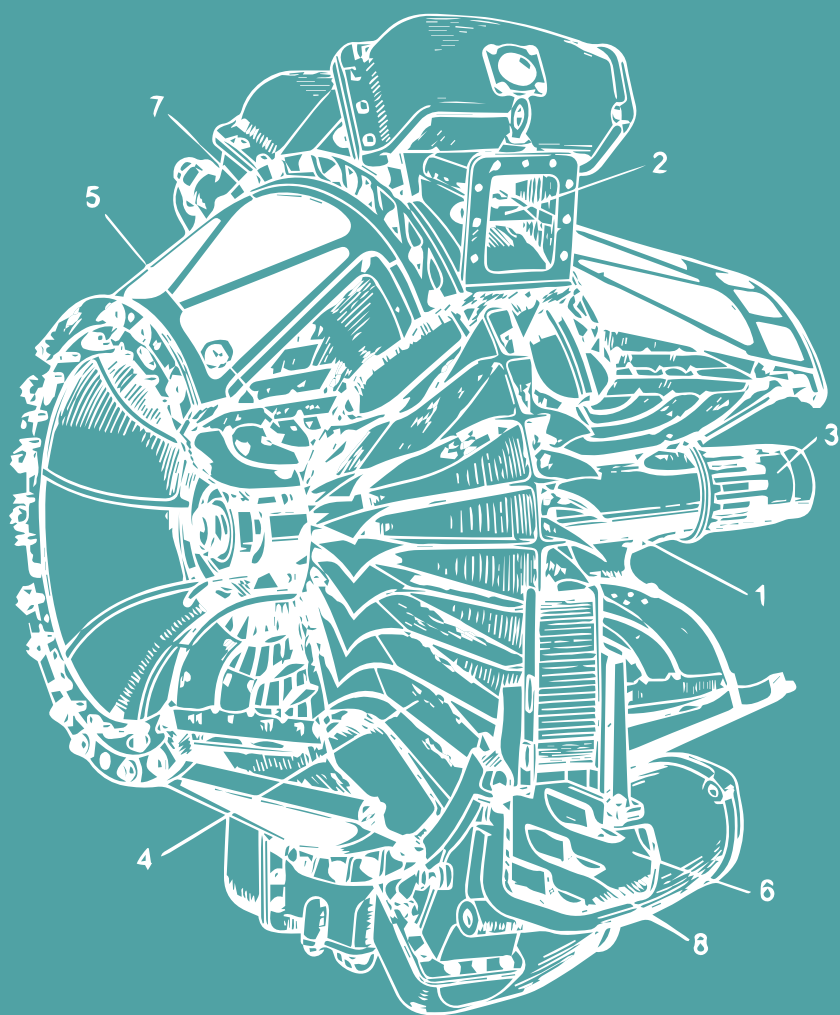
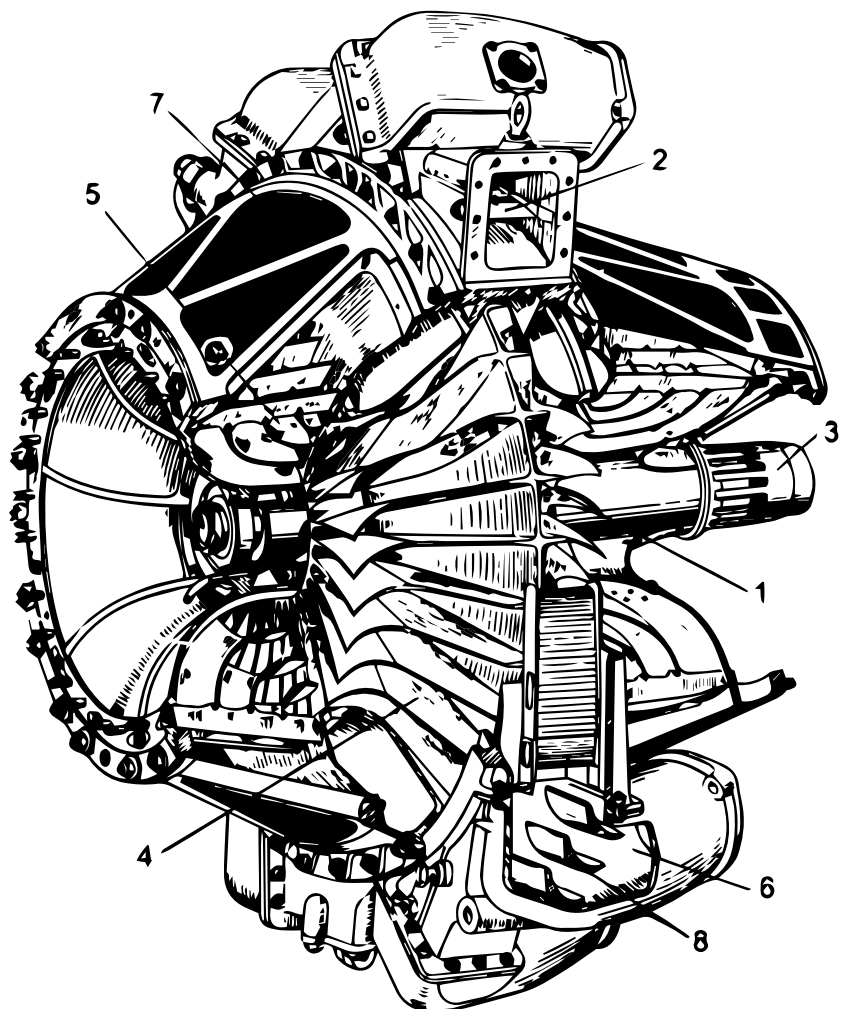


RADIÁLNÍ KOMPRESORY

Marián HOCKO & Marek KLIMKO



RADIÁLNÍ KOMPRESORY



RADIÁLNÍ KOMPRESORY

Marián HOCKO & Marek KLIMKO

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ
PLZEŇ 2023**



**FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

RADIÁLNÍ KOMPRESORY

Ing. Marián Hocko, PhD.

Ing. Marek Klimko, Ph.D.

Recenzenti:

prof. Ing. Jozef Považan, CSc.

doc. Ing. Zdeněk Železný, CSc.

Jazyková korektura:

PhDr. Dagmar Hocková

Grafické zpracování obálky:

Jakub Pokorný

Typografická úprava:

Jakub Pokorný

Vydala:

Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 2732/8, 301 00 Plzeň

První vydání, 107 stran

Pořadové číslo: 2389, ediční číslo: 55-072-23

Plzeň 2023

ISBN 978-80-261-1066-8

ISBN 978-80-261-1065-1 (brožovaná vazba)

DOI <https://doi.org/10.24132/ZCU.2023.10668>

© Západočeská univerzita v Plzni, 2023

Předmluva

Cílem této publikace je poskytnout čtenáři komplexní přehled v oblasti teorie a konstrukce radiálních kompresorů (RK) současných leteckých turbokompresorových motorů (LTKM) používaných ve vojenském i civilním letectví.

Doposud byla problematika RK zpracována pouze jako součást učebnic, resp. vysokoškolských skript, které se zabývají problematikou teorie leteckých motorů

(J. Růžek, Teorie leteckých motorů, část I.: Kompresory, plynové turbíny a spalovací komory, VA AZ Brno 1979; A. Ott, Základy teorie a konstrukce leteckých lopatkových motorů, část I., VVLŠ SNP Košice 1975; J. Kříž, Letadlové motory I., VŠD Žilina) nebo konstrukce leteckých motorů (Z. Linhart, J. Kamenický, Konstrukce leteckých motorů I., VA AZ Brno 1978). V publikaci je poprvé uceleným způsobem řešena problematika analýzy vzniku nestabilní práce RK a prostředků, které umožňují rozšíření oblasti stabilní činnosti současných RK LTKM.

Publikace je rozdělena do 10 kapitol, ve kterých se postupně řeší základní požadavky na RK, rozdělení RK, základní parametry RK, teorie a charakteristiky RK, nestabilní práce RK a možnosti jejího předcházení. V přílohách je uvedený přehled parametrů konkrétních typů RK použitých v sériově vyráběných LTKM. Poslední kapitola je věnována konstrukci RK. Na příkladu konkrétních typů RK motorů M-701 (L-29 Delfín), VK-1 (MiG-15) a M-601 E (L-410UVP) jsou popsány zvláštnosti konkrétní konstrukce RK s jednostranným oběžným kolem, RK s oboustranným oběžným kolem a kombinovaného axiálně-radiálního kompresoru LTKM.

V publikaci jsou použity převážně zahraniční literární zdroje (americké, anglické nebo ruské) a také informace z technických předpisů konkrétních typů LTKM používaných jak ve vojenských, tak civilních letadlech (MiG-15, L-29, L-410 a dalších), které měli autoři k dispozici v průběhu vědecko-pedagogické činnosti na vojenských i civilních leteckých školách. Použité grafické výstupy jsou výsledkem práce autorů. Fotografie jsou čerpané z bohatého archivu autorů, který byl vytvořen jejich působením ve vojenském i civilním letectví. U neupravených a převzatých materiálů je vždy uveden použitý zdroj.

Odborná publikace slouží jako studijní materiál pro studenty absolvující předmět „Plynové turbíny a turbokompresory“ v rámci studijního oboru „Stavba energetických strojů a zařízení“ na Katedře energetických strojů a zařízení Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. Publikace může být také využita jako doplňková studijní literatura pro pracovníky v průmyslu a letecké odborníky pracující v oblasti projektování, výroby a provozu civilní, resp. vojenské letecké techniky.

Autoři

Obsah

Úvod	1
1 Rozdělení RK LTKM	5
1.1 Rozdělení RK podle počtu stupňů	5
1.2 Rozdělení RK podle směru vstupu vzduchu	8
1.3 Rozdělení RK podle konstrukce oběžného kola	10
1.4 Rozdělení RK podle konstrukce difuzoru	12
1.5 Rozdělení RK podle konstrukce výstupní soustavy	13
2 Základní parametry kompresorů	15
2.1 Celkový stupeň stlačení kompresoru	15
2.2 Celková účinnost kompresoru	15
2.3 Hmotnostní průtok vzduchu v kompresoru LTKM	17
2.4 Příkon kompresoru LTKM	17
2.5 Otáčky kompresoru LTKM	18
2.6 Stupeň reakce RK LTKM	19
3 Vstupní soustava RK LTKM	20
3.1 Vstup vzduchu do oběžného kola RK	20
3.1.1 Vstupní soustava RK bez rozvíření	20
3.1.2 Vstupní soustava RK s rozvířením	22
3.2 Parametry vzduchu na vstupu do oběžného kola RK	23
4 Oběžné kolo RK LTKM	26
4.1 Analýza proudění v rotoru RK LTKM	26
4.1.1 Rychlostní poměry na vstupu do oběžného kola RK	27
4.1.2 Proudění vzduchu v oběžném kole RK – „slip factor“	29
4.1.3 Stupeň reakce RK	33
4.1.4 Stlačení v rotoru oběžného kola RK	34
4.2 Ztráty v oběžném kole RK LTKM	35
4.2.1 Ztráty při průtoku vzduchu záběrníkem oběžného kola	37
4.2.2 Ztráty při průtoku vzduchu oběžným kolem	37
4.2.3 Ztráty v koncové části oběžného kola	38
4.2.4 Celkové ztráty v oběžném kole RK	39
4.2.5 Statický tlak na výstupu z oběžného kola RK	39
4.2.6 Hustota vzduchu na výstupu z oběžného kola RK	39
4.2.7 Stanovení výstupní šířky oběžného kola RK	40
5 Bezlopatkový difuzor RK LTKM	41
5.1 Určení parametrů proudu vzduchu na výstupu z BLD	51
6 Lopatkový difuzor RK LTKM	53
6.1 Určení parametrů proudu vzduchu na výstupu z LD	56
7 Výstupní soustava RK LTKM	61
7.1 Spirální výstupní soustava RK LTKM	61
7.2 Kolenová výstupní soustava RK LTKM	63
7.3 Prstencová výstupní soustava RK LTKM	64
7.4 Určení parametrů vzduchu za výstupní soustavou RK LTKM	64

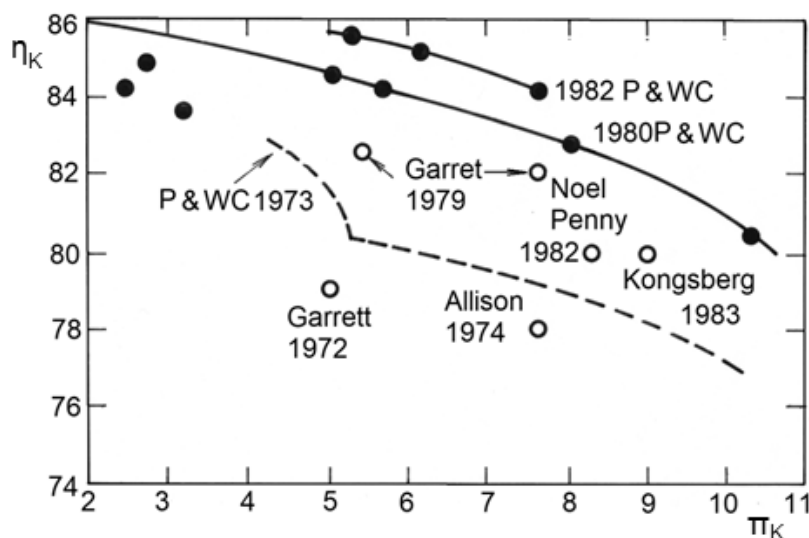
8	Charakteristiky RK LTKM	66
8.1	Závislost celkového stupně stlačení a celkové kompresní účinnosti RK na změně hmotnostního průtoku vzduchu	66
8.2	Závislost celkového stupně stlačení a celkové kompresní účinnosti RK na změně otáček	69
8.3	Vliv atmosférických podmínek a režimu letu na práci RK	71
8.4	Teorie podobnosti aplikovaná v kompresorech LTKM	71
8.5	Bezrozměrné parametry	72
8.6	Redukované parametry	73
9	Nestabilní práce RK LTKM	75
9.1	Úvod	75
9.2	Mechanismus vzniku pumpáže	78
9.3	Možnosti ochrany RK LTKM před nestabilní prací	79
9.3.1	Úprava lopatek oběžného kola RK	79
9.3.2	Použití vstupních nastavitelných lopatek RK LTKM	80
9.3.3	Použití nastavitelných lopatek difuzoru RK LTKM	80
9.3.4	Použití bezlopatkového difuzoru RK LTKM	82
9.3.5	Použití přívodu externího vzduchu do BLD	82
9.3.6	Použití obtokového kanálu na vstupu do oběžného kola RK	82
9.3.7	Použití přetlakové komůrky ve skříni RK	86
10	Konstrukce RK LTKM	87
10.1	Úvod	87
10.2	Konstrukce RK jednoproudového LTKM M-701	87
10.3	Konstrukce RK kombinovaného kompresoru motoru M-601	88
10.4	RK s oboustranným oběžným kolem jednoproudového LTKM VK-1	92
10.5	Namáhání RK LTKM	94
10.6	Materiály používané v konstrukci RK LTKM	95
	Závěr	97
	Použitá literatura	98
	Příloha č. 1. Přehled parametrů radiálních kompresorů LTKM	99
	Příloha č. 2. Test k procvičení	100
	Seznam obrázků a tabulek	102
	Seznam vybraných symbolů	105
	Seznam vybraných indexů	106
	Seznam vybraných zkratk	107

Úvod

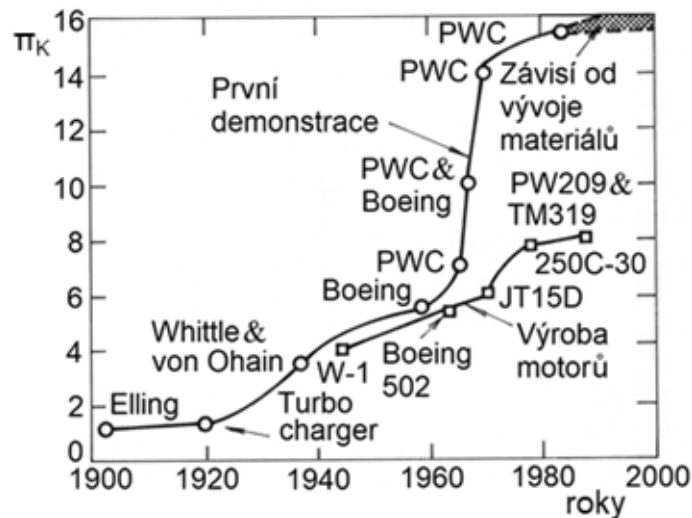
Princip činnosti radiálního (odstředivého) kompresoru je známý již od středověku. Přesto k jeho využití v průmyslu došlo až na začátku 20. století. První čtyřstupňový RK na vzduch, který dodával $0,89 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ se stupněm stlačení $\pi_k = 8$, při otáčkách $n = 5\,000 \text{ min}^{-1}$ byl konstruován podle návrhu francouzského profesora *Rateaua* v roce 1906. Vzhledem na nedokonalost tehdejších axiálních kompresorů se od 20. let do 40. let 20. století staly RK nejčastěji používaným typem kompresoru pro stlačování vzduchu, par a plynů. V 50. a 60. letech měl rozvoj axiálních kompresorů za následek snížení zájmu o RK. I přesto se RK používají i v současnosti, a to hlavně v případě požadavku nižšího hmotnostního průtoku plynu při vyšším stlačení. [1]

Kompresory u LTKM obecně slouží ke spolehlivému a nepřetržitému nasávání, stlačování a dodávání stlačeného vzduchu do spalovací komory při všech provozních režimech motoru. V kompresoru dochází k transformaci mechanické energie, která je přivedena hřídelí, na tlakovou a tepelnou energii. Ke zvyšování tlaku vzduchu dochází silovým působením lopatek radiálního rotoru kompresoru na částice vzduchu. V rotorové části kompresoru se v důsledku přivedené mechanické energie zvyšuje tlak, absolutní rychlost a teplota vzduchu. V statorové části kompresoru dochází k přeměně kinetické energie na tlakovou a tepelnou energii.

U některých LTKM se může na jednom stupni RK dosahovat stupeň stlačení $\pi_k = 8$ a více. Oběžná kola současných RK se vyrábí z jednoho polotovaru titanové slitiny. Základní výzkum RK použitých v LTKM je zaměřen na zvyšování jejich parametrů. Na Obr. 0-1 je znázorněn vývoj parametrů RK různých firem (Pratt & Whitney Canada, Garrett, Noel Penny, Allison, Kongsberg) a na Obr. 0-2 lze vidět historický vývoj navyšování stupně stlačení RK v průběhu let.



Obr. 0-1 Závislost účinnosti RK η_k na stupni stlačení π_k [2]



Obr. 0-2 Zvyšování stupně stlačení RK v průběhu let jejich vývoje [2]

Požadavky na RK LTKM

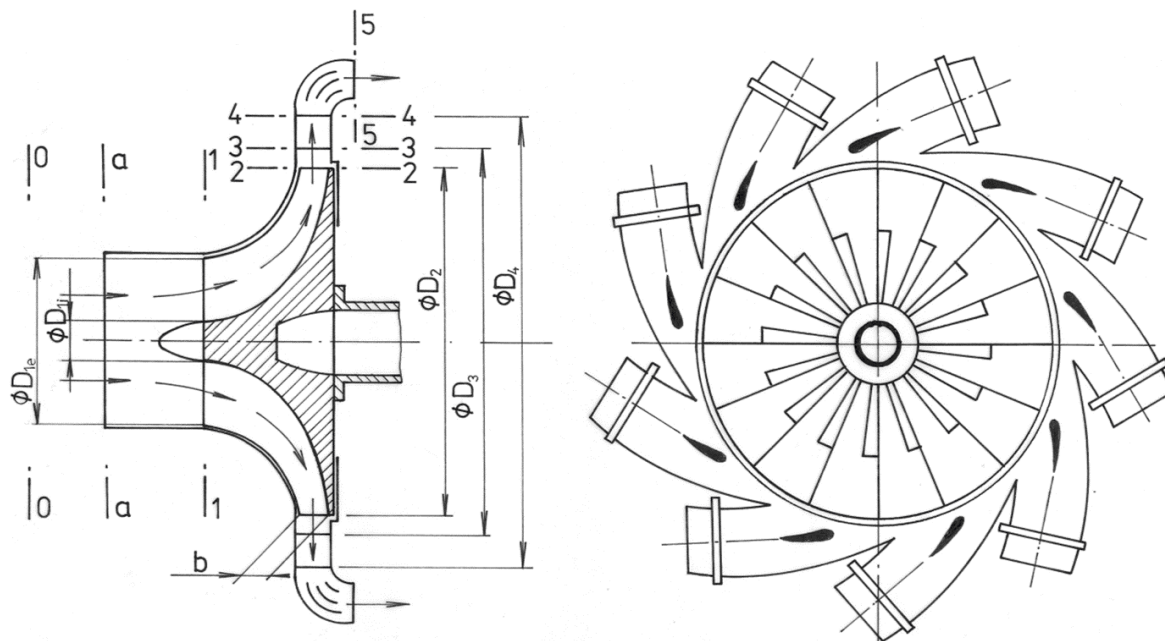
- plynulá a nepřetržitá dodávka stlačeného vzduchu do spalovací komory,
- dosažení požadovaného celkového stupně stlačení π_{Kc} ,
- stabilní práce při všech provozních režimech motoru,
- vysoká celková účinnost stlačování vzduchu η_{Kc} ,
- minimální rozměry,
- minimální hmotnost,
- minimální citlivost na změnu provozního režimu,
- konstrukční jednoduchost,
- vysoká spolehlivost během provozu,
- nízká cena,
- jednoduchost obsluhy.

Jednotlivé požadavky kladené na kompresory jsou často protikladné. Proto je finální konstrukce kompresoru výsledkem kompromisu.

Princip činnosti RK LTKM

Stupeň RK se skládá ze vstupní soustavy (a-1), oběžného kola (1-2), bezlopatkového difuzoru (2-3), lopatkového difuzoru (3-4) a výstupní soustavy (4-5) (viz Obr. 0-3).

Vzduch je do RK přiváděn vstupní soustavou. Při činnosti RK LTKM na zemi za nulových podmínek rychlosti, se vzduch do RK dostává účinkem podtlaku, který vytváří pracující RK. Během letu se vzduch do RK dostává v důsledku působení přetlaku, který je závislý na rychlosti letu (Machově číslu letu). Vzduch, který vstupuje do oběžného kola RK, se účinkem přiváděného výkonu na oběžné kolo urychluje, přičemž dochází vlivem odstředivé síly ke zvyšování absolutní rychlosti, tlaku a teploty vzduchu. Urychlený proud vystupující z oběžného kola vstupuje do bezlopatkového difuzoru (BLD), ve kterém dochází k přeměně kinetické energie na energii tlakovou a tepelnou, v důsledku čeho se zvyšuje statický tlak a statická teplota vzduchu. Proces transformace kinetické energie vzduchu na tlakovou a tepelnou energii pokračuje s vyšší účinností v lopatkovém difuzoru (LD). Stlačený vzduch opouští RK přes výstupní soustavu, ve které se parametry vzduchu mění pouze minimálně.



Obr. 0-3 Principiální schéma RK

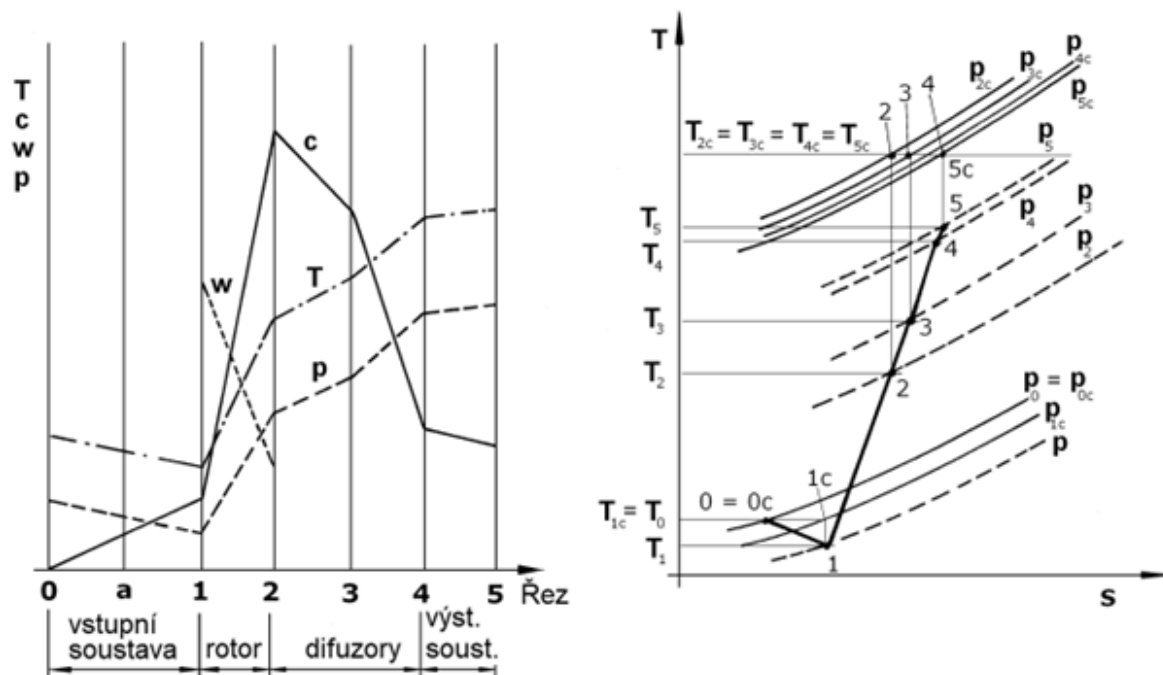
Změna základních parametrů proudu vzduchu na střední proudnici je znázorněna na Obr. 0-4. Úsek mezi řezy „a-a“ a „1-1“ znázorňuje vstupní soustavu RK. Řez „0-0“ je teoreticky nekonečně vzdálený před RK. Prakticky je tento řez v takové vzdálenosti, ve které se neprojeví vliv činnosti RK. U RK pracujícího např. na zkušebně se absolutní rychlost vzduchu zvětšuje z rychlosti $c_0 = 0 \text{ ms}^{-1}$ na hodnotu c_1 . Ve vstupní soustavě se nepřivádí žádná energie ($W_{e,01} = 0$) a nepřivádí, resp. neodvádí žádné teplo, což v souladu se zachováním energie znamená, že jsou celkové teploty v řezech „0-0“ a „1-1“ stejné ($T_{0c} = T_{1c}$).

Jelikož platí, že absolutní rychlost $c_1 > c_0$, dochází ve vstupní soustavě k poklesu statické teploty $T_1 < T_0$. Statický tlak se mění stejně jako statická teplota. V důsledku ztrát třením a vířením proudu vzduchu klesá ve vstupní soustavě celkový tlak.

V oběžném kole RK (mezi rovinami „1-1“ a „2-2“) se přivádí mechanická energie $W_{e,12}$, v důsledku čeho dochází ke zvýšení celkové teploty T_{2c} , statické teploty T_2 , statického tlaku p_2 a absolutní rychlosti vzduchu c_2 .

Vzduch, který vystupuje z oběžného kola RK, vstupuje do BLD („2-2“ až „3-3“) a následně LD („3-3“ až „4-4“). BLD a LD zabezpečují přeměnu kinetické energie vzduchu na tlakovou a tepelnou energii. V difuzních kanálech BLD a LD klesá absolutní rychlost vzduchu, roste statický tlak i statická teplota. Jelikož se v difuzoru nepřivádí žádná energie ($W_{e,23} = W_{e,34} = 0$), při zanedbání přívodu a odvodu tepla mezi rovinami „2-2“ až „4-4“ je celková teplota vzduchu konstantní ($T_{2c} = T_{3c} = T_{4c}$). V důsledku třecích ztrát a ztrát vířením dochází v difuzorech k poklesu celkového tlaku vzduchu.

Výstupní soustava RK („4-4“ až „5-5“) zabezpečuje usměrnění vzduchu na výstupu z RK podle požadavků spalovací komory, která za kompresorem následuje. Ve výstupní soustavě se také nekoná práce ($W_{e,45} = 0$). Zanedbáním přívodu a odvodu tepla bude tedy platit rovnost celkových teplot ($T_{4c} = T_{5c}$). Ve výstupní soustavě RK se obvykle absolutní rychlost vzduchu snižuje ve velmi malé míře, a proto je i zvýšení statického tlaku a statické teploty ve výstupní soustavě méně výrazné. Vlivem tření a víření proudu vzduchu ve výstupní soustavě dochází k poklesu celkového tlaku.



Obr. 0-4 Průběh změn parametrů vzduchu při průtoku RK LTKM

Základní problémy RK LTKM

Základními problémy, se kterými se potýkají konstruktéři RK LTKM jsou:

- stabilita činnosti kompresorů při různých režimech letu a režimech činnosti motoru,
- náročné prostorové tvarování lopatek oběžného kola RK,
- výrobní náročnost,
- minimalizace velkých čelních rozměrů RK
- komplikovaná konstrukce vícestupňových koncepcí RK.