behavior of Air in the Hydrostatic Lubrication of Loaded Spherical Bearings
TRANSACTIONS OF THE ASME, July 1956, Volume 78, number 5 str. 893-898
- 17/ Drescher: Gleitlager mit Selbstschmierung.
Z.VDI Bd 95 Nr.35 1953
- 18/ Drescher: Special Features of Self-acting air Bearings and their Effect on practical Application.
Sborník I. mez.symposia o vzduch. ložiskách
- 19/ Drescher: Gasgeschmierte Lager. Plynem mazaná ložiska. Schmiertechnik 1961, Heft 5,6 str.237-248, 315-323.
- 20/ Fischer - Cherubín: Některé statické a dynam. charakteristiky rychloběžných hřídelových systémů s ložisky mazanými plynem.
Sborník I.symposia o plynových ložiskách VSA.
- 21/ Ford, Harris, Pantall: Principles and applications of hydrodynamic - type gas bearings.
Principy a aplikace hydrodynamických typů plynových ložisek. The Institution of Mechanical Engineers - PROCEEDINGS 1957 Volume 171 str. 93-123
- 22/ Fox: Proudění otvory v ložiskách mazaných vnějším tlakem
Sborník I.symposia o ložiskách maz. plynem.
- 23/ Fuchs-Uhlenbusch: Hydromagnetické teorie ložisek.
Z für Angewandte Mathematik und Mechanik 1963 sešit 12
- 24/ Fuller: Vlastnosti nízkého tření ložisek mazaných plynem. Transactions of the New York Academy of Science.
- 25/ Fuller: Air - Lubricated Bearings (Hydrostatic Thrust Bearings)
K - Theory and Practice of Lubrication for Engineers.
Vyd. John Willey & Sons Inc; New York str 295 - 305
- 26/ Fuller: Friction and Power Losses in Journal Bearings
Theory and Practice of Lubrication for Engineers str.223-229.

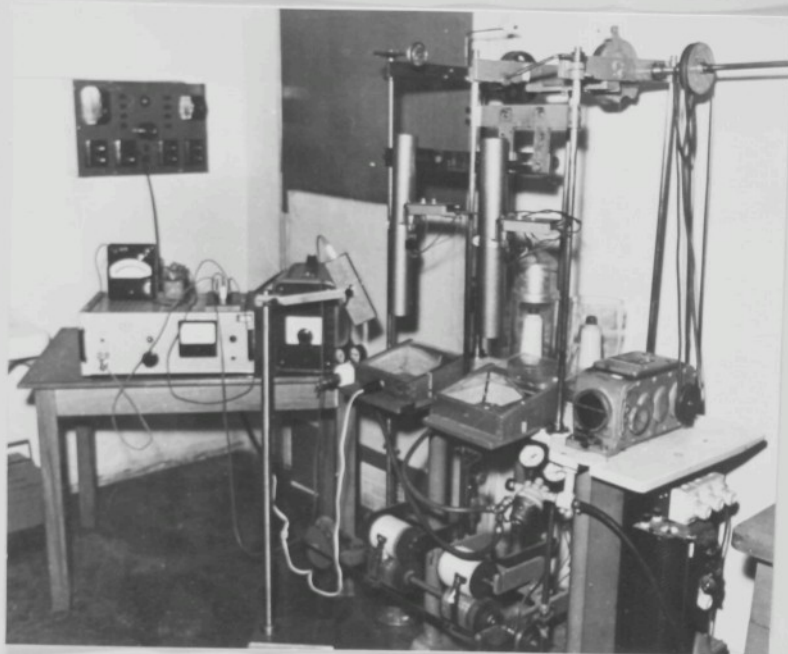
- 27/ Fuller: Hydrodynamic Lubrication of Journal Bearings.
Theory and Practice of Lubrication for Engineers.
Vyd. John Wiley & Sons Inc; New York str. 192-205
- 28/ Fuller: Hydrostatic Lubrication.
Theory and Practice of Lubrication for Engineers. Vyd. John
Wiley & sons Inc, New York str. 82-195
- 29/ Fuller: Hydrostatic Lubrication Part I - Oil-Pad Bearings
Machine Design 1947 (June) str. 110-116
- 30/ Fuller: Hydrostatic Lubrication Part II - Oil Lifts.
Machine Design - July 1947 str. 117-122.
- 31/ Fuller: Hydrostatic Lubrication Part III- Step Bearings
Machine Design - August, 1947 str. 115-120
- 32/ Fuller: Hydrostatic Lubrication Part IV - Oil Cushions
Machine Design - September, 1947 str. 127 - 131, 188, 190
- 33/ Fuller: Hydrostatic Squeeze Film
Theory and Practice of Lubrication for Engineers
Vyd. John Wiley & Sons Inc, New York str. 126 - 145
- 34/ Garman: A Study of the High - Speed Centrifuge
The Review of Scientific Instruments. Vol.4, 1933 str.
450-453
- 35/ Gottwald, Vieweg: Berechnungen und Model versuche an
Wasser - und Luftlagern.
Zeitschrift für angewandte Physik. Zweiter Band
- 36/ Grammel: Rotační kužel.
Kniha: Der Kreisel
- 37/ Gross: A Gas Film Lubrication Study, Part I.
Som Theoretical Analyses of Slider Bearings.
IBM-Journal of Research and Development. vol.3/1965 str.
237 - 255.
- 38/ Hauro Mori: A Theoretical Investigation of Pressure Depre-
ssion in Externally Pressurozed Gas-Lubricated Circular
Thrust Bearings.
Transactions of the ASME, series D, Journal of Basic
Engineering 1961 str. 201 - 208
- 39/ Hughes: Působení přenosu tepla při mazání hydrostatického
axial. ložiska.
Transactions of the ASME, 1957 svaz. 79
- 40/ Jampolskij u Piruev: Nesuschaja sposobnost i ustojčivost
četyrechkamerbvo gidrostatičeskovo nadšipnika.
Energo - mašinostroenie 1966 č. 6
- 41/ Lamm: K teorii a metodice ultracentrifug.
Zpravodaj o fyzikální chemii 1929.

- 42/ Samobuzené vibrace axialních ložisek mazaných plynem.
Transactions of the ASME sv.80 1958 str.411-414
- 43/ Licht: Air - Hammer Instability in Pressurized - Journal
Gas Bearings.
Transactions of the ASME, series D, Journal of Basic
Engineering 1961 str. 235-243
- 44/ Extension of the Conducting Sheet Analogy to Externally
Pressurized Gas Bearings.
TRANSACTIONS OF THE ASME, series D, Journal of Basic
Engineering 1961 str. 209-212
- 45/ Loeb: The Determination of the Characteristics of Hydro-
static Bearings through the use of the Electric Analog
Field Platter
ASLE Transactions, Volume 1, Number 1 str.217-224
- 46/ Loeb, Rippel: Determination of Optimum Proportions for
Hydrostatic Bearings
ASLE Transactions, Volume 1, Number 1 str.241-247
- 47/ Loch: Aerostatická ložiska
Konstruktion Březen 1967
- 48/ Mayer - Mark: Ultraodstředivky
Makromolekule Chemie
- 49/ Michael: A Gas Film Lubrication Study, Part II. Numerical
Solution of the Reynolds - Equation for Finite Slider
- Bearings.
IBM-Journal of Research and Development Vol.3/1965
str. 256-259
- 50/ Michele: Plynem mazaná ložiska.
Studijní zpráva První Brněnské strojírny 1960 - ROS -
- TU - C28
- 51/ Makarov - Šetler: K voprosu balancirovki vysokoskorostnykh
centrifug.
- 52/ Oplt Vladimír: Návrh aerostatického vzduchového ložiska
1 = 12 mm, D = 8 mm
Diplomová práce VŠST 1957 č. V 66/67 S
- 53/ Ochoduzsko: Śvodki do zmniejszenia nateżenia przepływu
masy
Teoria maszyn cieplnych, cześć 1. Vyd. PWT, Warszawa 1957
str. 435 - 444
- 54/ Pentall - Robinson: Ložiska mazaná plynem v nukleárním
inženýrství.
Nuclear Engineering 1959 sv.4 str.123-128
- 55/ Pinkus, Sternlicht: Hydrodynamic Gas - Bearings.
Theory of hydrodynamic Lubrication /McGraw-Hill Book
Company Inc., 1961/ str.136-176

- 56/ Reiner: The Physics of Air-Viscosity as related to gas Bearing design.
Sborník prací I.mez. symposia o vzduch. ložiskách Vashington.
- 57/ Reiner: Dostředivé vzduchové ložisko.
I.mez. symposium o vzduch. ložiskách
- 58/ Reynolds - Gross: Experimental Investigation of Whirl in Self - Acting Air - Lubricated Journal Bearings.
ASLE transaction 1962, Volume 5 str. 392 - 403
- 59/ Richardson: Static and Dynamic Characteristics of Compensated Gas Bearings
TRANSACTIONS OF THE ASME, Volume 80, October 1958
str. 1503 - 1509
- 60/ Shibar - Paslay: O teorii axialních ložisek mazaných tukem.
Transactions of the ASME 1957 sv. 79
- 61/ Solov'ev: O práci aerodynamických ložisek se stabilizačními drážkami.
- 62/ Solov'ev - Makarov: Nekotorye voprosy ustojčivosti raboty aerodinamickich opor nprjadilnych centrifug.
- 63/ Solov'ev: Rozdělení radiálních tlaků u aerodynamického ložiska.
- 64/ Speen - Grant: Omni-Directional Support of Spheres Using Externally Pressurized Gas Lubricated Bearing Pads.
ASLE transactions 1962, Volume 5, str.375-384
- 65/ Speen: Pressure and Flow Studies of an Experimental Externally Pressurized Gas Lubricated Bearings.
ASLE transactions 1962, Volume 5, str.242-253
- 66/ Šejnberg: Plynové mazání kluzných ložisek - teorie výpočet Tření i iznos v mašinách
- 67/ Šejnberg: Elektrošpiněli na nodšipnikách s vozdušnojo smazkoj u opyt ich explayatacii.
Stanki i instrument Nr 3, 1962
- 68/ Vibroytočživost nodšipnika s gazovoj smazkoj /Šejnberg/
Konstruivovanie rasčet i ispytanie mašin.
- 69/ Šejnberg - Šuster: Vibroustčivij poristyj aerostatičeskij podpjatnik.
Stonki i instrument 1960 Nr 11
- 70/ Šejnberg: Experimentální výzkum vzduchových ložisek.
Tření i iznos v mašinách sborník AN SSSR
- 71/ Šejnberg: Gazovaja smazka nodšipnikov skolženija /teorija i rasčet/

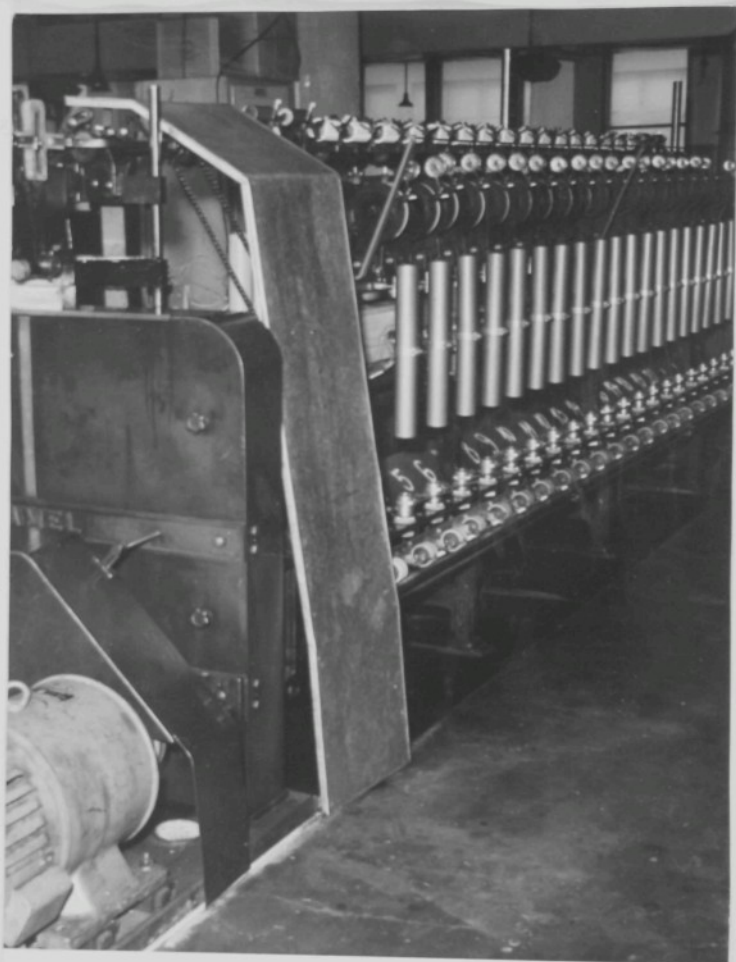
Akademija nauk SSSR institut mašinovedenija.

- 72/ Tang - Gross: Analysis and Design of Externally Pressurized Gas Bearings.
ASLE transactions 1862, Volume 5 str.261-286
- 73/ Trnka: Kluzná ložiska mazaná plyny - aerodynamická.
Výzkumná zpráva SVÚSS - 66 - 04035
- 74/ Trnka: Směrnice pro výpočet a konstrukci radiálních aerostatických ložisek.
Výzkumná zpráva: SVÚSS - 66 - 04002
- 75/ Turnblade: The Design of Externally Pressurized Gas Lubricated Bearings by the Method of Bearing Equivalence
ASLE transactions 1962, Volume 5 str.385-391
- 76/ Warren De Witt Garman: A Study of the High - Speed Centrifuge:
Received May 17 1933
- 77/ Wiedemann: Ultracentrifuga
Chimica Chimica acta 1959 str.6-13
- 78/ Zolton - Anderson: Pokusy s rotujícími axial. aerostat. ložisky.
Sborník z I.mez. symposia o vzduch. ložiskách.
- 79/ Autor neznám: Vzduchová ložiska
Science 1937
- 80/ Autor není uveden: Gas Lubricated Bearings /design, manufacture, application/
Engineering 1956 str. 559 - 562
- 81/ Autor neznám: Principy plyn. ložisek - aplikace.
The Chartered mechanical Engineer roč.1956 č.7/3
- 82/ Autor neznám: Nové druhy vzduchových ložisek pro vysokotáčkové textilní stroje.
Melliand - textil Berichte
- 83/ Autor neznám: Vzduchová ložiska s malým třením
Lubrication Engineer roč.1953 č.6

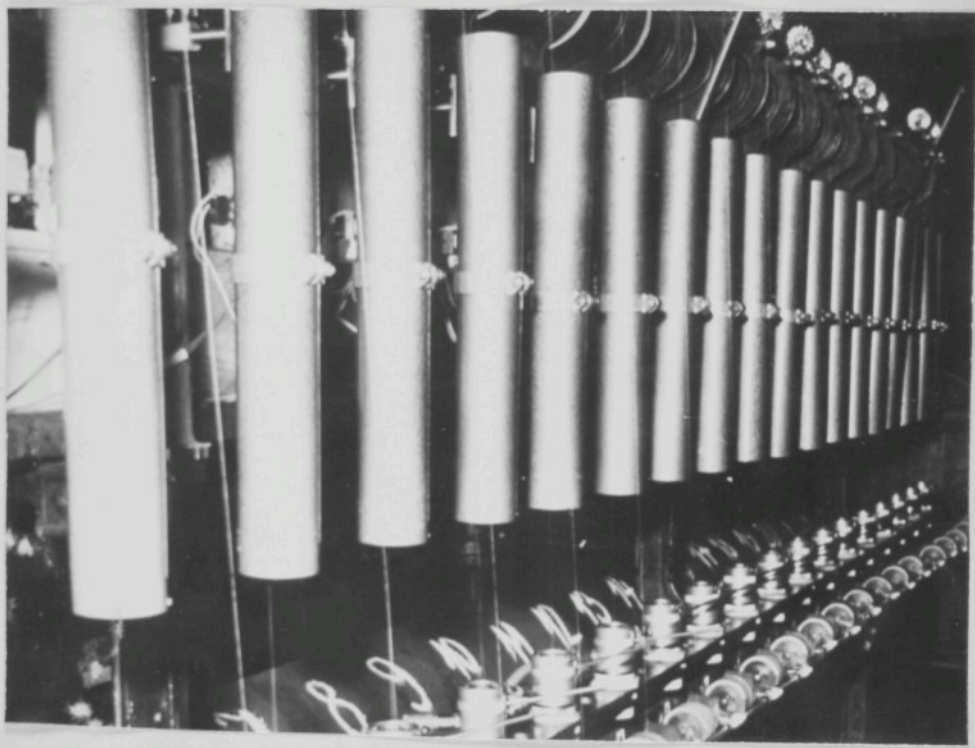


Obr.1

Pokusné zařízení pro tvarování polyamidových vláken.

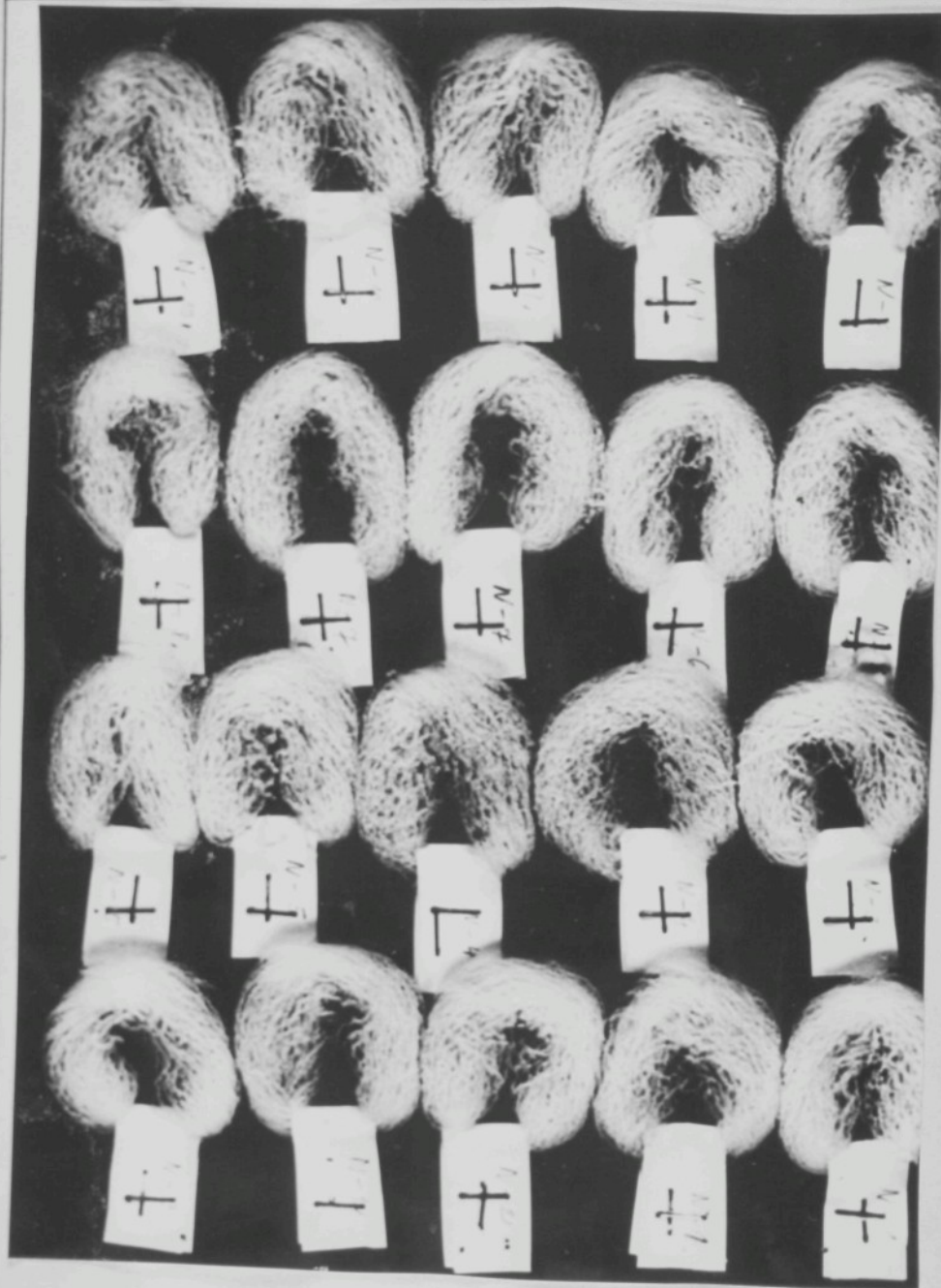


Obr.1
Prototyp tvarovacího stroje pro 50 zakrucovacích vřeten
uložených v aerostatických ložiskách kde expandující vzduch
nese a současně pohání.



Obr.2

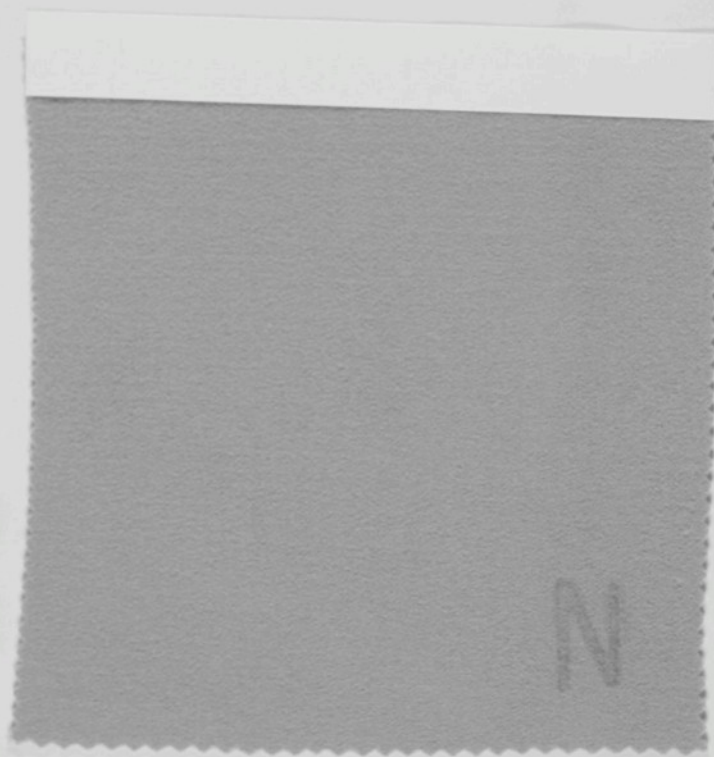
Detail uložení zakrucovacích vřeten na stroji.



Obr.1
Pohled na tvarované silonové vlákno.



Pletenina vyrobená z vláken 2 x 120 denier.



Pletenina vyrobená z vláken 2 x 40 den, tvarovaných na stroji, kde jsou zakrucovací rotorky uloženy na vzduchovém polštáři.



Pletenina vyrobená z vláken 40 den, tvarovaných na stroji,
kde jsou zakrúčovací rotorky uloženy na vzduchovém polštáři.



č. 1



č. 2



č. 3



č. 4



č. 5



č. 6



č. 7



č. 8



č. 9



č. 10



č. 11

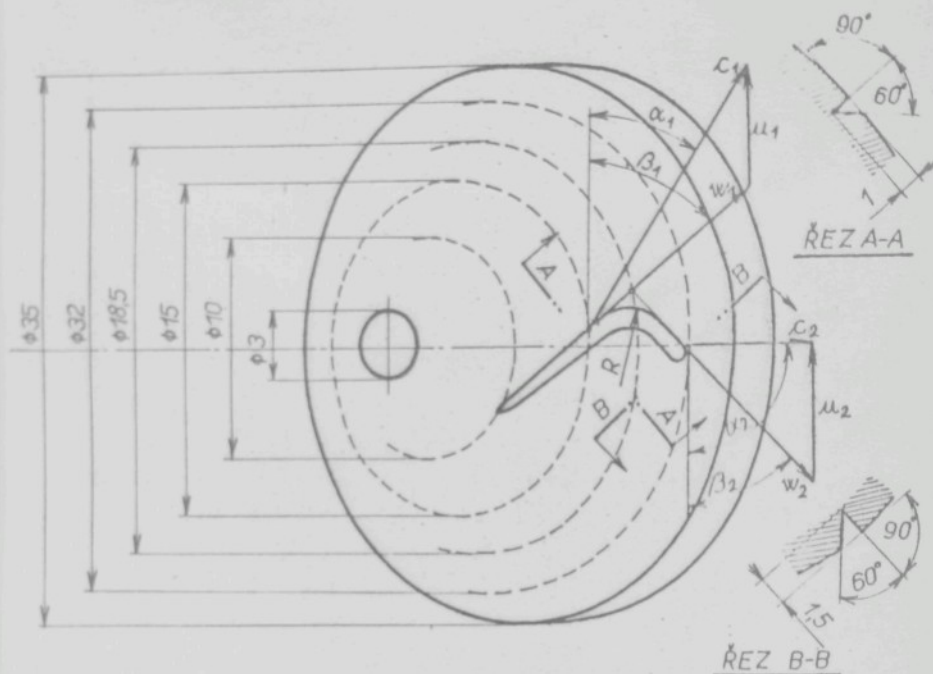


č. 12

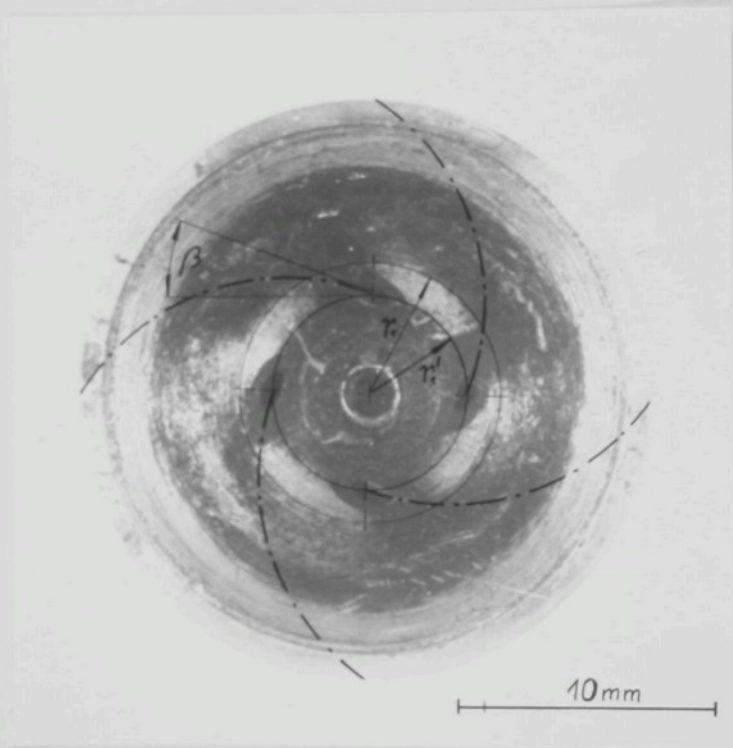


Obr.1

Zkrucovací zařízení uložené oboustranně na vzduchovém polštáři - ventilační ztráty jsou zmenšeny.



n [s ⁻¹]	α_1	β_1	α_2	β_2	R [mm]	C_1	u_1	w_1	C_2	u_2	w_2
	[ve stupních]					[m.s ⁻¹]					
1670	30	33,5	90	62,5	2,5	368	63	314	206	104	235
2500	30	37,5	90	42,5	2	368	94	290	148	157	218
3340	30	42	111	32,5	1,75	368	126	267	113	208	200
4170	30	47,5	142	25	1,75	368	157	244	127	262	182



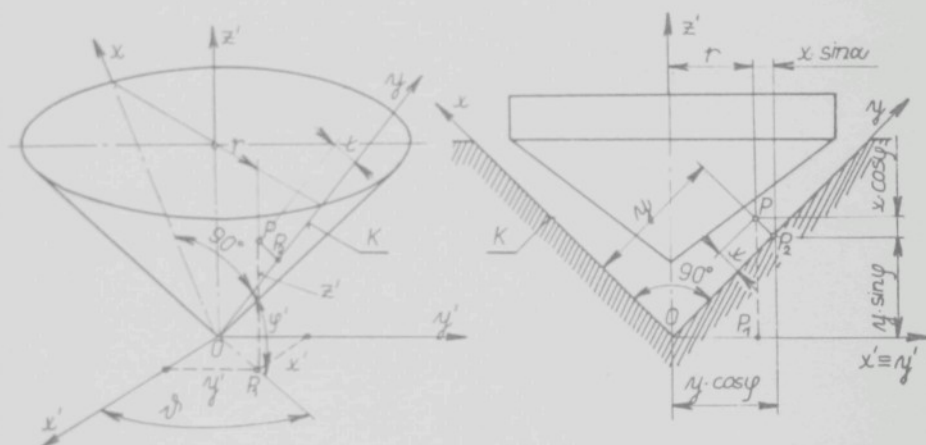
Obr.1.

Obráz proudění vytvořený
po 14 denním provozu ložiska

Použití Lagrangeových rovnic

Pohybové rovnice proudění v mezikruhové kuželové štěrbině lze získat také z Lagrangeových rovnic. Jejich výhoda spočívá především v tom, že poskytují jednoduché schéma pro odvození pohybových rovnic pomocí výrazů pro kinetickou a potenciální energii.

Pro řešení tímto způsobem je zaveden nový souřadný systém: $O(x; y; \vartheta; \varphi)$, kde φ je parametr. / $O(x'; y'; z')$ / = kartézský souřadný systém.



Obr. 1

Hmotný bod proudícího média v novém souřadném systému:

x = normálová vzdálenost bodu P od povrchu kužele statorku

$x = \overline{P P_2}$ kde P_2 je normálový průmět P na kužel K

ϑ = úhel, který svírá osa x' s přímkou $\overline{O P_1}$, kde P_1 je kolmý průmět bodu P do roviny (x', y')

$\lambda = \overline{O P_1}$ je délka průmětu O P v rovině x', y' .

$$\begin{aligned}\text{Flatí: } z' &= y \cdot \sin \varphi + x \cdot \cos \varphi & x' &= r \cdot \cos \nu^{\theta} \\ r &= y \cdot \cos \varphi - x \cdot \sin \varphi & y' &= r \cdot \sin \nu^{\theta}\end{aligned}$$

Transformační rovnice $O(x', y', z') \longleftrightarrow (x, y, \nu^{\theta}, \varphi)$:

$$\begin{aligned}x' &= (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \nu^{\theta} & \text{a)} \\ y' &= (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \nu^{\theta} & \text{b)} \dots (1) \\ z' &= x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi & \text{c)}\end{aligned}$$

Velikost kinetické energie hmotného bodu P jest:

$$T = \frac{1}{2} m \cdot c^2 \quad \text{kde } c = \text{rychlost hmotného bodu}$$

$$c^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2$$

$$T = \frac{m}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) = \frac{m}{2} \left[\left(\frac{dx'}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy'}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz'}{dt} \right)^2 \right] \dots (2)$$

Derivace rovnic (1) podle času:

$$\frac{dx'}{dt} = (-\dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi) \cos \nu^{\theta} + (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi) \cdot (-\sin \nu^{\theta}) \cdot \dot{\nu}^{\theta}$$

$$\frac{dy'}{dt} = (-\dot{x} \sin \varphi - \dot{y} \cos \varphi) \sin \nu^{\theta} + (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi) \cos \nu^{\theta} \cdot \dot{\nu}^{\theta} \dots (3)$$

$$\frac{dz'}{dt} = \dot{x} \cdot \sin \varphi + \dot{y} \cdot \cos \varphi$$

Po dosazení do vztahu pro T a po úpravě bude:

$$T = \frac{1}{2} m / \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi)^2 \cdot \dot{\nu}^{\theta 2} / \dots (4)$$

Lagrangeovy rovnice 2. druhu

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_1} = - \frac{\partial V}{\partial q_1} \dots (5)$$

kte: q_1 jsou Lagrangeovy souřadnice.

V řešeném případě jsou souřadnice:

$$q_1 = x; q_2 = y; q_3 = \varphi \quad \dots \text{a získají se tři pohybové rovnice.}$$

V = potenciál působících vnějších sil - v řešeném případě potenciál tlakové síly

$$\frac{\partial V}{\partial q_1} = \frac{\partial p}{\partial q_1} \quad p = \text{tlak}$$

Derivace rovnice (4):

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = m \cdot \dot{x}; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} = m \cdot \dot{y}; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = m (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi)^2 \cdot \dot{\varphi}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = m \cdot \dot{\varphi} (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi) (-\sin \varphi)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = m \cdot \dot{\varphi} (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \varphi$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0$$

Po dosazení do Lagrangeových rovnic:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\text{I. } m \cdot \ddot{x} + m \cdot \sin \varphi (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi) \dot{\varphi}^2 = - \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\text{II. } m \cdot \ddot{y} - m \cdot \cos \varphi (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi) \dot{\varphi}^2 = - \frac{\partial p}{\partial y} \quad \dots (6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = - \frac{\partial p}{\partial \varphi}$$

$$\text{III. } m \cdot \frac{d}{dt} / (-x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi)^2 \cdot \dot{\varphi} / = - \frac{\partial p}{\partial \varphi}$$

$$\text{Platí: } \dot{x} = c_x; \quad \ddot{x} = \frac{dx}{dt}$$

$$\dot{y} = c_y; \quad \ddot{y} = \frac{dy}{dt}$$

$$\text{r. } \dot{\varphi} = c_{\varphi}; \quad \ddot{\varphi} = \frac{d\dot{\varphi}}{dt} \quad \text{ kde } \dot{\varphi} \text{ úhlová rychlost otáčení}$$

Protože $x = f(t, y, \varphi)$; $y = f(t, x, \varphi)$; $z = f(t, x, y)$
obdrží se totální derivace:

$$\frac{d c_x}{dt}; \quad \frac{d c_y}{dt}; \quad \frac{d c_\varphi}{dt}$$

Z matematické analýzy platí:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d c_x}{dt} &= \frac{\partial c_x}{\partial t} + \frac{\partial c_x}{\partial x} \cdot c_x + \frac{\partial c_x}{\partial y} \cdot c_y + \frac{\partial c_x}{\partial \varphi} \cdot \frac{c_\varphi}{r} \quad \text{a)} \\ \frac{d c_y}{dt} &= \frac{\partial c_y}{\partial t} + \frac{\partial c_y}{\partial x} \cdot c_x + \frac{\partial c_y}{\partial y} \cdot c_y + \frac{\partial c_y}{\partial \varphi} \cdot \frac{c_\varphi}{r} \quad \text{b)} \\ \frac{d}{dt} (r^2 \cdot \dot{\varphi}) &= \frac{d}{dt} (r c_\varphi) = \frac{dr}{dt} \cdot c_\varphi + \frac{d c_\varphi}{dt} \cdot r \quad \text{c)} \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \frac{d}{dt} (-x \sin \varphi + y \cos \varphi) = -\dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi = \\ &= c_x \sin \varphi + c_y \cos \varphi \end{aligned}$$

$$\frac{d c_\varphi}{dt} = \frac{\partial c_\varphi}{\partial t} + \frac{\partial c_\varphi}{\partial x} \cdot c_x + \frac{\partial c_\varphi}{\partial y} \cdot c_y + \frac{\partial c_\varphi}{\partial \varphi} \cdot \frac{c_\varphi}{r} \quad \dots (8)$$

Po dosazení do (7c) bude:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (r \cdot c_\varphi) &= (-c_x \sin \varphi + c_y \cos \varphi) \cdot c_\varphi + (-x \sin \varphi + y \cos \varphi) \cdot \\ &\cdot \left(\frac{\partial c_\varphi}{\partial t} + \frac{\partial c_\varphi}{\partial x} \cdot c_x + \frac{\partial c_\varphi}{\partial y} \cdot c_y \right) + c_\varphi \cdot \frac{\partial c_\varphi}{\partial \varphi} \end{aligned}$$

Lagrangeovy rovnice (6 I; 6 II a 6 III) dále upraveny:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}^2 &= \frac{c_\varphi^2}{(-x \sin \varphi + y \cos \varphi)^2} \\ m \cdot \frac{dc_x}{dt} + m \sin \varphi \cdot \frac{c_\varphi^2 (-x \sin \varphi + y \cos \varphi)}{(-x \sin \varphi + y \cos \varphi)^2} &= - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (9) \end{aligned}$$

$$m \cdot \frac{d c_y}{dt} - m \cos \varphi \frac{c_{\varphi}^2 (-x \sin \varphi + y \cos \varphi)}{(-x \sin \varphi + y \cos \varphi)^2} = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (10)$$

$$m \cdot \frac{d c_{\varphi}}{dt} + m \frac{(-c_x \sin \varphi + c_y \cos \varphi) \cdot c_{\varphi}}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} = - \frac{\partial p}{\partial \varphi} \cdot \frac{1}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} \quad \dots (11)$$

Po dosazení za $m = \rho$ do rovnice (9) - (11) bude:

$$\frac{d c_x}{dt} + \frac{c_{\varphi}^2}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} \cdot \sin \varphi = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \dots (12)$$

$$\frac{d c_y}{dt} - \frac{c_{\varphi}^2}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} \cdot \cos \varphi = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad \dots (13)$$

$$\frac{d c_{\varphi}}{dt} + \frac{(-c_x \sin \varphi + c_y \cos \varphi) \cdot c_{\varphi}}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{(-x \sin \varphi + y \cos \varphi) \partial \varphi} \quad \dots (14)$$

Zjednodušující předpoklady:

- a) Proudí-li plyn v mezikruhovité kuželové šterbině jež je úzká a úhel šterbiny je malý, je možno zanedbat proudění ve směru osy x . Tedy přímo $x = 0$. Potom se pohybové rovnice zredukují na dvě, neboť rovnici (9) nebude nutné uvažovat.

Po úpravách vzhledem k $x = 0$ bude platit:

$$\frac{d c_y}{dt} - \frac{c_{\varphi}^2}{y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{y} \quad \dots (15)$$

$$\frac{d c_{\varphi}}{dt} + \frac{c_y \cdot c_{\varphi}}{y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{y \cos \varphi \cdot \partial \varphi} \quad \dots (16)$$

b) Proudění je stacionární.

Potom $\frac{dc}{dt} = 0$

c) Z kruhové symetrie vyplývá že $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$

d) Platí rovnice kontinuity.

e) Platí rovnice stavu plynů.

Po dosazení do (6.34) za $\frac{dc_{\varphi}}{dt}$ ze (6.26) a po zjednodušení podle zavedených předpokladů bude:

$$\frac{\partial c_{\varphi}}{\partial y} c_y + \frac{c_y \cdot c_{\varphi}}{y} = 0 \Rightarrow \frac{\partial c_{\varphi}}{\partial y} + \frac{c_{\varphi}}{y} = 0$$

Po separaci proměnných a integraci plyne:

$$c_{\varphi} = \frac{k_1}{y} \quad (k_1 = \text{konstanta}) \quad \dots (17)$$

Rovnicí (15) lze upravit dosazením ze (7b) při respektování předpokladů pro proudění:

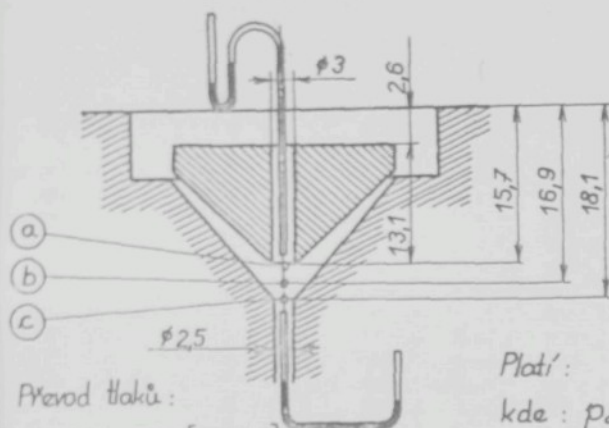
$$\frac{\partial c_y}{\partial y} \cdot c_y - \frac{c_y^2}{y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

Po dosazení za rychlost c_{φ} z rovnice (17) a zavedením obyčejných derivací bude:

$$c_y \cdot \frac{dc_y}{dy} - \frac{k_1^2}{y^3} = - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} \quad \dots (18)$$

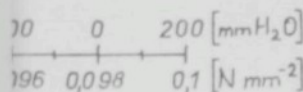
Toto je diferenciální rovnice, kterou po úpravě je možno integrovat a řešit tlak p .

MĚŘENÍ PITOTOVOU TRUBICÍ DNE 25.1.1969



Délky na výkrese
uvedené byly změ-
řeny při $p_0 = 0,4 \text{ N mm}^{-2}$
hloubkoměram za
rotace

Převod tlaků:



Platí: $p_d = p_c - p_s$,
kde: p_d - dynamický tlak
 p_c - celkový tlak
 p_s - statický tlak

MĚŘICÍ MÍSTO	ROTOREK MĚŘICÍ MÍSTO (a)					STATOREK MĚŘICÍ MÍSTO (c)					STŘED MĚŘICÍ MÍSTO (b)				
$p_0 [\text{N mm}^{-2}]$	0,3	0,325	0,35	0,375	0,4	0,3	0,325	0,35	0,375	0,4	0,3	0,325	0,35	0,375	0,4
$p_s [\text{mmHg}]$	-105	-117	-123	-132	-142	-101	-108	-119	-131	-176	-126	-136	-152	-171	-179
$p_c [\text{mmHg}]$	-20	-25	-27	-30	-35	-6	-6	-6	-7	-10	-7	-8	-9	-10	-12
$p_d [\text{mmHg}]$	85	92	96	102	108	95	102	113	124	166	119	128	141	161	167

K vyvození rychlosti je třeba dynamický tlak:

$$\frac{p_d}{\rho} = \frac{c^2}{2} \Rightarrow c = \sqrt{2 \cdot \frac{p_d}{\rho}} \quad \dots \quad [\text{m s}^{-1}]$$

Přítoková hmotnost:

$$M = S_R \cdot c_R \cdot \rho + S_S \cdot c_S \cdot \rho \quad \dots \quad [\text{kg s}^{-1}]$$

$$\text{kde: } S_R = \frac{\pi \cdot 3^2}{4}, S_S = \frac{\pi \cdot 2,5^2}{4} \quad \dots \quad [\text{mm}^2]$$

TLAK PŘED VÝZOU P= 30000,0

PROTEKLA HŮTA ZE ČTYŘECH VÝZ. N1- 3,291 KG/HOD

PROTEKLA HŮTA V ÚSEKU (1-1) P0= ,8141 KG/HOD

CELKOVÁ PROTEKLA HŮTA V ÚSEKU (1-2) P= 4,105 KG/HOD

P1-	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
H-	,612402	,580059	,555127	,534238	,517393	,502568	,489473	,477988	,466504
7,80	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
8,00	9736,73	9762,35	9787,61	9814,23	9839,36	9864,80	9889,97	9914,73	9941,71
8,50	9815,61	9844,13	9871,77	9899,37	9925,68	9952,61	9978,88	10004,5	10032,3
9,00	9891,80	9911,74	9940,98	9970,17	9997,73	10025,3	10052,1	10078,3	10107,3
9,50	9936,79	9968,40	9998,40	10029,2	10057,4	10085,3	10113,1	10139,9	10168,9
10,0	9982,71	10015,1	10047,4	10078,0	10107,2	10135,8	10163,7	10190,9	10220,6
10,5	10020,9	10055,3	10087,1	10118,8	10148,5	10177,5	10205,8	10233,5	10263,6
11,0	10053,2	10087,8	10120,4	10152,6	10182,1	10211,6	10240,4	10267,9	10298,4
11,5	10079,1	10114,6	10147,3	10180,0	10209,4	10239,1	10269,4	10298,7	10325,8
12,0	10100,5	10135,8	10169,1	10201,1	10231,0	10260,3	10289,4	10317,3	10347,3
12,5	10116,7	10151,9	10185,1	10217,0	10246,9	10276,0	10304,5	10332,3	10362,6
13,0	10128,6	10163,5	10196,0	10227,9	10257,0	10286,2	10314,0	10341,4	10371,3
13,5	10136,1	10169,9	10201,8	10232,0	10261,5	10290,6	10319,1	10347,9	10373,1
14,0	10138,0	10170,8	10201,5	10231,7	10260,9	10289,2	10317,3	10345,9	10368,9
14,5	10134,8	10166,1	10197,8	10228,1	10257,4	10285,1	10312,8	10340,8	10352,0
15,0	10125,7	10155,9	10186,0	10216,8	10247,7	10277,3	10306,8	10335,8	10364,6
15,5	10110,2	10139,0	10168,7	10197,8	10226,6	10255,6	10284,5	10312,9	10340,4
16,0	10080,4	10109,5	10138,3	10167,2	10195,9	10224,6	10253,4	10282,4	10311,3
16,5	10037,7	10066,2	10095,1	10124,3	10153,0	10181,9	10210,6	10239,6	10268,0
16,8	10000,2	9999,95	9999,94	10000,1	9999,95	9999,98	10000,3	10000,1	10000,2

P1-	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
H-	,456934	,447963	,439707	,432051	,424395	,418652	,412910	,405211	,401426
7,80	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
8,00	9967,13	9993,77	10017,9	10043,3	10068,9	10092,3	10115,3	10143,1	10164,9
8,50	10058,2	10085,6	10109,9	10136,1	10163,5	10190,6	10219,4	10237,6	10260,1
9,00	10133,2	10161,8	10186,6	10212,7	10240,6	10263,3	10287,2	10315,9	10330,0
9,50	10195,7	10224,9	10249,6	10276,5	10304,4	10327,3	10351,6	10380,5	10402,9
10,0	10247,8	10276,7	10302,3	10329,0	10357,8	10386,5	10404,5	10433,8	10456,5
10,5	10290,5	10319,9	10345,5	10372,3	10400,9	10424,0	10448,3	10478,0	10500,5
11,0	10325,8	10355,0	10380,5	10407,7	10436,4	10459,7	10483,8	10513,3	10535,6
11,5	10353,7	10382,8	10408,7	10435,8	10464,1	10487,5	10511,5	10540,8	10563,6
12,0	10374,8	10404,3	10429,5	10456,5	10485,3	10510,0	10532,5	10561,8	10580,8
12,5	10389,6	10419,1	10444,4	10470,6	10499,3	10521,9	10545,7	10575,2	10597,5
13,0	10397,7	10426,8	10451,6	10478,2	10506,6	10528,9	10552,3	10581,5	10603,5
13,5	10399,2	10427,8	10452,2	10477,9	10505,7	10528,0	10551,1	10579,1	10600,8
14,0	10392,7	10420,4	10444,3	10468,7	10495,7	10517,1	10539,7	10567,7	10588,6
14,5	10376,0	10402,5	10425,2	10448,9	10475,0	10495,3	10516,9	10543,5	10563,6
15,0	10346,8	10371,0	10392,1	10414,4	10438,6	10457,9	10477,8	10503,1	10521,9
15,5	10399,5	10321,4	10340,0	10360,1	10380,9	10398,0	10415,9	10436,5	10455,3
16,0	10270,7	10243,4	10257,8	10273,4	10290,4	10303,8	10318,5	10335,7	10349,3
16,5	10110,9	10119,5	10127,1	10135,5	10144,0	10151,5	10158,6	10168,2	10175,5
16,8	9999,96	9999,93	10000,1	10000,3	10000,2	10000,2	10000,2	10000,3	10000,3

PLAK PŘED VÝZOU P = 22500,0

PROTEKLA HMOTA ZE ČTYŘECH ÚST: $W_1 = 3,565 \text{ KG/HOD}$ PROTEKLA HMOTA V ÚSEKU (0-1): $W_0 = 8872 \text{ KG/HOD}$ CELKOVÁ PROTEKLA HMOTA V ÚSEKU (1-2): $W = 8,447 \text{ KG/HOD}$

P1-	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
P-	553005	556260	559426	562633	565729	568645	571674	574418	578005
Y=7,80	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
8,00	9745,94	9771,36	9796,78	9822,20	9847,61	9874,91	9900,29	9925,17	9949,13
8,50	9845,57	9873,90	9901,96	9929,16	9952,34	9981,03	10007,2	10030,2	10057,5
9,00	9929,02	9956,81	9985,20	10012,3	10039,3	10068,2	10095,2	10119,0	10145,5
9,50	9997,61	10027,0	10056,7	10086,3	10111,7	10141,5	10168,7	10192,8	10220,6
10,0	10055,8	10085,6	10115,3	10143,7	10171,3	10202,1	10227,7	10254,1	10282,3
10,5	10103,7	10133,9	10164,0	10192,8	10221,5	10252,0	10280,6	10304,8	10333,3
11,0	10143,2	10174,5	10204,4	10233,6	10262,7	10293,7	10321,5	10346,1	10375,0
11,5	10175,5	10206,7	10237,7	10266,8	10295,8	10325,6	10354,8	10379,2	10406,5
12,0	10201,4	10232,4	10263,3	10292,3	10321,1	10352,5	10380,6	10404,9	10434,2
12,5	10220,8	10251,7	10282,5	10311,4	10340,2	10370,8	10399,5	10423,0	10452,2
13,0	10234,4	10264,6	10294,7	10323,5	10351,6	10382,8	10410,1	10434,3	10462,8
13,5	10241,5	10271,0	10300,5	10328,6	10356,1	10386,6	10413,3	10436,8	10464,7
14,0	10241,5	10270,4	10298,6	10326,1	10352,2	10381,5	10407,6	10430,5	10457,2
14,5	10233,8	10262,7	10291,7	10319,3	10346,9	10376,4	10401,3	10413,0	10439,1
15,0	10216,3	10240,8	10265,9	10289,7	10312,9	10338,6	10361,7	10381,1	10405,5
15,5	10198,9	10223,9	10248,7	10273,5	10297,7	10322,5	10342,7	10359,8	10381,4
16,0	10136,6	10155,1	10171,7	10187,0	10201,1	10215,4	10236,0	10249,7	10266,1
16,5	10065,2	10074,0	10082,6	10090,1	10096,3	10105,7	10115,3	10122,1	10130,3
16,8	10000,2	9999,95	9999,91	10000,1	9999,95	9999,96	10000,3	10000,1	10000,2
P1-	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
P-	452141	445449	437793	430251	425309	420566	416024	410996	405254
Y=7,80	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
8,00	9974,56	9998,70	10022,8	10051,3	10075,4	10101,4	10128,5	10146,4	10178,0
8,50	10063,6	10107,8	10136,5	10161,1	10184,9	10212,5	10239,7	10259,7	10289,8
9,00	10173,4	10198,4	10227,7	10252,1	10277,6	10303,8	10331,7	10351,8	10382,1
9,50	10247,8	10273,0	10303,2	10327,8	10357,9	10379,9	10408,1	10428,4	10458,8
10,0	10309,7	10335,3	10365,7	10390,6	10416,1	10442,8	10471,2	10491,2	10521,9
10,5	10361,1	10386,4	10417,3	10441,9	10467,7	10494,7	10523,5	10543,2	10574,3
11,0	10402,6	10428,4	10459,0	10484,0	10509,8	10537,0	10565,6	10585,7	10616,5
11,5	10436,1	10461,7	10492,7	10517,0	10543,0	10570,3	10598,6	10618,6	10649,3
12,0	10461,5	10486,9	10517,9	10542,6	10567,9	10595,0	10623,3	10643,7	10674,3
12,5	10479,5	10504,8	10535,7	10559,7	10585,5	10612,0	10640,1	10659,9	10690,3
13,0	10489,4	10514,7	10544,9	10568,8	10594,0	10620,4	10640,5	10668,2	10698,1
13,5	10491,2	10515,9	10545,5	10568,8	10594,0	10619,8	10647,3	10666,4	10695,3
14,0	10483,2	10507,3	10535,7	10559,1	10583,1	10608,3	10634,7	10653,9	10682,6
14,5	10465,4	10486,3	10513,6	10535,9	10558,8	10582,9	10608,9	10626,4	10654,6
15,0	10420,0	10449,3	10474,9	10495,6	10516,9	10540,0	10563,8	10580,9	10607,0
15,5	10371,0	10390,1	10413,0	10430,9	10450,1	10470,6	10491,6	10506,7	10530,3
16,0	10281,8	10295,4	10314,2	10329,0	10344,4	10360,6	10377,4	10389,5	10408,3
16,5	10139,7	10146,0	10156,0	10163,6	10171,4	10179,9	10189,2	10195,7	10205,9
16,8	9999,96	9999,93	10000,1	10000,3	10000,2	10000,2	10000,2	10000,3	10000,3

LAK PŘED ÚZDÍV P= 35000,0

ROTEKLA HMOTA ZE ČTYŘECH ÚZÍ M1= 3,639 KG/HOD

ROTEKLA HMOTA V ÚSEKU (0-1) M0= 9525 KG/HOD

ELKOVA PROTEKLA HMOTA V ÚSEKU (1-2) M= 4,792 KG/HOD

P1-	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
M-	521436	510654	500547	491367	482773	475117	468418	460762	455020
7,80	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
8,00	9754,99	9780,39	9805,76	9831,13	9857,13	9882,49	9905,95	9933,81	9956,65
8,50	9876,62	9902,72	9925,44	9955,50	9982,10	10007,6	10031,7	10060,2	10084,3
9,00	9976,90	10003,8	10031,3	10058,2	10085,6	10111,8	10136,7	10165,3	10189,5
9,50	10061,0	10088,2	10116,6	10144,3	10172,0	10198,3	10223,4	10252,9	10277,3
10,0	10130,9	10159,0	10187,1	10215,1	10243,7	10270,4	10295,4	10325,4	10350,1
10,5	10188,5	10217,3	10246,0	10274,4	10303,4	10330,4	10355,4	10385,5	10410,5
11,0	10237,0	10265,9	10294,7	10323,5	10352,2	10379,6	10404,5	10434,9	10459,7
11,5	10275,8	10304,5	10333,6	10362,4	10391,6	10418,8	10444,1	10474,3	10498,9
12,0	10306,9	10335,4	10364,6	10393,7	10422,1	10449,1	10474,9	10505,0	10529,4
12,5	10329,5	10358,6	10387,0	10415,4	10444,3	10471,2	10496,3	10526,9	10550,6
13,0	10344,4	10372,6	10401,8	10430,0	10458,3	10484,6	10509,5	10539,4	10563,6
13,5	10352,1	10379,2	10407,5	10435,1	10462,7	10488,9	10513,2	10542,5	10566,1
14,0	10350,2	10376,6	10404,3	10430,7	10457,6	10483,2	10505,3	10535,0	10557,4
14,5	10337,9	10363,1	10388,9	10414,1	10439,8	10464,3	10486,8	10513,7	10535,6
15,0	10312,0	10336,1	10360,1	10383,5	10406,8	10428,9	10450,4	10475,6	10495,2
15,5	10270,0	10290,4	10311,4	10331,8	10352,2	10372,1	10390,0	10413,0	10430,7
16,0	10202,7	10216,2	10234,5	10250,2	10266,6	10281,7	10296,4	10313,6	10327,4
16,5	10097,9	10105,6	10114,0	10122,0	10130,1	10138,3	10145,5	10154,6	10162,1
16,8	10000,2	9999,95	9999,94	10000,1	9999,95	9999,96	9999,97	10000,1	9999,91
P1-	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
M-	449277	443535	437793	432051	427266	422480	418652	413867	409082
7,80	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
8,00	9940,76	10006,1	10032,0	10058,8	10084,5	10110,4	10132,1	10159,8	10188,1
8,50	10106,4	10132,7	10160,9	10189,2	10213,9	10239,7	10262,0	10290,2	10319,0
9,00	10214,3	10240,4	10267,6	10296,0	10321,4	10347,3	10369,6	10397,9	10427,3
9,50	10307,3	10328,5	10355,5	10384,5	10410,0	10436,7	10458,6	10487,0	10516,6
10,0	10375,4	10401,8	10429,5	10458,4	10484,1	10510,4	10533,1	10561,2	10591,0
10,5	10435,5	10462,3	10490,3	10518,8	10544,8	10571,5	10593,8	10622,8	10652,3
11,0	10485,0	10511,6	10539,3	10568,8	10594,6	10621,0	10643,7	10671,8	10701,6
11,5	10524,7	10551,0	10578,6	10607,9	10633,5	10660,3	10682,8	10711,3	10740,9
12,0	10554,4	10581,2	10609,3	10638,4	10663,9	10690,5	10712,3	10741,2	10770,1
12,5	10576,1	10602,2	10630,1	10659,2	10684,5	10710,4	10732,7	10760,9	10790,3
13,0	10587,9	10614,5	10641,2	10670,2	10694,9	10720,7	10742,9	10771,1	10799,8
13,5	10590,4	10615,8	10642,4	10670,8	10695,5	10720,7	10742,3	10769,9	10796,6
14,0	10581,1	10605,9	10632,0	10659,2	10683,3	10708,6	10729,1	10755,6	10783,8
14,5	10559,1	10581,0	10606,8	10632,9	10656,0	10679,6	10700,2	10725,7	10752,8
15,0	10516,6	10538,7	10562,0	10586,5	10608,0	10630,7	10649,1	10673,6	10698,7
15,5	10449,1	10468,1	10489,6	10511,5	10530,3	10550,3	10567,4	10589,3	10611,8
16,0	10342,5	10358,1	10374,3	10391,8	10407,0	10423,4	10436,9	10454,1	10472,5
16,5	10169,7	10178,1	10186,6	10195,9	10204,2	10213,1	10220,5	10229,2	10239,3
16,8	9999,96	9999,93	10000,1	10000,3	10000,2	10000,2	10000,2	10000,3	10000,3

PLÁK PŘED VÝZOV P= 37500,0

PROTEKLA HMOTA ZE ČTYŘECH VÝZ M1= 4,114 KG/HOD

PROTEKLA HMOTA V ÚSEKU (0-1) M0= 1,023 KG/HOD

CELKOVÁ PROTEKLA HMOTA V ÚSEKU (1-2) M= 5,137 KG/HOD

P1=	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
H=	,501221	,493301	,485645	,478945	,472245	,466504	,460762	,455020	,451191
Y=7,80	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
8,00	9764,70	9790,04	9816,65	9841,97	9868,55	9893,23	9918,52	9945,07	9964,75
8,50	9908,33	9934,92	9962,77	9988,03	10015,2	10040,4	10066,3	10094,0	10113,5
9,00	10027,4	10054,7	10083,3	10109,2	10137,1	10162,3	10188,6	10216,6	10236,8
9,50	10127,0	10155,1	10183,9	10210,6	10238,6	10264,0	10291,3	10319,2	10339,5
10,0	10210,5	10238,8	10267,8	10294,2	10323,0	10349,3	10375,6	10404,3	10424,2
10,5	10279,7	10308,4	10337,0	10364,3	10392,9	10418,8	10446,0	10474,3	10495,2
11,0	10336,6	10365,1	10394,7	10421,7	10450,6	10476,9	10503,8	10532,5	10553,1
11,5	10387,6	10411,4	10440,9	10468,3	10497,0	10523,7	10550,3	10579,4	10599,6
12,0	10419,4	10447,5	10477,4	10504,7	10533,2	10559,1	10586,8	10614,5	10634,6
12,5	10446,0	10474,5	10503,7	10530,8	10559,2	10585,6	10611,9	10640,7	10660,6
13,0	10463,4	10491,3	10520,3	10547,4	10575,7	10600,7	10627,7	10655,6	10675,7
13,5	10471,2	10499,0	10526,7	10553,1	10580,8	10603,8	10632,1	10659,5	10678,8
14,0	10467,3	10494,5	10521,6	10547,4	10574,4	10600,2	10623,9	10650,8	10669,5
14,5	10451,1	10478,5	10503,4	10527,0	10552,8	10578,1	10600,6	10625,7	10643,3
15,0	10418,1	10441,0	10465,9	10488,1	10512,2	10533,8	10555,6	10580,7	10597,3
15,5	10362,5	10383,1	10404,3	10424,3	10444,9	10464,3	10484,3	10505,6	10520,1
16,0	10273,2	10289,7	10306,3	10322,2	10338,3	10353,1	10369,3	10386,1	10398,0
16,5	10133,5	10141,6	10149,9	10158,2	10166,9	10175,0	10183,2	10191,6	10198,2
16,8	10000,2	9999,95	9999,94	9999,51	9999,95	9999,98	9999,62	10000,1	9999,61

P1=	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
H=	,445449	,441621	,435979	,432051	,428723	,424395	,420566	,416733	,412910
Y=7,80	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
8,00	9993,77	10015,3	10046,2	10069,6	10093,0	10117,7	10142,9	10168,8	10195,8
8,50	10143,1	10164,5	10196,4	10219,7	10243,6	10268,1	10293,6	10320,1	10347,0
9,00	10267,0	10288,4	10321,0	10344,2	10368,1	10393,2	10418,9	10444,5	10472,5
9,50	10369,8	10391,4	10424,0	10447,4	10471,4	10496,5	10522,3	10548,6	10575,1
10,0	10455,3	10476,5	10509,9	10533,4	10557,6	10582,3	10608,3	10634,7	10662,4
10,5	10525,9	10546,9	10566,0	10604,2	10626,7	10653,6	10679,8	10705,9	10733,2
11,0	10583,5	10605,9	10638,7	10662,2	10686,3	10711,0	10737,5	10763,9	10791,5
11,5	10630,0	10651,5	10683,3	10708,0	10732,5	10757,6	10783,2	10810,0	10837,3
12,0	10665,9	10687,3	10720,3	10743,4	10767,7	10792,6	10818,1	10844,7	10872,4
12,5	10690,7	10711,9	10745,4	10768,4	10792,6	10817,4	10842,1	10868,6	10896,2
13,0	10705,6	10726,7	10758,9	10781,9	10806,0	10830,1	10855,4	10881,1	10908,1
13,5	10708,1	10729,2	10761,4	10783,7	10807,2	10830,7	10855,4	10881,2	10907,5
14,0	10698,1	10718,1	10749,1	10771,5	10793,8	10817,4	10840,9	10866,2	10892,1
14,5	10670,9	10691,0	10720,9	10741,6	10763,5	10786,0	10808,5	10833,3	10858,2
15,0	10622,6	10640,4	10668,8	10698,5	10708,8	10730,4	10751,9	10774,7	10797,5
15,5	10543,3	10559,1	10584,7	10601,8	10620,2	10639,1	10658,8	10679,0	10699,9
16,0	10415,5	10429,0	10448,5	10462,6	10478,0	10492,9	10509,1	10525,3	10542,8
16,5	10207,5	10215,1	10225,3	10233,2	10241,2	10249,4	10257,8	10267,5	10277,3
16,8	9999,96	9999,93	9999,54	10000,3	10000,2	10000,2	10000,2	10000,3	10000,3

BLK PŘED VÝZOU - 40000,0
PROTEKČNÍ HMOTA ZE ČTYŘECH VÝZ. M1- 4,354 KG/NOČ
PROTEKČNÍ HMOTA V ÚSEKU (0-1) M0- 1,353 KG/NOČ
CELKOVÁ PROTEKČNÍ HMOTA V ÚSEKU (1-2) - 5,541 KG/NOČ

P1-	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
M-	4837,00	4779,68	4741,60	4684,16	4645,90	4588,40	4550,20	4511,91	4473,63
T-7,00	9700,00	9725,00	9750,00	9775,00	9800,00	9825,00	9850,00	9875,00	9900,00
8,00	9700,22	9806,78	9826,90	9855,35	9874,17	9907,12	9929,84	9953,43	9977,82
8,50	9953,61	9980,56	10001,7	10013,1	10021,4	10028,7	10035,2	10039,0	10041,8
9,00	10097,7	10124,9	10144,6	10174,3	10196,1	10228,0	10251,1	10275,4	10299,7
9,50	10237,6	10245,3	10265,3	10285,5	10317,3	10349,3	10373,0	10396,8	10421,7
10,0	10337,2	10345,7	10368,5	10396,2	10418,3	10450,4	10473,6	10496,1	10522,6
10,5	10401,3	10429,4	10449,8	10482,4	10502,1	10535,0	10557,9	10581,9	10607,2
11,0	10469,9	10497,7	10518,4	10540,3	10570,4	10603,3	10627,0	10650,8	10675,7
11,5	10525,5	10553,7	10574,2	10604,2	10626,5	10658,9	10682,3	10707,1	10731,7
12,0	10569,5	10597,5	10617,7	10644,7	10669,6	10703,4	10726,4	10748,6	10774,1
12,5	10601,9	10629,7	10650,8	10673,4	10701,4	10733,1	10765,5	10790,9	10805,2
13,0	10622,6	10649,7	10669,6	10693,8	10720,4	10753,6	10775,4	10799,7	10823,9
13,5	10639,3	10658,7	10677,3	10704,9	10727,4	10750,7	10770,7	10804,7	10828,2
14,0	10625,2	10652,2	10670,3	10699,8	10719,1	10748,8	10771,6	10794,6	10817,7
14,5	10603,8	10629,1	10647,2	10674,3	10693,7	10723,3	10744,0	10765,9	10787,8
15,0	10550,5	10584,0	10601,1	10626,5	10644,2	10672,1	10691,1	10712,1	10732,4
15,5	10488,0	10509,3	10529,7	10546,8	10563,0	10586,8	10604,4	10622,0	10640,8
16,0	10371,6	10388,2	10399,8	10417,9	10431,0	10450,4	10463,6	10478,1	10492,7
16,5	10181,9	10192,5	10198,6	10208,7	10215,1	10225,5	10232,2	10240,4	10248,6
16,8	10000,2	10000,6	9999,94	9999,51	10000,6	10000,6	9999,62	10000,1	9999,61

P1-	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
M-	4426,75	4397,07	4359,79	4320,51	4282,23	4263,09	4274,80	4186,52	4167,38
T-7,00	9925,00	9950,00	9975,00	10000,0	10025,0	10050,0	10075,0	10100,0	10125,0
8,00	10003,1	10029,3	10054,7	10081,2	10110,0	10127,3	10156,8	10186,1	10204,7
8,50	10170,0	10205,2	10231,4	10258,8	10287,4	10303,8	10333,5	10364,4	10382,1
9,00	10325,2	10361,9	10378,6	10406,5	10434,3	10451,2	10481,4	10511,5	10529,7
9,50	10447,2	10473,4	10500,1	10528,6	10557,0	10573,3	10604,1	10634,7	10652,3
10,0	10548,2	10575,1	10601,9	10629,9	10659,0	10674,8	10705,1	10736,4	10754,0
10,5	10632,5	10658,9	10686,5	10714,1	10742,8	10759,4	10789,2	10821,4	10837,9
11,0	10701,9	10728,0	10755,2	10783,7	10812,1	10828,3	10859,0	10889,6	10907,0
11,5	10757,6	10783,4	10810,5	10838,6	10867,9	10882,7	10913,1	10944,6	10961,7
12,0	10799,7	10826,6	10853,4	10881,3	10909,2	10925,0	10955,2	10986,5	11003,4
12,5	10830,7	10856,2	10882,8	10910,6	10939,6	10955,2	10985,2	11015,2	11031,9
13,0	10848,1	10874,1	10900,0	10927,7	10956,6	10970,9	11000,6	11031,9	11047,4
13,5	10853,0	10878,4	10903,7	10931,4	10959,0	10973,3	11002,6	11033,1	11048,6
14,0	10841,9	10866,1	10891,4	10918,0	10944,5	10958,8	10987,6	11017,6	11032,5
14,5	10830,9	10854,0	10878,3	10903,8	10929,4	10923,7	10951,5	10979,3	10995,0
15,0	10753,9	10776,0	10799,4	10822,8	10847,3	10859,7	10886,6	10913,5	10927,2
15,5	10659,7	10679,9	10701,3	10722,7	10744,0	10755,8	10779,6	10803,4	10818,6
16,0	10508,6	10524,5	10541,8	10559,1	10576,4	10586,6	10605,3	10625,2	10635,6
16,5	10257,1	10265,6	10274,3	10284,4	10294,6	10299,0	10310,7	10321,3	10327,3
16,8	9999,34	10000,5	9999,54	10000,6	10000,2	10000,2	10000,2	10000,3	10000,3

TRAK PŘED DÝZOU P- 30000,0

PROTEKLA HMOTA ZE ČTYŘECH DÝZ M= 3,291 KG/HOD

PROTEKLA HMOTA V ÚSEKU (0-1) MO= 1,018 KG/HOD

CELKOVÁ PROTEKLA HMOTA V ÚSEKU (1-2) M= 4,309 KG/HOD

H=	400000	410000	420000	430000	440000	450000	460000	470000	480000
P1=	10143,5	10094,1	10049,2	10008,7	9971,68	9937,99	9906,54	9878,47	9853,20
Y-7,80	10143,5	10094,1	10049,2	10008,7	9971,68	9937,99	9906,54	9878,47	9853,20
8,00	10192,0	10142,2	10096,6	10056,0	10018,1	9983,97	9953,15	9924,54	9898,68
8,50	10296,6	10246,6	10200,3	10158,9	10120,8	10085,9	10053,8	10024,4	9997,79
9,00	10393,5	10332,6	10286,6	10243,8	10205,4	10169,8	10137,4	10107,3	10079,9
9,50	10455,1	10404,3	10357,3	10314,7	10275,4	10239,5	10206,3	10176,0	10148,4
10,0	10514,5	10463,0	10415,0	10373,4	10333,7	10297,5	10264,0	10233,4	10204,7
10,5	10563,6	10511,8	10464,6	10421,5	10381,9	10345,2	10311,5	10280,7	10251,8
11,0	10602,4	10551,3	10503,9	10460,6	10420,9	10384,4	10350,3	10319,3	10290,3
11,5	10633,6	10581,9	10534,6	10491,6	10451,9	10414,8	10381,5	10350,3	10321,7
12,0	10656,6	10605,2	10558,0	10515,2	10475,4	10438,9	10405,2	10373,8	10345,7
12,5	10671,3	10620,2	10574,0	10530,9	10491,4	10455,5	10422,0	10391,0	10362,3
13,0	10678,4	10627,5	10581,7	10539,3	10500,2	10464,3	10431,6	10401,0	10372,9
13,5	10675,5	10625,8	10580,5	10538,7	10500,6	10466,0	10433,0	10403,5	10376,1
14,0	10661,8	10613,4	10569,7	10529,4	10491,7	10457,8	10426,5	10397,5	10371,0
14,5	10634,7	10588,4	10545,9	10507,1	10471,3	10439,0	10408,8	10381,3	10355,4
15,0	10588,3	10544,4	10504,7	10468,5	10435,6	10405,2	10377,2	10351,6	10328,1
15,5	10513,8	10475,2	10439,5	10407,3	10377,7	10351,2	10326,8	10304,2	10283,4
16,0	10395,5	10364,0	10336,2	10310,5	10287,3	10266,1	10247,0	10229,4	10213,7
16,5	10199,9	10182,9	10167,8	10154,1	10142,2	10131,0	10120,9	10112,2	10103,4
16,8	9999,71	9999,90	9999,78	10000,3	9999,97	10000,2	9999,67	10000,0	10000,1
H=	490000	500000	510000	520000	530000	540000	550000	560000	570000
P1=	9829,61	9808,28	9788,62	9770,65	9754,93	9739,77	9726,29	9713,38	9702,15
Y-7,80	9829,61	9808,28	9788,62	9770,65	9754,93	9739,77	9726,29	9713,38	9702,15
8,00	9874,50	9853,09	9832,82	9814,78	9797,89	9782,69	9768,64	9755,76	9744,02
8,50	9972,85	9950,65	9929,62	9910,80	9893,15	9877,19	9862,39	9848,76	9836,28
9,00	10054,7	10031,3	10010,1	9990,13	9971,84	9955,25	9939,84	9925,61	9912,04
9,50	10122,6	10098,5	10076,7	10056,7	10037,9	10020,2	10004,3	9989,67	9975,68
10,0	10178,8	10154,7	10132,3	10111,8	10092,5	10074,5	10058,3	10042,7	10028,5
10,5	10225,3	10201,1	10178,3	10157,4	10137,8	10120,0	10103,0	10087,3	10072,9
11,0	10263,7	10239,1	10216,5	10195,2	10175,3	10157,4	10140,3	10124,0	10109,4
11,5	10294,6	10270,1	10247,1	10225,7	10205,2	10187,6	10170,5	10154,3	10139,5
12,0	10318,7	10293,8	10271,1	10249,5	10230,0	10211,5	10194,5	10178,0	10163,5
12,5	10335,9	10311,3	10288,5	10267,3	10247,9	10229,5	10212,3	10196,2	10181,4
13,0	10346,8	10322,5	10300,1	10279,1	10259,8	10241,2	10224,4	10208,8	10194,3
13,5	10350,2	10326,4	10304,7	10283,8	10264,9	10247,4	10230,6	10215,1	10201,0
14,0	10346,2	10323,0	10301,5	10282,2	10263,8	10246,4	10230,4	10215,9	10201,6
14,5	10332,3	10310,6	10290,2	10271,5	10253,9	10238,0	10223,1	10208,6	10195,7
15,0	10306,2	10286,4	10268,0	10250,9	10234,4	10219,8	10206,3	10193,4	10181,6
15,5	10264,4	10247,0	10230,4	10216,1	10201,9	10189,0	10177,5	10166,0	10155,7
16,0	10198,9	10185,1	10172,7	10161,3	10150,8	10141,2	10132,3	10123,9	10116,1
16,5	10096,3	10089,3	10083,4	10077,8	10072,4	10067,6	10062,8	10058,9	10055,1
16,8	10000,0	10000,2	10000,2	9999,99	9999,92	9999,98	10000,1	9999,93	9999,75

INVERZNÍ FUNKCE $U=F(V)$

$Y=$	$H=,40 P1= 10143$ ARGUM.V $U=F(V)$	$H=,41 P1= 10094$ ARGUM.V $U=F(V)$	$H=,42 P1= 10049$ ARGUM.V $U=F(V)$	$H=,43 P1= 10008$ ARGUM.V $U=F(V)$	$H=,44 P1= 9971$ ARGUM.V $U=F(V)$
8,00	-129,23, 464845	-129,04, 465361	-128,78, 466089	-128,46, 466998	-128,10, 468012
8,50	-124,75, 477551	-124,52, 478247	-124,22, 479091	-123,86, 480136	-123,46, 481312
9,00	-121,49, 487045	-121,20, 487878	-120,85, 488910	-120,45, 490071	-120,00, 491413
9,50	-118,34, 493350	-118,00, 494373	-117,60, 495547	-117,15, 496901	-117,65, 498369
10,0	-118,27, 496539	-117,87, 497730	-117,41, 499100	-116,90, 500652	-116,35, 502314
10,5	-116,24, 496660	-117,77, 498049	-117,24, 499618	-116,67, 501347	-116,05, 503214
11,0	-119,23, 493690	-118,68, 495329	-118,08, 497102	-117,44, 499037	-116,75, 501114
11,5	-121,25, 487727	-120,62, 489565	-119,84, 491575	-119,21, 493747	-118,44, 496039
12,0	-124,34, 478744	-123,62, 480845	-122,84, 483088	-122,02, 485501	-121,16, 488013
12,5	-126,55, 466743	-127,71, 469106	-126,82, 471640	-125,90, 474275	-124,93, 477037
13,0	-133,94, 451773	-132,98, 454401	-131,97, 457207	-130,92, 460118	-129,83, 463136
13,5	-140,63, 433759	-139,52, 436707	-138,36, 439788	-137,17, 442980	-135,95, 446285
14,0	-148,76, 412728	-147,47, 415999	-146,14, 419409	-144,79, 422912	-143,40, 426484
14,5	-150,52, 386653	-157,02, 392276	-155,49, 395995	-153,93, 399814	-152,35, 403707
15,0	-170,17, 361438	-168,41, 365416	-166,84, 369498	-164,84, 373660	-163,03, 377905
15,5	-184,07, 330986	-182,00, 335394	-179,82, 339854	-177,83, 344390	-175,73, 348978
16,0	-200,73, 297125	-198,26, 301966	-195,79, 306880	-193,33, 311829	-190,87, 316826
16,5	-220,88, 259468	-217,89, 264850	-214,92, 270266	-211,97, 275704	-209,05, 281174
16,8	-236,15, 232934	-232,72, 238762	-229,34, 244583	-225,99, 250420	-222,69, 256234

$Y=$	$H=,45 P1= 9937$ ARGUM.V $U=F(V)$	$H=,46 P1= 9906$ ARGUM.V $U=F(V)$	$H=,47 P1= 9878$ ARGUM.V $U=F(V)$	$H=,48 P1= 9853$ ARGUM.V $U=F(V)$	$H=,49 P1= 9829$ ARGUM.V $U=F(V)$
8,00	-127,68, 469184	-127,23, 470492	-126,74, 471888	-126,21, 473400	-125,65, 474979
8,50	-123,01, 482623	-122,51, 484044	-121,99, 485580	-121,42, 487232	-120,83, 488951
9,00	-119,51, 492865	-118,98, 494455	-118,41, 496135	-117,80, 497932	-117,17, 499824
9,50	-117,11, 500013	-116,53, 501751	-115,91, 503606	-115,27, 505579	-114,59, 507623
10,0	-115,75, 504115	-115,11, 506032	-114,45, 508067	-113,75, 510173	-113,02, 512401
10,5	-115,39, 505197	-114,70, 507298	-113,97, 509521	-113,21, 511815	-112,43, 514209
11,0	-116,02, 503309	-115,26, 505601	-114,46, 508016	-113,64, 510506	-112,80, 513098
11,5	-117,63, 498427	-116,80, 500966	-115,93, 503580	-115,03, 506272	-114,11, 509069
12,0	-120,26, 490651	-119,33, 493391	-118,38, 496212	-117,40, 499138	-116,40, 502148
12,5	-123,93, 479930	-122,91, 482904	-121,86, 485962	-120,78, 489105	-119,69, 492334
13,0	-128,72, 466264	-127,58, 469504	-126,41, 472806	-125,23, 476197	-124,03, 479654
13,5	-134,70, 448705	-133,43, 453165	-132,13, 456744	-130,82, 460390	-129,50, 464081
14,0	-141,99, 430175	-140,56, 433939	-139,12, 437774	-137,66, 441683	-136,19, 445641
14,5	-150,76, 407702	-149,15, 411748	-147,52, 415873	-145,89, 420051	-144,25, 424283
15,0	-161,21, 382208	-159,38, 386569	-157,54, 390989	-155,70, 395468	-153,86, 399981
15,5	-173,63, 353644	-171,53, 358350	-169,43, 363086	-167,34, 367882	-165,25, 372709
16,0	-188,43, 321859	-185,99, 326939	-183,57, 332042	-181,16, 337192	-178,77, 342351
16,5	-206,16, 286651	-203,29, 292146	-200,45, 297673	-197,64, 303191	-194,86, 308738
16,8	-219,44, 262063	-216,22, 267878	-213,05, 273706	-209,92, 279531	-206,84, 285353

H=,50 P1= 9008		H=,51 P1= 9788		H=,52 P1= 9770		H=,53 P1= 9754		H=,54 P1= 9739	
Y=	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)
8,00	-125,05 ,476678	-124,45 ,478421	-123,82 ,480261	-123,16 ,482149	-122,49 ,484110				
8,50	-120,21 ,490791	-119,57 ,492676	-118,91 ,494659	-118,22 ,496689	-117,52 ,498794				
9,00	-116,52 ,501785	-115,84 ,503844	-115,14 ,505950	-114,42 ,508131	-113,68 ,510387				
9,50	-113,89 ,509738	-113,17 ,511952	-112,43 ,514241	-111,67 ,516579	-110,89 ,518969				
10,0	-112,28 ,514702	-111,51 ,517079	-110,72 ,519531	-109,91 ,522035	-109,09 ,524592				
10,5	-111,63 ,516704	-110,80 ,519250	-109,96 ,521874	-109,10 ,524551	-108,23 ,527310				
11,0	-111,93 ,515768	-111,04 ,518517	-110,14 ,521321	-109,22 ,524181	-108,29 ,527123				
11,5	-113,18 ,511947	-112,22 ,514882	-111,25 ,517873	-110,26 ,520949	-109,26 ,524059				
12,0	-115,38 ,505216	-114,35 ,508369	-113,30 ,511556	-112,23 ,514831	-111,16 ,518142				
12,5	-118,58 ,495625	-117,45 ,498979	-116,32 ,502397	-115,17 ,505879	-114,01 ,509401				
13,0	-122,81 ,483176	-121,59 ,486764	-120,35 ,490395	-119,10 ,494094	-117,84 ,497808				
13,5	-128,16 ,467841	-126,81 ,471673	-125,46 ,475524	-124,10 ,479447	-122,73 ,483417				
14,0	-134,72 ,449648	-133,23 ,453704	-131,74 ,457837	-130,25 ,461994	-128,75 ,466175				
14,5	-142,51 ,428569	-140,96 ,432684	-139,31 ,437254	-137,67 ,441653	-136,02 ,446108				
15,0	-152,02 ,404554	-150,38 ,408761	-148,64 ,413003	-146,91 ,417452	-144,68 ,423162				
15,5	-163,17 ,377576	-161,40 ,382456	-159,04 ,387403	-156,99 ,392338	-154,95 ,397311				
16,0	-176,39 ,347530	-174,03 ,352744	-171,69 ,357977	-169,37 ,363230	-167,07 ,368503				
16,5	-192,11 ,314288	-189,40 ,319866	-186,71 ,325445	-184,05 ,331024	-181,43 ,336616				
16,8	-203,79 ,291183	-200,79 ,297006	-197,83 ,302823	-194,91 ,308645	-192,03 ,314470				

H=,55 P1= 9726		H=,56 P1= 9713		H=,57 P1= 9702	
Y=	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)
8,00	-121,80 ,486121	-121,09 ,488182	-120,38 ,490293		
8,50	-116,80 ,500950	-116,07 ,503155	-115,32 ,505413		
9,00	-112,93 ,512694	-112,16 ,515053	-111,39 ,517438		
9,50	-110,10 ,521436	-109,30 ,523957	-108,48 ,526504		
10,0	-108,25 ,527228	-107,40 ,529892	-106,55 ,532612		
10,5	-107,34 ,530097	-106,44 ,532941	-105,53 ,535842		
11,0	-107,34 ,530097	-106,39 ,533103	-105,43 ,536195		
11,5	-108,25 ,527228	-107,24 ,530432	-106,21 ,533697		
12,0	-110,08 ,521517	-108,99 ,524901	-107,89 ,528377		
12,5	-112,84 ,512963	-111,67 ,516564	-110,49 ,520234		
13,0	-116,58 ,501593	-115,31 ,505422	-114,04 ,509294		
13,5	-121,36 ,487408	-119,98 ,491446	-118,61 ,495532		
14,0	-127,25 ,470408	-125,75 ,474692	-124,26 ,478974		
14,5	-134,37 ,450591	-132,73 ,455078	-131,09 ,459620		
15,0	-142,86 ,427906	-141,05 ,432658	-139,25 ,437443		
15,5	-152,92 ,402325	-150,90 ,407324	-148,90 ,412362		
16,0	-164,79 ,373794	-162,53 ,378090	-160,29 ,384403		
16,5	-178,83 ,342206	-176,26 ,347820	-173,72 ,353431		
16,8	-189,19 ,320298	-186,38 ,326115	-183,62 ,331933		

TLAK PŘED DÝZOU P- 32500,0

PROTEKLA HMOTA ZE ČTYŘECH DÝZ M1- 3,565 KG/HOD

PROTEKLA HMOTA V USEKU (0-1) MO- 1,103 KG/HOD

CELKOVÁ PROTEKLA HMOTA V USEKU (1-2) M- 4,668 KG/HOD

M-	400000	410000	420000	430000	440000	450000	460000	470000	480000
P1-	10176,1	10115,4	10060,4	10010,4	9964,94	9923,95	9886,33	9852,64	9821,19
Y-7,80	10176,1	10115,4	10060,4	10010,4	9964,94	9923,95	9886,33	9852,64	9821,19
8,00	10232,8	10171,7	10116,9	10066,3	10020,6	9979,22	9941,57	9906,64	9874,96
8,50	10356,5	10295,4	10239,5	10188,4	10142,1	10100,1	10061,3	10025,7	9993,38
9,00	10458,9	10397,6	10341,5	10289,7	10242,7	10199,9	10160,4	10124,7	10091,2
9,50	10544,5	10482,1	10425,1	10374,0	10326,1	10282,6	10242,9	10206,5	10172,8
10,0	10614,7	10552,2	10495,1	10443,4	10395,7	10351,8	10311,8	10274,6	10240,7
10,5	10672,4	10610,0	10553,1	10500,8	10452,4	10408,6	10368,2	10331,2	10296,6
11,0	10719,3	10656,7	10599,9	10547,8	10499,7	10455,3	10414,5	10377,2	10342,4
11,5	10756,2	10693,9	10636,9	10584,8	10536,5	10492,5	10452,2	10414,5	10379,4
12,0	10783,5	10721,6	10664,9	10612,8	10565,1	10520,8	10480,5	10442,9	10408,6
12,5	10801,4	10739,9	10683,8	10631,9	10584,3	10540,8	10500,9	10463,9	10429,4
13,0	10810,1	10748,3	10693,7	10642,6	10595,5	10552,2	10512,7	10475,8	10442,1
13,5	10807,5	10747,9	10693,3	10642,9	10596,8	10554,3	10515,3	10479,1	10446,3
14,0	10792,2	10733,7	10680,0	10631,7	10586,7	10545,6	10507,6	10472,8	10440,5
14,5	10760,4	10703,8	10653,1	10605,6	10563,1	10523,6	10487,6	10454,4	10423,8
15,0	10706,3	10653,3	10605,3	10561,6	10521,3	10484,4	10450,7	10420,0	10391,1
15,5	10619,0	10571,7	10527,9	10488,8	10453,6	10420,7	10391,2	10363,9	10338,4
16,0	10478,4	10440,4	10405,5	10374,1	10346,3	10320,1	10297,1	10275,6	10256,2
16,5	10243,4	10222,3	10203,5	10186,7	10171,8	10158,6	10146,2	10135,4	10125,2
16,8	9999,92	9999,69	10000,3	9999,59	9999,60	10000,2	9999,95	10000,2	10000,4
M-	490000	500000	510000	520000	530000	540000	550000	560000	570000
P1-	9793,12	9767,29	9743,14	9721,80	9702,15	9684,18	9667,90	9652,73	9639,26
Y-7,80	9793,12	9767,29	9743,14	9721,80	9702,15	9684,18	9667,90	9652,73	9639,26
8,00	9846,54	9820,32	9795,77	9773,96	9753,82	9735,36	9718,58	9703,48	9689,54
8,50	9963,78	9936,37	9911,68	9888,67	9867,34	9848,21	9830,24	9813,94	9798,80
9,00	10061,0	10032,9	10007,1	9983,51	9961,59	9941,37	9922,84	9905,49	9889,82
9,50	10141,4	10113,3	10086,9	10062,7	10040,3	10019,1	10000,1	9982,31	9965,73
10,0	10209,2	10180,0	10153,0	10128,4	10105,5	10083,9	10064,5	10046,4	10029,1
10,5	10265,0	10235,7	10208,2	10183,1	10159,9	10138,0	10118,3	10099,5	10082,5
11,0	10311,1	10281,2	10253,8	10228,3	10204,8	10183,1	10162,8	10143,8	10126,2
11,5	10347,5	10318,1	10290,8	10264,9	10241,1	10219,8	10198,9	10179,9	10162,4
12,0	10376,5	10347,1	10319,4	10293,8	10270,3	10248,4	10228,0	10208,6	10190,8
12,5	10397,7	10367,9	10340,8	10315,5	10291,9	10270,0	10249,7	10230,6	10213,1
13,0	10410,4	10381,7	10354,9	10330,0	10306,4	10284,6	10264,6	10245,8	10228,2
13,5	10415,7	10387,1	10360,7	10336,3	10313,4	10292,4	10272,7	10254,5	10236,9
14,0	10411,1	10383,5	10358,1	10334,4	10312,2	10291,7	10272,6	10255,1	10238,4
14,5	10395,3	10368,8	10344,7	10322,5	10301,4	10282,1	10263,9	10247,3	10231,7
15,0	10365,0	10341,2	10318,8	10297,8	10278,8	10261,0	10244,6	10229,3	10214,5
15,5	10315,4	10294,2	10275,4	10256,8	10240,4	10225,4	10210,6	10197,7	10184,9
16,0	10238,1	10222,0	10207,0	10193,0	10180,1	10168,8	10157,6	10147,3	10138,4
16,5	10115,5	10107,9	10099,9	10093,0	10086,4	10080,9	10075,5	10070,2	10065,8
16,8	10000,1	10000,2	9999,64	10000,2	10000,2	10000,3	9999,80	10000,2	9999,83

INVERZNÍ FUNKCE $U=F(V)$

H = ,40 P1= 10176	H = ,41 P1= 10115	H = ,42 P1= 10060	H = ,43 P1= 10010	H = ,44 P1= 9964
Y. ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)
8,00 -108,85 ,466708	-108,84 ,466735	-108,76 ,467023	-108,62 ,467479	-108,42 ,468131
8,50 -104,82 ,480332	-104,77 ,480525	-104,65 ,480931	-104,47 ,481530	-104,24 ,482326
9,00 -101,85 ,490586	-101,76 ,490946	-101,60 ,491520	-101,38 ,492264	-101,11 ,493207
9,50 -99,873 ,497566	-99,727 ,498071	-99,519 ,498791	-99,256 ,499756	-98,943 ,500849
10,0 -98,826 ,501273	-98,627 ,501973	-98,367 ,502890	-98,054 ,504031	-97,692 ,505324
10,5 -98,682 ,501778	-98,423 ,502700	-98,106 ,503842	-97,737 ,505161	-97,321 ,506635
11,0 -99,427 ,499130	-99,103 ,500276	-98,722 ,501646	-98,290 ,503195	-97,812 ,504904
11,5 -101,07 ,493354	-100,67 ,494751	-100,22 ,496351	-99,713 ,498135	-99,165 ,500057
12,0 -103,62 ,484440	-103,14 ,486123	-102,61 ,487982	-102,02 ,490004	-101,40 ,492193
12,5 -107,14 ,472437	-106,56 ,474393	-105,93 ,476539	-105,26 ,478827	-104,55 ,481263
13,0 -111,60 ,457345	-110,99 ,459610	-110,25 ,462045	-109,48 ,464629	-108,66 ,467340
13,5 -117,32 ,439124	-116,51 ,441725	-115,65 ,444477	-114,75 ,447360	-113,82 ,450376
14,0 -124,20 ,417774	-123,23 ,420713	-122,23 ,423786	-121,19 ,427021	-120,12 ,430345
14,5 -137,47 ,393246	-131,33 ,396551	-130,15 ,400021	-128,94 ,403562	-127,70 ,407247
15,0 -142,36 ,365469	-141,00 ,369190	-139,61 ,373035	-138,19 ,376983	-136,76 ,381010
15,5 -154,16 ,334788	-152,54 ,338484	-150,89 ,342730	-149,22 ,347058	-147,54 ,351532
16,0 -163,33 ,299493	-165,36 ,301192	-164,38 ,306937	-162,39 ,313754	-160,41 ,318642
16,5 -185,47 ,260572	-183,05 ,265876	-180,64 ,271215	-178,25 ,276587	-175,86 ,281993
16,8 -198,46 ,232039	-195,67 ,238757	-192,91 ,244595	-190,17 ,250401	-187,47 ,256225

H = ,45 P1= 9923	H = ,46 P1= 9886	H = ,47 P1= 9852	H = ,48 P1= 9821	H = ,49 P1= 9793
Y. ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)
8,00 -108,18 ,468960	-107,89 ,469945	-107,56 ,471037	-107,19 ,472266	-106,79 ,473634
8,50 -103,96 ,483299	-103,64 ,484404	-103,28 ,485542	-102,88 ,486717	-102,46 ,487906
9,00 -100,79 ,494327	-100,43 ,495580	-100,04 ,496993	-99,609 ,498493	-99,148 ,500013
9,50 -98,505 ,502110	-98,186 ,503549	-97,750 ,505115	-97,283 ,506795	-96,784 ,508566
10,0 -97,287 ,506775	-96,842 ,508385	-96,361 ,510109	-95,850 ,511974	-95,309 ,513932
10,5 -96,662 ,508293	-96,365 ,510089	-95,834 ,512026	-95,273 ,514056	-94,684 ,516206
11,0 -97,294 ,506750	-96,739 ,508736	-96,151 ,510856	-95,534 ,513091	-94,890 ,515465
11,5 -98,580 ,502144	-97,960 ,504376	-97,307 ,506704	-96,627 ,509131	-95,922 ,511683
12,0 -100,74 ,494502	-100,04 ,496958	-99,317 ,499515	-98,566 ,502199	-97,790 ,504963
12,5 -103,80 ,483847	-103,02 ,486559	-102,21 ,489375	-101,38 ,492272	-100,52 ,495278
13,0 -107,81 ,470180	-106,93 ,473452	-106,03 ,476208	-105,10 ,479375	-104,16 ,482603
13,5 -112,85 ,453501	-111,86 ,456738	-110,85 ,460055	-109,81 ,463507	-108,76 ,467016
14,0 -119,02 ,433785	-117,89 ,437310	-116,75 ,440945	-115,59 ,444643	-114,41 ,448438
14,5 -126,44 ,411007	-125,16 ,414865	-123,86 ,418799	-122,56 ,422809	-121,24 ,426871
15,0 -135,30 ,385117	-133,84 ,389305	-132,36 ,393575	-130,87 ,397977	-129,38 ,402263
15,5 -145,85 ,356015	-144,15 ,360587	-142,45 ,365198	-140,75 ,369848	-139,05 ,374563
16,0 -158,42 ,323563	-156,44 ,328536	-154,46 ,333542	-152,49 ,338595	-150,53 ,343659
16,5 -173,50 ,287432	-171,15 ,292877	-168,82 ,298355	-166,50 ,303838	-164,21 ,309325
16,8 -184,79 ,262064	-182,15 ,267881	-179,53 ,273711	-176,95 ,279541	-174,40 ,285356

H = ,5 P1= 477 - ,51 P1= 73

H=,50 P1= 9767	H=,51 P1= 9743	H=,52 P1= 9721	H=,53 P1= 9702	H=,54 P1= 9684
T= ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)
8,00	-105,36	475092	-105,91	476618
8,50	-102,00	490087	-101,52	491786
9,00	-98,660	501866	-98,148	503692
9,50	-96,260	510491	-95,711	512466
10,0	-94,742	515985	-94,153	518135
10,5	-94,070	518454	-93,435	520775
11,0	-94,223	517088	-93,535	520413
11,5	-95,194	514339	-94,447	517074
12,0	-96,994	507832	-96,179	510758
12,5	-99,647	498342	-98,755	501516
13,0	-103,19	485246	-102,21	469353
13,5	-107,69	470592	-106,61	447427
14,0	-113,23	452281	-112,03	426196
14,5	-119,91	430985	-118,57	405179
15,0	-127,08	406700	-126,38	384186
15,5	-137,35	379316	-135,65	364138
16,0	-149,58	348790	-146,64	345392
16,5	-161,94	314868	-159,70	320387
16,8	-171,88	291181	-169,39	296989
			-166,93	302031
			-164,50	308653
			-162,10	314481

H=,55 P1= 9667	H=,56 P1= 9652	H=,57 P1= 9639
T= ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)	ARGUM.V U-F(V)
8,00	-103,86	483630
8,50	-99,376	499316
9,00	-95,888	511018
9,50	-93,317	521214
10,0	-91,604	527557
10,5	-90,710	530902
11,0	-90,610	531273
11,5	-91,296	528609
12,0	-92,772	523231
12,5	-95,056	514844
13,0	-98,181	503563
13,5	-102,20	489416
14,0	-107,17	472349
14,5	-113,19	452389
15,0	-120,39	429510
15,5	-128,91	403631
16,0	-139,00	374726
16,5	-150,93	342626
16,8	-159,73	320287
		-157,40
		-155,09
		-152,73
		-150,42
		-148,16
		-145,95
		-143,79
		-141,68
		-139,61
		-137,59
		-135,61
		-133,67
		-131,77
		-129,91
		-128,09
		-126,31
		-124,57
		-122,87
		-121,21
		-119,59
		-118,01
		-116,47
		-114,97
		-113,51
		-112,09
		-110,71
		-109,37
		-108,07
		-106,81
		-105,59
		-104,41
		-103,27
		-102,17
		-101,11
		-100,09
		-99,11
		-98,17
		-97,27
		-96,41
		-95,59
		-94,81
		-94,07
		-93,37
		-92,71
		-92,09
		-91,51
		-90,97
		-90,47
		-89,91
		-89,39
		-88,91
		-88,47
		-88,07
		-87,71
		-87,39
		-87,11
		-86,87
		-86,67
		-86,51
		-86,39
		-86,31
		-86,27
		-86,27
		-86,31
		-86,41
		-86,57
		-86,79
		-87,07
		-87,41
		-87,81
		-88,27
		-88,79
		-89,37
		-89,91
		-90,51
		-91,17
		-91,89
		-92,67
		-93,51
		-94,41
		-95,37
		-96,39
		-97,47
		-98,61
		-99,81
		-101,07
		-102,39
		-103,77
		-105,21
		-106,71
		-108,27
		-109,89
		-111,57
		-113,31
		-115,11
		-116,97
		-118,89
		-120,87
		-122,91
		-125,01
		-127,17
		-129,39
		-131,67
		-134,01
		-136,41
		-138,87
		-141,39
		-143,97
		-146,61
		-149,31
		-152,07
		-154,89
		-157,77
		-160,71
		-163,71
		-166,77
		-169,89
		-173,07
		-176,31
		-179,61
		-182,97
		-186,39
		-189,87
		-193,41
		-196,91
		-200,47
		-204,09
		-207,77
		-211,51
		-215,31
		-219,17
		-223,09
		-227,07
		-231,11
		-235,21
		-239,37
		-243,59
		-247,87
		-252,21
		-256,61
		-261,07
		-265,59
		-270,17
		-274,81
		-279,51
		-284,27
		-289,09
		-293,97
		-298,91
		-303,91
		-308,97
		-314,09
		-319,27
		-324,51
		-329,81
		-335,17
		-340,59
		-346,07
		-351,61
		-357,21
		-362,87
		-368,59
		-374,37
		-380,21
		-386,11
		-392,07
		-398,09
		-404,17
		-410,31
		-416,51
		-422,77
		-429,09
		-435,47
		-441,91
		-448,41
		-454,97
		-461,59
		-468,27
		-474,91
		-481,61
		-488,37
		-495,19
		-502,07
		-508,91
		-515,81
		-522,77
		-529,79
		-536,87
		-543,91
		-551,01
		-558,17
		-565,39
		-572,67
		-579,91
		-587,21
		-594,57
		-601,91
		-609,31
		-616,77
		-624,21
		-631,71
		-639,27
		-646,81
		-654,41
		-662,07
		-669,69
		-677,37
		-685,11
		-692,91
		-700,77
		-708,69
		-716,67
		-724,71
		-732,81
		-740,97
		-749,19
		-757,47
		-765,81
		-774,21
		-782,67
		-791,19
		-799,77
		-808,31
		-816,91
		-825,57
		-834,29
		-843,07
		-851,91
		-860,81
		-869,77
		-878,79
		-887,87
		-896,91
		-906,01
		-915,17
		-924,39
		-933,67
		-942,91
		-952,21
		-961,57
		-970,91
		-980,31
		-989,77
		-999,21
		-1008,71
		-1018,27
		-1027,81
		-1037,41
		-1047,07
		-1056,79
		-1066,51
		-1076,27
		-1086,09
		-1095,91
		-1105,77
		-1115,69
		-1125,61
		-1135,57
		-1145,59
		-1155,67
		-1165,71
		-1175,81
		-1185,97
		-1196,19
		-1206,47
		-1216,81
		-1227,21
		-1237,67
		-1248,19
		-1258,77
		-1269,31
		-1279,91
		-1290,57
		-1301,29
		-1312,07
		-1322,91
		-1333,81
		-1344,77
		-1355,79
		-1366,81
		-1377,87
		-1388,91
		-1399,91
		-1410,97
		-1422,09
		-1433,27
		-1444,51
		-1455,81
		-1467,17
		-1478,59
		-1489,91
		-1501,31
		-1512,77
		-1524,29
		-1535,87
		-1547,51
		-1559,21
		-1570,97
		-1582,79
		-1594,67
		-1606,61
		-1618,61
		-1630,67
		-1642,79
		-1654,91
		-1667,07
		-1679,29
		-1691,57
		-1703,91
		-1716,31
		-1728,77
		-1741,29
		-1753,87
		-1766,51
		-1779,21
		-1791,97
		-1804,79
		-1817,67
		-1830,61
		-1843,61
		-1856,67
		-1869,79
		-1882,91
		-1896,07
		-1909,29
		-1922,57
		-1935,91
		-1949,31
		-1962,77
		-1976,29
		-1989,87
		-2003,51
		-2017,21
		-2030,97
		-2044,79
		-2058,67
		-2072,61
		-2086,61
		-2100,67
		-2114,79
		-2128,91
		-2143,07
		-2157,29
		-2171,57
		-2185,91
		-2199,31
		-2213,77
		-2228,29
		-2242,87
		-2257,51
		-2272,21
		-2286,97
		-2301,79
		-2316,67
		-2331,61
		-2346,61
		-2361,67
		-2376,79
		-2391,91
		-2407,07
		-2422,29
		-2437,57
		-2452,91
		-2468,31
		-2483,77
		-2499,29
		-2514,87
		-2530,51
		-2546,21
		-2561,97
		-2577,79
		-2593,67
		-2609,61
		-2625,61
		-2641,67
		-2657,79
		-2673,91
		-2689,91
		-2706,07
		-2722,29
		-2738,57
		-2754,91
		-2771,31
		-2787,77
		-2804,29
		-2820,87
		-2837,51
		-2854,21
		-2870,97
		-2887,79
		-2904,67
		-2921,61
		-2938,61
		-2955,67
		-2972,79
		-2989,91
		-3007,07
		-3024,29
		-3041,57
		-3058,91
		-3076,31
		-3093,77
		-3111,29
		-3128,87
		-3146,51
		-3164,21
		-3181,97
		-3199,79
		-3217,67
		-3235,61
		-3253,61
		-3271,67
		-3289,79
		-3307,9

HLAK PŘED OYZOU P= 35000,0

PROTEKLA HMOTA ZE ČTYŘECH OYZ M1= 3,899 KG/HOD

PROTEKLA HMOTA V USEKU (0-1) M0= 1,191 KG/HOD

CELKOVÁ PROTEKLA HMOTA V USEKU (1-2) M= 5,030 KG/HOD

H=	400000	410000	420000	430000	440000	450000	460000	470000	480000
P1=	10214,3	10140,1	10073,3	10013,2	9958,20	9907,67	9862,74	9821,19	9783,57
Y=7,80	10214,3	10140,1	10073,3	10013,2	9958,20	9907,67	9862,74	9821,19	9783,57
8,00	10200,2	10205,9	10139,4	10078,1	10023,2	9972,48	9927,08	9884,88	9846,95
8,50	10425,4	10350,8	10283,4	10222,3	10166,0	10114,8	10067,9	10025,3	9986,84
9,00	10545,4	10471,1	10402,7	10340,5	10284,0	10232,8	10184,9	10142,1	10102,1
9,50	10644,8	10570,2	10501,9	10439,3	10382,6	10330,1	10282,5	10239,1	10198,4
10,0	10727,7	10652,3	10583,9	10521,8	10464,1	10411,7	10363,7	10319,0	10278,7
10,5	10795,9	10720,5	10651,6	10589,2	10531,8	10478,9	10431,0	10386,4	10345,3
11,0	10850,7	10775,9	10706,9	10644,5	10586,8	10534,7	10486,1	10441,1	10399,6
11,5	10894,3	10819,3	10751,4	10688,3	10631,0	10578,6	10529,8	10485,2	10444,3
12,0	10928,7	10852,9	10784,2	10722,2	10665,3	10612,9	10564,3	10519,6	10478,7
12,5	10948,9	10874,3	10807,4	10745,3	10688,6	10636,5	10588,6	10544,2	10503,4
13,0	10959,3	10885,9	10819,5	10758,2	10702,0	10650,3	10603,5	10559,4	10519,0
13,5	10956,9	10885,1	10819,5	10758,9	10704,4	10653,5	10607,3	10564,5	10524,6
14,0	10939,8	10869,5	10805,4	10746,6	10693,2	10643,7	10598,6	10557,4	10518,6
14,5	10903,0	10835,5	10774,1	10717,9	10666,2	10618,8	10575,7	10536,1	10499,3
15,0	10840,4	10776,7	10719,0	10666,5	10618,2	10574,0	10533,1	10496,2	10462,3
15,5	10730,3	10681,8	10629,4	10581,9	10539,3	10499,7	10463,9	10430,9	10401,4
16,0	10574,9	10527,8	10485,7	10447,3	10412,7	10381,5	10353,7	10327,5	10304,3
16,5	10295,3	10268,7	10246,4	10225,4	10206,4	10190,3	10175,0	10161,5	10149,5
16,8	9999,69	9999,88	9999,96	9999,88	9999,59	9999,99	10000,1	9999,79	10000,0

H=	490000	500000	510000	520000	530000	540000	550000	560000	570000
P1=	9749,32	9717,87	9689,79	9663,96	9640,38	9619,04	9599,95	9581,98	9565,70
Y=7,80	9749,32	9717,87	9689,79	9663,96	9640,38	9619,04	9599,95	9581,98	9565,70
8,00	9812,23	9780,75	9751,96	9725,37	9701,48	9679,79	9659,76	9641,93	9624,71
8,50	9950,58	9918,55	9888,71	9861,04	9835,56	9812,77	9792,17	9772,20	9754,41
9,00	10065,8	10032,2	10001,3	9973,62	9947,11	9923,81	9901,69	9880,74	9862,48
9,50	10161,0	10127,3	10095,9	10066,7	10040,2	10016,0	9992,92	9972,07	9952,43
10,0	10241,1	10206,9	10174,4	10145,2	10118,3	10092,6	10069,2	10048,0	10028,1
10,5	10307,5	10272,1	10240,1	10210,4	10182,6	10157,1	10133,3	10110,9	10090,8
11,0	10361,6	10326,6	10294,0	10264,3	10236,1	10210,3	10185,8	10163,7	10143,0
11,5	10405,5	10370,3	10337,7	10307,6	10280,0	10253,8	10229,2	10207,0	10186,2
12,0	10440,6	10405,2	10372,5	10342,5	10314,0	10288,2	10263,9	10241,2	10220,0
12,5	10465,9	10430,9	10398,6	10368,2	10340,5	10314,5	10290,2	10267,5	10246,5
13,0	10481,8	10447,0	10415,3	10385,5	10359,1	10332,6	10308,9	10285,8	10265,6
13,5	10488,1	10454,3	10422,7	10394,2	10366,7	10341,7	10318,7	10297,0	10276,2
14,0	10483,5	10450,8	10420,4	10392,3	10365,9	10341,6	10318,9	10298,3	10278,6
14,5	10465,9	10434,4	10405,6	10378,6	10354,0	10330,7	10309,7	10289,8	10270,9
15,0	10430,8	10402,3	10375,9	10351,0	10328,1	10306,6	10287,1	10268,8	10251,7
15,5	10373,8	10348,0	10324,8	10303,8	10283,9	10265,4	10248,5	10232,3	10217,5
16,0	10282,5	10262,8	10245,1	10228,5	10213,0	10199,2	10185,7	10174,4	10163,3
16,5	10138,2	10128,2	10118,8	10110,6	10102,7	10095,9	10089,4	10083,1	10077,7
16,8	9999,83	10000,0	9999,75	9999,77	10000,1	9999,77	9999,67	9999,73	9999,91

INVERZNI FUNKCE U-F(V)

Y-	H=,40 P1= 10214 ARGUM.V U-F(V)	H=,41 P1= 10140 ARGUM.V U-F(V)	H=,42 P1= 10073 ARGUM.V U-F(V)	H=,43 P1= 10013 ARGUM.V U-F(V)	H=,44 P1= 9958 ARGUM.V U-F(V)
8,00	-82,555 ,468868	-82,694 ,468304	-82,763 ,468060	-82,766 ,468025	-82,714 ,468250
8,50	-88,881 ,483527	-88,982 ,483111	-89,014 ,482994	-88,983 ,483133	-88,898 ,483461
9,00	-86,157 ,494639	-86,216 ,494421	-86,208 ,494430	-86,141 ,494695	-86,020 ,495199
9,50	-84,308 ,502301	-84,322 ,502256	-84,272 ,502463	-84,164 ,502905	-84,004 ,503587
10,0	-83,284 ,506608	-83,250 ,506736	-83,154 ,507144	-83,000 ,507812	-82,797 ,508649
10,5	-83,055 ,507584	-82,968 ,507935	-82,820 ,508543	-82,617 ,509415	-82,365 ,510484
11,0	-83,005 ,505252	-83,460 ,505874	-83,255 ,506709	-82,997 ,507812	-82,691 ,509090
11,5	-84,738 ,499684	-84,728 ,500555	-84,459 ,501691	-84,139 ,503002	-83,773 ,504541
12,0	-87,071 ,490879	-86,787 ,492073	-86,447 ,493440	-86,057 ,495060	-85,623 ,496862
12,5	-90,037 ,478886	-89,669 ,480332	-89,248 ,482053	-88,779 ,483335	-88,268 ,486004
13,0	-93,889 ,463557	-93,426 ,465452	-92,912 ,467481	-92,352 ,469676	-91,752 ,472040
13,5	-98,703 ,445192	-98,129 ,447362	-97,507 ,449725	-96,842 ,452236	-96,140 ,454946
14,0	-104,58 ,423490	-103,88 ,426037	-103,13 ,428760	-102,34 ,431538	-101,52 ,434673
14,5	-111,67 ,398457	-110,81 ,401430	-109,91 ,404563	-108,97 ,407833	-108,01 ,411221
15,0	-120,14 ,370045	-119,10 ,373468	-118,02 ,377035	-116,91 ,380726	-115,77 ,384516
15,5	-130,28 ,339087	-129,00 ,342008	-127,70 ,346034	-126,37 ,350169	-125,03 ,354412
16,0	-142,45 ,302251	-140,88 ,306738	-139,29 ,311318	-137,69 ,315958	-136,08 ,320688
16,5	-157,19 ,261893	-155,23 ,267083	-153,27 ,272356	-151,31 ,277638	-149,36 ,282954
16,8	-168,36 ,232934	-156,08 ,238762	-163,82 ,244587	-161,57 ,250409	-159,34 ,256225

Y-	H=,45 P1= 9907 ARGUM.V U-F(V)	H=,46 P1= 9862 ARGUM.V U-F(V)	H=,47 P1= 9821 ARGUM.V U-F(V)	H=,48 P1= 9783 ARGUM.V U-F(V)	H=,49 P1= 9749 ARGUM.V U-F(V)
8,00	-82,610 ,468643	-82,457 ,469259	-82,264 ,470003	-82,031 ,470926	-81,763 ,471984
8,50	-88,764 ,484006	-88,582 ,484725	-88,361 ,485621	-88,102 ,486698	-87,809 ,487859
9,00	-85,851 ,495922	-85,637 ,496770	-85,385 ,497846	-85,096 ,499029	-84,774 ,500372
9,50	-83,797 ,504441	-83,547 ,505495	-83,259 ,506728	-82,936 ,508070	-82,582 ,509540
10,0	-82,548 ,509709	-82,257 ,510947	-81,930 ,512317	-81,569 ,513872	-81,177 ,515540
10,5	-82,070 ,511728	-81,733 ,513178	-81,362 ,514762	-80,958 ,516434	-80,524 ,518346
11,0	-82,344 ,510596	-81,956 ,512236	-81,535 ,514013	-81,082 ,515931	-80,602 ,517992
11,5	-83,367 ,506263	-82,922 ,508122	-82,445 ,510146	-81,938 ,512315	-81,403 ,514554
12,0	-85,150 ,498827	-84,641 ,500934	-84,100 ,503185	-83,531 ,505584	-82,936 ,508082
12,5	-87,719 ,488241	-87,137 ,492624	-86,524 ,493131	-85,884 ,495764	-85,221 ,498527
13,0	-91,117 ,474552	-90,450 ,477240	-89,755 ,480007	-89,034 ,482906	-88,292 ,485913
13,5	-95,405 ,457762	-94,640 ,460733	-93,850 ,463815	-93,036 ,466983	-92,203 ,470265
14,0	-100,67 ,437819	-99,788 ,441104	-98,887 ,444504	-97,965 ,447972	-97,025 ,451558
14,5	-107,02 ,414725	-105,01 ,418352	-104,97 ,422075	-103,92 ,425871	-102,86 ,429768
15,0	-114,61 ,388407	-113,44 ,392377	-112,25 ,396452	-111,05 ,400606	-109,83 ,404817
15,5	-123,66 ,358716	-122,29 ,363107	-120,91 ,367560	-119,52 ,372101	-118,13 ,376581
16,0	-134,46 ,325479	-132,84 ,330341	-131,22 ,335225	-129,60 ,340191	-127,98 ,345158
16,5	-147,41 ,288328	-145,48 ,293710	-143,55 ,299124	-141,64 ,304569	-139,74 ,310020
16,8	-157,13 ,262058	-154,93 ,267884	-152,76 ,273700	-150,61 ,279530	-148,49 ,285348

γ	H=,50 P1= 9717 ARGUM.V U-F(V)	H=,51 P1= 9689 ARGUM.V U-F(V)	H=,52 P1= 9663 ARGUM.V U-F(V)	H=,53 P1= 9640 ARGUM.V U-F(V)	H=,54 P1= 9619 ARGUM.V U-F(V)
8,00	-81,464 ,473178	-81,135 ,474487	-80,780 ,475886	-80,402 ,477405	-80,001 ,479018
8,50	-81,486 ,489208	-81,134 ,490646	-80,758 ,492175	-80,358 ,493798	-80,938 ,495541
9,00	-81,423 ,501828	-81,045 ,503399	-81,643 ,505114	-81,219 ,506871	-82,774 ,508776
9,50	-82,199 ,511192	-81,790 ,512926	-81,358 ,514753	-80,905 ,516701	-80,432 ,518747
10,0	-80,759 ,517349	-80,314 ,519225	-79,848 ,521248	-79,361 ,523368	-78,956 ,525534
10,5	-80,064 ,520300	-79,580 ,522401	-79,075 ,524598	-78,550 ,526869	-78,008 ,529241
11,0	-80,096 ,520173	-79,567 ,522452	-79,017 ,524856	-78,449 ,527310	-77,864 ,529867
11,5	-80,845 ,516942	-80,265 ,519430	-79,665 ,522021	-79,048 ,524716	-78,415 ,527466
12,0	-82,319 ,510683	-81,681 ,513387	-81,024 ,516196	-80,351 ,519062	-79,664 ,522036
12,5	-84,536 ,501370	-83,832 ,504321	-83,111 ,507330	-82,374 ,510450	-81,625 ,513631
13,0	-87,530 ,489004	-86,750 ,492208	-85,955 ,495474	-85,147 ,498830	-84,326 ,502250
13,5	-81,351 ,473636	-80,485 ,477073	-80,605 ,480629	-80,713 ,484200	-80,811 ,487867
14,0	-86,070 ,455215	-85,102 ,458942	-84,123 ,462742	-83,135 ,466588	-82,138 ,470508
14,5	-101,178 ,433715	-100,69 ,437738	-99,599 ,441814	-98,498 ,445967	-97,391 ,450148
15,0	-100,61 ,409110	-107,38 ,413461	-106,15 ,417844	-104,91 ,422285	-103,68 ,426759
15,5	-116,73 ,381300	-115,33 ,385983	-113,93 ,390730	-112,53 ,395491	-111,14 ,400291
16,0	-126,37 ,350182	-124,76 ,355252	-123,16 ,360343	-121,56 ,365454	-119,98 ,370611
16,5	-137,85 ,315502	-135,98 ,320988	-134,12 ,326502	-132,28 ,332020	-130,45 ,337565
16,8	-146,38 ,291178	-144,30 ,296992	-142,25 ,302617	-140,21 ,308649	-138,20 ,314463

γ	H=,55 P1= 9599 ARGUM.V U-F(V)	H=,56 P1= 9581 ARGUM.V U-F(V)	H=,57 P1= 9565 ARGUM.V U-F(V)
8,00	-89,581 ,480702	-89,144 ,482486	-88,690 ,484290
8,50	-85,498 ,497383	-85,043 ,499244	-84,571 ,501206
9,00	-82,311 ,510727	-81,833 ,512725	-81,339 ,514951
9,50	-79,941 ,520840	-79,436 ,523034	-78,916 ,525277
10,0	-78,333 ,527801	-77,797 ,530171	-77,246 ,532591
10,5	-77,449 ,531689	-76,876 ,534188	-76,291 ,536794
11,0	-77,264 ,532477	-76,651 ,535193	-76,025 ,537964
11,5	-77,768 ,530270	-77,109 ,533184	-76,438 ,536155
12,0	-78,963 ,525069	-78,252 ,528162	-77,529 ,531315
12,5	-80,864 ,516874	-80,092 ,520179	-79,311 ,523548
13,0	-83,495 ,505736	-82,656 ,509236	-81,808 ,512856
13,5	-86,900 ,491604	-85,982 ,495385	-85,058 ,499185
14,0	-91,135 ,474477	-90,127 ,478521	-89,114 ,482588
14,5	-96,279 ,454408	-95,165 ,458696	-94,049 ,463012
15,0	-102,44 ,431292	-101,20 ,435858	-99,961 ,440457
15,5	-109,75 ,405129	-108,36 ,409980	-106,98 ,414870
16,0	-118,40 ,375761	-116,83 ,380983	-115,27 ,386197
16,5	-128,65 ,343110	-126,85 ,348656	-125,08 ,354227
16,8	-136,21 ,320283	-134,25 ,326109	-132,31 ,331938

PLAK PŘED BYZOU P= 37500,0

PROTEKLA HMOTA ZE ČTYRECH DYZ M1= 4,114 KG/HOD

PROTEKLA HMOTA V USEKU (0-1)MO= 1,279 KG/HOD

CELKOVÁ PROTEKLA HMOTA V USEKU (1-2) M= 5,393 KG/HOD

H=	400000	410000	420000	430000	440000	450000	460000	470000	480000
P1=	10259,2	10169,3	10088,5	10015,5	9949,22	9888,57	9834,67	9784,13	9739,21
T=7,80	10259,2	10169,3	10088,5	10015,5	9949,22	9888,57	9834,67	9784,13	9739,21
8,00	10335,3	10246,0	10164,9	10092,2	10025,1	9964,26	9909,18	9859,32	9813,68
8,50	10503,3	10414,0	10332,9	10258,9	10191,2	10129,6	10074,3	10023,1	9976,65
9,00	10643,2	10553,0	10470,9	10397,0	10329,3	10267,8	10211,5	10159,4	10112,4
9,50	10758,2	10668,1	10587,2	10512,5	10444,1	10381,9	10324,9	10273,2	10224,6
10,0	10854,4	10764,5	10682,9	10607,6	10539,7	10477,0	10419,7	10367,7	10319,0
10,5	10933,4	10843,7	10761,6	10686,9	10618,7	10555,9	10498,5	10445,6	10397,0
11,0	10997,2	10907,9	10826,4	10751,5	10683,2	10620,5	10563,4	10510,8	10461,8
11,5	11048,5	10959,7	10877,9	10804,0	10735,9	10672,6	10615,1	10562,3	10514,1
12,0	11086,4	10998,2	10917,4	10843,7	10775,1	10713,5	10655,9	10603,2	10554,3
12,5	11112,9	11024,5	10944,8	10871,6	10803,7	10742,2	10684,8	10632,6	10584,4
13,0	11125,2	11038,9	10959,6	10886,1	10820,4	10759,3	10702,6	10651,3	10603,3
13,5	11123,3	11038,3	10959,7	10886,4	10823,2	10763,5	10708,5	10657,6	10611,2
14,0	11105,2	11020,7	10945,0	10875,4	10811,7	10753,3	10700,0	10650,0	10605,0
14,5	11064,1	10983,3	10909,9	10842,5	10781,1	10725,3	10673,9	10626,8	10583,7
15,0	10992,2	10915,9	10846,5	10783,7	10726,1	10673,3	10625,4	10582,1	10541,4
15,5	10876,0	10806,7	10743,5	10686,9	10636,0	10589,1	10546,1	10506,8	10471,1
16,0	10685,6	10627,8	10576,7	10530,5	10489,0	10452,0	10417,7	10386,7	10358,1
16,5	10355,7	10323,5	10294,8	10269,4	10246,3	10227,1	10208,0	10191,7	10177,0
16,8	10000,3	9988,7	9977,9	9968,5	9959,75	9951,80	9943,62	9935,1	9926,2

H=	490000	500000	510000	520000	530000	540000	550000
P1=	9697,66	9660,60	9626,90	9596,58	9568,51	9542,68	9519,09
T=7,80	9697,66	9660,60	9626,90	9596,58	9568,51	9542,68	9519,09
8,00	9772,26	9734,02	9700,02	9668,17	9640,06	9614,11	9589,81
8,50	9934,36	9895,24	9859,29	9827,04	9797,46	9770,03	9745,29
9,00	10068,7	10029,1	9992,74	9959,54	9928,51	9899,66	9873,98
9,50	10180,3	10140,2	10103,4	10068,7	10037,2	10009,0	9981,92
10,0	10274,5	10233,3	10195,4	10160,7	10129,3	10099,2	10072,2
10,5	10352,7	10310,9	10273,4	10238,2	10205,3	10174,8	10147,5
11,0	10416,2	10375,1	10336,4	10301,1	10268,3	10237,9	10209,8
11,5	10468,5	10427,6	10389,2	10353,4	10320,0	10289,2	10260,9
12,0	10509,2	10467,8	10430,2	10394,3	10361,0	10330,3	10302,2
12,5	10540,2	10499,0	10460,6	10425,0	10392,2	10362,2	10333,9
13,0	10559,5	10518,8	10481,1	10446,5	10413,8	10384,0	10356,0
13,5	10567,2	10527,7	10490,8	10456,1	10425,1	10395,1	10368,2
14,0	10563,6	10524,7	10488,2	10455,2	10424,4	10395,9	10369,6
14,5	10543,5	10506,6	10472,3	10441,2	10411,4	10384,0	10359,0
15,0	10503,8	10469,9	10438,9	10409,4	10382,7	10357,4	10334,2
15,5	10436,2	10408,6	10380,1	10354,8	10331,2	10309,3	10289,6
16,0	10382,6	10359,2	10338,0	10318,0	10299,9	10282,9	10267,6
16,5	10163,1	10151,5	10140,5	10130,0	10121,6	10112,8	10105,0
16,8	9999,99	10000,2	10000,1	10000,3	9999,94	9999,93	10000,2

INVERZNÍ FUNKCE $U=F(V)$

γ	H=,40 P1= 10250 ARGUM.V U=F(V)	H=,41 P1= 10169 ARGUM.V U=F(V)	H=,42 P1= 10088 ARGUM.V U=F(V)	H=,43 P1= 10015 ARGUM.V U=F(V)	H=,44 P1= 9949 ARGUM.V U=F(V)
8,00	-79,391, 471381	-79,662, 470145	-79,859, 469242	-79,989, 468577	-80,058, 468339
8,50	-76,009, 487140	-76,242, 486062	-76,402, 485317	-76,498, 484864	-76,537, 484661
9,00	-73,484, 499230	-73,676, 498284	-73,799, 497672	-73,859, 497400	-73,863, 497380
9,50	-71,744, 507650	-71,894, 506906	-71,976, 506544	-71,998, 506430	-71,966, 506568
10,0	-70,742, 512590	-70,846, 512070	-70,885, 511887	-70,866, 511953	-70,794, 512323
10,5	-70,446, 514048	-70,501, 513775	-70,494, 513795	-70,429, 514115	-70,313, 514693
11,0	-70,842, 512072	-70,844, 512070	-70,785, 512364	-70,670, 512914	-70,506, 513726
11,5	-71,929, 506757	-71,872, 507048	-71,756, 507594	-71,586, 508447	-71,368, 509518
12,0	-73,720, 498054	-73,598, 498563	-73,418, 499532	-73,186, 500666	-72,908, 501974
12,5	-76,744, 486058	-76,648, 486962	-75,796, 488179	-75,494, 489619	-75,140, 491238
13,0	-79,546, 470675	-79,265, 471993	-78,931, 473535	-78,549, 475257	-78,125, 477262
13,5	-83,690, 451952	-83,312, 453660	-82,883, 455551	-82,408, 457678	-81,894, 459997
14,0	-88,765, 429870	-88,273, 431964	-87,733, 434300	-87,151, 436809	-86,531, 439492
14,5	-94,893, 404346	-94,265, 406904	-93,593, 409662	-92,883, 412577	-92,139, 415650
15,0	-102,24, 375227	-101,45, 378292	-100,62, 381519	-99,751, 384911	-98,858, 388423
15,5	-111,03, 342391	-110,03, 346008	-109,01, 349749	-107,95, 353643	-106,88, 357666
16,0	-121,59, 305416	-120,34, 309650	-119,06, 314021	-117,77, 318484	-116,46, 323039
16,5	-134,39, 263431	-132,80, 268507	-131,20, 273642	-129,60, 278834	-128,00, 284060
16,8	-144,09, 232948	-142,23, 238758	-140,37, 244592	-138,51, 250424	-136,66, 256229

γ	H=,45 P1= 9888 ARGUM.V U=F(V)	H=,46 P1= 9834 ARGUM.V U=F(V)	H=,47 P1= 9784 ARGUM.V U=F(V)	H=,48 P1= 9739 ARGUM.V U=F(V)	H=,49 P1= 9697 ARGUM.V U=F(V)
8,00	-80,075, 468257	-80,039, 468413	-79,961, 468787	-79,841, 469335	-79,685, 470061
8,50	-76,523, 484715	-76,450, 485031	-76,356, 485517	-76,211, 486202	-76,032, 487064
9,00	-73,816, 497610	-73,724, 498070	-73,592, 498693	-73,420, 499540	-73,214, 500516
9,50	-71,886, 506966	-71,759, 507580	-71,594, 508415	-71,391, 509377	-71,156, 510518
10,0	-70,675, 512907	-70,512, 513708	-70,311, 514732	-70,074, 515885	-69,806, 517219
10,5	-70,152, 515487	-69,948, 516502	-69,708, 517693	-69,432, 519064	-69,127, 520620
11,0	-70,298, 514757	-70,049, 516012	-69,764, 517446	-69,446, 519015	-69,099, 520720
11,5	-71,108, 510764	-70,808, 512237	-70,474, 513393	-70,107, 515736	-69,713, 517669
12,0	-72,569, 503558	-72,231, 505276	-71,841, 507182	-71,421, 509228	-70,973, 511418
12,5	-74,762, 493090	-74,340, 495080	-73,887, 497262	-73,404, 499590	-72,896, 502067
13,0	-77,663, 479407	-77,167, 481698	-76,541, 484185	-75,888, 486773	-75,111, 489514
13,5	-81,345, 462488	-80,763, 465129	-80,154, 467899	-79,519, 470826	-78,863, 474012
14,0	-85,879, 442330	-85,198, 445325	-84,491, 448406	-83,762, 451650	-83,013, 455008
14,5	-91,366, 418885	-90,567, 422236	-89,746, 425705	-88,905, 429294	-88,047, 432954
15,0	-97,939, 392057	-96,999, 395814	-96,040, 399698	-95,066, 403634	-94,078, 407650
15,5	-105,78, 361771	-104,67, 365961	-103,54, 370236	-102,41, 374597	-101,26, 379019
16,0	-115,14, 327688	-113,82, 332383	-112,48, 337147	-111,15, 341957	-109,81, 346839
16,5	-126,39, 289369	-124,79, 294662	-123,19, 300011	-121,59, 305393	-120,01, 310782
16,8	-134,82, 262053	-133,00, 267872	-131,19, 273708	-129,39, 279535	-127,61, 285353

H=,50 P1= 9660		H=,51 P1= 9626		H=,52 P1= 9596		H=,53 P1= 9568		H=,54 P1= 9542	
Y=	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)	ARGUM.V U=F(V)
8,00	-79,483 ,470918	-79,270 ,471959	-79,019 ,473088	-78,744 ,474382	-78,446 ,475768				
8,50	-75,819 ,488058	-75,576 ,489186	-75,306 ,490478	-75,012 ,491885	-74,697 ,493383				
9,00	-72,976 ,501675	-72,709 ,502968	-72,417 ,504400	-72,101 ,505923	-71,765 ,507537				
9,50	-70,890 ,511843	-70,596 ,513305	-70,277 ,514855	-69,936 ,516548	-69,575 ,518385				
10,0	-69,507 ,518689	-69,183 ,520297	-68,834 ,522046	-68,464 ,523939	-68,074 ,525976				
10,5	-68,792 ,522263	-68,433 ,524097	-68,050 ,526024	-67,646 ,528045	-67,225 ,530163				
11,0	-68,724 ,522615	-68,324 ,524604	-67,903 ,526738	-67,462 ,528969	-67,003 ,531300				
11,5	-69,292 ,519796	-68,848 ,522020	-68,383 ,524341	-67,899 ,526762	-67,399 ,529285				
12,0	-70,800 ,513756	-70,006 ,516243	-69,491 ,518782	-68,959 ,521424	-68,411 ,524171				
12,5	-72,365 ,504645	-71,812 ,507326	-71,241 ,510112	-70,654 ,513006	-70,052 ,516009				
13,0	-74,912 ,492362	-74,294 ,495317	-73,659 ,498383	-73,008 ,501509	-72,345 ,504748				
13,5	-78,186 ,476958	-77,492 ,480193	-76,783 ,483491	-76,060 ,486932	-75,325 ,490387				
14,0	-82,246 ,458434	-81,464 ,461927	-80,668 ,465540	-79,861 ,469224	-79,044 ,472979				
14,5	-87,174 ,436713	-86,288 ,440545	-85,392 ,444478	-84,486 ,448436	-83,573 ,452471				
15,0	-93,079 ,411770	-92,070 ,415971	-91,054 ,420203	-90,031 ,424517	-89,004 ,428863				
15,5	-100,11 ,383530	-98,951 ,388053	-97,791 ,392664	-96,628 ,397314	-95,465 ,402001				
16,0	-108,46 ,351766	-107,12 ,356740	-105,79 ,361734	-104,45 ,366774	-103,12 ,371834				
16,5	-118,43 ,316227	-116,86 ,321677	-115,30 ,327132	-113,75 ,332641	-112,21 ,338127				
16,8	-125,84 ,291183	-124,09 ,297002	-122,35 ,302831	-120,64 ,308645	-118,94 ,314468				

H=,55 P1= 9519	
Y=	ARGUM.V U=F(V)
8,00	-78,127 ,477222
8,50	-74,361 ,495001
9,00	-71,409 ,509298
9,50	-69,195 ,520267
10,0	-67,667 ,527961
10,5	-66,786 ,532432
11,0	-66,528 ,533732
11,5	-66,883 ,531912
12,0	-67,849 ,527025
12,5	-69,437 ,519071
13,0	-71,669 ,508050
13,5	-74,580 ,493962
14,0	-78,219 ,476806
14,5	-82,653 ,456583
15,0	-87,974 ,433267
15,5	-94,301 ,406754
16,0	-101,80 ,376939
16,5	-110,68 ,343641
16,8	-117,25 ,320299

TK PŘED DÝZOU P= 40000,0
PROTEKLA HMOTA ZE ČTYŘECH DÝZ M1= 4,388 KG/HOD.
PROTEKLA HMOTA V USEKU (0-1) M0= 1,441 KG/HOD
CELKOVÁ PROTEKLA HMOTA V USEKU (1-2) M= 5,829 KG/HOD

	M= 40000	410000	420000	430000	440000	450000	460000	470000	480000
P1=	10324,3	10212,0	10110,9	10018,8	9935,74	9861,62	9791,99	9731,35	9675,20
7,80	10324,3	10212,0	10110,9	10018,8	9935,74	9861,62	9791,99	9731,35	9675,20
8,00	10415,0	10302,6	10201,2	10110,0	10027,0	9951,11	9882,40	9820,88	9763,59
8,50	10612,9	10500,9	10399,8	10307,9	10224,0	10149,2	10079,5	10015,9	9958,50
9,00	10776,7	10665,9	10564,1	10472,4	10388,8	10312,2	10242,8	10179,4	10121,2
9,50	10912,9	10802,3	10701,8	10609,4	10525,1	10448,9	10378,9	10315,0	10256,3
10,0	11027,2	10915,7	10815,4	10723,4	10639,5	10562,9	10492,5	10429,3	10369,3
10,5	11120,3	11010,8	10909,8	10818,2	10734,9	10658,0	10587,4	10523,2	10464,2
11,0	11196,5	11087,0	10987,3	10896,1	10812,5	10735,5	10664,9	10600,9	10541,4
11,5	11257,5	11149,0	11049,5	10957,9	10875,2	10798,2	10727,9	10664,4	10605,5
12,0	11303,5	11195,0	11095,9	11006,0	10923,2	10847,5	10777,8	10714,0	10655,0
12,5	11334,4	11227,0	11129,3	11040,3	10957,7	10882,5	10813,6	10749,8	10691,2
13,0	11351,7	11245,4	11148,3	11059,2	10979,2	10904,8	10835,9	10773,6	10715,7
13,5	11350,8	11245,7	11150,5	11063,9	10983,4	10911,3	10844,0	10782,5	10725,7
14,0	11330,4	11226,9	11134,0	11049,1	10972,1	10900,4	10835,1	10775,0	10719,9
14,5	11283,4	11184,3	11094,3	11011,6	10937,6	10869,3	10806,8	10748,7	10696,0
15,0	11200,9	11107,3	11022,3	10944,1	10874,0	10810,2	10751,5	10697,5	10648,2
15,5	11065,4	10979,1	10902,2	10831,5	10768,1	10710,4	10657,5	10609,9	10565,4
16,0	10940,2	10868,1	10804,0	10746,8	10694,4	10648,4	10606,0	10568,0	10533,3
16,5	10843,2	10781,4	10726,2	10676,6	10633,5	10594,7	10558,4	10524,6	10491,5
16,8	10800,7	10740,2	10685,5	10636,5	10593,2	10554,7	10518,2	10483,6	10449,4

M= 490000 500000 510000
P1= 9623,54 9577,49 9535,94

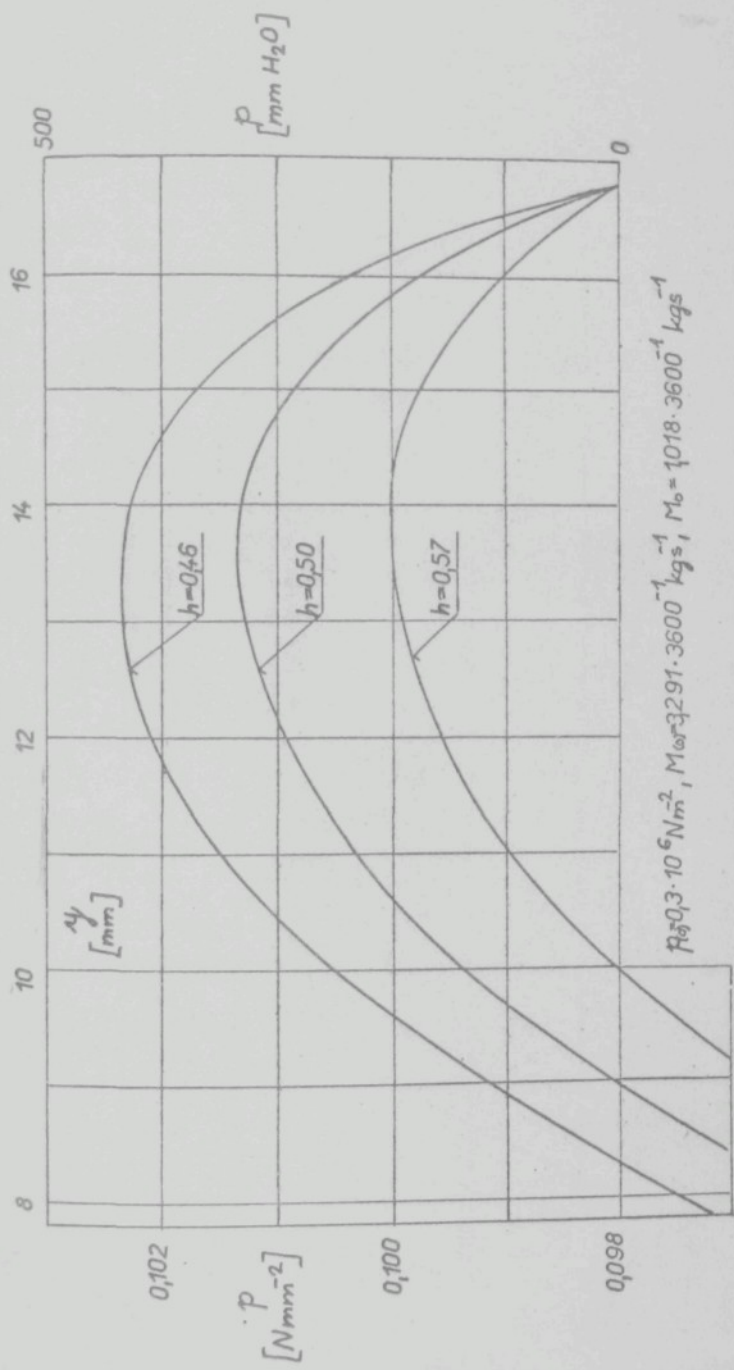
7,80	9623,54	9577,49	9535,94
8,00	9712,31	9665,29	9623,47
8,50	9906,19	9859,02	9814,97
9,00	10068,1	10019,1	9975,28
9,50	10202,7	10153,3	10108,0
10,0	10315,6	10265,1	10219,8
10,5	10409,7	10359,4	10312,5
11,0	10487,2	10436,6	10390,4
11,5	10558,2	10499,5	10453,3
12,0	10599,9	10550,6	10503,9
12,5	10637,6	10588,0	10541,3
13,0	10662,0	10612,6	10567,3
13,5	10673,5	10624,7	10580,3
14,0	10669,7	10622,1	10579,2
14,5	10647,4	10602,9	10561,1
15,0	10602,1	10560,5	10523,1
15,5	10525,8	10488,4	10455,6
16,0	10401,1	10372,7	10345,8
16,5	10199,1	10183,4	10170,1
16,8	9999,30	10000,5	10000,4

INVERZNÍ FUNKCE $U=F(V)$

$H=,40$	$P1=10324$	$H=,41$	$P1=10212$	$H=,42$	$P1=10110$	$H=,43$	$P1=10018$	$H=,44$	$P1=9935$	
$Y=$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$
8,00	-66,634	,475018	-67,045	,472741	-67,378	,470916	-67,643	,469507	-67,844	,468428
8,50	-63,541	,492225	-63,911	,490117	-64,207	,488462	-64,437	,487176	-64,605	,486220
9,00	-61,212	,505490	-61,542	,503616	-61,800	,502103	-61,994	,501008	-62,128	,500243
9,50	-59,582	,514951	-59,871	,513285	-60,089	,512029	-60,246	,511097	-60,345	,510499
10,0	-58,604	,520749	-58,849	,519264	-59,026	,518238	-59,143	,517540	-59,205	,517177
10,5	-58,247	,522836	-58,446	,521693	-58,580	,520872	-58,655	,520429	-58,676	,520325
11,0	-58,496	,521352	-58,646	,520478	-58,732	,519978	-58,762	,519813	-58,740	,519943
11,5	-59,348	,516343	-59,444	,515807	-59,479	,515604	-59,459	,515692	-59,389	,516127
12,0	-60,812	,507809	-60,850	,507586	-60,828	,507701	-60,752	,508160	-60,628	,508877
12,5	-62,912	,495750	-62,884	,495909	-62,798	,496412	-62,661	,497218	-62,477	,498240
13,0	-65,684	,480259	-65,581	,480822	-65,423	,481688	-65,216	,482818	-64,963	,484264
13,5	-69,182	,461196	-68,994	,462184	-68,754	,463484	-68,466	,465054	-68,135	,466806
14,0	-73,482	,438609	-73,196	,440044	-72,858	,441798	-72,476	,443785	-72,055	,446010
14,5	-78,688	,412358	-78,283	,414353	-77,832	,416585	-77,340	,419011	-76,810	,421683
15,0	-84,939	,382350	-84,393	,384926	-83,805	,387703	-83,179	,390637	-82,521	,393779
15,5	-82,431	,348353	-81,711	,351528	-80,953	,354916	-80,165	,358426	-80,348	,362107
16,0	-101,44	,309834	-100,50	,313740	-99,528	,317802	-98,534	,321999	-97,520	,326285
16,5	-112,37	,265656	-111,14	,270533	-109,89	,275513	-108,63	,280551	-107,36	,285646
16,8	-120,66	,232958	-119,19	,238770	-117,71	,244584	-116,24	,250424	-114,76	,256239

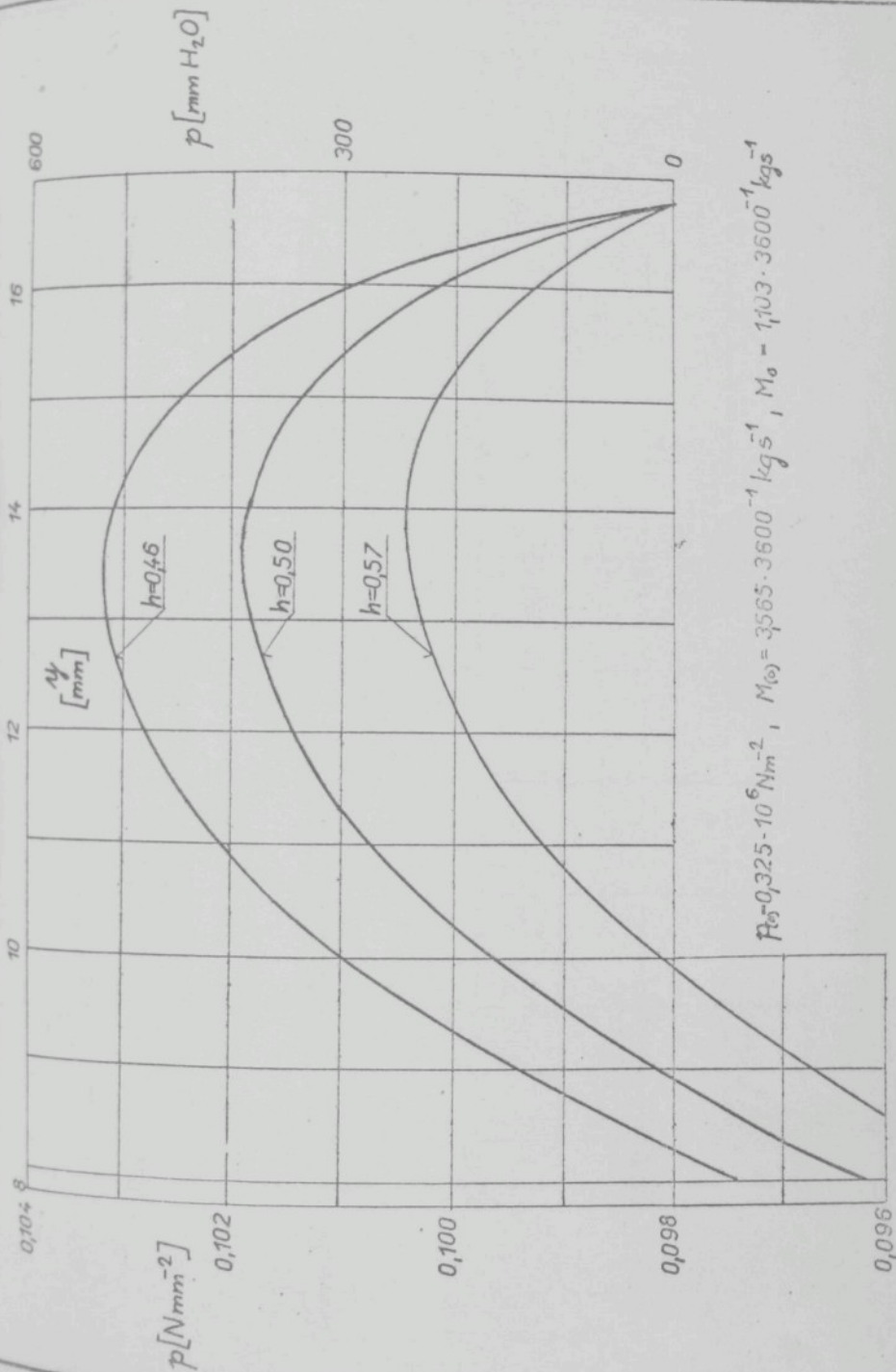
$H=,45$	$P1=9861$	$H=,46$	$P1=9791$	$H=,47$	$P1=9731$	$H=,48$	$P1=9675$	$H=,49$	$P1=9623$	
$Y=$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$	$ARGUM.V$	$U-F(V)$
8,00	-67,984	,467639	-68,077	,467147	-68,115	,466960	-68,113	,466935	-68,072	,467178
8,50	-64,715	,485650	-64,779	,485282	-64,793	,485169	-64,766	,485317	-64,702	,485683
9,00	-62,207	,499770	-62,242	,499596	-62,228	,499678	-62,175	,499973	-62,087	,500487
9,50	-60,391	,510241	-60,393	,510235	-60,350	,510487	-60,269	,510953	-60,153	,511639
10,0	-59,216	,517109	-59,184	,517295	-59,108	,517790	-58,996	,518404	-58,850	,519288
10,5	-58,649	,520471	-58,579	,520874	-58,468	,521539	-58,321	,522423	-58,142	,523483
11,0	-58,670	,520327	-58,560	,520970	-58,409	,521880	-58,224	,522962	-58,008	,524272
11,5	-59,272	,516773	-59,117	,517682	-58,922	,518861	-58,695	,520217	-58,438	,521706
12,0	-60,460	,508857	-60,254	,511057	-60,011	,512483	-59,736	,514090	-59,432	,515834
12,5	-62,250	,499530	-61,987	,501047	-61,688	,502745	-61,360	,504630	-61,004	,506705
13,0	-64,671	,485890	-64,343	,487700	-63,981	,489745	-63,592	,491934	-63,176	,494269
13,5	-67,766	,468840	-67,364	,471016	-66,930	,473386	-66,470	,475906	-65,985	,478577
14,0	-71,997	,448380	-71,108	,450947	-70,591	,453668	-70,049	,456544	-69,485	,459578
14,5	-76,248	,424510	-75,658	,427494	-75,042	,430590	-74,403	,433848	-73,745	,437224
15,0	-81,833	,397085	-81,121	,400510	-80,387	,404055	-79,634	,407722	-78,865	,411465
15,5	-88,508	,365915	-87,648	,369826	-86,770	,373868	-85,878	,377968	-84,973	,382202
16,0	-96,488	,330710	-95,443	,335202	-94,387	,339787	-93,322	,344440	-92,250	,349139
16,5	-106,08	,290798	-104,80	,296007	-103,52	,301274	-102,23	,306550	-100,95	,311882
16,8	-113,28	,262077	-111,81	,267863	-110,34	,273717	-108,88	,279541	-107,43	,285333

γ.	H = 50 P1 = 9577		H = 51 P1 = 9535	
	ARGUM. V	U-F(V)	ARGUM. V	U-F(V)
8,00	-67,892	,467593	-67,878	,468235
8,50	-64,602	,486271	-64,470	,486987
9,00	-61,864	,501174	-61,809	,502089
9,50	-60,004	,512501	-59,826	,513541
10,0	-58,673	,520300	-58,466	,521542
10,5	-57,933	,524721	-57,696	,526093
11,0	-57,763	,525715	-57,492	,527343
11,5	-58,153	,523380	-57,842	,525242
12,0	-59,102	,517816	-58,748	,519892
12,5	-60,623	,508924	-60,219	,511241
13,0	-62,736	,496753	-62,276	,499389
13,5	-65,479	,481353	-64,953	,484287
14,0	-68,901	,462675	-68,299	,465935
14,5	-73,070	,440718	-72,379	,444282
15,0	-78,081	,415333	-77,284	,419329
15,5	-84,058	,386470	-83,134	,390875
16,0	-91,174	,353932	-90,094	,358746
16,5	-99,668	,317221	-98,390	,322616
16,8	-105,99	,291190	-104,56	,297012



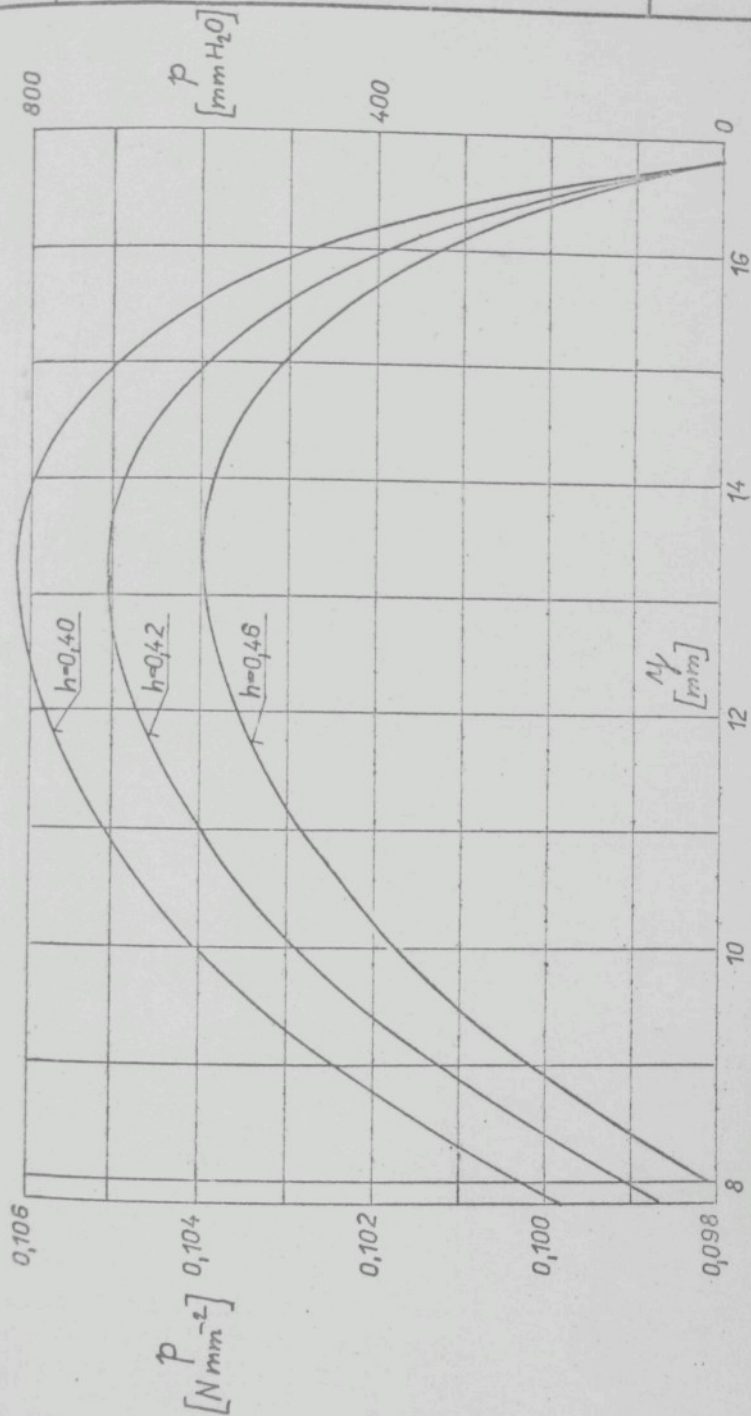
$p_0 = 0,3 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}$, $M_{01} = 3297 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$, $M_{02} = 18 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$





$$R_0 = 0.325 \cdot 10^6 \text{ Nm}^{-2}, \quad M_{(0)} = 3565 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}, \quad M_0 = 1403 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$$

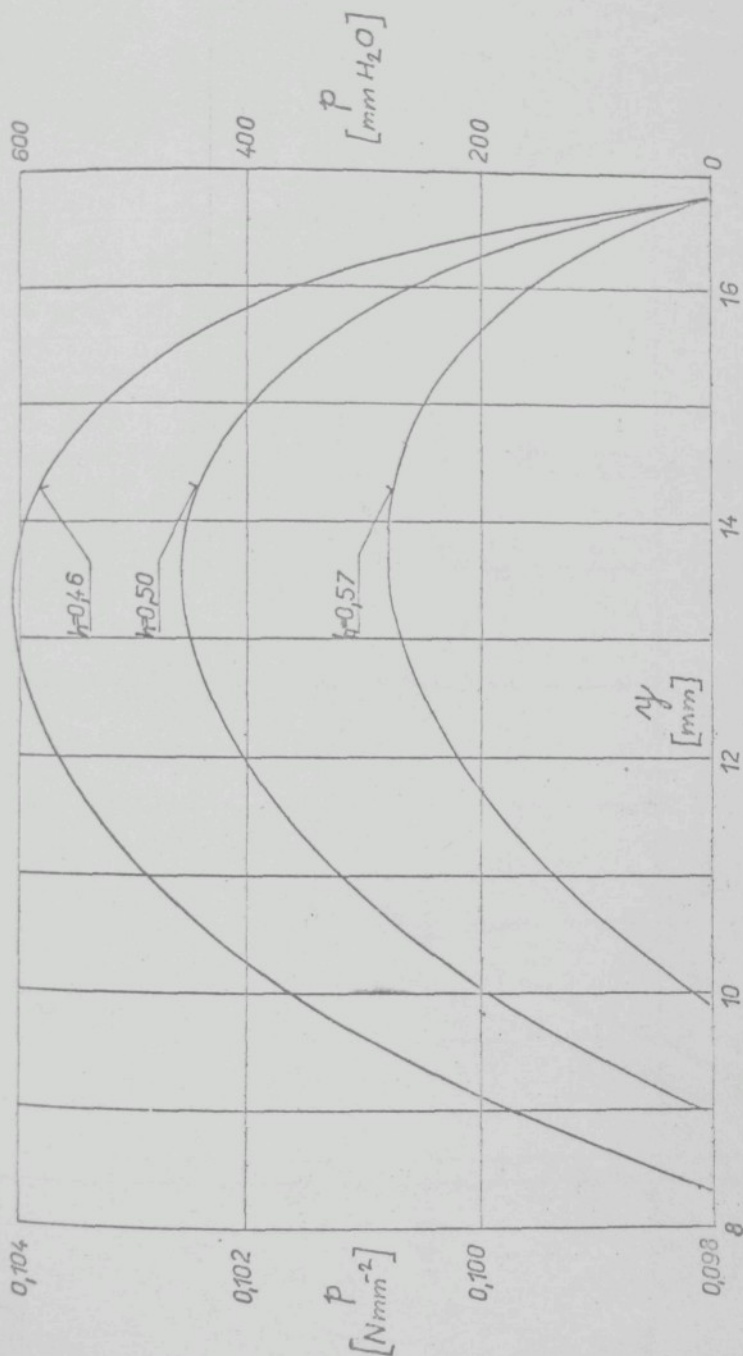
$$p_0 = 0,325 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}, \quad M_0 = 3565 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}, \quad M_0 = 1,103 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$$

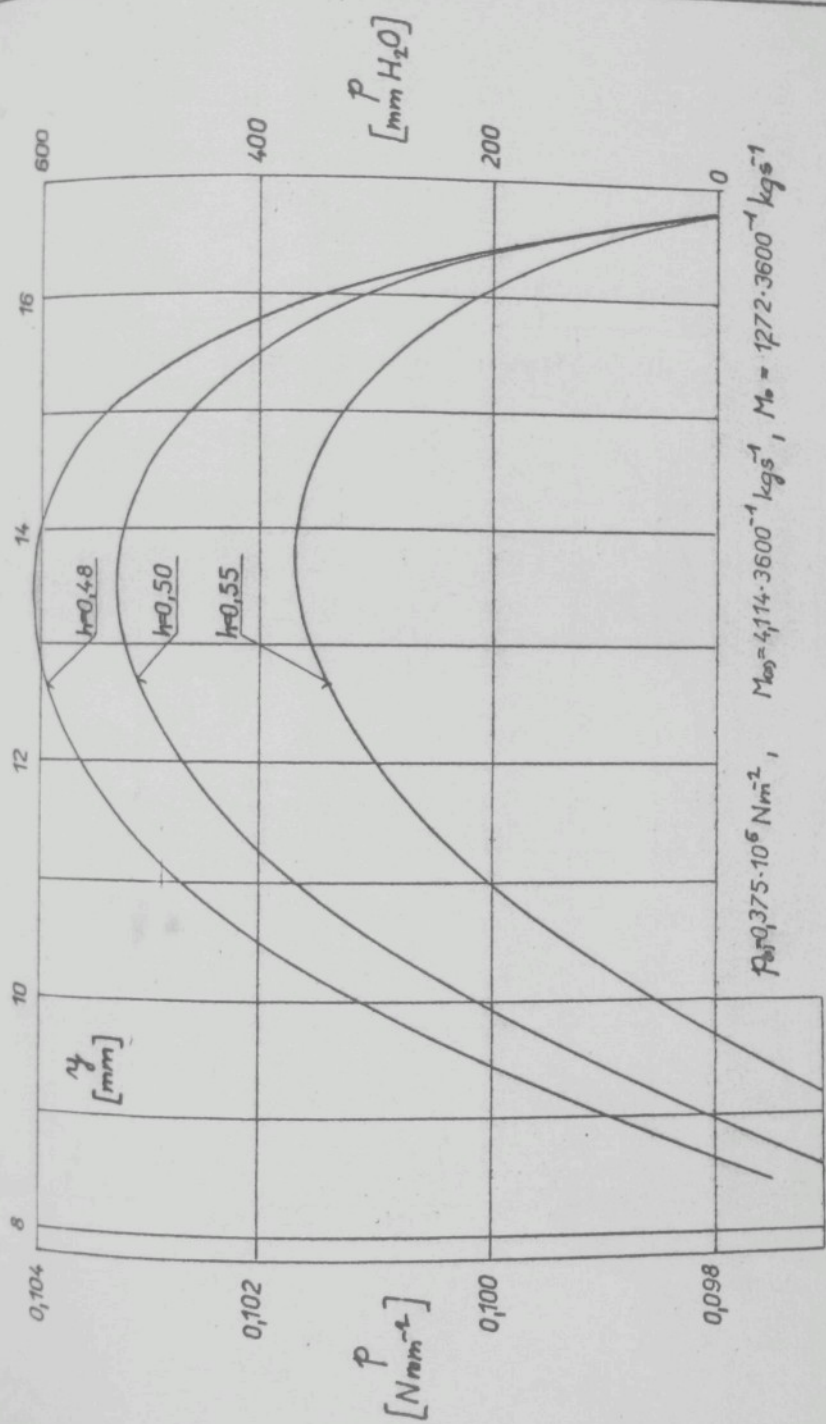


$$M_0 = 1,191 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$$

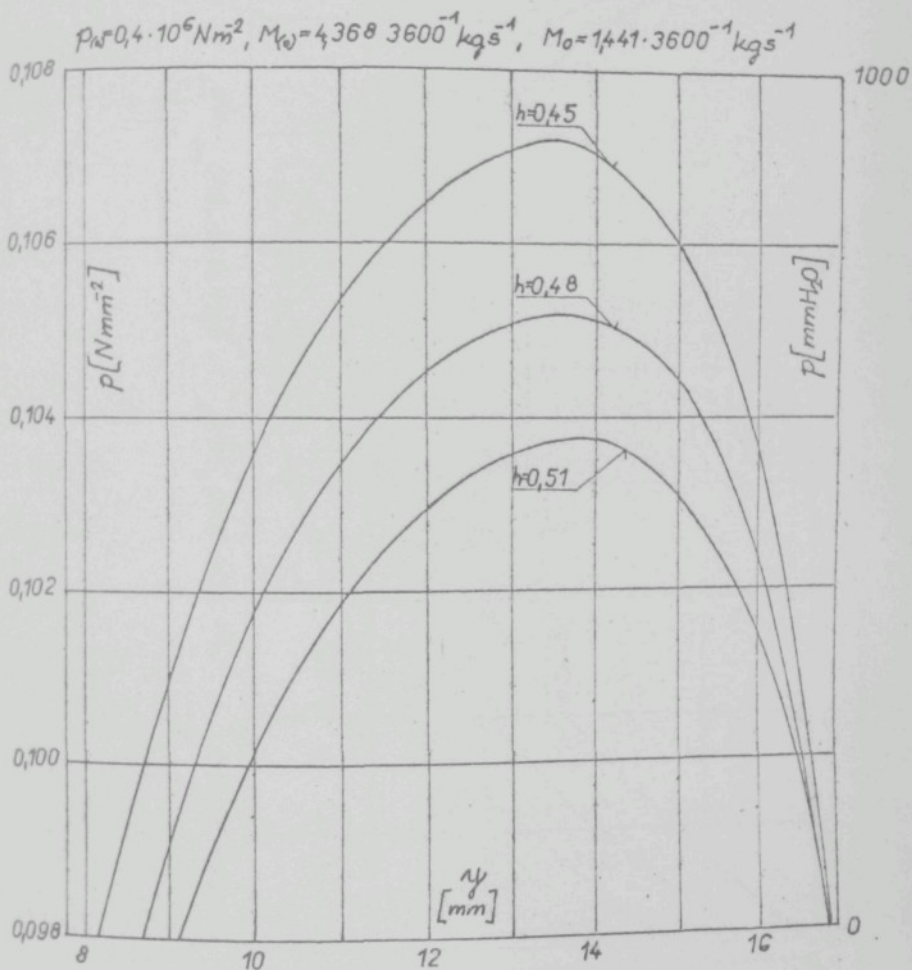
$$M_0 = 3839 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$$

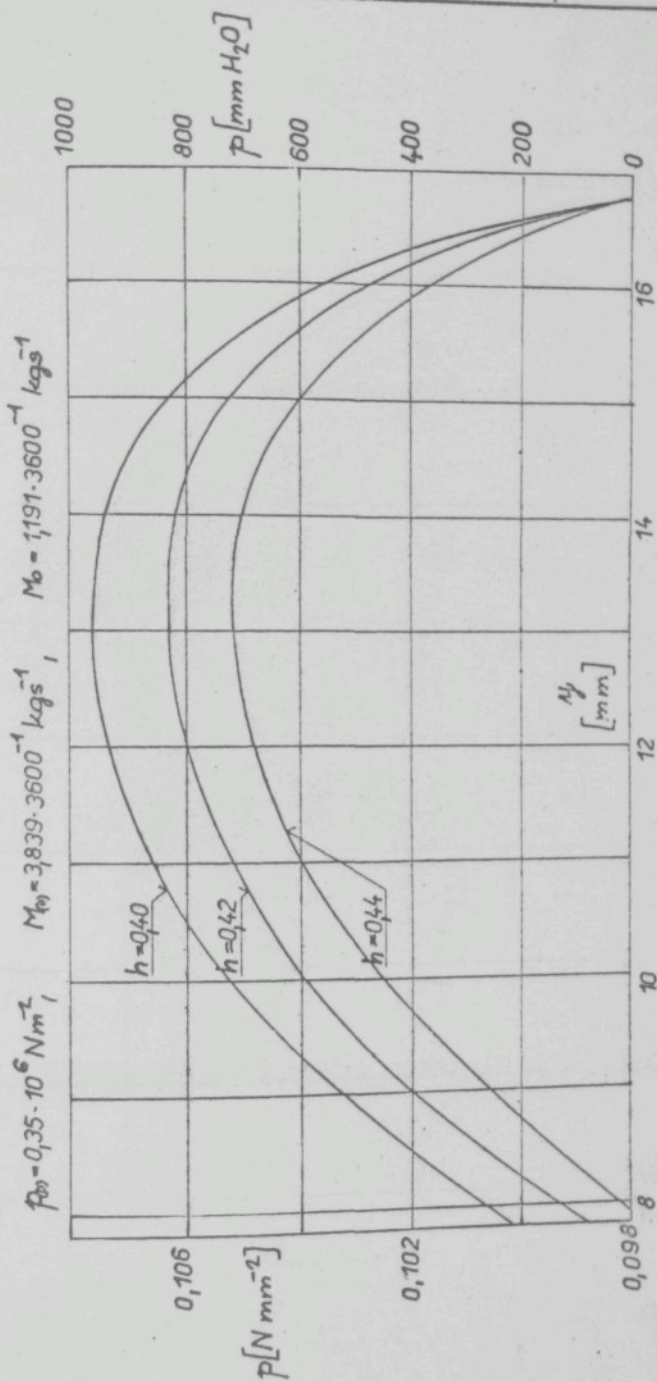
$$P = 0,35 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}$$

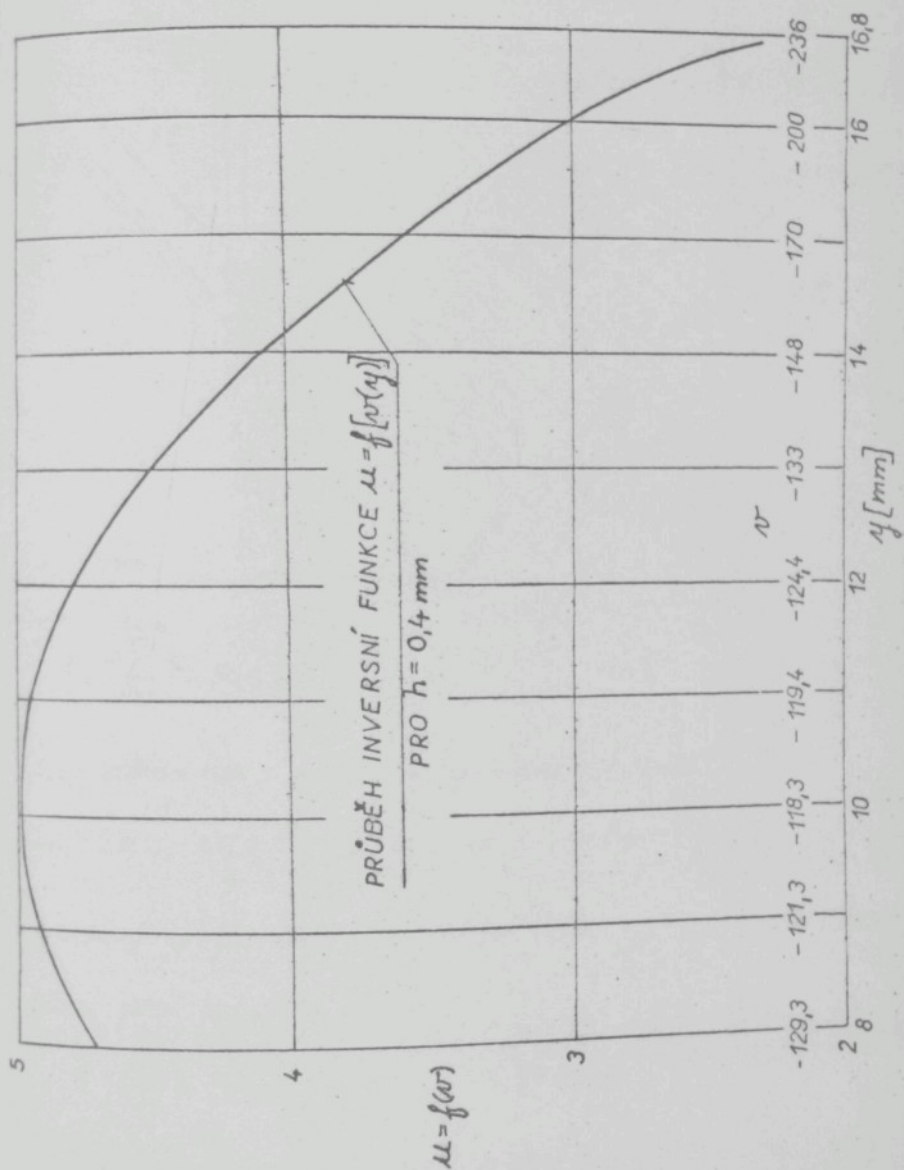


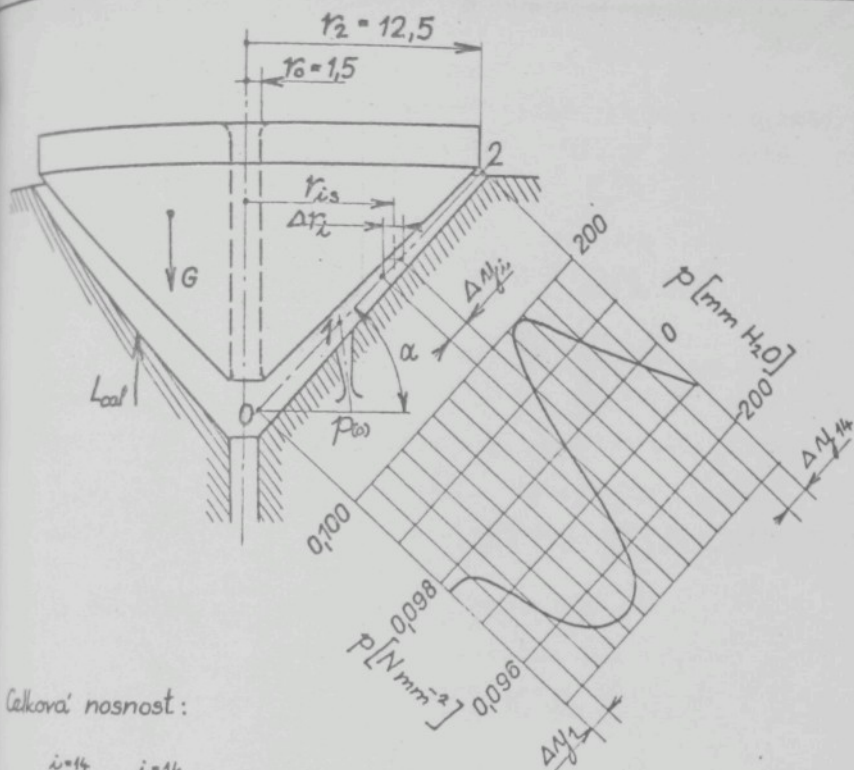


$p_0 = 0.375 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, $M_0 = 4114 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$, $M_b = 1272 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$









Celková nosnost:

$$L_{cal} \sum_{i=1}^{i=14} L_i = \sum_{i=1}^{i=14} S_i p_{is} [N],$$

kde: p_{is} = střední tlak v mezerě na poloměru r_{is} [Nmm^{-2}]

$$S_i = 2\pi r_{is} \cdot \Delta r_i = 2\pi \cdot r_{is} \cdot \Delta y \cdot \cos \alpha [mm^2]$$

Použitý tlakový profil byl naměřen při tlaku $p(0) = 0,4 \cdot 9806 \cdot 10^3 Nmm^{-2}$

Po vyčíslení jsou jednotlivé nosnosti:

$$L_1 + L_8 = 41,473 \text{ Pondů}, L_9 + L_{14} = 73,97 \text{ Pondů},$$

$$L_{cel} = 73,97 - 41,473 = 32,497 \text{ Pondů}$$

Síla tíže vlastního rotorku $G = 28,6 \text{ Pondů}$

PŘÍLOHA č. 15

Tabelární hodnoty numerického výpočtu tlaku p v místě vstupu do mezery v závislosti na poloměru r_a podle vzorců :

$$p_1 = \sqrt{12kM_1 \ln \frac{r_a}{r_i} + p_a^2}, \quad p_2 = \sqrt{12kM_2 \ln \frac{r_a}{r_i} + p_a^2}$$

Dosadíme - li hodnoty $M_1 = M \frac{\ln \frac{r_a}{r_i}}{\ln \frac{r_a}{r_i}}, M_2 = M \frac{\ln \frac{r_a}{r_i}}{\ln \frac{r_a}{r_i}}$

do obou vzorců, dostaneme $p_2 = p_1$. Označíme tedy $p = p_1 = p_2$.

$$k = \frac{\eta \cdot R \cdot T}{\pi \cdot \cos \alpha \cdot h^3}; \quad h = 0,04 \cdot 10^{-3} \text{ m}; \quad T = 293^\circ \text{ K}; \quad \alpha = 45^\circ$$

Po dosazení konstant $k = 1,122158 \cdot 10^{11}, M = 3,76991 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right]$

$$r_a = 0,0125 [\text{m}], r_i = 0,0015 [\text{m}], p_a = 10^4$$

získáme výraz
$$p = \sqrt{2,3942 \cdot 10^8 \ln \frac{r_a}{r_i} \ln \frac{r_a}{r_i} + 10^8}$$

Maximum funkce p nastane pro

$$r_a = \sqrt{r_a \cdot r_i} = 4,33 \cdot 10^{-3}$$

$r_a \cdot 10^3$	$\ln \frac{r_a}{r_i}$	$\ln \frac{r_a}{r_i}$	$p^2 \cdot 10^{-8}$	$p \cdot 10^{-4}$	Pozn.
1.5	0	2,1203	1	1	
2	0,28766	1,8326	2,2622	1,50	
3	0,69315	1,4271	3,3683	1,83	
4	0,98084	1,1394	3,6758	1,917	
4.33	1,0601	1,0602	3,6908	1,921	maximum
5	1,2040	0,91629	3,6413	1,91	
6	1,3863	0,73396	3,4361	1,85	
7	1,5405	0,57981	3,1385	1,77	
8	1,6740	0,44629	2,7887	1,67	
9	1,7918	0,32851	2,4093	1,55	
10	1,8971	0,22314	2,0135	1,42	
11	1,9924	0,12787	1,60997	1,27	
12	2,0794	0,040857	1,20341	1,10	
12.5	2,1203	0	1	1	

Příloha č.16

Výpočet tlakové funkce

$$p_1 = \sqrt{12 k M_1 \ln \frac{r_a}{r} + p_a^2} ; \quad p_2 = \sqrt{12 k M_2 \ln \frac{r}{r_i} + p_a^2}$$

$$r_a = 12,5 \text{ mm} ; r_i = 2,5 \text{ mm} ; 12 k = 1,34658 \cdot 10^{+12}$$

$$h = 0,04 \text{ mm} ; p_a = 10333 \text{ kp/m}^2$$

$$M = 2,777 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s} = 0,1 \text{ kg/hod}$$

$r \cdot 10^3 [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$2,393 \cdot 10^{-5}$	$2,211 \cdot 10^{-5}$	$2,007 \cdot 10^{-5}$	$1,777 \cdot 10^{-5}$	$1,511 \cdot 10^{-5}$	$1,196 \cdot 10^{-5}$	$8,111 \cdot 10^{-6}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{ata}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,039	1,038	1,038	1,037	1,037	1,036	1,035
11	1,053	1,051	1,049	1,047	1,045	1,042	1,039
10	1,067	1,065	1,062	1,057	1,054	1,050	1,044
9	1,062	1,079	1,075	1,070	1,064	1,058	1,050
8	1,062	1,075	1,090	1,083	1,076	1,067	1,056
7	1,058	1,070	1,083	1,098	1,088	1,077	1,063
6	1,055	1,065	1,076	1,088	1,102	1,088	1,071
5	1,050	1,058	1,067	1,077	1,088	1,102	1,080
4	1,045	1,050	1,056	1,063	1,071	1,080	1,091
3	1,083	1,040	1,042	1,044	1,047	1,051	1,056

$$M = 8,333 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s} = 0,3 \text{ kg/hod}$$

$r \cdot 10^{-3} [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$7,178 \cdot 10^{-5}$	$6,632 \cdot 10^{-5}$	$6,022 \cdot 10^{-5}$	$5,331 \cdot 10^{-5}$	$4,533 \cdot 10^{-5}$	$3,589 \cdot 10^{-5}$	$2,433 \cdot 10^{-5}$
$r [\text{m}]$	$P [\text{atm}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,052	1,050	1,048	1,047	1,045	1,042	1,039
11	1,091	1,087	1,082	1,076	1,070	1,062	1,053
10	1,132	1,125	1,117	1,108	1,097	1,084	1,068
9	1,125	1,166	1,155	1,141	1,126	1,107	1,084
8	1,117	1,155	1,195	1,178	1,157	1,132	1,102
7	1,108	1,141	1,178	1,218	1,192	1,161	1,121
6	1,097	1,126	1,157	1,192	1,231	1,192	1,144
5	1,084	1,107	1,132	1,161	1,192	1,229	1,164
4	1,068	1,084	1,102	1,121	1,144	1,169	1,200
3	1,047	1,053	1,060	1,068	1,077	1,088	1,101

$$M = 1,388 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} = 0,5 \text{ kg/hod}$$

$r \cdot 10^{-3} [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$1,196 \cdot 10^{-4}$	$1,105 \cdot 10^{-4}$	$1,004 \cdot 10^{-4}$	$8,885 \cdot 10^{-5}$	$7,555 \cdot 10^{-5}$	$5,982 \cdot 10^{-5}$	$4,056 \cdot 10^{-5}$
$r [\text{m}]$	$P [\text{atm}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,064	1,062	1,059	1,056	1,053	1,049	1,044
11	1,128	1,121	1,113	1,105	1,094	1,082	1,066
10	1,194	1,183	1,170	1,155	1,137	1,117	1,090
9	1,183	1,257	1,229	1,208	1,184	1,153	1,116
8	1,170	1,229	1,292	1,266	1,233	1,194	1,145
7	1,155	1,208	1,265	1,327	1,287	1,239	1,176
6	1,138	1,184	1,233	1,287	1,377	1,288	1,212
5	1,117	1,154	1,194	1,239	1,238	1,344	1,252
4	1,090	1,116	1,145	1,176	1,212	1,252	1,299
3	1,056	1,066	1,078	1,091	1,106	1,123	1,144

$$M = 1,944 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} = 0,7 \text{ kg/hod}$$

$F \cdot 10^{-3} [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$1,675 \cdot 10^{-4}$	$1,547 \cdot 10^{-4}$	$1,405 \cdot 10^{-4}$	$1,244 \cdot 10^{-4}$	$1,058 \cdot 10^{-4}$	$8,374 \cdot 10^{-5}$	$5,678 \cdot 10^{-5}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{ata}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,076	1,073	1,070	1,066	1,061	1,055	1,048
11	1,164	1,155	1,144	1,132	1,118	1,100	1,079
10	1,253	1,238	1,220	1,200	1,177	1,148	1,112
9	1,238	1,324	1,300	1,272	1,239	1,199	1,148
8	1,220	1,300	1,383	1,347	1,305	1,253	1,187
7	1,200	1,272	1,377	1,428	1,376	1,312	1,229
6	1,177	1,239	1,305	1,376	1,453	1,376	1,276
5	1,148	1,199	1,253	1,312	1,376	1,499	1,329
4	1,112	1,148	1,187	1,229	1,276	1,329	1,392
3	1,064	1,079	1,095	1,113	1,133	1,157	1,185

$$M = 2,222 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} = 0,8 \text{ kg/h}$$

$F \cdot 10^{-3} [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$1,914 \cdot 10^{-4}$	$1,768 \cdot 10^{-4}$	$1,606 \cdot 10^{-4}$	$1,422 \cdot 10^{-4}$	$1,209 \cdot 10^{-4}$	$9,570 \cdot 10^{-5}$	$6,489 \cdot 10^{-5}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{ata}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,083	1,079	1,075	1,070	1,065	1,058	1,050
11	1,182	1,171	1,159	1,145	1,129	1,110	1,086
10	1,282	1,264	1,245	1,222	1,196	1,164	1,123
9	1,264	1,360	1,332	1,302	1,266	1,221	1,164
8	1,245	1,333	1,426	1,386	1,339	1,282	1,207
7	1,222	1,302	1,386	1,475	1,418	1,347	1,254
6	1,196	1,266	1,339	1,418	1,504	1,419	1,307
5	1,164	1,221	1,282	1,347	1,419	1,499	1,367
4	1,123	1,164	1,207	1,254	1,307	1,367	1,436
3	1,069	1,085	1,104	1,124	1,147	1,174	1,206

$$M = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} = 0,9 \text{ kg/hod}$$

$r \cdot 10^{-3} [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$2,153 \cdot 10^{-4}$	$1,930 \cdot 10^{-4}$	$1,807 \cdot 10^{-4}$	$1,599 \cdot 10^{-4}$	$1,360 \cdot 10^{-4}$	$1,077 \cdot 10^{-4}$	$7,300 \cdot 10^{-5}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{ata}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,089	1,085	1,080	1,075	1,068	1,061	1,052
11	1,200	1,187	1,174	1,159	1,141	1,119	1,092
10	1,309	1,290	1,269	1,244	1,215	1,179	1,134
9	1,290	1,295	1,366	1,332	1,292	1,242	1,179
8	1,269	1,366	1,467	1,424	1,373	1,309	1,227
7	1,244	1,332	1,424	1,522	1,459	1,381	1,279
6	1,215	1,292	1,373	1,459	1,553	1,460	1,337
5	1,179	1,242	1,309	1,381	1,460	1,548	1,403
4	1,134	1,179	1,227	1,279	1,337	1,403	1,479
3	1,073	1,092	1,112	1,135	1,160	1,190	1,225

$$M = 2,777 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} = 1 \text{ kg/hod}$$

$r \cdot 10^{-3} [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$2,393 \cdot 10^{-4}$	$2,211 \cdot 10^{-4}$	$2,007 \cdot 10^{-4}$	$1,770 \cdot 10^{-4}$	$1,511 \cdot 10^{-4}$	$1,196 \cdot 10^{-4}$	$8,112 \cdot 10^{-5}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{ata}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,094	1,090	1,085	1,079	1,072	1,064	1,054
11	1,216	1,203	1,189	1,171	1,152	1,128	1,100
10	1,336	1,316	1,292	1,265	1,233	1,194	1,145
9	1,316	1,430	1,398	1,361	1,317	1,263	1,194
8	1,292	1,398	1,508	1,461	1,405	1,336	1,247
7	1,265	1,361	1,461	1,567	1,498	1,415	1,304
6	1,233	1,317	1,405	1,499	1,600	1,500	1,367
5	1,194	1,263	1,336	1,415	1,499	1,595	1,438
4	1,145	1,194	1,277	1,304	1,367	1,438	1,520
3	1,078	1,098	1,120	1,146	1,174	1,206	1,245

$$M = 3,765 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$r \cdot 10^3 [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$3,243 \cdot 10^{-4}$	$2,996 \cdot 10^{-4}$	$2,721 \cdot 10^{-4}$	$2,408 \cdot 10^{-4}$	$2,048 \cdot 10^{-4}$	$1,621 \cdot 10^{-4}$	$1,099 \cdot 10^{-4}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{atm}]$						
$12 \cdot 10^{-2}$	1,121	1,100	1,103	1,095	1,086	1,075	1,062
$11 \cdot 10^{-2}$	1,274	1,258	1,239	1,217	1,191	1,160	1,121
$10 \cdot 10^{-2}$	1,429	1,403	1,373	1,338	1,279	1,247	1,182
$9 \cdot 10^{-3}$	1,403	1,547	1,507	1,460	1,405	1,335	1,246
$8 \cdot 10^{-3}$	1,373	1,501	1,644	1,586	1,516	1,428	1,314
$7 \cdot 10^{-3}$	1,338	1,460	1,586	1,716	1,633	1,527	1,388
$6 \cdot 10^{-3}$	1,297	1,405	1,516	1,632	1,758	1,634	1,468
$5 \cdot 10^{-3}$	1,246	1,336	1,429	1,527	1,634	1,752	1,557
$4 \cdot 10^{-3}$	1,182	1,246	1,314	1,388	1,478	1,557	1,660
$3 \cdot 10^{-3}$	1,093	1,121	1,150	1,183	1,220	1,262	1,312

$$M = 5,555 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} = 2 \text{ kg/hod}$$

$r \cdot 10^3 [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$4,785 \cdot 10^{-4}$	$4,442 \cdot 10^{-4}$	$4,015 \cdot 10^{-4}$	$3,554 \cdot 10^{-4}$	$3,022 \cdot 10^{-4}$	$2,392 \cdot 10^{-4}$	$1,622 \cdot 10^{-4}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{atm}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,153	1,147	1,135	1,124	1,110	1,095	1,075
11	1,375	1,352	1,362	1,296	1,260	1,216	1,160
10	1,583	1,548	1,508	1,461	1,405	1,336	1,247
9	1,547	1,739	1,686	1,624	1,550	1,458	1,336
8	1,508	1,686	1,865	1,790	1,698	1,583	1,429
7	1,461	1,624	1,790	1,960	1,851	1,713	1,528
6	1,405	1,550	1,698	1,851	2,013	1,852	1,634
5	1,336	1,458	1,583	1,713	1,852	2,005	1,752
4	1,247	1,336	1,429	1,528	1,634	1,752	1,886
3	1,121	1,160	1,202	1,248	1,300	1,358	1,426

$$M = 8,333 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} = 3 \text{ kg/hod}$$

$r \cdot 10^3 [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$7,178 \cdot 10^{-6}$	$6,632 \cdot 10^{-6}$	$6,022 \cdot 10^{-6}$	$5,331 \cdot 10^{-6}$	$4,533 \cdot 10^{-6}$	$3,589 \cdot 10^{-6}$	$2,433 \cdot 10^{-6}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{ata}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,209	1,196	1,182	1,166	1,147	1,124	1,096
11	1,517	1,486	1,450	1,409	1,359	1,298	1,219
10	1,795	1,749	1,696	1,634	1,558	1,464	1,341
9	1,749	2,000	1,932	1,851	1,753	1,629	1,464
8	1,696	1,932	2,165	2,067	1,947	1,795	1,590
7	1,634	1,851	2,066	2,287	2,146	1,967	1,720
6	1,558	1,753	1,947	2,146	2,355	2,148	1,863
5	1,465	1,629	1,796	1,967	2,148	2,344	2,017
4	1,341	1,464	1,590	1,722	1,863	2,017	2,191
3	1,162	1,218	1,278	1,343	1,414	1,494	1,586

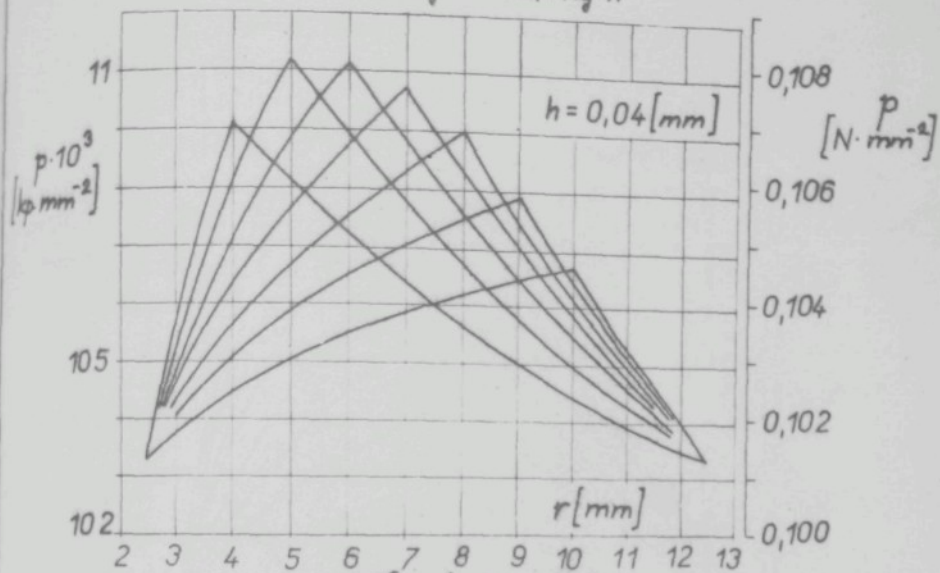
$$M = 2,777 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 10 \text{ kg/hod}$$

$r \cdot 10^3 [\text{m}]$	10	9	8	7	6	5
$M [\text{kg/s}]$	$2,392 \cdot 10^{-3}$	$2,211 \cdot 10^{-3}$	$2,007 \cdot 10^{-3}$	$1,777 \cdot 10^{-3}$	$1,511 \cdot 10^{-3}$	$1,196 \cdot 10^{-3}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{ata}]$					
$12 \cdot 10^{-3}$	1,543	1,510	1,673	1,429	1,377	1,313
11	2,277	2,207	2,127	2,031	1,915	1,768
10	2,873	2,777	2,664	2,531	2,363	2,159
9	2,777	2,393	2,154	2,988	2,784	2,522
8	2,664	3,154	3,623	3,427	3,185	2,873
7	2,531	2,988	3,427	3,865	3,587	3,226
6	2,368	2,784	3,185	3,587	4,000	3,590
5	2,159	2,522	2,873	3,226	3,590	3,978
4	1,872	2,158	2,437	2,720	2,014	3,328
3	1,148	1,568	1,720	1,877	2,044	2,224

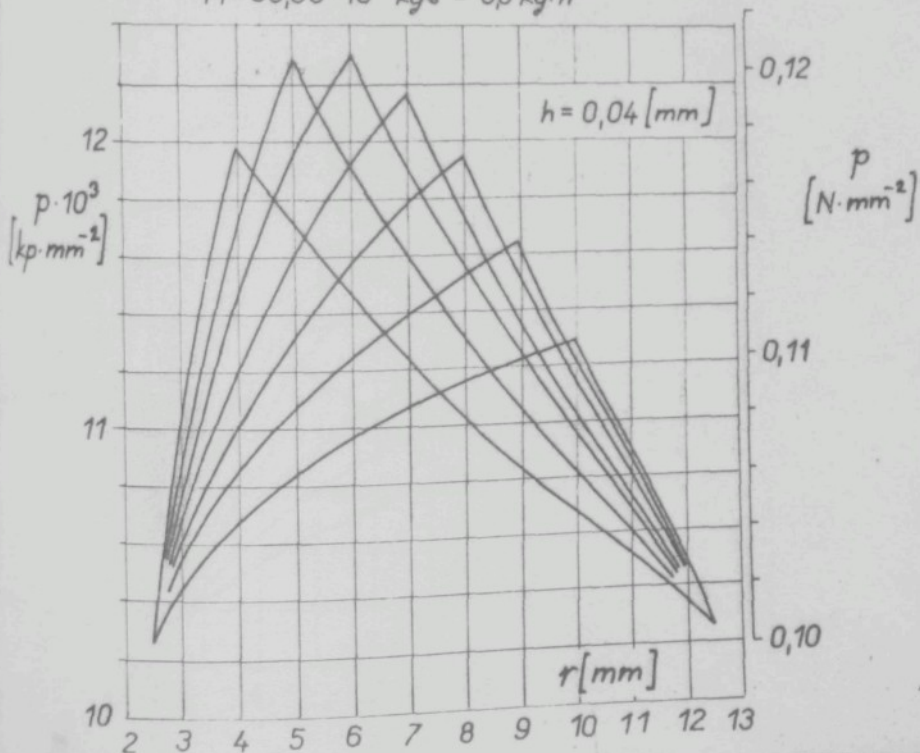
$$M = 1,388 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 5 \text{ kg/hod}$$

$\eta \cdot 10^3 [\%]$	10	9	8	7	6	5	4
$M [\text{kg/s}]$	$1,196 \cdot 10^{-3}$	$1,105 \cdot 10^{-3}$	$1,004 \cdot 10^{-3}$	$8,885 \cdot 10^{-4}$	$7,555 \cdot 10^{-4}$	$5,982 \cdot 10^{-4}$	$4,056 \cdot 10^{-4}$
$r [\text{m}]$	$p [\text{atm}]$						
$12 \cdot 10^{-3}$	1,313	1,294	1,272	1,247	1,217	1,181	1,136
11	1,768	1,723	1,672	1,611	1,539	1,448	1,329
10	2,159	2,095	2,020	1,933	1,827	1,692	1,512
9	2,095	2,441	2,347	2,236	2,100	1,937	1,692
8	2,021	2,347	2,664	2,531	2,368	2,159	1,872
7	1,933	2,236	2,531	2,829	2,639	2,395	2,058
6	1,827	2,100	2,368	2,639	2,921	2,642	2,253
5	1,692	1,927	2,159	2,395	2,642	2,906	2,464
4	1,511	1,691	1,872	2,057	2,253	2,464	2,700
3	1,241	1,328	1,419	1,515	1,619	1,734	1,866

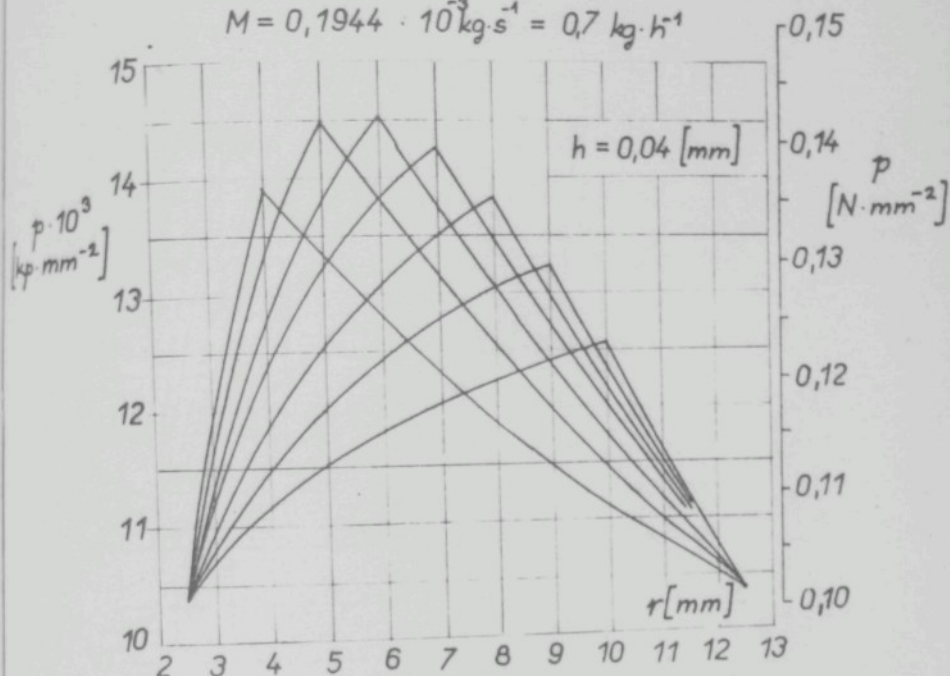
$$M = 27,77 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$



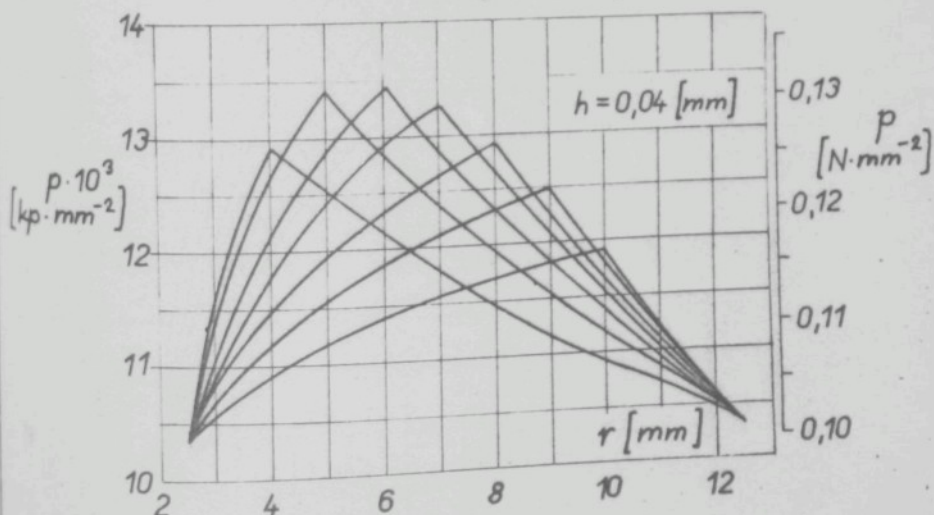
$$M = 83,33 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 0,3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$



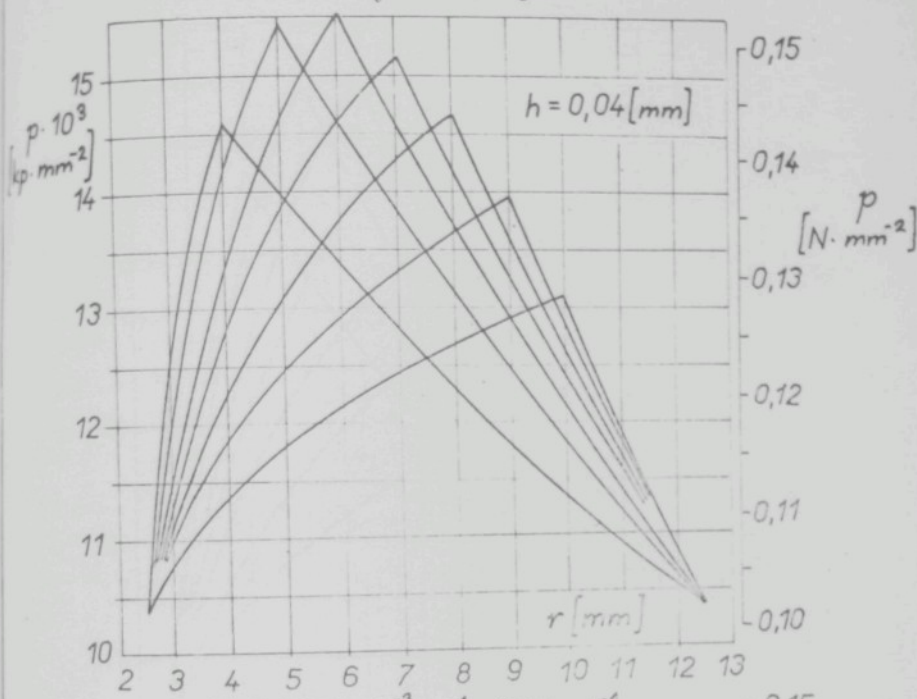
$$M = 0,1944 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 0,7 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$



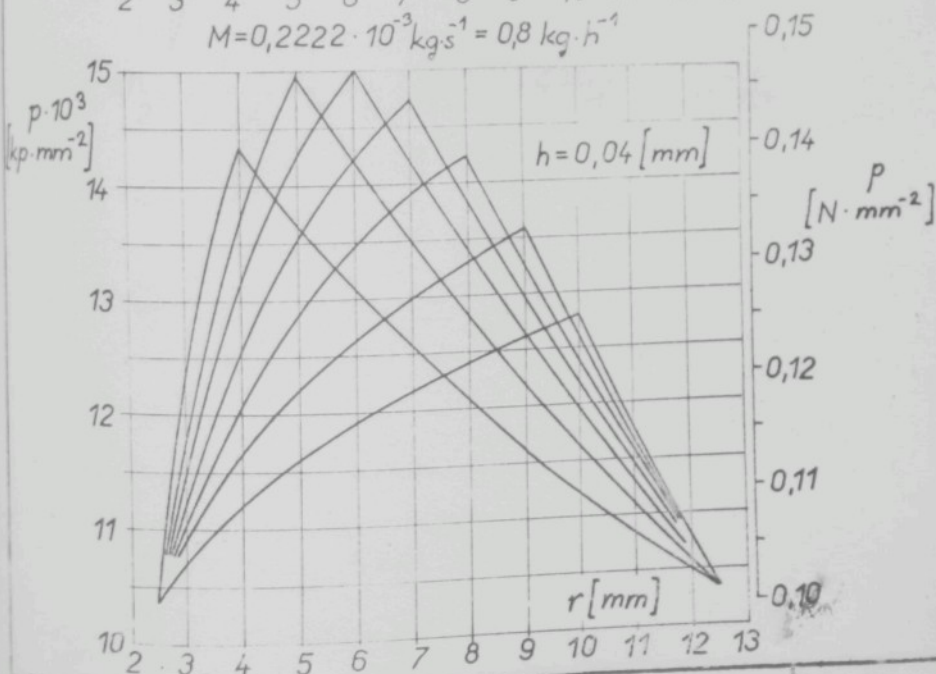
$$M = 0,1388 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 0,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$



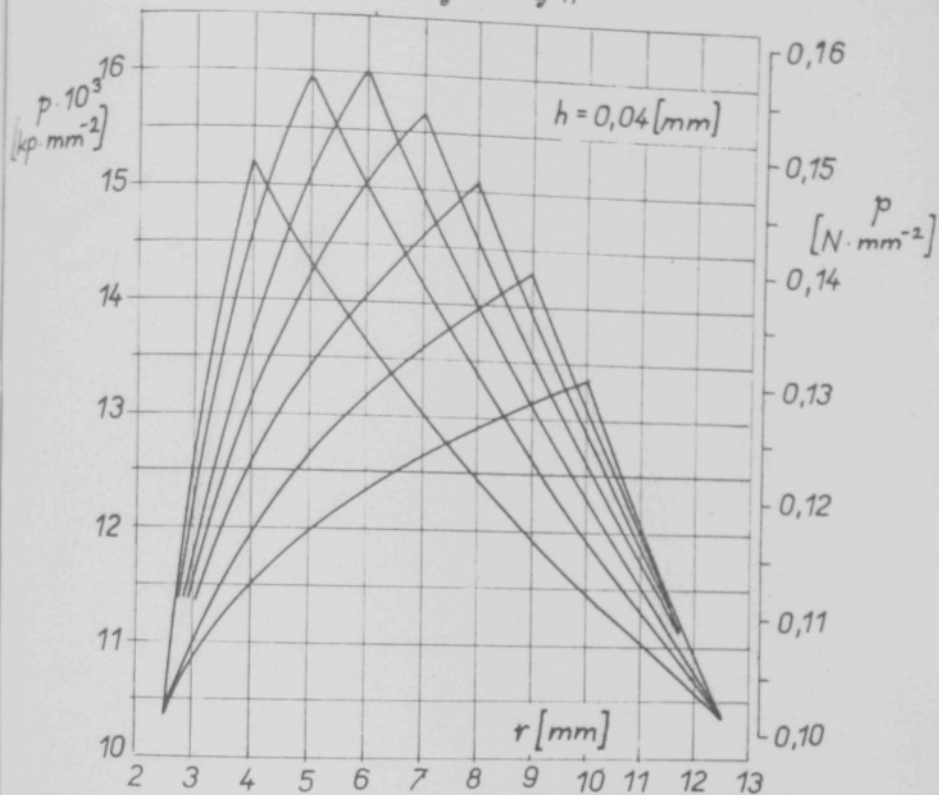
$$M = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 0,9 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$



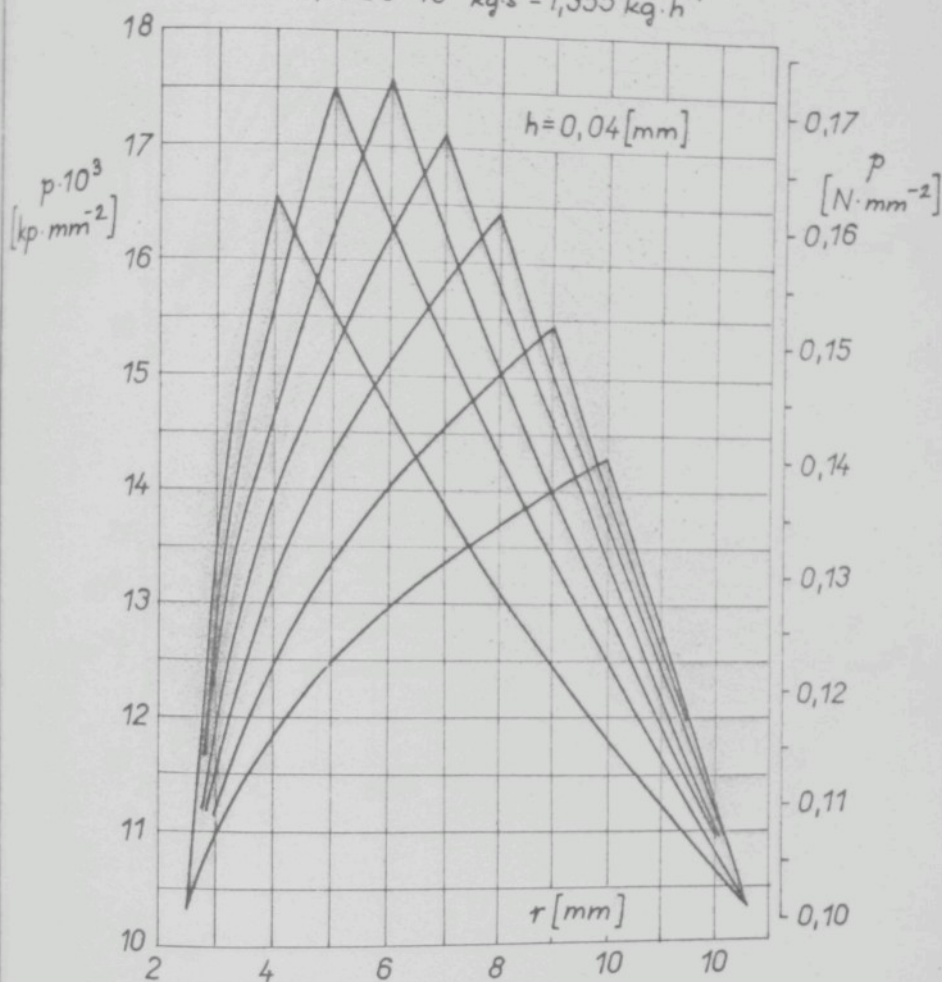
$$M = 0,2222 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 0,8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$



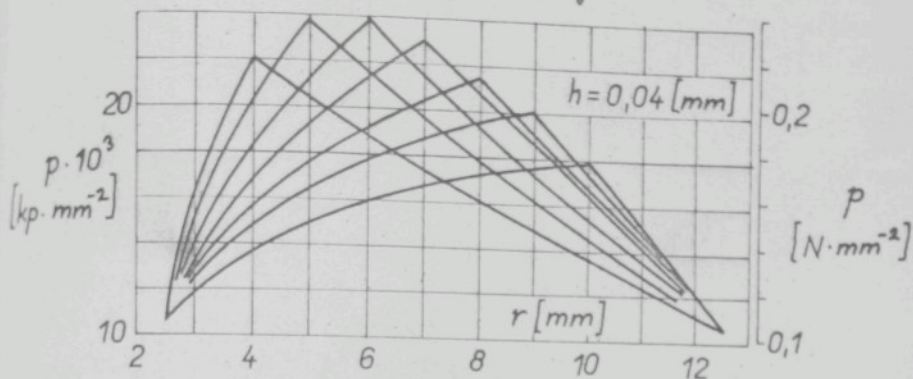
$$M = 0,2777 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$



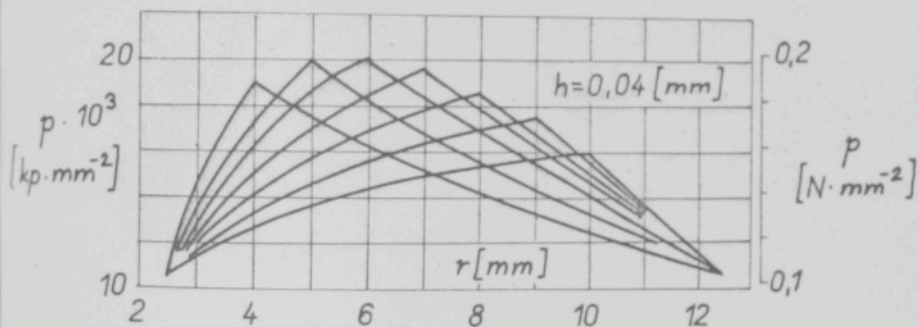
$$M = 0,3765 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-4} = 1,355 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-4}$$

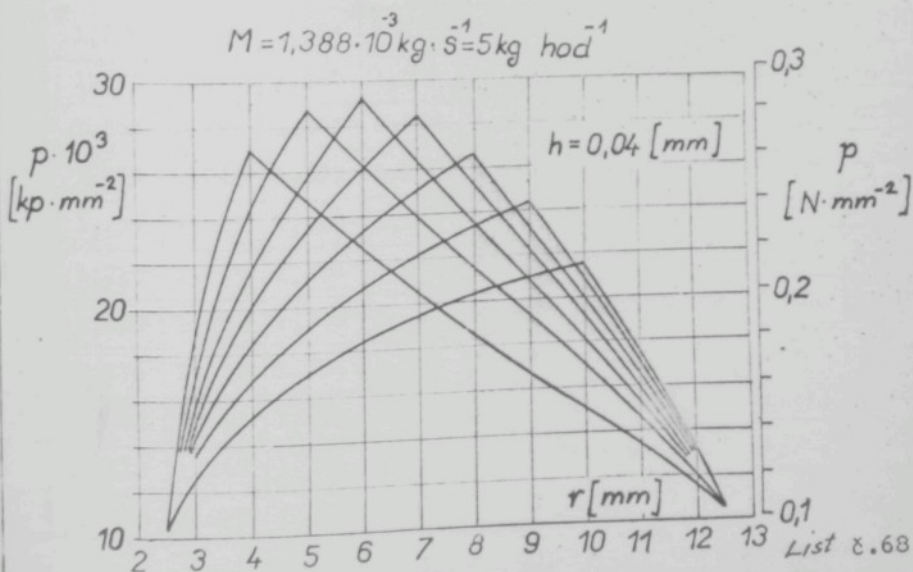
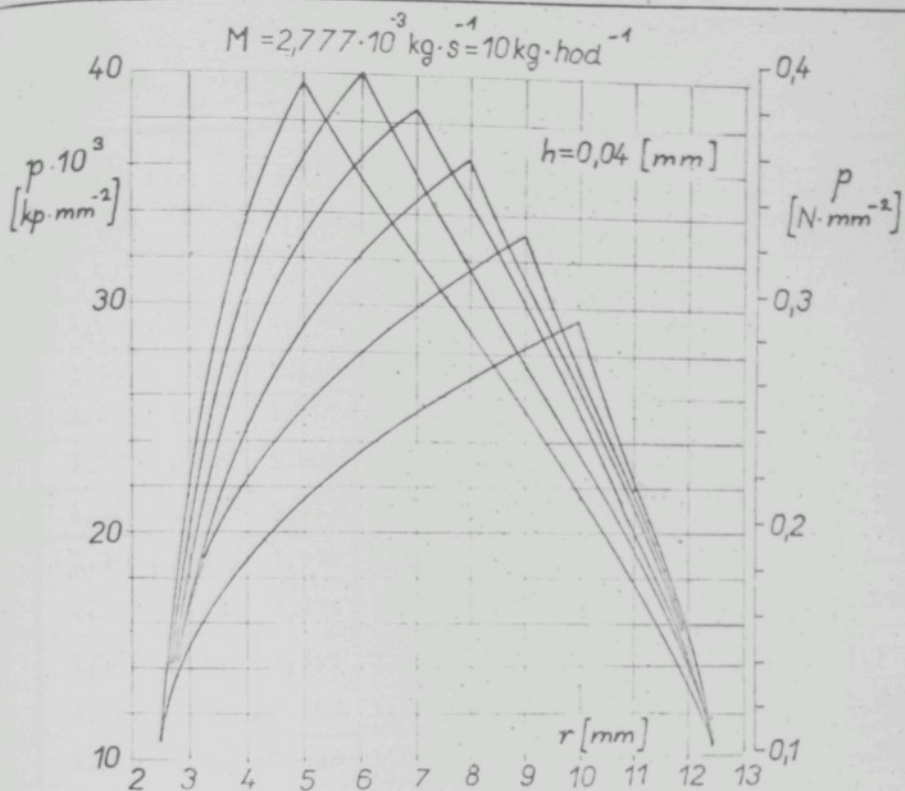


$$M = 0,8333 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$



$$M = 0,5555 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$





Příloha č.17

Průběhy tlaků

... $r_a = 25 \text{ mm}$, $r_b = 2,5 \text{ mm}$, $h = 0,04 \text{ mm}$
 $M = 2,777 \cdot 10^4 \text{ kg/s} = 1 \text{ kg/h}$

10^{-3} [m]	20	18	16	14	12	10	9	8	7
M_1	$2,509 \cdot 10^{-4}$	$2,381 \cdot 10^{-4}$	$2,239 \cdot 10^{-4}$	$2,078 \cdot 10^{-4}$	$1,892 \cdot 10^{-4}$	$1,672 \cdot 10^{-4}$	$1,545 \cdot 10^{-4}$	$1,403 \cdot 10^{-4}$	$1,272 \cdot 10^{-4}$
25	1,033								
24	1,098	1,094	1,090	1,087	1,082	1,076	1,073	1,069	1,065
23	1,161	1,155	1,148	1,140	1,131	1,120	1,114	1,106	1,098
22	1,224	1,215	1,205	1,193	1,180	1,164	1,154	1,144	1,131
21	1,287	1,275	1,262	1,247	1,229	1,208	1,195	1,182	1,165
20	1,349	1,335	1,319	1,300	1,279	1,253	1,237	1,220	1,200
19	1,342	1,395	1,376	1,354	1,329	1,298	1,280	1,259	1,235
18	1,335	1,456	1,434	1,409	1,379	1,344	1,323	1,299	1,272
17	1,327	1,445	1,493	1,465	1,432	1,391	1,367	1,340	1,308
16	1,319	1,434	1,553	1,522	1,484	1,439	1,413	1,382	1,347
15	1,310	1,422	1,538	1,580	1,539	1,489	1,459	1,425	1,386
14	1,301	1,409	1,522	1,640	1,595	1,540	1,508	1,470	1,427
13	1,290	1,395	1,504	1,618	1,653	1,593	1,558	1,517	1,470
12	1,279	1,379	1,485	1,595	1,714	1,649	1,611	1,566	1,515
11	1,266	1,363	1,463	1,569	1,683	1,707	1,666	1,618	1,562
10	1,253	1,344	1,439	1,540	1,649	1,769	1,724	1,673	1,612
9	1,237	1,323	1,412	1,507	1,610	1,724	1,787	1,731	1,666
8	1,220	1,299	1,382	1,470	1,566	1,673	1,731	1,794	1,724
7	1,200	1,271	1,346	1,427	1,514	1,612	1,666	1,724	1,787
6	1,176	1,238	1,304	1,375	1,453	1,539	1,587	1,639	1,696
5	1,148	1,198	1,253	1,311	1,376	1,448	1,489	1,533	1,581
4	1,112	1,148	1,186	1,228	1,276	1,329	1,359	1,392	1,427
3	1,064	1,079	1,095	1,113	1,133	1,156	1,170	1,185	1,201

$$M = 5,555 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} = 2 \text{ kg/h}$$

$Re \cdot 10^{-3} [m]$	20	18	16	14	12	10	9	8	7	6
M_1	$0,17 \cdot 10^{-4}$	$4,763 \cdot 10^{-4}$	$4,479 \cdot 10^{-4}$	$4,157 \cdot 10^{-4}$	$3,785 \cdot 10^{-4}$	$3,345 \cdot 10^{-4}$	$3,090 \cdot 10^{-4}$	$2,805 \cdot 10^{-4}$	$2,484 \cdot 10^{-4}$	$2,112 \cdot 10^{-4}$
25	1,033									
24	1,150	1,150	1,140	1,130	1,129	1,118	1,112	1,105	1,097	1,087
23	1,270	1,260	1,250	1,230	1,220	1,201	1,189	1,175	1,160	1,142
22	1,380	1,370	1,350	1,330	1,310	1,281	1,264	1,245	1,222	1,196
21	1,490	1,470	1,450	1,420	1,390	1,361	1,339	1,313	1,284	1,250
20	1,600	1,580	1,550	1,520	1,480	1,439	1,412	1,382	1,347	1,304
19	1,590	1,680	1,640	1,610	1,570	1,518	1,486	1,450	1,409	1,359
18	1,580	1,780	1,740	1,700	1,650	1,586	1,560	1,519	1,471	1,414
17	1,560	1,760	1,840	1,790	1,740	1,674	1,634	1,589	1,535	1,471
16	1,550	1,740	1,930	1,880	1,820	1,754	1,710	1,659	1,600	1,528
15	1,530	1,720	1,910	1,980	1,910	1,835	1,787	1,731	1,666	1,587
14	1,520	1,700	1,880	2,070	2,000	1,918	1,865	1,805	1,734	1,648
13	1,500	1,680	1,850	2,040	2,090	2,003	1,946	1,881	1,804	1,710
12	1,480	1,650	1,820	2,000	2,190	2,091	2,030	1,959	1,877	1,776
11	1,460	1,620	1,790	1,960	2,140	2,182	2,117	2,041	1,953	1,844
10	1,430	1,590	1,750	1,910	2,090	2,279	2,209	2,128	2,032	1,916
9	1,410	1,560	1,710	1,860	2,030	2,209	2,306	2,219	2,117	1,993
8	1,380	1,510	1,650	1,800	1,950	2,128	2,220	2,318	2,208	2,075
7	1,340	1,470	1,600	1,730	1,870	2,033	2,117	2,208	2,307	2,165
6	1,300	1,410	1,520	1,640	1,770	1,916	1,993	2,076	2,165	2,264
5	1,250	1,340	1,430	1,540	1,640	1,769	1,835	1,906	1,983	2,069
4	1,118	1,250	1,320	1,390	1,470	1,570	1,620	1,675	1,735	1,802
3	1,090	1,120	1,150	1,180	1,220	1,269	1,293	1,320	1,349	1,383

$$M = 3,765 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} = 3 \text{ kg/h}$$

$G \cdot 10^{-3} [\text{m}]$	20	18	16	14	12	10	9	8	7	6
M_1	3,400 $\cdot 10^{-4}$	3,228 $\cdot 10^{-4}$	3,035 $\cdot 10^{-4}$	2,817 $\cdot 10^{-4}$	2,565 $\cdot 10^{-4}$	2,226 $\cdot 10^{-4}$	2,094 $\cdot 10^{-4}$	1,902 $\cdot 10^{-4}$	1,683 $\cdot 10^{-4}$	1,431 $\cdot 10^{-4}$
5	1,033									
24	1,120	1,115	1,110	1,105	1,099	1,091	1,087	1,082	1,076	1,070
23	1,203	1,196	1,186	1,176	1,164	1,149	1,141	1,131	1,120	1,108
22	1,285	1,274	1,261	1,246	1,228	1,207	1,195	1,181	1,164	1,146
21	1,365	1,351	1,334	1,315	1,292	1,264	1,248	1,230	1,209	1,185
20	1,445	1,427	1,407	1,383	1,355	1,322	1,302	1,280	1,254	1,223
19	1,436	1,503	1,479	1,452	1,419	1,380	1,356	1,330	1,299	1,263
18	1,427	1,579	1,552	1,521	1,484	1,438	1,412	1,381	1,346	1,304
17	1,417	1,566	1,626	1,590	1,549	1,498	1,467	1,433	1,393	1,345
16	1,407	1,552	1,700	1,661	1,615	1,558	1,525	1,486	1,441	1,388
15	1,395	1,537	1,681	1,733	1,682	1,620	1,583	1,541	1,491	1,432
14	1,383	1,521	1,661	1,807	1,752	1,684	1,644	1,597	1,543	1,478
13	1,370	1,503	1,640	1,781	1,823	1,750	1,706	1,656	1,596	1,525
12	1,356	1,484	1,615	1,752	1,897	1,818	1,771	1,716	1,652	1,575
11	1,340	1,462	1,588	1,720	1,850	1,890	1,839	1,780	1,711	1,627
10	1,322	1,439	1,558	1,684	1,818	1,955	1,910	1,848	1,773	1,683
9	1,302	1,412	1,525	1,644	1,771	1,910	1,987	1,919	1,839	1,742
8	1,280	1,381	1,486	1,597	1,716	1,847	1,919	1,996	1,910	1,806
7	1,254	1,346	1,441	1,543	1,652	1,773	1,839	1,910	1,938	1,876
6	1,224	1,304	1,388	1,478	1,575	1,683	1,742	1,806	1,876	1,954
5	1,186	1,252	1,322	1,397	1,479	1,570	1,620	1,675	1,735	1,801
4	1,139	1,186	1,236	1,291	1,351	1,419	1,457	1,498	1,544	1,595
3	1,075	1,095	1,116	1,140	1,167	1,198	1,215	1,235	1,256	1,280

$$M = 1,111 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 4 \text{ kg/h}$$

$\epsilon \cdot 10^{-3} [\text{m}]$	20	18	16	14	12	10	9	8	7
M_1	$1,003 \cdot 10^{-3}$	$9,525 \cdot 10^{-4}$	$8,957 \cdot 10^{-4}$	$8,313 \cdot 10^{-4}$	$7,569 \cdot 10^{-4}$	$6,689 \cdot 10^{-4}$	$6,181 \cdot 10^{-4}$	$5,612 \cdot 10^{-4}$	$4,986 \cdot 10^{-4}$
25	1,033								
24	1,272	1,261	1,249	1,234	1,217	1,197	1,186	1,173	1,157
23	1,481	1,461	1,439	1,414	1,384	1,348	1,327	1,303	1,274
22	1,671	1,645	1,615	1,580	1,539	1,489	1,459	1,426	1,386
21	1,850	1,817	1,780	1,737	1,686	1,624	1,587	1,544	1,484
20	2,020	1,982	1,938	1,888	1,828	1,754	1,710	1,659	1,600
19	2,001	2,171	2,092	2,034	1,965	1,881	1,830	1,772	1,703
18	1,982	2,298	2,272	2,176	2,101	2,006	1,949	1,884	1,807
17	1,961	2,271	2,391	2,320	2,235	2,131	2,068	1,995	1,909
16	1,938	2,242	2,539	2,462	2,369	2,255	2,166	2,107	2,013
15	1,914	2,211	2,502	2,605	2,505	2,380	2,306	2,220	2,117
14	1,888	2,178	2,462	2,749	2,641	2,503	2,427	2,334	2,224
13	1,860	2,141	2,418	2,697	2,780	2,637	2,551	2,451	2,333
12	1,828	2,101	2,370	2,641	2,923	2,771	2,678	2,572	2,445
11	1,793	2,056	2,316	2,578	2,852	2,909	2,810	2,696	2,561
10	1,754	2,006	2,255	2,508	2,771	3,053	2,946	2,827	2,682
9	1,710	1,949	2,186	2,427	2,679	2,948	3,094	2,965	2,811
8	1,659	1,884	2,107	2,334	2,571	2,827	2,964	3,111	2,948
7	1,600	1,807	2,013	2,224	2,445	2,682	2,811	2,948	3,095
6	1,528	1,713	1,899	2,089	2,289	2,505	2,622	2,747	2,882
5	1,439	1,596	1,754	1,918	2,091	2,279	2,380	2,489	2,603
4	1,322	1,439	1,558	1,684	1,818	1,966	2,046	2,132	2,225
3	1,154	1,206	1,263	1,324	1,392	1,467	1,509	1,554	1,604

$$M = 1,388 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 5 \text{ kg/h}$$

$G \cdot 10^3 [m]$	20	18	16	14	12	10	9	8	7
M_1	$1,254 \cdot 10^{-3}$	$1,190 \cdot 10^{-3}$	$1,119 \cdot 10^{-3}$	$1,039 \cdot 10^{-3}$	$9,461 \cdot 10^{-4}$	$8,361 \cdot 10^{-4}$	$7,726 \cdot 10^{-4}$	$7,015 \cdot 10^{-4}$	$6,210 \cdot 10^{-4}$
25	1,000								
24	1,320	1,312	1,297	1,279	1,259	1,235	1,221	1,205	1,186
23	1,570	1,550	1,524	1,494	1,459	1,416	1,390	1,361	1,320
22	1,790	1,765	1,730	1,689	1,641	1,583	1,548	1,508	1,460
21	2,000	1,965	1,922	1,872	1,813	1,740	1,697	1,647	1,580
20	2,199	2,155	2,105	2,046	1,977	1,892	1,840	1,781	1,710
19	2,177	2,338	2,281	2,215	2,136	2,038	1,980	1,913	1,830
18	2,150	2,516	2,453	2,379	2,291	2,183	2,117	2,040	1,950
17	2,130	2,486	2,623	2,542	2,445	2,325	2,253	2,170	2,070
16	2,105	2,453	2,792	2,704	2,598	2,468	2,389	2,290	2,190
15	2,070	2,418	2,749	2,866	2,752	2,611	2,526	2,420	2,310
14	2,040	2,379	2,704	3,029	2,907	2,756	2,664	2,550	2,430
13	2,010	2,337	2,653	2,971	3,065	2,903	2,805	2,690	2,550
12	1,977	2,291	2,598	2,907	3,227	3,054	2,950	2,820	2,680
11	1,937	2,240	2,537	2,836	3,146	3,211	3,099	2,970	2,810
10	1,892	2,183	2,468	2,756	3,054	3,374	3,255	3,110	2,950
9	1,840	2,117	2,389	2,664	2,950	3,255	3,420	3,270	3,100
8	1,781	2,042	2,298	2,558	2,828	3,118	3,274	3,439	3,250
7	1,712	1,953	2,190	2,432	2,684	2,954	3,100	3,250	3,420
6	1,629	1,844	2,059	2,278	2,507	2,753	2,886	3,020	3,180
5	1,524	1,707	1,892	2,081	2,280	2,495	2,611	2,735	2,860
4	1,385	1,523	1,664	1,811	1,966	2,136	2,228	2,320	2,430
3	1,132	1,246	1,314	1,387	1,467	1,556	1,606	1,650	1,710

$$12 k = 1,346 \cdot 10^{12}$$

$$\dot{M} = 1,666 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 6 \text{ kg/h}$$

$G \cdot 10^4 [\text{m}]$	20	18	16	14	12	10	9	8	7
M_r	1,505 $\cdot 10^{-3}$	1,429 $\cdot 10^{-3}$	1,344 $\cdot 10^{-3}$	1,246 $\cdot 10^{-3}$	1,135 $\cdot 10^{-3}$	1,003 $\cdot 10^{-3}$	9,271 $\cdot 10^{-4}$	8,419 $\cdot 10^{-4}$	7,404 $\cdot 10^{-4}$
5	1,033								
24	1,376	1,361	1,344	1,324	1,300	1,272	1,255	1,236	1,215
23	1,660	1,634	1,605	1,570	1,530	1,481	1,452	1,418	1,379
22	1,913	1,878	1,838	1,792	1,738	1,671	1,632	1,586	1,533
21	2,145	2,103	2,055	1,998	1,932	1,850	1,801	1,744	1,678
20	2,364	2,315	2,259	2,194	2,116	2,020	1,963	1,896	1,818
19	2,540	2,519	2,456	2,382	2,294	2,185	2,119	2,044	1,954
18	2,715	2,718	2,648	2,565	2,467	2,346	2,273	2,188	2,089
17	2,888	2,884	2,836	2,746	2,638	2,505	2,425	2,332	2,222
16	2,259	2,647	3,023	2,926	2,809	2,664	2,576	2,475	2,355
15	2,228	2,603	2,976	3,105	2,979	2,823	2,728	2,618	2,488
14	2,194	2,565	2,926	3,286	3,151	2,983	2,882	2,764	2,624
13	2,157	2,519	2,870	3,222	3,326	3,147	3,038	2,912	2,762
12	2,115	2,467	2,809	3,151	3,505	3,314	3,198	3,064	2,904
11	2,071	2,410	2,741	3,072	3,415	3,487	3,364	3,220	3,050
10	2,020	2,346	2,664	2,983	3,314	3,667	3,536	3,384	3,203
9	1,963	2,273	2,576	2,882	3,198	3,536	3,717	3,556	3,364
8	1,896	2,189	2,475	2,764	3,064	3,384	3,555	3,739	3,535
7	1,818	2,089	2,355	2,624	2,903	3,203	3,364	3,535	3,720
6	1,723	1,967	2,208	2,452	2,707	2,980	3,128	3,285	3,453
5	1,604	1,813	2,020	2,232	2,454	2,693	2,823	2,960	3,109
4	1,445	1,604	1,764	1,929	2,105	2,294	2,397	2,507	2,626
3	1,209	1,285	1,363	1,443	1,539	1,641	1,698	1,758	1,825

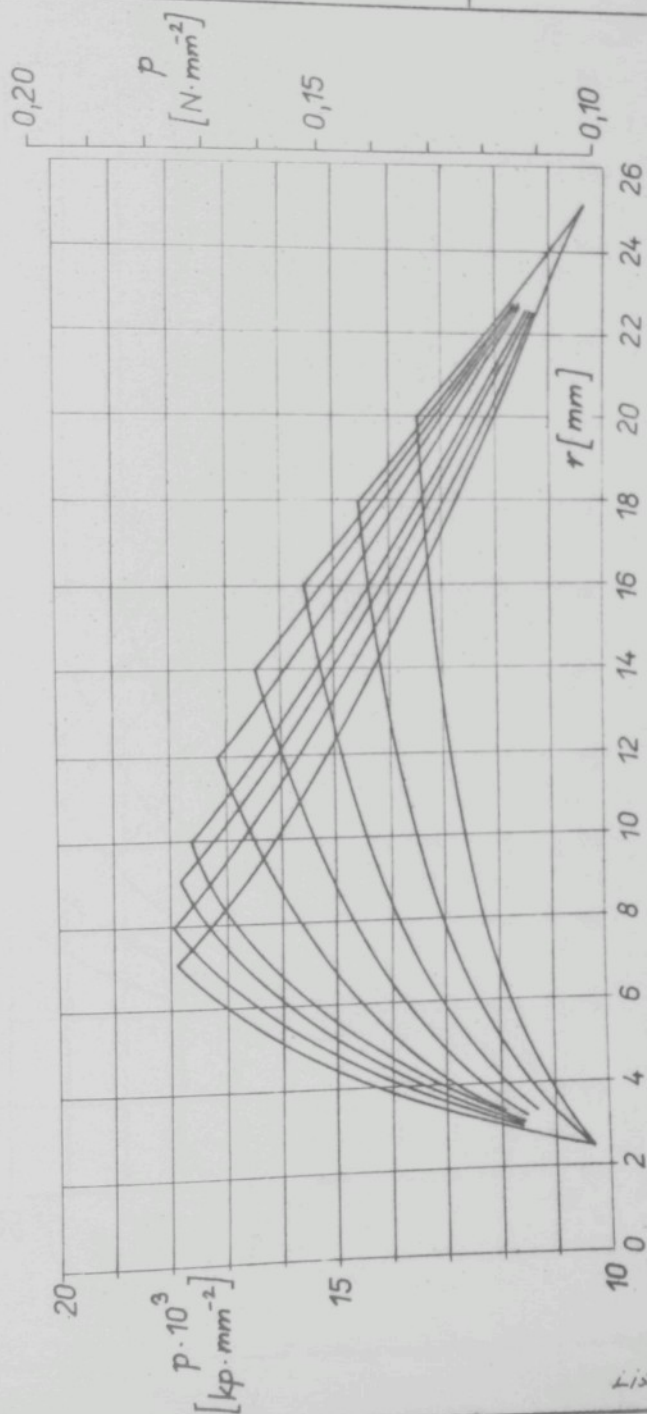
$$M = 1,944 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 7 \text{ kg/h}$$

$\frac{M}{r}$	20	18	16	14	12	10	9	8	7
M	$1,944 \cdot 10^{-3}$	$1,667 \cdot 10^{-3}$	$1,567 \cdot 10^{-3}$	$1,454 \cdot 10^{-3}$	$1,324 \cdot 10^{-3}$	$1,170 \cdot 10^{-3}$	$1,081 \cdot 10^{-3}$	$9,822 \cdot 10^{-4}$	$8,694 \cdot 10^{-4}$
25	1,033								
24	1,425	1,408	1,388	1,366	1,339	1,307	1,289	1,267	1,243
23	1,743	1,714	1,681	1,643	1,598	1,543	1,510	1,473	1,429
22	2,022	1,984	1,940	1,889	1,829	1,755	1,711	1,660	1,601
21	2,278	2,232	2,178	2,117	2,043	1,953	1,899	1,836	1,763
20	2,518	2,465	2,403	2,332	2,246	2,141	2,078	2,004	1,918
19	2,492	2,688	2,619	2,538	2,441	2,322	2,250	2,167	2,069
18	2,465	2,905	2,828	2,739	2,632	2,499	2,419	2,326	2,216
17	2,435		2,834	2,936	2,819	2,673	2,585	2,483	2,362
16	2,403	2,828	3,238	3,132	3,004	2,846	2,751	2,640	2,508
15	2,369	2,785	3,187	3,327	3,190	3,020	2,917	2,797	2,654
14	2,332	2,739	3,132	3,525	3,378	3,195	3,084	2,955	2,802
13	2,291	2,688	3,071	3,455	3,568	3,373	3,254	3,117	2,953
12	2,246	2,631	3,005	3,377	3,762	3,555	3,429	3,282	3,108
11	2,197	2,569	2,930	3,291	3,665	3,743	3,609	3,453	3,268
10	2,141	2,449	2,846	3,194	3,554	3,938	3,769	3,631	3,434
9	2,078	2,419	2,751	3,084	3,429	3,796	3,993	3,818	3,609
8	2,004	2,326	2,640	2,955	3,282	3,631	3,818	4,017	3,795
7	1,918	2,216	2,508	2,802	3,108	3,434	3,609	3,795	3,996
6	1,813	2,082	2,347	2,615	2,893	3,192	3,352	3,522	3,706
5	1,681	1,912	2,141	2,374	2,617	2,879	3,020	3,169	3,331
4	1,503	1,680	1,858	2,041	2,234	2,442	2,555	2,675	2,805
3	1,236	1,322	1,411	1,506	1,609	1,722	1,785	1,851	1,925

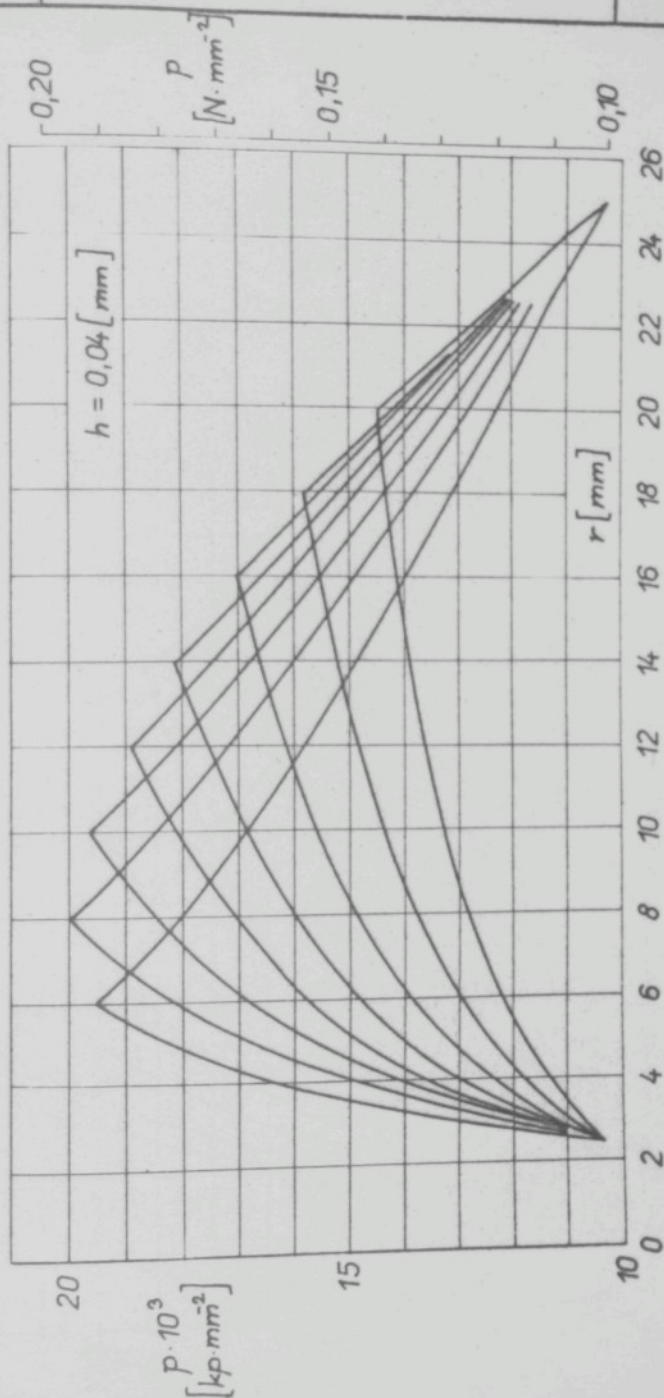
$$M = 2,777 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 10 \text{ kg/h}$$

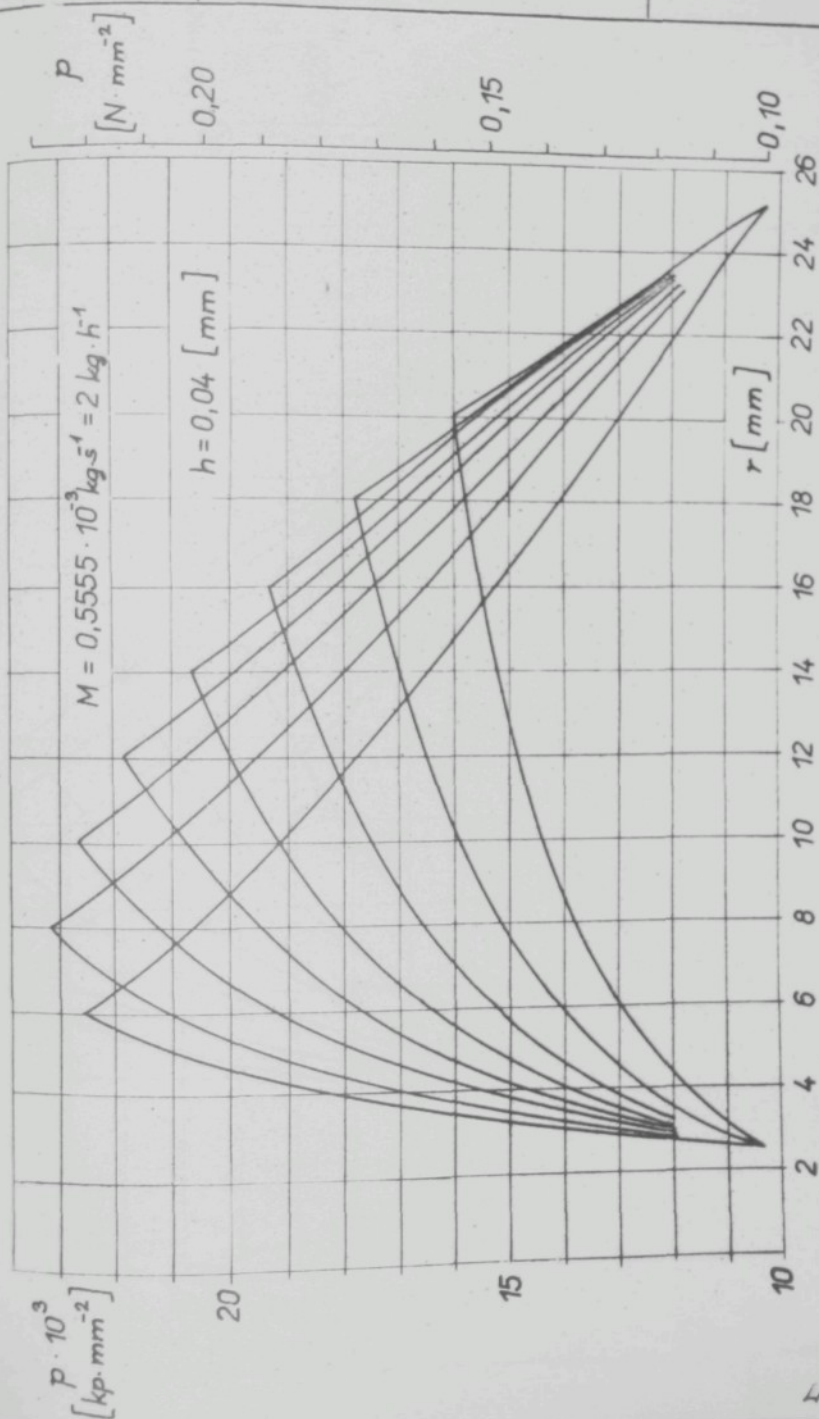
$r \cdot 10^{-3} [\text{m}]$	20	18	16	14	12	10	9	8	7
M_1	$2,508 \cdot 10^{-3}$	$2,381 \cdot 10^{-3}$	$2,239 \cdot 10^{-3}$	$2,078 \cdot 10^{-3}$	$1,892 \cdot 10^{-3}$	$1,672 \cdot 10^{-3}$	$1,545 \cdot 10^{-3}$	$1,403 \cdot 10^{-3}$	$1,242 \cdot 10^{-3}$
25	1,033								
24	1,563	1,541	1,515	1,486	1,451	1,409	1,384	1,356	1,323
23	1,970	1,934	1,892	1,844	1,786	1,716	1,673	1,625	1,569
22	2,320	2,273	2,218	2,155	2,079	1,986	1,930	1,866	1,790
21	2,637	2,580	2,515	2,438	2,347	2,235	2,167	2,088	1,996
20	2,933	2,867	2,792	2,704	2,599	2,468	2,389	2,298	2,190
19	2,901	3,141	3,056	2,957	2,839	2,692	2,603	2,500	2,378
18	2,867	3,406	3,312	3,203	3,072	2,909	2,811	2,697	2,561
17	2,831	3,361	3,563	3,443	3,300	3,122	3,015	2,890	2,742
16	2,792	3,312	3,811	3,681	3,526	3,334	3,217	3,082	2,920
15	2,750	3,260	3,749	3,919	3,752	3,545	3,420	3,274	3,100
14	2,704	3,203	3,681	4,158	3,980	3,758	3,624	3,467	3,281
13	2,653	3,140	3,608	4,073	4,211	3,974	3,830	3,663	3,465
12	2,598	3,072	3,527	3,980	4,446	4,194	4,042	3,864	3,653
11	2,537	2,995	3,436	3,875	4,328	4,422	4,260	4,071	3,847
10	2,468	2,909	3,334	3,758	4,194	4,658	4,487	4,287	4,049
9	2,389	2,811	3,217	3,623	4,042	4,487	4,725	4,513	4,261
8	2,298	2,697	3,082	3,467	3,864	4,287	4,513	4,753	4,486
7	2,190	2,561	2,920	3,281	3,652	4,048	4,261	4,486	4,728
6	2,059	2,395	2,722	3,051	3,392	3,754	3,949	4,155	4,378
5	1,892	2,183	2,468	2,756	3,055	3,374	3,545	3,727	3,924
4	1,664	1,890	2,115	2,343	2,583	2,839	2,978	3,125	3,284
3	1,314	1,428	1,545	1,668	1,800	1,944	2,023	2,107	2,199

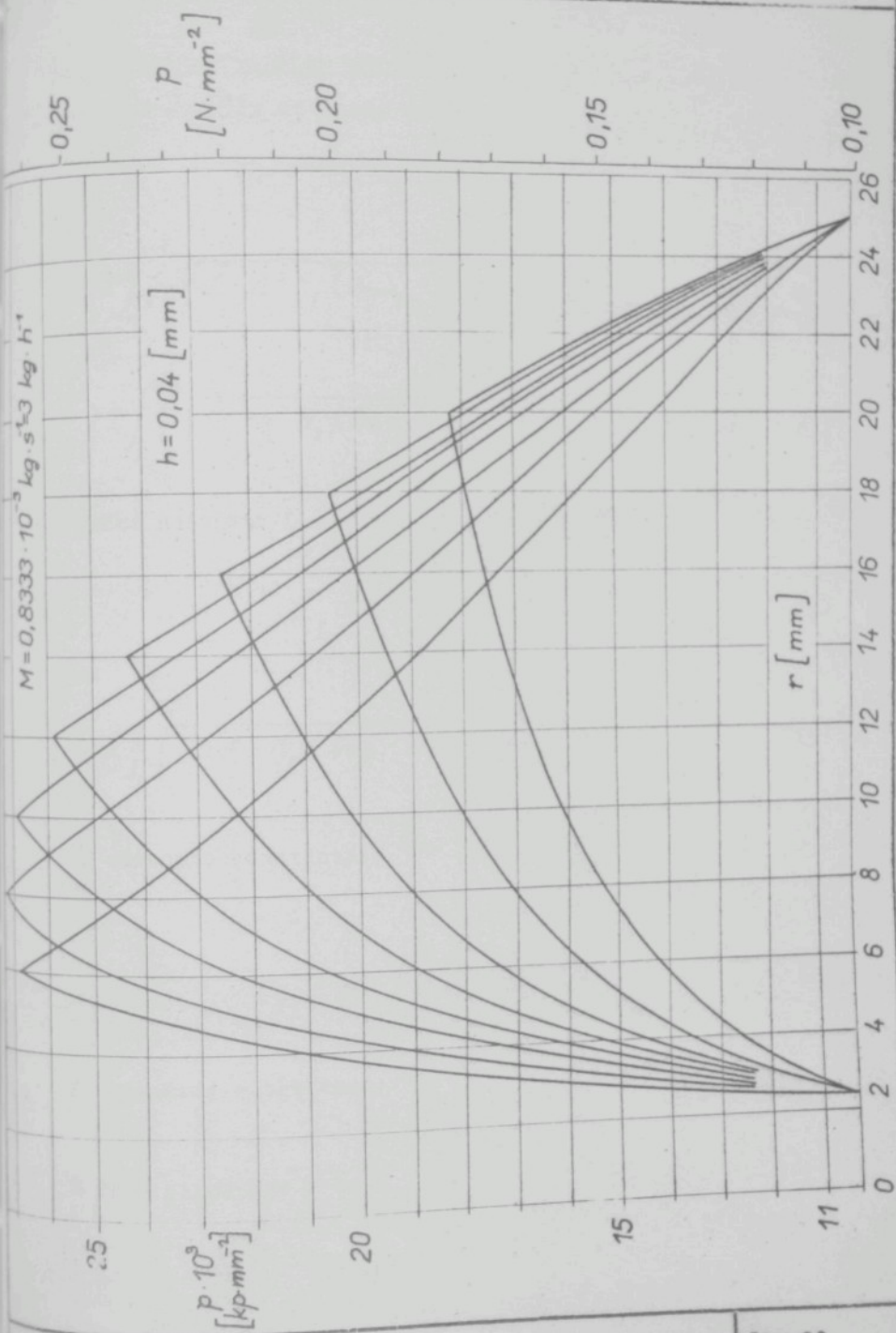
$$M = 0,2777 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \text{ hod}^{-1}; \quad h = 0,04 \text{ [mm]}$$



$$M = 0,3765 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 1,355 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$







Matematické řešení nosnosti aerostatického kuželového ložiska:
Pro nosnost byly odvozeny tyto vztahy:

$$L = L_1 + L_2 \quad (1)$$

kde:

$$L_1 = 2\pi \int_{r_i}^{r_e} \left[\sqrt{12 \cdot k \cdot M_1 (\ln r - \ln r_i) + p_a^2} - p_a \right] \cdot r \cdot dr \quad (2)$$

$$L_2 = 2\pi \int_{r_e}^{r_a} \left[\sqrt{12 \cdot k \cdot M_2 (\ln r_a - \ln r) + p_a^2} - p_a \right] \cdot r \cdot dr \quad (3)$$

Výpočet nosnosti L_1 je proveden jako rozdíl:

$$L_1 = L' - L'' \quad (4)$$

kde:

$$L' = 2\pi \int_{r_i}^{r_e} \sqrt{12 \cdot k \cdot M_1 (\ln r - \ln r_i) + p_a^2} \cdot r \cdot dr \quad (5)$$

Po zavedení konstanty: $a = 12 \cdot k \cdot M_1$,
 $b = p_a^2 - 12 \cdot k \cdot M_1 \cdot \ln r_i$,

bude:
$$L' = 2\pi \int_{r_i}^{r_e} \sqrt{a \cdot \ln r + b} \cdot r \cdot dr \quad (6)$$

Po zavedení substituce: $a \cdot \ln r + b = \frac{1}{2} \cdot a \cdot v^2$,
 $\frac{dr}{r} = v \cdot dv$

Z toho plyne pro r :

$$\ln r = -\frac{b}{a} + \frac{v^2}{2} \quad ; \quad r = e^{-\frac{b}{a}} \cdot e^{\frac{v^2}{2}}$$

A pro v plyne:

$$\frac{v^2}{2} = \frac{b}{a} + \ln x ; \quad v = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{b}{a} + \ln x \right)} .$$

Po dosazení do (6)

$$L_1' = 2\pi \int_{\sqrt{2 \cdot \left(\frac{b}{a} + \ln x_i \right)}}^{\sqrt{2 \cdot \left(\frac{b}{a} + \ln x_e \right)}} \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{2}} \cdot v \cdot x^2 \cdot v \cdot dv = 2\pi \int_A^B \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{2}} \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{2b}{a}} \cdot e^{v^2} \cdot dv =$$

$$\text{kde: } A = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{b}{a} + \ln x_e \right)} ; \quad B = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{b}{a} + \ln x_i \right)} \\ = T \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{a} \cdot e^{-\frac{2b}{a}} \int_A^B v^2 \cdot e^{v^2} \cdot dv .$$

Dále per partes:

$$v = x ; \quad v \cdot e^{v^2} = y' , \\ 1 = x' ; \quad \frac{1}{2} e^{v^2} = y .$$

Potom:

$$\int_A^B \underbrace{v}_{x'} \cdot \underbrace{v \cdot e^{v^2}}_{y'} \cdot dv = \left[v \cdot \frac{e^{v^2}}{2} \right]_A^B - \frac{1}{2} \int_A^B e^{v^2} \cdot dv =$$

Po dosazení bude:

$$L_1' = T \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{a} \cdot e^{-\frac{2b}{a}} \left\{ \left[v \cdot \frac{e^{v^2}}{2} \right]_A^B - \frac{1}{2} \int_A^B e^{v^2} \cdot dv \right\} ,$$

přičemž integrál $-\frac{1}{2} \int_A^B e^{v^2} \cdot dv$ - se dá řešit řadou
nebo numericky .

$$L_1^* = 2 \cdot \pi \cdot p_a \int_{x_i}^{x_e} x \cdot dx = T \cdot p_a (x_e^2 - x_i^2)$$

Nosnost L_1 :

$$L_1 = L_1' + L_1'' = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{a \cdot e^{-\frac{2b}{a}}} \left\{ \left[v \cdot \frac{e^{v^2}}{2} \right]_A^B - \frac{1}{2} \int_A^B e^{v^2} dv \right\} - \pi \cdot p_a (r_c^2 - r_i^2)$$

Výpočet nosnosti L_2 :

Integrál (3) se rozdělí na dva: $L_2 = L_2' - L_2''$,

$$L_2'' = 2\pi \cdot p_a \cdot \int_{r_e}^{r_a} r \, dr = \pi \cdot p_a \cdot (r_a^2 - r_e^2) ,$$

$$L_2' = 2\pi \int_{r_e}^{r_a} \sqrt{12 \cdot k \cdot M_2 (\ln r_a - \ln r) + p_a^2} \cdot r \cdot dr =$$

Po zavedení konstanty: $a = 12 \cdot k \cdot M_2$,

$$b = 12 \cdot k \cdot M_2 \cdot \ln r_a + p_a^2 ,$$

$$L_2' = 2\pi \int_{r_e}^{r_a} \sqrt{b - a \ln r} \cdot r \cdot dr = \quad (7)$$

Po zavedení substituce: $b - a \cdot \ln r = \frac{1}{4} \cdot a \cdot v^2$

$$\text{Derivací: } -a \cdot \frac{dr}{r} = a \cdot \frac{v}{2} \cdot dv$$

$$\text{Z toho: } dr = -\frac{1}{2} r \cdot v \cdot dv$$

Z toho plyne pro r, v :

$$\ln r = \frac{-\frac{1}{4} \cdot a \cdot v^2 + b}{a} = \frac{b}{a} - \frac{v^2}{4} ; r = e^{\left(\frac{b}{a} - \frac{v^2}{4}\right)} ; v = 2 \sqrt{\frac{b}{a} - \ln r}$$

Po dosazení do (7):

$$L_2' = -2\pi \cdot \frac{1}{4} \sqrt{a} \int_{\frac{2\sqrt{\frac{b}{a} - \ln \kappa_e}}{2}}^{\frac{2\sqrt{\frac{b}{a} - \ln \kappa_a}}{2}} v^2 \cdot v^2 \cdot dv = -\frac{\pi \cdot \sqrt{a}}{2} \int_A^B v^2 \cdot e^{\left(\frac{2b}{a} - \frac{v^2}{2}\right)} \cdot dv =$$

$$\text{Kde: } A = 2 \sqrt{\frac{b}{a} - \ln \kappa_e} ; B = 2 \sqrt{\frac{b}{a} - \ln \kappa_a}$$

$$L_2' = \frac{\pi \cdot \sqrt{a}}{2} e^{\frac{2 \cdot b}{a}} \int_B^A v^2 \cdot e^{-\frac{v^2}{2}} \cdot dv$$

$$\text{kde: } \int_B^A v^2 \cdot e^{-\frac{v^2}{2}} \cdot dv = \int_B^A v \cdot v \cdot e^{-\frac{v^2}{2}} \cdot dv$$

Tento integrál je řešen per partes :

$$\begin{aligned} v &= x & v \cdot e^{-\frac{v^2}{2}} &= y' \\ 1 &= x' & -e^{-\frac{v^2}{2}} &= y \end{aligned}$$

$$\text{Čili: } = - \left[v \cdot e^{-\frac{v^2}{2}} \right]_A^B + \int_A^B e^{-\frac{v^2}{2}} \cdot dv ,$$

a lze psát:

$$A \cdot e^{-\frac{A^2}{2}} - B \cdot e^{-\frac{B^2}{2}} + 2\pi \left[\phi(B) - \phi(A) \right] \quad (8)$$

$$\text{kde: } \phi(B) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^B e^{-\frac{v^2}{2}} \cdot dv ; \phi(A) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^A e^{-\frac{v^2}{2}} \cdot dv \quad (9)$$

A jelikož platí:

$$\int_A^B = \int_{-\infty}^B - \int_{-\infty}^A$$

po dosazení bude:

$$L_2' = \frac{\pi \cdot \sqrt{2}}{2} \cdot e^{\frac{2b}{a}} \cdot \left[B \cdot e^{-\frac{B^2}{2}} - A \cdot e^{-\frac{A^2}{2}} + 2\pi (\phi(A) - \phi(B)) \right] \quad (10)$$

$$L_2 = L_2' - L_2''$$

$$L_2 = \frac{\pi \cdot \sqrt{2}}{2} e^{\frac{2b}{a}} \left[B \cdot e^{-\frac{B^2}{2}} - A \cdot e^{-\frac{A^2}{2}} + 2\pi (\phi(A) - \phi(B)) \right] - \pi \cdot \rho_a (\kappa_a^2 - \kappa_e^2) \quad (11)$$

Při čemž $\phi(A)$; $\phi(B)$ je známý integrál Laplace-Gaussovy funkce pravděpodobnosti a jeho velikosti pro dané hodnoty v se najdou v matematických tabulkách.

Novost celého ložiska:

$$\begin{aligned} L = L_1 + L_2 = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{a} \cdot e^{-\frac{2b}{a}} & \left\{ \left[v \cdot \frac{e^{v^2}}{2} \right]_A^B - \frac{1}{2} \int_A^B e^{v^2} dv \right\} + \\ & + \frac{\pi \cdot \sqrt{2}}{2} \cdot e^{\frac{2b}{a}} \left[B \cdot e^{-\frac{B^2}{2}} - A \cdot e^{-\frac{A^2}{2}} + 2\pi (\phi(A) - \phi(B)) \right] = \\ & - \pi \cdot \rho_a \left[(\kappa_e^2 - \kappa_\lambda^2) + (\kappa_a^2 - \kappa_e^2) \right] \quad (12) \end{aligned}$$

PŘÍLOHA č.19

Výpočet nosnosti aerostatického kuželového ložiska

podle vzorce:

$$L = 2\pi \left\{ \int_{r_e}^{r_a} \left[\sqrt{12 \cdot k M_1 \ln \frac{r_a}{r} + p_a^2} - p_a \right] r dr + \int_r^{r_e} \left[\sqrt{12 \cdot k M_2 \ln \frac{r_e}{r} + p_a^2} - p_a \right] r dr \right\} \quad (1)$$

je proveden tak, že vhodnou substitucí přijdeme k výrazu:

$$L = 2\pi \left\{ \underbrace{\frac{p_a^2}{2} (r_i^2 - r_a^2)}_A + \underbrace{e^{2 \ln r_i + \frac{2 p_a^2}{12 k M_1}} \sqrt{12 \cdot k M_1}}_B \underbrace{\int_{C_1}^{C_2} \sqrt{x} \cdot e^{-2x} dx}_C + \right. \\ \left. + \underbrace{e^{2 \ln r_e - \frac{2 p_a^2}{12 k M_2}} \sqrt{12 \cdot k M_2}}_D \underbrace{\int_{E_1}^{E_2} \sqrt{x} \cdot e^{2x} dx}_E \right\} \quad (2)$$

$$\text{Kde } C_1 = \frac{p_a^2}{12 k M_2}; \quad C_2 = C_1 - \ln \frac{r_e}{r_a}; \quad l_1 = \frac{p_a^2}{12 k M_1}; \quad l_2 = l_1 + \ln \frac{r_a}{r_e}$$

$$\text{Přitom ve vzorci (1) nahrazujeme } M_2 = M \frac{\ln \frac{r_e}{r_a}}{\ln \frac{r_a}{r_e}}; \quad M_1 = M \frac{\ln \frac{r_a}{r_e}}{\ln \frac{r_a}{r_e}}$$

Integrály ve vzorci (2) jsou počítány tak, že integrovanou funkci nahrazujeme Taylorovou řadou, v ní bereme tolik členů řady, aby byla zaručena přesnost čtyř cifer výpočtu.

Při výpočtu byly získány následující mezihodnoty a konečně hodnota nosnosti L (A = - 0,77)

r_e	B	C	D	E	L
3	6.718	0.1403	$2.3 \cdot 10^{-1}$	2.334	1.43
5	5.309	0.1684	$1.3 \cdot 10^{-2}$	14.12	1.97
6	5.200	0.1585	$9.5 \cdot 10^{-3}$	28.92	2.08
7	5.162	0.1402	$6.2 \cdot 10^{-3}$	59.11	2.04
7.5	5.154	0.1293	$4.8 \cdot 10^{-3}$	86.50	1.99
8	5.152	0.1176	$3.5 \cdot 10^{-3}$	130.8	1.91
9	5.158	0.0923	$1.5 \cdot 10^{-3}$	358.7	1.69
10	5.172	0.0656	$3.8 \cdot 10^{-4}$	1667	1.37
11.5	5.200	0.0251	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$1.65 \cdot 10^6$	0.663

Tabulka vypočtených nosností kuželového ložiska
tlak vzduchu před dyzou p_0 v (kg/metr čtverečný)
 $p_0 = 17,00$ milimetru
 $p_0 = 0,60$ milimetru

$p_0 = 20000$ M(K/H) L(KG)	$p_0 = 25000$ M(K/H) L(KG)	$p_0 = 30000$ M(K/H) L(KG)	$p_0 = 35000$ M(K/H) L(KG)	$p_0 = 40000$ M(K/H) L(KG)	$p_0 = 45000$ M(K/H) L(KG)	$p_0 = 50000$ M(K/H) L(KG)
			H = 0,010 milimetru			
0,03 1,988	0,05 3,095	0,08 4,229	0,11 5,378	0,15 6,536	0,19 7,698	0,24 8,861
			H = 0,015 milimetru			
0,10 1,946	0,17 2,991	0,26 4,030	0,35 5,048	0,46 6,040	0,57 7,000	0,69 7,928
			H = 0,020 milimetru			
0,21 1,777	0,34 2,617	0,48 3,390	0,62 4,100	0,77 4,754	0,91 5,359	1,05 5,920
			H = 0,025 milimetru			
0,32 1,448	0,48 2,013	0,63 2,502	0,77 2,932	0,91 3,319	1,04 3,670	1,17 3,992
			H = 0,030 milimetru			
0,39 1,082	0,55 1,439	0,69 1,739	0,82 2,001	0,94 2,234	1,06 2,445	1,17 2,639
			H = 0,035 milimetru			
0,43 0,782	0,58 1,011	0,71 1,202	0,82 1,367	0,93 1,514	1,03 1,647	1,12 1,769
			H = 0,040 milimetru			
0,45 0,565	0,59 0,718	0,70 0,844	0,81 0,953	0,90 1,050	0,99 1,138	1,07 1,219
			H = 0,045 milimetru			
0,46 0,415	0,59 0,521	0,70 0,608	0,79 0,683	0,88 0,750	0,96 0,810	1,03 0,866
			H = 0,050 milimetru			
0,47 0,311	0,53 0,387	0,69 0,449	0,78 0,503	0,86 0,551	0,93 0,594	1,00 0,634
			H = 0,055 milimetru			
0,47 0,237	0,59 0,294	0,68 0,340	0,77 0,380	0,84 0,415	0,91 0,447	0,98 0,476
			H = 0,060 milimetru			
0,47 0,185	0,58 0,228	0,66 0,263	0,76 0,293	0,83 0,320	0,90 0,344	0,96 0,366

TABULKA VÝPOČTENÝCH NOSNOSTÍ KUŽELOVÉHO LOŽISKA
TLAK VZDUCHU PŘED DYŽOU PO V (KG/METR ČTVERECNÝ)
RA = 4,00 MILIMETRU
D = 0,60 MILIMETRU

PO= 20000 N(K/H) L(KG)	PO= 25000 N(K/H) L(KG)	PO= 30000 N(K/H) L(KG)	PO= 35000 N(K/H) L(KG)	PO= 40000 N(K/H) L(KG)	PO= 45000 N(K/H) L(KG)	PO= 50000 N(K/H) L(KG)
H= 0,010 MILIMETRU						
H= 0,015 MILIMETRU						
0,10 2,779	0,17 4,314	0,26 5,873	0,36 7,440	0,47 9,004	0,60 10,558	0,74 12,096
H= 0,020 MILIMETRU						
0,22 2,697	0,38 4,114	0,56 5,500	0,75 6,839	0,97 8,123	1,19 9,351	1,42 10,522
H= 0,025 MILIMETRU						
0,39 2,475	0,62 3,632	0,87 4,692	1,13 5,662	1,39 6,553	1,64 7,376	1,89 8,139
H= 0,030 MILIMETRU						
0,55 2,102	0,83 2,943	1,10 3,673	1,35 4,320	1,60 4,901	1,84 5,430	2,07 5,915
H= 0,035 MILIMETRU						
0,67 1,678	0,95 2,259	1,21 2,750	1,45 3,179	1,67 3,562	1,89 3,909	2,09 4,226
H= 0,040 MILIMETRU						
0,74 1,297	1,01 1,698	1,25 2,034	1,47 2,325	1,67 2,585	1,86 2,819	2,04 3,035
H= 0,045 MILIMETRU						
0,78 0,994	1,04 1,277	1,26 1,512	1,46 1,716	1,64 1,897	1,81 2,061	1,97 2,212
H= 0,050 MILIMETRU						
0,81 0,765	1,05 0,970	1,25 1,140	1,43 1,287	1,60 1,417	1,75 1,535	1,90 1,643
H= 0,055 MILIMETRU						
0,82 0,596	1,05 0,748	1,24 0,874	1,41 0,982	1,57 1,079	1,71 1,166	1,84 1,246
H= 0,060 MILIMETRU						
0,83 0,470	1,05 0,586	1,23 0,681	1,39 0,764	1,54 0,837	1,67 0,903	1,79 0,963

TABULKA VÝPOČTENÝCH NOSNOSTÍ KULEVÉHO LOŽISKA

TLAK VZDUCHU PŘED DYZOU PO V (KG/METR ČTVERECNÝ)

RA= 12,00 MILIMETRU

D= 0,80 MILIMETRU

PO= 20000 M(K/H) L(KG)	PO= 25000 M(K/H) L(KG)	PO= 30000 M(K/H) L(KG)	PO= 35000 M(K/H) L(KG)	PO= 40000 M(K/H) L(KG)	PO= 45000 M(K/H) L(KG)	PO= 50000 M(K/H) L(KG)
0,03 1,990	0,05 3,103	0,08 4,244	0,11 5,403	0,15 6,575	0,20 7,756	0,25 8,942
0,10 1,977	0,18 3,068	0,27 4,175	0,38 5,287	0,50 6,395	0,63 7,494	0,78 8,580
0,23 1,913	0,39 2,913	0,58 3,887	0,78 4,824	1,00 5,721	1,23 6,575	1,46 7,368
0,40 1,743	0,64 2,548	0,90 3,281	1,16 3,950	1,41 4,562	1,67 5,127	1,92 5,649
0,56 1,466	0,84 2,043	1,11 2,542	1,37 2,984	1,62 3,380	1,85 3,740	2,08 4,071
0,60 1,160	0,96 1,555	1,21 1,889	1,45 2,180	1,67 2,440	1,88 2,675	2,09 2,891
0,75 0,890	1,02 1,162	1,25 1,390	1,47 1,587	1,67 1,762	1,85 1,921	2,03 2,067
0,79 0,679	1,04 0,871	1,26 1,030	1,45 1,167	1,63 1,290	1,80 1,401	1,96 1,502
0,81 0,521	1,05 0,660	1,25 0,774	1,43 0,873	1,59 0,961	1,75 1,041	1,89 1,114
0,82 0,405	1,05 0,508	1,24 0,593	1,41 0,666	1,56 0,731	1,70 0,790	1,83 0,844
0,83 0,319	1,05 0,397	1,23 0,462	1,39 0,517	1,53 0,566	1,66 0,611	1,78 0,652

Příloha č. 21

$$L = \pi r_b^2 \sqrt{12 k M \ln \frac{r_a}{r_b} + p_a^2} + \int_{r_b}^{r_a} 2 \pi r \sqrt{12 k M \ln \frac{r_a}{r} + p_a^2} \cdot dr -$$

$$- \pi r_a^2 \cdot p_a$$

$$p_a = 10\,330 \text{ kp/m}^2, \quad r_a = 15 \text{ mm} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad \pi = 3,14159$$

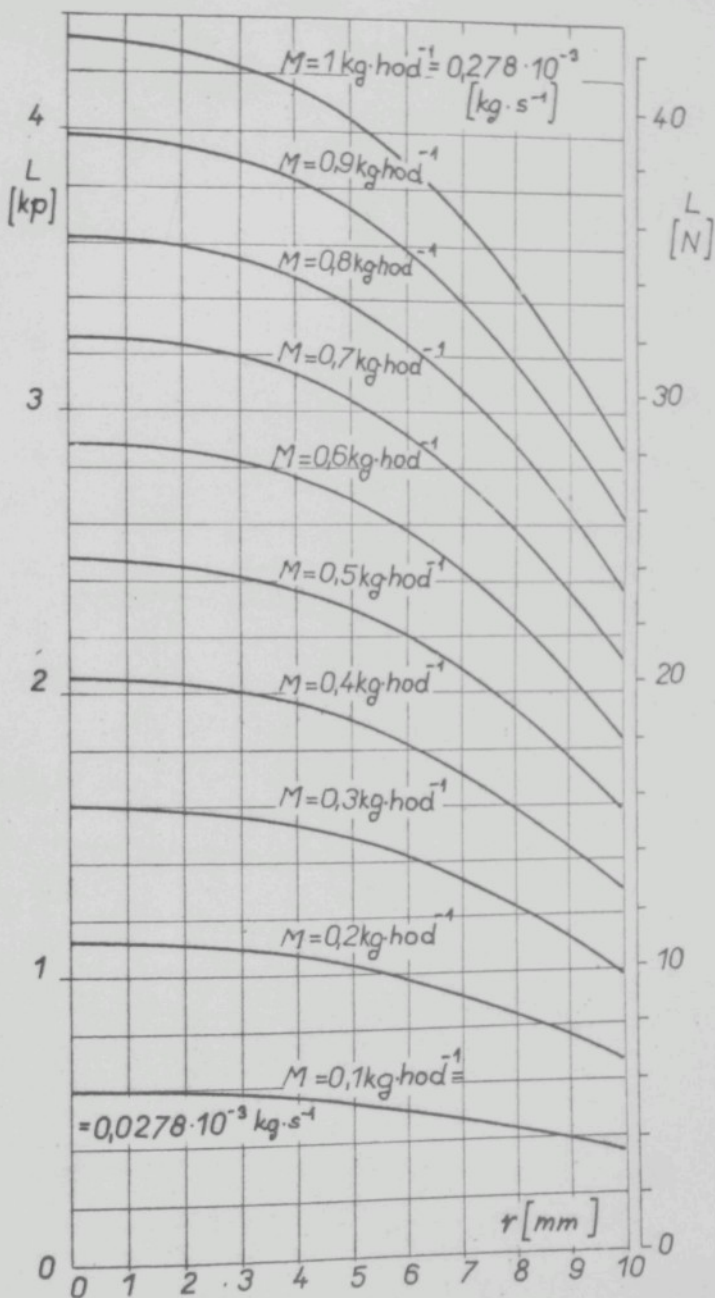
$$\text{přesnost ... } \varepsilon = 10^{-4}, \quad 12 k = 1,346589 \cdot 10^{12}, \quad h = 0,04 \text{ mm}$$

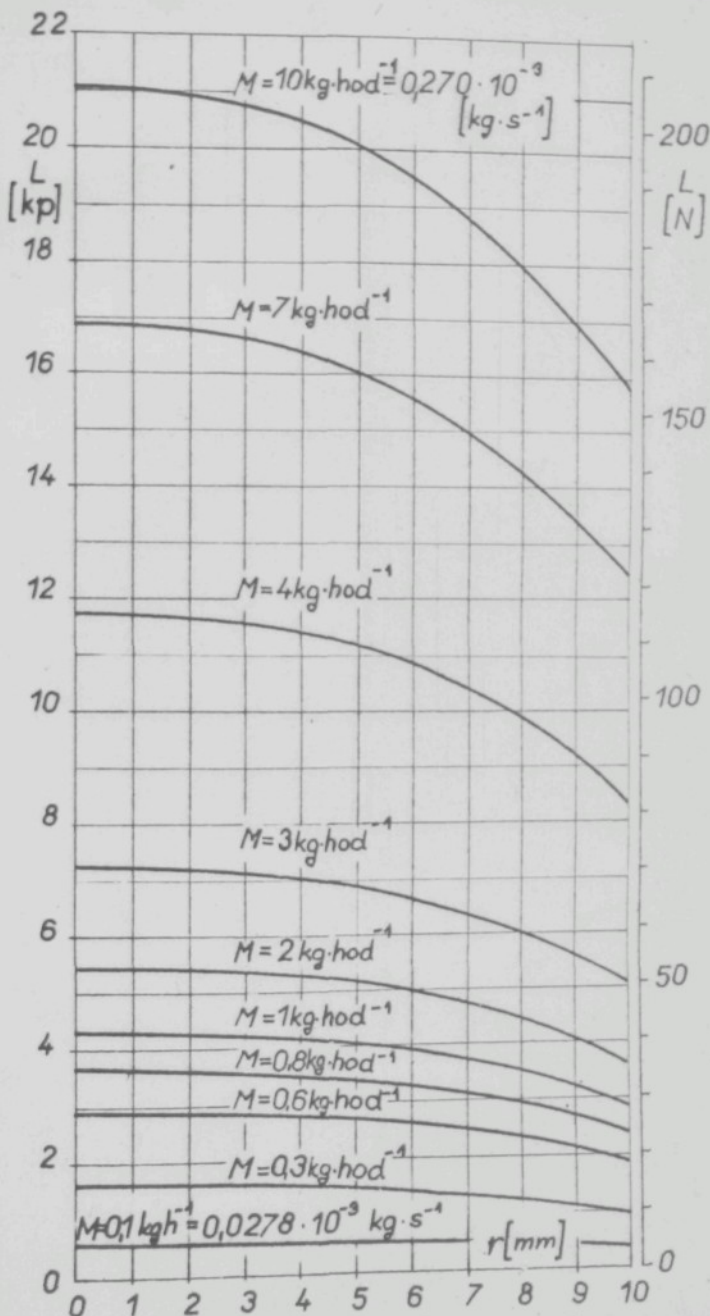
M	M	r [m]					
kg/s	kg/h	1.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁵	3.10 ⁻⁵	6.10 ⁻⁵	8.10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
		L [kp]					
2,777.10 ⁻⁵	0,1	0,59314	0,59314	0,59314	0,59313	0,59313	0,59312
5,555.10 ⁻⁵	0,2	1,12188	1,12188	1,12188	1,12187	1,12187	1,12186
8,333.10 ⁻⁵	0,3	1,60592	1,60592	1,60592	1,60591	1,60590	1,60590
1,111.10 ⁻⁴	0,4	2,05631	2,05631	2,05631	2,05629	2,05628	2,05627
1,388.10 ⁻⁴	0,5	2,47993	2,47993	2,47993	2,47992	2,47990	2,47989
1,666.10 ⁻⁴	0,6	2,88149	2,88149	2,88149	2,88148	2,88146	2,88144
1,944.10 ⁻⁴	0,7	3,26439	3,26439	3,26439	3,26438	3,26436	3,26435
2,222.10 ⁻⁴	0,8	3,63122	3,63122	3,63122	3,63120	3,63118	3,63116
2,500.10 ⁻⁴	0,9	3,98397	3,98397	3,98390	3,98390	3,98390	3,98390
2,770.10 ⁻⁴	1	4,32426	4,32426	4,32426	4,32424	4,32422	4,32420
5,555.10 ⁻⁴	3	7,25017	7,25017	7,25016	7,25014	7,25011	7,25008
3,765.10 ⁻⁴	2	5,45047	5,45047	5,45047	5,45045	5,45043	5,45040
1,111.10 ⁻³	4	11,7203	11,7203	11,7203	11,7203	11,7203	11,7202
1,388.10 ⁻³	5	13,5851	13,5851	13,5851	13,5850	13,5849	13,5849
1,944.10 ⁻³	7	16,8753	16,8753	16,8753	16,8752	16,8751	16,8750
2,777.10 ⁻³	10	21,0913	21,0913	21,0913	21,0912	21,0911	21,0911

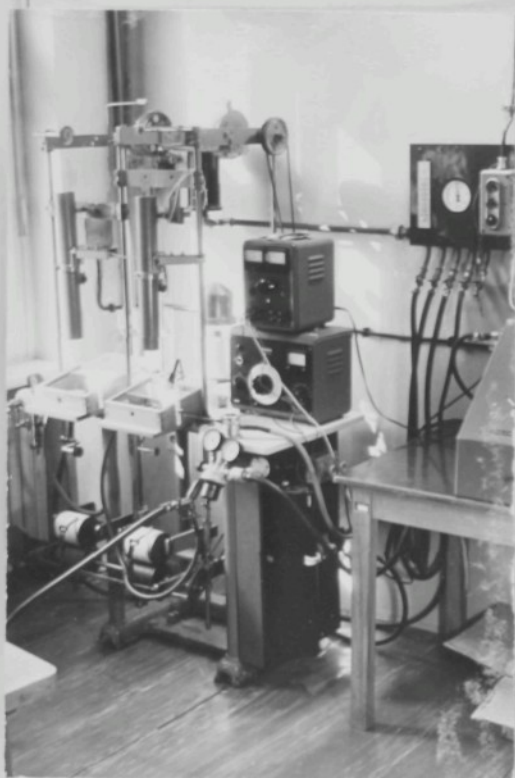
M	M	r [m]					
		2.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	6.10 ⁻⁴	7.10 ⁻⁴
kg/s	kg/h	L [kp]					
2,777.10 ⁻⁵	0,1	0,59307	0,59298	0,59285	0,59268	0,59247	0,59222
5,555.10 ⁻⁵	0,2	1,12177	1,12163	1,12142	1,12114	1,12080	1,12039
8,333.10 ⁻⁵	0,3	1,60578	1,60550	1,60530	1,60500	1,60450	1,60400
1,111.10 ⁻⁴	0,4	2,05615	2,05593	2,05561	2,05519	2,05460	2,05400
1,388.10 ⁻⁴	0,5	2,47974	2,47949	2,47914	2,47870	2,47810	2,47730
1,666.10 ⁻⁴	0,6	2,88129	2,88101	2,88061	2,88010	2,87940	2,87860
1,944.10 ⁻⁴	0,7	3,26420	3,26490	3,26340	3,26290	3,26210	3,26120
2,222.10 ⁻⁴	0,8	3,63090	3,63060	3,63010	3,62950	3,62880	3,62780
2,500.10 ⁻⁴	0,9	3,98370	3,98330	3,98280	3,98220	3,98130	3,98040
2,770.10 ⁻⁴	1	4,32390	4,32360	4,32310	4,32240	4,32150	4,32040
5,555.10 ⁻⁴	3	7,24978	7,24927	7,24850	7,24750	7,24620	7,24470
3,765.10 ⁻⁴	2	5,45000	5,44970	5,44910	5,44830	5,44720	5,44600
1,111.10 ⁻³	4	11,7197	11,7190	11,7179	11,7165	11,7147	11,7125
1,388.10 ⁻³	5	13,5846	13,5836	13,5824	13,5801	13,5788	13,5766
1,944.10 ⁻³	7	16,8740	16,8730	16,8720	16,8700	16,8670	16,8650
2,777.10 ⁻³	10	21,0910	21,0892	21,0875	21,0845	21,0823	21,0788

M	M	r [m]					
kg/s	kg/h	$8 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
		L [kp]					
$2,777 \cdot 10^{-5}$	0,1	0,59192	0,59158	0,59119	0,58480	0,57370	0,55760
$5,555 \cdot 10^{-5}$	0,2	1,11991	1,11935	1,11872	1,10800	1,08900	1,06100
$8,333 \cdot 10^{-5}$	0,3	1,60330	1,60260	1,60180	1,58800	1,56300	1,52500
$1,111 \cdot 10^{-4}$	0,4	2,05330	2,05240	2,05140	2,03500	2,00400	1,95900
$1,388 \cdot 10^{-4}$	0,5	2,47650	2,47550	2,47440	2,45500	2,42000	2,36700
$1,666 \cdot 10^{-4}$	0,6	2,88770	2,88650	2,88530	2,85500	2,81500	2,75600
$1,944 \cdot 10^{-4}$	0,7	3,26020	3,25900	3,25770	3,23400	3,19100	3,12600
$2,222 \cdot 10^{-4}$	0,8	3,62670	3,62540	3,62230	3,59900	3,55200	3,48200
$2,500 \cdot 10^{-4}$	0,9	3,97910	3,97780	3,97620	3,94900	3,89900	3,82300
$2,770 \cdot 10^{-4}$	1	4,31920	4,31770	4,31610	4,28760	4,23480	4,15420
$5,555 \cdot 10^{-4}$	3	7,24280	7,24077	7,23830	7,19690	7,11960	7,00000
$3,765 \cdot 10^{-4}$	2	5,44450	5,44280	5,44080	5,40700	5,34460	5,24860
$1,111 \cdot 10^{-3}$	4	11,7099	11,7069	11,7035	11,6440	11,5320	11,3600
$1,388 \cdot 10^{-3}$	5	13,5730	13,5700	13,5660	13,4490	13,3740	13,1800
$1,944 \cdot 10^{-3}$	7	16,8610	16,8570	16,8520	16,7730	16,6240	16,3950
$2,777 \cdot 10^{-3}$	10	21,0747	21,0699	21,0645	20,0969	20,7910	20,5150

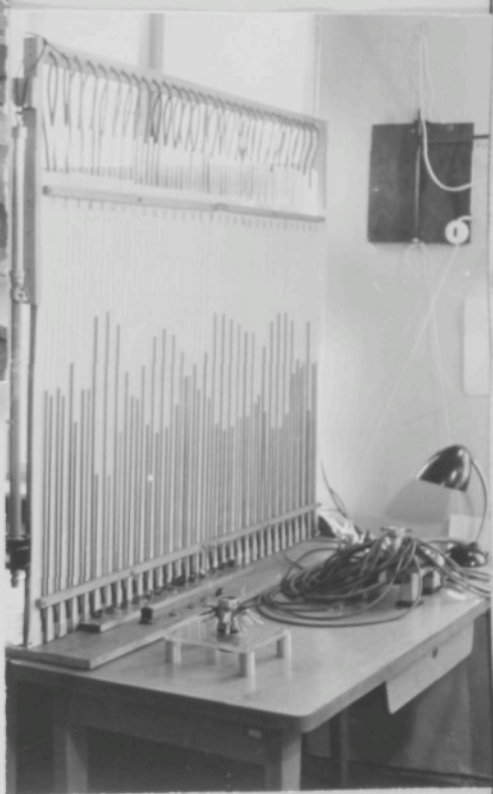
M	M	r [m]					
kg/s	kg/h	$5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}
		L [kp]					
$2,777 \cdot 10^{-5}$	0,1	0,53620	0,50930	0,47680	0,43870	0,39460	0,34450
$5,555 \cdot 10^{-5}$	0,2	1,02360	0,97500	0,91700	0,84700	0,76540	0,67150
$8,333 \cdot 10^{-5}$	0,3	1,47400	1,40900	1,32800	1,23100	1,11600	0,98300
$1,111 \cdot 10^{-4}$	0,4	1,89600	1,81600	1,71500	1,59400	1,45000	1,28100
$1,388 \cdot 10^{-4}$	0,5	2,29500	2,20100	2,08300	1,94000	1,76900	1,56700
$1,666 \cdot 10^{-4}$	0,6	2,67400	2,56800	2,43400	2,27100	2,07500	1,84300
$1,944 \cdot 10^{-4}$	0,7	3,03600	2,91800	2,77000	2,58800	2,37000	2,11000
$2,222 \cdot 10^{-4}$	0,8	3,38400	3,25600	3,09400	2,89500	2,65500	2,36800
$2,500 \cdot 10^{-4}$	0,9	3,71800	3,58100	3,40600	3,19100	2,93000	2,61900
$2,770 \cdot 10^{-4}$	1	4,04220	3,89990	3,70840	3,47800	3,19800	2,86300
$5,555 \cdot 10^{-4}$	3	6,83370	6,61290	6,33000	5,97770	5,54400	5,01640
$3,765 \cdot 10^{-4}$	2	5,11470	4,93810	4,71230	4,43410	4,09315	3,68150
$1,111 \cdot 10^{-3}$	4	11,1170	10,7950	10,3800	9,85000	9,21000	8,41600
$1,388 \cdot 10^{-3}$	5	12,9080	12,5450	12,0700	11,4880	10,7570	9,85500
$1,944 \cdot 10^{-3}$	7	16,0700	15,6400	15,0780	14,3740	13,4970	12,4130
$2,777 \cdot 10^{-3}$	10	20,1250	19,6040	18,9320	18,0820	17,0240	15,7120



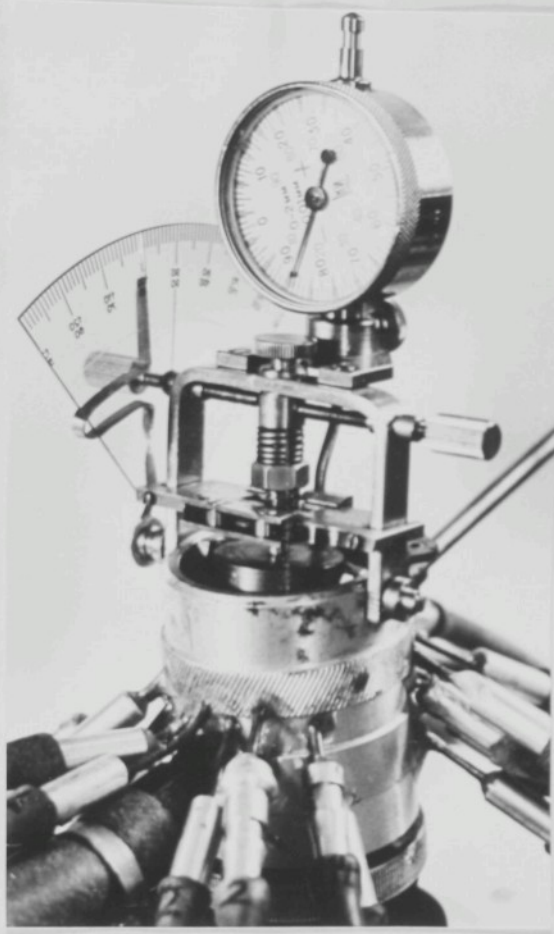




obr.1
Zkušební stolice aerosta-
tických ložisek

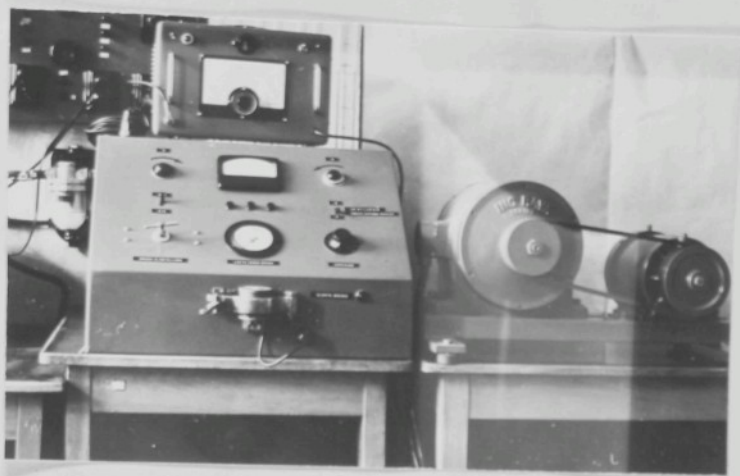


obr.2
Měření tlaku v mezeře
U manometrem



obr.3

Přídavné zařízení na ložisko sloužící pro
napodobení stavu při kmitání rotorku



obr.4

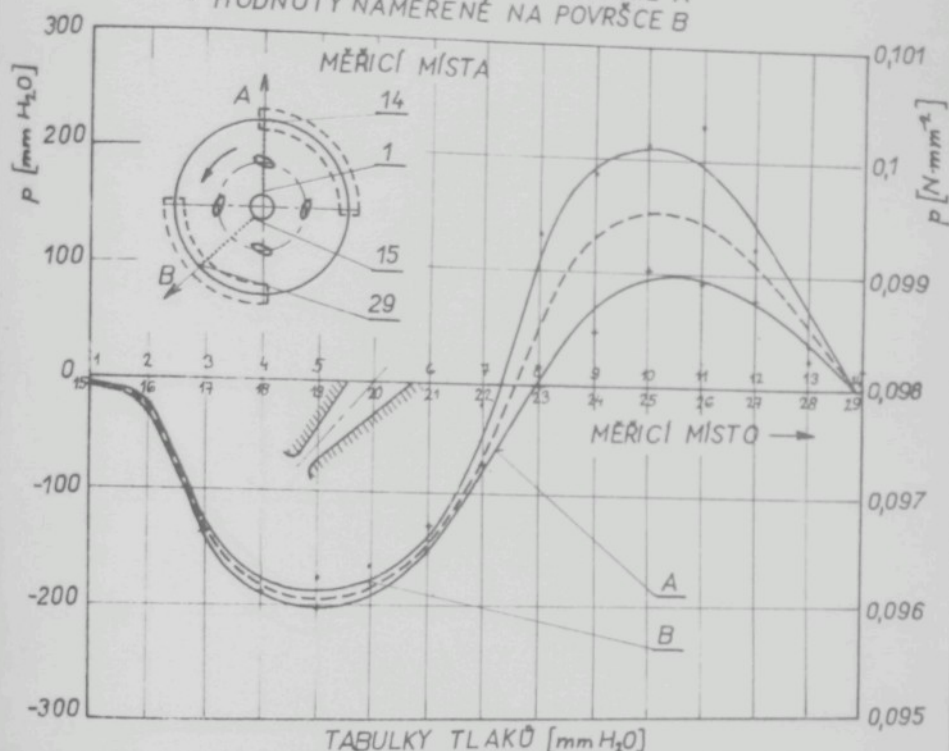
Zkušební stolice fy Heberlein Švýcarsko.

TABULKA TLAKŮ NAMĚŘENÝCH V MEZEŘE LOŽISKA
[mm H₂O]

MĚR. MÍSTO	TLAK VZDUCHU PŘED TRYSKOU $p_{w,9806} \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$											
	0,200	0,225	0,250	0,275	0,300	0,325	0,350	0,375	0,400	0,425	0,450	0,475
1	-3	-4	-5	-7	-8	-9	-11	-12	-12	-12	-12	-13
2	-7	-8	-8	-9	-11	-17	-21	-20	-15	-16	-17	-17
3	-36	-45	-63	-68	-90	-115	-134	-140	-130	-141	-159	-131
4												
5	-68	-88	-100	-121	-198	-224	-251	-290	-306	-326	-364	-399
6	-4	-29	-43	-95	-147	-232	-267	-309	-363	-357	-363	-383
7	68	55	54	-3	-42	-89	-119	-144	-138	-149	-164	-178
8	104	101	123	98	65	45	34	26	49	40	29	9
9	120	117	145	145	128	137	158	172	203	206	207	203
10	126	128	161	186	192	217	257	283	339	338	357	368
11	120	119	152	174	189	220	258	285	322	334	357	365
12	60	65	79	100	98	133	166	174	180	199	202	214
13	9	-9	-3	-4	-6	-3	0	-9	-1	-7	-23	43
14	1	-2	-2	-2	-0	-11	-1	-5	-6	-10	-23	-32
15	-10	-12	-18	-15	-23	-32	-42	-47	-21	-50	-60	-68
16	-20	-24	-24	-30	-52	-73	-92	-104	-51	-108	-122	-144
17	-56	-81	-84	-122	-165	-194	-214	-238	-245	-301	-330	-347
18	-58	-90	-104	-134	-181	-200	-216	-257	-310	-326	-344	-351
19	-48	-76	-95	-124	-147	-165	-176	-208	-271	-272	-289	-291
20	-40	-60	-93	-105	-127	-145	-158	-193	-229	-245	-255	-265
21	-37	-59	-97	-104	-125	-141	-156	-190	-227	-241	-260	-266
22	22	0	0	-52	-84	-87	-115	-158	-175	-202	-219	-232
23	97	105	133	106	103	133	118	115	142	156	138	151
24	120	131	196	155	177	186	206	240	224	310	320	341
25	130	140	218	188	195	212	242	275	306	342	347	359
26	126	134	201	178	193	199	232	267	299	321	345	332
27	53	56	75	75	72	66			108	118	338	97
28	-14	-17	-30	-30	-18	-43	-66	-72	-60	-74	-85	-80
29	7	10	-6	-7	11	8	8	10	10	17	15	10

MĚŘENÍ TLAKU V MEZEŘE LOŽISKA NESENÉHO A POHÁNĚ- NÉHO VZDUCEM (TLAK PŘED TRYSKOU $p = 0,300 \cdot 980,6 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$)

- * HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE A
- * HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE B

TABULKY TLAKŮ [mm H₂O]

MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. MĚŘENÍ	-5	-19	-127		-218	-140	-78	-13	31	82	70	72	8	19
2. MĚŘENÍ	-6	-19	-121		-184	-111	-66	6	56	122	110	85	35	9
φ HODNOTA	-5,5	-19	-124		-201	-126	-72	-3,5	44	102	30	79	21,5	14

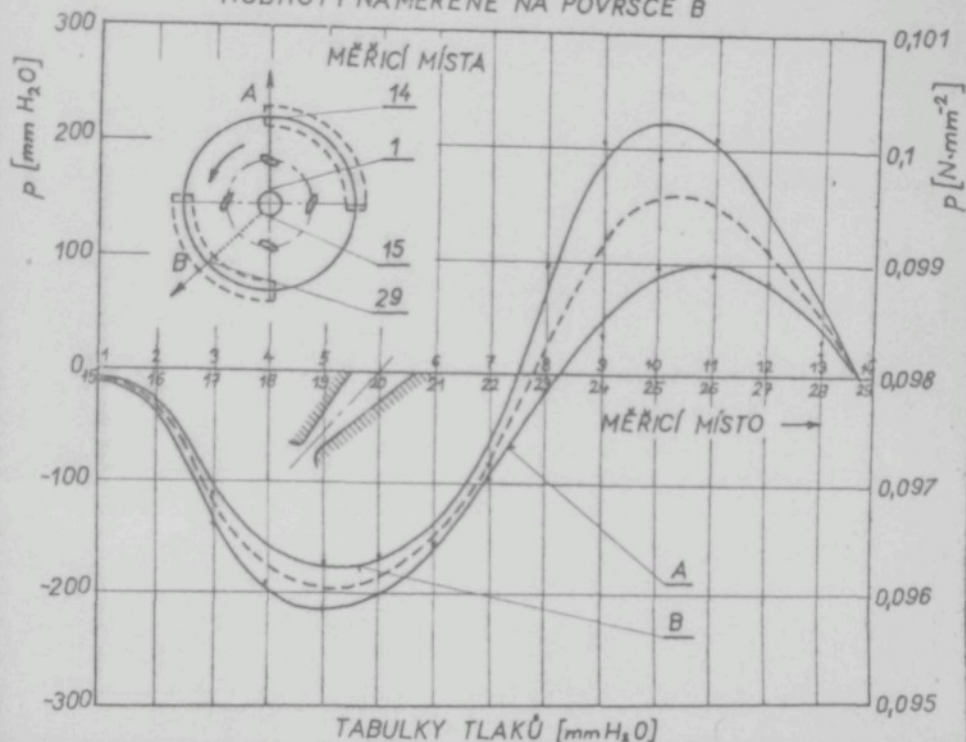
MĚŘICÍ MÍSTO	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1. MĚŘENÍ	-5	-34	-167	-175	-157	-149	-151	-45	107	158	175	191	99	10	20
2. MĚŘENÍ	-8	-10	-100	-204	-190	-180	-160	9	155	213	250	270	148	60	-21
φ HODNOTA	-6,5	-22	-134	-190	-174	-165	-156	-18	131	186	213	231	124	35	-0,5

MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VÝSLEDNÝ TLAK	-6	-27	-135	-183	-195	-186	-150	-64	52	132	155	148	110	56

MĚŘENÍ TLAKU V MEZEŘE LOŽISKA NESENÉHO A POHÁNĚ- NÉHO VZDUCHEM (TLAK PŘED TRYSKOU $p_0 = 0,325 \cdot 9806 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$)

• HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE A

• HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE B



MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. MĚŘENÍ	-8	-24	-143		-230	-158	-100	-30	17	69	60	64	5	24
2. MĚŘENÍ	-13	-29	-132		-204	-155	-97	-10	49	123	116	106	36	4
φ HODNOTA	-105	-27	-138		-217	-157	-99	-20	33	96	88	85	21	14

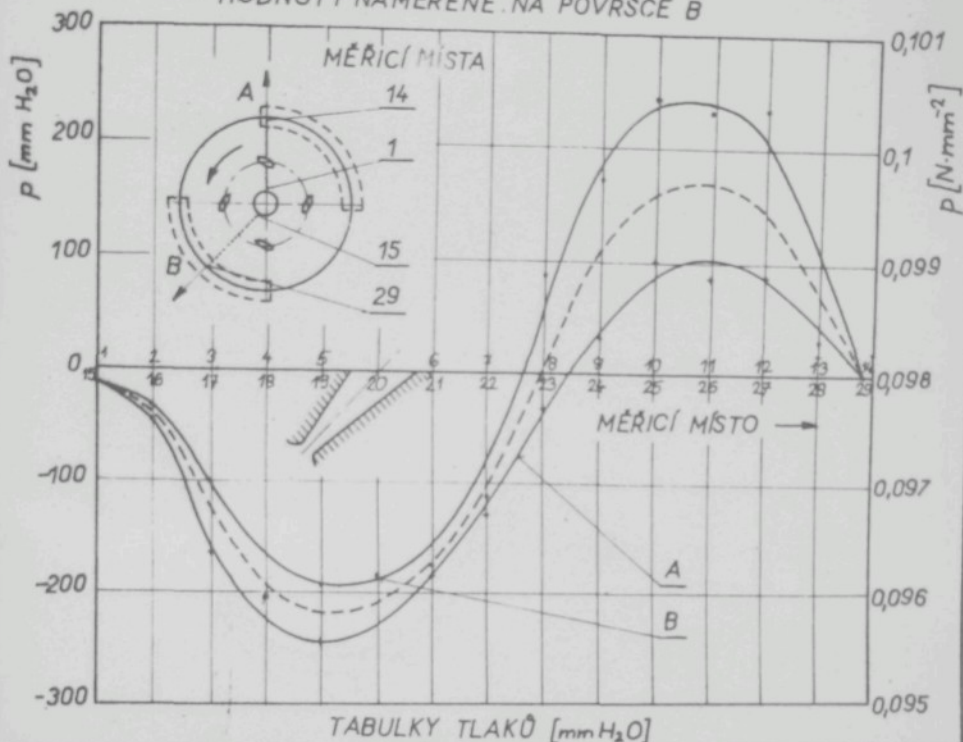
MĚŘICÍ MÍSTO	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1. MĚŘENÍ	-10	-51	-188	-190	-172	-163	-164	-95	99	164	179	198	103	5	27
2. MĚŘENÍ	-7	-19	-150	-193	-174	-166	-155	-70	96	165	210	220	135	48	-14
φ HODNOTA	-9	-35	-169	-192	-173	-165	-160	-83	98	110	195	209	110	27	6,5

MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VÝSLEDNÝ TLAK	-10	-32	-120	-175	-195	-185	-148	-80	20	115	160	150	110	50

MĚŘENÍ TLAKU V MEZEŘE LOŽISKA NESENÉHO A POHÁNĚ- NÉHO VZDUCEM (TLAK PŘED TRYSKOU $p_0 = 0,350 \cdot 980,6 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$)

• HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE A

• HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE B



MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. MĚŘENÍ	-7	-28	-162		-263	-185	-132	-50	1	67	48	53	-4	30
2. MĚŘENÍ	-15	-40	-166		-220	-182	-127	-20	54	135	127	115	33	5
Ø HODNOTA	-11	-34	-166		-242	-184	-130	-35	28	101	86	84	15	17,5

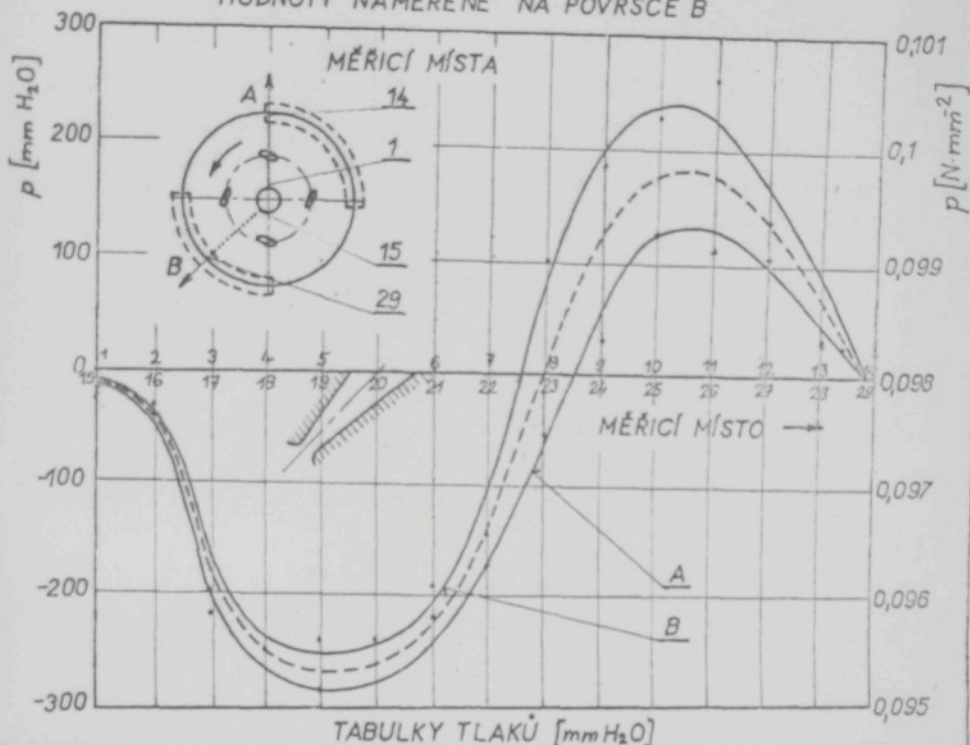
MĚŘICÍ MÍSTO	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1. MĚŘENÍ	-16	-71	-207	-201	-196	-183	-182	-123	95	181	194	217	125	6	31
2. MĚŘENÍ	-6	-22	-174	-207	-192	-190	-177	-102	95	170	220	243	145	50	-22
Ø HODNOTA	-11	-47	-100	-204	-194	-187	-175	-113	85	175	207	230	235	28	4,5

MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VÝSLEDNÝ TLAK	-11	-40	-125	-192	-220	-210	-173	-100	0	112	160	168	155	70

MĚŘENÍ TLAKU V MEZERE LOŽISKA NESENÉHO A POHÁNĚNÉHO VZDUCHEM (TLAK PŘED TRYSKOU $p = 0,375 \cdot 980,6 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$)

• HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE A

• HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE B

TABULKY TLAKŮ [mm H₂O]

MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. MĚŘENÍ	-19	-34	-193		-308	-259	-170	-46	36	127	106	95	15	25
2. MĚŘENÍ	-19	-48	-200		-261	-125	-170	-64	22	120	110	115	30	7
φ HODNOTA	-16	-41	-197		-285	-192	-170	-55	29	124	108	105	225	16

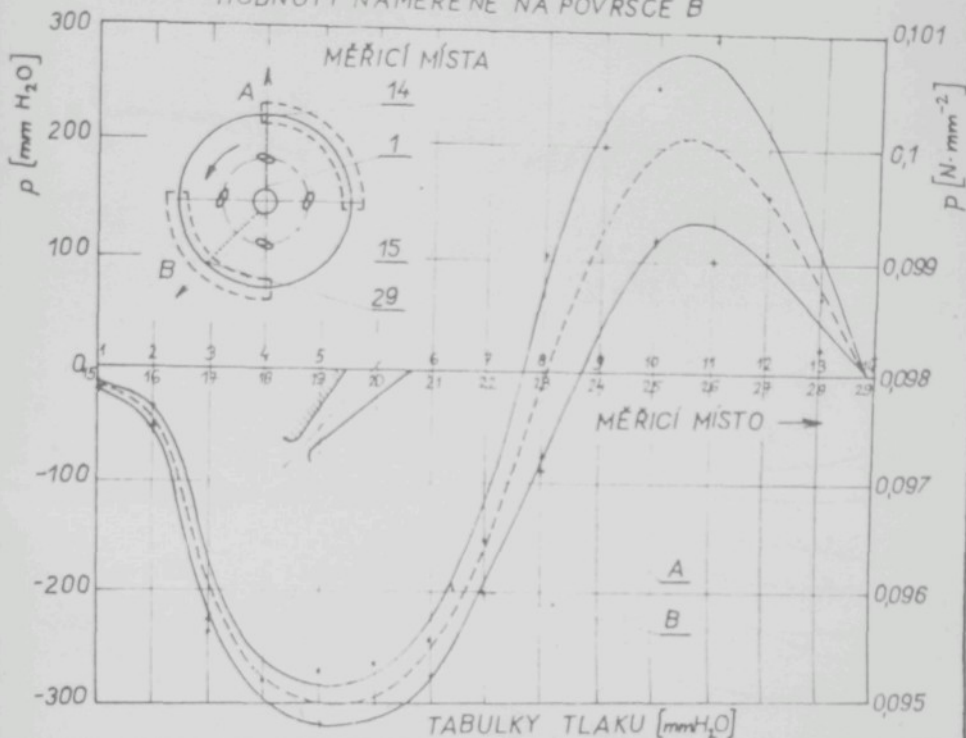
MĚŘICÍ MÍSTO	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1. MĚŘENÍ	-10	-37	-225	-260	-250	-251	-226	-142	99	186	212	253	117	5	40
2. MĚŘENÍ	-6	-26	-204	-235	-230	-225	-212	-143	103	185	240	268	155	55	-25
φ HODNOTA	-8	-32	-215	-248	-240	-238	-220	-143	101	186	226	261	136	30	7,5

MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VÝSLEDNÝ TLAK	-12	-40	-182	-250	-268	-260	-228	-135	0	125	178	178	140	65

MĚŘENÍ TLAKU V MEZEŘE LOŽISKA NESENÉHO A POHÁNĚ- NÉHO VZDUCHEM (TLAK PŘED TRYSKOU $p_s = 0,400-9806 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$)

* HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE A

* HODNOTY NAMĚŘENÉ NA POVRŠCE B

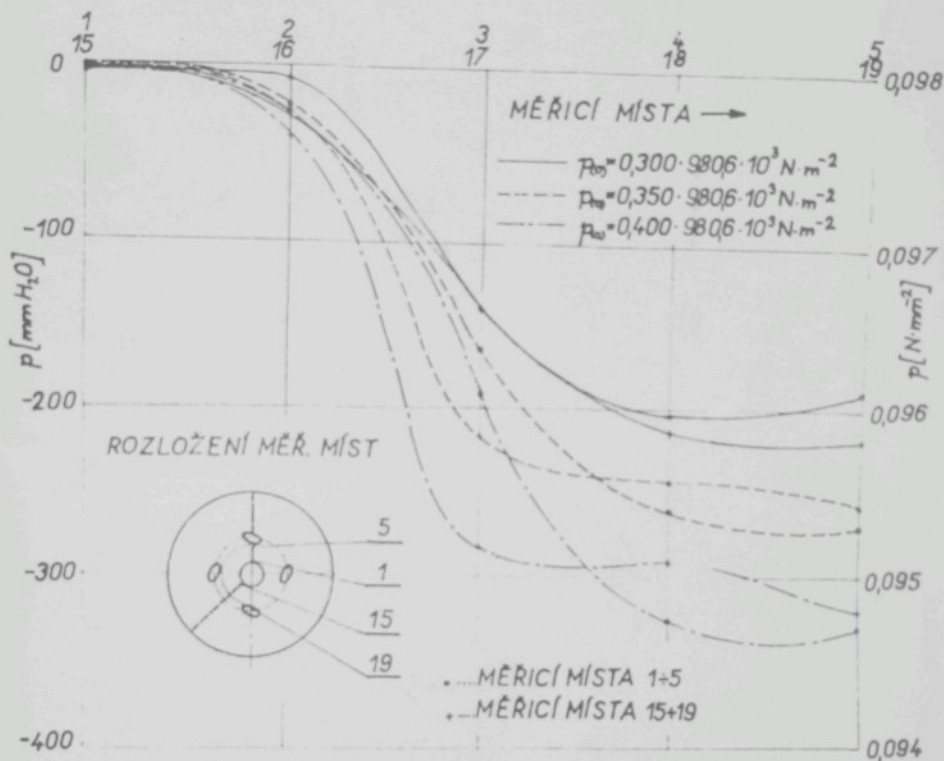


MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. MĚŘENÍ	-15	-40	-213		-335	-279	-195	-75	12	117	91	89	9	25
2. MĚŘENÍ	-26	-63	-234		-304	-270	-207	-80	12	120	110	126	30	7
φ HODNOTA	-21	-52	-224		-320	-275	-201	-78	12	119	101	108	20	16

MĚŘICÍ MÍSTO	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1. MĚŘENÍ	-18	-44	-243	-290	-280	-272	-247	-170	101	202	238	186	137	67	39
2. MĚŘENÍ	-8	-28	-230	-270	-260	-255	-238	-140	105	199	268	305	180	67	-24
φ HODNOTA	-13	-36	-236	-280	-270	-264	-243	-155	103	201	253	296	159	67	2,5

MĚŘICÍ MÍSTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VÝSLEDNÝ TLAK	-17	-48	-200	-280	-300	-295	-252	-158	-10	125	195	200	160	75

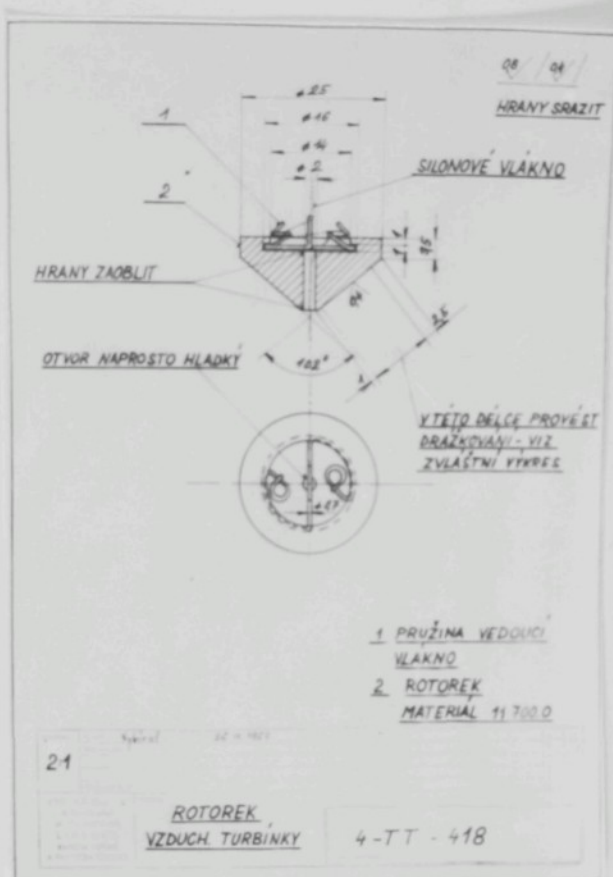
MĚŘENÍ TLAKU V MEZEŘE LOŽISKA NESENÉHO
A POHÁNĚNÉHO VZDUCHCHEM (PRO MĚŘICÍ
MÍSTA LEŽÍCÍ MEZI STŘEDNÍM OTVOREM A TRYSKAMI)

TABULKA TLAKŮ [mm H₂O]

MĚŘ. MÍSTO		1	2	3	4	5	15	16	17	18	19
$p_0 \cdot 9806 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$	0,30	-1	-26	-140	-206	-190	-3	-7	-140	-216	-220
		-1	-26	-140	-198	-190	-3	-9	-140	-207	-217
	0,35	-2	-28	-170	-264	-277	-4	-16	-204	-252	-264
		-2	-23	-155	-257	-263	-4	-35	-225	-235	-252
	0,40	-2	-27	-188	-330	-330	-6	-41	-280	-290	-320
		-2	-28	-197	-320	-328	-5	-42	-287	-290	-322



Statorek pro stabilní provoz při zakrucování polyamidových vláken (optimální konstrukce)



Obr.2

Konstrukce rotorku pro stabilní rotaci
při zakrucování polyamidových vláken

u/50-II. př.

Kandidátská disertační práce

ULOŽENÍ VYSOKOTÁČKOVÝCH ROTORKŮ KUŽELOVÉHO TVARU
NA VZDUCHOVÉM POLŠTÁŘI

DÍL I.

Aspirant: Ing. Jaroslav Matějka

Školitel: Prof. Ing. Jiří Mayer

Pracoviště: Vysoká škola strojní a textilní Liberec
Katedra tepelné a provozní techniky

O b s a h

	Strana
Použité označení	4
1.0 Úvod	7
2.0 Účel práce	10
3.0 Princip navrženého zařízení	12
3.1 Vývoj navrženého zařízení s ohledem na nosnost a stabilitu rotace	14
3.2 Stanovení některých parametrů	17
3.3 Regulace otáček	21
3.4 Prototyp na 50 jednotek a výsledky zkoušek	23
3.5 Možnosti zmenšení spotřeby vzduchu	23
4.0 Současný stav poznatků o řešení proudění v mezeře aerostatických ložisek	34
5.0 Proudění v mezikruhovém kuželovém mezeře nestejně tloušťky	39
5.1 Průtoková plocha mezikruhového průřezu štěrby	42
5.2 Odvození pohybových rovnic proudění	44
5.3 Isoentropické proudění v prostoru 1 - 2	53
5.4 Isotermické proudění v prostoru 1 - 2	60
5.5 Proudění v mezeře v prostoru 0 - 1	66
5.6 Řešení tlakové funkce (komplexní řešení)	68
6.0 Nosnost navrženého zařízení	73
7.0 Uložení včetně na kuželových ložiskách mazaných kapalinou nebo plynem	75
8.0 Hydrostatické kuželové ložisko	79
8.1 Řešení proudění - tlakový profil	79
8.2 Nosnost ložiska	84
8.3 Vliv velikosti výstupního otvoru na nosnost	87
8.4 Vliv kinetické energie proudu na nosnost	90

	Strana
9.0 Aerostatické kuželové ložisko	94
9.1 Řešení proudění - tlakový profil	95
9.2 Nosnost ložiska	105
9.3 Vliv velikosti výstupního otvoru na nosnost	107
9.4 Vliv kinetické energie proudu na nosnost	111
9.5 Zvýšení nosnosti geometrickou úpravou ložiska	113
10.0 Spotřeba vzduchu $M=f(\text{tlaku, tloušťky mezery a } \varnothing \text{ trysky})$	116
10.1 Nestabilní provoz aerostatického ložiska	117
10.2 Stabilní provoz aerostatického ložiska	124
11.0 Pokusná zařízení - výsledky experimentů a měření	127
11.1 Pokusná zařízení	127
11.2 Zjišťování rychlostního součinitele Lavalovy trysky	127
11.3 Měření zdvíhu rotorku	129
11.4 Výsledky měření tlakového profilu	137
12.0 Zhodnocení výsledků práce - srovnání vypočtených a naměřených parametrů - rozbor nových poznatků	
13.0 Souhrn	146
14.0 Použitá literatura	150
Seznam příloh	153

Poznámka: Nedílnou součástí této práce
jsou přílohy č. 1 - 24
svázané v části II.

Použitá označení

Označení:	Název:	Rozměr:
$P_{(o)}$	- tlak vzduchu před vstupem do trysky	$N\ m^{-2}$
P_o	- tlak vzduchu v místě štěrbiny 0	$N\ m^{-2}$ ($N\cdot mm^{-2}$)
P_l	- tlak vzduchu v místě štěrbiny 1	$N\ m^{-2}$ ($N\cdot mm^{-2}$)
$P^{(m)}$	- tlak v mezeře na určitém poloměru r	$N\ m^{-2}$ ($N\cdot mm^{-2}$)
P_k	- tlak kritický - v nejužším místě trysek	$N\ m^{-2}$
P_b	- tlak barometrický - tlak okolí	$N\ m^{-2}$
P_y	- tlak vzduchu ve štěrbině v určitém místě površky kužele	$N\ m^{-2}$ ($N\cdot mm^{-2}$)
c_y	- rychlost proudění po povrchu štěrbin	$m\ s^{-1}$
c_r	- rychlost proudění ve směru radiálním	$m\ s^{-1}$
c_o	- rychlost proudění ve směru tangenciálním	$m\ s^{-1}$
c_z	- rychlost proudění ve směru osy rotace	$m\ s^{-1}$
c_u	- rychlost ve směru obvodovém	$m\ s^{-1}$
u	- rychlost obvodová	$m\ s^{-1}$
ω	- rychlost úhlová	s^{-1}
w	- rychlost relativní	$m\ s^{-1}$
v	- měrný objem	$m^3\ kg^{-1}$
ρ	- měrná hmotnost	$kg\ m^{-3}$
t	- teplota	$^{\circ}C$
T	- teplota absolutní	$^{\circ}K$
K	- koeficient isoentropie	
π	- koeficient polytropie	
n	- počet otáček	s^{-1}
R	- plynová konstanta	$J\ kg^{-1}\ ^{\circ}K^{-1}$

M	-	průtoková hmotnost	kg s^{-1}
S	-	plocha průtokového průřezu	m^2
F	-	síla	N
F _o	-	síla obvodová	N
r	-	poloměr	m
r _a	-	vnější poloměr rotorku	m
r _e	-	poloměr na němž leží ústí trysek	m
r _i	-	poloměr vrtání ve statorku	m
r _o	-	poloměr vrtání v rotorku	m
M _k	-	krouticí moment	N m
P	-	výkon	W
φ	-	rychlostní součinitel	
ψ	-	průtokový součinitel	
den	-	denier (titr) tíže $9 \cdot 10^3 \text{ m}$ vláknů v gramech	
β	-	poměr tlaku před tryskou ku tlaku za tryskou	
Z	-	počet zákrutů na přízi na jeden metr	
a	-	zrychlení	m s^{-2}
c _p	-	měrné teplo za konstantního tlaku	$\text{J kg}^{-1} \text{ deg}^{-1}$
i	-	entalpie - měrná	J kg^{-1}
y	-	délka površky	m
l	-	práce - měrná	J
E	-	energie - měrná	J kg^{-1}
q	-	teplo	J
h	-	zdvih	m
d _{kr}	-	kritický průměr trysky	m
d	-	průměr	m

k	-	konstanta	
L	-	nosnost ložiska	N
Re	-	Reynoldsovo podobnostní číslo	
ν	-	kinematická vazkost	$m^2 s^{-1}$
γ	-	dynamická vazkost	$N s m^{-2}$
V	-	celkový objem	m^3
e	-	základ přirozených logaritmů	
Δ	-	charakteristické ložiskové číslo	$\frac{\gamma \cdot \omega \cdot r^2}{c^2 p}$
λ	-	relativní výstřednost	$\frac{e}{c}$
$\frac{L}{D}$	-	poměrná šířka ložiska	

1.0 Ú v o d

Problematika úkolu řešeného v rámci kandidátské disertační práce "Uložení vysokootáčkových rotorků kuželového tvaru na vzduchovém polštáři" vyplynula ze státního výzkumného úkolu METVAR č.67-41-1, řešeného na textilní fakultě a z dílčího úkolu č.4 "Uložení vysokootáčkových rotorů na vzduchovém polštáři", řešeného na katedře tepelné a provozní techniky. Potřeba vysokootáčkových vřeten se jeví především u strojů na zkracování polyamidových vláken při jejich tvarování, poněvadž je třeba zajistit při vysokém počtu zákrutů na 1 běžný metr vlákna i dostatečnou produkci a tím i dobrou produktivitu výroby.

Z těchto důvodů vývoj textilních a i jiných strojů stále směřuje k větším otáčkám. Tak na příklad textilní stroje na zkracování vláken při jejich tvarování vyšly původně ze skacích strojů o otáčkách řádově 100 s^{-1} , další etapa při použití speciálních valivých ložisek dosáhla řádově otáček 1000 s^{-1} , dnes běží stroje při otáčkách 5000 s^{-1} , jejichž představitelem v ČSSR je vysokovýkonný stroj ELITEX TK 500 - výrobce Kovostav Ústí n/Orlicí, kde zkracující element je odvalován na kotoučích, při čemž dotyk je zajišťován pomocí magnetické síly. Výzkumné a konstrukční ústavy pracují na vývoji stroje, kde je dosahováno 15.000 s^{-1} ekvivalentních otáček.

Cestou prudkého zvyšování produkce procházejí též doprácací stroje, jejichž posledním představitelem ve světě je unikátní československý bezvřetenový systém doprácacího stroje, jehož komora má otáček 500 s^{-1} .

Jedna z dalších vývojových cest, která se s ohledem na nejnovější poznatky z teorie mazání nabízí, je uložení vřeten a rotujících elementů na plynových ložiskách, kde v souhlase s viskositou je malá třecí práce a tím i nepatrné oteplení

1.0 Ú v o d

Problematika úkolu řešeného v rámci kandidátské disertační práce "Uložení vysokootáčkových rotorků kuželového tvaru na vzduchovém polštáři" vyplynula ze státního výzkumného úkolu METVAR č.67-41-1, řešeného na textilní fakultě a z dílčího úkolu č.4 "Uložení vysokootáčkových rotorů na vzduchovém polštáři", řešeného na katedře tepelné a provozní techniky. Potřeba vysokootáčkových vřeten se jeví především u strojů na zkracování polyamidových vláken při jejich tvarování, poněvadž je třeba zajistit při vysokém počtu zákrutů na 1 běžný metr vlákna i dostatečnou produkci a tím i dobrou produktivitu výroby.

Z těchto důvodů vývoj textilních a i jiných strojů stále směřuje k větším otáčkám. Tak na příklad textilní stroje na zkracování vláken při jejich tvarování vyšly původně ze skacích strojů o otáčkách řádově 100 s^{-1} , další etapa při použití speciálních valivých ložisek dosáhla řádově otáček 1000 s^{-1} , dnes běží stroje při otáčkách 5000 s^{-1} , jejichž představitelem v ČSSR je vysokovýkonný stroj ELITEX TK 500 - výrobce Kovostav Ústí n/Orlicí, kde zkracující element je odvalován na kotoučích, při čemž dotyk je zajišťován pomocí magnetické síly. Výzkumné a konstrukční ústavy pracují na vývoji stroje, kde je dosahováno 15.000 s^{-1} ekvivalentních otáček.

Cestou prudkého zvyšování produkce procházejí též doprřadací stroje, jejichž posledním představitelem ve světě je unikátní československý bezvřetenový systém doprřadacího stroje, jehož komora má otáček 500 s^{-1} .

Jedna z dalších vývojových cest, která se s ohledem na nejnovější poznatky z teorie mazání nabízí, je uložení vřeten a rotujících elementů na plynových ložiskách, kde v souhlase s viskositou je malá třecí práce a tím i nepatrné oteplení

ložiska. Otázkami plynových ložisek se proto v poslední době začalo zabývat mnoho vědeckých a výzkumných ústavů ve světě. V SSSR je to hlavně prof. Šejnberg se svou skupinou / 1 / a nímž pracovníci Výzkumného ústavu bavlnářského z Ústí nad Orlicí konsultovali některé otázky uložení komory bezvřetenového předení na plynových ložiskách.

Ve Švýcarsku u fy Escher Wyss pracuje na vývoji plynových ložisek ing. Loch se svou skupinou. V NSR dr. Drescher ve výzkumném ústavu Max. Plancka v Göttingenu. V Rumunsku prof. Constantinescu, v Izraeli prof. Reiner a v USA několik vědecko-výzkumných ústavů při vysokých školách apod. Soupis literatury z tohoto oboru jež je většinou v překladech na KTT je uveden v příloze č.1.

V Československu je hlavní pracoviště tohoto druhu ve SVUSS Běchovice, kde se otázkami zabývá skupina: Ing. Trnka, Ing. Vinš, Ing. Šebesta, doc. Ing. Tondl CSc a další.

Některé firmy plynová ložiska již vyrábějí. Anglická firma Westwind Turbines používá aerostatická ložiska pro uložení vřeten na 2000 s⁻¹ otáček. 300 vřeten je podle / 2 / v USA u společnosti IBM ve 24 hod. provozu denně již déle než 2 roky, aniž došlo k poškození. Tímto výkonem jsou překročeny všechny strojírenské standardy.

Z uvedených důvodů a též z důvodů zachovat pro ČSSR vysoký standart ve stavbě textilních strojů, byla z podnětu katedry textilních strojů VŠST v Liberci založena skupina pro výzkum otázek plynového mazání, s perspektivou využití poznatků výzkumu pro uložení vřeten na extrémně vysoké otáčky u textilních strojů.

Objasnění některých vzájemných souvislostí jevů určujících nosnost vzduchového ložiska, hledání optimálních geometrických parametrů, jakož i experimentální ověření jednotlivých působících faktorů, je cílem předložené disertační práce. Poněvadž mnoho vřeten textilních strojů rotuje kolem svislé osy, je předmětem zkoumání jen aerostatické kuželové ložisko, jež se jeví jako universální - se schopností zachy-

covat jak radiální, tak axiální tlaky. Je to ložisko radiálně-axiální. Toto ložisko také není výrobně náročné a kladou se menší požadavky na přesnost. Jako výchozí bylo vzato aerostatické ložisko kuželového tvaru, u kterého expandující vzduch nese rotorek a zároveň jej pohání.

Jsem velmi zavázán především svému školiteli Prof. Ing. Jiřímu Mayerovi za pochopení a trvalou podporu této práce a za cenné rady a připomínky, kterými usměrňoval řešení problematiky. Na tomto místě děkuji také RNDr. Miloslavu Nekvindovi CSc. za poskytování konsultací na matematickém zvládnutí některých úkolů a návrhů na volbu schůdné matematické metody řešení. Děkuji také Ing. Osvaldu Modrlákovi, programátorovi KTT, za vypracování programů pro řešení složitých vztahů na číslicovém počítači MINSK 22.

Děkuji vědeckým pomocným silám z řad studentů a mechanikovi katedry s. Brejlovi, za pomoc při časově náročných měřeních, grafickém zpracování a výrobě pokusných či měřicích aparatur. Na tomto místě též děkuji za nevšední spolupráci Kamilu Schirhalovi, technologovi n.p. Elite, který je s doc. Ing. Ferdinandem Neckářem CSc. spoluautorem československého patentu č. 88577 a který prováděl dlouhodobé ověřovací provozní zkoušky prototypu navrženého stroje na tvarování.

Národnímu podniku Elite Varnsdorf patří můj dík za finanční podporu výzkumných prací. V první fázi prací kryl nemalé náklady na výzkum. Nynější náklady jsou hrazeny ze státního úkolu METVAR.

2.0 Účel práce

Při použití plynového ložiska jako progresivního konstrukčního prvku vůbec (mimo použití z nutnosti - nukleární technika, provoz za vysokých teplot) hrají velkou roli otázky vyplývající vlastně z nevýhod plynových ložisek. Jsou to:

- Poměrně malá měrná nosnost. U aerostatických ložisek se pohybuje v rozsahu $0,05 - 0,25 \text{ N mm}^{-2}$ (u aerodynamických ložisek jen $0,01 \text{ N mm}^{-2}$).
- Poměrně drahý provoz - vysoká měrná spotřeba vzduchu.
- Dosud plně neprozkoumané otázky vibrace rotorů při velmi vysokých otáčkách.

Při použití plynového ložiska u textilních strojů pro tvarování vláken přistupuje další rozhodující požadavek:

- Při současném stavu tvarovací techniky nepravým zákrutem musí ložisko bezporuchově pracovat při otáčkách minimálně $4000 - 7000 \text{ sec}^{-1}$.

Nosnost aerostatického ložiska je závislá na tlakovém profilu v mezeře ložiska. Z teorie radiálních aerostatických ložisek je známo, že tlakový profil je funkcí tlaku vzduchu před trysekou, ale také geometrických parametrů ložiska. Účelem práce je najít některá optima geometrických parametrů přičemž se vychází z proudění vzduchu ve šterbině ložiska.

S otázkou nosnosti úzce souvisí též spotřeba vzduchu pro mazání, resp. mazání a pohon. Stejnou nosnost lze dosáhnout na příklad menším počtem trysek o větším kritickém průřezu, nebo větším počtem trysek o menším kritickém průřezu, přičemž u každé alternativy může být jiná spotřeba vzduchu. Svou roli bude hrát asi též rozmístění trysek. Účelem práce je prozkoumat, jaké uspořádání u ložiska kuželového tvaru je nejvýhodnější. U ložisek kde expandující vzduch z trysek nese a zároveň pohání, bude spotřeba vzduchu též funkcí požadovaného krouticího momentu, který dále závisí na rychlostech proudění.

Je třeba hledat vhodné "olopatkování rotorku".

Při pokusných provezech ložiska kuželového tvaru se vyskytovaly určité vibrace. Při experimentech se ukázalo, že stabilita rotace je funkcí mnoha proměnných parametrů ložiska. Především je to geometrický tvar statorku, rotorku a šterbiny, umístění trysek; uložení ložiska na stroji apod. U ložiska kde vzduch nese a zároveň pohání, přistupují další proměnné jako sklon os trysek vzhledem ke směru obvodové rychlosti, vzdálenost průsečíku průmětů os trysek od těžiště rotorku, velikost otvorů pro průchod vlákna v rotorku a ve statorku, a též velikost vrcholového úhlu statorku a rotorku. Stabilita byla ovlivněna také tvarem elementu pro opásání vlákna. Element je uchycen na rotorku. Je to důkazem, že stabilita souvisí i s ventilačními ztrátami.

Svoji úlohu hrají další vnější síly při zakrucování vlákna, např. vznikající balon na vlákne. Konečně jsou to vlivy dynamického nevyvážení rotorku. Potom geometrická osa kužele nesusohlasí s hlavní osou setrvačnosti. V důsledku toho koná hlavní osa setrvačnosti precesní pohyb, který vede k nesymetrii vzdušného polštáře a tím pravděpodobně k tlakovým změnám v mezeře a k nestabilnímu rotačnímu pohybu. Účelem práce v oboru stability je tedy také najít opatření pro odstranění některých uvedených příčin nestability rotace a to hlavně cestou experimentální.

Analytické řešení problému stability popsaného ložiska bylo předmětem samostatné práce / 3 / a též v současné době pokračují práce na řešení stability dalšími členy výzkumné skupiny na VŠST a pokračuje výzkum stability též na externím pracovišti v Brně.

3.0 Princip navrženého zařízení

Požadavky kladené na progresivní konstrukci zařízení k tvarování vláken jsou:

- 1) Otáčky zkrucovacího vřetene ... $3500 \div 8500 \text{ s}^{-1}$.
- 2) Kontinuita tvarování (provádět operace zkrucování, ustalování a rozkrucování vlákna současně).
- 3) Stejnoměrný počet zákrutů na jednotku délky.
- 4) Dokonalé ustálení (fixace vlákna).
- 5) Trvanlivost zařízení - malá poruchovost.
- 6) Jednoduchá obsluha.
- 7) Malá pořizovací cena.
- 8) Malé náklady na provoz a údržbu.

Po rozboru těchto náročných požadavků a po prověrce dosavadních způsobů tvarování, z nichž je většina chráněna cizími patenty, bylo navrženo zkrucovací zařízení s volně se otáčejícím rotorkem na vzduchovém polštáři.

(Poznámka: V době návrhu nebyl znám princip tvarování pomocí zkrucovacího elementu odvalujícího se mezi dvěma kotouči, k nimž je přitlačován silou magnetu.)

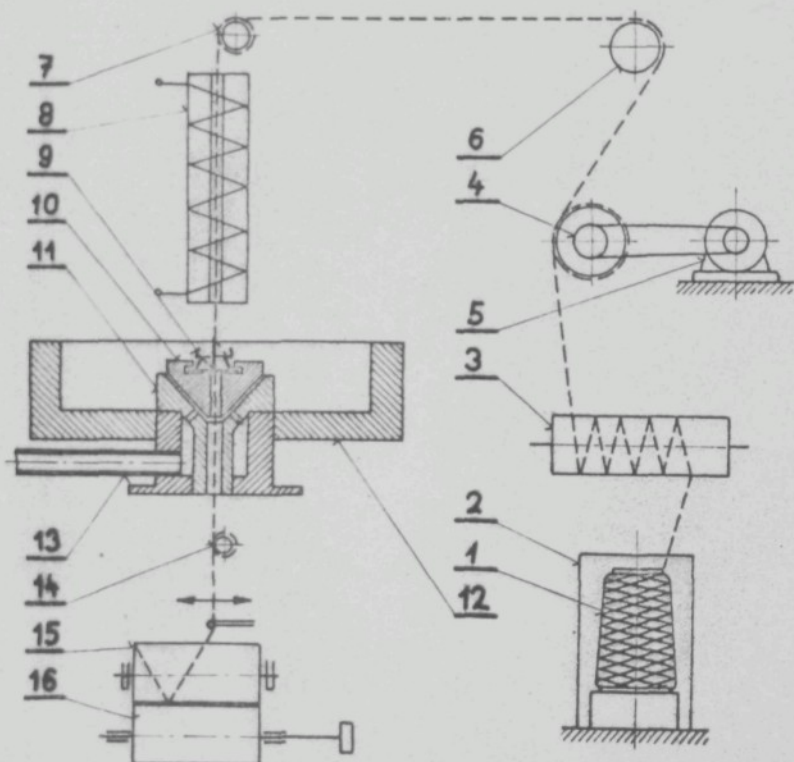
Princip navrženého zařízení je na obr. 1.

Zařízení pozůstává ze čtyř hlavních samostatných celků:

- a) zařízení pro nucené podávání - posice 1 - 7;
- b) zařízení pro fixaci vlákna v zakrucovaném stavu - posice 8;
- c) zařízení pro tvoření nepravého zákrutu - posice 9 - 14;
- d) zařízení pro navíjení ztvarovaného vlákna - posice 15 - 16.

Ve sklenici je uložena cívka 1 s polyamidovým vláknem, které má základní zákrut (multifil). Vláknem je vedeno přes válcový brzdíč 3, dále na nucené podávací zařízení 4, poháněné elektromotorem 5. Dále je vlákno vedeno na vyrovnávací zařízení 6 a přes vodící kladku 7 do topného tělesa 8 a dále do zkrucovacího zařízení sestávajícího z rotorku 10, statoru 11, krytu 12, přívodu vzduchu 13 a elementu pro uchycení vlákna. Dále je vlákno vedeno přes vodící kladku 14 na navíjecí cívku 15, která je poháněna zařízením 16. Kladky 7 a 14 jsou od sebe vzdáleny cca 1 metr.

Na tento nový způsob tvarování byl udělen československý patent č. 88577.



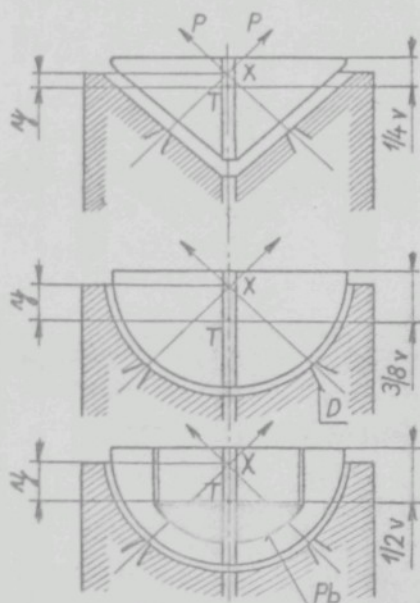
Obr. 1

Princip tvarování podle čs. patentu č. 88577

3.1 Vývoj navrženého zařízení

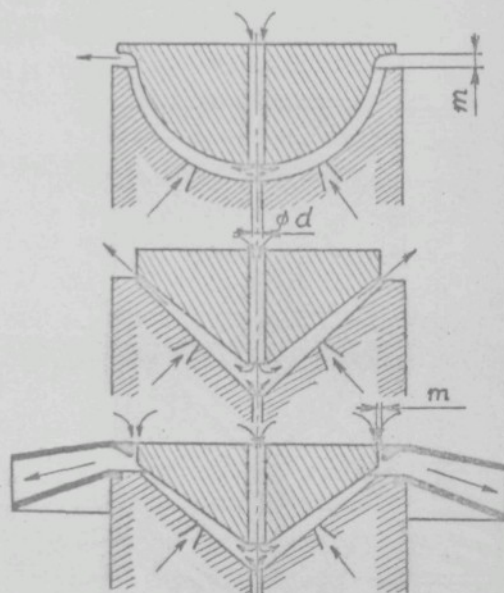
Jako podklad pro navržené zařízení pro tvoření zákrutů na vlákne byla vzata ultracentrifuga jež je popsána v práci Svedberg-Petersen: Die Ultrazentrifuge / 4 / a v práci / 5 /. Avšak je-li na rotorku uchyceno vlákno, které je zkrucováno, podmínka pro vysokou a rovnoměrnou rotaci se mění a stávají se složitější. Bylo třeba najít správné umístění trysek a najít správný jejich sklon. Rovněž vrcholový úhel kužele rotorku i statorku byl předmětem vývoje. Mnoha pokusy bylo zjištěno, že sklon os trysek je nutné provést tak, aby průměty výslednic sil daných změnou hybnosti proudů vzduchu z trysek protínaly osu otáčejícího se rotorku v určité vzdálenosti nad těžištěm rotorku.

Čím je průsečík (x) výš nad těžištěm, tím se dosáhne větší stability běhu rotorku - viz obr. 2. Zároveň se však ukázalo, že jakmile se trysky zabudují hodně vysoko nad vrchol



Obr. 2

Úprava rotorků s ohledem
na těžiště



Obr. 3

Úprava rotorků s ohledem
na stabilitu

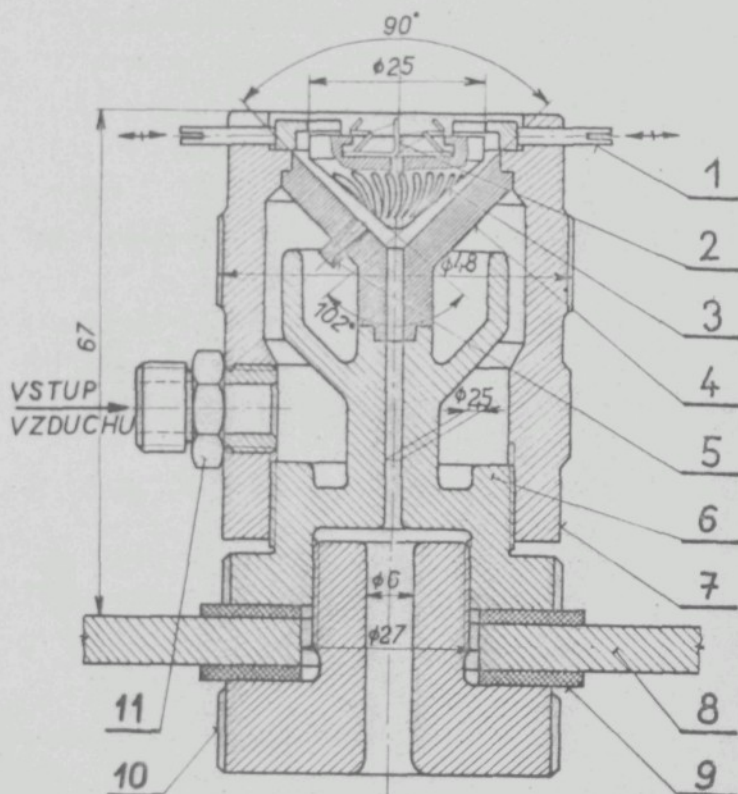
kužele statorku nastávají poruchy rotace. Podobně když se zvětší sklon trysek z 30° např. na 40° (viz obr. 7 sklopený pohled P), pak kolmé složky sil P jsou již tak veliké, že "vyhazují" rotorek z kužele statorku. Z toho důvodu bylo nutno snižovat těžiště rotorku. Byl zkoušen provoz s rotorkem půlkulového tvaru - obr. 2b, který má těžiště ve $3/8$ výšky, kdežto rotorky kuželového tvaru v $1/4$ výšky - viz obr. 2a. Dále byly činěny pokusy snížit těžiště vylitím dutiny v půlkulovém rotorku olovem - viz obr. 2c a tak snížit těžiště až na $1/2$ výšky. Rotorek půlkulového tvaru však se velmi obtížně uváděl do rotace a to proto, že se rotorek na vzduchovém polštáři kolébal kolem středu O. Dotyk sice nenastal, avšak otáčky se neuvedly na žádanou výši.

Kolébání bylo v jedné variantě odstraněno stabilizačním osazením - viz obr. 3a, ale stejně požadovaných otáček se nedosáhlo. Důvod je asi třeba hledat v půlkulové mezeře mezi statorkem a rotorkem, která nepříznivě zakřivuje proud vzduchu z trysek. Experimenty byly nalezeny vrcholové úhly a to u statorku 90° a u rotorku 102° , které zaručují stabilní rotaci. Tím vznikla kuželová mezera dělená na dva prostory kružnicí na níž jsou vyústěny trysky. V horním prostoru mezery je tlak vyšší než barometrický a proudí zde vzduch vystupující z trysek se vzduchem přisávaným ze spodního prostoru mezery, kde je tlak menší než barometrický. Tím se sice zmenšuje nosnost, avšak dává to stabilizační účinek. K tomu též napomáhá usměrňovací hrdlo ve tvaru difuzoru, kde vznikající vzduchový prstenec mezi hrdlem a rotorkem zabraňuje bočnímu vychýlení rotorku - viz obr. 3c.

Stabilitu chodu rotace ovlivňuje též do určité míry velikost otvoru pro průchod vlákna ve statorku a rotorku, v každém případě však jejich velikost ovlivňuje nosnost.

Po vyřešení uvedených základních problémů se stabilitou běhu rotorku bylo vytvořeno zkrucovací zařízení, které je velmi jednoduché, jehož podstatou je aerostatické ložisko, kde proudící vzduch z trysek slouží jak k pohonu rotorku, tak

k mazání ložiska. Sestava zkrucovacího zařízení je v posledním provedení na obr. 4. Do dutiny statorku je přiváděn vzduch ze vzdušníku přes redukční ventil. Ve statoru jsou tangenciálně zasazeny čtyři Lavalovy trysky skloněné pod určitým úhlem k rovnoběžce kružnici ve směru rotace. Nadkritickou rychlostí proudící vzduch z trysek a stržený vzduch z mezery pod tryskami vytváří rotační tlakový vzduchový polštář, na kterém plave rotorek opatřený "lopatkováním". Zařízení v tomto provedení dosahuje otáček 2500 s^{-1} .



Obr. 4
Sestava zkrucovacího zařízení

3.2 Stanovení některých parametrů

V prvním provedení bylo použito trysek zúžených, vrtaných přímo do stěny statorku.

Zvoleno:

- 1) Velikost kritického průřezu trysek - S_k .
- 2) Počet otáček rotorku - n .
- 3) Tvar "lopatkování".
- 4) Velikost tlaku vzduchu před tryskami - $p_{(o)}$.
- 5) Velikost tlaku vzduchu za tryskami - p_1 .

Počítáno:

- 1) Průtoková hmotnost vzduchu.
- 2) Krouticí moment - výkon na obvodě.

Proudění v trysce je turbulentní, bude se tedy jednat o pochod se ztrátami, výměna tepla s okolím je zde nepatrná a je možno ji zanedbat. Podmínka pro tento pochod bude:

- a) Teplo přivedené z venku nebo odvedené na venek je rovno nule, $q_{(o),l} = 0$.
- b) Teplo vzniklé vnitřním třením a třením o stěny není rovno nule, $q_z > 0$.

Z rovnice polytropy je určen koeficient polytropy:

$$p_{(o)} \cdot v_{(o)}^n = p_1 \cdot v_1^n; \quad n = \frac{\log \frac{v_1}{v_{(o)}}}{\log \frac{p_{(o)}}{p_1}}$$

přičemž

$$v_{(o)} = \frac{R \cdot T_{(o)}}{p_{(o)}}; \quad v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1}, \quad T_1 = T_{(o)} \left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Výstupní rychlost z trysky:

$$\text{Platí zde režim: } \frac{p_1}{p_{(o)}} = \beta < \beta_k$$

Potom pro zúženou trysku bude

$$c_1 = \sqrt{2 \frac{K}{K+1} \frac{n-1}{n+1} \cdot p_{(0)} \cdot v_{(0)}} = k \sqrt{R \cdot T_{(0)}} \quad (3.1)$$

Průtoková hmotnost vzduchu pro daný režim:

$$M = S_K \cdot \sqrt{2 \frac{K}{K+1} \cdot \frac{n-1}{n+1} \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{2}{n-1}}} \cdot \sqrt{\frac{p(o)}{v(o)}} \quad (3.2)$$

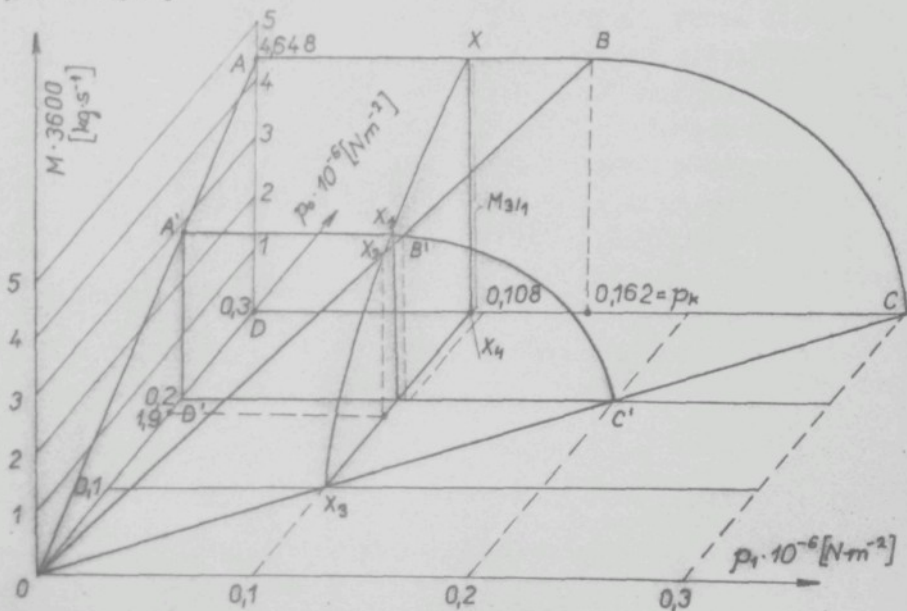
Pro $\varnothing d_K = 1 \text{ mm}$ je $S_K = 0,785 \text{ mm}^2$.

Pro tlak $p_{(0)} = 30 \cdot 10^3 \cdot 9,806 \text{ N m}^{-2}$

$$P_1 = 10 \cdot 10^3 \cdot 9,806 \text{ N m}^{-2}$$
$$T_{(0)} = 313^{\circ}\text{K} \quad (40^{\circ}\text{C} \text{ z kompresoru})$$

vyšla ze vztahu (3.1) rychlost $c_1 = 198 \text{ m s}^{-1}$

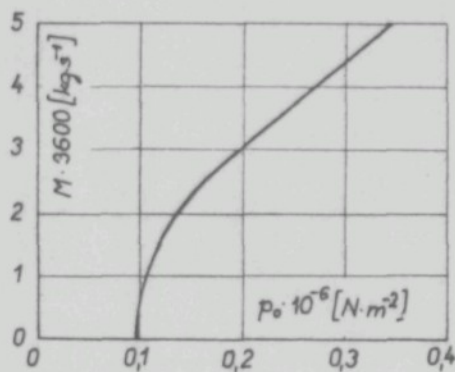
a ze vztahu (3.2) průtoková hmotnost $M = \frac{4,648}{3600} \text{ kg s}^{-1}$
pro 4 trysky.



Obr. 5 Průtokový kužel

Závislost průtokové hmotnosti na tlaku vzduchu před tryskou dává průtokový kužel podle obr. 5.

Řez A-B-C-D kuželem po čáře $p_{(0)} = 0,3 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}$ vedeným kolmo na stěnu O-A-D a řez $x-x_3-x_4$ kuželem po čáře $p_{(0)} = 0,1 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}$, rovnoběžně se stěnou O-A-D dává průsečnicí $x-x_4$, jejíž velikost udává průtokovou hmotnost při uvedených parametrech. Pro tlak $p_{(0)} = 0,2 \cdot 10^6$ platí řez A'-B'-C'-D', v němž velikost průsečnice s řezem $x-x_3-x_4$ udává průtokovou hmotnost. Z obr. 5 je vidět, že koncové body průsečnic, které udávají průtokovou hmotnost, leží na přímce $x-x_2$ a na hyperbole x_2-x_3 . Lze tedy závislost průtokové hmotnosti na vstupním tlaku $p_{(0)}$ a konstantním tlaku p_1 nakreslit do grafu - obr. 6.



Obr. 6

Závislost průtokové hmotnosti
na tlaku $p_{(0)}$

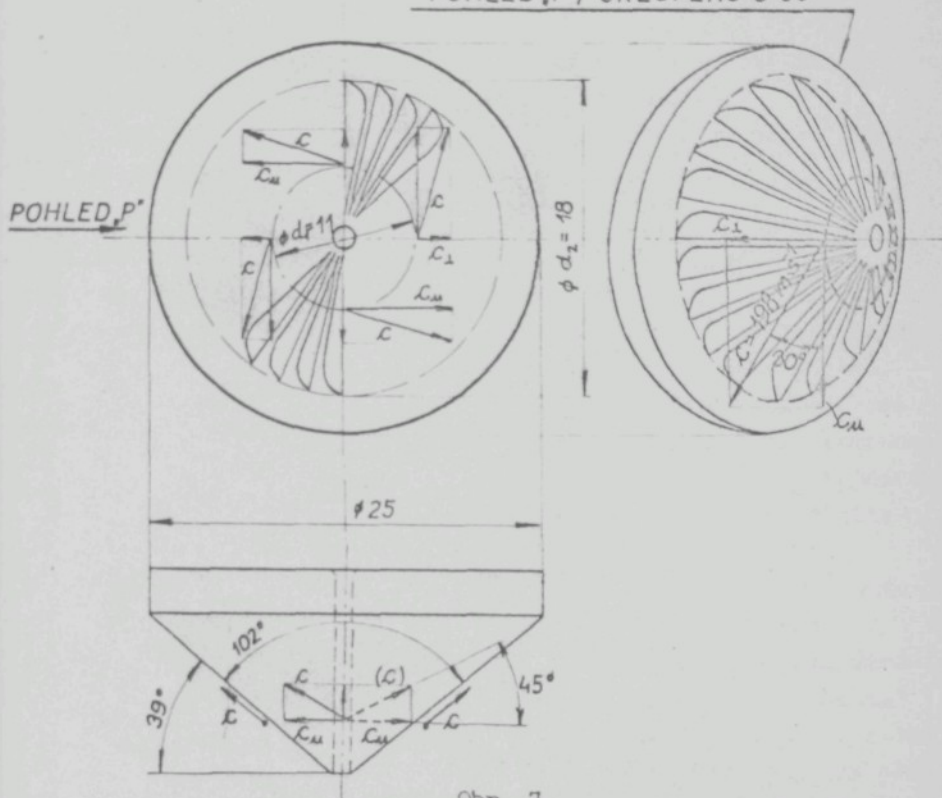
Účinky proudů vzduchu vystupujících z trysky na rotorek je možno v hrubém přiblížení vyjádřit, když se připustí srovnání se vzduchovou turbínkou. Potom část vzduchu proudí rotujícím "kanálkem" (drážkou na plášti kužele rotorku) a kinetická energie proudu se přeměňuje na mechanickou práci. Jelikož směr proudu vzduchu svírá s osou rotace úhel 51° , lze toto uspořádání nazvat radiál-

ně axiální / 6 /. Krouticí moment od účinku pracovní látky na "lopatky" rotorku jest:

$$M_k = M \cdot (c_{1u} \cdot r_1 - c_{2u} \cdot r_2) \dots / \text{N m} / , \quad (3.3)$$

kde c_{1u} , c_{2u} jsou složky absolutní rychlosti do směru obvodové rychlosti u - viz obr. 7.

POHLED P'' , SKLOPENO O 39°



Obr. 7

Rozklad rychlostí na rotorku

$$\begin{aligned} \text{Výkon: } P &= M_k \cdot \omega = M (c_{1u} u_1 - c_{2u} u_2) \\ &= M (c_1 \cos \alpha_1 \cdot u_1 - c_2 \cos \alpha_2 \cdot u_2) \end{aligned}$$

Z rychlostních trojúhelníků na obr. 8 plyne, že $c_1 \cos \alpha_1 = w_1 \cos \beta_1 + u_1$, $c_2 \cos \alpha_2 = u_2$,

potom také

$$P = M (w_1 \cos \beta_1 \cdot u_1 + u_1^2 - u_2^2)$$

Pro $d_1 = 12 \text{ mm}$, $d_2 = 18 \text{ mm}$ při $n = 1670 \text{ s}^{-1}$ činí obvodové

rychlosti $u_1 = 63$, $u_2 = 94 \text{ m s}^{-1}$.

Po dosazení do rovnice pro výkon bude výkon na obvodě

$$P = 2,3 \text{ W.}$$

S ohledem na to, že určitá část průtokové hmotnosti proudí mezery mimo "kanálky" nutno výkon P úměrně snížit.

Pro konstrukci rychlostních trojúhelníků je třeba ještě určit relativní rychlost w_2 . Podle / 7 / platí:

$$w_2 = \sqrt{u_2^2 - u_1^2 + w_1^2 + 2 h_0}$$

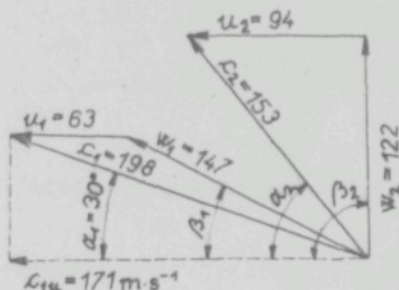
kde h_0 je spád zpracovaný v oběžných "kanálech". S ohledem na naměřené malé tlakové rozdíly je možno počítat, že "lopatková-

ní" je rovnotlakové.

Pro jednoduchost bude vliv tepelného (ztraceného spádu) h_0 vyjádřen průtokovým součinitelem ψ .

Po dosazení bude rychlost w_2 rovna 163 m s^{-1} . Velké ztráty třením v "kanálku" extrémně malých rozměrů jsou zde vyjádřeny průtokovým součinitelem

$\psi = 0,75$ a tedy rychlost w_2 skutečná $= 122 \text{ m s}^{-1}$.



Obr. 8

Rychlostní trojúhelníky

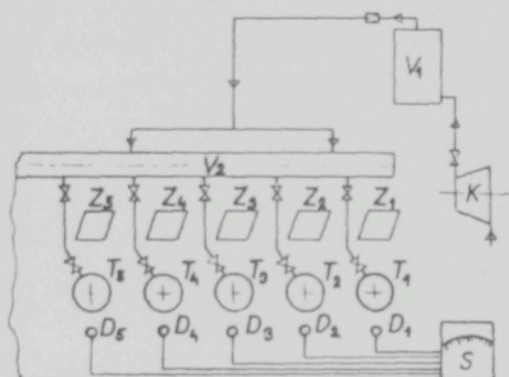
Plocha rovnoběžníků rychlostí c ; w ; u ; bude ležet v tečné rovině kužele rotorku - viz obr. 7. Na obr. 8 jsou výsledné rychlostní trojúhelníky.

3.3 Regulace otáček

Pro stejnoměrný počet zákrutů na 1 metr délky u každé jednotky je při provozu stroje s více jednotkami třeba zajistit regulaci otáček. Pro ověřovací prototyp stroje pro 50 zakruco-

vacích vřeten byla navržena a použita regulace pomocí stroboskopu, jejíž schema je na obr. 9.

Na stroboskop S byly připojeny doutnavky D, které všechny mají kmity tónového generátoru stroboskopu. U zkrucovacích vřeten byla vhodně postavena zrcátka Z, která zvětšovala. Potřebný počet otáček - kmitů se nastavil centrálně na stroboskopu. Re-



Obr. 9

Schéma regulace otáček

gulačními ventily byl pak nastaven takový pří-
vod vzduchu, aby počet
otáček rotorku byl to-
tožný s kmity doutnavky.
Obraz otáčejícího se
rotorku se zdánlivě za-
stavil. Za provozu po-
tom obsluhující perso-
nál pozoroval občas
obraz rotorku v zrcátku.
Ukázalo se, že když
"stroboskopické otáče-
ní" rotorku na jednu
nebo druhou stranu by-
lo okem viditelné, by-

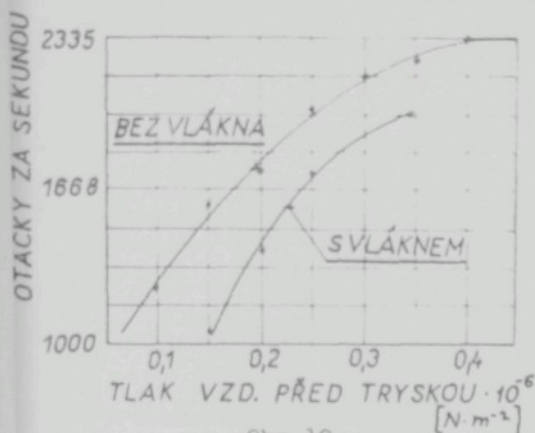
ly otáčky ještě v mezích přípustné tolerance počtu zákrutů. Změna zákrutů o 1 % a tedy změna otáček o 2 % nemá vliv na kva-
litu tvarování. Např. 2 % z otáček 1670 s^{-1} je 33 otáček a to
již otáčení je nepozorovatelné. Dále bylo zjištěno, že malá
změna tlaku vzduchu $0,01 \cdot 10^{-6} \text{ N m}^{-2}$ nemá tak velký vliv na zmē-
nu otáček, aby otáčky vystoupily z přípustné tolerance. Pro vy-
rovnání změn v odběru vzduchu byly použity vzdušníky V_1 a V_2 .
Vývoj ostatních důležitých elementů jako je např. fixační tě-
leso šterbinového typu, regulátoru fixační teploty, vývoj tva-
ru rotorku s ohledem na jeho namáhání a jiné je popsán ve vý-
zkumné práci katedry / 8 /.

3.4 Prototyp na 50 zakrucovacích vřeten a výsledky zkoušek

Na základě výsledků získaných na pokusném zařízení - viz příloha č. 2, byl navržen a postaven prototyp stroje na 50 zakrucovacích vřeten - viz příloha č. 3. Zkušební z ověřovacího provozu potvrdily, že tvarování při větším počtu vřeten je reálné.

Podrobné hodnocení kvality tvarovaného vlákna a úpletů z něho provedl ve své zprávě / 9 / Výzkumný ústav pletářský v Brně.

V příloze č. 4 je fotografie vzorků tvarované příze 40 den a v příloze č. 5 pletenina, vyrobená z přízí tvarovaných na prototypu. Na obr. 10 je závislost otáček na tlaku vzduchu za-



Obr.10

Závislost otáček na tlaku
vzduchu před tryskou

krucovacího zařízení na prototypu.

3.5 Možnosti zmenšování spotřeby vzduchu

Pro ekonomii při použití aerostatického kuželového ložiska, kde vzduch slouží jak k mazání tak pro pohon, je třeba hledat všechny možnosti snížení spotřeby vzduchu, poněvadž přes prudké zvýšení otáček a tím i pronikavé zvýšení produkce, je stlačený vzduch drahý. Nabízejí se tyto možnosti:

a) Použití rozšířené trysky Lavalovy

Jsou-li použity trysky zúžené bez Lavalova nátrubku je možno rozlišit provoz podle poměru tlaků před a za tryskou. Předpoklad je, že se jedná o pochod se ztrátami bez výměny tepla z vnějšku.

$$\text{Provoz při } \beta = \frac{p_1}{p_{(o)}} > \beta_{kr} ,$$

příčemž pro vzduch je $\beta_{kr} = \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K}{K-1}} = 0,528$.

Fotom pro rychlost platí:

$$c_1 = \sqrt{2 \frac{K}{K-1} p_{(o)} \cdot v_{(o)} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]} \quad (3.4)$$

a pro průtokovou hmotu z rovnice kontinuity plyne

$$M = S_1 \sqrt{2 \frac{K}{K-1} \frac{p_{(o)}}{v_{(o)}} \left[\left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]} \quad (3.5)$$

Provoz při $\beta \leq \beta_{kr}$:

Pro rychlost platí:

$$c_1 = \sqrt{2 \frac{K}{K-1} \frac{n-1}{n+1} \cdot p_{(o)} \cdot v_{(o)}} = \nu \cdot \sqrt{p_{(o)} \cdot v_{(o)}} = \nu \cdot \sqrt{T_{(o)}} \quad (3.6)$$

a průtoková hmotnost:

$$M = S_1 \sqrt{2 \frac{K}{K-1} \frac{n-1}{n+1} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{2}{n-1}} \cdot \frac{p_{(o)}}{v_{(o)}}} = \chi S_1 \sqrt{\frac{p_{(o)}}{v_{(o)}}} = \chi S_1 \sqrt{\frac{p_{(o)}}{R \cdot T_{(o)}}} \quad (3.7)$$

Rovnice (3.6) ukazuje, že při zvyšování přivodního tlaku $p_{(o)}$, nebude se výstupní rychlost měnit, neboť podle Boyle-Mariottova zákona se při zvyšování tlaku $p_{(o)}$ snižuje měrný objem $v_{(o)}$. Tento zákon je vyjádřen rovnocinnou hyperbolou a součin $p_{(o)} \cdot v_{(o)}$ se při konstantní $T_{(o)}$ nemění.

Průtoková hmotnost se však podle (3.7) s tlakem $p_{(o)}$ mění, jak je pro tlaky $p_{(o)}$, $p'_{(o)}$, $p''_{(o)}$ vidět na obr. 11.

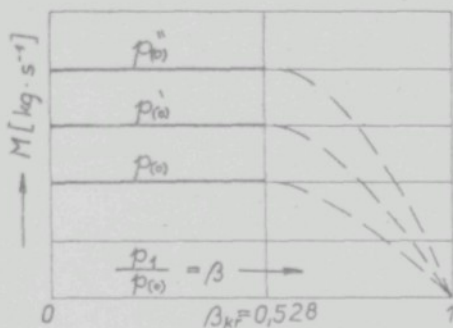
Zvyšuje-li se průtoková hmotnost při konstantní rychlosti a konstantní průtokové ploše S_1 , musí se podle rovnice kontinuity zvětšovat měrná hmotnost ρ (hustota) neboť platí:

$$M = \rho \cdot S_1 \cdot c_1$$

příčemž měrná hmotnost se mění podle stavové rovnice.

Při použití zúžené trysky bez Lavalova nátrubku za provozu

$\beta < 0,528$ je-li $p_{(o)}$ neměnné se průtoková hmotnost a rychlost již nezvyšuje a tedy ani výkon na obvodě, který je průtokové hmotě a rychlosti přímo úměrný. Je-li za tohoto režimu zvýšen tlak $p_{(o)}$, potom průtoková hmota roste, avšak rychlost při konstantní teplotě $T_{(o)}$ se již nemění.



Obr. 11

Závislost M na změně
počátečního tlaku

Nedostatkem zúžující se trysky bez Lavalova nátrubku je tedy nedávné využití celého tlakového spádu, který je k dispozici. Při použité zúžené trysce dimensované při vstupním tlaku $0,3 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}$ je využit tlakový spád jen do tlaku $0,162 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}$ přesto, že za tryskou je tlak

$0,1 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}$. Vyšrafovaná plocha v diagramu $p-v$ na obr. 12a při zanedbání ztrát značí mechanickou energii, která vznikla přeměnou při expansi v zúžené trysce. Vyšrafovaná plocha na obr. 12b značí mechanickou energii získanou přeměnou při expansi v Lavalově trysce. Z diagramu $p-v$ však není patrné, jaká část mechanické energie byla ztracena třením v trysce a jaký je zbytek, který lze skutečně využít. To je názorné při zobrazení expance v diagramu $T-s$, když od šrafované plochy označené (+) se odečte šrafovaná plocha označená (-) jak ukazuje obr. 12c, d. Proto pro získání větších výstupních rychlostí než je rychlost kritická a k úplnému využití tlakového spádu je nutno použít trysky Lavalovy.

Pro výstupní rychlost u zúžené trysky při polytropické expansi platí

$$c_1 = \sqrt{2 \frac{K}{K+1} \frac{n-1}{n+1} p_{(o)} v_{(o)}} \quad (3.8)$$

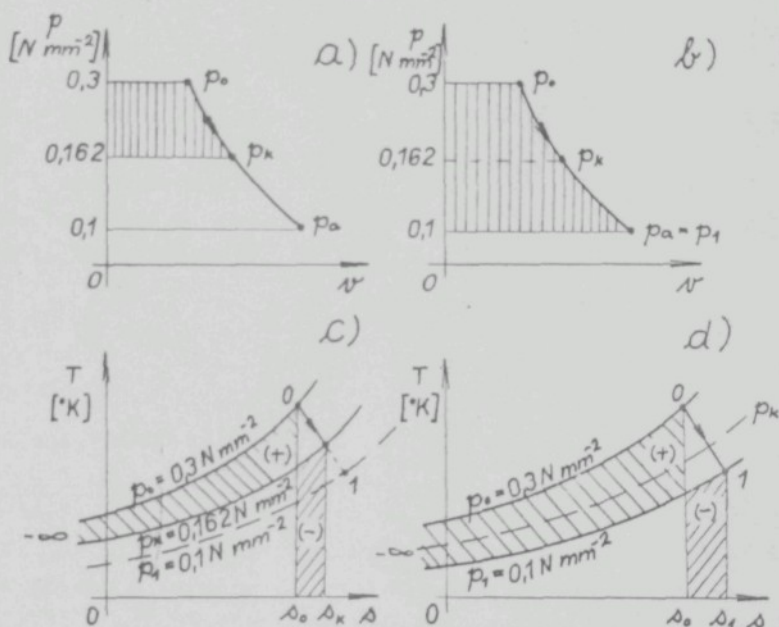
a pro Lavalovu trysku

$$c_1 = \sqrt{\frac{2K}{K-1} p_{(o)} v_{(o)} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]} \quad (3.9)$$

Jelikož výkon na obvodě

$$P = M (c_{1u} \cdot u_1 - c_{2u} \cdot u_2) ,$$

je přímo úměrný hmotnosti vzduchu a obvodovým složkám rychlosti, bude při použití Lavalovy trysky při stejné průtokové hmotnosti M a obvodové rychlosti u_1, u_2 výkon větší než u trysky zúžené.



Obr. 12

Průběh expanse v $p-v$ a $T-s$ diagramu

To vše za předpokladu, že se složka rychlosti c_{2u} také mění.

Použije-li se tedy za jinak stejných okolností Lavalova tryska, vystačí se s menším množstvím pracovní látky M .

b) Zvýšení vstupní teploty vzduchu

Pro průtokovou hmotnost kritickým průřezem platí pro trysku Lavalovu i zúženou vztah při adiabatickém proudění:

$$M = \frac{S_{kr} \cdot C_{kr}}{v_{kr}}, \text{ kde:}$$

$$C_{kr} = \sqrt{2 \frac{K}{K+1} \cdot p_{(o)} \cdot v_{(o)}} \\ v_{kr} = v_{(o)} \cdot \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{1}{K-1}}$$

$$\text{Potom: } M = S_{kr} \cdot v^* \cdot \sqrt{\frac{p_{(o)}}{v_{(o)}}} = S_{kr} \cdot v^* \cdot \frac{p_{(o)}}{\sqrt{R \cdot T_{(o)}}}$$

$$\text{kde konstanta } v^* = \sqrt{2 \frac{K}{K+1} \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{2}{K-1}}}$$

Tedy průtoková hmotnost M je nepřímo úměrná odmocnině z počáteční teploty a jejím zvyšováním zmenšuje se M .

K daným hodnotám $p_{(o)}$, p_1 , T_1 a M lze určit změnšnou průtokovou hmotnost M' pro jinou počáteční teplotu $T'_{(o)}$ s stejné hodnoty obou tlaků:

$$M = S_{kr} \cdot k \cdot \frac{p_{(o)}}{\sqrt{R \cdot T_{(o)}}}; \quad M' = S_{kr} \cdot k \cdot \frac{p_{(o)}}{\sqrt{R \cdot T'_{(o)}}}$$

$$\text{Z dělení vztahů plyne: } M' = M \cdot \sqrt{\frac{T_{(o)}}{T'_{(o)}}} \quad (3.10)$$

Tak např. pro tlak před tryskou 30 N mm^{-2} a při počáteční teplotě $T_{(o)} = 313 \text{ }^\circ\text{K}$ lze vypočítat při polytropické expansi v Lavalově trysce o průměru $d_{kr} = 0,71 \text{ mm}$ průtokovou hmotnost $M = 1,31 \text{ g s}^{-1}$. Zvýšení vstupní teploty při kompresi za předpokladu, že kompresní děj probíhá polytropicky při $n = 1,35$ bude při počáteční teplotě $T_{(o)} = 293 \text{ }^\circ\text{K}$:

$$T_1 = T_{(o)} \left[\frac{p_1}{p_{(o)}} \right]^{\frac{n-1}{n}} = 376 \text{ }^\circ\text{K} \Rightarrow t_1 = 103 \text{ }^\circ\text{C},$$

což je teplota $T'_{(o)}$ před tryskou.

Po dosazení do vztahu (3.10) platí pro novou průtokovou hmotnost vzduchu

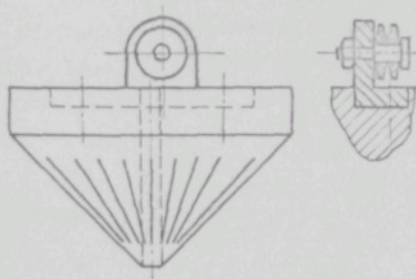
$$M' = 1,31 \sqrt{\frac{313}{376}} = 1,18 \text{ g s}^{-1}.$$

Průtoková hmotnost se zmenší o 10 %.

Zvyšování počáteční teploty až na určitou přípustnou mez bude záviset od použití tohoto ložiska. Tak např. při použití na tvarování polyamidových vláken se zvětšování teploty příznivě projeví na spotřebě vzduchu. Pro kvalitu fixování je podle / 10 / výhodné po fixaci vlákno rychle ochladit. Jelikož hnačí vzduch z trysek proudí mimo vlákno nebude mu jeho ohřátí vadit. Naopak vlákno bude ochlazováno přisávaným vzduchem proudícím přes otvor v ose statorku - viz obr. 1.

c) Zmenšením ventilačních ztrát:

Bylo provedeno velmi mnoho zkoušek pro určení optimálního opásání vlákna na rotorku, aby bylo zajištěno zakrucování bez skluzu avšak při minimálním tření. Různé způsoby uchycení jsou na obrázcích 1 ÷ 12 - viz příloha č. 6. S ohledem na snižování napětí ve vlákne při jeho nuceném posuvu vyhovuje nejlépe uspořádání rotorku podle obr. 13. Toto uspořádání mělo největší ventilační ztráty.



Obr. 13

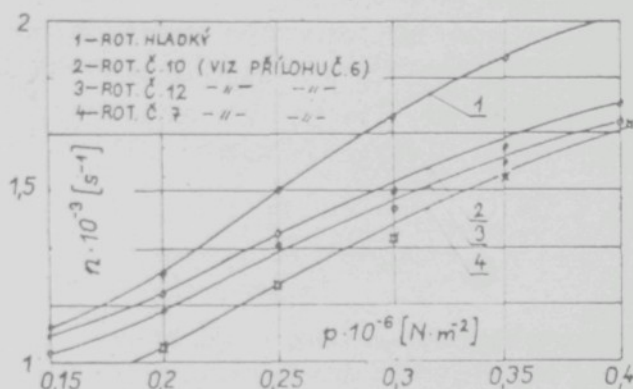
Rotorek s kladičkou pro uchycení vlákna

Proto konsolka nesoucí kladičku byla zapuštěna do vybrání v rotorku - viz obr. 10 v příloze č. 6. Ventilační ztráty se zmenšily, otáčky při stejném tlaku se zvětšily, avšak nevýhodou se ukázaly nepříznivé pevnostní poměry v rotorku. Konečným řešením byl rotorek s kruhovým vybráním na čele, do něhož byla zapuštěna očka z kaleného drátu pro uchycení vlákna - uspořádání je na obr. 12 v příloze č. 6.

Na obr. 14 jsou některé výsledky zkoušek zmenšování ventilačních ztrát uvedené závislosti otáček na tlaku před tryskami. Pro srovnání v grafu uvedena závislost $n = f(p_{(0)})$ pro

rotorek bez zařízení pro uchycení vlákna.

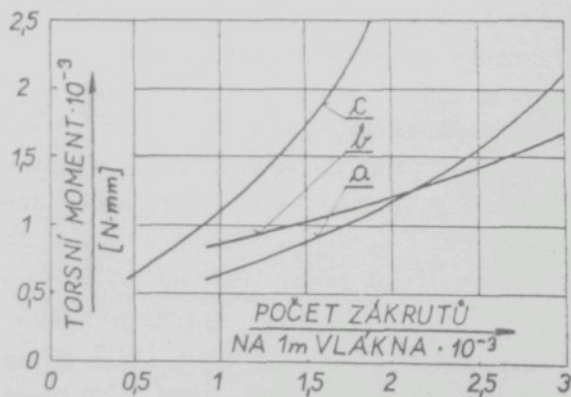
Pro zjištění, má-li smysl zabývat se zmenšováním ventilačních stínit bylo provedeno měření rozdělení krouticího momentu potřebného na vlastní zakrucování a na krytí ventilačních



Obr. 14

Závislost otáček na tlaku před tryskami pro různé rotorky

ztrát. Na maďarském přístroji "Electric torsion moment testr" byl změřen torzní moment silonového vlákna a to pro různý počet zákrutů na jeden metr vlákna. Výsledky jsou na obr. 15.



Obr. 15

Výsledky měření torzního momentu

Křivka a platí pro zákrut Z silonového vlákna 40 den při počátečním zákrutu 30 Z. (Zákrut Z - pravotočivý, zákrut S - levootočivý.) Křivka b platí pro zákrut S silonového vlákna 40 den při počátečním zákrutu 30 Z. Křivka c platí pro Z zákrut chemlonového vlákna 60 den 12 kepilár při počátečním zákrutu 120 Z.

Z výsledků tohoto měření byly metodou nejmenších čtverců vypočteny koeficienty empirických vzorců pro torzní momenty:

$$M = 0,372 \cdot 98,06 \cdot X \cdot D^2 \cdot 10^{-3} / N \text{ mm} / , \quad (3.11)$$

nebo

$$M = 9,806 \cdot 10^{-6} (0,151^{-4} + 0,93 \cdot 10^{-8} \cdot X^2) D^2 / N \text{ mm} / , \quad (3.12)$$

kde: X - počet zákrutů na 1 m vlákna
D - titr denier vlákna.

Z těchto vztahů lze vypočítat krouticí moment pro různé hodnoty X a D, přičemž vypočtené hodnoty nutno považovat za orientační.

Vzhledem k tomu, že při tvarování nepravým zákrutem je jedna polovina délky zkrucovaného vlákna vystavena tepelnému působení a vlákno je termoplastické, lze předpokládat, že skutečné torzní momenty vznikající při tvarování ve vlákne jsou nižší než hodnoty na obr. 15, jež byly získány bez tepelného působení.

Vpředu byl spočítán výkon $P = 23 \text{ W}$ na obvodě rotorku při otáčkách $n = 1670 \text{ s}^{-1}$. (Ve skutečnosti výkon P bude menší s ohledem na část hmotnosti vzduchu, jež proudí mimo "lopatkový kanálek". Tuto část lze určit ze znalosti objemu v mezeře mezi rotorkem a statorkem při daném zdvihu h a známém objemu mezi "lopatkami" na statorku.)

Potom krouticí moment

$$M_k = \frac{P}{2 \pi n} = \frac{2,3}{2 \pi \cdot 1670} = 0,2182 \text{ N mm}.$$

Pro vlákno 40 den a 3000 zákrutů na 1 m podle obr. 15 činí torzní moment $M_k = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ N mm}$.

Pro vlákno 120 den a 2500 zákrutů na 1 m podle vztahu (44) činí $M_k = 13,4 \cdot 10^{-3} \text{ N mm}$.

Z uvedeného vyplývá, že z celkového krouticího momentu rotorku připadá na vlastní zkrucování u vlákna 40 den jen cca 1 % a u vlákna 120 den jen cca 6 %. Ostatní výkon se spotřebuje na přemáhání ventilačních odporů rotorku, ventilačních odporů "rotujícího" vlákna a třecích odporů vlákna ve fixačním tělese. Ukazuje se tedy, že ventilační ztráty mají rozhodující vliv na velikost otáček rotorku, respektive na spotřebu vzduchu.

Velikost ventilačních ztrát řešil teoreticky Karmán /11/, Schultz /12/ a pokusně též prof. Miškovský u fy BBC pro oběžná kola parních turbin. Podle těchto prací lze ventilační ztráty rotujícího kotouče ve vzduchu vyjádřit vztahem:

$$P = 3,2 \cdot D^{4,6} \left(\frac{n}{1000} \right)^{2,8} \frac{p^{0,8}}{T} \cdot 10^{-3}, \quad / \text{ W } / \quad (3.13)$$

kde: D - průměr kotouče v metrech

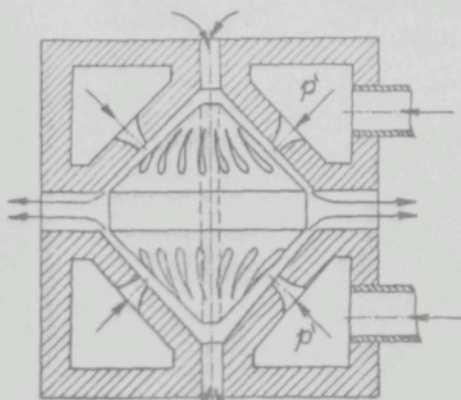
n - otáčky za minutu

p - tlak vzduchu v kp.cm^{-2}

T - absolutní teplota ve $^{\circ}\text{K}$

K ventilačním ztrátám u rotorku dochází jen na čelní ploše nahofe, částečně na obvodovém zakončení rotorku. Je tedy třeba

na horní plochy zbavit.



Obr. 16 Návrh na zmenšení ventilačních ztrát

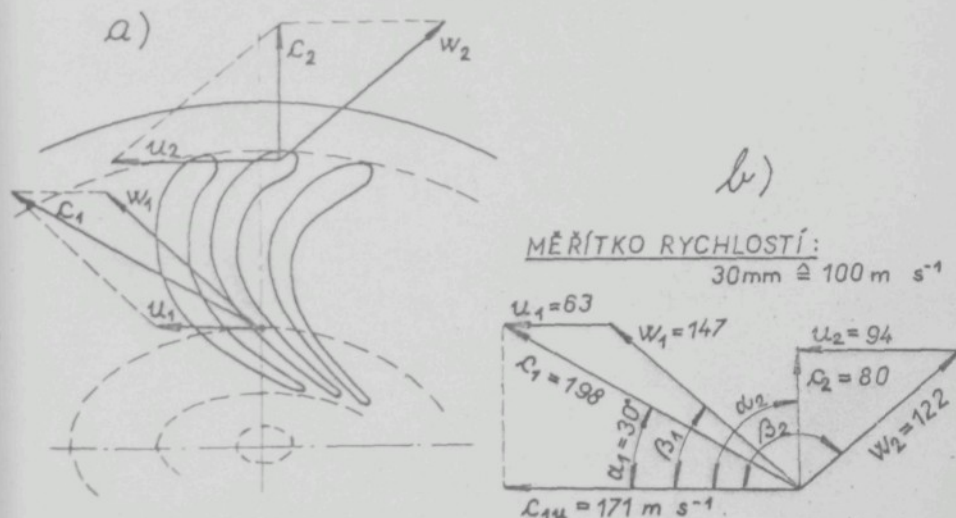
Progresivní řešení tohoto problému nabízí námět, jehož princip je na obr. 16.

Konstrukční uspořádání rotorku i statorku provést ve tvaru oboustranného kužele a statorek osadit tryskami na horní i spodní polovině. Hlavní ventilační ztrátu, která vznikala na čele rotorku, kde se nejvíce uplatňoval vliv elementu pro uchycení vlákna na rotorek

by se takto podstatně zmenšila. K řešení by však zůstalo vhodné bezprokluzné uchycení vlákna uvnitř statorku. Byly zahájeny pokusy pro experimentální ověření uvedeného návrhu na zařízení podle obrázku na příloze č. 7.

d) Správným zakřivením "lopatek" rotorku

"Lopatky" na rotorku, který je zatím používán jsou vytvořeny radiálním drážkováním povrchu kužele rotorku - podle obr. 7. Z rychlostních trojúhelníků podle obr. 8 plyne, že proud vzduchu vzhledem k otáčejícímu se rotorku má vstupovat do "lopatkového kanálku" relativní rychlostí w_1 pod úhlem $\beta_1 < 90^\circ$. Lopatkový kanálek je však proveden pod úhlem $\beta_1 = 90^\circ$. Tím vzniká ráz a s tím spojené ztráty. Také úhel β_2 je nepříznivý. To se projevuje na výkonu. Upravené bezrázové zakřivení "lopatek" při nejmenší výstupní ztrátě pro stejnou absolutní rychlost c_1 a stejné otáčky je ve srovnání s obr. 8 uvedeno na obr. 17.



Obr. 17
Zakřivení "lopatek"

Při upraveném zakřivení "lopatek"

pro $c_1 = 198 \text{ m s}^{-1}$; $u_1 = 63 \text{ m s}^{-1}$, $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 90^\circ$
a $M = 1,29 \text{ g s}^{-1}$ bude výkon:

$$P = M (c_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot u_1 - c_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdot u_2) = 13,85 \text{ W},$$

kdežto při radiálním nezakřiveném "lopatkování" byl výkon
 $P = 2,3 \text{ W}$.

Je samozřejmé, že zisk na výkonu bude mnohem menší a to proto, že jen určitá část vzduchu bude proudit v zakřivených kanálkách a druhá část proudí volnou mezerou mezi statorkem a rotorkem, jejíž velikost je dána zdvihem h .

Zakřivené lopatkování bylo použito při osazení Lavalovými tryskami pro otáčky 1670 s^{-1} , 2500 s^{-1} , 3340 s^{-1} a 4170 s^{-1} podle rozměrů uvedených v příloze č. 8 a po zajištění vyššího tlaku vzduchu z kompresoru, nebo po osazení větším množstvím trysek bude provedeno měření.

Se zakřiveným lopatkováním dosáhl mechanik Čížinský na Karlově universitě v Praze přes 5000 otáček za sekundu.

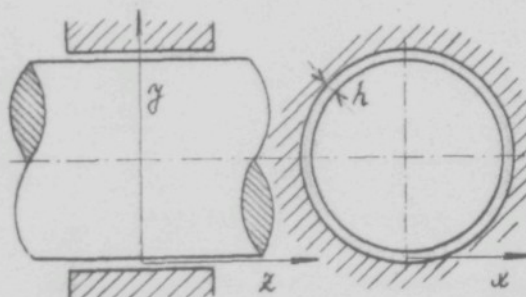
4.0 Současný stav poznatků o řešení proudění v mezeře aerostatických ložisek

Proudění skutečné vzdušiny v mezeře aerostatického ložiska obecně popisují Navier-Stokesovy rovnice, jež zachycují účinky tlakových a hmotových sil, jak to vyplývá z pohybového Newtonova zákona a dále účinky třecích sil plynoucích z viskozity vzdušiny. Pro laminární proudění mají rovnice tvar:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dc_x}{dt} &= \rho \cdot X - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \cdot \nabla^2 \cdot c_x + \frac{1}{3} \cdot \eta \cdot \frac{\partial}{\partial x} \Delta \\ \rho \frac{dc_y}{dt} &= \rho \cdot Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \cdot \nabla^2 \cdot c_y + \frac{1}{3} \cdot \eta \cdot \frac{\partial}{\partial y} \Delta \\ \rho \frac{dc_z}{dt} &= \rho \cdot Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \cdot \nabla^2 \cdot c_z + \frac{1}{3} \cdot \eta \cdot \frac{\partial}{\partial z} \Delta \end{aligned} \right\} (4.1)$$

Kde X, Y, Z jsou složky tíhových sil a symboly ∇^2 a Δ mají význam:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; \quad \Delta = \frac{\partial c_x}{\partial x} + \frac{\partial c_y}{\partial y} + \frac{\partial c_z}{\partial z}$$



Obr. 17a

Souřadný systém

Zavedený souřadný systém je na obr. 17a.

Rovnice lze řešit jen za určitých zjednodušujících předpokladů:

- 1) Účinek setrvačných sil se zanedbává.
- 2) Proudění je stacionární.
- 3) Zanedbávají se rychlosti

ve směru kolmém k tečné rovině ložiska.

- 4) Převládající je viskozní napětí $\gamma \cdot \frac{\partial c_z}{\partial y}$ a $\gamma \frac{\partial c_z}{\partial y}$ a ostatní jsou zanedbány.

Za těchto zjednodušení se Navier-Stokesovy rovnice redukuje na:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \gamma \frac{\partial^2 c_x}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \gamma \frac{\partial^2 c_z}{\partial y^2} \quad (4.2)$$

Řešením těchto rovnic za použití stavové rovnice a rovnice kontinuity se dojde k Reynoldsově nelineární parciální rovnici druhého řádu:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\gamma} \cdot p^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\gamma} \cdot p^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \frac{\partial}{\partial x} \left(h \cdot p^{\frac{1}{n}} \right) \quad (4.3)$$

Pro výpočet tlaku z Reynoldsovy rovnice je třeba opět provést řadu zjednodušujících předpokladů a proto existuje různé její řešení. Řešení je i tak komplikované pro stlačitelné mazání a pro přibližné řešení je v současné době nutné použít číslicového počítače.

Známa je Šejnbergova metoda řešení, popsána v / 1 / a / 22 / a experimentálně ověřena / 23 /.

Tato metoda předpokládá: $\gamma(t, p) = \text{konst.}$, $\rho(t) = \text{konst.}$, $Re \geq 2000$; isotermický proces a rychlostí proudění vzduchu ve štrbině menší než 400 m.s^{-1} . Jedná se v podstatě o řešení Reynoldsovy rovnice přičemž mimo uvedených zjednodušení je výpočet usnadněn zavedením bezrozměrných veličin a charakteristických čísel.

Jsou to: Charakteristické ložiskové číslo $\Lambda = \frac{\gamma \omega r^2}{c_p^2}$,

relativní výstřednost $\lambda = \frac{e}{c}$,

poměrná šířka ložiska $\frac{L}{D}$,

kde c je radiální ložisková vůle.

Licht ve své práci / 24 / pro řešení proudění v plochých a kuželových aerostatických ložiskách používá analogie elektric-

kého pole k poli tlakovému. Nejprve vhodně redukuje rovnici, která představuje tlakové pole plynových ložisek na Laplaceův tvar. S ním pak pracuje pomocí modelu vodičícího listu a přístroje na zakreslování pole elektrického napětí s použitím elektrolytické vany.

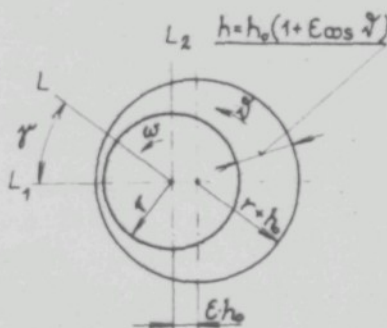
Loch ve své práci / 25 / za předpokladů, že h je konstantní, proudění isothermické a laminární, a dále že plyn je ideální, řeší proudění metodou "jednotkových nosných polí" s použitím pokusných hodnot a tím si vytváří obraz o celém ložisku. Ve II.dílu této práce uvedenou metodou řeší i kuželová ložiska radiálně axiální.

Ausman a Downey / 26 / vycházejí z Reynoldsovy rovnice:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{6} \cdot p \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{6} \cdot p \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \frac{\partial}{\partial x} \left(h p \right)^{\frac{1}{n}}$$

a pokládají $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$ a $n = 1$.

Řeší radiální ložisko mazané plynem o neomezené šířce o průřezu



Obr. 17b

Geometrie ložiskové mezery

podle obr. 17b. Aerodynamické působení plynu, který je hnán sinusoidovou šterbinou mezi ložiskem a čepem určuje diferenciální tlakovou sílu na jednotku šířky na ložiskovém čepu.

Pro rovnováhu musí být tlaková síla vyvážena zatížením L na jednotku šířky. Obecně toto zatížení bude působit ve směru daným úhlem φ a bude mít komponenty L_1 a L_2 souběžné a kolmé ke směru vychýlení. Pro-

tože šířka mezery h je malá ve srovnání s poloměrem čepu r , je Reynoldsova rovnice použitelná i když byla odvozena v kartesiánských souřadnicích. Potom rovnice (4,3) přejde na tvar

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(p^{\frac{1}{n}} \cdot h^3 \cdot \frac{dp}{d\varphi} \right) = \lambda \cdot p_0 \cdot k \cdot h_0^2 \cdot \frac{d}{d\varphi} \left(p^{\frac{1}{n}} \cdot h \right), \quad (4.4)$$

$$\text{kde: } \lambda = \frac{6\beta \omega r^2}{k p_0 h_0^2}, \quad \nu = \frac{x}{r}, \quad \omega = \frac{c x}{r}.$$

Rovnice (4.4) je již obyčejná diferenciální rovnice a lze ji integrovat. Další řešení se provádí metodou postupných aproximací, přičemž stačí první tři členy řady, aby výsledek byl srovnatelný s jinými analytickými postupy a praxí vyhovující.

Existují další varianty řešení proudění, tlakového profilu a pak nosnosti přičemž většina z nich pozůstává v tom, že pomocí aproximací se Reynoldsova nelineární rovnice lineari- suje. Další metody se zde neuvádějí, ale lze je najít v pracích jednotlivých autorů uvedených v příloze 1 nebo i v příspěvcích 1. světového symposia o plynových ložiskách.

Z oblasti vzduchových ložisek kuželových, kde expandující vzduch nese a současně pohání, jsou známé práce profesorů Bearuse a Pickelse / 5 /, / 27 /. Avšak tyto a též jiné práce jsou především povahy experimentální. Komplexní analytické řešení kuželového aerostatického ložiska o nestejné tloušťce mezery, která je ve srovnání s tloušťkou normálního aerostatického ložiska cca 10^2 krát větší není známo. Při katedře tepelné a provozní techniky VŠST Liberec byl tento problém řešen s ohledem na stabilitu rotace v rámci práce / 28 /.

Základní otázkou před kterou je řešitel postaven se ukazuje rozhodnutí o charakteru proudění. Při řešení normálního aerostatického ložiska, s ohledem na malou tloušťku mezery (několik tisícín milimetru), jsou pro stanovení tlakového profilu v mezeře rozhodující třecí síly

$$dF = dS \cdot \tau = dS \cdot \beta \frac{dc}{dy}.$$

(tedy nutno počítat s vazkostí vzduchu) a dále síly tlakové. Zanedbávají se síly setrvačné. Reynoldsovo číslo je menší než kritické, proudění je laminární a proto se vychází z rovnic Navier-Stokesových a po zanedbání sil setrvačných se dojde k rovnici Reynoldsové, jež popisuje změny v mezeře. Naproti tomu u ložiska, kde vzduch nese a zároveň pohání, je tloušťka mezery řádově 10^2 krát větší a dosahuje u vrcholu kuželů až

2,5 mm. Rychlosti proudění jsou poměrně vysoké. Reynoldsovo číslo jest zde:

$$Re = \frac{c \cdot d_{ekv}}{\nu}$$

kde: d_{ekv} je ekvivalentní rozměr pro mezikruží

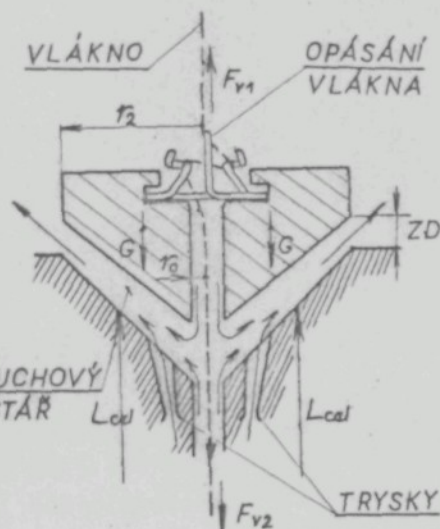
$$d_{ekv} = \frac{4 S}{O_{vvod}} = \frac{4 \cdot \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)}{\pi (d_1 + d_2)} = d_1 - d_2 = 2 h.$$

Při vazkosti vzduchu 20° teplého $\nu = 0,0000157 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ při průměrné tloušťce mezery $h = 0,5 \text{ mm}$ a předpokládané střední rychlosti proudění $c = 50 \text{ m s}^{-1}$ činí $Re \approx 3180$ a platí pro přechodovou oblast mezi prouděním laminárním a turbulentním. To ovšem není uvažovaná turbulentnost daná vířením a třením vlivem rotace "olopatkováného" rotorku. Osy trysek nejsou kolmo na povrchu rotorku, nýbrž prakticky tangenciálně k-povrchu kužele se sklonem k vnějšímu průměru kuželdů. Pro vytvoření vysokých otáček (krouticího momentu) se využívá rychlosti vzduchu expandujícího z trysek. To vše ukazuje, že setrvačné síly budou rozhodující a třecí síly nehrají tak velkou roli. Aby bylo řešení možné, je potom nutné třecí síly dané vazkostí zanedbat a počítat s ideální vzdušinou. Takové proudění popisují rovnice Eulerovy. Proto v tomto řešení je jich použito. Problémem zůstává postihnout turbulenci vlivem "lopatkování" rotorku a osazení statorku jen určitým počtem trysek. V následujícím řešení nebude turbulence uvažována a předpokládá se, že její účinky budou reprezentovat rozdíly mezi analytickými a experimentálními výsledky.

Přes všechny problém idealisující předpoklady však získané zákonitosti mohou dosti věrně postihnout skutečný charakter proudění.

5.0 Proudění v mezikruhové kuželové mezeře nestejné tloušťky

Při tvarování polyamidových vláken nepravým zákrutem vzniká při nuceném posuvu vlákna tahová síla F_{v2} ve směru osy rotorku. Zároveň podle obr.17a ve stejném směru působí i tíhová síla G vlastního rotorku. Proti těmto silám působí v opačném směru síla L od tlaku



Obr.17c

Silové účinky na rotorek

vzduchu v mezeře a síla F_{v1} . Tíhová síla rotorku $G = 0,28 \text{ N}$.
Tahová síla $F_{v2} = F_{v1} \cdot e^{\alpha \cdot f}$
(5.1)

Tahová síla na jeden denier $F_v = 0,001 \pm 0,002 \text{ N den}^{-1}$.

Nosnost

$$L_{cal} = \int_{r_0}^r p \cdot dS / \text{N} / . \quad (5.2)$$

Zatím co tíhová síla je konstantní, mění se tahová síla podle toho jaké vlákno je tvarováno. Tak např. pro vlákno velikosti 60 den bude činit tahová

síla cca 0,1 N, přičemž jednotková tahová síla F_v je funkcí koeficientu tření f vlákna o element a je funkcí úhlu opásání α a samozřejmě síly F_{v1} , kterou lze měřit. Jakmile je tedy tvarováno vlákno o větší tloušťce, zvětší se síly působící ve směru posuvu vlákna a aby byla zachována rovnováha sil musí se zvýšit nosnost L . To je možné dvojím způsobem - buď se zvětší tlak v mezeře tím, že začne protékat více vzduchu a zdvih h se nezmění, nebo pro stejnou průtokovou hmotnost se zvětší tlak tím, že se zmenší zdvih h .

S ohledem na průchod vlákna jsou v rotorku a statorku otvory. Vzduch z trysek proudí velkou rychlostí směrem na vnější průměr a v prostoru mezery pod tryskami vzniká injektorový účinek. Otvory ve statorku a rotorku je přisáván vzduch a jeho množství ovlivňuje nosnost L. Bude tedy záležet i na velikosti otvorů.

Aby mohla být vypočítána nosnost ložiska je podle rovnice (5.2) nutno nalézt nejprve vztah pro rozložení tlaku p po celé délce mezery. Pro jeho snadnější řešení jsou položeny tyto zjednodušující předpoklady:

- 1) Předpokládá se proudění ideálního plynu - bez tření.
- 2) Proudění probíhá při vratné změně adiabatické.
- 3) Uvažuje se hladký rotorek, který se nepohybuje.
- 4) Předpokládá se, že proudění je osově (rotačně) symetrické - velikost složky rychlosti ve směru rovnoběžkových kružnic je konstantní.
- 5) S ohledem na malou tloušťku štěrbin se zanedbávají složky rychlosti kolmo na osu mezery (viz obr. 18) u řešení pomocí Eulerových rovnic v cylindrických souřadnicích, resp. ve směru osy x (viz obr.25) při transformovaných souřadnicích.
- 6) Proudění je předpokládáno stacionerní.
- 7) Síla tíže vzduchu je s ohledem na malou měrnou hmotnost zanedbána.
- 8) Při řešení proudění za změny adiabatické vrátne se uvažuje jen proudění v oblasti 1 - 2, jakoby otvory ve statorku a rotorku (viz obr.18) byly ucpány (statorek je osazen čtyřmi tryskami).

Těmito požadavky je problém zidealizován. Srovnání výsledků analytického řešení s experimentálními výsledky ověří jeho použitelnost.

Pro řešení tlakového profilu je použito pět základních rovnic - metoda řešení:

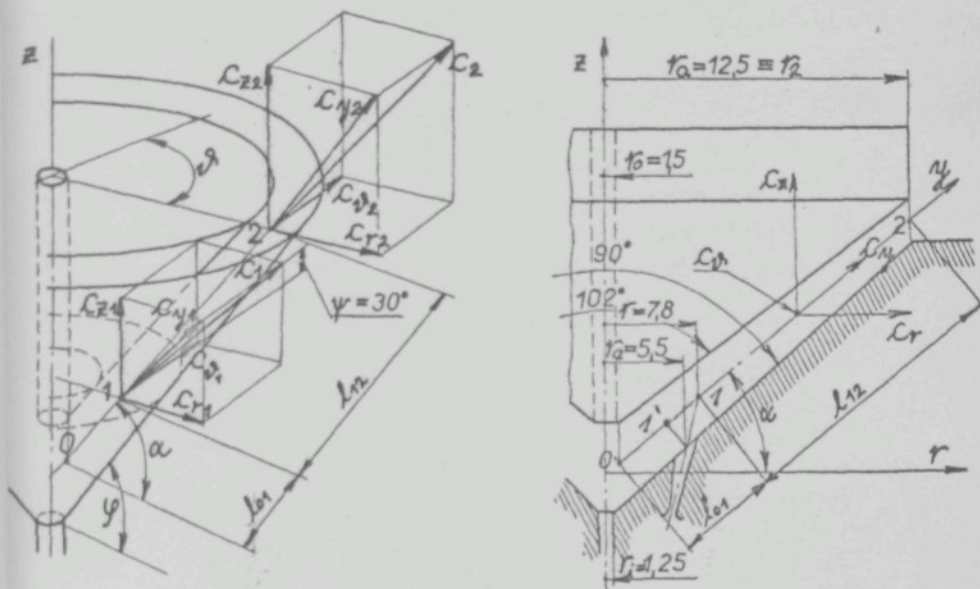
1) Pohybové rovnice $F = m \cdot a$ (5.3)

2) Rovnice kontinuity $S \cdot c = M \cdot v$ (5.4)

3) Rovnice zachování energie $\sum E_1 = \sum E_2$ (5.5)

4) Stavová rovnice ideálních plynů $p \cdot v = R \cdot T$ (5.6)

5) Rovnice vratné adiabatické změny $p_1 \cdot v_1^k = \text{konst.}$ (5.7)



Obr. 18

Rozklad rychlosti na vstupu a výstupu do štěrbin

Označení rychlostí: c_1 - absolutní rychlost (výstup z trysky)
 c_y - rychlost plynu na povrchu kužele
 c_z - složka ve směru osy rotace
 c_r - složka ve směru kolmo na osu rotace
 c_u - složka obvodová - tangenciální.

Složky rychlosti jsou vzájemně vázány úhlem α , jež svírá osa mezery y s osou r .

Z obr.18 plyne pro jednotlivé složky rychlosti v místě 1:

$$c_{y1} = c_1 \cdot \sin \psi \quad (5.8)$$

$$c_{u1} = c_1 \cdot \cos \psi = \frac{c_{y1}}{\tan \psi} \quad (5.9)$$

$$c_{z1} = c_{y1} \cdot \sin \alpha \quad (5.10)$$

$$c_{z1} = c_1 \cdot \sin \psi \cdot \sin \alpha \quad (5.11)$$

$$c_{r1} = c_{y1} \cdot \cos \alpha \quad (5.12)$$

$$c_{r1} = c_1 \cdot \sin \psi \cdot \cos \alpha \quad (5.13)$$

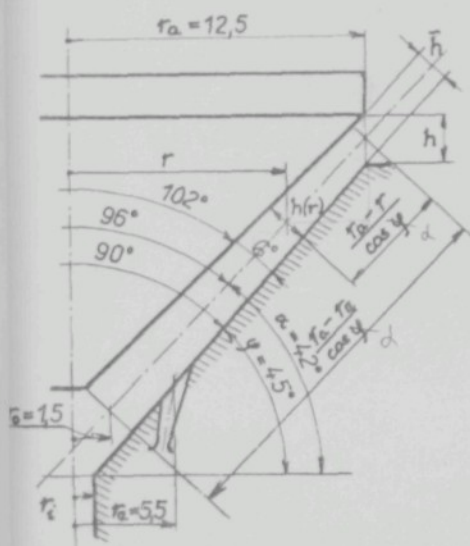
Rychlost ve směru povrchu v kterémkoliv místě

se určí též z rovnice kontinuity $c_y = \frac{M_1 \cdot v}{S} \quad (5.14)$

a za použití (5.10) a (5.12) $c_z = \frac{M_1 \cdot v}{S} \cdot \sin \alpha, c_r = \frac{M_1 \cdot v}{S} \cdot \cos \alpha \quad (5.15)$

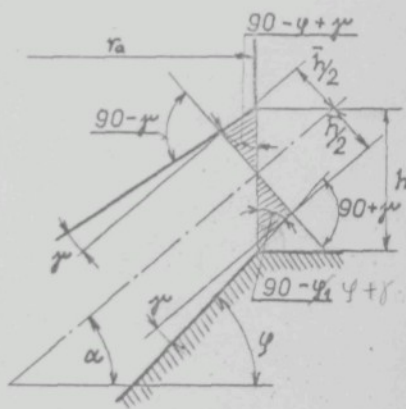
5.1 Průtoková plocha mezikruhové štěrby

Z neznačené geometrie štěrby na obr.19 lze vyjádřit plochu průtokového průřezu v závislosti na poloměru a zdvihu h .



Obr. 19

Geometrie průtokové plochy



Obr. 20

Geometrická závislost zdvihu h na $\bar{h}$

Plocha:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h(r) \quad (5.16)$$

Tloušťka štěrby $h(r)$ na libovolném poloměru r :

$$h(r) = \bar{h} + 2 \operatorname{tg} \delta^* \frac{(r_a - r)}{\cos \alpha} \quad (5.17)$$

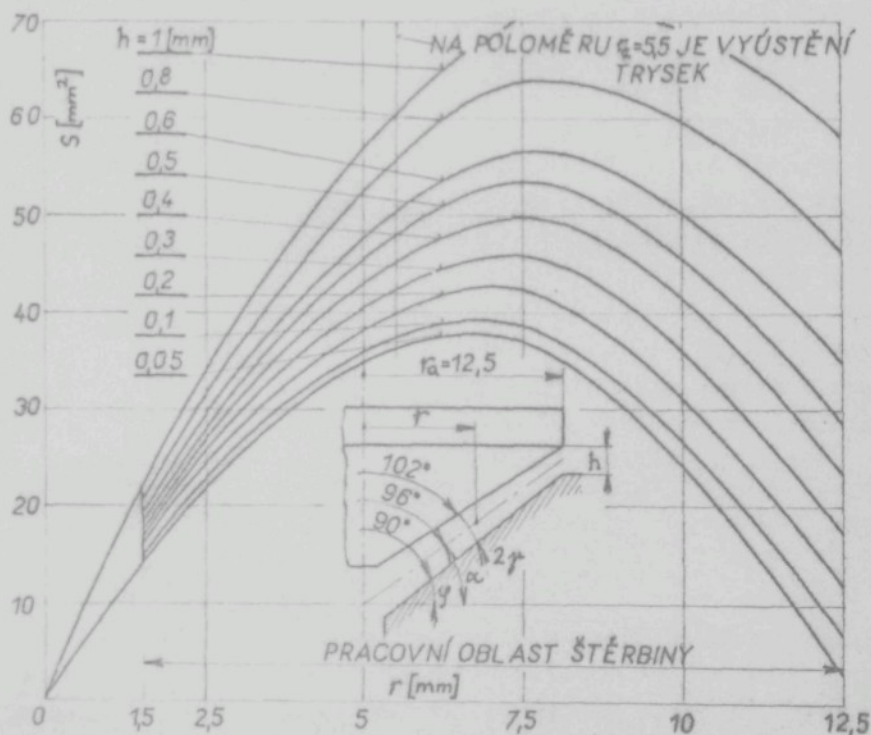
kde $h(r)$ je možné vyjádřit přímo zdvihem h , podle obr. 20 pomocí sinusové věty:

$$h(r) = \frac{2h}{\frac{\sin(90 - \delta^*)}{\sin(90 - \alpha + \delta^*)} + \frac{\sin(90 + \delta^*)}{\sin(90 - \varphi)}} + 2 \operatorname{tg} \delta^* \left(\frac{r_a - r}{\cos \alpha} \right) \quad (5.18)$$

Průtoková plocha pro různý zdvih h v závislosti na poloměru potom bude:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \left[\frac{2h}{\frac{\sin(90 - \delta^*)}{\sin(90 - \alpha + \delta^*)} + \frac{\sin(90 + \delta^*)}{\sin(90 - \varphi)}} + 2 \operatorname{tg} \delta^* \left(\frac{r_a - r}{\cos \alpha} \right) \right] \quad (5.19)$$

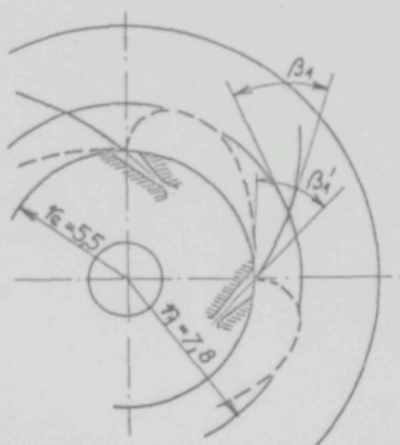
Z této rovnice je patrné, že průběh průtokové plochy mezi-
kruží je parabolický - viz obr. 21.



Obr. 21

Závislost průtokové plochy štěrbině na poloměru rotoru
a zdvihu h

Pracovní oblast štěrbiný je od poloměru 1,5 mm do poloměru 12,5 mm. Nosný a hnací vzduch vstupuje do štěrbiný z trysek umístěných na poloměru $r_e = 5,5$ mm. Jelikož ložisko je osazeno 4 tryskami, ze kterých vzduch proudí do štěrbiný kritickou nebo nadkritickou rychlostí, dá se předpokládat, že k rovnoměrnému smíšení expandujícího vzduchu se vzduchem strhávaným z prostoru vrcholu kuželů dojde na průtokové ploše na větším průměru než je průměr, na kterém je vyústění trysek. Proud vzduchu z trysek se bude vlivem štěrbiný o malé tloušťce rychle rozšiřovat na obě strany až nastane spojení se sousedními proudy a úplné smíšení i s přísávaným vzduchem. K této úvaze opravňuje zjištěný obraz proudění vytvořený stopami z nečistot a oleje z kompresoru jak je vidět na fotografii v příloze č. 9. Z "obrazu proudění" lze nalézt



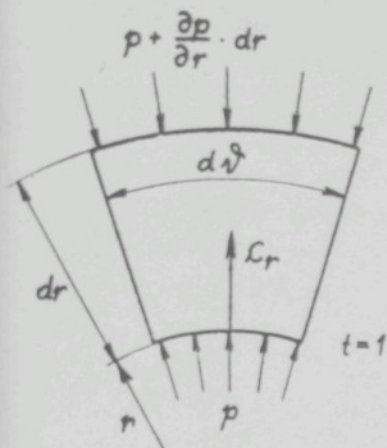
Obr. 22

Obraz pravděpodobného spojení proudů

průměr na kterém nastává spojení proudů. Na obr. 22 je graficky vyznačena hypotéza jak pravděpodobně ke spojování proudů dochází a je zakótován průměr spojení proudů, který byl odečten z fotografie v příloze č.9. Statorky s vytvořeným "obrazem proudění" byly získány po 14 denním provozu tvarovacího zařízení v národním podniku Elite Varnsdorf.

5.2 Odvození pohybových rovnic proudění

Odvození je provedeno pomocí Newtonovy pohybové rovnice. Poněvadž ve skutečnosti vzduchový polštář ve štěrbině rotuje, je použito cylindrické soustavy souřadnic z, r, φ viz obr. č.18. Pohyb elementu v uvažovaných souřadnicích je určen, jsou-li známy tyto složky rychlosti:



Obr. 23

Silové účinky na element

$$c_r = \frac{dr}{dt} \quad - \text{radiální složka,}$$

$$c_v = r \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad - \text{tangenciální složka}$$

$$c_z = \frac{dz}{dt} \quad - \text{osová složka.}$$

Newtonova pohybová rovnice ve směru radiálním

$$dF_r = dm \cdot \ddot{r} = dm \cdot \frac{dc_r}{dt} \quad (5.20)$$

Podle obr. 23 působí ve směru poloměru r na stěnu vytknutého elementu tyto silové účinky:

Nejprve hmota elementu: $dm = dr \cdot l \cdot d\vartheta \cdot \rho$

Výsledné zrychlení ve směru poloměru r lze vyjádřit jako součet posuvného zrychlení $\frac{dc_r}{dt}$ a odstředivého $\frac{c_v^2}{r}$.

Tlaková síla ve směru r : $p \cdot d\vartheta \cdot l$

Tlaková síla v opačném směru: $-(p + \frac{\partial p}{\partial r} \cdot dr) \cdot l \cdot d\vartheta$

Po dosazení do (5.20):

$$p \cdot d\vartheta \cdot l - (p + \frac{\partial p}{\partial r} \cdot dr) \cdot l \cdot d\vartheta = dr \cdot l \cdot d\vartheta \cdot \rho \left(\frac{dc_r}{dt} - \frac{c_v^2}{r} \right)$$

Po úpravě:

$$\frac{dc_r}{dt} - \frac{c_v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5.21)$$

Výsledné zrychlení ve směru kolmém na poloměr se skládá z tangenciálního zrychlení $r \left(\frac{d^2\vartheta}{dt^2} \right)$

a zrychlení Coriolisova $2 \cdot \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\vartheta}{dt}$,

tedy

$$r \frac{d^2\vartheta}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d(r \cdot c_v)}{dt} = \frac{dc_v}{dt} + \frac{c_r \cdot c_v}{r}$$

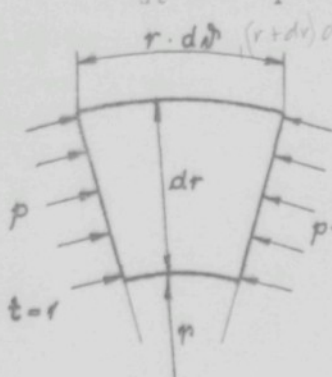
Na obr. 23a jsou zakresleny tlakové účinky na vytknutý element proudu ve směru tangenciálním.

Po dosazení do rovnice (5.20) bude:

$$p \cdot dr \cdot l - (p + \frac{\partial p}{\partial r} \cdot dr) \cdot l \cdot dr = dr \cdot l \cdot r \cdot d\varphi \cdot \rho \left(\frac{dc_r}{dt} + \frac{c_r \cdot c_\varphi}{r} \right)$$

Po úpravě:

$$\frac{dc_r}{dt} + \frac{c_r \cdot c_\varphi}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{r \partial r} \quad (5.22)$$



Obr. 23a

Silové účinky na element

Obdobně ve směru osy z:

$$\frac{dc_z}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5.23)$$

Po vyjádření totální derivace

$\frac{dc_r}{dt}$, $\frac{dc_\varphi}{dt}$, $\frac{dc_z}{dt}$ v rovni-

cích (5.21), (5.22), (5.23) pomocí derivací parciálních lze obdržet při současném respektování předpokladu 6:

$$\left. \begin{aligned} \text{a) } c_r \frac{\partial c_r}{\partial r} + \frac{c_\varphi}{r} \frac{\partial c_r}{\partial \varphi} + c_z \frac{\partial c_r}{\partial z} - \frac{c_\varphi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \\ \text{b) } c_r \frac{\partial c_\varphi}{\partial r} + \frac{c_\varphi}{r} \frac{\partial c_\varphi}{\partial \varphi} + c_z \frac{\partial c_\varphi}{\partial z} + \frac{c_r \cdot c_\varphi}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} \\ \text{c) } c_r \frac{\partial c_z}{\partial r} + \frac{c_\varphi}{r} \frac{\partial c_z}{\partial \varphi} + c_z \frac{\partial c_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (5.24)$$

To jsou Eulerovy pohybové rovnice v cylindrických souřadnicích. Aby řešení bylo možné je zde provedeno toto zjednodušení:

$$c_z = \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial c_r}{\partial z} = \frac{\partial c_\varphi}{\partial z} = 0$$

Z dalšího řešení pomocí transformovaného souřadného systému - viz obr. 24 - se ukáže, že zjednodušení bylo možno použít. Tím se problém zredukuje na dvourozměrný.

Dále podle předpokladu 4 platí: $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$.

Potom bude:

$$c_r \frac{\partial c_r}{\partial r} - \frac{c_{\varphi}^2}{r} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5.25)$$

$$c_r \frac{\partial c_{\varphi}}{\partial r} + \frac{c_r \cdot c_{\varphi}}{r} = 0 \quad (5.26)$$

Pomocí těchto dvou rovnic lze již najít tlekovou funkci a to tak, že z rovnice (5.26) bude vyjádřena tangenciální složka rychlosti c_{φ} , dosazena do rovnice (5.25) a bude možno provést integraci a vyjádřit tlak p . Ježto c_{φ} je funkcí pouze proměnné φ , lze psát místo $\frac{\partial c_{\varphi}}{\partial r}$ výraz $\frac{dc_{\varphi}}{dr}$.

Pak rovnice (5.26) po dělení rychlostí c_r přejde na:

$$\frac{dc_{\varphi}}{dr} + \frac{c_{\varphi}}{r} = 0$$

Separováním proměnných plyne:

$$\int \frac{dc_{\varphi}}{c_{\varphi}} + \int \frac{dr}{r} = 0$$

Po integraci: $\ln c_{\varphi} + \ln r = k_1$,

čili

$$c_{\varphi} \cdot r = k_1; \quad c_{\varphi} = \frac{k_1}{r} \quad (5.27)$$

Po dosazení do (5.25) a zavedení obyčejných derivací:

$$c_r \frac{dc_r}{dr} - \frac{k_1^2}{r^3} = - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} \quad (5.28)$$

Než bude provedeno další řešení této diferenciální rovnice, je vhodné poukázat na práci / 13 / kde autoři hledají rozložení tlaku v radiálním směru u axiálního turbinového stupně. Autoři pro stanovení tlaků v mezeře také vycházejí z Eulerovy hydrodynamické rovnice pro radiální složku rychlostí:

$$c_r \frac{\partial c_r}{\partial r} + c_z \frac{\partial c_r}{\partial z} - \frac{c_{\varphi}^2}{r} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5.29)$$

V této rovnici však nezanedbávají proudění ve směru osy rotace z , a druhý člen rovnice, který tento vliv zahrnuje vyjadřují pomocí rychlosti v radiálním směru takto:

$$c_z \frac{\partial c_r}{\partial z} = c_z \frac{\partial c_r}{\partial} \frac{dr}{dz} \quad (5.30)$$

při čemž podle obr. 18 je $\frac{dr}{dz} = \cotg \alpha$.

(pro $\alpha = 45^\circ$ platí, že $\tg \alpha = \cotg \alpha = \tg (90 - \alpha)$ což odpovídá zde řešenému případu).

Z rozkladu sil na obr. 18 také plyne

$$c_z = \frac{c_r}{\cotg \alpha}$$

Po dosazení do (5.30)

$$c_z \frac{\partial c_r}{\partial z} = \frac{c_r}{\cotg \alpha} \frac{\partial c_r}{\partial r} \cotg \alpha = c_r \frac{\partial c_r}{\partial r}$$

A po dosazení do (5.29) platí pro radiální směr:

$$2 c_r \frac{\partial c_r}{\partial r} - \frac{c_r^2}{r} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5.31)$$

V Eulerově pohybové rovnici ve směru tangenciálním také se uplatňuje proudění ve směru osy rotace:

$$c_r \frac{\partial c_\varphi}{\partial r} + c_z \frac{\partial c_\varphi}{\partial z} + \frac{c_r \cdot c_\varphi}{r} = 0 \quad (5.32)$$

Druhý člen rovnice upravují takto:

$$c_z \frac{\partial c_\varphi}{\partial z} = c_z \frac{\partial c_\varphi}{\partial r} \frac{dr}{dz} = \frac{c_r}{\cotg \alpha} \frac{\partial c_\varphi}{\partial r} \cotg \alpha = c_r \frac{\partial c_\varphi}{\partial r}$$

A po dosazení do (5.32) dostávají:

$$2 c_r \frac{\partial c_\varphi}{\partial r} + \frac{c_r c_\varphi}{r} = 0 \quad (5.33)$$

Z této rovnice autofí vyjadřují rychlost c_φ : Dělením veličinou c_r , přepsáním na obyčejné derivace a separováním proměnných bude:

$$2 \frac{d c_\varphi}{c_\varphi} + \frac{dr}{r} = 0$$

Po integraci: $2 \ln c_\varphi + \ln r = k_1$

čili $c_\varphi \cdot r = k_1$

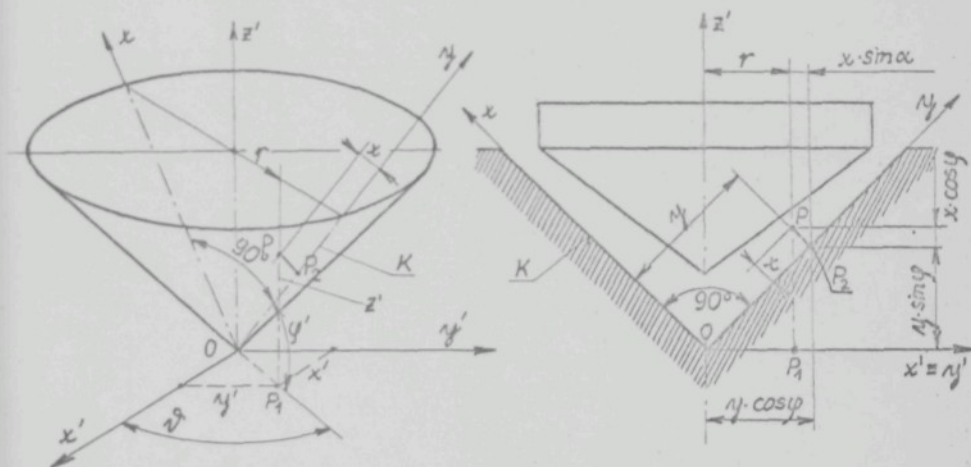
a

$$c_{a2} = \sqrt{\frac{k_1}{r}} \quad (5.34)$$

Po dosazení do (5.31) dostávají po zavedení obyčejných derivací pohybovou rovnici ve směru radiálním:

$$2 c_r \cdot \frac{d c_r}{dr} - \frac{k_1}{r^2} = - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} \quad (5.35)$$

Tato rovnice řešení proudění podle /13/ se liší od rovnice (5.28). Nevýhodou obou rovnic však je, že tlakový profil bude ve směru radiálním. Pro hledání tlakového profilu přímo v ose štěrbiny bude výhodné provést transformaci na nový souřadný systém přímo na směr y - viz obr. 24. Podobně jsou odvozovány pohyb. rovnice v práci / 29 /.



Obr. 24

Zavedení nového souřadného systému

Na obr. 24 je / $O, (x'; y'; z')$ / kartézský souřadný systém.

/ $O, (x, y, \varphi, \rho)$ / nový souřadný systém

kde φ je parametr.

x = normálová vzdálenost hmot. bodu P, od povrchu kužele
statoru

$x = \overline{P, P_2}$, kde P_2 je normálový průmět P na kužel K

$\vartheta =$ úhel, který svírá osa x' s přímkou $\overline{O; P_1}$, kde P_1 je kolmý průmět bodu P do roviny (x', y)

$r = \overline{O, P_1}$ je délka průmětu $O P$ v rovině x', y .

Platí: $z' = y \cdot \sin \varphi + x \cos \varphi$ $x = r \cdot \cos \vartheta$

$r = y \cdot \cos \varphi - x \sin \varphi$ $y' = r \sin \vartheta$

Transformační rovnice $O(x', y', z') \longleftrightarrow (x, y, \vartheta, \varphi)$:

$$x' = (-x \sin \varphi + y \cos \varphi) \cos \vartheta \quad (5.36)$$

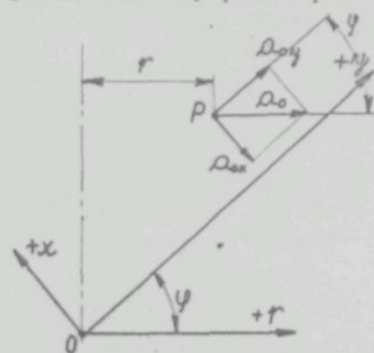
$$y' = (-x \sin \varphi + y \cos \varphi) \sin \vartheta \quad (5.37)$$

$$z' = x \cos \varphi + y \sin \varphi \quad (5.38)$$

Newtonova pohybová rovnice ve směru osy y :

$$dF_y = dm a_y = dm \cdot \left(\frac{dc_y}{dt} - a_{oy} \right) \quad (5.39)$$

Podle obr. 25 platí pro složky odstředivého zrychlení:



Obr. 25

$$a_o = \frac{c_y^2}{r}$$

$$a_{ox} = -\frac{c_y^2}{r} \sin \varphi, \quad (5.40)$$

(znaménko minus je dáno orientací souřadného systému)

$$a_{oy} = \frac{c_y^2}{r} \cos \varphi = \frac{c_y^2}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} \cdot \cos \varphi \quad (5.41)$$

Po vyjádření hmoty dm a síly dF z tlakových účinků na proudící element a dosazení do (5.39) bude pohybová rovnice ve směru osy y :

$$\frac{dc_y}{dt} - \frac{c_y^2}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} \cos \varphi = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \quad (5.42)$$

Pro směr proudění v ose x platí analogicky:

$$dF_x = dm \cdot a_x = dm \left(\frac{dc_x}{dt} - a_{ox} \right) = dm \left(\frac{dc_x}{dt} - \left(-\frac{c_y^2}{r} \sin \varphi \right) \right) \quad (5.43)$$

Po dosazení platí pro pohybovou rovnici ve směru osy x:

$$\frac{dc_x}{dt} + \frac{c_y^2}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} \cdot \sin \varphi = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.44)$$

Pro tangenciální směr platí:

$$dF = dm \cdot a_y ; \quad dm = dr \cdot l \cdot r \cdot d\varphi \quad (5.45)$$

Výsledné zrychlení ve směru kolmém na poloměr otáčení se skládá z tangenciálního zrychlení a zrychlení Coriolisova:

$$\begin{aligned} a_y &= r \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dc_y}{dt} + \frac{c_y c_r}{r} = \\ &= \frac{dc_y}{dt} + \frac{c_y \cdot (-c_x \sin \varphi + c_y \cos \varphi)}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} \quad (5.46) \end{aligned}$$

Po dosazení za hmotu dm a sílu dF z tlakových účinků na proudící element (obr.23) a po úpravě platí pro pohybovou rovnici ve směru tangenciálním:

$$\frac{dc_y}{dt} + \frac{c_y (-c_x \sin \varphi + c_y \cos \varphi)}{-x \sin \varphi + y \cos \varphi} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{(-x \sin \varphi + y \cos \varphi) d\varphi} \quad (5.47)$$

Za použití zjednodušujících předpokladů, že s ohledem na malou tloušťku štěrbiny je možno zanedbat proudění ve směru osy x, tedy $x = 0$ budou platit jen dvě rovnice:

Ve směru osy y:

$$\frac{dc_y}{dt} - \frac{c_y^2}{y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (5.48)$$

Ve směru tangenciálním:

$$\frac{dc_y}{dt} + \frac{c_y c_{\varphi}}{y} = - \frac{1}{\rho} \frac{1}{y \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \quad (5.49)$$

Po vyjádření obyčejné derivace $\frac{dc_y}{dt}$ a $\frac{dc_{\varphi}}{dt}$ pomocí derivací parciálních a vzhledem k předpokladu 6.... ($\frac{dc}{dt} = 0$) bude platit pro proudění ve směru osy y:

$$\frac{\partial c_y}{\partial y} \cdot c_y - \frac{c_y^2}{y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (5.50)$$

Analogicky pro směr tangenciální při respektování ještě předpokladu 4... ($\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$) platí:

$$\frac{\partial c_{\varphi}}{\partial y} c_y + \frac{c_y c_{\varphi}}{y} = 0 ,$$

resp.

$$\frac{\partial c_{\varphi}}{\partial y} + \frac{c_{\varphi}}{y} = 0 \quad (5.51)$$

Separací proměnných a integrací plyne:

$$c_{\varphi} = \frac{k_1}{y} , \quad (5.52)$$

kde k_1 je integrační konstanta.

Po dosazení za rychlost c_{φ} , do rovnice (5.50) a zavedení obyčejných derivací bude:

$$c_y \frac{dc_y}{dy} - \frac{k_1^2}{y^3} = - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} \quad (5.53)$$

Při řešení proudění v cylindrických souřadnicích byl v rovnicích (5.25) a (5.26) zanedbán účinek změn proudění ve směru osy rotace. Vzhledem k výsledku řešení podle / 13 / - viz rovnice (5.35) se zdálo, že zanedbání účinků proudění ve směru osy rotace dosti ovlivní hledaný tlakový profil. Avšak při řešení proudění přímo ve směru osy mezery (osa y) na které se přešlo pomocí transformace souřadného systému byl předpoklad zanedbat proudění ve směru kolmém na osu mezery zcela oprávněný a při tom výsledkem řešení je podobná pohybová rovnice (5.53) jako rovnice (5.28). Stejná pohybová rovnice vyšla

také při řešení pomocí Lagrangeových rovnic - viz rovnice (18) v příloze č. 10.

Ukázalo se tedy, že předpoklad 5 je oprávněný a proto dále bude řešena již jen rovnice (5.53) ve směru osy y .

5.3 Proudění při adiabatické vratné změně

Rovnice (5.53) vynásobena dy :

$$c_y dc_y - k_1^2 \cdot \frac{dy}{y^3} = - \frac{dp_y}{\rho_y} \quad (5.54)$$

S ohledem na integraci rovnice je vhodné dosadit za poměr $\frac{dp_y}{\rho_y}$ z rovnice isentropické změny na základě předpokladu 2:

$$p_1 v_1^K = p_2 v_2^K = p_y v_y^K, \\ p_y = \frac{p_1 v_1^K}{v_y^K} = p_1 v_1^K \cdot \rho_y^K \quad (5.55)$$

Diferencováním se obdrží:

$$dp_y = p_1 \cdot v_1^K \cdot K \cdot \rho_y^{K-1} \cdot d\rho_y$$

a po dělení měrnou hmotou ρ_y :

$$\frac{dp_y}{\rho_y} = p_1 v_1^K K \rho_y^{K-2} \cdot d\rho_y$$

Po dosazení do (5.54) je možno integrovat:

$$\int c_y dc_y - k_1^2 \int \frac{dy}{y^3} + p_1 v_1^K K \int \rho_y^{K-2} \cdot d\rho_y = k$$

Po integraci

$$\frac{c_y^2}{2} - \frac{k_1^2}{-2 y^2} + p_1 v_1^K \rho_y^{K-1} \cdot \frac{K}{K-1} = k$$

S ohledem na (5.55) bude:

$$\frac{c_y^2}{2} + \frac{k_1^2}{2 y^2} + \frac{p_y}{\rho_y} \cdot \frac{K}{K-1} = k \quad (5.56)$$

Tato rovnice je známá pod názvem Bernoulliho rovnice pro stlačitelné medium a vyjadřuje zákon zachování energie při isentropickém proudění / 14 /.

Po jednoduché úpravě:

$$\frac{K}{K-1} \cdot \frac{p_y}{\rho_y} = \frac{K}{K-1} \cdot R \cdot T_y .$$

Z termodynamiky platí pro měrné teplo c_p :

$$c_p = \frac{K}{K-1} R .$$

Potom

$$\frac{K}{K-1} \cdot \frac{p_y}{\rho_y} = c_p \cdot T_y = i_y ,$$

i_y - entalpie media v místě y .

Rovnice (5.56) přejde ve tvar:

$$\frac{c_y^2}{2} + \frac{k_1^2}{2 y^2} + i_y = k . \quad (5.57)$$

Interpretace konstanty k

Pro výslednou rychlost v libovolném místě y podle předpokladů 5 platí:

$$c^2 = c_y^2 + c_{\dot{y}}^2 .$$

Podle (5.52) však : $c_{\dot{y}} = \frac{k_1}{y}$; $c_{\dot{y}}^2 = \frac{k_1^2}{y^2}$, pak : $c^2 = c_y^2 + \frac{k_1^2}{y^2}$

Potom rovnice (5.57) přejde na tvar:

$$\frac{c^2}{2} + i_y = k \quad (5.58)$$

Konstantu k lze zjistit pomocí základní rovnice obecného tepelného stroje.

Rovnice je napsána mezi body (0) - 2 (viz obr. 18). V bodě (0) je rychlost nulová.

Potom platí:

$$(0),2 + \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} + \dot{Q}_2 = i_{(0)} - i_2 + q_{(0),2} + q_{\Sigma} \quad (5.59)$$

- kde $\ell_{(0),2}$ = užitečná práce získaná z 1 kg hmoty média
 ΔE_{kin} = přírůstek kinetické energie
 ΔE_{pol} = přírůstek polohové energie
 ℓ_z = mechanická energie, která se třením změnila v teplo
 $i_{(0),2}$ = entalpie na začátku a na konci proudění
 $q_{(0),2}$ = teplo přivezené z venku
 q_z = teplo vzniklé třením

Pro proudění adiabatické vratné platí:

$$\ell_{(0),2} = q_{(0),2} = q_z = E_{\text{pol}} = 0 \quad (5.60)$$

Rovnice (5.59) přejde na:

$$E_{\text{kin}2} - E_{\text{kin}(0)} = i_{(0)} - i_2$$

Tedy

$$\frac{c_2^2}{2} + i_2 = \frac{c_{(0)}^2}{2} + i_{(0)} \quad (5.61)$$

Rychlost $c_{(0)}$ na začátku proudění = 0 viz (obr.18 - bod (0))
 Potom z (5.61) plyne:

$$\frac{c_2^2}{2} + i_2 = i_{(0)} \quad (5.62)$$

Rovnici (5.62) lze psát pro libovolné místo mezi body (0) a 2, např. pro y, kde je výsledná rychlost $c = \sqrt{c_y^2 + c_z^2}$:

$$\frac{c^2}{2} + i_y = i_{(0)}$$

Levá strana rovnice je stejná jako u rovnice (5.58)
 a tedy

$$k = i_{(0)} \quad (5.63)$$

Vyjádření integrační konstanty k_1 :

Z rovnice (5.52) plyne:

$$k_1 = c_y \cdot y$$

Z okrajových podmínek platí pro:

$$y = y_1 \quad \text{je} \quad c_{y1} = c_{y1}$$

Dále podle obr. 18 z rozkladu sil plyne:

$$c_{y1} = c_1 \cos \psi, \quad c_1 = \frac{c_{y1}}{\sin \psi}$$

Potom:

$$c_{y1} = c_{y1} \cotg \psi = \frac{c_{y1}}{\tg \psi}$$

a tedy:

$$k_1 = \frac{c_{y1}}{\tg \psi} y_1 \quad (5.64)$$

Po dosazení do (5.56)

$$\frac{c_y^2}{2} + \frac{c_{y1}^2 \cdot y_1^2}{2 \tg^2 \psi \cdot y^2} + \frac{p_y}{\rho_y} \frac{K}{K-1} = i(0) \quad (5.65)$$

Z rovnice kontinuity s použitím stavové rovnice plyne pro rychlost c_y :

$$c_y = \frac{M_1 \cdot v_y}{S_y} = \frac{M_1 \cdot R \cdot T_y}{S_y \cdot p_y} \quad (5.66)$$

kde: M_1 = průtoková hmotnost plynu

R - plynová konstanta

T_y - absolutní teplota v určitém místě mezery

S_y - průtoková plocha v určitém místě mezery

p_y - tlak v mezeře v určitém místě y :

Dále pro měrnou hmotu platí:

$$\rho_y = \frac{1}{v_y} = \frac{p_y}{R T_y} \quad (5.67)$$

Po dosazení (5.66) a (5.67) do (5.65) bude:

$$\frac{M_1^2 R^2 T_y^2}{2 S_y^2 p_y^2} + \frac{c_{y1}^2 y_1^2}{2 \tg^2 \psi y^2} + R T_y \frac{K}{K-1} = i(0) \quad (5.68)$$

V této rovnici je třeba vyjádřit proměnné veličiny T_y a S_y . Ostatní veličiny jsou konstantní. Absolutní teplotu v určitém místě y lze vyjádřit z rovnice isoentropy.

Podle obr.18 v místě 2 je tlak p_2 roven barometrickému tlaku a teplota T_2 rovna teplotě okolí.

Potom pro teplotu T_y platí:

$$\frac{T_y}{T_2} = \left(\frac{p_y}{p_2} \right)^{\frac{K-1}{K}}, \quad T_y = T_2 \frac{p_y}{p_2}^{\frac{K-1}{K}}$$

Po dosazení do (5.68) bude:

$$\frac{M_1^2 R^2 T_2^2}{2 p_2^{\frac{K}{K-1}} (K-1)} - \frac{p_y}{S_{y1}} + \frac{c_{y1}^2 v_1^2}{2 \lg \gamma y^2} + R T_2 \left(\frac{1}{p_2} \right) \cdot p_y^{\frac{K-1}{K}} \cdot \frac{K}{K-1} = i(0) \quad (5.69)$$

Průtoková plocha je vyjádřena rovnicí (5.19) v závislosti na zdvihu h a poloměru r .

Vzhledem k tomu, že $r = y \cos \alpha$, rovnice pro průtokovou plochu S_y přejde na tvar:

$$S_y = 2 \pi \cos \alpha \cdot y \left[\frac{\sin(90-\gamma)}{\sin(90-\alpha-\gamma)} - \frac{\sin(90+\gamma)}{\sin(90-\gamma)} + 2 \lg \gamma \left(\frac{r_0 - \cos \alpha \cdot y}{\cos \alpha} \right) \right] \quad (5.70)$$

Rychlost c_{y1} pro (5.69) lze vyjádřit z rovnice kontinuity v místě 1 ve směru y :

$$c_{y1} = \frac{M_1 v_1}{S_{y1}} = \frac{M_1 R T_1}{S_{y1} p_1}$$

Teplotu T_1 je výhodné vyjádřit ze známé teploty $T(0)$ před vstupem do trysky. Jelikož kritický průměr použité Lavalovy trysky je extrémně malý ($d_k = 0,71$ mm) nelze počítat z bezeztrátového průtoku. Teplota T_1 je proto určena za předpokladu vratné adiabatické expanse.

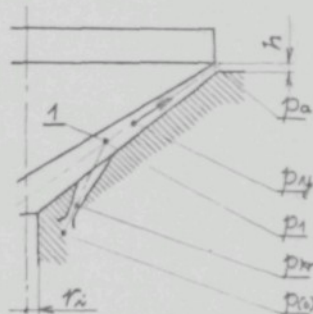
$$T_1 = T(0) \left(\frac{p_1}{p(0)} \right)^{\frac{K-1}{K}}, \quad \text{kde } K = 1,4$$

Potom

$$c_{y1} = \frac{M_1 R T(0)}{p_1 s_{y1}} \left(\frac{p_1}{p(0)} \right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (5.71)$$

Pro rovnici (5.69) a (5.71) je potřebné ještě stanovit průtokovou hmotnost M_1 [kg s⁻¹]. Vzduch do mezery proudí ze čtyř rozšířených trysek. Provoz může probíhat při různých režimech, které mají vliv na průtokovou hmotnost a tedy dále na průběh tlaku v mezeře a na nosnost ložiska.

Tlak vzduchu p_y (v mezeře těsně za bodem 1) se může zvětšit dvěma způsoby:



Obr. 26

- 1) Když tlak vzduchu $p(0)$ před tryskou se zvětší a zdvih h zůstane konstantní.
- 2) Když $p(0)$ bude konstantní a zdvih h se zmenší.

Proto problém tlaku vzduchu v mezeře je nutné řešit komplexně jako soustava Lavalova trysky - mezera (viz obr. 26)

Tvarem průtokového průřezu trysky je dán průběh expanse v trysce a je známo, že Lavalova tryška je velmi choulostivá na změny tlaku za tryskou. Jelikož se předpokládá změna zatížení ložiska za konstantního tlaku před tryskou, bude se měnit zdvih h a tím tedy i tlak za tryskou. Závislost průtokové hmotnosti na poměru tlaků za tryskou a před tryskou znázorňuje Bendemanova elipsa - viz obr. 27. Vzhledem k tomu, že průtokový průřez čtyř trysek je velmi malý oproti ploše průřezu mezery v místě vyústění a že tlak v mezeře byl naměřen velmi malý ve srovnání s tlakem $p(0)$, předpokládá se trvale provoz s malým poměrem β , tedy $\beta \ll \beta_{kr}$ a potom změny tlaku za tryskou neovlivní velikost průtokové hmoty M_1 . Pro průtokovou hmotnost čtyř trysek za těchto okolností platí při vratné adiabatické expansi z rovnice kontinuity pro nejužší - kritický průřez trysky S_{kr}

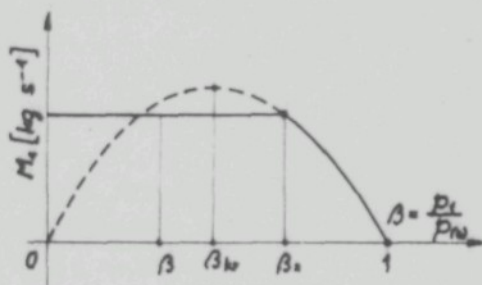
$$M_1 = \frac{4 S_{kr} c_{kr}}{v_{kr}} ,$$

kde c_{kr} je průtoková rychlost v nejužším místě Lavalovy trysky a je dána vztahem :

$$c_{kr} = \sqrt{2 \frac{K}{K+1} p_{(o)} v_{(o)}} = 1,08 \sqrt{p_{(o)} v_{(o)}} .$$

Pro měrný objem v_{kr} platí z rovnice isoentropy :

$$v_{kr} = v_{(o)} \left(\frac{p_{(o)}}{p_{kr}} \right)^{\frac{1}{K}} = \frac{v_{(o)}}{\left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}}} .$$



Obr. 27

Závislost průtokové hmoty na poměru $\frac{p}{p_0}$ u Lavalovy trysky

činitelem φ . Rychlostní součinitel φ byl pro tuto trysku získán experimentálně - viz kapitola 11.2.

Z předešlých úvah vyplývá že platí:

$$M_1 = \frac{4 S_{kr} \varphi 1,08 \sqrt{p_{(o)} v_{(o)}}}{\frac{v_{(o)}}{\left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}}}} = 0,686 \pi \cdot \varphi \cdot d_{kr}^2 \cdot \sqrt{\frac{p_{(o)}}{v_{(o)}}} . \quad (5.72)$$

Po dosazení (5.70), (5.71) a (5.72) do (5.69) lze obdržet konečnou rovnici pro určení průběhu tlaku na povrchu statorku. Definováním konstant A, B, C, D, E vztahy

$$A = R T_2 \left(\frac{1}{p_2} \right)^{\frac{K-1}{K}}$$

S ohledem na extrémně malý průměr trysky je třeba počítat s rychlostí menší než teoretickou. K překonání tření vzduchu o povrch trysky a také třením mezi částicemi vzduchu je třeba vynaložit určitou práci a potom skutečná rychlost je menší a lze ji obdržet když teoretickou rychlost násobíme rychlostním sou-

$$\text{a jelikož: } \frac{1}{p_k^{K-1}} = \left[\left(\frac{1}{p_k} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]^2$$

$$\text{potom: } A^2 = R^2 T_2^2 \frac{1}{p_2^{\frac{K-1}{K}}}$$

$$B = \frac{R T_2(0)}{p_1 S_{y1}} \cdot \left(\frac{p_1}{p(0)} \right)^{\frac{K-1}{K}} \cdot \frac{y_1}{\sqrt{2} \operatorname{tg} \psi}$$

$$C = \frac{K}{K-1}$$

$$D = i(0)$$

Pak rovnici (5.69) lze psát ve tvaru:

$$\frac{M_1^C}{C} \frac{A^C}{S_y^C} p_y^{-\frac{C}{K}} + \frac{M_1^C B^C}{y^C} + A C p_y^{\frac{K-1}{K}} = i(0) = D \quad (5.73)$$

Heinrich

Tlak zde vychází implicitně a k jeho určení je třeba použít některé metody numerického počtu, nebo vypracovat program a řešit na počítači.

5.4 Isotermické proudění

Při výpočtech proudění v mezeře ložisek mazaných plyny jednotliví autoři / 1 /, / 24 /, / 25 / počítají skoro zanedbně se změnou isotermickou. Z měření tlaku zde řešeného ložiska (viz obr.18) plyne, že změna tlaku při proudění mezi body 0-1-2 činí max. jen 60 N mm^{-2} , takže změna teploty vlivem změny tlaku podle rovnice stavu je zanedbatelná. Proto v dalším bude proudění řešeno rovněž jako isotermické.

Platí zjednodušující předpoklady 1 ÷ 7 použité při proudění vratném adiabatickém. Mění se předpoklad 8 a to tak, že zde bude již uvažována průtoková hmotnost vzduchu M_1 , vystupujícího jak z hnacích trysek, tak i průtoková hmotnost M_0 , přisávaná z prostoru 0-1, to jest uvažuje se ve statorku i v rotorku otvor pro průchod vlákna - viz obr. 8.18.

Celková průtoková hmotnost $M = M_0 + M_1$.

Je konečn^ě učin^{ěn} předpoklad 9:

Teplota vzduchu před tryskami je předpokládána tak velká, aby po prob^ěhnuté expansi se zmenšila práv^ě na teplotu 20°C, to jest na teplotu přisávaného vzduchu z prostoru 0-1. Teplotu vzduchu před expansí je možné upravit.

Tyto nové zjednodušující předpoklady jsou položeny proto, poněvadž se tím zjednoduší program pro výpočet tlakové funkce a pak nosnosti na číslicovém počítači MINSK.

Pro výpočet tlakové funkce lze jako výchozí vztah použít pohybovou diferenciální rovnici proudění (5.54) odvozenou postupem (5.39 - 5.54).

Rovnice má tvar:

$$c_y dc_y - k_1^2 \frac{dy}{y^3} = - \frac{dp_y}{\rho_y} .$$

Pro isotermickou změnu platí:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = p_y v_y = R T_1 ,$$

$$p_y = \frac{p_1 v_1}{v_y} = p_1 v_1 \rho_y = p T_1 \cdot \rho_y \quad (5.74)$$

Po diferenciování:

$$dp_y = R T_1 d\rho_y$$

a dále

$$\frac{dp_y}{\rho_y} = R T_1 \frac{d\rho_y}{\rho_y} \quad (5.75)$$

Pro měrnou hmotu platí:

$$\rho_y = \frac{1}{v_y} = \frac{p_y}{R T_1}$$

Po dosazení do jmenovatele na pravé straně rovnice (5.75) bude:

$$\frac{dp_y}{p_y} = \frac{d\rho_y}{\rho_y}$$

a tedy

$$\frac{dp_y}{p_y} = R T_1 \frac{d\rho_y}{p_y}$$

Nyní již lze dosadit do (5.54) a integrovat :

$$\int c_y \, dc_y - \int \frac{k_1 \, dy}{y^3} + R T_1 \int \frac{dp_y}{p_y} = 0 ,$$

$$\frac{c_y^2}{2} + \frac{k_1}{2y^2} + R T_1 \ln p_y = k \quad (5.76)$$

Z rovnice kontinuity lze vyjádřit rychlost c_y :

$$c_y = \frac{M}{S_y \rho_y} .$$

Ze stavové rovnice $\frac{p_y}{\rho_y} = R T_1$

lze dosadit za ρ_y do vztahu pro rychlost c_y :

$$c_y = \frac{M R T_1}{S_y p_y} .$$

Po dosazení do (5.76) bude:

$$\frac{M^2 R^2 T_1^2}{2 S_y^2 p_y^2} + \frac{k_1}{2 y^2} + R T_1 \ln p_y = k \quad (5.77)$$

Integrační konstantu k_1 lze určit pomocí okrajových podmínek stejně jak bylo provedeno při proudění vratném adiabatickém. Platí tedy vztah (5.64):

$$k_1 = \frac{c_{y1}}{tg \psi} \cdot y_1$$

Rychlost c_{y1} (rychlost v místě 1 ve směru y) použitím rovnice kontinuity pro místo 1 a použitím rovnice stavu lze vyjádřit:

$$c_{y1} = \frac{M}{S_{y1} \rho_y} = \frac{M R T_1}{p_1 S_{y1}}$$

Po dosazení do (5.77) plyne:

$$\frac{M^2 \cdot R^2 \cdot T_1^2}{2 S_y^2 \cdot p_y^2} + \frac{M^2 \cdot R^2 \cdot T_1^2 \cdot y_1^2}{2 p_1^2 \cdot S_{y1}^2 \cdot tg^2 \psi \cdot y^2} + R \cdot T_1 \cdot \ln p_y = k \quad (5.78)$$

Po zavedení konstant:

$$E = R T_1 ; \quad F = \frac{R T_1 y_1^2}{2 p_1^c S_{y1} \operatorname{tg}^2 \psi} ; \quad G = k$$

a po krácení rovnice (5,78) výrazem $R T$, dostane rovnice pro určení tlaku na ose y (površka kužele) tento tvar:

$$\frac{M^2}{\varepsilon} E \frac{1}{(p_y S_y)^c} + \frac{M^2 F}{y^2} + \ln p_y = G , \quad (5.79)$$

při čemž průtoková hmotnost jest: $M = M_0 + M_1$.

Průtokovou hmotnost M_0 přisávaného vzduchu lze určit z rovnice kontinuity při proudění otvorem v rotorku a statorku, při čemž rychlost proudění je možno vypočítat ze změřeného dynamického tlaku v ústí otvoru rotorku a statorku Pitotovou trubicí - viz příloha č. 11.

K vyvození rychlosti je třeba dynamický tlak:

$$\frac{p_d}{\rho} = \frac{c^2}{2} , \text{ tedy: } c_0 = \sqrt{2 \frac{p_d^0}{\rho}} ; \quad c_i = \sqrt{2 \frac{p_d^i}{\rho}} .$$

Potom průtoková hmotnost M_0 (viz obr. 18):

$$M_0 = \pi r_0^2 \cdot c_0 \rho + \pi r_i^2 c_i \rho .$$

Průtoková hmotnost M_1 je dána vztahem (5.72).

Průtoková plocha je jako dříve $S_y = f(y; h)$ podle vztahu (5.70).

Nutno dále podotknout, že integrační konstanta k při proudění isoentropickém není totožná s konstantou k při proudění isothermickém - tedy $D \neq G$.

Pro numerické řešení tlakové funkce bylo použito počítače MINSK 22 a rovnice (5.78) pro isothermické proudění bylo pro vyhotovení programu upravena takto:

$$\frac{1}{(p_y S_y)^2} + \frac{1}{(\operatorname{tg} \psi S_{y1} p_1)^2} \left(\frac{y_1}{y} \right)^2 + \frac{2 \ln p_y}{M^2 R T_1} = k \quad (5.80)$$

Konstanta k v této rovnici lze určit z okrajové podmínky v bodu 2 kde platí:

$$p_2 = p_{\text{bar}} = \text{konst} = 98.060 \text{ N m}^{-2}$$

Tak se dostane závislost tlaku $p = f(y)$ definovaná implicitně rovnicí (5.80). Jelikož průtoková plocha S_y je funkcí zdvihu h , potom i tlak $p = f(y, h)$. Numerické řešení na číslicovém počítači MINSK 22 je tabelárně zpracováno v příloze č. 12.

Alternativní řešení

Rovnici (5.80) vyjadřující tlakovou funkci v implicitním tvaru lze úpravou převést na tvar explicitní takto:
V rovnici (5.80)

$$\frac{1}{(p_y S_y)^2} + \frac{1}{(\text{tg } \psi S_{y1} p_1)^2} \left(\frac{y_1}{y} \right)^2 + \frac{2 \ln p_y}{M^2 R T_1} = k$$

kterou lze psát ve tvaru

$$\frac{1}{p_y^2 S_y^2} + \frac{A}{y^2} + B \ln p_y = C \quad (5.81)$$

kde A, C jsou konstanty

a B je konstanta závislá pouze na M a T_1 .

Zavede-li se substituce: $p_y S_y = u$, $p_y = \frac{u}{S_y}$, $u > 0$
pak po dosazení platí:

$$\frac{1}{u^2} + \frac{A}{y^2} + B \ln u - B \ln S_y = C$$

a tedy:

$$\frac{1}{u^2} + B \ln u = C + B \ln S_y - \frac{A}{y^2}. \quad (5.82)$$

Proměnná funkce u po nahrazení novou proměnnou v dle vztahu:

$$v = \frac{1}{u^2} + B \ln u$$

a vyšetří její průběh:

$$\text{Derivace podle } u: \frac{dv}{du} = -\frac{2}{u^3} + \frac{B}{u} = \frac{1}{u^3} (B \cdot u^2 - 2)$$

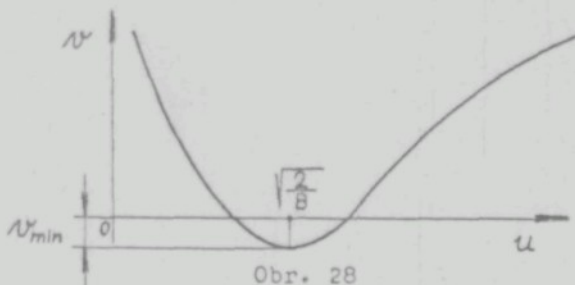
Pro extrém nové funkce v platí:

$$\frac{dv}{du} = -\frac{2}{u^3} + \frac{B}{u} = 0 \text{ a z toho } u = \sqrt{\frac{2}{B}}$$

A tedy:

$$v_{\min} = \frac{B}{2} + \frac{B}{2} \ln \frac{2}{B} = \frac{B}{2} (1 + \ln \frac{2}{B})$$

Grafický průběh funkce v :



Obr. 28

Inverzení funkce k funkcí v má dvě větve:

$$1) u = F_1(v)$$

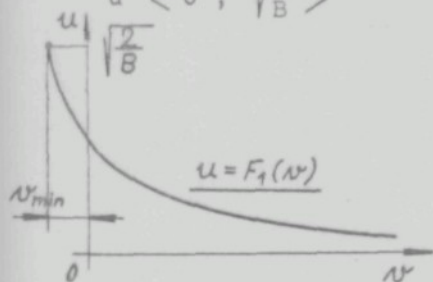
$$v < v_{\min}; +\infty$$

$$u < 0; \sqrt{\frac{2}{B}}$$

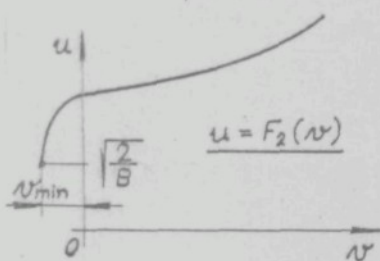
$$2) u = F_2(v)$$

$$v < v_{\min}; +\infty$$

$$u < \sqrt{\frac{2}{B}}; +\infty$$



Obr. 29



Obr. 30

Z rovnice (5.82) se vypočítá u :

$$\frac{1}{u^2} + B \ln u = \underbrace{C + B \ln S_y - \frac{A}{y^2}}_v$$

$$1) u = F_1(v) = F_1 \left(C + B \ln S_y - \frac{A}{y^2} \right)$$

Byla zavedena substituce $u = p_y \cdot S_y$

$$\text{Potom: } p_y = \frac{1}{S_y} F_1 \left(C + B \ln S_y - \frac{A}{y^2} \right) \quad (5.83)$$

$$2) \quad u = F_2(u) = F_2 \left(C + B \ln S_y - \frac{A}{y^2} \right)$$

$$p_y = \frac{1}{S_y} F_2 \left(C + B \ln S_y - \frac{A}{y^2} \right) \quad (5.84)$$

Po dosazení za konstanty byl při použití okrajových podmínek pro rovnici (5.84) vyhotoven program pro numerické řešení na číslicovém počítači MINSK 22. Tabulární a grafické zpracování výsledků je uvedeno v příloze č. 13. Pro řešení byla užita větev F_2 jelikož odpovídá experimentálním výsledkům a podobný průběh tlaků v mezeře lze též očekávat na základě průběhu průtokové plochy. Hodnota M byla vzata pro jednotlivé tlaky před tryskou $p_{(0)}$ a pro jednotlivé zdvihy h .

5.5 Proudění v mezeře v prostoru $0 \div 1$

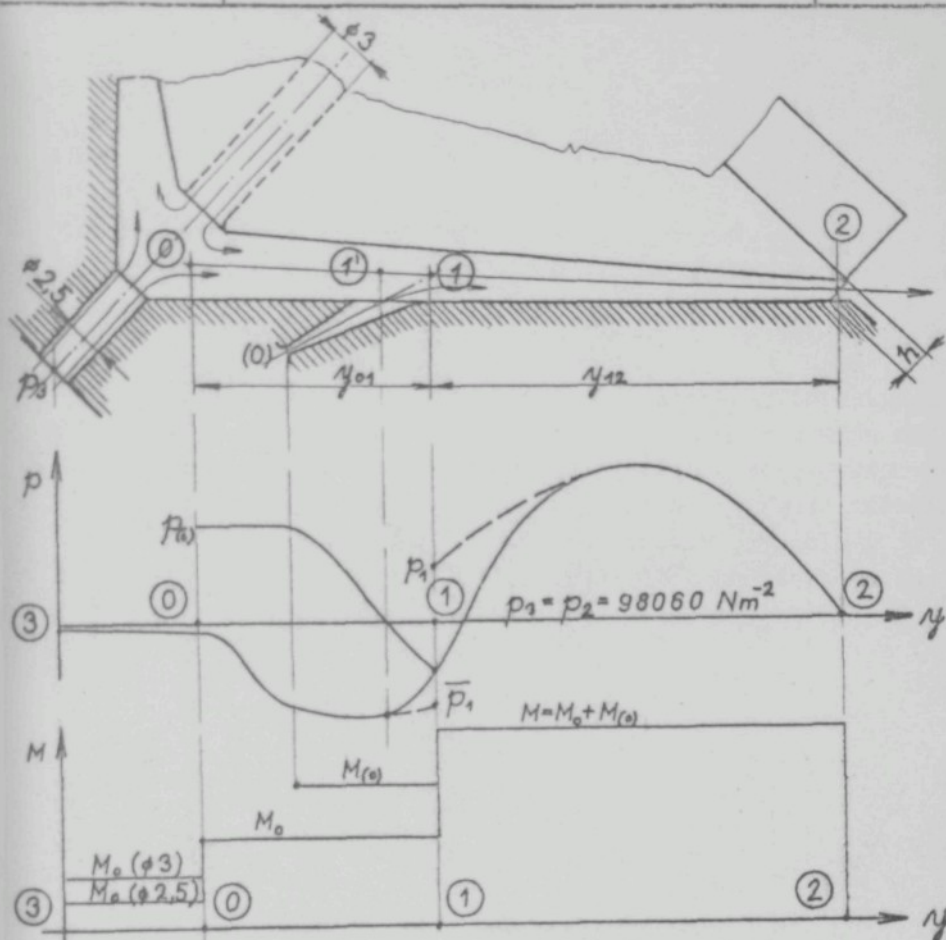
Pro určení celkové nosnosti je třeba ještě najít průběh tlaku v mezeře v prostoru mezi vrcholy kuželů rotorku a statorku a ústím trysek - viz obr. 31.

Proud vzduchu vystupující z trysek velkou rychlostí do prostoru mezery 1-2 strhuje vzduch z oblasti $0 \div 1$ a to zde způsobuje nasávací - ejektorový účinek. Do mezery tím proudí otvory ve statorku a rotorku určitá hmotnost vzduchu M_0 . Od výstupu z trysek 1' po místo 1 nastává mísení hmoty M_0 a hmotou $M_{(0)}$ a prudké zvýšení tlaku.

Pro určení průběhu tlaku v kterémkoliv místě oblasti $0 - 1'$ bude zkoumáno proudění mezi obecně vytknutými body $0 - y$. Veličiny v těchto bodech jsou označeny indexy $0, y$. Předpokládá se opět proudění isotermické. Při použití dříve uvedených zjednodušujících předpokladů lze použít stejné odvození (vztahy (5.20) - (5.54)) diferenciální pohybové rovnice proudění a za výchozí vzít vztah (5.54):

$$c_y dc_y - k_1^2 \frac{dy}{y^3} = \frac{dp_y}{\rho_y}$$

Dále platí za předpokladu, že plyn v bodě 0 má teplotu T_1 .



Obr. 31

Průběh tlaků a průtokové hmotnosti

$$\frac{dp_y}{\rho_y} = R T_1 \quad \frac{d\rho_y}{\rho_y} = R T_1 \quad \frac{dp_y}{p_y}$$

Po dosazení do rovnice (5.54) a integrování bude:

$$\frac{c_y^2}{2} + \frac{k_1^2}{2y^2} + R T_1 \ln p_y = k_4 \quad (5.85)$$

Z rovnice kontinuity:

$$c_y = \frac{M_0}{S_y \rho_y} = \frac{M_0 R T_1}{S_y p_y}$$

(Teplotu proudícího vzduchu do místa 0 je možno upravit na

teplotu T_1 .)

Pro integrační konstantu k_1 platí podle (5.52):

$$k_1 = c_y \cdot y$$

kde c_y je podle obr. 18 tangenciální rychlost.

Pro proudění v mezeře v prostoru $0 \div 1$ je účinn tento předpoklad:

$$c_y = 0$$

tedy předpokládá se radiální vstup do mezery. (Předpoklad je oprávněný - proudící plyn je ideální - nevazký - proudí od vstupu do mezery v místě 0 ve směru povrchů kužele.) Teprve až na rovnoběžkové kružnici v místě 1 je směr proudu změněn vlivem proudění vzduchu z trysek. Za tohoto předpokladu je konstanta k_1 nulová a tím i celý druhý člen na levé straně rovnice (5.85), která po dosazení za rychlost c_y přejde na tvar:

$$\frac{M_0^2 R^2 T_1^2}{2 S_y^2 p_y^2} + R T_1 \ln p_y = k_4$$

Po úpravě:

$$\frac{1}{(S_y p_y)^2} + \frac{2 \ln p_y}{M_0^2 R T_1} = k_4 \quad (5.86)$$

5.6 Komplexní řešení tlakové funkce

Pro tlak byly odvozeny tyto rovnice:

Pro oblast $0 \div 1$ rovnice (5.86)

$$\frac{1}{(S_y p_y)^2} + \frac{2 \ln p_y}{M_0^2 R T_1} = k_4$$

Pro oblast $1 \div 2$ rovnice (5.80)

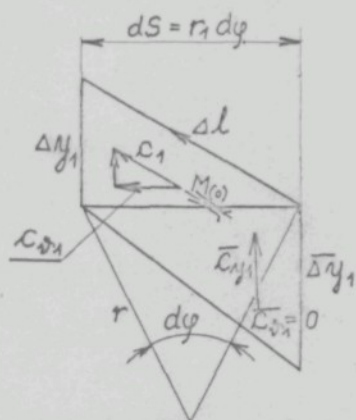
$$\frac{1}{(S_y p_y)^2} + \frac{1}{(\tan \psi S_{y1} p_1)^2} \left(\frac{y_1}{y} \right)^2 + \frac{2 \ln p_y}{(M_0 + M_{(0)})^2 R T_1} = k$$

Pro určení tlaku z těchto rovnic je třeba nejdříve vyjádřit čtyři neznámé konstanty a to: Integrační konstanty k_1, k_4 , přísávanou hmotnost vzduchu M_0 a tlak p_1 . Z obrázku 31 vyplývá

že v místě 1 se průtoková hmotnost mění skokem a je nutno tedy i předpokládat nespojitost v tlaku v okolí místa 1. Nespojitost je v obrázku 31 vyznačena u tlaku čárkovaně přičemž tlak o něco vpravo od bodu 1 - tedy kde již proudí hmotnost $M = M_0 + M_{(0)}$ je označen p_1 , tlak o něco vlevo od bodu 1, kde proudí jen množství M_0 je označen $\bar{p}_1$. V uvedených rovnicích je tlak $\bar{p}_1$ skryt v průtokové hmotnosti M_0 jež na něm bude závislá.

S ohledem na počet neznámých v rovnicích (5.80) a (5.86) je třeba pro jejich řešení postavit další rovnice. Pro určení tlaků p_1 a $\bar{p}_1$ lze použít rovnice pro hybnost proudu pro směr radiální a tangenciální v místě nespojitosti tlaků - tedy v místě 1.

V místě 1 je vytknut element kontrolní plochy dS podle obr. 32. Časová změna hybnosti se rovná výslednici vnějších



Obr. 32

Geometrie kontrolní plochy

sil a je dána tokem hybnosti kontrolní plochou. Ve složkách možno psát:

$$\frac{d}{dt} \int \rho c_n dV = \sum F_n$$

Elementem dS kontrolní plochy proteče za jednotku času objem $V = c_n \cdot dS$ o hmotnosti ρc_n , kde c_n je rychlost v určitém směru. Vnější síly jsou zde reprezentovány tlakem na povrch kontrolní plochy, tedy:

$$F = p \cdot dS.$$

Pro celkovou hybnost potom platí:

$$\int_S \rho c_n c_n dS = - \int_S p dS.$$

Ve směru radiálním (směr y) bude tedy pro hybnost platit za předpokladu, že do kontrolní plochy proudí hmotnost M_0 radiálně ($c_{y1} = 0$) a v místě kontrolní plochy vstupuje z trysek hmotnost $M_{(0)}$. Všechny veličiny před kontrolní plochou

jsou označeny indexem 1 s pruhem, veličiny vystupující z kontrolní plochy indexem 1, a veličiny související s tryskami indexem (o).

$$\begin{aligned} \overline{p}_1 \overline{c}_{y1} (-c_{y1}) d\overline{S}_1 + \overline{p}_1 c_{y1} c_{y1} dS_1 + \overline{p}_{(o)} c_{y(o)} (-c_{y(o)}) dS_{(o)} = \\ = \overline{p}_1 d\overline{S}_1 - p_1 dS_1^* + p_{(o)} dS_{(o)} \end{aligned}$$

$$\text{kde: } d\overline{S}_1 = r_1 d\varphi h_1 - dS_{(o)}$$

$$dS_1 = \Delta y_1 h_1 = \frac{c_{y1}}{c_{y1}} r_1 d\varphi h_1$$

$$dS_{(o)} = \text{výstupní průřez trysky}$$

$$p_{(o)} dS_{(o)} - \text{malé} - \text{zanedbává se}$$

$$dS_1^* = \Delta \ell \frac{r_1 d\varphi}{\Delta \ell} h = r_1 d\varphi h$$

přičemž:

$$dS_{(o)} c_{y(o)} \overline{p}_{(o)} = \frac{M_{(o)}}{2\pi} d\varphi$$

Po dosazení, úpravě a integraci bude:

$$p_1 c_{y1}^2 - \overline{p}_1 \overline{c}_{y1}^2 + R T_1 (p_1 - \overline{p}_1) = \frac{R T_1 M_{(o)}}{S_1} (c_{(o)} + \frac{R T_1}{c_{(o)}}).$$

Po dosazení z rovnice kontinuity:

$$\frac{(M_o + M_{(o)})^2 R T_1}{p_1 S_1^2} - \frac{M_o^2 R T_1}{\overline{p}_1 S_1^2} + p_1 - \overline{p}_1 = \frac{M_{(o)}}{S_1} (c_{(o)} + \frac{R T_1}{c_{(o)}}) \quad (5.87)$$

Podobně platí pro hybnost ve směru tangenciálním (směr ψ):

$$\begin{aligned} \overline{p}_1 \overline{c}_{y1} (-\overline{c}_{y1}) (h_1 r_1 \Delta \varphi - dS_{(o)}) + \overline{p}_{(o)} c_{y(o)} (-c_{y(o)}) dS_{(o)} \\ + \overline{p}_1 c_{y1} c_{y1} = -p_1 h_1 \Delta y_2 + \overline{p}_1 h_1 \Delta \ell \frac{y_2}{\Delta \ell} \end{aligned}$$

Po úpravě a integraci:

$$p_1 c_{y1}^2 - \overline{p}_1 \overline{c}_{y1}^2 = \frac{R T_1 M_{(o)}}{S_1} c_{(o)}$$

Po dosazení z rovnice kontinuity při použití (5.9):

$$\frac{(M_o + M_{(o)})^2 R T_1}{\operatorname{tg} \psi S_1 p_1} = M_{(o)} c_{(o)} \operatorname{tg} \psi \quad (5.88)$$

Další dvě rovnice lze získat z platnosti rovnic (5.80) a (5.86) pro okrajové body 0 a 2. Rovnice (5.86) má pro bod 0 tvar:

$$\frac{1}{(S_o p_o)^2} + \frac{2 \ln p_o}{M_o^2 \cdot R T_1} = \bar{k}$$

Rovnice (5.80) má pro bod 2 tvar:

$$\frac{1}{(S_2 p_2)^2} + \frac{1}{(S_1 p_1 \operatorname{tg} \psi)^2} \left(\frac{y_1}{y_2} \right)^2 + \frac{2 \ln p_2}{(M_o + M_{(o)})^2 R T_1} = k$$

Konstantní členy budou označeny takto:

$$\frac{1}{(S_o p_o)^2} = A; \quad \frac{2 \ln p_o}{R T_1} = B; \quad \frac{1}{(S_2 p_2)^2} = C$$

$$\frac{1}{(S_1 \operatorname{tg} \psi)^2} \left(\frac{y_1}{y_2} \right)^2 = D; \quad \frac{2 \ln p_2}{R T_1} = E$$

$$\frac{R T_1}{S_1^2} = F; \quad \frac{M_{(o)}}{S_1} (c_{(o)} + \frac{R T_1}{c_{(o)}}) = G;$$

$$\frac{R T_1}{\operatorname{tg} \psi S_1} = H; \quad M_{(o)} c_{(o)} \operatorname{tg} \psi = I$$

Hledané konstanty jsou dále označeny :

$$M_o = x_1; \quad k = x_2; \quad p_1 = x_3; \quad k = x_4; \quad p_1 = x_5$$

Po dosažení obdrží se soustava rovnic:

$$A + \frac{B}{x_1} = x_2 \quad (5.89)$$

$$C + \frac{D}{x_3} + \frac{E}{(x_1 + M_{(o)})^2} = x_4 \quad (5.90)$$

$$F \cdot \frac{(x_1 + M_{(0)})^2}{x_3} - F \frac{x_1^2}{x_5} + x_3 - x_5 = G \quad (5.91)$$

$$H \cdot \frac{(x_1 + M_{(0)})^2}{x_3} = I \quad (5.92)$$

Řešením uvedené soustavy rovnic budou určeny hledané konstanty a potom po jejich dosazení do (5.86) a (5.80) lze najít průběh tlaku po celé délce mezery vždy pro určitý zdvih h za předpokladu, že tlak v místě 0 a v místě 2 je tlakem barometrickým - tedy $p_0 = p_2 = p_{\text{bar}}$. Řešení po vyhotovení vhodného programu bylo provedeno na číslicovém počítači MINSK 22. Výsledky jsou uvedeny v příloze č.14.

6.0 Nosnost navrženého zařízení

(Platí pro aerostatická ložiska, kde expandující vzduch nese a zároveň pohání rotorek.)

Nosnost je obecně definována součinem tlaku a nosné plochy ložiska

$$L_{cel} = \int_{\kappa_0}^{\kappa_2} p \cdot dS, \quad (6.1)$$

$$\text{kde: } dS = 2 \pi \cdot r \cdot dr \quad (6.2)$$

S ohledem na barometrický tlak, který působí na otáčející se kuželový rotorek shora, bude třeba psát pro skutečnou nosnost pro provoz kdy na rotorku není uchyceno a zkrucováno vlákno:

$$L_{cel} = L_{(0+1)} + L_{(1+2)} - L_{p \text{ bar}} = G, \quad (6.3)$$

kde:

$L_{(0+1)}$ - nosnost daná tlakem v oblasti mezery (0+1)
(viz např. obr. 31)

$L_{(1+2)}$ - nosnost daná tlakem v oblasti mezery 1+2

$L_{(p\text{-bar})}$ - síla od barometrického tlaku působícího na rotorek shora

G - síla tíže vlastního rotorku.

Po dosazení do (6.3) bude:

$$L_{celk} = 2\pi \left[\int_{\kappa_0}^{\kappa_1} p_{(0+1)} r \cdot dr + \int_{\kappa_1}^{\kappa_2} p_{(1+2)} r \cdot dr - p_{\text{bar}} \cdot \frac{r_2^2}{2} \right] = G. \quad (6.4)$$

V případě že na rotorku bude uchyceno vlákno a bude zkrucováno, platí pro nosnost (viz obr. 17a):

$$L_{cel} = L_{(0+1)} + L_{(1+2)} - L_{(p\text{-bar})} = G + F_{v2} - F_{v1}, \quad (6.5)$$

kde F_{v2} - tahová síla vlákna podle vztahu (5.1).

S ohledem na to, že proudy expandujícího vzduchu z trysek

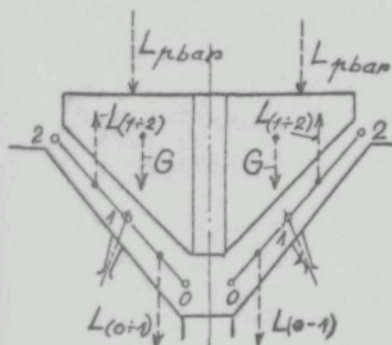
působí pod určitým úhlem vůči svislé ose přímo na rotorek, lze předpokládat, že nosnost se tímto účinkem zvětší. Po zahrnutí tohoto vlivu jež je označen L_{pr} (který zde však není přesně určován) by konečně pro nosnost aerostatického ložiska, kde expandující vzduch nese a zároveň pohání, platilo:

$$L_{cel} = L_{(0+1)} + L_{(1+2)} + L_{pr} - L_{(p-bar)} = G + F_{v2} - F_{v1} \quad (6.6)$$

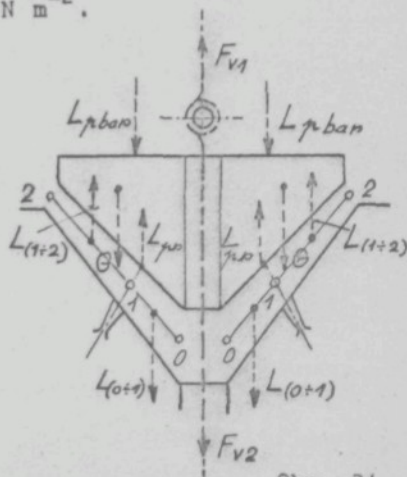
Zařízením je možno zakrucovat polyamidová vlákna v určitém rozsahu jejich tloušťky. Tím se však též mění síly tahu vláken F_{v2} a F_{v1} a na levé straně rovnice (6.6) se musí také změnit členy $L_{(0+1)}$ a $L_{(1+2)}$. Při konstantním tlaku vzduchu před tryskami se např. při zvětšení tahové síly F_{v2} zmenší mezera h a tím však se zvětší tlak v mezeře.

Přesné číselné řešení celkové nosnosti jako funkce průtokové hmoty a funkce zdvihu h se zde neuvádí. Na obr. 33 je naznačeno působení sil podle rovnice (6.3) a na obr. 34 působení sil podle rovnice (6.6). V příloze č. 14 je grafickým integrováním ověřena nosnost za provozu bez zakrucování při tlaku před tryskou

$$P_{(0)} = 0,4 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}.$$



Obr. 33



Obr. 34

Působení sil na rotorek

- Kde: $L_{(0+1)}$ - nosnost pro prostor 0+1
 $L_{(1+2)}$ - nosnost pro prostor 1+2
 $L_{(p\text{-}bar)}$ - síla od barometrického tlaku působící
na rotorek shora
 G - síla tíže vlastního rotorku

Při zakrucování vláken platí pro nosnost (viz obr. 17a):

$$L_{\text{celk}} = L_{(0+1)} + L_{(1+1)} - L_{(p\text{bar})} = G + F_{v2} - F_{v1},$$

kde: F_{v2} - tahová síla vlákna podle (5.1).

Podrobné řešení celkové nosnosti, tabelární zpracování výsledků včetně grafů je v příloze č.14. Řešení bylo po vhodném naprogramování provedeno na číslicovém počítači MINSK 22. Na obr. 33 je celková nosnost v závislosti na průtokové hmotnosti vzduchu M a na obr. 34 v závislosti na zdvíhu h .

7.0 Uložení vřeten na kuželových ložiskách mazaných kapalinou nebo plynem

Používání plynů jako mazadla ke snížení tření dvou strojních dílů je v poslední době středem zájmu mnoha vývojových oddělení vědeckých a výzkumných ústavů. Tento soustředěný zájem konstruktérů a výzkumníků vyplývá z požadavků konstrukce nových vysoce výkonných strojů, kde rotační části pracují za velmi vysokých otáček. Rovněž některá nově vzniklá odvětví - jako např. výroba jaderné energie nebo astronautika si vynutila použití plynů jako mazadla. Dále mazání plynem je použito tam, kde je nepřípustné znečištění stroje, např. olejem - různá optická zařízení apod. Zmenšení třecí práce a zjednodušení konstrukce přináší též použití plynem mazaných ložisek u různých menších vysokootáčkových proudových strojů, kde se pracovní látka použije zároveň k mazání a není třeba oddělovat mazací místa od jiných částí stroje - není třeba těsnit - např. u expančních turbinek. Konečně též za provozu při velmi nízkých nebo vysokých teplotách se s výhodou použije plynového mazání, neboť běžné mazací prostředky jsou velmi citlivé na provozní podmínky. Snad jen syntetický olej - silikonový - má malou závislost viskozity na teplotě a lze jej použít na málo zatížená ložiska pracující za teplot od -45°C do $+250^{\circ}\text{C}$ / 15 /.

U ložisek mazaných plynem při velmi vysokých otáčkách také dojde k zahrnutí plynu, avšak rychle proudící plyn vzniklé třecí teplo lehce z ložiska odvede.

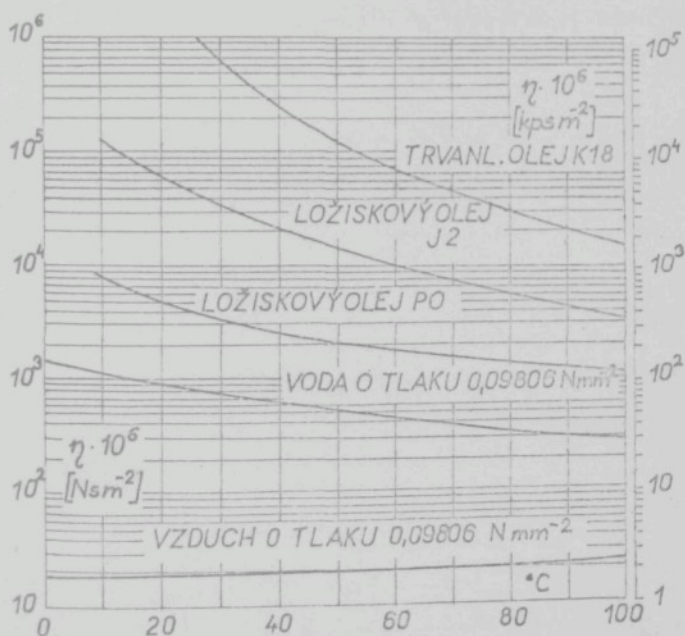
U aerodynamických ložisek se plyn vlivem relativního pohybu dvou po sobě se troucích těles nasává do ložiskové mezery. Tato ložiska lze zatěžovat až když otáčky překročí určitou mez. Při rozběhu a doběhu nelze zamezit dotyku dvou třecích ploch a dojde k polosuchému tření. Problémem zůstává náchylnost k rozkmitání hřídele, jež se vlivem nízké viskozity plynů hůře

tlumí než při použití kapalného maziva. Nosnost je malá (podrobně: Drescher-Abteilung Reibungsforschung am Max-Planck Institut für Strömungsforschung Göttingen / 16 /).

V této práci je přihlédnuto zatím k ložiskům aerostatickým, do kterých je plyn vtlačován pod tlakem. Přívodní tlak lze volit prakticky libovolně a tím dosáhnout větší nosnosti. Je zde menší tření než u aerodynamických. Nevýhodou je potřeba vnějšího zdroje tlaku. Tam, kde s ohledem na větší zatížení už aerodynamická ložiska nestačí, použije se ložisek aerostatických. Nosnost je závislá na tlaku a nezávislá na otáčkách. Naopak nosnost ložisek aerodynamických je funkcí jen otáček.

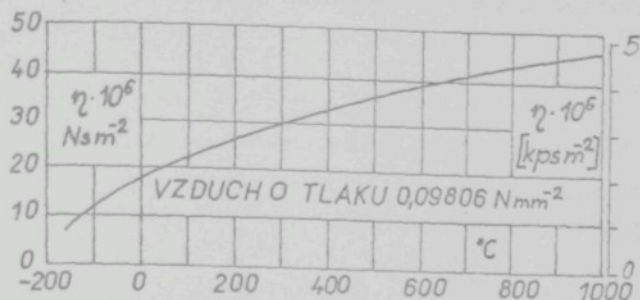
Viskozita maziva

Nejdůležitější veličina, která udává jakost maziva a tím i tření a nosnost ložiska je viskozita. Na obr. 35 je vynesena



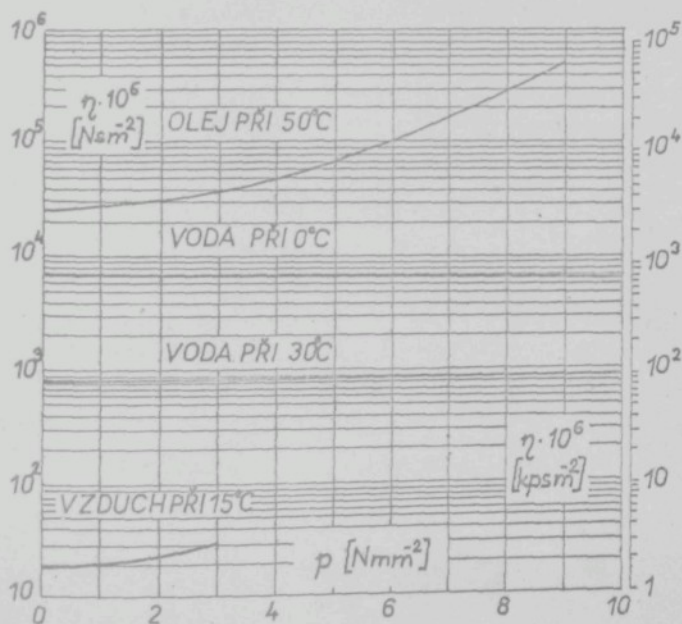
Obr. 35 Viskozita maziva v závislosti na teplotě 0-100°C

viskozita vzduchu, vody a oleje v závislosti na teplotě. Na obr. 36 je viskozita vzduchu v závislosti na teplotě



Obr. 36 Viskozita vzduchu v závislosti na teplotě
-200 ÷ 1000°C

Na obr. 37 je viskozita oleje, vody a vzduchu v závislosti na tlaku.



Obr.37 Viskozita maziva v závislosti na tlaku

U plynů je viskozita značně menší než u kapalin a tím je menší i nosnost ložiska.

U aerostatických ložisek můžeme nosnost ovlivnit počátečním tlakem plynu, avšak tím se zvětší průtočná hmota.

Z obr. 35, 37 je vidět, že viskozita plynů s teplotou jen mírně stoupá. U kapalných mazacích prostředků však s teplotou viskozita prudce klesá. Vlivem špatného odvodu tepla z třecí práce se vyskytují u ložisek mazaných olejem velké rozdíly v teplotě - dochází i k změně viskozity v provozních podmínkách až v poměru 10 : 1, jak je vidět na obrázku. Z průběhu viskozity vzduchu v závislosti na tlaku je vidět, že vzhledem k provozním podmínkám, kdy teplota plynového ložiska je takřka konstantní, není třeba tuto závislost při výpočtech respektovat.

Výpočet tření u kuželového ložiska

Protože viskozita plynů je řádově asi 10^{-3} viskozity běžných univerzálních olejů, jsou nízké ztráty třením, což umožňuje provoz při vysokých kluzných rychlostech. To je hlavní vliv na vývoj těchto ložisek.

$$\text{Třecí síla: } \int dF = \int dS \cdot \eta \cdot \frac{dc_t}{dy} \quad (7.1)$$

kde: c_t je tangenciální rychlost vyvolaná otáčením.
Pro kuželové ložisko je plocha: (α = úhel kužele)

$$dS = \frac{2 \pi r dr}{\cos \alpha} \quad (7.2)$$

Rychlostní gradient je:

$$\frac{dc_t}{dy} = \frac{c_t}{h} = \frac{r \omega}{h} \quad (7.3)$$

kde: ω = úhlová rychlost a h = tloušťka mezery

$$\text{Třecí moment: } \int dM = \int_{r_i}^{r_a} dF r = \int_{r_i}^{r_a} \frac{2 \pi \eta \omega}{\cos \alpha \cdot h} r^3 dr \quad (7.4)$$

$$\text{Po integraci: } M_t = \frac{2 \pi \eta \omega}{\cos \alpha \cdot h} \left[\frac{r^4}{4} \right]_{r_i}^{r_a} = \frac{\pi \eta \omega}{2 \cos \alpha \cdot h} (r_a^4 - r_i^4) \quad (7.5)$$

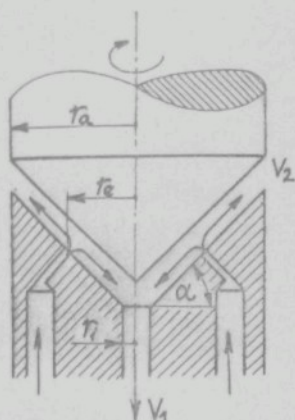
Pro dané ložisko je jen ω proměnná a můžeme tedy psát, že:

$$M_t = k \omega \quad (7.6)$$

Ztracený výkon v ložisku je:

$$P_t = \frac{M_t \cdot \omega}{102} \quad (7.7)$$

8.0 Hydrostatické kuželové ložisko



Obr. 38

Schema hydrostatického
kuželového ložiska

U tohoto ložiska se pod tlakem přivádí kapalina do ložiskové mezery kruhovou drážkou nebo pásem trysek. Kapalina proudí na obě strany - ven z kužele a dovnitř kužele - viz obr. 38. Jako mezačího prostředku lze použít také vody a takové ložisko je označováno jako vodní ložisko. S takovým ložiskem provádělo pokusy již více autorů a jejich snahou bylo najít podmínky pro optimální parametry ložiska. Konstruktivní podmínky lze získat při řešení proudění kapaliny v mezeře ložiska.

proudění kapaliny v mezeře ložiska.

8.1 Řešení proudění - tlakový profil

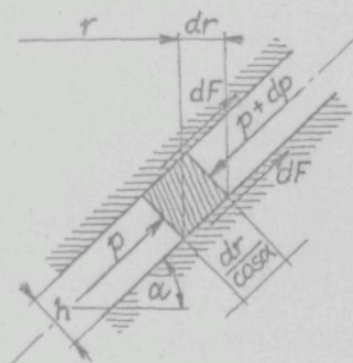
Při proudění ložiskovou mezerou se vytváří tlakové pole třením o stěny mezery. Tlakové pole je směřováno pro nosnost ložiska. Tlak klesá od místa výstupu z drážky nebo trysek na obě strany až na atmosférický tlak.

Pro řešení proudění jsou určeny tyto předpoklady:

- Kapalina proudí z kruhové drážky na poloměru r_e . (Prakticky se přivádí jednotlivými tryskami.)
- Proudění je isothermické.

- c) Proudění je stacionární.
d) Tlak p se napříč mezery h nemění.
e) Proudění je laminární - to ukazuje velikost Reynoldsova

čísla $R = \frac{d_{\text{ekv}} \cdot c}{\nu}$ pro velikost mezery $h = 0,04 \text{ [mm]}$ a pro dynamickou vazkost vody při 20°C $\eta = 10^{-3} \text{ [N s m}^{-2}\text{]}$ to jest pro kinematickou vazkost $\nu = \frac{\eta}{\rho} = 10^{-6} \text{ [m}^2 \text{s}^{-1}\text{]}$.



Obr. 39

Síly působící na element

Počítá se s parabolickým průběhem rychlosti v příčném řezu.

f) Proudící kapalina je voda.

g) Zanedbává se síla tíže.

Pro výpočet průběhu tlaku v ložiskové mezeře je vytknut element proudící kapaliny a vyznačena rovnováha sil, které na element působí - viz obr.39. Z rovnováhy tlakových a třecích sil pro ustálené proudění elementu plyne:

$$dp S_1 = 2 dF \quad (8.1)$$

Kde: přírůstek tlaku = dp

$$\text{plocha} = S_1 = 2 \pi r h \quad (8.2)$$

$$\text{třecí síla} = dF = d S_2 \cdot \tau \quad (8.3)$$

$$d S_2 = 2 \pi r \frac{dr}{\cos \alpha} \quad (8.4)$$

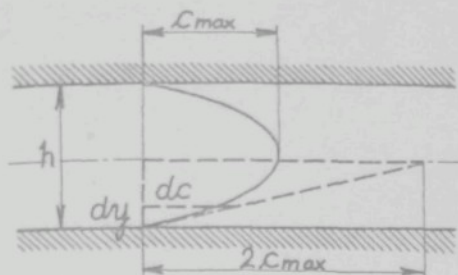
$$\text{Smykové napětí podle Newtona } \tau = \eta \cdot \frac{dc}{dy} \quad (8.5)$$

Po dosažení do (8.1) bude

$$dp 2 \pi r h = 4 \pi r \eta \frac{dc}{dy} \cdot \frac{dr}{\cos \alpha} \quad (8.6)$$

Střední rychlost laminárního proudu je uvažována, jako by se jednalo o proudění mezi dvěma rovnoběžnými deskami / 17 /.

Zároveň pro střední rychlost proudění plyne z rovnice kontinuity



$$c_{stř} = \frac{V}{2 \pi r h} \quad (8.7)$$

$$c_{stř} = \frac{2}{3} c_{max}$$

Rychlostní gradient kolmo na směr proudu a v místě dotyku rychlostního profilu se stěnou - na obr. 40 v bodě A - bude

Obr. 40

Rychlostní profil laminárního proudu

$$\frac{dc}{dy} = \frac{2 c_{max}}{\frac{h}{2}} = \frac{4 c_{max}}{h} = \frac{6 \cdot c_{stř}}{h} = \frac{3 V}{\pi r h^2} \quad (8.8)$$

Po dosazení do rovnice (8.6):

$$dp = \frac{6 \cdot \eta \cdot V}{\pi h^3 \cos \alpha} \cdot \frac{dr}{r} \quad (8.9)$$

Podle obr. 38 se rozdělí proudění na proudění dovnitř kužele s průtokovým objemem V_1 a na proudění ven z kužele s průtokovým objemem V_2 .

Při proudění dovnitř kužele platí obr. 39 a pro tlak bude:

$$\int_{p_a}^{p_1} dp = \frac{6 \cdot \eta \cdot V}{\pi h^3 \cos \alpha} \cdot \int_{r_1}^r \frac{dr}{r} \quad (8.10)$$

U ložisek, kde mazací prostředek je kapalina se počítá s přetlakem a atmosferický tlak p_a není respektován.

Po integraci bude:

$$p_1 = \frac{6 \cdot \eta \cdot V_1}{\pi h^3 \cos \alpha} (\ln r - \ln r_1) \quad (8.11)$$

Při proudění směrem ven z kužele roste poloměr r , avšak tlak p klesá a tedy dp je záporný. Proto pro fyzikální podmínky tohoto problému je třeba před rovnicí (8.9) dát znaménko minus. Integrovat je třeba od r_a a od p_2 do p_a .

Po integraci:

$$-\int_{p_1}^{p_2} dp = \frac{6 \cdot \eta \cdot V_2}{\pi h^3 \cos \alpha} \int_r^{r_a} \frac{dr}{r} = \int_{p_2}^{p_1} dp$$

$$p_2 = \frac{6 \cdot \eta \cdot V_2}{\pi h^3 \cos \alpha} (\ln r_a - \ln r) \quad (8.12)$$

Za konstantu lze položit neproměnné hodnoty:

$$k = \frac{\eta \cdot V}{h^3} \quad (8.13)$$

Pro grafické znázornění je výhodné zavést bezrozměrnou veličinu $\frac{p}{k}$. Pro $\frac{p_1}{k}$ a $\frac{p_2}{k}$ plyne z rovnic (8.11), (8.12) a (8.13):

$$\frac{p_1}{k} = \frac{6}{\pi \cos \alpha} \frac{V_1}{V} (\ln r - \ln r_1)$$

$$\frac{p_2}{k} = \frac{6}{\pi \cos \alpha} \frac{V_2}{V} (\ln r_a - \ln r)$$

Průtokový objem V_1 a V_2 z celkového průtokového objemu V lze určit z podmínky, že na poloměru $r = r_e$ bude platit $p_1 = p_2$.

Z porovnání rovnic (8.11) a (8.12) plyne:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\ln r_a - \ln r_e}{\ln r_e - \ln r_1} \quad (8.14)$$

Jelikož $V = V_1 + V_2$, bude po dosazení za V_2 z rovnice (8.14):

$$V = V_1 + V_1 \frac{\ln r_e - \ln r_1}{\ln r_a - \ln r_e} = V_1 \left(1 + \frac{\ln r_e - \ln r_1}{\ln r_a - \ln r_e} \right) =$$

$$= V_1 \frac{\ln r_a - \ln r_1}{\ln r_a - \ln r_e}$$

$$\text{z toho } V_1 = V \frac{\ln r_a - \ln r_e}{\ln r_a - \ln r_1}; \text{ obdobně } V_2 = V \frac{\ln r_e - \ln r_1}{\ln r_a - \ln r_1} \quad (8.15)$$

Po dosazení za V_1 a V_2 do vztahů pro $\frac{p_1}{k}$ a $\frac{p_2}{k}$ bude:

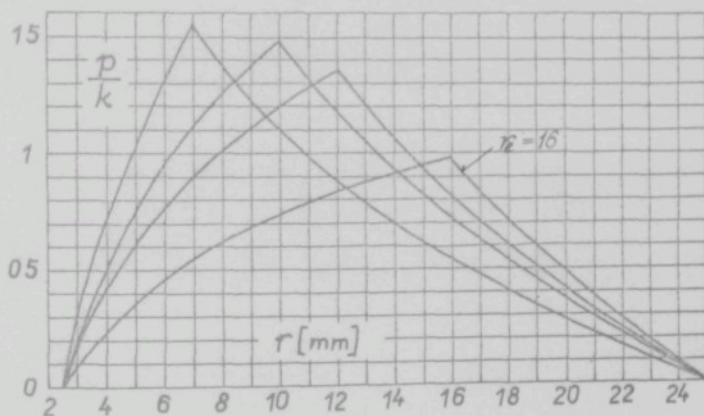
$$\frac{p_1}{k} = \frac{6}{\pi \cos \alpha} \frac{(\ln r - \ln r_1) (\ln r_a - \ln r_e)}{\ln r_a - \ln r_1} \quad \text{a)} \quad (8.16)$$

$$\frac{p_2}{k} = \frac{6}{\pi \cos \alpha} \frac{(\ln r_e - \ln r_1) (\ln r_a - \ln r)}{\ln r_a - \ln r_1} \quad \text{b)}$$

Pro tlak p v místě vstupu tekutiny do mezery, tj. při $r = r_e$ bude platit $p = f(r_e)$:

$$\frac{p}{k} = \frac{6}{\pi \cos \alpha} \frac{(\ln r_e - \ln r_1) (\ln r_a - \ln r_e)}{\ln r_a - \ln r_1} \quad (8.17)$$

Pro ložisko o rozměrech $r_a = 25 \text{ mm}$, $r_1 = 2,5 \text{ mm}$, $\alpha = 45^\circ$ je závislost $\frac{p}{k}$ na obrázku 41 graficky vynesena a to pro $r_e = 7, 10, 12, 16 \text{ mm}$.



Obr. 41

Průběh $\frac{p}{k}$ v závislosti na poloměru r_e pro $r_e = 7, 10, 12$ a 16 mm

8.2 Nosnost hydrostatického kuželového ložiska

Nosnost je definována součinem tlaku a nosné plochy ložiska

$$dL = p \cdot dS_3 \quad (8.18)$$

kde: $dS_3 = 2 \pi r dr$

Po dosazení z (8.16) a integraci ve směru od r_1 do r_e (viz obr.4) bude

$$L_1 = p_1 dS_3$$

$$dL_1 = \frac{6 k (\ln r_a - \ln r_e)}{\cos \alpha (\ln r_a - \ln r_1)} (\ln r - \ln r_1) 2 \pi r dr ;$$

$$L_1 = \frac{12 k (\ln r_a - \ln r_e)}{\cos \alpha (\ln r_a - \ln r_1)} \int_{r_1}^{r_a} (\ln r - \ln r_1) r dr ;$$

$$\text{konstanta } K = \frac{12 k (\ln r_a - \ln r_e)}{\cos \alpha (\ln r_a - \ln r_1)}$$

a po integraci:

$$L_1 = K \left[\frac{r^2}{2} \ln r - \frac{r^2}{4} - \frac{r^2}{2} \ln r_1 \right]_{r_1}^{r_a} =$$

$$= K \left(\frac{r_e^2}{2} \ln r_e - \frac{r_e^2}{4} - \frac{r_e^2}{4} - \frac{r_e^2}{2} \ln r_1 - \frac{r_1^2}{2} \ln r_1 + \frac{r_1^2}{4} + \frac{r_1^2}{2} \ln r_1 \right) =$$

$$L_1 = K \left(\frac{r_e^2}{2} \ln \frac{r_e}{r_1} + \frac{r_1^2 - r_e^2}{4} \right) \quad (8.19)$$

Obdobně ve směru od r_e do r_a bude:

$$L_2 = p_2 dS_3$$

a po dosazení ze (8.16b):

$$L_2 = \frac{12 k (\ln r_e - \ln r_1)}{\cos \alpha (\ln r_a - \ln r_1)} \int_{r_e}^{r_a} (\ln r_a - \ln r) r dr =$$

$$L_2 = K \left[\frac{r_a^2}{2} \ln r_a - \frac{r_a^2}{2} \ln r + \frac{r_a^2}{4} \right]_{r_e}^{r_a} =$$

$$= K \left(\frac{r_a^2}{2} \ln r_a - \frac{r_a^2}{2} \ln r_a + \frac{r_a^2}{4} - \frac{r_e^2}{2} \ln r_a + \frac{r_e^2}{2} \ln r_e - \frac{r_e^2}{4} \right) =$$

$$L_2 = K \left(-\frac{r_e^2}{2} \ln \frac{r_e}{r_a} + \frac{r_a^2 - r_e^2}{4} \right) \quad (8.20)$$

Celková nosnost bude:

$$L = L_1 + L_2$$

$$L = \frac{12 k}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{\ln r_a - \ln r_1} \left[\left(\ln \frac{r_a}{r_e} \right) \left(\frac{r_e^2}{2} \ln \frac{r_e}{r_1} + \frac{r_1^2 - r_e^2}{4} \right) + \right.$$

$$\left. + \left(\ln \frac{r_e}{r_1} \right) \left(\frac{r_e^2}{2} \ln \frac{r_e}{r_a} + \frac{r_a^2 - r_e^2}{4} \right) \right] \quad (8.21)$$

Pro grafické znázornění bude zajímavý poměr $\frac{L}{p}$:

$$\frac{L}{p} = \frac{12 k}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{\ln r_a - \ln r_1} \left[\left(\ln \frac{r_a}{r_e} \right) \left(\frac{r_e^2}{2} \ln \frac{r_e}{r_1} + \frac{r_1^2 - r_e^2}{4} \right) + \right.$$

$$\left. + \left(\ln \frac{r_e}{r_1} \right) \left(\frac{r_e^2}{2} \ln \frac{r_e}{r_a} + \frac{r_a^2 - r_e^2}{4} \right) \right] \frac{\pi \cos \alpha (\ln r_a - \ln r_1)}{6 k \ln \frac{r_e}{r_1} \ln \frac{r_a}{r_e}}$$

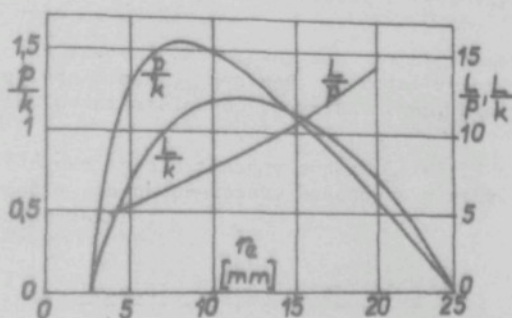
$$= 2 \pi \left[\frac{r_e^2}{2} + \frac{r_1^2 - r_e^2}{4 \ln \frac{r_e}{r_1}} - \frac{r_e^2}{2} + \frac{r_a^2 - r_e^2}{4 \ln \frac{r_a}{r_e}} \right] =$$

$$\frac{L}{p} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{r_1^2 - r_e^2}{\ln r_e - \ln r_1} + \frac{r_a^2 - r_e^2}{\ln r_a - \ln r_e} \right)$$

Pro hydrostatické kuželové ložisko o vnějším poloměru $r_a = 25$ mm, vnitřním poloměru $r_1 = 2,5$ mm a úhlu $\alpha = 45^\circ$, je na obr. 42

vynesena závislost

$$\frac{p}{k} = f(r_e); \quad \frac{L}{k} = f(r_e); \quad \frac{L}{p} = f(r_e)$$



Obr. 42

Závislost tlaku a nosnosti na vstupním poloměru

Z vyznačené závislosti lze usuzovat na optimální parametry ložiska. Největší nosnost ložiska je pro umístění trysek uprostřed povrchu kužele (maximum je při $r_e = 11,5$ mm) při konstantním průtokovém množství V a při konstantní tloušťce mezery h .

Maximum funkce $\frac{p}{k}$ lze vypočítat, když její první derivace se položí rovna nule :

$$p = \frac{6k}{\pi \cos \alpha (\ln r_a - \ln r_1)} (\ln r_e - \ln r_1) (\ln r_a - \ln r_e)$$

Dáno za konstantu:

$$K_1 = \frac{6k}{\pi \cos \alpha (\ln r_a - \ln r_1)}$$

$$\frac{dp}{dr_e} = K_1 \frac{1}{r_e} (\ln r_a - \ln r_e) - K_1 (\ln r_e - \ln r_1) \frac{1}{r_e} = 0$$

Z toho:

$$\ln r_a - \ln r_e - \ln r_e + \ln r_1 = 0$$

to jest:

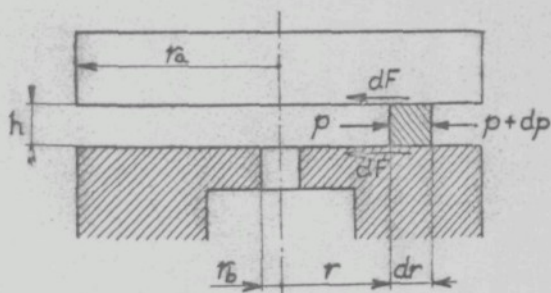
$$\ln \frac{r_a r_1}{r_e^2} = 0 ; \quad \frac{r_a r_1}{r_e^2} = 1$$

a maximum $r_e = \sqrt{r_a r_1}$

Po dosažení je tlak maximální při $r_e = 7,9$ mm. Tlak v místě výstupu z trysky je dán čerpadlem a lze ho měřit. Při tom však při konstantní tloušťce štěrbin h vzroste rychlost proudění a průtočné množství. Pro konstrukci z toho vyplývá dodržet maximum pro nosnost L .

8.3 Vliv velikosti výstupního otvoru trysky na nosnost

Při praktickém provedení kuželového ložiska se přívod maziva provádí tryskami uspořádanými po obvodě kruhu o poloměru r_e . Velikost výstupního otvoru trysky má vliv na nosnost ložiska. Z velikosti tohoto vlivu lze usuzovat na alternativní řešení



Obr. 43

Model patního ložiska

váhy tlakových a třecích sil působících na vytknutý element.

$$- dp S_1 = 2 dF \quad (8.22)$$

kde: $S_1 =$ průtočná plocha mezery $= 2 \pi r h$

$$dF = d S_2 \cdot \tau = d S_2 \cdot \eta \cdot \frac{dc}{dy}$$

$$dS_2 = 2 \pi r dr$$

s menším počtem trysek, ale o větším průměru výstupního průřezu trysky a naopak.

Pro jednoduchost bude vyšetřen tento vliv na konstrukci ložiska s jediným otvorem podle modelu na obr. 43.

Průběh tlaku v mezě se obdrží z rovnováhy

Po dosazení:

$$-dp \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 4 \pi \cdot r \cdot dr \cdot \eta \cdot \frac{dc}{dy} \quad (8.23)$$

Po dosazení za rychlostní gradient z rovnice (8.8) a zavedení mezí bude:

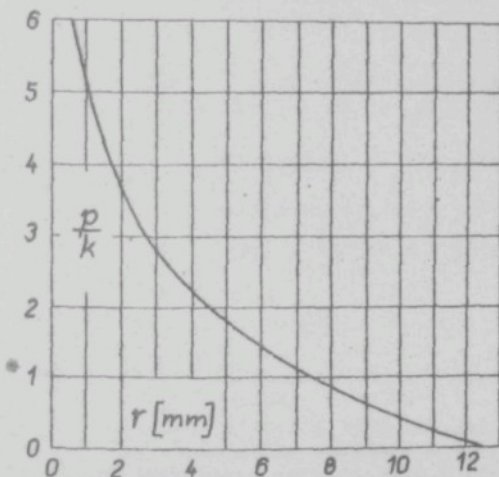
$$-\int_p^{p_a} dp = \frac{6 \cdot \eta \cdot v}{\pi \cdot h^3} \int_r^{r_a} \frac{dr}{r}$$

Po integraci a zavedení konstanty:

$$k = \frac{\eta \cdot v}{h^3}$$

a při respektování pouze přetlaku bude:

$$p = \frac{6}{\pi} k (\ln r_a - \ln r) \quad (8.24)$$



Obr. 44

Průběh tlaku v mezeře patního ložiska

Pro výpočet nosnosti se předpokládá, že nad výstupním otvorem trysky je konstantní tlak p_k a plocha S_1 . Potom je třeba v rovnici (8.24) dosadit za poloměr r konečný poloměr r_b a integrovat v mezích od nuly do r_b a proměnný tlak ponechat nad plochou S_2 a integro-

Průběh tlaku $\frac{p}{k}$ ve šterbině podle rovnice (8.24) je na obr. 44 pro tyto parametry:

Vnější průměr

$$r_a = 15 \text{ mm}$$

Vstupní průměr

$$r_b = 1 \text{ mm}$$

Po dosazení za konstantu k a vynásobení hodnot na grafu 44 obdrží se průběh tlaku pro určité h a η při daném prátokovém objemu V .

Pro výpočet nos-

vat v mezích od r_b do r_a .

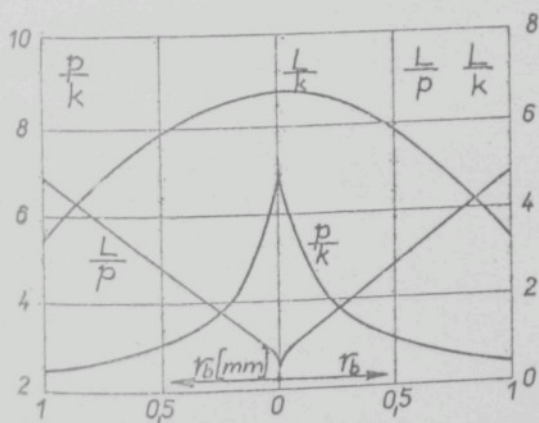
Pro celkovou nosnost platí:

$$L = L_1 + L_2 = p_k \int_{r_b}^{r_a} d S_1 + \int_{r_b}^{r_a} p \cdot d S_2 \quad (8.25)$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{\pi}{6} k \left[(\ln r_a - \ln r_b) \int_0^{r_b} 2 \pi r dr + \int_{r_b}^{r_a} (\ln r_a - \ln r) 2 \pi r dr \right] = \\ &= 12 k \left[(\ln r_a - \ln r_b) \frac{r_b^2}{2} + \ln r_a \left(\frac{r_a^2}{2} - \frac{r_b^2}{2} \right) - \left(\ln r \frac{r^2}{2} - \frac{r^2}{4} \right) \right]_{r_b}^{r_a} = \\ &= 12 k \left[\ln r_a \frac{r_b^2}{2} - \ln r_b \frac{r_b^2}{2} + \ln r_a \frac{r_a^2}{2} - \ln r_a \frac{r_b^2}{2} - \right. \\ &\quad \left. - \ln r_a \frac{r_a^2}{2} + \ln r_b \frac{r_b^2}{2} + \frac{r_a^2}{4} - \frac{r_b^2}{4} \right] = 3 k (r_a^2 - r_b^2) \cdot \quad (8.26) \end{aligned}$$

Pro poměr nosnosti ložiska a nutného tlaku platí:

$$\frac{L}{p} = \frac{\pi}{2} \frac{r_a^2 - r_b^2}{\ln r_a - \ln r_b} \quad (8.27)$$



Obr. 45 Závislost tlaku a nosnosti na velikosti výstup. otvoru trysky

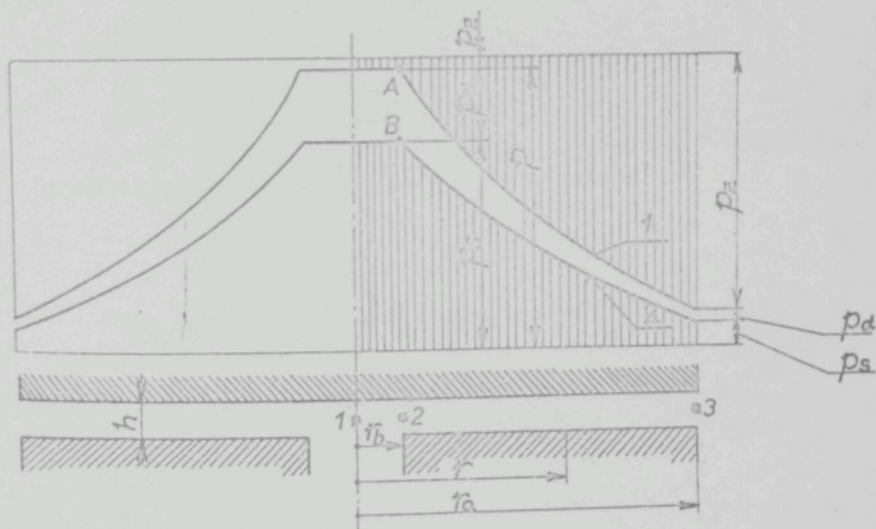
Velikost nosnosti, tlaku a jejich poměru jsou pro hydrostatické ložisko o poloměru $r_a = 15$ mm v závislosti na poloměru r_b výstupního otvoru trysky uvedeny na obr. 45. Z křivky pro nosnost plyne volba menší výstupní

otvor trysky a s ohledem na průtočnou hmotu, resp. rychlost, volit u kuželového ložiska větší počet trysek na obvodě kružnice o poloměru r_c .

8.4 Vliv kinetické energie proudu na nosnost

Při dosavadním výpočtu byla zanedbána kin. část energie proudu. Její vliv se projeví nejvíce v místě přechodu z výstupního průřezu trysky (na obr. 46 místo 2) do ložiskové mezery, tedy na poloměru r_b , jelikož zde je nejmenší průtokový průřez a tím i největší průtoková rychlost.

Bude-li se zmenšovat poloměr r_b , bude se nad poloměrem (místo 2) zvětšovat průtoková rychlost a tedy i zv. kinetická energie proudící kapaliny, což má za následek jistý



Obr. 46

Model ložiska pro zkoumání vlivu kinetické energie pokles statického tlaku v místě přechodu z výstupního otvoru. Vliv kinetické energie lze v rozměru tlaku vyjádřit tak zv. dynamickým tlakem:

$$p_d = \frac{\rho c^2}{2} \quad (8.28)$$

Vliv bude zjišťován na modelu ložiska podle obr.46.

Proudění v ložisku budiž rozděleno na proudění mezi body 1 a 2 a 2 a 3. Statický tlak mezi body 1 a 2 se předpokládá konstantní a je dán rovnicí

$$p = \frac{6}{\pi} k (\ln r_a - \ln r_b). \quad (8.28)$$

Statický tlak p mezi body 2 a 3 je proměnný a je dán vztahem:

$$p = \frac{6}{\pi} k (\ln r_a - \ln r). \quad (8.29)$$

Jeho průběh v závislosti na poloměru r ukazuje křivka 1 na obr. 46.

Dynamický tlak p_d mezi body 1 a 2 se předpokládá konstantní.

$$p_d = \frac{c^2}{2} \cdot \rho = \text{konst.}$$

Po dosazení za rychlost c z rovnice (8.7) bude:

$$p_d = \frac{v^2 \cdot \rho}{8 \cdot \pi^2 r_b^2 \cdot h^2}. \quad (8.30)$$

Dynamický tlak mezi body 2 a 3 je proměnný:

$$p_d = \frac{v^2 \cdot \rho}{8 \pi \cdot r^2 \cdot h^2}. \quad (8.31)$$

Vliv kinetické energie mezi body 1 a 2 bude vyjádřen odečtením dynamického tlaku od původního statického tlaku potřebného k překonání tření.

$$\left[p_s \right]_{r_b}^{r_a} = \frac{6}{\pi} k^2 (\ln r_a - \ln r_b) - \frac{v^2 \cdot \rho}{8 \cdot \pi^2 r_b^2 \cdot h^2}. \quad (8.32)$$

Obdobně platí mezi body 2 a 3 :

$$\left[p_s \right]_{r_b}^{r_a} = \frac{6}{\pi} k (\ln r_a - \ln r) - \frac{v^2 \cdot \rho}{8 \pi^2 r^2 h^2}. \quad (8.33)$$

S přihlédnutím k tomu, že $k = \frac{v \cdot \eta}{h^3}$ lze provést úpravu:

$$\frac{v^2 \cdot \rho}{8 \pi^2 r_b^2 h^2} = \frac{6}{\pi} k \left(\frac{v \cdot \rho \cdot h}{48 \pi r_b^2 \eta} \right).$$

Po dosazení:

$$\left[\begin{matrix} p_s \\ 0 \end{matrix} \right]_{r_b}^{r_a} = \frac{6}{\pi} k \left(\ln r_a - \ln r_b - \frac{v \cdot \rho \cdot h}{48 \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot \eta} \right), \quad (8.34)$$

$$\left[\begin{matrix} r_a \\ p_s \\ r_b \end{matrix} \right] = \frac{6}{\pi} k \left(\ln r_a - \ln r_b - \frac{v \cdot \rho \cdot h}{48 \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot \eta} \right). \quad (8.35)$$

Průběhy těchto tlaků jsou vyznačeny na obr. 46 křivkou 2.

Pro proudění mezi body 1, 2 a 3 lze psát Bernoulliho rovnici:

$$h = \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} + h_{z1} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + h_{z2} = \frac{p_3}{\rho} + \frac{c_3^2}{2} + h_{z3}. \quad (8.36)$$

Součet tlakové, rychlostní a ztracené výšky se při průtoku nemění. Po vynásobení rovnice měrnou hmotností ρ , bude rovnice (8.39) vyjádřena tlaky a pro každý poleměr r lze psát:

$$p_a + p_d + p_z = p. \quad (8.37)$$

Bernoulliho rovnice v tomto tvaru je graficky vyznačena nad ložiskem v obr. 46, kde je vidět, že největší dynamický tlak je nad výstupním poleměrem trysky (body A-B).

Nosnost ložiska vyjádřená pomocí statického tlaku p_s bude součet nosností nad výstupním otvorem a nosností nad mezikružím.

$$L_s = \int_0^{r_b} p_s dS_1 + \int_{r_b}^{r_a} p_s dS_2, \quad (8.38)$$

kde S_1 je plocha výstupního otvoru trysky a S_2 je plocha nosného mezikruží.

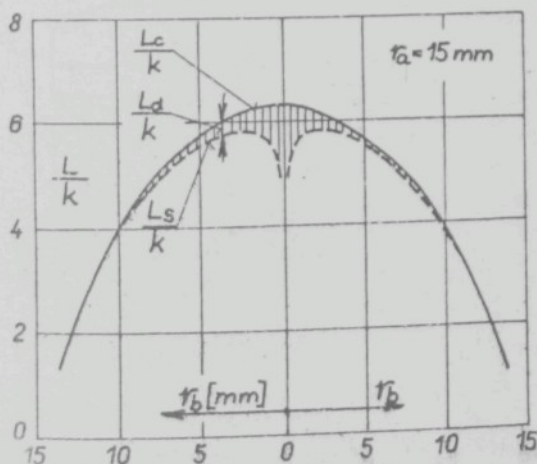
Po dosazení bude:

$$L_s = \frac{6}{\pi} k \left[\left(\ln \frac{r_a}{r_b} - \frac{v \cdot \rho \cdot h}{48 \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot \eta} \right) 2 \pi r dr + \right. \\ \left. + \int_{r_b}^{r_a} \left(\ln \frac{r_a}{r} - \frac{v \cdot \rho \cdot h}{48 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \eta} \right) 2 \cdot \pi \cdot r dr \right] = 12 k \left[\left[\frac{r^2}{2} \ln \frac{r_a}{r_b} - \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{V \rho h}{48 \pi r_b^2 \eta} \left[\frac{r^2}{2} \right]_0^{r_b} + \left[\ln r_a \frac{r^2}{2} - \left(\ln r \frac{r^2}{2} - \frac{r^2}{4} \right) - \right. \\
 & \left. - \frac{V \rho h}{48 \pi \eta} \ln r \right]_{r_b}^{r_a} = 12 k \left[\ln r_a \frac{r_b^2}{2} - \ln r_b \frac{r_b^2}{2} - \frac{V \rho h}{48 \pi \eta} \frac{1}{2} + \right. \\
 & + \ln r_a \frac{r_a^2}{2} - \ln r_a \frac{r_a^2}{2} + \frac{r_a^2}{4} - \frac{V \rho h}{48 \pi \eta} \ln r_a - \ln r_a \frac{r_b^2}{2} + \\
 & + \ln r_b - \frac{r_b^2}{2} - \frac{r_b^2}{4} + \frac{V \rho h}{48 \pi \eta} \ln r_b \left. \right] = \\
 & = 3 k \left(r_a^2 - r_b^2 - \frac{V \rho h}{20 \pi \eta} - \frac{V \rho h}{10 \pi \eta} \ln r_a + \frac{V \rho h}{10 \pi \eta} \ln r_b \right) \Rightarrow \\
 & \frac{L_s}{k} = 3 \left[r_a^2 - r_b^2 - \frac{V \rho h}{20 \pi \eta} (1 + 2 \ln \frac{r_a}{r_b}) \right] \quad (8.39)
 \end{aligned}$$

Průběh funkce (8.39) v závislosti na různém poloměru výstupního

otvoru je na obr. 47 vyznačen čárkovaně. Rozdíl mezi nosností L_c a L_s znázorňuje vliv kinetické energie na nosnost ložiska. Grafické znázornění je provedeno pro příklad, kdy průtočný objem činí $V = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a pro velikost mezery $h = 0,04 \text{ mm}$



Obr. 47

Vliv kinetické energie na nosnost ložiska

Při srovnání průběhu nosnosti L_c s nosností L_s je vidět, že vliv kinetické energie je nepatrný a uvádí-li se, že průtok maziva je většinou značně menší, je možné vliv kinetické energie zanedbat.

Výzkumem a pokusy s hydrostatickým kuželovým ložiskem se zabývali Gottwald a Viweg / 18 / v institutu pro technickou fyziku na technické vysoké škole v Darmstadtu. Zjišťovali, do jaké míry se výpočet blíží skutečnosti. Jejich měření potvrdilo zjištěné výsledky, např. pro polohu trysek apod.

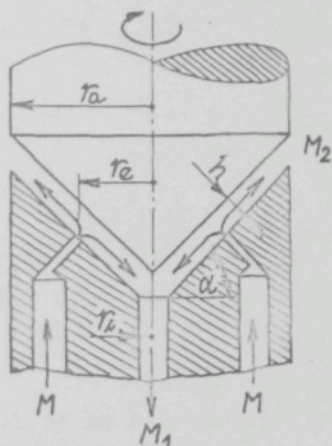
9.0 A e r o s t a t i c k é k u ž e l o v é l o ž i s k o

Vzduch pro mazání je přiváděn pod tlakem do ložiskové mezery otvory umístěnými v tělese ložiska na průměru r_0 . Při proudění ložiskovou mezerou se vytváří kuželové tlakové pole, které je směrodatné pro nosnost ložiska. Tlak vzduchu klesá od místa přívodu na obě strany až na atmosférický tlak. Ve

výpočtu nutno respektovat stlačitelnost vzduchu. Předpokládá se, že vzduch během proudění při velké rychlosti, avšak na krátké dráze, nezmění svoji teplotu a tedy proudění bude isotermické. Schema ložiska je na obr. č.48.

Další předpoklady:

Proudění je stacionární a je zanedbáno působení síly tíže plynu.



Obr.48

Schema aerostatického kuželového ložiska

9.1 Řešení proudění - tlakový profil

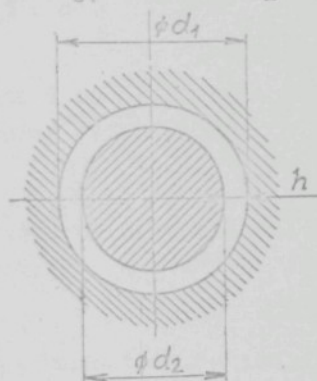
Z řešení proudění v mezeře ložiska lze nalézt průběh tlaků vzduchu a nosnost ložiska.

Reynoldsovo číslo, které je kritériem, jímž se rozlišuje proudění laminární od turbulentního je:

$$R_e = \frac{c \cdot d_{ekv}}{\nu} \quad (9.1)$$

kde: d_{ekv} = ekvivalentní rozměr pro mezikruží a rovná se

$$d_{ekv} = \frac{4 S}{O_{bv}} = \frac{4 \cdot \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)}{1 \cdot d_2} = d_1 - d_2 = 2 h \quad (9.2)$$



Obr. 49

Označení mezery

Kinematická viskozita ν pro vzduch (20°C) = $15,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

h = tloušťka štěrbin; u ložisek

takového typu bývá ... 0,04 mm

c ... rychlost proudění se předpokládá 50 m/s.

Pak $R_e = 250$

Velikost Reynoldsova čísla ukazuje, že proudění v mezeře je laminární, neboť $250 < 2320$ a dá se počítat s parabolickým průběhem rychlostí v příčném řezu. Maxi-

mální rychlost proudu se uvažuje, jako by se jednalo o laminární průtok mezi dvěma rovnoběžnými deskami / 17 /

$$c_{\max} = \frac{3}{2} c_{\text{stř}} \quad (9.3)$$

což vyplývá ze vztahu pro přeměnu plochy parabolického úseče na obdélník, kde $c_{\text{stř}}$ vyplyne z rovnice kontinuity $S c = V$,

z toho:

$$c_{\text{stř}} = \frac{V}{2 \pi r h} \quad (9.4)$$

Dále je třeba vyjádřit rychlostní gradient kolmo na směr proudu v místě dotyku paraboly se stěnou - na obr. 50 - je to bod A.

Z vlastností paraboly plyne, že subtangenta je vrcholem pálená a pak lze psát:

$$\frac{dc}{dy} = \frac{2 c_{\max}}{\frac{h}{2}} = \frac{4 c_{\max}}{h} . \quad (9.5)$$

Po dosazení za $c_{\max}$ z rovnice (9.3) a (9.4) bude:

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dy} &= \frac{4 \cdot \frac{3}{2} c_{stř}}{h} = \\ &= \frac{6 V}{2 \pi r h^2} = \frac{3 V}{\pi r h^2} . \end{aligned}$$

(9.6)

Objem V se mění podle rovnice stavu plynu:

$$V = \frac{M R T}{p} . \quad (9.7)$$

Na základě předpokladu, že se jedná o proudění isotermické platí, že:

$$p \cdot v = \text{konst} . \quad (9.8)$$

Pro rychlostní gradient lze psát po dosazení ze (9.7):

$$\frac{dc}{dy} = \frac{3 M R T}{\pi h^2 r p} . \quad (9.9)$$

Na vytknutý elementární prvek proudu vzduchu se vyznačí rovnováha sil, které na něj působí - viz obr. 51.

Z rovnováhy tlakových a třecích sil působících na prvek plyne pro směr dovnitř kužele: $dp \cdot S_1 = 2 dF$ (9.10)

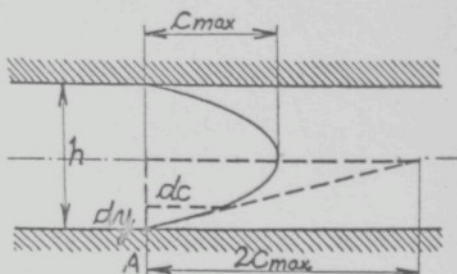
kde: dp = přírůstek tlaků

$$dF = \text{třecí síla} = dS_2 \cdot \tau \quad (9.11)$$

$$S_1 = \text{plocha mezikruží} = 2 \pi r h \quad (9.12)$$

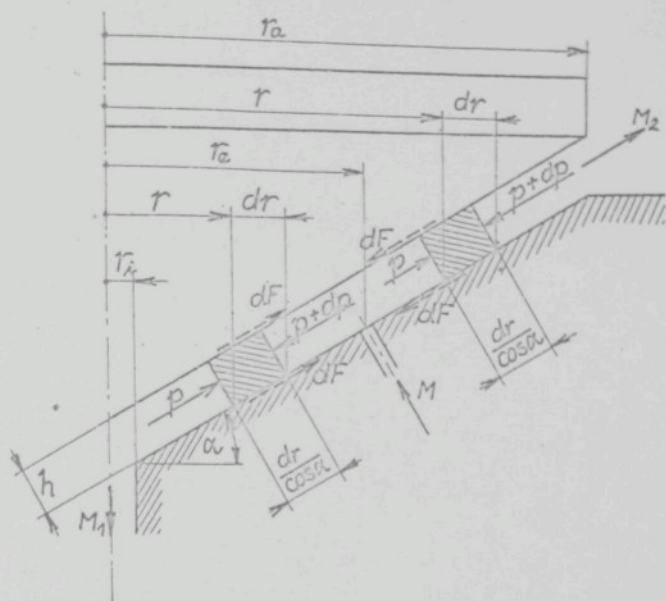
$$dS_2 = 2 \pi r \cdot \frac{dr}{\cos \alpha} \quad (9.13)$$

$$\tau \text{ je smykové napětí podle Newtona } \tau = \eta \frac{dc}{dy} . \quad (9.14)$$



Obr. 50

Rychlostní profil laminárního proudu



Obr. 51

Silové účinky na prvek proudu vzduchu

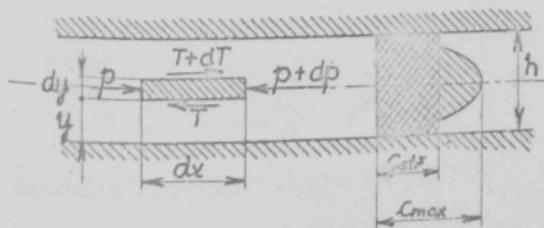
Po dosažení z rovnic (9.9, 9.11, 9.12, 9.13, 9.14) do (9.10) bude:

$$dp \cdot 2 \pi r h = 4 \pi r \frac{dr}{\cos \alpha} \cdot \frac{3 M R T}{\pi h^2 r p} \quad (9.15)$$

Po úpravě

$$p dp = 6 \frac{\eta R T}{\pi \cos \alpha h^3} \pi \frac{dr}{r} \quad (9.16)$$

Vztah (9.16) lze odvodit také tímto postupem :



Obr. 52

Působení sil na prvek proudu

Dle obr. 52 působí rozdíl tlaků

$$dP = 1 dy dp$$

a rozdíl třecích sil

$$dT = 1 dx d\tau$$

Tyto rozdíly musí být při ustáleném

proudění v rovnováze:

Pro smykové napětí platí:

$$\tau = \eta \frac{dc}{dy}; \quad d\tau = \frac{d^2c}{dy^2} dy.$$

η = dynamická vazkost pro vzduch o teplotě 20°C, a o tlaku 98.066 N m⁻² činí 18,2 · 10⁻⁶ / N s m⁻² /

Pro rovnováhu sil na prvek platí:

$$dy dp + \eta \cdot \frac{d^2c}{dy^2} dy dx = 0.$$

Z toho tlakový gradient:

$$\frac{dp}{dx} = - \eta \cdot \frac{d^2c}{dy^2} = - \eta c''.$$

Také:

$$c'' = \frac{dc'}{dy} = - \frac{\frac{dp}{dx}}{\eta}.$$

Integrací bude:

$$c' = - \frac{\frac{dp}{dx}}{\eta} y + k_1 = \frac{dc}{dy}.$$

Další integrací:

$$c = - \frac{\frac{dp}{dx}}{2\eta} y^2 + k_1 y + k_2.$$

Pro integrační konstanty plyne z okrajových podmínek:

Pro $y = 0$.. je $c = 0$.. a proto též $k_2 = 0$.

Pro $y = h$.. je $c = 0$,

$$\text{je } k_1 = \frac{\frac{dp}{dx}}{2\eta} h.$$

Po dosažení:

$$c = - \frac{\frac{dp}{dx}}{2\eta} y^2 + \frac{\frac{dp}{dx}}{2\eta} h y = \frac{\frac{dp}{dx}}{2\eta} (-y^2 + h y).$$

Maximální rychlost bude pro $y = \frac{h}{2}$:

$$c_{\max} = \frac{\frac{dp}{dx}}{2\eta} \left(-\frac{h^2}{4} + \frac{h^2}{2} \right) = \frac{h^2}{4} \frac{\frac{dp}{dx}}{2\eta}.$$

Ze vztahu pro přeměnu parabolické úseče na obdélník plyne:

$$c_{\text{stř}} = \frac{2}{3} c_{\text{max}} = \frac{h^2}{12\eta} \frac{dp}{dx}$$

Z rovnice kontinuity:

$$c_{\text{stř}} = \frac{V}{2\pi r h} = \frac{M R T}{2\pi r h p}$$

Převedeno na kuželovou průtočnou plochu platí: $dx = \frac{dr}{\cos \alpha}$

Potom:

$$\frac{M R T}{2\pi r h p} = \frac{h^2}{12\eta} \frac{dp}{dr} \cos \alpha$$

A pro tlak z toho plyne:

$$p dp = 6 \frac{\eta R T}{\pi \cos \alpha h^3} M \frac{dr}{r} \quad (9.16)$$

Na základě (9.8) a pro zjednodušení je zavedena konstanta:

$$k = \frac{R T}{\frac{\pi}{\eta} \cos \alpha h^3} \quad (9.17)$$

Pro tlak vyplývá z rovnice (9.16):

$$\int_{p_a}^{p_i} dp = 6 k M_1 \int_{r_2}^r \frac{dr}{r}$$

Celková průtoková hmotnost vzduchu se dělí: $M = M_1 + M_2$.

Pro zavedení mezi bude platit, že při $r = r_1$ bude $p = p_a =$
= atmosférický tlak. Po integraci bude:

$$\left[\frac{p^2}{2} \right]_{p_a}^{p_i} = \left[6 k M_1 \ln r \right]_{r_2}^r \quad (9.18)$$

Z toho:

$$\frac{p_1^2}{2} - \frac{p_a^2}{2} = 6 k M_1 (\ln r - \ln r_2)$$

A tlak:

$$p_i = \sqrt{12 k M_1 (\ln r - \ln r_1) + p_a^2} \quad (9.19)$$

Pro rovnováhu tlakových a třecích sil působících na prvek pro směr ven z kužele (viz obr. 51) plyne:

$$2 \, dF + dp \, S_1 = 0,$$

čili:

$$2 \, dF = - dp \, S_1. \quad (9.20)$$

Po dosazení za dF a S_1 z (9.9, 9.11, 9.12, 9.13, 9.14) a po dosazení, kdy platí, že při $r = r_a$, bude $p = p_a$ = atmosférický tlak, se obdrží:

$$\int_{p_2}^{p_a} dp = 6 k M_2 \int_r^{r_a} \frac{dr}{r}.$$

Po integraci bude:

$$-\left[\frac{p^2}{2}\right]_{p_2}^{p_a} = \left[6 k M_2 \ln r\right]_r^{r_a} = \left[\frac{p^2}{2}\right]_{p_a}^{p_2}.$$

Z toho:

$$\frac{p_2^2}{2} - \frac{p_a^2}{2} = 6 k M_2 (\ln r_a - \ln r).$$

A tlak:

$$p_2 = \sqrt{12 k M_2 (\ln r_a - \ln r) + p_a^2} \quad (9.21)$$

Na poloměru $r = r_e$ bude platit, že $p_1 = p_2$.

Pak z rovníc (9.19) a (9.21) plyne pro průtokovou hmotu M_1 a M_2 :

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\ln r_a - \ln r_e}{\ln r_e - \ln r_1}, \text{ nebo: } \frac{M_1}{M} = \frac{\ln r_a - \ln r_e}{\ln r_a - \ln r_1}, \quad (9.22)$$

a z toho plyne:

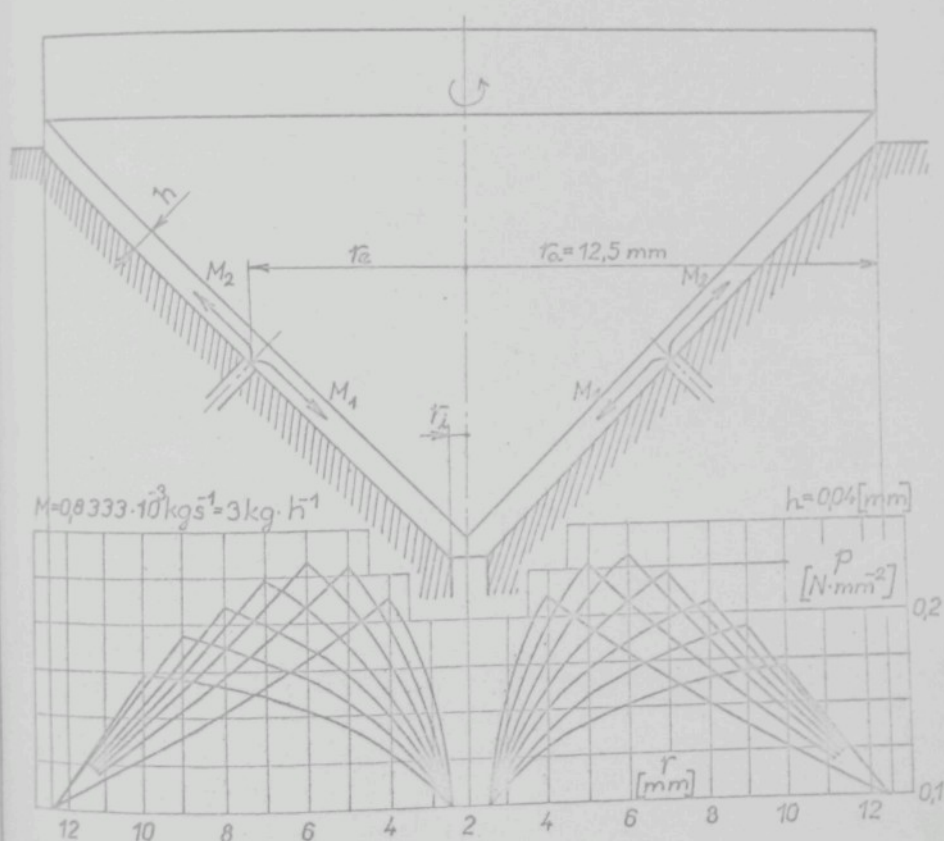
$$M_1 = M \frac{\ln \frac{r_a}{r_e}}{\ln \frac{r_a}{r_1}}, \quad M_2 = M \frac{\ln \frac{r_e}{r_1}}{\ln \frac{r_a}{r_1}}. \quad (9.23)$$

Po dosazení (9.23) do (9.19) a (9.21) bude:

$$p_1 = \sqrt{12 \frac{\eta \cdot R T}{\pi \cos \alpha h^3} M \frac{\ln \frac{r_a}{r_e}}{\ln \frac{r_a}{r_1}} (\ln r - \ln r_1) + p_a^2},$$

$$p_2 = \left[12 \frac{\eta \cdot R \cdot T}{\pi \cos \alpha \cdot h^3} M \frac{\ln \frac{r_0}{r_1}}{\frac{r_0}{r_1}} (\ln r_a - \ln r) + p_a^2 \right]$$

Z těchto rovnic již lze obdržet průběh tlaku v nosiči pro každý poloměr r . Tlak v místě vstupu do nosiče bude největší. Při proměnném poloměru r_0 se bude tlak v nosiči měnit a lze najít optimální rozložení tlaku a maximální tlak nad místem vstupu.

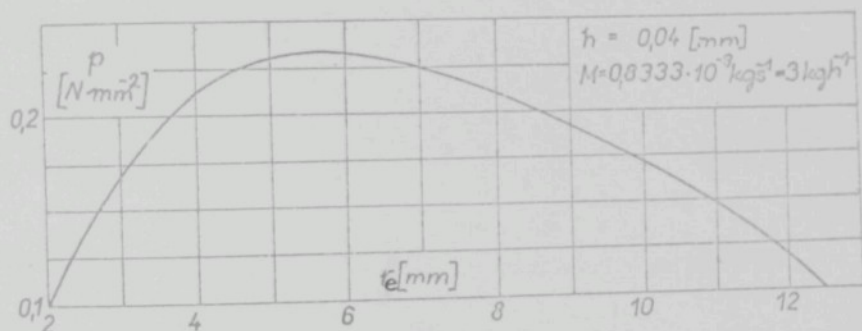


Obr. 53

Závislost tlaku vzduchu v nosiči na poloměru r , pro různé poloměry r_0

Na obr. 53 jsou vyneseny průběhy tlaků v mezeře pro aerostatické kuželové ložisko o vnějším poloměru $r_o = 12,5$ mm a vnitřním poloměru $r_i = 2,5$ mm při velikosti mezery $h = 0,04$ mm, kterou protéká hmota vzduchu $M = 3,3600 \cdot 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$ o teplotě 20°C .

Průběh tlaků v místě vstupu vzduchu do mezery ložiska v závislosti na poloměru r_o je vynesen na obr. 54. Je to ve skutečnosti obalová křivka maxim. tlaků v mezeře. Zde provedeno pro aerostatické ložisko o poloměru $r_i = 12,5$ mm, $r_i = 2,5$ mm, $h = 0,04$ mm a $M = 3,3600 \cdot 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$. Zařna poloměru r_o byla prováděna v mezích od 2,5 do 12,5 mm. Závislost je možno získat buď z rovnice (9.19) nebo (9.21). Tabulární zpracování numerického výpočtu tlaku p pro obr. 54 je v příloze 15.



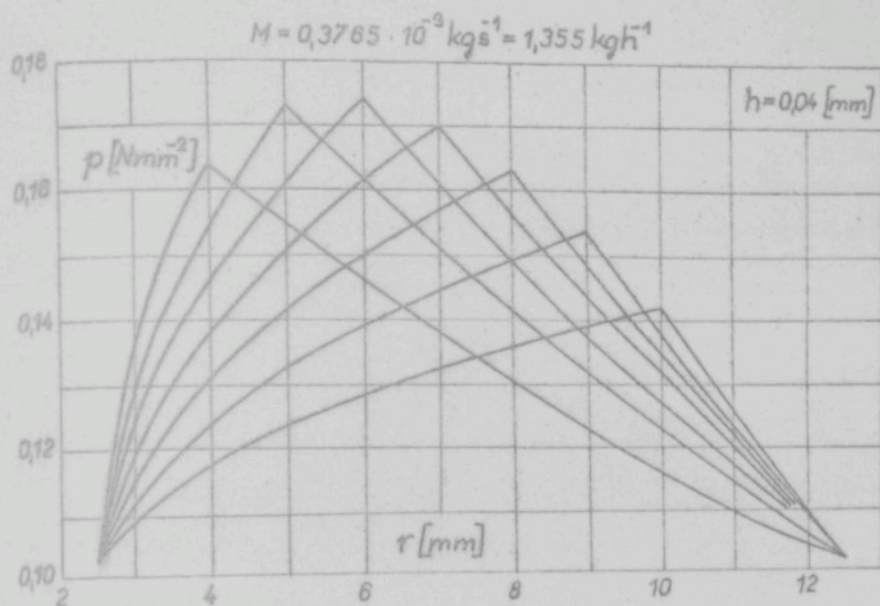
Obr. 54

Průběh tlaků v místě vstupu do mezery v závislosti na poloměru r_o .

Na obr. 55 je průběh tlaků v mezeře pro stejné ložisko, avšak pro $M = 1,355 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$ a opět pro sedm různých umístění trysek. Průběh tlaku v místě vstupu vzduchu do mezery je uveden na obr. 5.22.

Jak se změní průběh tlaků v místě vstupu do mezery v závislosti na poloměru r_o při proměnném poloměru r_i , je vidět na obr. 56 křivka A, kde všechny parametry zůstaly stejné jako pro křivku B, avšak poloměr r_i byl zmenšen na 1,5 mm.

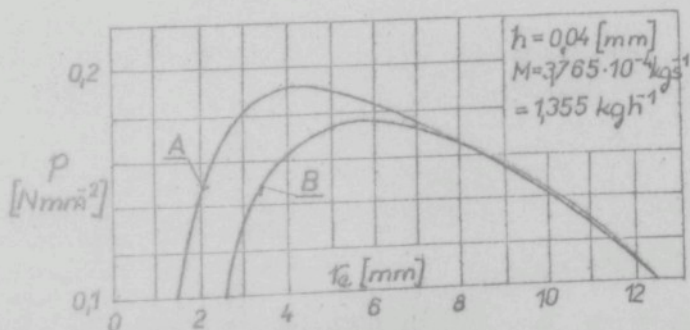
Je vidět, že tlak v místech vstupu do mezery se zvětšil a maximum se posunulo na menší poloměr r_e .



Obr. 55

Průběh tlaků v mezeře v závislosti na r , pro různý poloměr r_e

V příloze č. 16 je uvedeno více závislostí tlaku v mezeře na poloměru r při různých poloměrech r_e , a to u ložiska



Obr. 56 Průběh tlaků v místě vstupu do mezery v závislosti na r_e

o rozměrech $r_a = 12,5$ mm, $r_i = 2,5$ mm, $h = 0,04$ mm pro průtokové množství, $M = (1 \pm 10) \cdot 3600^{11}$ kg s⁻¹ a v příloze č. 17 pro ložisko o rozměrech $r_a = 25$ mm, $r_i = 2,5$ mm, $h = 0,04$ mm. Uvedené závislosti jsou zpracovány tabelárně a některé i graficky. Hodnoty tlaků byly získány naprogramováním rovnice 9.21 a výsledky na číslicovém počítači MINSK.

Pro závislost tlaku v místě vstupu vzduchu do mezery na poloměru r_a , lze získat maximum položením první derivace funkce (9.19) pro p_1 rovno nule, přičemž za M_1 do funkce (9.19) dosadíme z (9.23):

$$p_1 = \sqrt{12 k M \frac{\ln r_a - \ln r}{\ln r_a - \ln r_i} (\ln r - \ln r_i) + p_a^2}.$$

Derivace podle r :

$$\frac{dp_1}{dr} = \frac{\frac{12 k M}{\ln r_a - \ln r_i} \frac{1}{r} (\ln r - \ln r_i) - \frac{12 k M}{\ln r_a - \ln r_i} (\ln r_a - \ln r) \frac{1}{r}}{2 \sqrt{12 k M \frac{\ln r_a - \ln r}{\ln r_a - \ln r_i} (\ln r - \ln r_i) + p_a^2}} = 0$$

Z toho:

$$\frac{12 k M}{\ln r_a - \ln r_i} \left[-\frac{1}{r} (\ln r - \ln r_i) + \frac{1}{r} (\ln r_a - \ln r) \right] = 0.$$

Dále:

$$\frac{1}{r} \left(\ln \frac{r_i r_a}{r^2} \right) = 0.$$

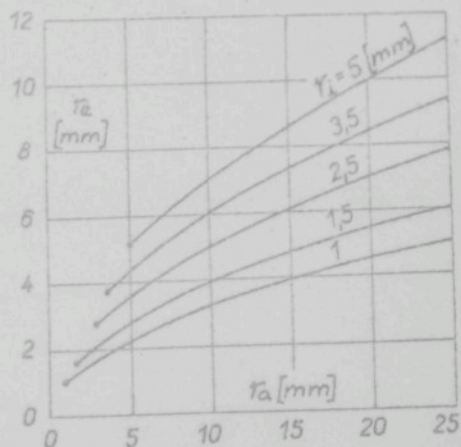
A to platí pro

$$\frac{r_i r_a}{r^2} = 1.$$

Z toho maximum tlaku pro:

$$r = \sqrt{r_i r_a} \quad (9.24)$$

Grafický průběh této funkce je na obr.57.



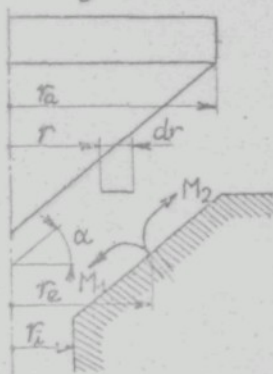
Obr. 57
Závislost poloměru r_a na kterém
je p_{max} (při různém r_i)

Maximum je nezávislé na druhu proudící hmoty ani na množství proudící hmoty.

9.2 Nosnost aerostatického kuželového ložiska

Nosnost je dána součinem tlaku vzduchu a axiálního průmětu plochy ložiska. Je to integrál

$$L = \int p_p \cdot S = 2\pi \int p_p r dr, \quad (9.25)$$



kde p_p je přetlak, rozhodující pro nosnost ložiska,

$$p_{p1} = p_1 - p_a,$$

$$p_{p2} = p_2 - p_a,$$

a kde p_a je tlak barometrický.

Po dosazení do (9.25) bude nosnost v mezích od r_1 do r_a :

Obr. 56

$$L_1 = 2\pi \int_{r_1}^{r_a} \left[\sqrt{12 k M_1 (\ln r - \ln r_1) + p_a^2 - p_a} \right] r \cdot dr \quad (9.26)$$

Nosnost v mezích od r_e do r_a :

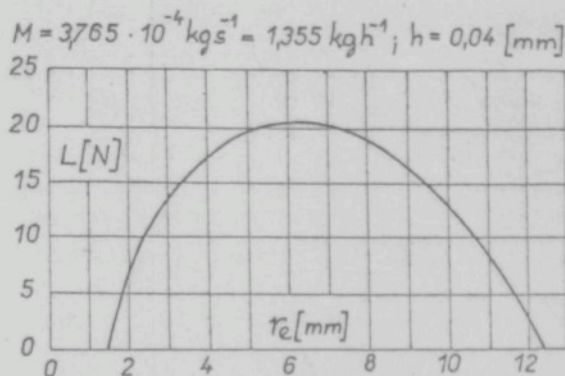
$$L_2 = 2\pi \int_{r_e}^{r_a} \left[\sqrt{12 k M_2 (\ln r_a - \ln r) + p_a^2 - p_a} \right] r \cdot dr \quad (9.27)$$

Celková nosnost:

$$L = L_1 + L_2.$$

Matematické řešení rovnic nosnosti je uvedeno v příloze č. 18. Numerické řešení nosnosti v závislosti na poloměru r_e rovnice (9.26, 9.27) bylo provedeno zavedením vhodné substituce a integrované funkce nahrazeny Taylorovou řadou při zaručení přesnosti dvou desetinných míst. Postup, tabulární a grafické zpracování nosnosti je uveden v příloze č. 19.

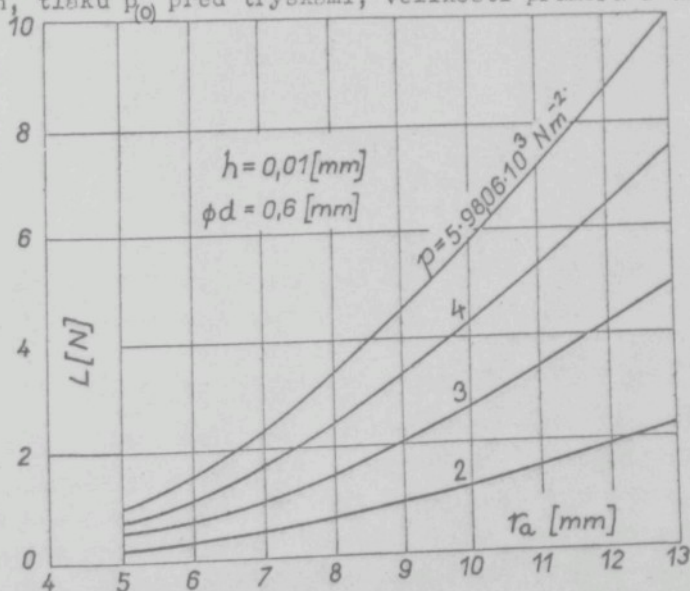
Pro ložisko o vnějším poloměru $r_a = 12,5$ mm, o vnitřním poloměru $r_i = 1,5$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $h = 0,04$ mm, $T = 293^\circ\text{K}$, $M = 1,355 \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$ je závislost nosnosti L po poloměru r_e vyznačena na obr. 59.



Obr. 59

Nosnost ložiska v závislosti na poloměru r_e

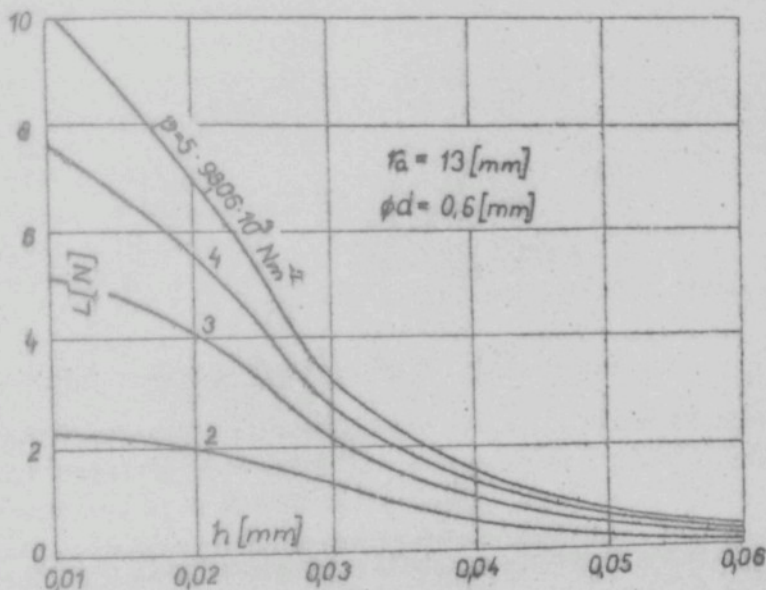
Nosnost jako funkci průtokové hmotnosti M , tloušťky mezery h , tlaku p_0 před tryskami, velikosti průměru d trysek



Obr. 60 Závislost nosnosti na poloměru r_a

a velikosti vnějšího poloměru r_a ložiska lze vypočítat po dosažení ze M_1 a M_2 z rovnice (9.23) dále za M a po následující integraci.

Pro rovnici (9.26) a (9.27) byl sestaven program a výpočet proveden na číslicovém počítači MINSK 22. Výsledky jsou uvedeny na obr. 60 a obr. 61.



Obr. 61

Závislost nosnosti na tloušťce mezery h

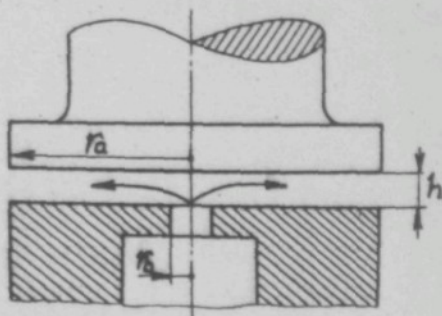
Číselné hodnoty k obr. 60 a 61 jsou v provedení tiskárny MINSK 22 v příloze č. 20.

9.3. Vliv velikosti výstupního otvoru trysky na nosnost

Při praktickém provedení kuželového aerostatického ložiska je přívod vzduchu proveden několika tryskami uspořádanými do kruhu o poloměru r_a . Velikost výstupního otvoru bude mít jistě určitý vliv na nosnost. Tento vliv bude nyní zjištěn na modelu ložiska s jediným vstupem, jak uvedeno na obr. 62.

Ze získaného výsledku lze usuzovat i na vliv velikosti trysky pro kuželové ložisko.

Nad výstupním otvorem trysky se předpokládá konstantní tlak p_k a plocha S_1 , a na nosné ploše S_2 (mezikruží o poloměrech r_a , r_b) je tlak proměnný - zmenšuje se, až při $r = r_a$ je $p = p_a = 98066 \text{ N m}^{-2}$ je



Obr. 62

Patiní ložisko - model

Pro průběh absolutních tlaků v mezeře tohoto ložiska lze odvodit podobný vztah jako (9.21), a to:

$$p = \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2} \quad (9.35)$$

Nad výstupním otvorem trysky je předpokládán absolutní tlak konstantní a je třeba proto dosadit za proměnnou mez r , konečnou mez r_a a obdržít se:

$$p_k = \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r_b) + p_a^2} \quad (9.36)$$

Absolutní tlak nad nosným mezikružím po integraci a dosazení mezi - viz obr. 62 bude:

$$-\left[\frac{p^2}{2}\right]_{p_a}^p = \left[6 k M \ln r\right]_{r_b}^{r_a}$$

Pro kladnou hodnotu tlaku p se zamění meze a platí:

$$p = \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2} \quad (9.37)$$

přičemž jak ve vztahu pro p_k , tak pro p má konstanta k u tohoto modelu ložiska hodnotu:

$$k = \frac{\eta R T}{6 \pi \cdot h^3} \quad (9.38)$$

Pro nosnost aerostatického ložiska je rozhodující přetlak

vzduchu v mezeře. Jelikož byly vyjádřeny oba tlaky jako absolutní, je třeba od součtu nosností z absolutních tlaků odečíst nosnost vyjádřenou pro obě plochy z atmosférického tlaku.

$$L_3 = p_a \int_0^{r_b} dS_1 + p_a \int_{r_b}^{r_a} dS_2 = 2\pi \cdot p_a \int_0^{r_b} r dr + 2\pi p_a \int_{r_b}^{r_a} r dr = \\ = \pi p_a r_a^2 \quad (9.39)$$

Takže celková nosnost od přetlaku bude:

$$L = L_1 + L_2 - L_3 = p_k \int_0^{r_b} dS_1 + \int_{r_b}^{r_a} p dS_2 - \pi p_a r_a^2$$

Nosnost nad vstupním otvorem:

$$L_1 = \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r_b) + p_a^2} \int_0^{r_b} 2\pi r dr$$

Po integraci:

$$L_1 = \pi r_b^2 \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r_b) + p_a^2} \quad (9.40)$$

Nosnost mimo vstupní otvor:

$$L_2 = \int_{r_b}^{r_a} \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2} \cdot 2\pi r dr \quad (9.41)$$

Tento integrál lze řešit obdobným způsobem jako integrály (9.26), (9.27) v příloze č. 18, avšak po dosazení mezi podle obr. 62. Pro řešení integrálu (9.41) se zavádí tyto další konstanty:

$$\left. \begin{aligned} a &= 12 k M, \\ b &= 12 k M r_a + p_a^2. \end{aligned} \right\} \quad (9.42)$$

Po zavedení substituce - viz rov. 9.29 v příloze č. 18 a integraci bude:

$$L_2 = \frac{\pi \sqrt{2}}{2} e^{\frac{2b}{a}} \left[B e^{-\frac{B^2}{2}} - A e^{-\frac{A^2}{2}} + 2\pi (\phi(A) - \phi(B)) \right], \quad (9.43)$$

kde

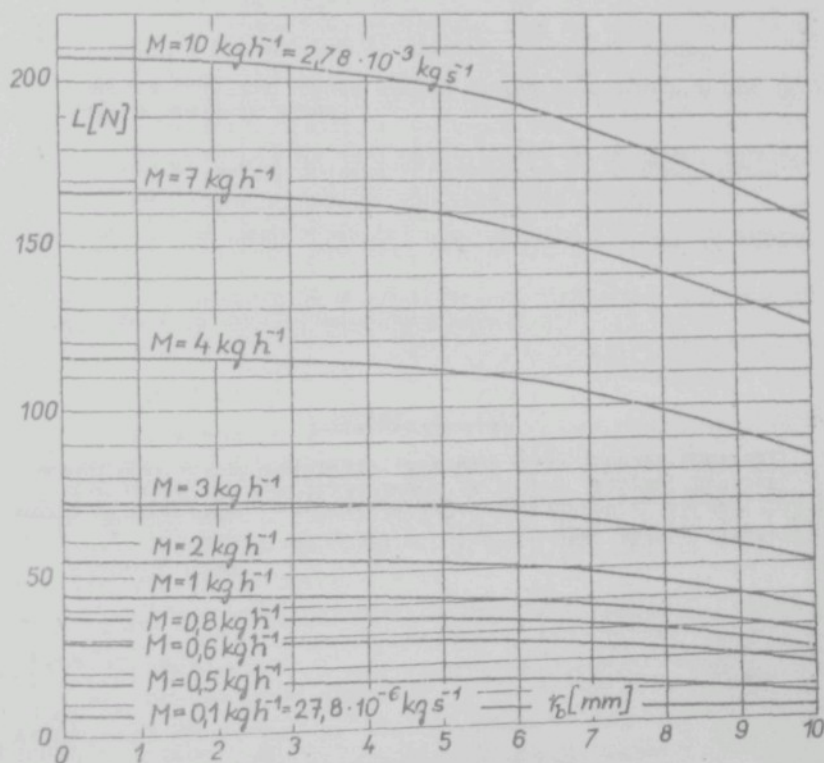
$$A = 2 \sqrt{\frac{b}{a} - \ln r_b}, \quad B = 2 \sqrt{\frac{b}{a} - \ln r_a},$$

$$\phi(A) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^B e^{-\frac{v^2}{2}} dv, \quad \phi(B) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^A e^{-\frac{v^2}{2}} dv.$$

Takže celková nosnost daná přetlakem:

$$L = L_1 + L_2 - L_3 = \pi r_b^2 \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r_b) + p_a^2} + \frac{\pi \sqrt{2}}{2} e^{\frac{2b}{a}} \cdot \left[B e^{-\frac{B^2}{2}} - A e^{-\frac{A^2}{2}} + 2\pi (\phi(A) - \phi(B)) \right] - \pi p_a r_a^2 \quad (9.44)$$

Vyčíslení vlivu výstupního otvoru trysky na nosnost bylo provedeno pro patní ložisko o vnějším poloměru $r_a = 15$ mm, pro velikost mezery $h = 0,04$ mm a pro průtokovou hmotu $M = (0,1+10) \cdot 3600^{-1} \text{ kg s}^{-1}$. Pro rovnici (9.44) byl vytvořen program a výpočet proveden na číslicovém počítači MINSK. Výsledné závislosti jsou na obr. 63 a jsou velmi přesné, poněvadž nosnost byla vyčíslena pro velký počet poloměrů trysky.



Obr. 63 Zavislost nosnosti na velikosti výstupního otvoru trysky

Výsledek je podobný jako u hydrostatického ložiska. Se zvětšujícím se poloměrem r_b se nosnost zmenšuje.

Z průběhu křivek vyplývá, že pro větší průtokovou hmotu se nosnost při zvětšujícím se poloměru r_b rychleji zmenšuje. Za druhé se ukazuje, že při stejném poloměru trysky se nosnost neztvrdí v poměru průtokových hmot a bude výhodnější použít pro určitou průtokovou hmotu větší počet menších trysek.

Podrobné tabelární zpracování a grafické závislosti nosností na velikosti poloměru trysky je v příloze č. 21.

9.4 Zvýšení nosnosti geometrickou úpravou ložiska

Nosnost aerostatického ložiska je dána součinem axiální složky tlaku a nosné plochy:

$$dL = p \, dS.$$

Např. pro patní ložisko podle obr. 43 je dán tlak v mezeře vztahem (9.35):

$$p^{(m)} = \sqrt{12 \, k \, M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2},$$

a nosnost dána vztahem (9.25)

$$L = 2 \pi \int p_p \, r \, dr,$$

kde

$$p_p = \text{přetlak}, \quad p_p = p_1^{(m)} - p_a.$$

Když v místě vstupu vzduchu do mezery je provedeno vybrání o radiusu r_b a hloubce h , nastanou tyto tlakové poměry: Vzduch vstupuje do ložiska o tlaku p_0 . V zužující se trysce dojde k expanzi na tlak $p_1 = p_1^{(m)}$ a tento tlak je konstantní v celém vybrání o ploše $S = \pi(r_b^2 - r_b^2)$. Pak vzduch proudí mezerou na vnější obvod a tlak se přitom zmenšuje až na tlak atmosferický.

Na obr. 64 jsou vyneseny tlaky v ložisku. Ložisku bez mezery patří čárkový průběh a ložisku s mezerou křivka plná. Je vidět, že u ložiska s vybráním působí nejvyšší tlak $p_1^{(m)}$ na větší plochu.

Nosnost ložiska bez vybrání je po dosazení

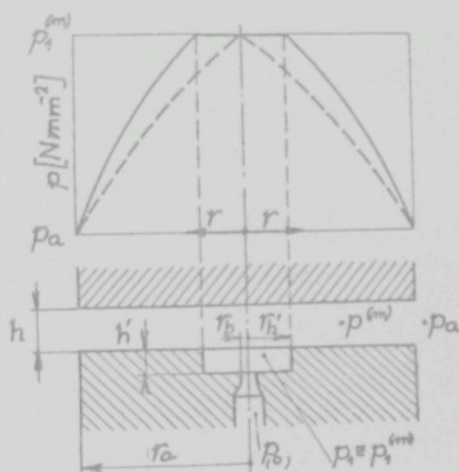
$$L = \int_{r_b}^{r_a} \left[\sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2 - p_b^2} \right] \cdot r dr . \quad (9.45)$$

Nosnost ložiska s vybráním:

$$L_v = \int_{r_b'}^{r_a} \left[\sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2 - p_b'^2} \right] r dr + \int_{r_b}^{r_b'} p_1^{(m)} r dr . \quad (9.46)$$

Je vidět, že platí

$$L_v > L . \quad (9.47)$$



Obr. 64

Průběh tlaku u ložiska s vybráním

Podobnou úpravou s vybráním lze provést i u ložiska radiálně axiálního - kuželového tvaru. Zároveň u kuželového ložiska je možno provést dvě řady trysek. Rozdělení tlaku plynu podél povrchy kužele závisí na poloze řad trysek od nichž k poloměrům r_a a r_1 nastává pokles tlaku přičemž mezi řadami trysek je tlak konstantní - viz obr.65.

Také touto konstrukční úpravou se zvětší nosnost, avšak je třeba hledat optimum vzhledem k spotřebě vzduchu.

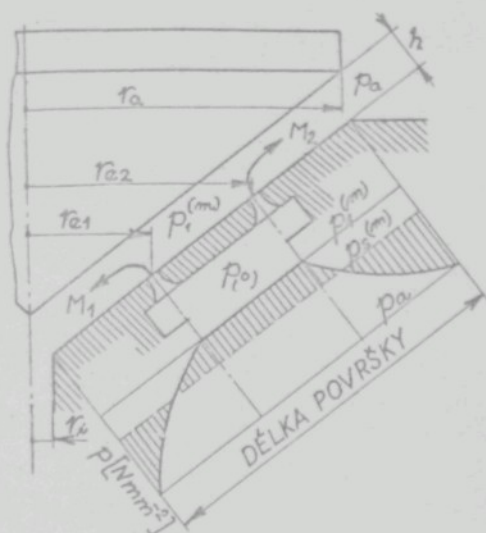
Nosnost zde bude součtem nosností v mezích:

$$L_1 \dots \langle r_1 \div r_{e1} \rangle \dots p^{(m)} = f(M_1),$$

$$L_2 \dots \langle r_{e1} \div r_{e2} \rangle \dots p_s^{(m)},$$

$$L_3 \dots \langle r_{e2} \div r_a \rangle \dots p^{(m)} = f(M_2),$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3.$$



Obr.65

Průběh tlaku na povrchu při dvou
řadách trysek

9.5 Vliv kinetické energie

Na modelu aerostatického ložiska podle obr.62 lze vyšetřit též vliv kinetické energie proudu vzduchu v mezeře ložiska na nosnost ložiska. Tento vliv bude největší při přechodu z výstupního otvoru trysky do ložiskové mezery, poněvadž je zde malý průtočný průřez a tím i veliká průtočná rychlost. Vliv kinetické energie se bude hledat v závislosti na velikosti výstupního otvoru trysky. Tlak, který byl dříve vypočítán (8.34) byl statický tlak potřebný k překonání tření při proudění vzduchu v ložiskové mezeře.

Při výpočtu vlivu kinetické energie je postupováno stejně jako v kapitole (8.4):

Pro tlak dynamický platí:

$$p_d = \frac{c_{str}^2 \cdot \rho}{2}, \quad (9.49)$$

Bude-li rozdíl $r_{e2} - r_{e1}$ dostatečně velký, potom s přijatelnou přesností lze počítat nosnost ložiska ze středního tlaku $p_s^{(m)}$ v mezích od r_1 po r_a :

$$L = 2\pi \int_{r_1}^{r_a} p_s^{(m)} r dr, \quad (9.48)$$

příčemž:

$$\varphi = \frac{1}{V}, \text{ z rovnice (8.7): } c_{\text{stř}} = \frac{V}{2\pi h r},$$

kde objem V je dán stavovou rovnicí:

$$V = \frac{M R T}{p_s} \quad (9.50)$$

a dále platí:

$$v = \frac{R T}{p} \text{ a tedy: } \varphi = \frac{p_s}{R T}.$$

Po dosazení do (9.49):

$$p_d = \frac{M^2 R^2 T^2}{8 \pi^2 h^2 r^2 p_s^2} \frac{p_s}{R T} = \frac{M^2 R T}{8 \pi^2 r^2 h^2 p_s} \quad (9.51)$$

Pro tlak bylo dříve odvozeno - viz (9.37):

$$p = \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2} \quad (9.52)$$

Vyjádření vlivu kinetické energie bude nový statický tlak:

$$p_s = \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2} - \frac{M^2 R T}{8 \pi^2 r^2 h^2 p_s}.$$

Po vynásobení celého vztahu tlakem p_s a anulování rovnice:

$$p_s^2 - p_s \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2} + \frac{M^2 R T}{8 \pi^2 r^2 h^2} = 0 \quad (9.53)$$

Kořeny této kvadratické rovnice jsou:

$$p_s = \frac{\sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2}}{2} \pm \sqrt{\frac{12 k M \ln \frac{r_a}{r} + p_a^2}{4} - \frac{M^2 R T}{8 \pi^2 r^2 h^2}} \quad (9.54)$$

Když do rovnice (9.54) za r se dosadí r_a a ostatní hodnoty pro určité dané ložisko, získá se jeden kořen kvadratické rovnice:

$$p_s = 0,999806 \cdot 10^3 \text{ N m}^{-2}$$

a druhý kořen

$$p_s = 0,0198,06 \cdot 10^3 \text{ N m}^{-2}$$

Kdyby zde nebylo účinku dynamického tlaku, pak bychom museli dostat pro $r = r_a$ $p_s = 98,066 \text{ N m}^{-2}$.

Je tedy správný první kořen rovnice a pro výpočet nosnosti lze dosazovat do vztahu:

$$p_s = \frac{b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} - a}$$

Jelikož bylo počítáno s absolutními tlaky a pro nosnost aerostatického ložiska je rozhodující přetlak, je třeba od součtu nosnosti z absolutních tlaků odečíst nosnost pro plochy S_1 i S_2 vyjádřenou z atmosférického tlaku - viz vztah (9.39).

$$L_3 = \pi p_a r_a^2.$$

Nosnost ložiska bude součet nosností nad otvorem trysky a nad nosným mezikružím zmenšená o nosnost L_3 .

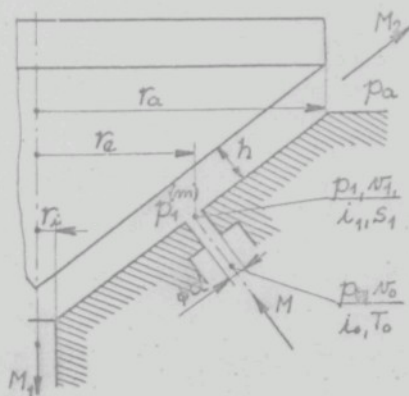
$$L_s = \int_0^{r_b} p'_s \cdot dS_1 + \int_{r_b}^{r_a} p_s \cdot dS_2, \quad (9.55)$$

kde p_s je tlak nad výstupním otvorem trysky, který se předpokládá konstantní a proto se dosadí v (9.54) za proměnnou mez r konečná mez r_a a obdrží se pro nosnost:

$$\begin{aligned} L_s = & \frac{1}{2} \sqrt{12 k M (\ln r_a - \ln r_b) + p_a^2} \cdot \int_0^{r_b} 2 \pi r dr + \\ & + \sqrt{\frac{12 k M (\ln r_a - \ln r_b) + p_a^2}{4} - \frac{M^2 R T}{8 \pi^2 r_b^2 h^2}} \int_0^{r_b} 2 \pi r dr + \\ & + \int_{r_b}^{r_a} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 (12 k M (\ln r_a - \ln r))}{2} + p_a^2} 2 \pi r dr + \\ & + \int_{r_b}^{r_a} \sqrt{\frac{12 k M (\ln r_a - \ln r) + p_a^2}{4} - \frac{M^2 R T}{8 \pi^2 r^2 h^2}} 2 \pi r dr - \pi p_a r_a^2 \end{aligned} \quad (9.56)$$

Pokus řešit numericky tuto rovnici byl neúspěšný.

Pro zvyšování tlaku přívodního vzduchu p_0 do trysky, zvětšuje se i průtoková hmota plynu M a při konstantní velikosti mezery h se též zvyšuje tlak vzduchu $p_1^{(m)}$ za datím trysky a tím i nosnost ložiska. Když naopak přívodní tlak p_0 bude konstantní a bude změněna velikost mezery h , změní se tlak $p_1^{(m)}$. Z uvedeného vyplývá, že problém je třeba řešit komplexně jako soustavu tryska + mezera - viz obr. 66. Při výpočtu tlaku v mezeře byly uvažovány ztráty třením a proto proudění tryskou se uvažuje se ztrátami.



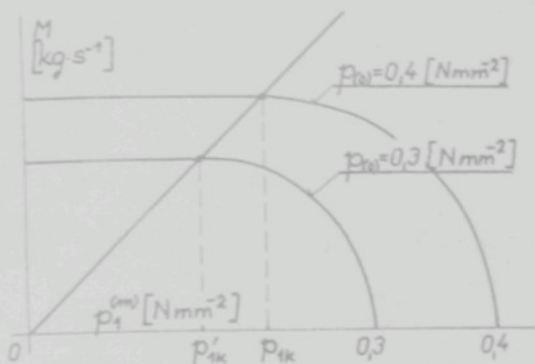
Obr. 66

Aerostatické kuželové ložisko

$p_1^{(m)}$ = tlak v mezeře těsně
za ústím trysky - na
poloměru r_e

Jak bylo uvedeno, lze při konstantním tlaku p_0 měn

hodnotu $p_1 = p_{01} \cdot 0,528 = p_{1k}$ se průtoková hmota zvětšuje podle zákona elipsy a dále při snižování tlaku p_1 za konstantního



Obr. 67

Závislost průtokové hmoty M na tlaku p_{1k} a na tlaku p_1 při konstantním tlaku $p_{(0)}$

tlaku $p_{(0)}$ se již průtoková hmota M nemění.

Při zmenšování tlaku p_1 od hodnoty $p_1 = p_{(0)}$ až do hodnoty p_{1k} včetně, platí, že $p_1 = p_1^{(m)}$. Při zmenšování tlaku p_1 od p_{1k} až k nule platí, že

$$p_1 = p_{1k} \neq p_1^{(m)}.$$

Proto i sledovaný případ je rozdělen na průtok

$$a) p_1^{(m)} \leq p_{1k}; p_1 = p_{1k}.$$

$$b) p_1 > p_{1k}; p_1 = p_1^{(m)} \text{ a tedy } p_1^{(m)} > p_{1k}.$$

10.1 Nestabilní provoz aerostatického ložiska

V případě, že $p_1^{(m)} = p_{1k}$, lze odvodit vztah pro výtokovou rychlost z trysky:

$$c_1 = \sqrt{2 \cdot \varphi \cdot \sqrt{i_0 - i_1}} = \varphi \sqrt{2 \cdot \frac{K}{K+1} p_1 v_1}. \quad (10.1)$$

Pro vzduch bude:

$$c_1 = 3,38 \varphi \sqrt{p_{(0)} v_0}. \quad (10.2)$$

Pro průtokovou hmotu z rovnice kontinuity platí:

$$M = \frac{S_1 c_1}{v_1} = S_1 \varphi \sqrt{2 \cdot \frac{K}{K-1} \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K}{K-1}} \frac{p_1}{v_1}}. \quad (10.3)$$

což pro vzduch činí:

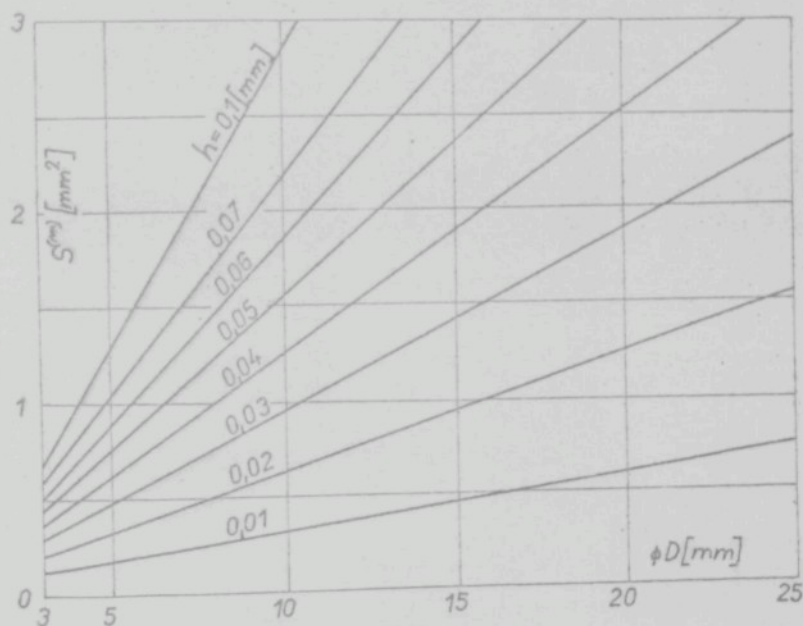
$$M = 0,685 \cdot S_1 \varphi \cdot \sqrt{\frac{p_{(0)}}{v_0}} = 0,685 \frac{\pi d^2}{4} \cdot \varphi \cdot \frac{p_{(0)}}{\sqrt{R T_0}}. \quad (10.4)$$

Průtoková hmota je stejná pro průtok tryskou i mezerou.
Potom

$$M = M_{\text{tryskou}} = M_{\text{mezerou}}$$

$$0,685 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \eta \cdot \frac{P_0}{\sqrt{R \cdot T_0}} = S_1^{(m)} \cdot c_1^{(m)} \cdot \frac{1}{v_1^{(m)}} = \pi \cdot d \cdot h \cdot c_1^{(m)} \cdot \frac{1}{v^{(m)}} \quad (10.5)$$

kde $S_1^{(m)}$ je průtoková plocha mezery h , $c_1^{(m)}$ je průtoková rychlost mezerou za ústím trysky a $v_1^{(m)}$ je měrný objem vzduchu v mezeře za ústím trysky, d = průměr trysky.



Obr. 68

Závislost průtokové plochy $S^{(m)}$ na průměru rotořku

Vztah pro průtokové množství M samozřejmě platí pro kterékoliv místo v mezeře, tedy pro kteroukoliv průtokovou plochu $S^{(m)}$, jejíž průběh v závislosti na ϕD je na obr. 68.

Pro tlak v mezeře byla odvozena rovnice (9.19):

$$p^{(m)} = \sqrt{12 k M_1 (\ln r - \ln r_1) + p_a^2},$$

respektive

$$p^{(m)} = \sqrt{12 k M_2 (\ln r_a - \ln r) + p_a^2}.$$

Tlak v mezeře za ústím trysky lze obdržet dosazením poloměru r_e , na kterém jsou umístěny trysky, za obecný poloměr r . Po dosazení také za průtokovou hmotu M , a konstantu k bude:

$$p_1^{(m)} = \sqrt{12 \frac{\eta \cdot R T_0}{\pi \cos \alpha_1 h^3} M \frac{\ln \frac{r_a}{r_e}}{\ln \frac{r_a}{r_1}} (\ln r_e - \ln r_1) + p_a^2}. \quad (10.6)$$

Pro získání závislosti $p_1^{(m)}$ na p_0 je dále dosazeno za průtokovou hmotu plynu M z rovnice (10.4):

$$p_1^{(m)} = \sqrt{12 \frac{\eta \cdot \sqrt{R T_0}}{\pi \cos \alpha_1 h^3} 0,685 \gamma \cdot \frac{\pi d^2}{4} p_0 \frac{\ln \frac{r_a}{r_e}}{\ln \frac{r_a}{r_1}} (\ln r_e - \ln r_1) + p_a^2}. \quad (10.7)$$

Za předpokladu, že následující výraz:

$$12 \frac{\eta \cdot \sqrt{R T_0}}{\pi \cos \alpha_1 h^3} 0,685 \gamma \cdot \frac{\pi d^2}{4} \frac{\ln \frac{r_a}{r_e}}{\ln \frac{r_a}{r_1}} (\ln r_e - \ln r_1) = k^*,$$

je konstantní (zavedena konstanta k^*), bude dán tlak $p_1^{(m)}$ vztahem:

$$p_1^{(m)} = \sqrt{k^* \frac{p_0^2}{h^3} + p_a^2}. \quad (10.8)$$

Při čemž h je vždy větší než nula.

Když i velikost mezery h bude konstantní, pak platí, že

$$k^* \cdot h^{-3} = k^{**}$$

a pro tlak $p_1^{(m)}$ se dostane:

$$p_1^{(m)} = \sqrt{k^{**} \cdot p_{(o)} + p_a^2} \quad (10.9)$$

Tlak $p_1^{(m)}$ podle (10.8) je funkcí velikosti mezery h .
Vzhledem k dané podmínce provozního režimu, kdy:

$$p_1^{(m)} < p_{lk} = p_{(o)} \cdot 0,528, \quad (10.10)$$

lze nalézt velikost mezery h pro tento provoz:

Za této podmínky platí pro průtokovou hmotu vztah (10.4):

$$M = 0,685 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \eta \cdot \frac{p_{(o)}}{\sqrt{R T_o}}.$$

Ze vztahu (10.6) pro tlak v mezeře $p_1^{(m)}$ lze definovat konstantu $\widehat{k}$ takto:

$$\widehat{k} = \frac{12 \eta R T_o}{\pi \cos \alpha_1} \cdot \frac{\ln \frac{r_a}{r_e}}{\ln \frac{r_a}{r_1}} \ln \frac{r_e}{r_1}.$$

Pak vztah (10.6) nabude tvaru:

$$p_1^{(m)} = \sqrt{\widehat{k} \frac{M}{h^3} + p_a^2} \quad (10.11)$$

Vzhledem k (10.10) bude

$$0,528 \cdot p_{(o)} > \sqrt{\widehat{k} \frac{M}{h^3} + p_a^2}.$$

Po dosazení za průtokovou hmotu z (10.4) platí:

$$0,528 \cdot p_{(o)} > \sqrt{\widehat{k} \frac{1}{h^3} \cdot 0,685 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \eta \cdot \frac{p_{(o)}}{\sqrt{R T_o}} + p_a^2},$$

z čehož vyplývá:

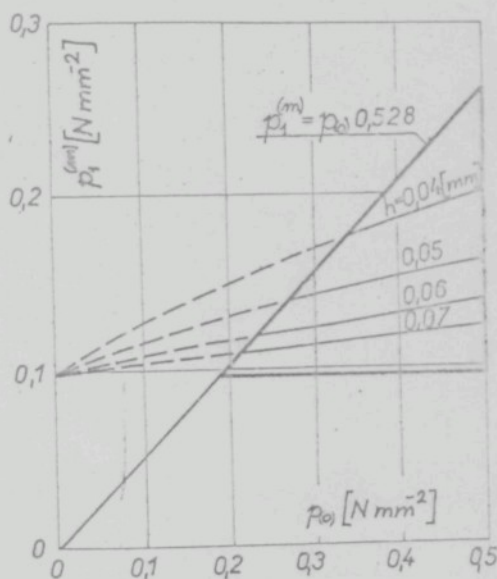
$$\frac{1}{h^3} < \frac{0,528^2 \cdot p_{(o)}^2 - p_a^2}{\widehat{k} \cdot 0,685 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \eta \cdot \frac{p_{(o)}}{\sqrt{R T_o}}}.$$

Z toho plyne mez pro velikost mezery h v závislosti na tlaku $p_{(o)}$ - aby platil režim (10.10):

$$h > \sqrt[3]{\frac{\hat{k} \cdot 0,685 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \varphi \cdot \frac{p_{(o)}}{\sqrt{R \cdot T_o}}}{0,528^2 \cdot p_{(o)}^2 - p_a^2}} \quad (10.12)$$

Nyní lze vynést graficky závislost (10.8) na $p_{(o)}$

Na obr. 69 vzhledem k (10.12) platí jen hodnoty pro různé mezery h pod čarou $p_1^{(m)} = 0,528 \cdot p_{(o)}$ - plně vytažené.



Obr. 69

Závislost tlaku $p_1^{(m)}$ na $p_{(o)}$

Grafické vyjádření závislosti (10.13) pro hodnoty

$$\alpha_1 = 45^\circ; \quad \varphi = 1; \quad r_e = 0,007 \text{ [m]}; \quad r_a = 0,0125 \text{ [m]}; \\ r_1 = 0,0015 \text{ [m]}; \quad T_o = 293 \text{ [}^\circ\text{K]}; \quad d = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ [m]},$$

je na obr. 70. Pro podmínku $p_1^{(m)} = p_{lk} = p_{(o)} \cdot 0,528$ platí

Z rovnice (10.8)

plyne:

$$p_{(o)} = \frac{(p_1^{(m)2} - p_a^2) h^3}{k^*}$$

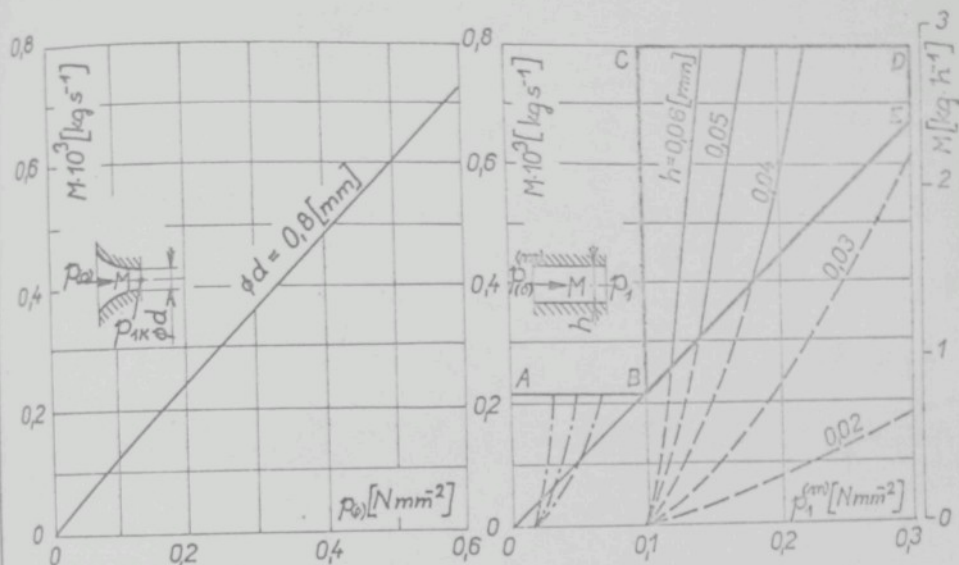
Závislost průtokové
hmoty na tlaku

$p_1^{(m)}$ lze odčíst
po dosažení tlaku
 $p_{(o)}$ z (10.8) do
(10.4):

$$M = 0,685 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \varphi \cdot$$

$$\frac{(p_1^{(m)2} - p_a^2) \cdot h^3}{k^* \sqrt{R \cdot T_o}} \quad (10.13)$$

na obr. 70 pro různé h a pro $p_a = 98.066 \text{ [N m}^{-2}\text{]}$ hodnoty v lichoběžníku B-C-D-E.



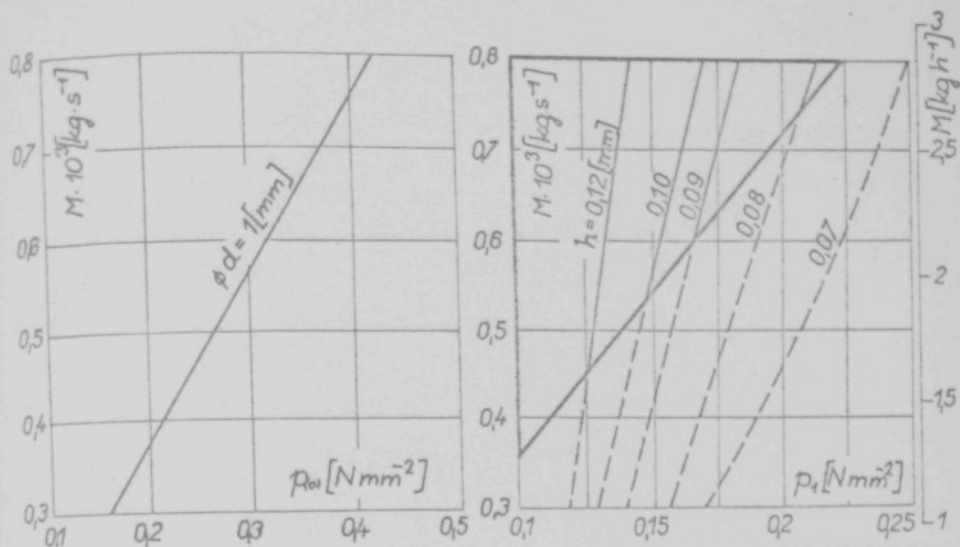
Obr. 70

Závislost průtokové hmoty na tlaku p_0 , p_1 , $p_1^{(m)}$ a mezeře h

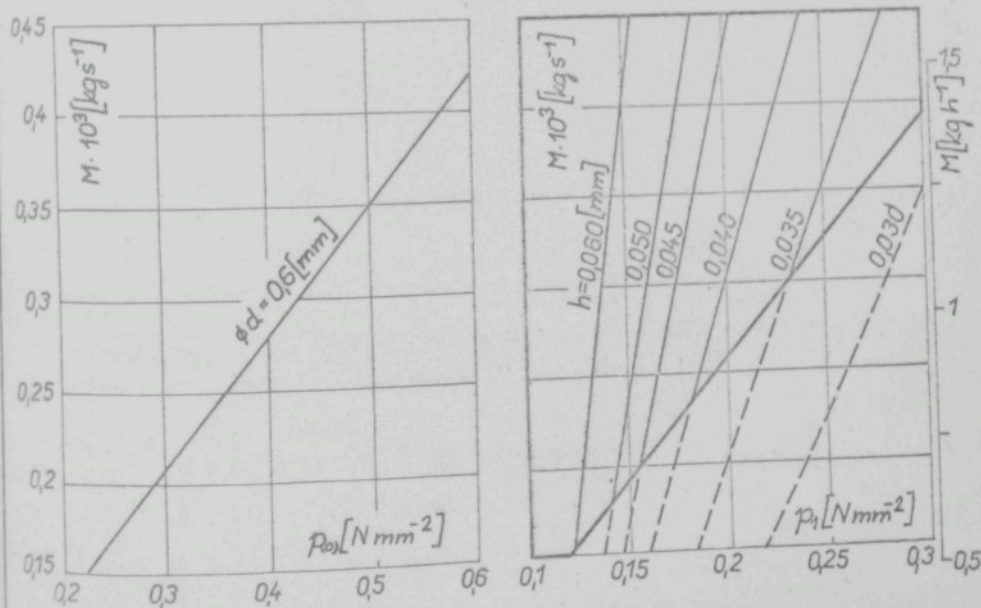
Za předpokladu, že by ložisko pracovalo např. v prostředí o tlaku $p_a = 9.806 \text{ [N m}^{-2}\text{]}$ pak pro určení průtokové hmoty M v mezích od $p_a = 9.806 \div 98.066 \text{ [N m}^{-2}\text{]}$ pro různé velikosti h , h' , h'' , platí hodnoty v trojúhelníku O-A-B.

Na obr. 71 a 72 je tatáž závislost pro průměry trysky 1 [mm] a 0,6 [mm] rovněž pro podmínku, že $p_1^{(m)} \leq p_{1k}$.

Platí opět hodnoty tlustě zarámované.



Obr. 71 Závislost $\dot{M} = f(p_{01}, p_1^{(m)}; h)$ pro $\phi d = 1 \text{ mm}$



Obr. 72 Závislost $M = f(p_K; p_1^{(m)}; h)$ pro $\phi d = 0,6 \text{ mm}$

10.2 Stabilní provoz aerostatického ložiska

b) Za předpokladu, že $p_1 > p_{1k}$, platí z teorie proudění v tryskách pro výtokovou rychlost:

$$c_1 = \sqrt{2 \cdot \frac{K}{K-1} p_{(o)} v_o \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right]} \quad (10.14)$$

a pro průtokovou hmotu potom z rovnice kontinuity :

$$M = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \varphi \sqrt{2 \cdot \frac{K}{K-1} \frac{p_{(o)}}{v_o} \left[\left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right]} \quad (10.15)$$

Po dosazení z rovnice (10.15) do (10.6) za průtokovou hmotu M vyjde závislost $p_1^{(m)}$ (tlak v mezeře za ústím trysky), na $p_{(o)}$:

$$p_1^{(m)} = \sqrt{\frac{12 \cdot \eta \cdot R \cdot T_o}{\pi \cdot \cos \alpha_1 \cdot h^3} \frac{\pi d^2}{4} \varphi p_{(o)} \left[\frac{K}{K-1} \frac{2}{R T_o} \left[\left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right] \frac{\ln \frac{r_e}{r_1}}{\ln \frac{r_e}{r_1}} \right]} \quad (10.16)$$

Za předpokladu, že následující výraz je položen za konstantu k^* :

$$\frac{12 \cdot \eta \cdot R \cdot T_o}{\pi \cdot \cos \alpha_1} \frac{\pi d^2}{4} \varphi \sqrt{\frac{K}{K-1} \frac{2}{R T_o}} \frac{\ln \frac{r_e}{r_1}}{\ln \frac{r_e}{r_1}} \ln \frac{r_e}{r_1} = k^*,$$

bude dán tlak $p_1^{(m)}$ vztahem :

$$p_1^{(m)} = \sqrt{\frac{k^*}{h^3} p_{(o)} \left[\left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{p_1}{p_{(o)}} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right] + p_a^2} \quad (10.17)$$

Za předpokladu, že $p_1 > p_{1k}$, platí v tomto intervalu, jak už bylo uvedeno na začátku, že $p_1^{(m)} \equiv p_1$.

Pak lze psát:

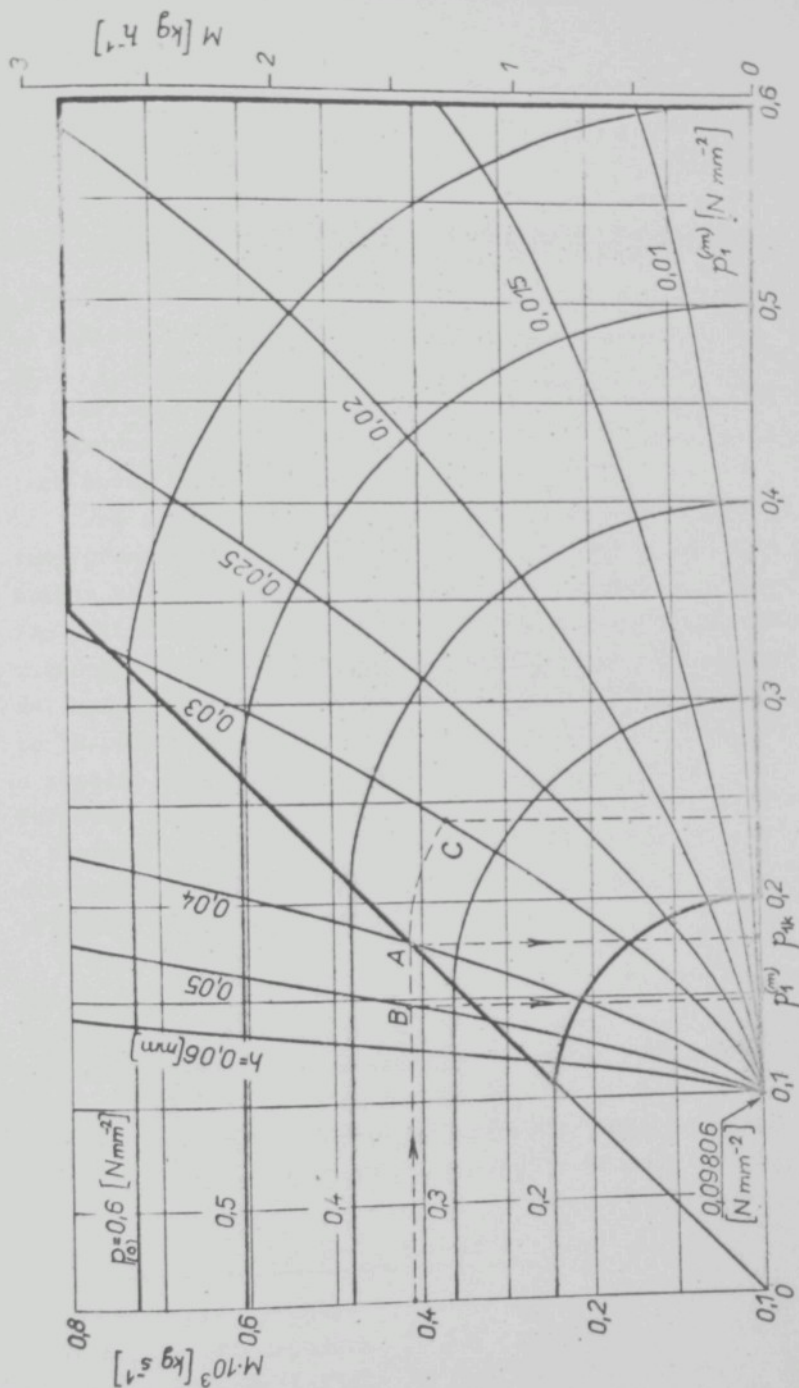
$$p_1^{(m)} = \left[\frac{\kappa}{h^3} p_{(o)} \left(\frac{p_1^{(m)}}{p_{(o)}} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{p_1^{(m)}}{p_{(o)}} \right)^{\frac{K+1}{K}} + p_a^2 \right] \quad (10.18)$$

Závislost je v implicitním tvaru.

Vztah pro průtokovou hmotu M v závislosti na $p_{(o)}$ a $p_1^{(m)}$ a též pro různé velikosti h lze nalézt z rovnice (10.15) po dosazení za $p_1 = p_1^{(m)}$ ze vztahu (10.18) :

$$M = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \eta \cdot p_{(o)} \left[\frac{\kappa}{K-1} \frac{2}{K T_o} \left[\frac{\kappa}{h^3} p_{(o)} \left(\frac{p_1^{(m)}}{p_{(o)}} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{p_1^{(m)}}{p_{(o)}} \right)^{\frac{K+1}{K}} + p_a^2 \right]^{\frac{1}{K}} - \frac{p_{(o)}^{\frac{2}{K}}}{\frac{K+1}{2K}} \right] \quad (10.19)$$

Grafické znázornění závislosti (10.19) $M = f(p_{(o)}, p_1^{(m)}, h)$ pro stejné hodnoty jako při řešení případu a) je na obr. 73.



Obr. 73

Závislost $M = f(p_1^{(m)}; p_1^{(m)}; h)$ při $\phi = 0,8$ mm

11.0 Pokusná zařízení, výsledky experimentů, výsledky měření

11.1 Pokusná zařízení

Pro ověřování teoretických výsledků bylo zhotoveno pokusné zařízení s aerostatickými ložisky, kde expandující vzduch nese rotorek a zároveň jej pohání. Pohled na pokusnou stolicí je v příloze 22 obr. 1. Na tomto zařízení jsou prováděny zkoušky zakrucování vláken, zkoušky nosnosti, zkoušky stability rotace apod. Současně lze zkoušet dvě ložiska.

Pro zjišťování tlakového profilu mezery ložiska byly pořízeny přenosné malé stolice, jež společně s 30 násobným U manometrem tvoří jeden zkušební celek - viz obr.2 v příloze 22. Pro zjišťování změn tlakového profilu v mezeře při různých změnách zátěže jakož i pro napodobení stavu při kmitání rotoru, bylo zhotoveno přídatné zařízení na ložisko, umožňující rotorek posunovat ve směru osy rotace nebo kolmo na osu rotace a konečně naklánět osu rotoru. Všechny pohyby lze přesně měřit. Zařízení je na obr. 3 v příloze 22. Takto se získá podobný obraz rozložení tlaku v mezeře, jako když rotorek kmitá při nestabilním chodu. Z toho je možné usuzovat na působení sil jež jsou příčinou vychylování rotoru.

Pro zkoumání kmitání rotoru vysokofrekvenčního elektromotoru, jež je uložen v aerostatických ložiskách slouží zkušební stolice od fy. Heberlein ze Švýcarska - viz obr. 4, příloha 22. Na zařízení je možno zkoušet kmitání ložiska při 2500 otáčkách za sekundu a to na principu změny kapacity v mezeře ložiska, Stolicí je opatřena měničem frekvence (otáček) a měničem tlaku vzduchu a úplným měřicím zařízením.

11.2 Zjišťování rychlostního součinitele pro Lavalovu trysku

Pro správný návrh Lavalovy trysky pro ložisko je třeba znát ztráty při proudění. Ty lze vyjádřit součinitelem φ . Hodnoty součinitele φ pro tak extrémně malé průměry

nejdou v odborné literatuře dostupné. Z toho důvodu bylo provedeno měření a hodnota φ zjištěna.

Rychlost ve výstupním otvoru Lavalovy trysky při bezztrátovém proudění je dána vztahem:

$$c_{1 \text{ ad}} = \sqrt{2 \cdot \frac{K}{K-1} p_{01} v_0 \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_{01}} \right)^{\frac{K}{K-1}} \right]} = \sqrt{2 \cdot \overline{h_{ad}}} \quad (11.1)$$

Rychlost skutečná - se ztrátami:

$$c_{1 \text{ pol}} = \sqrt{2 \cdot \frac{K}{K-1} p_{01} v_0 \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_{01}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]} = \sqrt{2 \cdot \overline{h_{ok}}} = \sqrt{2 \cdot \varphi \cdot \overline{h_{ad}}} \quad (11.2)$$

kde n je polytropický koeficient vyjadřující ztráty. Ten však je obtížné přesně určit.

Proto schůdnější cesta je zjistit koeficient φ a pomocí něj vyjádřit skutečnou rychlost.

Pro průtokovou hmotu vzduchu z rovnice kontinuity platí:

$$M_{ad} = \frac{c_{1 \text{ ad}} \cdot S_1}{v_1} ; M_{pol} = \frac{c_{1 \text{ pol}} \cdot S_1}{v_1} = \frac{c_{1 \text{ ad}} \cdot \varphi \cdot S_1}{v_1} \quad (11.3)$$

Dělením rovnice plyne poměr:

$$\frac{M_{pol}}{M_{ad}} = \frac{c_{1 \text{ pol}}}{c_{1 \text{ ad}}} = \varphi \quad (11.4)$$

M_{pol} lze změřit a M_{ad} lze vypočítat.

Pro průtokovou hmotu M_{ad} také platí z průtoku známým kritickým průřezem S_1 :

$$M_{ad} = \frac{c_{kr} \cdot S_{kr}}{v_{kr}} \quad (11.5)$$

přičemž:

$$c_{kr} = \sqrt{2 \cdot \frac{K}{K-1} p_{01} v_0} = 1,077 \sqrt{p_{01} v_0} \quad (11.6)$$

Pro změření M_{pol} lze použít větší tlakovou nádrž o známém objemu V , ze které se přes trysku vzduch vypouští, přičemž se zachytí počáteční a konečný stav.

Pro vzduch v nádrži na počátku měření platí rovnice stavu:

$$\left. \begin{aligned} p_1 \cdot V &= M_1 R T_1 & M_1 &= \frac{p_1 V}{R T_1} \\ \text{a na konci měření:} & & & \\ p_2 V &= M_2 R T_2 & M_2 &= \frac{p_2 V}{R T_2} \end{aligned} \right\} \quad (11.7)$$

Odečtením rovnice:

$$M_1 - M_2 = \frac{p_1 V}{R T_1} - \frac{p_2 V}{R T_2} = \frac{V}{R} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right) \quad (11.8)$$

A když $T_1 = T_2$:

$$M_1 - M_2 = M_{\text{pol}} = \frac{V}{R T} (p_1 - p_2) \quad (11.9)$$

Z naměřených hodnot byl vypočítán podle (11.4) rychlostní součinitel:

$$\varphi = 0,806$$

To odpovídá hodnotě v diagramu pro φ v závislosti na Reynoldsově číslu [197]:

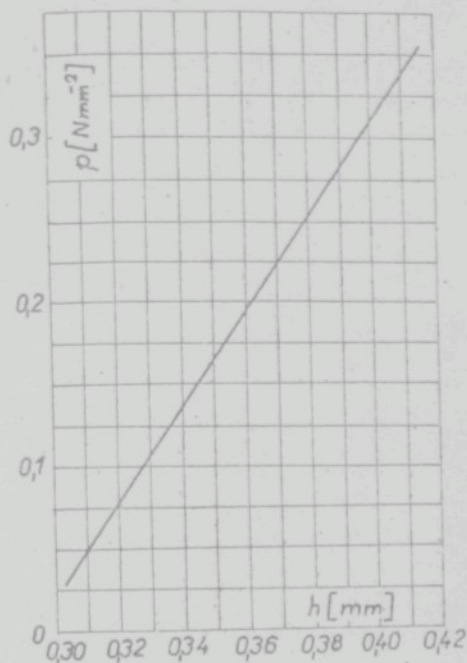
$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} = \frac{284 \cdot 0,007}{13,6 \cdot 10^{-6}} = 13.200 \Rightarrow \varphi = 0,8$$

Další faktor, který má vliv na přesnost vyjádření tlakového profilu a svislých poměrů při proudění v ložisku je šikmé seřiznutí trysky, čímž vzniká odklon proudu vzduchu od osy trysky. Velikost tohoto vlivu bude předmětem dalšího zkoumání na KTT.

Ukazuje se jako nutné pro další přesné řešení ložiska provést měření součinitele φ pro různé kritické průměry Lavalovy trysky a též pro trysky zdůžující se bez Lavalova nátrubku.

11.3 Měření zdvihu rotorku

Při řešení stability rotace a pro zjištění maximální nosnosti ze daného tlaku vzduchu před tryskou, je třeba znát zdvih rotorku na rotaci. Měření bylo prováděno pomocí pneumatického mikrometru za chodu bez zatížení, což je velmi komplikované.

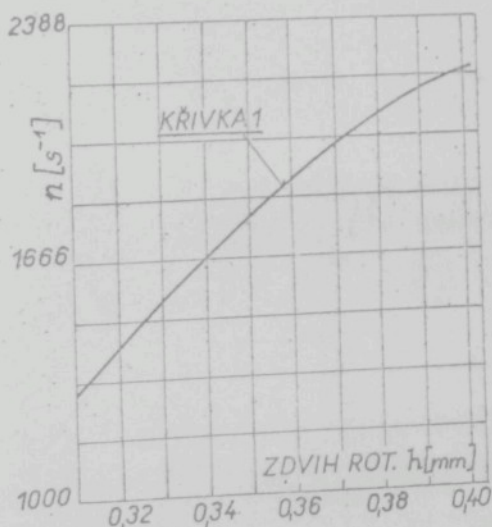


Obr. 74

Závislost zdvíhu rotorku na tlaku
vzduchu před tryskou

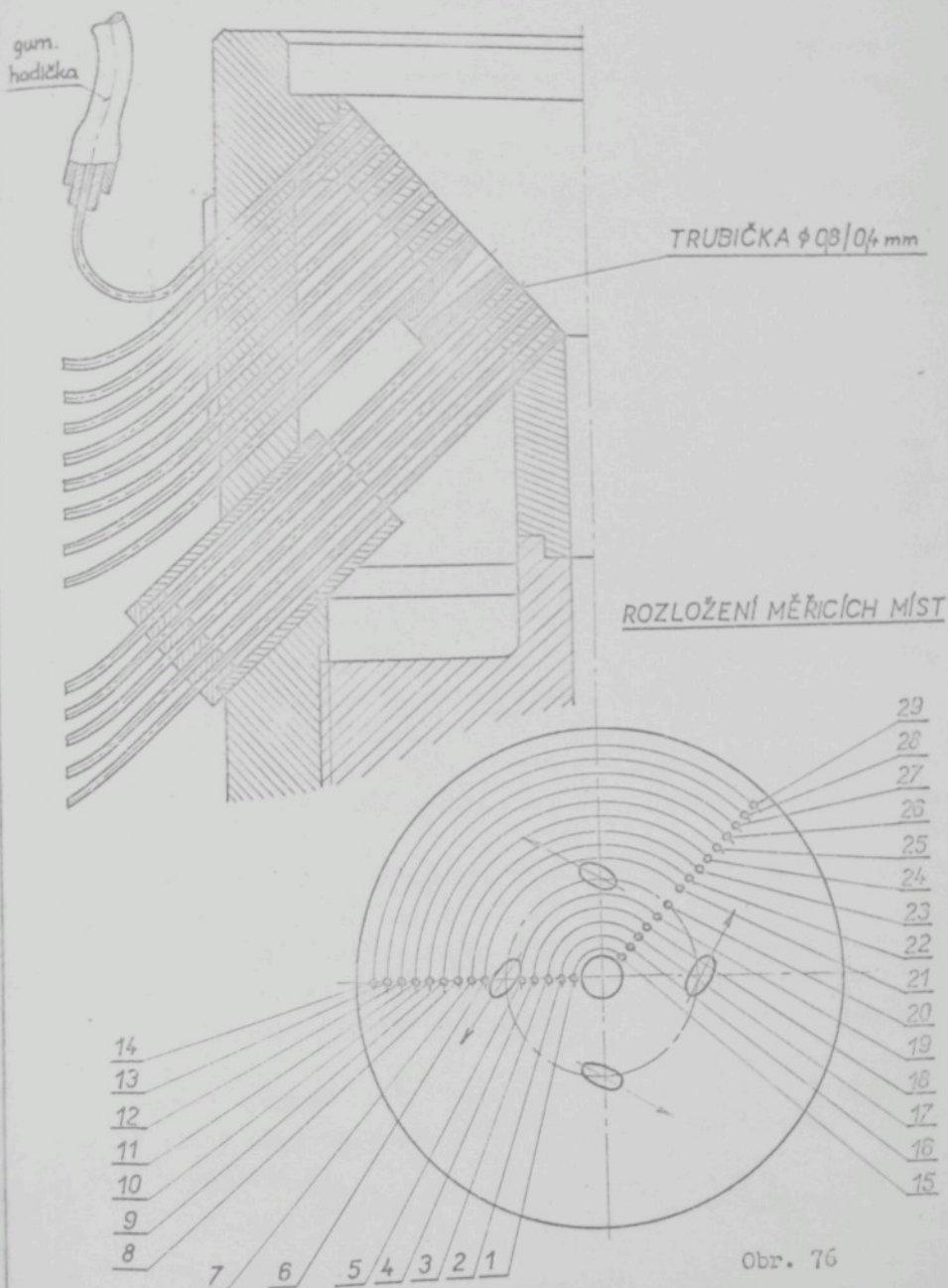
Princip pneumatického mikrometru je znám [20]. Byla vyrobena kalibrovaná tryska pro určité vymezení vlivu strhávání vzduchu za rotace. Výsledky, jejichž přesnost nelze stanovit, jsou na příložených grafech č. 74 a 75.

Následkem velké rychlosti vzduchu a tím, že rotorek je "uložen v jednom ložisku" vychází zdvih řádově 10x větší než u normálního aerostatického ložiska. Kontrola naměřených hodnot byla provedena tak, že měření zdvíhu bylo také provedeno za rotace s nezatíženým rotorkem pomocí indikátorových hodin.



Obr. 75 Závislost zdvíhu rotorku na jeho otáčkách

SCHEMA MĚŘENÍ TLAKU V MEZEŘE



11.4 Výsledky měření tlakového profilu

Pro ověření výsledků vypočtených hodnot tlaku v mezeře ložiska, kde vzduch nese a zároveň pohání, byly tlaky též měřeny.

Do statorku byly zasazeny trubičky s vnitřním průměrem 0,5 mm podle obr. 76. Tlaky byly měřeny na povrchu, na které leží též výstřední trysky (měřicí místa 1 - 14) a na povrchu mezi tryskami (měřicí místa 15 - 29). Z obou hodnot ležících vždy na jedné rovnoběžkové kružnici byl vzat průměr. Výsledky měření v grafickém zpracování pro tlaky vzduchu před tryskou v rozsahu

$$20. 9,806 \cdot 10^3 \text{ N m}^{-2} \div 475. 9,806 \cdot 10^3 \text{ N m}^{-2} \text{ jsou na}$$

obr. 77 a tabulární zpracování je na tabulce 1 v příloze 23.

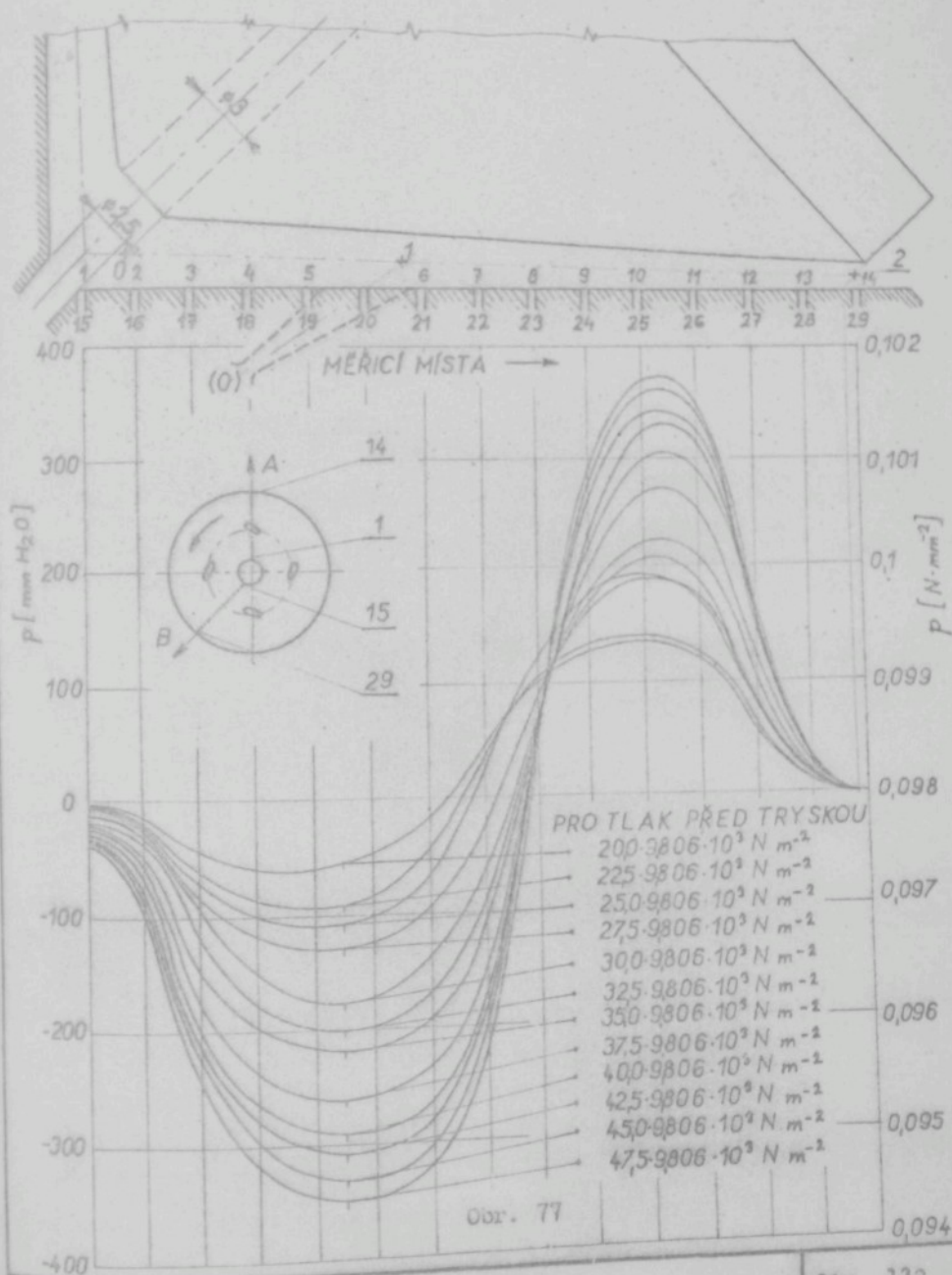
Tlaky byly měřeny za rotace rotorku bez vlákna. Z tlakového profilu v mezeře začleněného při tlaku $40. 9,806 \cdot 10^3 \text{ N m}^{-2}$ před tryskou byla grafickou integrací získána nosnost $L = 0,218 \text{ N}$, přičemž síla tíže vlastního rotorku činila $0,28 \text{ N}$. S ohledem na grafickou integraci je výsledek přijatelný.

Při zakrucování vláken je při startování a zastavování rotorku používána čelistová brzdička. Při měření tlakového profilu se ukázalo, že brzdička má dosti značný vliv na tlakový profil a to tak, že po velké části obvodu ruší výstup vzduchu z mezery ložiska. Proto bylo provedeno i měření tlakového profilu za provozu s brzdičkami a výsledky jsou na obr. 78 pro pět různých tlaků před tryskou.

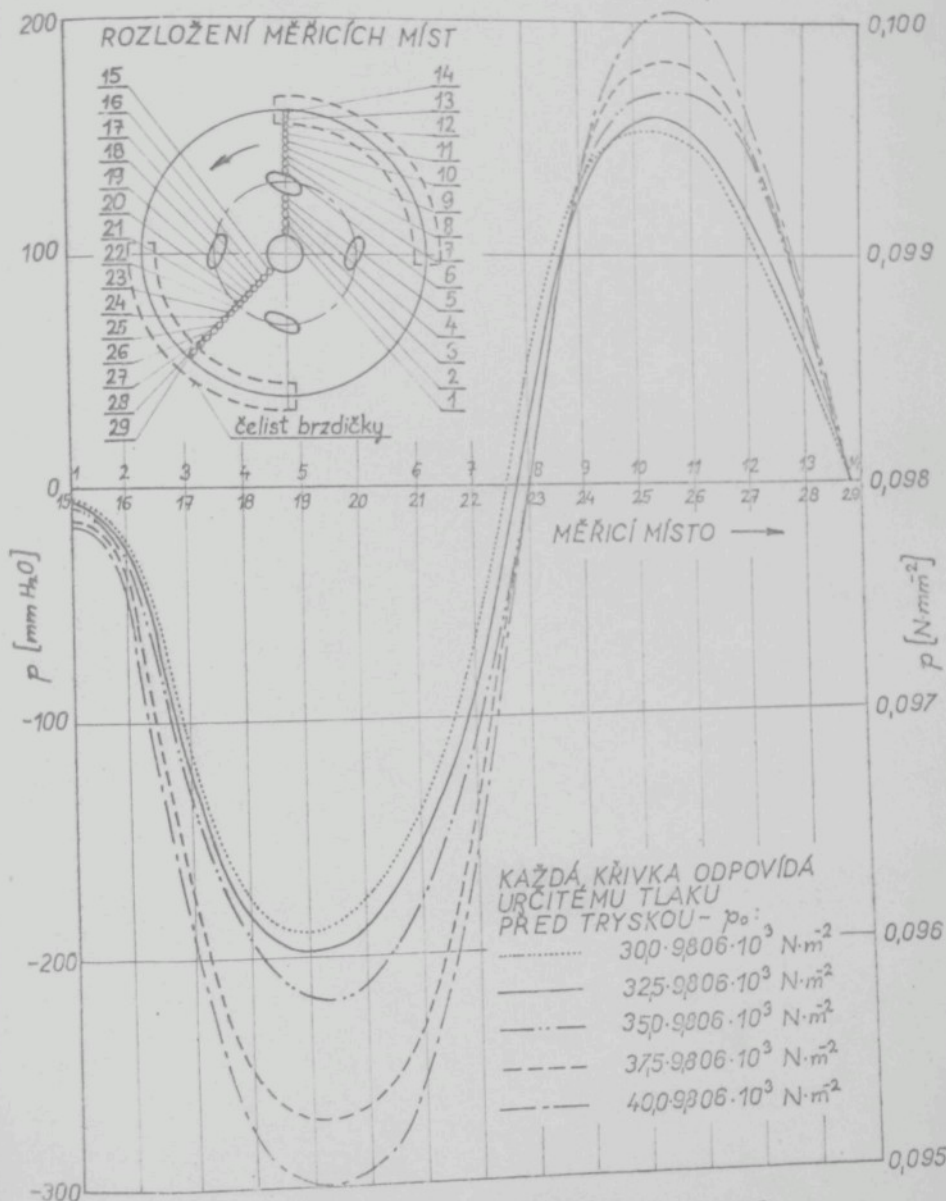
Jak je vidět ze srovnání tlakových profilů na obr. 77 a obr. 78, např. pro tlak $20. 9,806 \cdot 10^3 \text{ N m}^{-2}$ před tryskou, posunuje se při provozu s brzdičkami průsečík grafu tlaku s čarou barometrického tlaku doleva, což znamená, že tlak v prostoru před dotím trysky až po výstup z mezery se zvětšuje a nosnost také zvětšuje.

Ostatní výsledky měření tlakového profilu v mezeře pro jednotlivé tlaky před tryskami jsou uvedeny na tabulkách 2, 3, 4, 5, 6, 7 v příloze 23.

VÝSLEDNÝ TLAK V MEZEŘE LOŽISKA NESENÉHO
A POHÁNĚNÉHO VZDUCHEM (LOŽISKO BEZ BRZD)
NAMĚŘENÉ HODNOTY JSOU V TAB.1 PŘÍL.23



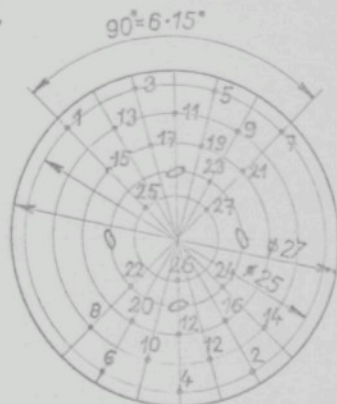
MĚŘENÍ TLAKU V MEZEŘE LOŽISKA NESENÉHO A POHÁNĚ- NÉHO VZDUCEM (VÝSLEDNÉ TLAKY Z TABULEK)



Obr. 78

MĚŘENO 25.2.1969

Podle schema na obr. 79 bylo provedeno měření tlaku v mezeře a výsledek je uveden na obr. 80 a také v polárních souřadnicích na obr. 81.

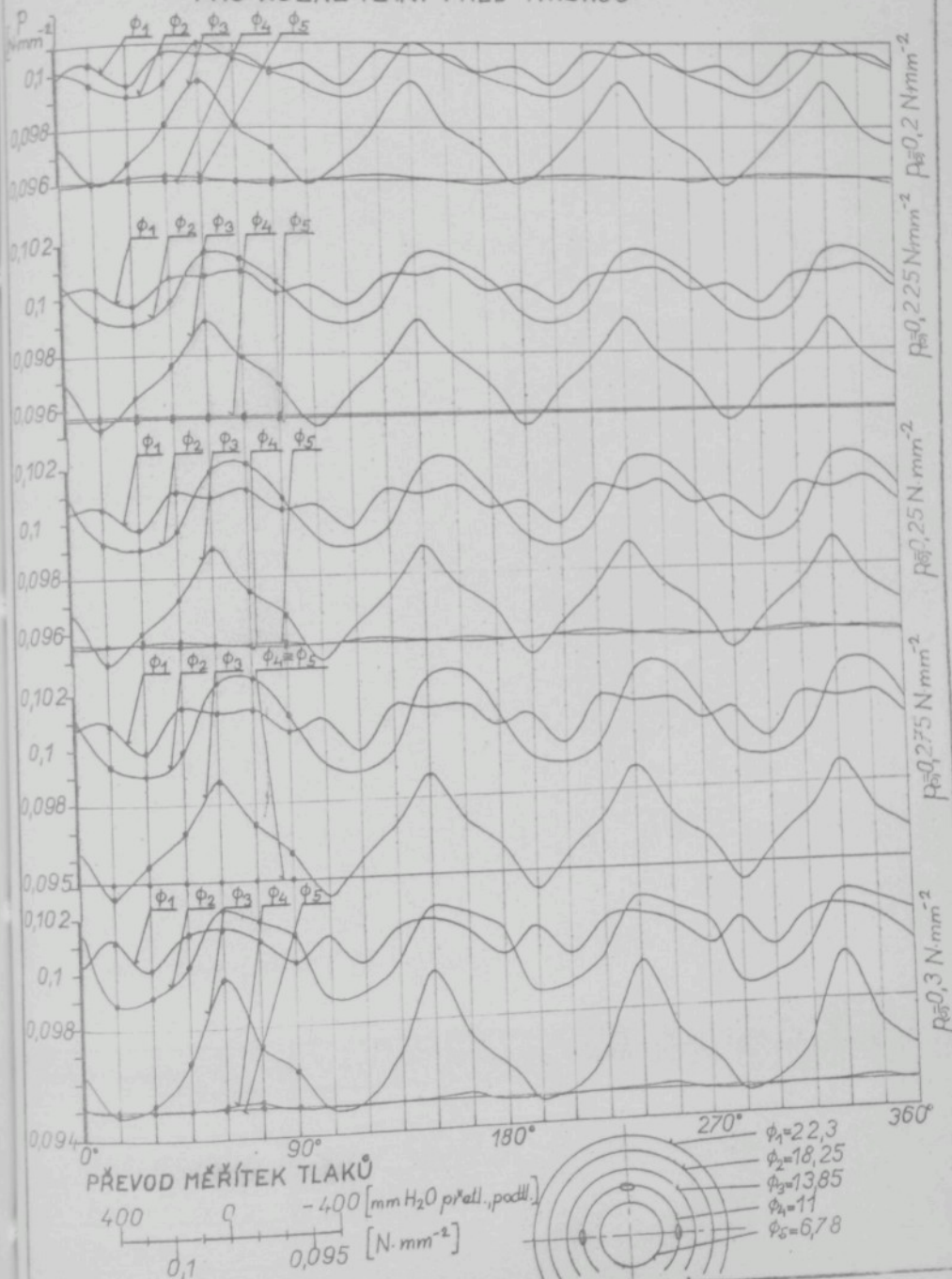


Obr. 79

Schema měřicích míst

Z průběhu tlaků plyne, že při výpočtu nosnosti ložiska je třeba provést opravu tlakového profilu vzhledem na kolísavý průběh tlaku po obvodě.

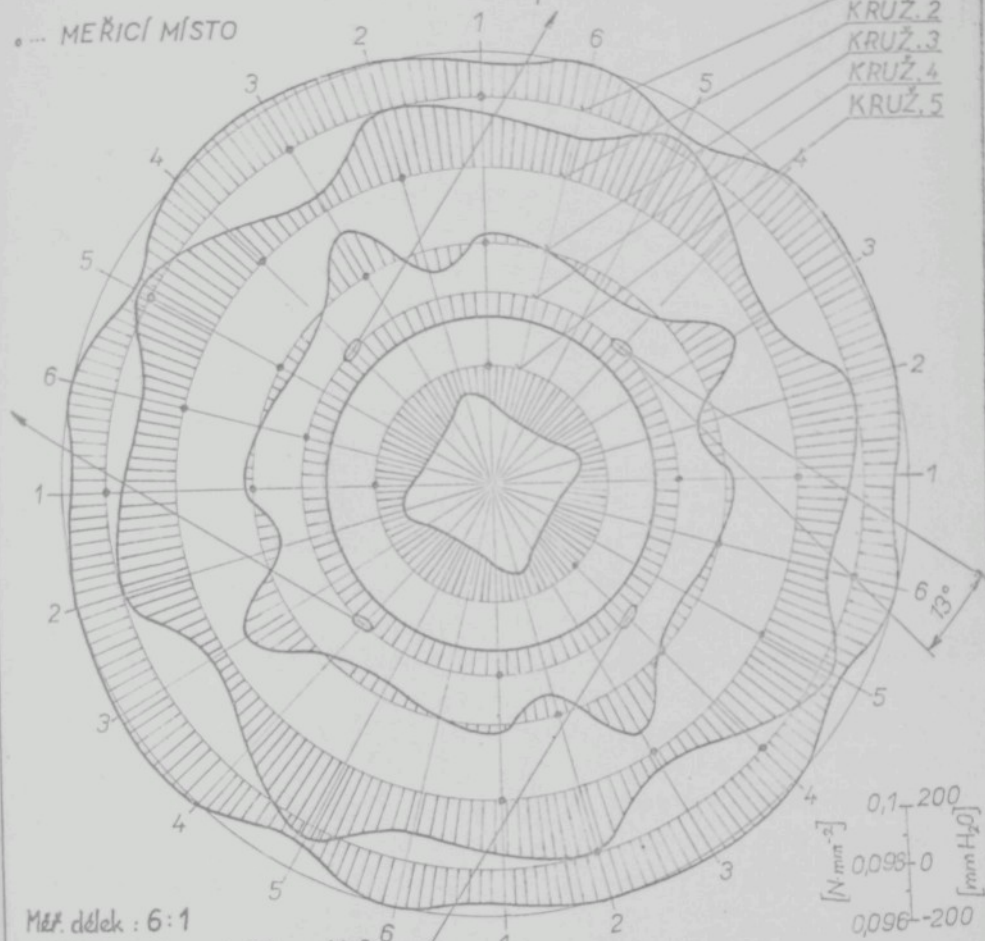
ROZVINUTÝ POLÁRNÍ DIAGRAM TLAKŮ VE ŠTĚRBINĚ PRO RŮZNÉ TLAKY PŘED TRYSKOU



POLÁRNÍ DIAGRAM TLAKŮ VE ŠTĚRBINĚ
PRO TLAK PŘED TRYSKOU $p_0 = 0,2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$

• ... MEŘICÍ MÍSTO

KRUŽ. 1
KRUŽ. 2
KRUŽ. 3
KRUŽ. 4
KRUŽ. 5



Meř. délek : 6 : 1

Mer. tlaků : $1 \text{ mm} \hat{=} 20 \text{ mm H}_2\text{O}$

tlaky jsou vynášeny od kružnic, na nichž leží měřicí místa.

Tabulka tlaků [mm H₂O]

Měřicí místo	1	2	3	4	5	6
Kruž. 1	117	165	182	178	77	170
Kruž. 2	188	228	55	142	286	142
Kruž. 3	20	-75	175	-23	-47	-10
Kruž. 4	-82				-84	
Kruž. 5	-132,5			-87		

12.0 Zhodnocení výsledků práce - rozbor nových poznatků

V kapitole 3.1 jsou uvedeny výsledky vývojových prací a pokusů na ložisku, kde expandující vzduch nese a zároveň pohání. Hlavní kritérium pro nerušenou rotaci pro široký rozsah otáčky se ukázalo v umístění trysek na kuželu statorku. Pro průměr rotorku 25 mm se experimentálně našla tato optima:

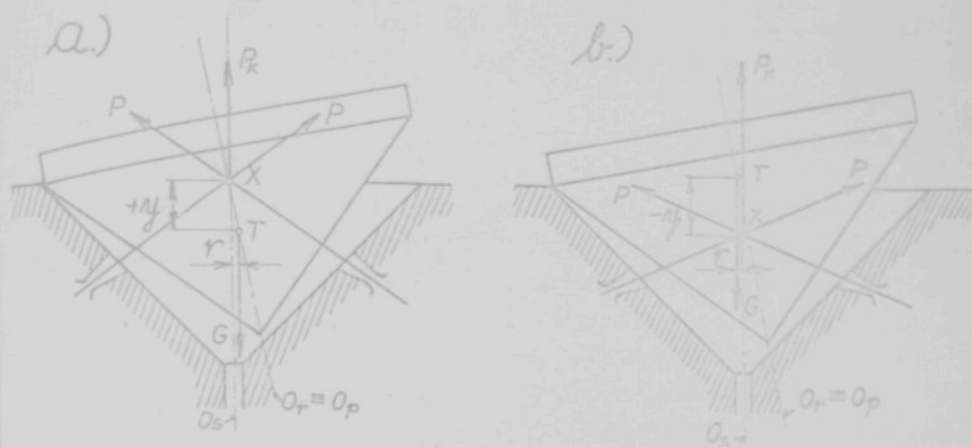
Vrcholový úhel kužele statorku	90°
Vrcholový úhel kužele rotorku	102°
(Tím je dán úhel šterbiny)	6°
Ústí trysek na rovnoběžkové kružnici . . .	Ø 11 mm
Směr osy trysky vůči základně statorku , . .	45°

Ostatní rozměry viz příloha č. 24.

Při vývoji geometrických parametrů se ukázalo, že rotace je pravidelnější, když průsečík x průmětu os trysek při uspořádání podle obr. 83 leží dostatečně vysoko nad těžištěm rotorku přičemž vzdálenost y tohoto myšleného průsečíku od těžiště je funkcí nejen sklonu trysek, jejich umístění na určité rovnoběžkové kružnici, nýbrž i polohy těžiště rotorku. Ve směru osy trysek působí na rotorek síly F z rozdílu hybnosti proudu vzduchu a lze najít nad myšleným průsečíkem x jejich výslednici F_k . V těžišti T působí tíže rotorku. Při vychýlení osy souměrnosti rotorku tvoří tyto dvě síly dvojici, jež natáčí "plovoucí" rotorek do takové polohy, v níž obě síly leží na společné svíslci, Z obr. 82a je vidět, že leží-li průsečík x nad těžištěm, vzniká dvojice sil se při vyklonění rotorku snaží napravit osu rotorku a provoz je stabilnější. Opakem je tomu při uspořádání podle obr. 82b.

Z uvedeného rozboru se nabízí použití z teorie stability plavání těles - viz obr. 83.

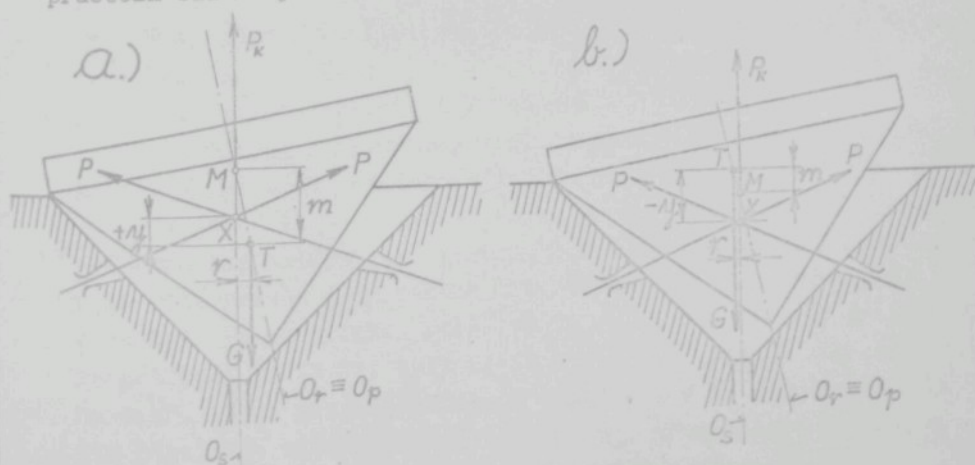
Na tomto obrázku v místě kde výslednice F_k (vztlaková



Obr. 82

Působení dvojice sil při vychýlení osy rotorku

сила) protíná osu rotorku (osa plavání) je průsečík M, nazývaný metacentrum. Leží-li nad těžištěm T_1 , stáčí dvojice sil vzniklé vychýlením osy rotorku zpět do původní - stabilní polohy - viz obr. 83a. Když metacentrum leží pod těžištěm, pak dvojice sil vzniklou výchylku dále zvětšuje, nastává dotyk rotorku se statorcem a porucha rotace. Je to uspořádání labilní. V případě, že průsečík sil X by ležel v těžišti, nastává rovnováha indiferentní



Obr. 83 Působení sil při pl...

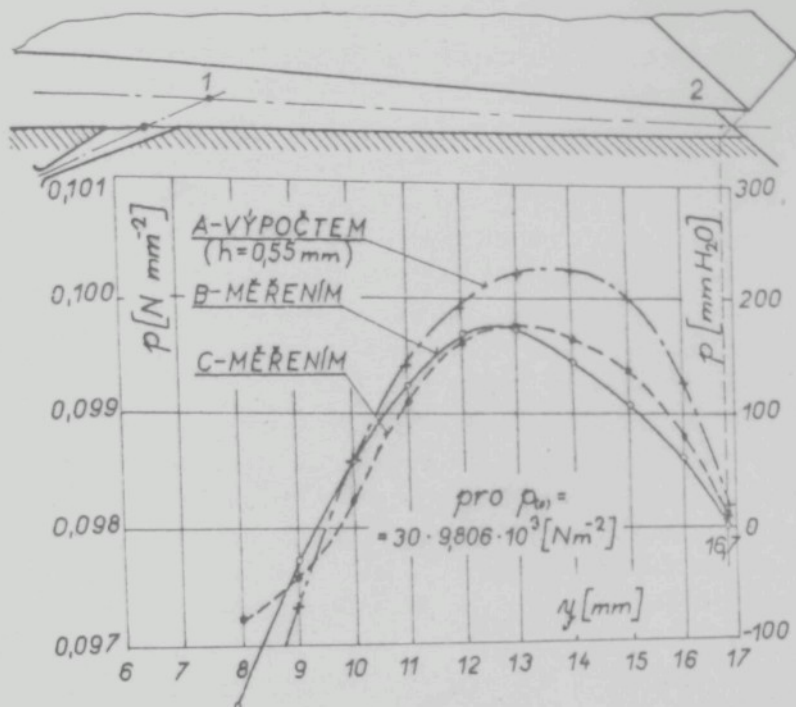
rovněž nepříznivé uspořádání. Tím je dokázáno, že pro stabilitu "plovoucího" rotorku je nutné zajistit umístění trysek na určité rovnoběžkové kružnici a pod takovým úhlem, aby myšlený průsečík sil x byl dostatečně nad těžištěm T , při čemž čím je vzdálenost mezi bodem x a těžištěm T větší, tím je i větší vzdálenost (m), tak zvaná metacentrická výška a tím se zvětšuje i rameno r a stabilizační moment dvojice sil se zvýší. Výsledky dosažené experimentální cestou potvrdily výsledky tohoto teoretického rozboru. Nestabilita chodu se však zcela neodstranila. Jsou známé návrhy na řešení stability tohoto ložiska a to stabilita při zakrucování - řeší / 3 / a stabilitu volné rotace řeší / 30 /. Dalším důležitým poznatkem získaným experimentální cestou je úhel mezery. Při úhlu menším než 6° je velmi ztíženo startování rotorku, kdy rotorek nedlehuje ještě svou volnou osu rotace (setrvačnick), vrchol kužele rotorku opisuje určenou kružnici a dochází k dotyku. Při úhlu 6° je již pro kroužení vrcholu kužele při startování dostatek prostoru a k dotyku nedochází. Klidnější chod při startování též zajišťuje startovací zařízení, které zároveň při zastavování rotace slouží jako brzda.

V kapitole 5 je řešeno proudění v mezeře nestojné tloušťky. Stlačitelné laminární proudění v úzkých mezerách lze popsat Navier - Stokesovými rovnicemi. Při zanedbání tření - tedy $\nu = 0$, přejdou Navier - Stokesovy rovnice v rovnice Eulerovy. Za použití dalších zjednodušujících předpokladů bylo proudění řešeno Eulerovými rovnicemi.

Při řešení tlakového profilu v mezeře ve směru povrchu kužele nebyl však zanedbán vliv tangenciálního proudění.

Výsledná rovnice pro tlakovou funkci byla odvozena jak pro proudění adiabatické vratné, tak i isotermické. Numericky byla však řešena jen rovnice tlakové funkce pro isotermické proudění. Po numerickém řešení rovnice (5.84) tlakové funkce na počítači MINSK 22, byly získány hodnoty tlaku - viz příloha č. 12, 13 na povrchu kužele v oblasti $1 \div 2$. Rovnice (5.84) již postihuje vliv množství vzduchu M_0 , přísávaného otvory ve statorku a rotorku. Zároveň byly získány hodnoty tlaku na

povrchu kužele v oblasti 1 ÷ 2 měřením - viz příloha č. 23. Proto je v obr. 84 provedeno srovnání výsledků a měření.



Obr. 84

Srovnání vypočteného a změřeného tlakového profilu.

V obrázku křivka A značí průběh tlaku v mezeře, který byl vypočítán z rovnice (5.84) resp. (5.80). Křivka B ukazuje průběh změřeného tlaku (jedná se o průměr z měření na dvou různých površkách). Křivka C značí průběh změřeného tlaku (je to průměr měření na rovnoběžkových kružnicích - viz polární tlakový diagram). Měření i výpočet byl prováděn při stejném tlaku před tryskami $p_0 = 0,3 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}$, při nezatíženém rotorku. Při výpočtu tlaku byla dosazena velikost mezery $h = 0,55 \text{ mm}$. Tabulárně jsou vypočítané hodnoty tlaku uvedeny v příloze č. 13, list 29, 16. sloupec.

Při porovnání je vidět, že vypočítané tlaky jsou v délce povrchů $y = 10$ až $y = 17,7 \text{ mm}$ větší než naměřené a to max. o 1 % -

vztaženo na absolutní tlaky, respektive max. o 20% - vztaženo na přetlak. Tento rozdíl je možno vysvětlit tak, že reprezentuje tlakové ztráty, které právě v této oblasti vznikají třením a vířením vzduchu v mezeře a v "lopetkových kanálcích" a které výpočet neuvažuje. Je na místě také si všimnout rozdílu mezi křivkami B a C, tedy měřenými tlaky. V oblasti $y = 9 \div 12,5$ mm je tlak měřený na rovnoběžkových kružnicích menší. Je to pravděpodobně dáno poměrně velkými tlakovými rozdíly na rovnoběžkových kružnicích, jež právě v této oblasti jsou a malým počtem měřicích míst v této oblasti, kde je totiž nedostatek místa vzhledem k tomu, že zde je vyústění trysek. Tím může dojít při zakreslování polárního průběhu tlaku a při následujícím hledání jeho střední hodnoty planimetrováním k určitým rozdílům.

Ze srovnání vypočtených tlaků a změřených je vidět, že tlakový profil v mezeře je podobný. Má parabolický tvar, rozdíly nejsou velké a jsou při tom zdůvodnitelné. Z toho je možné usuzovat, že odvozená tlaková funkce pro isotermické proudění je použitelná a dosti věrně popisuje průběh tlaků v mezeře kuželového ložiska daných geometrických parametrů, kde expandující vzduch nese a zároveň pohání rotorek. Stejně srovnání tlaků v mezeře je možné provést též pro jiné tlaky před tryskami - viz hodnoty vypočtených tlaků v příloze č. 13 a změřené tlaky uvedené v příloze č. 23.

Pro výpočet nosnosti tohoto ložiska je v kapitole 5.6 komplexní řešení tlakového profilu - tedy zároveň pro oblast $0 \div 1$ a oblast $1 \div 2$, při čemž se předpokládala v místě 1 nespojitost tlaku v limitě vlivem náhlé změny průtokového množství vzduchu. Byla nalezena soustava rovnic z nichž na počítači MINSK 22 je numericky řešen tlak v celém rozsahu mezery. Vlastní odvození soustavy rovnic se ukázalo dosti obtížné a bude předmětem dalšího upřesňování v rámci státního výzkumného úkolu METVAR.

Výsledky kapitoly 5 dále ukazují, že zatěžování rotorku např. tahem vlákna při zakrucování je omezeno. Rozsah zatížení se mění s tlakem $p_{(0)}$ před tryskami. Je-li ložisko při konstantním tlaku $p_{(0)}$ zatěžováno, zdvih h se zmenšuje a tlak v mezeře

se zvětšuje. Tak např. při tlaku $0,3 \cdot 10^6 \text{ N m}^{-2}$ před tryskami lze ložisko zatěžovat až do minimální velikosti mezery $h = 0,4 \text{ mm}$ - viz list 29 v příloze č. 13.

V kapitole 8 jsou hledány optimální geometrické parametry u hydrostatického kuželového ložiska o stejné tloušťce mezery při čemž se vychází z proudění kapaliny v mezeře.

Z rovnováhy tlakových a třecích sil je odvozena tlaková funkce a dále vyjádřena nosnost ložiska. V grafickém zpracování se dbalo na to, aby funkce tlaku a nosnosti byla vynášena v závislosti na hledaných geometrických parametrech ložiska.

Metoda pro získání optimálních parametrů hydrostatického ložiska byla uplatněna i u ložiska aerostatického. Maximum tlaku pro danou tloušťku mezery a danou průtokovou hmotnost bylo nalezeno při umístění ústí trysek přibližně v $1/3$ poloměru ložiska, při čemž maximum se zvětšuje a posunuje k menšímu poloměru ložiska se zmenšováním výstupního otvoru ve statoru ložiska. Jelikož nosnost ložiska je dána vztahem

$$L = \int p \cdot dS$$

a plocha S s poloměrem r roste, bude mít zmenšování otvoru ve statoru velmi malý vliv na nosnost.

Rozhodující však u ložiska je nosnost a ta je největší jak ukazuje obr. 59, při umístění ústí trysek v polovině povrchu kužele statoru.

Pro získání velikosti vlivu v závislosti na průměru vstupního otvoru byl použit model patního ložiska s jediným vstupem vzduchu. Ukázalo se, že při zvětšování vstupního otvoru se nosnost ložiska zmenšuje. Zajímavý je poznatek, že při zvětšujícím se vstupním otvoru a zároveň při zvětšování průtokové hmotnosti vzduchu se nosnost prudčeji zmenšuje - viz obr. 63. Z tohoto poznatku vyplývá, že při větší průtokové hmotnosti bude výhodnější použít větší počet menších vstupních otvorů.

V kapitole 9.0 je řešen také vliv kinetické energie proudu vzduchu na nosnost. U ložiska hydrostatického se vliv kinetické energie podařilo vyjádřit rozdílem nosností počítaných jednou z tlaku statického a po druhé s vlivem dynamického tlaku. Tento vliv je znázorněn na obr. 47. Vliv kinetické energie proudu vzdu-

chu byl vyjádřen nad hranou otvoru trysky kde je nejmenší průtokový průřez a tedy největší rychlost. Velikost vlivu kinetické energie byla vyjádřena jako funkce poloměru otvoru trysky.

Pro aerostatické ložisko pokus analyticky najít vliv kinetické energie proudu nad okrajem otvoru trysky v závislosti na velikosti otvoru byl neúspěšný. Ze získaného výsledku se nepodařilo numerické řešení. Je to zaviněno tím, že člen pro dynamický tlak

$$\frac{M^2 \cdot R \cdot T}{8 \pi^2 \cdot r^2 \cdot h^2}$$

v rovnici (9.54) se zvětšuje více než první člen pod odmocninou a tak vychází pod odmocninou záporné číslo a celá rovnice nemá řešení. Nastane to tenkrát, když se poloměr r ve vztahu pro dynamický tlak přibližuje výstupnímu poloměru r_1 trysky a ten je volen moc malý.

Výstupní poloměr r_1 je možno zvětšit a tím pod odmocninou získat kladnou hodnotu. Zůstává však další potíž, a to když se poloměr r přibližuje vnějšímu poloměru r_a . Zde také člen pro dynamický tlak pod odmocninou roste rychleji než první člen a tím opět vychází pod odmocninou záporné číslo. To ukazuje, že postavené předpoklady pro řešení vlivu kinetické energie u aerostatického ložiska je nutno brát jiné než u hydrostatického ložiska. Pravděpodobně už rovnice (9.49) asi není možno zcela aplikovat na stlačitelné prostředí. Z toho důvodu nebyla ani numericky řešena rovnice (9.56), která je závislá na správnosti rovnice (9.54).

Z úvah o jiném postupu vyřešit tento problém se nabízí použití Bernoulliho rovnice pro stlačitelné prostředí, vyjadřující zákon energie při isentropickém spojitým proudění bez působení tíže / 8 /:

$$c \cdot dc + \frac{dp}{\rho} = 0$$

Při platnosti isentropického zákona: $\frac{p}{\rho^\kappa} = \text{konst}$, plyne po integraci rovnice (4.57)

$$1 + \frac{c^2}{2} = \text{konst}$$

kde i = entalpie plynu.

$$i = \frac{K}{K-1} \cdot \int \frac{P}{P} = \frac{K}{K-1} \cdot R \cdot T$$

Řešení vlivu kinetické energie proudu plynu na nosnost za těchto nových předpokladů bude provedeno při dalším výzkumu.

V kapitole 10.0 je vyšetřován rozhodující faktor aerostatických ložisek, kde expandující vzduch jen nese (maže) - velikost průtokové hmotnosti plynu. Byly nalezeny důležité výsledky. Závislost průtokové hmotnosti na tlacích vzduchu před trysekou, za trysekou a v závislosti na tloušťce mezery pro aerostatické kuželové ložisko je z odvozených výsledků graficky zpracována na obr. 70, 71 a 72. Pro stabilní provoz ložiska byla odvozena rovnice (10.19) pro průtokovou hmotnost a graficky vyjádřena na obr. 73. Pro podmínku, že $p_1 > p_{1k}$ a $p_1 = p_1^{(m)}$, tedy $p_1^{(m)} > p_{1k}$, platí na obr. 73 jen oblast silně zarámovaná. Ve skutečnosti M na p_0 , $p_1^{(m)}$ a na h v tomto grafu platí též pro podmínku $p_1^{(m)} < p_{1k}$, kdy $p_1 = p_{1k}$, avšak platnost je jen v oblasti nad přímkou spojující místa p_{1k} .

Tak např. při tlaku $p_{(0)} = 0,345 \text{ N mm}^{-2}$ je průtoková hmotnost $0,417 \cdot 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$ a při velikosti mezery $h = 0,05 \text{ mm}$ činí tlak v mezeře za výstupním otvorem trysky $p_1^{(m)} = 0,144 \text{ N mm}^{-2}$ (na obr. 73 značeno čárkovaně - bod B), zatímco tlak ve výstupním otvoru trysky p_{1k} je roven $0,182 \text{ N mm}^{-2}$, což jest $0,528 \cdot p_{(0)}$ na obr. 73 bod A, kde čára tlaku $p_{(0)} = 0,345$ přechází do elipsy. Z uvedeného příkladu je dále vidět, že pro zvolený tlak $p_{(0)}$ je možno zatěžovat ložisko, přičemž se zmenšuje mezera h až na max. $0,04 \text{ mm}$. Tryskou i mezerou proudí stále stejná průtoková hmotnost M. Jakmile se zatížení dále zvětší, zmenší se mezera h např. na $0,03 \text{ mm}$ (bod C) a průtoková hmotnost se zmenší na cca $0,36 \cdot 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$. Tím se přešlo do oblasti, kde platí, že $p_1^{(m)} > p_{1k}$. Tlak $p_1^{(m)}$ se zvýšil na cca $0,235 \text{ N mm}^{-2}$ a je roven tlaku ve výstupním otvoru trysky.

Graf na obr. 73 vyjadřuje tedy i závislosti (10.18), to jest $p_1^{(m)} = f(p_0)$.

Z uvedeného příkladu vyplývá, že při provozu ložiska za podmínky $p_1^{(m)} < p_{1k}$ nutně dochází za výstupním otvorem trysky k dodatečné rušivé expanzi z tlaku p_{1k} na $p_1^{(m)}$. Tato expanze bývá při velkém rozdílu tlaků p_{1k} a p_1 tak prudká, že je ji

možno přirovnat k rázové vlně. Dokonce při některých měřeních tlakového profilu v mezeře patního ložiska bylo cizími výzkumníky zjištěno, že když $p_1^{(m)}$ je hodně menší než p_{1k} , což se stává při vysokém $p_{(0)}$ a velké mezeře h , tlak vzduchu spíše než aby klesal se vzdáleností od výstupního otvoru trysky, klesá rychle těsně za výstupním otvorem trysky, pak zase stoupá až do okamžiku rázové vlny, kdy prudce klesne a pak pozvolna už klesá až na tlak barometrický. Za takových podmínek může být provoz ložiska neklidný a nosnost se snižuje.

Japonský autor Harvo Mori se ve své práci / 21 / zabývá těmito problémy a vidí příčinu v tom, že následkem kritického proudění ve výstupním otvoru trysky dojde v mezeře v důsledku zvětšující se plochy průřezu k nadkritickému proudění v mezeře - tedy analogie z nadkritického proudění v rozbíhající se nátrubku Lavalovy trysky.

Na závěr kapitoly "zhodnocení výsledků" je třeba uvést zásadní poznatky z řešení obou druhů aerostatického ložiska kuželového tvaru a to:

- Tvar tlakového profilu ložiska, kde expandující vzduch nese a zároveň pohání, je velmi rozdílný od tlakového profilu ložiska kde expandující vzduch jen nese.
- Z výpočtů a měření vyplývá, že u ložiska, kde vzduch nese a zároveň pohání se uplatňuje jen režim proudění, kdy $\beta \ll \beta_{kr}$. U ložiska, kde vzduch jen nese se uplatňuje režim jak $\beta < \beta_{kr}$, tak hlavně $\beta > \beta_{kr}$.

13.0 S o u h r n

V předložené práci je řešena problematika aerostatického ložiska kuželového tvaru, kde za prvé expandující vzduch z trysek vytváří nosný vzduchový polštář a zároveň tento vzduch pohání rotorek a za druhé, kde expandující vzduch z trysek slouží jen k vytvoření nosného vzduchového polštáře a pohon rotorku je zajišťován jinak.

Byla vyvinuta a v poloprovozních zkouškách úspěšně ověřena nová metoda zakrucování polyamidových multifilových vláken při tvarování nepravým zákrutem. Na vyvinuté zařízení pro zakrucování byl udělen československý patent č. 88577 pod názvem pneumatické kadeření polyamidových vláken.

Podstatou zařízení pro udělování zákrutů na vláknech je aerostatické ložisko kuželového tvaru, kde proudící vzduch v mezeře ložiska nese a zároveň pohání zakrucovací element - rotorek.

V celostátní soutěži uspořádané na podnět československého úřadu pro patenty a vynálezy, československé vědecko-technické společnosti a ministerstva spotřebního průmyslu se vyvinutý princip tvarování umístil na druhém místě co do produkce a na prvním místě co do kvality ztvarovaného vlákna. V jednotlivých kapitolách je učiněn pokus experimentální a nebo analytickou cestou najít zobecnění některých navržených geometrických parametrů zařízení a toutéž cestou jsou hledána optima geometrických a výkonových parametrů zařízení - především obou typů aerostatických ložisek kuželového tvaru.

V třetí kapitole jsou uvedeny výsledky experimentálního výzkumu zařízení na zakrucování vláken. Byly nalezeny vhodné geometrické parametry vzduchového ložiska, kde expandující vzduch nese a zároveň pohání. Byl navržen a vyzkoušen jednoduchý způsob udržování otáček zakrucovacího elementu v dané toleranci, spočívající na principu stroboskopického sledování obrazu rotujícího elementu. Dále jsou stručně uvedeny výsledky polo-

provozních zkoušek na prototypu stroje pro 50 zkrucovacích vřeten. Zkoušky po stránce textilní vypracoval Výzkumný ústav pleťářský v Brně. Na závěr kapitoly 3 jsou zkoumány možnosti zmenšení spotřeby vzduchu, jež je základním ekonomickým kritériem použitelnosti aerostatických ložisek. Navrženo je několik způsobů snížení spotřeby hnacího a nosného vzduchu.

V dalších kapitolách jsou analytickou cestou hledány optimální konstrukční parametry ložiska s ohledem na širší použití tohoto progresivního strojního prvku při použití především v textilním strojírenství. Při určování těchto parametrů je třeba vycházet z proudění vzduchu v mezeře ložiska a proto v kapitole 4.0 jsou vypsány některé současné metody řešení proudění v mezeře ložiska a zdůvodněno, proč jsou ve vlastním řešení použity Eulerovy pohybové rovnice proudění.

V kapitole 5.0 je popsáno proudění v mezikruhovém mezeře ložiska - v mezeře o nespojitostech tloušťce. Po odvození pohybových Eulerových rovnic v aplikaci na mezikruhovou mezeru kuželového tvaru, je řešeno proudění adiabatické vratné a také isothermické. Je nalezena tlaková funkce v implicitním tvaru pro oblast proudění $1 \div 2$ a pro isothermické proudění je řešena na počítači MINSK vhodným programem. Dostí podstatný vliv na nosnost má oblast $0 \div 1$, kde se vlivem velké rychlosti proudění vzduchu z trysek projevuje injektorový účinek. Proto v kapitole 5.6 je provedeno komplexní řešení tlakového profilu pro obě oblasti při zahrnutí vlivu nespojitosti průtokové hmoty vzduchu a tím i v limitě nespojitosti tlaku při přechodu místa 1. Po získání tlakového profilu po celé délce povrchu kužele (oblast $0 \div 1 \div 2$) jež má zcela jiný tvar než normální aerostatické ložisko, je v kapitole 6.0 opět řešena nosnost ložiska a to v závislosti na průtokové hmotnosti a na zdvihu rotorku. Z tohoto výsledku je možné při známé tíži rotorku, pro určitý zdvih jež je funkcí počtu otáček určit vnější sílu na rotorek na příklad tah vlákna při zkrucování apod.

V kapitole 8.0 jsou pro hydrostatické kuželové ložisko odvozeny funkce tlaku a nosnosti a rozбором jejich extrémů jsou hledány optimální geometrické parametry ložiska. Stejný rozbor

Je proveden i z nalezených závislostí od vlivů kinetické energie proudu a velikosti výstupního otvoru trysek. Postup analytického řešení je proveden velmi podrobně proto, aby bylo možno během celého výpočtu dobře vidět do vzájemných vazeb proudění na geometrické parametry. Z numerického řešení potom vyplývají konkrétní konstrukční podklady pro ložisko.

V kapitole 9.0 je metodou detailně propracovanou na hydrostatickém ložisku řešeno analogicky ložisko aerostatické kuželového tvaru. Jsou opět nalezeny hodnoty pro optimální geometrické parametry ložiska, současně s tvarem tlakového profilu a hodnotami nosnosti ložiska průměru 25 mm v závislosti na průtokové hmotnosti vzduchu. Numerické vyhodnocení bylo řešeno na číslicovém počítači MINSK 22.

V kapitole 10.0 jsou podrobně řešeny otázky základního ekonomického kritéria aerostatických ložisek - průtokové hmotnosti, přičemž je řešení rozděleno podle teorie proudění v tryskách na proudění kdy poměr výstupního tlaku z trysky ku vstupnímu je větší než hodnota 0,528 (při proudění vzduchu) a na proudění, kdy poměr

$$\frac{p_1}{p_{(0)}} \leq 0,528.$$

Řešení je provedeno komplexně, to jest jako soustava tryska - mezera. Pro oba režimy jsou odvozeny závislosti průtokové hmotnosti vzduchu na tlacích před a za tryskou a na tloušťce ložiskové mezery a závislosti jsou přehledně graficky zpracovány s vyznačenými oblastmi platnosti.

Aby bylo možné provést ověření správnosti výsledků získaných početní cestou, bylo provedeno měření na experimentálním a poloprovozním zařízení v laboratořích.

Princip experimentálních zařízení, a výsledky měření jsou obsahem kapitoly 11.0.

Jsou zde výsledky měření tlakového profilu za rotace a to tlakový profil na povrchu kužele statorku a též tlakový profil v polárních souřadnicích. Pro určení skutečné rychlosti proudění z trysek a tím přesnější určení průtokové hmotnosti vzduchu při provozu ložiska, bylo provedeno měření pro zjištění rych-

lostního součinitele Lavalovy trysky kritického průměru 0,71 mm. Za rotace bylo provedeno měření zdvihu rotorku pneumatickým mikrometrem v závislosti na otáčkách, respektive na tlaku vzduchu před tryskami. Jsou též uvedeny výsledky experimentálního hledání optimálního tvaru rotorku - viz příloha 6.

V kapitole 12.0 je provedeno srovnání vypočtených a naměřených výsledků a v některých případech proveden pokus o rozbor nových poznatků. Pro všechny v práci zkoumané parametry je základem tlakový profil a ten lze dobře naměřit. Při srovnání vypočteného a změřeného tlakového profilu se ukázaly určité přijatelné rozdíly, jež reprezentují předpokládané ztráty tření a víření, které při výpočtu proudění pro zjednodušení nebyly uvažovány. Takto je potvrzena vhodnost použití Eulerových pohybových rovnic při vyšetřování proudění a přijatelnost položených zjednodušujících předpokladů.

V samostatném svazku svázané přílohy mají za úkol poskytnout možnost některé výsledky ve výpočtové části uvedené ve stručnosti zkoumat podrobněji, některé části práce doplňují a nebo uvádějí alternativní řešení a konečně uvádějí výsledky měření a zkoušek.



14.0 Použitá literatura

- / 1 / Šejnberg: Gazovaja smaska podšipnikov skolženija (Teorija i rasčet)
- / 2 / Časopis: Československý textil 1968, č.4
- / 3 / Rippel: Studie řešení stability aerostatického ložiska kuželového tvaru, sloužícího pro uložení vřeten na zakrucování polyamidových vláken
- / 4 / Svedberg - Petersen: Die Ultrazentrifuge
- / 5 / Beams : High Rotational Speeds (Journal of Applied Physics - December 1937)
- / 6 / Epifanova: Nízkokomperturnyje radialnye turbotandery
- / 7 / Mayer: Tepelné turbíny, turbokompresory a jejich regulace - skripta VŠST Liberec
- / 8 / Matějka: Turbínka na mimořádně vysoké otáčky - výzkumná zpráva KTT VŠST; Z-TU-25/65
- / 9 / Výzkumná zpráva: Hodnocení kvality PA hedvábí tvarovaných nepravým zákrutem na vysoce produktivních tvarovacích zařízeních nových principů (Výzkumný ústav pletářský, Brno)
- / 10 / Piller - Trávníček: Syntetická vlákna I, II.
- / 11 / Kármán: Hlavní poznatky při laminárním a turbulentním proudění ZFAMUM 1921/4
- / 12 / Schulz-Grumow: Třecí odpor kotoučů rotujících ve skříní ZFAMUM 1935/4
- / 13 / Nevole - Kousel: Řešení axiálního turbinového stupně
- / 14 / Dejč: Technická dynamika plynů
- / 15 / Vinš: Kluzná ložiska

- / 16 / Drescher: Gasgeschmierte Lager
Schmiertechnik 1961 - Heft 5
- / 17 / Maštovský: Hydromechanika - SNTL 1956
- / 18 / Gottwald - Viweg: Berechnungen und Modeliver - suche
an Wasser und Luftlagern:
Zeitschrift für angewandte Physik 1950
(437 - 443)
- /19 / Kmoníček: Měření ve strojnictví
- / 20 / Brůha: Úvod do nauky o proudění tepla
- / 21 / Harvo Mori: A Theoretical Investigation of Pressure
Dupression in Externally Pressurized
Gas - Lubricated Circular Thrust Bearings.
Uveřejněno v: Transactions of the ASME,
June 1961
- / 22 / Trnka - Vinš: Směrnice pro výpočet a konstrukci radiálních
aerostatických ložisek
(Výzkumná zpráva č. SVÜSS - 63 - 224 - 0803)
- / 23 / Trnka - Vinš: Kluzná ložiska mazaná plyny
(zpráva SVÜSS - 65 - 04024)
- /24 / Licht: Rozšíření analogie vodícího listu na
aerostatická ložiska
(Transactions of the ASME
Journal of Basic Engineering sv. 83, 1961)
- / 25 / Loch: Aerostatická ložiska
(Konstruktion březen a duben 1967)
- / 26 / Ausmen - Downey: Aerodynamická teorie ložisek mazaných
plynem
(Transactions of the ASME - sv. 79, 1957)
- / 27 / Beams-Pickels: Vytváření vysokých rotačních rychlostí
(Universita Virginie 1935)
- / 28 / Modrlák: Pneumatické kmitání v aerostatickém
ložisku
(Diplomová práce V 67/67^s)

/ 29 / Kočin, Kibel, Rose: Teoretická mechanika I
(str. 53)

/ 30 / Duda: Návrh na řešení stability aero-
statického ložiska kuželového
gyroskopu
VAAZ Brno

SEZNAM PŘÍLOH.

	List
1) Literatura z oboru plynových ložisek	1 ÷ 6
2) Pokusné zařízení pro tvarování vláken	7
3) Prototyp stroje pro tvarování vláken	8 ÷ 9
4) Tvarované silonové vlákno	10
5) Pletenina z tvarovaného vlákna	11 ÷ 12
6) Vývoj rotorku	13
7) Zakrucovací zařízení se zmenšenými ventilač. ztrátami	14
8) Zakřivení lopatek pro různý počet otáček	15
9) Obraz proudění vytvořený po laddenním provozu	16
10) Odvození tlakové funkce pomocí Lagrangeových rovníc	17 ÷ 22
11) Měření dynamického tlaku pro výpočet přísáva- ného vzduchu M	23
12) Tabelární zpracování výsledků řešení tlakové funkce (funkce v implicitním tvaru)	24 ÷ 28
13) Tabelární a grafické zpracování výsledků řeše- né tlakové funkce (funkce v explicitním tvaru)	29 ÷ 45
14) Celková nosnost aerostatického ložiska, kde vzduch nese a pohání (komplex. řešení tlak. funkce)	46 ÷ 53
15) Tabelární zpracování numerických výpočtů tla- ku. $p = f(r_e)$	54
16) Závislost tlaku v mezeře $p = f(r; r_e)$ při $r_a = 12,5$ mm.	55 ÷ 68
17) Závislost tlaku v mezeře $p = f(r; r_e)$ při $r_a = 25$ mm	69 ÷ 80
18) Matematické řešení nosnosti aerostat. ložiska	81 ÷ 85
19) Tabelární zpracování nosnosti v závislosti na poloměru trysky	86
20) Výsledky nosnosti vypočítané na počítači MINSK 22	87 ÷ 89
21) Tabelární zpracování nosnosti z počítače MINSK 22	90 ÷ 95
22) Pokusná zařízení	96 ÷ 98
23) Výsledky měření tlaku v mezeře $p = f(p_{(0)})$	99 ÷ 105
24) Výkresy zakrucovacího zařízení optimálních rozměrů	106 ÷ 107