

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



# **HIDRAVLIKA**

## **Turbostroji**

*Študijsko gradivo*

**dr. Tom Bajcar**

Ljubljana, november 2009

# 1. RAZVRSTITEV TURBOSTROJEV IN OSNOVE MEHANIKE TEKOČIN

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

## RAZVRSTITEV TURBOSTROJEV IN OSNOVE MEHANIKE TEKOČIN

1

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

**UVOD IN RAZVRSTITEV TURBOSTROJEV:**

Prenos energije iz tekočine na rotor ali obratno

Gonilnik spreminja tekočini:

- ◆ statično entalpijo,
- ◆ kinetično energijo,
- ◆ statični tlak.

Področja uporabe:

- letalski motorji,
- hidravlične, plinske in parne turbine,
- procesna tehnika, transportni sistemi.

Odprti in zaprti turbostroji.  
Razdelitev turbostrojev temelji na: smeri poti delovne tekočine.

2

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

### RAZVRSTITEV TURBOSTROJEV IN PRIMERI UPORABLJENIH TEKOČIN

**KOMPRESORJI IN ČRPALKE**

ODPRTI      ZAPRTI

AKSIJALNI    RADIALNI    KOMBINIRANI

TOK

**TURBINE**

ODPRTE      ZAPRTE

AKSIJALNE    RADIALNE    KOMBINIRANE

TOK

**PLIN IN PARA**

- Zrak
- Argon
- Neon
- Helij
- Freon
- Para
- Ogjikovodiki - plini

**PRIMERI UPORABLJENIH TEKOČIN**

**KAPLJEVINA**

- Voda
- Kriogene kapljevine (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, itd.)
- Ogjikovodiki - goriva
- Dvofazne mešanice kapljevina/trdna snov
- Kalij
- Živo srebro

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

### APLIKACIJE: Letalska vozila

TURBO VENTILATORSKI MOTOR

PROPELERSKO-VENTILATORSKI MOTOR

4

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

### APLIKACIJE: Letalska vozila

TURBO PROPELERSKI MOTOR

TURBO VENTILATORSKI MOTOR

5

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

### APLIKACIJE: Črpalke

VISOKOTLAČNA ČRPALKA

NIZKOTLAČNA ČRPALKA

(SPACE SHUTTLE)

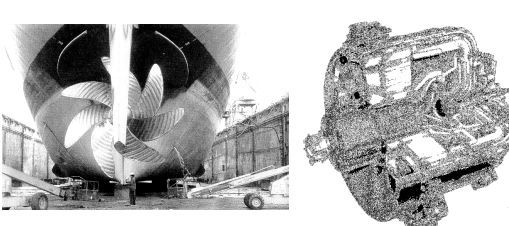
6

# 1. RAZVRSTITEV TURBOSTROJEV IN OSNOVE MEHANIKE TEKOČIN

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

**VOZILA: morska, kopenska**



LADJSKI VIJAK      AVTOMOBILSKA PLINSKA TURBINA

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

7

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

**ENERGETSKI STROJI: vodne turbine**



GONILNIK FRANCISOVE TURBINE

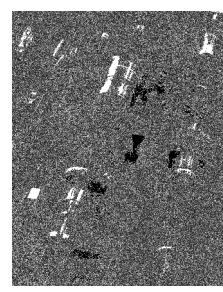
UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

8

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

**ENERGETSKI STROJI: plinske in parne turbine**




UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

9

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

**DRUGE APLIKACIJE**



UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

10

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

**OSNOVE DINAMIKE TEKOČIN V TURBOSTROJIH**

Tokovno polje v turbostroju je kompleksno.

**Tok je lahko:**

- ◆ stisljiv ali nestisljiv,
- ◆ podzvočni ali nadzvočni,
- ◆ stacionaren ali nestacionaren,
- ◆ enofazen ali dvofazen.

Tok je lahko v laminarnem, prehodnem ali turbulentnem področju.

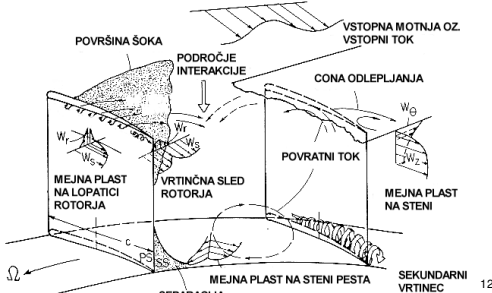
UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

11

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

**Narava toka v aksialnem kompresorju med gonilnimi lopatami**



POVRŠINA ŠOKA      VSTOPNA MOTNJA OZ. VSTOPNI TOK

PODROČJE INTERAKCIJE      CONA ODLEPLJANJA

MEJNA PLAST NA LOPATICI ROTORJA      VRTIČNA SLED ROTORJA      POVRATNI TOK

MEJNA PLAST NA STENI      SEKUNDARNI VRTINEC

SEPARACIJA

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEODEZIJU

12

# 1. RAZVRSTITEV TURBOSTROJEV IN OSNOVE MEHANIKE TEKOČIN

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

Način povezovanja znanj z različnih področij razvoja turbostrojev

13

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

ANALIZA TOKA TEKOČIN V TURBOSTROJIH

Trije osnovni pristopi:

- Integralske enačbe za kontrolni volumen
- Diferencialne enačbe
- Eksperiment ali podobnostna analiza

Osnovni zakoni mehanike veljajo za masni sistem s konstantno maso tekočine.

Zakoni o ohranitvi:

- mase
- gibalne ali vrtilne količine
- energije

14

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

INTEGRALSKI PRISTOP – PRINCIP KONTROLNEGA VOLUMNA

15

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

INTEGRALSKI PRISTOP – SPLOŠNA ENAČBA SPREMEMBE LASTNOSTI

Osnovo popisa dogajanja v postavljenem kontrolnem volumnu nam predstavlja splošna enačba spreminjanja lastnosti, zapisana v integralni obliki:

$$\frac{dN}{dt} = \int_A n \cdot \rho \cdot \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_V n \cdot \rho \cdot dV$$

I II III

I ... časovna sprememba lastnosti  $N$  v opazovanem kontrolnem volumnu,  
 II ... tok lastnosti  $N$  skozi površino opazovanega volumna,  
 III ... sprememba lastnosti  $N$  znotraj opazovanega kontrolnega volumna.

$N$  ... lastnost opazovanega fenomena,  
 $n$  ... lastnost  $N$  na enoto mase – specifična lastnost

16

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

INTEGRALSKI PRISTOP – KONTINUITETNA ENAČBA

$n = \frac{N}{M} = 1$  ;  $M$ ...masa kot lastnost snovi ( $N$ )

Zakon o ohranitvi mase:

$$0 = \int_A \rho \cdot \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot dV$$

17

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

INTEGRALSKI PRISTOP – GIBALNA ENAČBA

Gibalna enačba

$$n = \frac{\vec{v}}{v}$$

Normirana lastnost

$$\oint_A \vec{F} dA + \int_V \vec{B} \rho dV = \oint_A \vec{v} \cdot (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{v} \cdot (\rho dV)$$

$\vec{F}$  ...normalne in tangencialne površinske sile, normirane na enoto površine, ki delujejo na površino opazovanega kontrolnega volumna

$\vec{B}$  ...sila telesa (gravitacijska sila, sile elektro-magnetnega polja), normirana na enoto mase, ki deluje znotraj opazovanega kontrolnega volumna

18

# 1. RAZVRSTITEV TURBOSTROJEV IN OSNOVE MEHANIKE TEKOČIN

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**INTEGRALSKI PRISTOP – GIBALNA ENAČBA vrtilna količina**

$$\vec{n} = \vec{r} \times \vec{v}$$

$$\oint_A \vec{r} \times \vec{F} d\vec{A} + \int_V \vec{r} \times \vec{B} \cdot \rho dV = \oint_A (\vec{r} \times \vec{v}) \cdot (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_V (\vec{r} \times \vec{v}) \cdot \rho dV$$

$\vec{r}$  ...vektor oddaljenosti opazovane točke od izhodišča koordinatnega sistema opazovanega kontrolnega volumna

Pri obravnavanju rotirajočih tokov v turbostrojih se srečujemo s silami na rotirajočih lopatah. Zaradi tega nam gibalna enačba, izražena z vrtilno količino, zagotavlja lažji popis kot predhodno predstavljena gibalna enačba (z gibalno količino).

19

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**INTEGRALSKI PRISTOP – ENERGIJSKA ENAČBA**

Izhajamo iz prvega glavnega zakona termodinamike:

$$Q_{12} - W_{12} = E_2 - E_1$$

$n = e_o$   $e_o$  ... energija ( $e_o = e + e_s$ )

$$\frac{dq}{dt} - \frac{dW_A}{dt} - \int_V \vec{B} \vec{v} \cdot \rho dV = \oint_A e_o \cdot \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_V e_o \cdot \rho dV$$

$q$  ... toplota, prenešena v opazovani kontrolni volumen  
 $W_A$  ... opravljeno delo preko kontrolne površine

20

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**INTEGRALSKI PRISTOP – ENERGIJSKA ENAČBA**

Delo na enoto časa (moč sistema na okolico):  $\dot{W}_A = \dot{W}_t + \dot{W}_p + \dot{W}_{tr}$

Moč tlačnih sil:  $\dot{W}_p = \int_A p \vec{v} \cdot d\vec{A}$

$$\frac{dq}{dt} - \frac{dW_t}{dt} - \frac{dW_{tr}}{dt} - \int_V \vec{B} \vec{v} \cdot \rho dV = \oint_A \left( e_o + \frac{p}{\rho} \right) \cdot \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_V e_o \cdot \rho dV$$

Zastojna entalpija:

$$h_o = e + \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho}$$

21

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**INTEGRALSKI PRISTOP – ENERGIJSKA ENAČBA**

Končna oblika zakona o ohranitvi energije:

$$\frac{dq}{dt} - \frac{dW_t}{dt} - \frac{dW_{tr}}{dt} - \int_V \vec{B} \vec{v} \cdot \rho dV = \oint_A h_o \cdot \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_V e_o \cdot \rho dV$$

22

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

Delo prenešeno preko rotirajoče gredi izraženo z močjo:  $P_g = T_g \cdot \omega$

Opravljanje dela preko normalnih napetosti:  $h_o = e_o + \frac{p}{\rho}$

Delo prenešeno s tangencialnimi napetostmi je relativno majhno in ga izrazimo kot moč strižnih sil  $P_{st}$

Stacionarni obratovalni režim ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ):

**KONTINUITETNA ENAČBA**  $\oint_A \rho \cdot \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0$

**GIBALNA ENAČBA**  $\oint_A \vec{r} \times \vec{F} d\vec{A} + \int_V \vec{r} \times \vec{B} \cdot \rho dV = \oint_A (\vec{r} \times \vec{v}) \cdot (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A})$

**ENERGIJSKA ENAČBA**  $\dot{q} = P_g + P_{st} + \int_V \vec{B} \vec{v} \cdot \rho dV + \oint_A h_o \cdot \rho \vec{v} \cdot d\vec{A}$

23

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

Skupni moment, povezan z normalnimi in tangencialnimi silami, ki delujejo na kontrolno površino, je majhen. Zaradi tega lahko člen zamenjamo s  $T_g$ , ki predstavlja vrtilni moment gredi.

$$\oint_A \vec{r} \times \vec{F} d\vec{A} + \int_V \vec{r} \times \vec{B} \cdot \rho dV = \oint_A (\vec{r} \times \vec{v}) \cdot (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A})$$

24

# 1. RAZVRSTITEV TURBOSTROJEV IN OSNOVE MEHANIKE TEKOČIN

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

**ENODIMENZIJSKI PRISTOP K ANALIZI**

Pristop temelji na povezovanju zmogljivosti stroja s povprečnimi lastnostmi tekočine na vstopu in izstopu stroja ter z geometrijskimi značilnostmi stroja.

Predpostavke:

- Uporabljen je princip kontrolnega volumna za povezovanje obratovalne sposobnosti turbostroja z lastnostmi toka daleč pred in za lopaticami rotorja.
- Tok tekočine je relativno na steno lopatice nevskozen in stacionaren, tok pred in za lopaticami je uniformen (enakomeren po celotnem prerezu).
- Tok je osnosimetričen – lastnosti toka so uniformne po celotnem pretočnem traktu na vstopu in izstopu iz stroja

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO

25

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

**Prenos energije in vrtilnega momenta v turbostrojih**

Prenos iz gredi na tekočino

Prenos iz tekočine na gred

Kontrolni volumen zajema lopato gonilnika in je osnosimetričen.

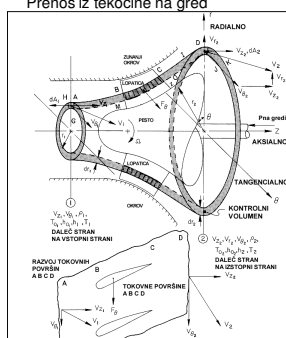
Prenos lastnosti skozi bočne površine ni upoštevan.

Dovedena moč na gredi se prenaša na tekočino preko momenta  $F_{\theta} \times R$ , kjer je  $F_{\theta}$  tangencialna sila.

Posledica je povečana vrtilna količina  $rV_{\theta}$

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO



26

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

V primeru kompresorja – delovnega stroja se vnos vrtilnega momenta odrazi s povečanjem hitrosti (obratno pri turbinah):

$|\vec{V}_2| > |\vec{V}_1|$  in  $V_{\theta 2} > V_{\theta 1}$

Skozi čelne mejne površine - stene ne prehaja energija, masa in gibalna količina. Preko lopatice prehaja samo mehanska moč na gredi.

**KONTINUITETNA ENAČBA**

$$\iint_{\text{kolobar GH}} \rho_1 \vec{V}_1 \cdot d\vec{A}_1 = \iint_{\text{kolobar JK}} \rho_2 \vec{V}_2 \cdot d\vec{A}_2$$

**GIBALNA ENAČBA**

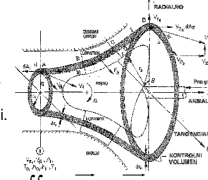
$$\int_V r F_{\theta} \rho dv = \iint_{\text{kolobar JK}} (r_2 V_{\theta 2}) (\rho_2 \vec{V}_2 \cdot d\vec{A}_2) - \iint_{\text{kolobar GH}} (r_1 V_{\theta 1}) (\rho_1 \vec{V}_1 \cdot d\vec{A}_1)$$

Moment vseh sil na lopatah      Vrtilna količina na izstopu      Vrtilna količina na vstopu

Površinske - viskozne sile v tangencialni smeri so zanemarejene !!

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO



27

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

Če je debelina tokovne cevi zelo majhna, lahko predpostavimo, da je parcialni volumski pretok konstanten po višini kontrol. vol.:

$$\int_V r F_{\theta} \rho dv = d\dot{m} \cdot (r_2 \cdot V_{\theta 2} - r_1 \cdot V_{\theta 1})$$

Moment vseh sil na lopatah gonilnika je enak momentu na gredi:

$$dT = d\dot{m} \cdot (r_2 \cdot V_{\theta 2} - r_1 \cdot V_{\theta 1})$$

Dovedeno moč popišemo z vrtilnim momentom  $T$  in vrtilno frekvenco  $\Omega$ :

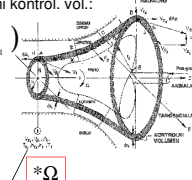
$$-dP_g = \Omega \cdot (d\dot{m}) \cdot (r_2 \cdot V_{\theta 2} - r_1 \cdot V_{\theta 1})$$

Z integracijo sledi Eulerjeva splošna turbinska enačba:

$$-P_g = \dot{m} \cdot \Omega \cdot (r_2 \cdot V_{\theta 2} - r_1 \cdot V_{\theta 1})$$

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO



28

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

ZA AKSIALNE TURBOSTROJE lahko predpostavimo:  $r_2 = r_1$

$$-P_g = \dot{m} \cdot U \cdot (V_{\theta 2} - V_{\theta 1})$$

ZA CENTRIFUGALNE TURBOSTROJE ima gibalna enačba obliko:

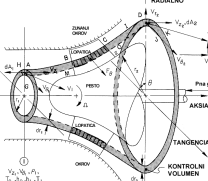
$$-P_g = \dot{m} \cdot (U_2 \cdot V_{\theta 2} - U_1 \cdot V_{\theta 1})$$

Moč na gredi turbostroja je tu določena z notranjimi spremenljivkami kot so: **obodna hitrost**, projekcija absolutne hitrosti toka na obodno hitrost in **masni pretok fluida skozi pretočni trakt stroja**

*Podana je notranja karakterizacija stroja kot posledica kinematike toka v pretočnem traktu turbostroja*

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO



29

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

ENERGIJSKA ENAČBA za predstavljeni kontrolni volumen podana z:

$$\dot{q} = P_g + P_{tr} + \dot{m} \cdot (h_{02} - h_{01})$$

Toplota = moč na gredi + moč trenja + sprememba entalpije, ki jo nosi tok tekočine skozi pretočni trakt.

$$h = e + p/\rho \quad e = \text{notranja energija}$$

Stagnacijska entalpija pa je podana z:

$$h_0 = e + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

Če zanemarimo strižne sile na kontrolnih površinah in predpostavimo ADIABATNO pretvorbo lahko zapišemo:

$$\frac{P_g}{\dot{m}} = h_{01} - h_{02}$$

Hidravlika

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEOTEHNIKO

30

# 1. RAZVRSTITEV TURBOSTROJEV IN OSNOVE MEHANIKE TEKOČIN

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

$$\frac{P_g}{\dot{m}} = h_{01} - h_{02}$$

Podana je karakterizacija turbinskega stroja z zunanjim stanjem na izstopu in vstopu v turbinskega stroja, kot posledica notranjih kinematskih razmer.

31

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

Vzročna povezanost zunanjih in notranjih spremenljivk

$$\frac{P_g}{\dot{m}} = U_2 V_{\theta 2} - U_1 V_{\theta 1} \qquad \frac{P_g}{\dot{m}} = h_{01} - h_{02}$$

$$-\frac{P_g}{\dot{m}} = h_{02} - h_{01} = U_2 \cdot V_{\theta 2} - U_1 \cdot V_{\theta 1}$$

Za turbostroje, v katerih se pretaka kapljevina, sledi:  $h \Rightarrow \rho$

$$-\frac{P_g}{\dot{m}} = \frac{p_{02} - p_{01}}{\rho} = g \cdot (H_2 - H_1)$$

32

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

Turbinska enačba za delovne stroje kot so črpalke, ventilatorji in kompresorji je podana z:

$$-\frac{P_g}{\dot{m}} = g \cdot (H_2 - H_1) = (U_2 \cdot V_{\theta 2} - U_1 \cdot V_{\theta 1})$$

V primeru toka skozi TURBINO se enačba preoblikuje v

$$\frac{P_g}{\dot{m}} = (h_{01} - h_{02}) = (U_1 \cdot V_{\theta 1} - U_2 \cdot V_{\theta 2})$$

Porast ali padec stagnacijske entalpije ali tlaka je sorazmeren spremembi tangencialnih hitrosti toka in hitrosti lopatice

33

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

**DIFERENCIALNI PRISTOP**

Izhajamo iz splošne enačbe spremembe lastnosti:

$$\frac{dN}{dt} = \int_A n \cdot \rho \cdot \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_V n \cdot \rho \cdot dV = \int_V \gamma \cdot dV$$

$\gamma$ ...učinki oz. vplivi na kontrolni volumen

Sprememba površinskega integrala v volumskega (Gaussov teorem):

$$\int_V \left[ \frac{\partial(n \cdot \rho)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (n \cdot \rho \cdot \vec{v}) - \gamma \right] \cdot dV = 0$$

$$\downarrow$$

$$\frac{\partial(n \cdot \rho)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (n \cdot \rho \cdot \vec{v}) - \gamma = 0$$

(Diferencialna enačba ohranitve N na enoto volumna)

34

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

**DIFERENCIALNI PRISTOP**

$$n \cdot \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) \right] + \rho \cdot \frac{\partial n}{\partial t} + \rho \cdot (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) n - \gamma = 0$$

0 (zakon o ohranitvi mase)  $0 = \int_A \rho \cdot \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot dV$

Snovska oblika zakona ohranitve spremenljivke n:

$$\rho \frac{\partial n}{\partial t} + \rho \cdot (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) n - \gamma = 0$$

$$\rho \frac{Dn}{Dt} = \gamma$$

$\gamma = 0$  ...lokalno konzervativna spremenljivka n;  
 $\gamma < 0$  ...lokalni ponor n;  
 $\gamma > 0$  ...lokalni izvor n.

35

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

**DIFERENCIALNI PRISTOP – GIBALNA ENAČBA**

$$n = \vec{v} \qquad \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \gamma = \gamma_V + \vec{\nabla} \cdot \gamma_A$$

Volumske sile (gravitacija  $\gamma_V = \rho \cdot \vec{f}$ )      Površinske sile – napetostni tenzor (vsota statičnega tlaka p in viskozni napetosti  $\tau$ )

Zakon ohranitve gibalne količine:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \cdot \vec{f} - \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \tau$$

Vztrajnostna sila      Težnostna sila      Tlačna sila      Viskozna sila

36

## 2. OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE IN OBRATOVANJE TURBOSTROJEV

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE  
IN  
OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**

1

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

Za natančno analizo je potrebno poznati fizikalno sliko procesa, ki se odvija med lopaticami turbostroja.

V pretočnem traktu kanalu turbostroja se vrši prenos energije, ki je omejen z geometrijo, gostoto energijskega toka in količino pretečene snovi.

2

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI CENTRIFUGALNIH TURBOSTROJEV**

Centrifugalni kompresor in tlačna slika

Mehansko delo gredi se preko rotorskih lopatic pretvori v stagnacijski porast tlaka, porast vrtilne količine in povečanje entalpije.

Stagnacijska ali statična entalpija in tlak naraščajo pri prehodu skozi rotor. Difuzor zmanjša kinetično energijo in dodatno poveča statični tlak. Spirala zajema tekočino iz difuzorja in jo usmerja v cevovod.

Spreminjanje  $p_0$  in  $T_0$  je podobno  $h_p$ , spreminjanje  $p$  in  $T$  pa  $h$ .

3

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI CENTRIFUGALNIH TURBOSTROJEV**

Tlačni porast je posledica:

- centrifugalne sile in
- Coriolisove sile

Sili sta posledici vrtenja in spremembe radialnega položaja.

Preostali del tlaka je posledica preusmeritve toka tekočine, kjer se oblika energije spremeni preko tangencialnega pospeška. Celotna sila se rezultira kot reakcijski moment na gredi stroja.

4

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI CENTRIFUGALNIH TURBOSTROJEV**

- Centrifugalni turbostroji se uporabljajo v primeru majhnih pretokov in visokih tlačnih razmerij. Uporabljajo se pri: turbinskih potisnikih in turboreaktivnih motorjih. Prav tako pokrivajo veliko področje v proizvodni – procesni industriji, avtomobilski industriji, raketnih črpalkah..... Dosežena so tlačna razmerja  $(p_2/p_1) = 12 \div 14$  in visoke vrtilne frekvence  $100.000 \text{ min}^{-1}$ .
- Tok v centrifugalnih kompresorjih je zaradi omenjenih vplivov podvržen močnemu povečanju mejne plasti, delitvi (separaciji) toka in pojavu sekundarnega toka. Zaradi naštetih pojmov imajo centrifugalni kompresorji nižji izkoristek od aksialnih.
- Za razliko od črpalk je potrebno pri obravnavanju tokovnih razmer v turbokompresorjih upoštevati kompresibilnost fluida (plina) in posledično termodinamske efekte, ki so vezani na energetske pretvorbe v stroju.

5

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**Hidravlika**

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**CENTRIFUGALNI TURBOSTROJI**

- Povsem aksialni tok je preko vstopnega usmernika preusmerjen v radialno smer. Prisotnost usmernika vpliva na gladko usmerjanje toka in s tem bistveno zmanjšuje jakost hrupa in zmanjša padec izkoristka zaradi vpadnih razmer in delitve toka, ki se pojavi na vstopnem robu rotorskih lopat kompresorja. Tok zapušča rotor skozi radialni difuzor in vstopa v spiralni okrov stroja.

6

## 2. OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE IN OBRATOVANJE TURBOSTROJEV

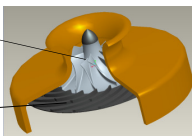
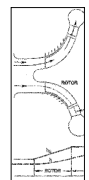
**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**CENTRIFUGALNI TURBOSTROJI**  
- ROTOR -

- Mehansko delo gredi se preko rotorskih lopatic pretvori v stagnacijski porast tlaka, porast vrtilne količine in povečanje entalpije.
- Stagnacijska entalpija in tlak naraščajo pri prehodu skozi rotor.

ROTOR

RADIALNI LOPATIČNI DIFUZOR

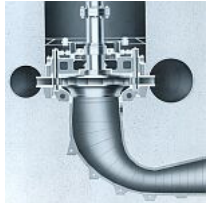

$$-\frac{P_g}{\dot{m}} = (h_{01} - h_{02}) = (U_1 \cdot V_{\theta 1} - U_2 \cdot V_{\theta 2})$$

7

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**CENTRIFUGALNI TURBOSTROJI**  
- ROTOR -

Rotor Francisove turbine

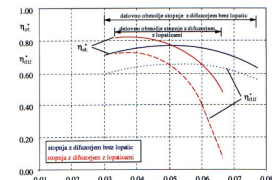



8

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**CENTRIFUGALNI TURBOSTROJI**  
- DIFUZOR -

- Tok z visoko hitrostjo zapuša rotor in ekspandira (difuzorski efekt) v statorju lopatičnem ali brezlopatičnem difuzorju. Zaradi vplivov stisljivosti se višina lopate zvezno zmanjšuje od vstopnega proti izstopnem robu. Tok nato vstopa v spiralo ali pa v naslednjo kompresorsko stopnjo preko medstopenjskega kanala.
- Osnovna naloga difuzorjev je pretvorba kinetične energije v tlačno energijo fluida. Glede na konstrukcijo in glede na delovno karakteristiko ločimo tri osnovne tipe difuzorjev:
  - difuzor z lopaticami,
  - difuzor brez lopatic in
  - difuzor spiralne oblike.

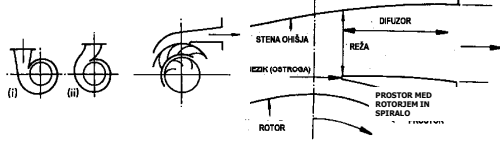


9

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**CENTRIFUGALNI TURBOSTROJI**  
- SPIRALNO OHIŠJE -

- Tekočina zapusti rotor z bistveno višjo absolutno hitrostjo, kot je hitrost v odvodni cevi. Izstopni sistem mora močno zmanjšati hitrost toka in povečati izstopni tlak.
- Spirala, ki obkroža rotor, ima vlogo difuzorja. Začenja se z minimalnim presekom, ki predstavlja začetek difuzorja in se širi vse do izstopne cevi. Razmejni jeziček predstavlja najbližji del ohišja spirale do rotorja in gleda proti smeri toka, ki zapuša rotor. Presek v ohišju se povečuje v skladu s povečanim tokom, ki zapuša rotor.



10

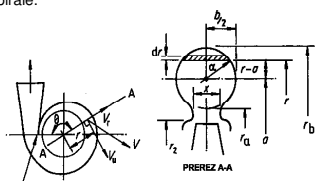
**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**CENTRIFUGALNI TURBOSTROJI**  
- SPIRALNO OHIŠJE -

- Če predpostavimo idealni tok in upoštevamo zakon o ohranitvi vrtilne količine  $\Gamma$  (produkt masnega vztrajn. momenta in kotne hitrosti), bo delec toka zapustil rotor po krivulji, ki ima obliko logaritemske spirale. Pri mnogih izvedbah ohišij so prečni preseki krožne oblike, zunanja stena pa sledi obliki Arhimedove spirale. S pomočjo integracije masnih diferencialov, ki so označeni na sliki, je mogoče določiti spremembe preseka in določiti pravilne oblike prečnih presekov spirale.

$$\Gamma = J\omega$$

$$J = \int r^2 dm$$



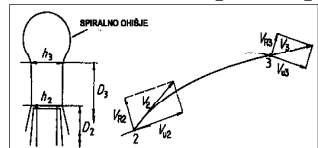
11

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**CENTRIFUGALNI TURBOSTROJI**  
- SPIRALNO OHIŠJE -

- Tokovnice sledijo spiralni krivulji, ki izhaja iz rotorja v točki 2 do izhoda v ohišje – točka 3; vmesno področje je difuzor spiralnega ohišja.
- S pomočjo zakona o ohranitvi mase in konstantne vrtilne količine med točkama 2 in 3, pri čemer zanemarimo izgube, lahko izračunamo povečanje tlaka z izrazom:

$$\Delta p_{difuzor} = p_3 - p_2 = \left[ \frac{V_2^2}{2} - \frac{V_3^2}{2} \right]$$



12

## 2. OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE IN OBRATOVANJE TURBOSTROJEV

Hidravlika

UNIVERZA LJUBLJANA  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEODEZIJO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**  
- AKSIJALNA TURBINA -

Tok tekočine z visokim tlakom in temperaturo priteče na niz statorskih lopatic oz. šob.

Temu sledi ekspanzija toka na statorskih lopaticah.

Pri tem pride do padca statične entalpije - odnosno tlaka in temperature.

Energija toka tekočine se preko vrtenja rotorjev pretvarja v mehansko energijo.

Visok izkoristek pretvorbe je odvisen od "gladkega" prehoda toka tekočine skozi pretočni trakt.

13

Hidravlika

UNIVERZA LJUBLJANA  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEODEZIJO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**

- Tok fluida skozi aksialni turbostroj je vzporeden z osjo turbostroja.
- Prenos energije se izvede s preusmeritvijo toka v koaksialni spiralni smeri v eni ali več stopnjah stroja.
- Aerodinamske (tokovne) karakteristike aksialnih turbostrojev so boljše od radialnih. Vzrok temu so večji vplivi realnih lastnosti tekočin, kot je trenje v radialnih turbostrojih, zaradi česar imajo ti nižji izkoristek. Kontaktno površine so pri aksialnih strojih znatno manjše!
- Večstopenske izvedbe centrifugalnih kompresorjev ustvarjajo mnogo večje aerodinamske ali hidrodinamske izgube, zato so za visoke vrednosti razmernikov tlaka  $p_{02} / p_{01}$  in večje masne tokove bolj primerni aksialni kompresorji

14

Hidravlika

UNIVERZA LJUBLJANA  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEODEZIJO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**

- Aksialni turbostroj je sestavljen iz enega ali več zaporednih parov: vodilniških lopatic na statorju in rotorskih lopatic na rotorju.
- Namen vodilniških lopatic je "gladko" vodenje toka na rotorske lopatice – optimalni natočni koti.

15

Hidravlika

UNIVERZA LJUBLJANA  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEODEZIJO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**

- Usmeritev absolutne hitrosti na izstopu iz statorske kaskade je določena z usmeritvijo vodilniških lopatic,
- Vektor relativne hitrosti na vstopu v rotorsko kaskado je pogojen z obliko in vstopnim kotom rotorskih lopatic,
- Izstopna relativna hitrost pa je pogojena z usmerjenostjo izstopnega dela rotorske lopatice
- Obliko vstopnega dela stat.lopatice pogojuje usmeritev absolutne izstopne hitrosti iz rotorja

16

Hidravlika

UNIVERZA LJUBLJANA  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEODEZIJO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**

- Rotorske lopatice dodajo zračnemu toku energijo s povišanjem stagnacijskega - totalnega tlaka, temperature in kinetične energije.
- V rotorju se povečuje tako totalni kot statični del energije.
- V statorju pa se vrši pretvorba kinetične energije v tlačno.

17

Hidravlika

UNIVERZA LJUBLJANA  
FAKULTETA ZA  
GRAĐENINSTVO IN  
GEODEZIJO

**Turbostroji**

dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**

- Tok priteka pod določenim vstopnim kotom na statorske lopatice, kjer se mu statični tlak poveča vsled difuzorske oblike pretočnega kanala, ki ga tvori par lopatic.
- Stagnacijski-totalni tlak se skozi difuzor ohranja, medtem ko statični tlak in temperatura narasteta, kinetična energija pa se zmanjša.
- V naslednji stopnji se proces v celoti ponovi.

18

## 2. OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE IN OBRATOVANJE TURBOSTROJEV

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**  
- ROTOR -

- Rotorske lopatice spreminjajo relativno hitrost in toku dodajo vrtilni moment, s tem pa mu povečajo absolutno komponento obodne hitrosti.
- Za kompresor velja, da je izstopna absolutna hitrost toka večja od vstopne in da je relativna hitrost manjša na izstopu:

$$V_2 \geq V_1 \quad W_2 \leq W_1$$

19

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**

- Če so v aksialnem stroju tokovnice soosne z gredjo, velja po Eulerjevi enačbi:

$$h_2 - h_1 = U \cdot (W_{\theta 1} - W_{\theta 2}) - \frac{V_2^2}{2} + \frac{V_1^2}{2}$$

20

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**

$$h_2 - h_1 = U \cdot (W_{\theta 1} - W_{\theta 2}) - \frac{(U - W_{\theta 2})^2 + (V_2)^2}{2} + \frac{(U - W_{\theta 1})^2 + (V_1)^2}{2}$$

$$\boxed{h_1 + \frac{(W_1)^2}{2} = h_2 + \frac{(W_2)^2}{2} = (h_0)_R = konst.}$$

Če so v aksialnem stroju tokovnice soosne z gredjo, se stagnacijska entalpija relativnega toka ohranja.

21

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**

Za nestisljive tokove:

$$p_1 + \frac{\rho \cdot (W_1)^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot (W_2)^2}{2} = p_{0R}$$

$$h_{0,R} = \frac{p_{0R}}{\rho} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{(W_1)^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{(W_2)^2}{2} = C_1(r)$$

Potencial  $C_1(r)$  se spreminja z odklikom od osi vrtenja in se z radijem  $r$  povečuje.

22

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**  
- TEORIJA KRILA -

- Lopatice turbostrojev v podzvočnih tokovih so v glavnem oblikovane z enostavnimi krožnimi in paraboličnimi loki ali pa z njihovo medsebojno kombinacijo. Površine lopatic so narejene tako, da zagotavljajo čim bolj gladko obtekanje toka na vstopu in izstopu, pri tem pa naj bi prihajalo do čim večjih energijskih sprememb in čim manjših aerodinamskih izgub.

23

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV**  
- TEORIJA KRILA -

- Na sesalni strani-zgornji strani krila se toku hitrost najprej poveča nato pa pade. Na tlačni – spodnji strani krila pa je hitrost manjša, nato pa enakomerno narašča tako, da je na izstopnem robu enaka vrednosti na sesalni strani.

24

## 2. OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE IN OBRATOVANJE TURBOSTROJEV

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV  
- TEORIJA KRILA -

- Izenačevanje tlakov na koncu krila (s tlačne strani na sesalno)

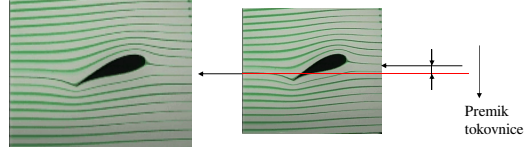


UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEOTEHNIKO

25

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV  
- TEORIJA KRILA -



- Prečni premik – sprememba smeri toka fluida se odraža kot sprememba gibalne količine, ki generira impulz sile na lopatični kaskadi.
- Prečni premik tokovnic ima za posledico spremembo gibalne količine in reakcijsko vzgonsko silo, ki predstavlja osnovni mehanizem krila ter prenosa energije iz toka na stroj odnosno obratno. Premik tokovnega polja je posledica asimetrije geometrijske strukture ovire (krila) v toku fluida.

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEOTEHNIKO

26

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

OSNOVNE ZNAČILNOSTI AKSIALNIH TURBOSTROJEV  
- TEORIJA KRILA -

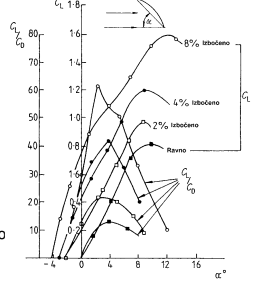
- Določevanje koeficientov vzgona in upora

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W_m^2 \cdot A}$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W_m^2 \cdot A}$$

$C_L$  ... vzgonski koeficient  
 $\alpha$  ... vpadni kot

- Koeficienti določeni eksperimentalno



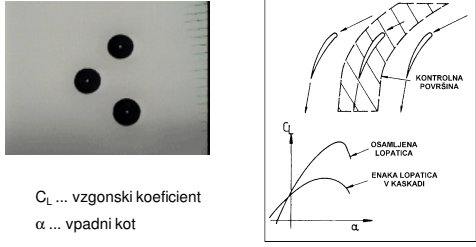
UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEOTEHNIKO

27

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

AKSIALNI TURBOSTROJI  
- KASKADA -

- Kaskada – niz lopat blizu druga drugi
- Vpliv ene lopate na drugo



$C_L$  ... vzgonski koeficient  
 $\alpha$  ... vpadni kot

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEOTEHNIKO

28

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

AKSIALNI TURBOSTROJI  
Kaplanova turbina

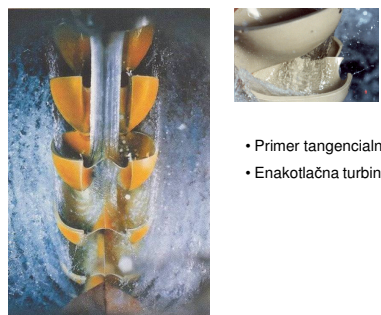


UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEOTEHNIKO

29

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

PELTONOVA TURBINA



- Primer tangencialnega turbostroja
- Enakotlačna turbina

UNIVERZA LJUBLJANA, FAKULTETA ZA GRAĐENINSTVO IN GEOTEHNIKO

30

## 2. OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE IN OBRATOVANJE TURBOSTROJEV

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**IZKORISTEK HIDRAVLIČNIH STROJEV**

S primerjavo z idealnimi pretvorbami dobimo izkoristke ali učinkovitost turbostroja.

$$h_0 = e + \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

$$\frac{P_s}{\dot{m}} \propto h_{01} - h_{02}$$

- Črpalke, ventilatorji, kompresorji:
 
$$\eta = \frac{\text{moč delovnega medija}}{\text{moč na gredi delovnega stroja}}$$

$$h_{01} \leq h_{02}$$

$$\frac{P_s}{\dot{m}} \geq h_{01} - h_{02}$$
- Turbine (vodne, plinske, parne, vetrne):
 
$$\eta = \frac{\text{moč na gredi turbine}}{\text{moč delovnega medija}}$$

$$h_{01} \geq h_{02}$$

$$\frac{P_s}{\dot{m}} \leq h_{01} - h_{02}$$

31

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**IZKORISTEK HIDRAVLIČNIH STROJEV**  
- IZKORISTEK ČRPALKE -

- Pri črpalkah primerjamo porast tlaka v odnosu na vloženo delo:
 
$$\eta_c = \frac{g \cdot (H_2 - H_1)}{\text{vložena moč na enoto mase}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot (H_2 - H_1)}{P}$$
- Hidravlični - Eulerjev izkoristek:
 
$$\eta_H = \frac{\text{dejanski porast energije delovnega medija}}{\text{idealni porast energije delovnega medija}} = \frac{g \cdot (H_2 - H_1)}{(U_2 \cdot V_{\theta 2} - U_1 \cdot V_{\theta 1})}$$

hidravlični izkoristek je enak skupnemu izkoristku, če med procesom ne prihaja do izgub pri prenosu lastnosti (mehanski prenos - trenje in puščanje tekočine).

$$\eta_H \geq \eta_{\text{SKUPNI}}$$

32

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**IZKORISTEK HIDRAVLIČNIH STROJEV**  
- IZKORISTEK TURBINE -

Pri tekočinskih - vodnih turbinah je izkoristek definiran s pretočnimi in tlačnimi veličinami.

$$\eta_t = \frac{\text{dejanska izstopna moč}}{\text{vstopna moč delovnega medija}} = \frac{P}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot (H_1 - H_2)}$$

33

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**DEJANSKE DELOVNE KARAKTERISTIKE TURBOSTROJEV**

- Do sedaj izpeljane enačbe so opisovale tokovne razmere v "idealnem" rotorju turbostroja. Realna tokovna razmerja odstopajo od navedenega, kar se odraža tudi v delovnih - energijskih karakteristkah turbostroja.
  - končno število lopatic;
  - trenje;
  - udarne izgube.

34

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**DEJANSKE DELOVNE KARAKTERISTIKE TURBOSTROJEV**  
- KONČNO ŠTEVILU LOPATIC -

- Do sedaj izpeljane enačbe so se nanašale na idealen rotor, to je rotor, kjer so tokovnice določene z obliko lopatice rotorja, kar je ponazorjeno s hipotezo o "neskončnem številu lopatic" in tokom brez trenja. Za tak tok je značilno, da je izstopni kot vektorja hitrosti določen s kotom lopatice na izstopu iz rotorja. V primeru realnega toka je tok neurejen in izstopni kot toka fluida odstopa od geometrijskega kota lopatice. Posledica tega je manjša dosežena specifična energija oz. dosežen tlak na turbostroju:
 
$$\epsilon = \frac{\Delta p_t}{\Delta p_{\infty}} = f(Q)$$

35

**Turbostroji** dr. Tom Bajcar

**DEJANSKE DELOVNE KARAKTERISTIKE TURBOSTROJEV**  
- IZGUBE V ROTORJU ZARADI TRENJA -

- So v prvem približku proporcionalne kvadratu povprečne vstopne hitrosti fluida. Ker je relativna hitrost v neposredni korelaciji s pretočno količino Q se lahko izgube zaradi trenja ocenjujejo s kvadratno odvisnostjo od pretoka.
 
$$\Delta p^* = \xi Q^2$$

36

## 2. OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE IN OBRATOVANJE TURBOSTROJEV

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**DEJANSKE DELOVNE KARAKTERISTIKE TURBOSTROJEV**  
- UDARNE IZGUBE V ROTORJU -

- So posledica odstopanja natočnega kota toka fluida od idealnega natočnega kota pri optimalnem volumskem pretoku  $Q_n$ .
- V primeru, da se dejanski pretok razlikuje od nominalnega pretoka, je dejanski natočni kot fluida na lopatico nepravilen, kar ima za posledico hidrodinamske izgube, ki so proporcionalne kvadratu razmerja pretokov:

$$\Delta p^{**} = \zeta \frac{\rho}{2} u_2^2 \left( \frac{Q}{Q_n} - 1 \right)^2$$

37

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- POTUJOČI VRTINEC -

tlak

pretok

NESTABILNO – PULZIRAJOČE PODROČJE

STABILNO PODROČJE

Best-Point Operation

38

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- POTUJOČI VRTINEC -

- Pri povečani obremenitvi aksialnega turbostroja se pojavi nasprotna tlačna razlika na sesalnih površinah lopat, ki povzroči porast mejne plasti in njeno cepitev, kar privede do nastanka vrtinca na lopatah. Posledica pojava vrtinca je znižanje tlačne razlike in izkoristka delovanja stroja. Povečanje tlaka na izstopu oziroma celo zaprtje izstopnega kanala ne povzroči pojava vrtinca na vseh lopatah istočasno. Ta se lahko pojavi na eni ali večjih lopatah istočasno, nato pa potuje od lopate do lopate s frekvenco, enako 50± 70 % vrtilne frekvence rotorja. Pojav imenujemo *potujoči vrtinec*.

39

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- POTUJOČI VRTINEC -

- Zaradi nenadnega porasta tlaka na vstopu med tretjo in četrto lopato (3-4) se pojavi vrtinec. Ta s svojo prisotnostjo blokira del pretočnega prereza, kar povzroči znižanje tlaka na pretočnem prerezu med četrto in peto lopato (4-5) in s tem prepreči nastanek vrtinca na tem mestu. Sočasno pride do povečanja tlaka na vstopu med drugo in tretjo lopato (2-3), kar ima za posledico pojav vrtinca v tem področju. Vrtinčno področje se giblje v nasprotni smeri vrtenja rotorja.

smer vrtenja

- Delni vrtinec se ponavadi pojavi v prvih stopnjah kompresorja, kjer obstaja visoko razmerje vstopnega in izstopnega premera lopate in nizka hitrost. Do njegovega nastanka pride pri zagonu, saj je pri tem masni tok delovnega medija majhen, vstopni pogoji pa so zelo visoki (velika zeljena tlačna razlika).

40

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- ODLEPLJANJE MEJNE PLASTI -

- Vpliv recirkulacije toka na rekuperacijo kinetične energije v tlačno v difuzorjih centrifugalnih strojev

41

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- KAVITACIJA -

- Kavitacija je pojav, pri katerem tekoča faza prehaja v plinasto in nazaj v okolju sprva homogene tekočine. Osnovni vzrok za nastanek kavitacije je lokalno zmanjšanje tlaka ob približno konstantni temperaturi.
- Zaključna faza kavitacijskega dogajanja je faza implozije ali kolapsa mehurčka. Pride lahko do silovitega trčenja in nastanka udarnega vala, ki se razširi na vse strani.

42

## 2. OSNOVNI PRINCIPI ANALIZE IN OBRATOVANJE TURBOSTROJEV

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- KAVITACIJA -

- V hidravličnih strojih
- Pri vbrizgavanju
- V naravi

43

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- KAVITACIJA -

Potujoči mehurčki    Pritrjena    Vrtinčna

Kavitacijski vrtinec    Kavitacijski oblak    Super kavitacija

44

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- KAVITACIJA -

S pojmom kavitacija označujemo pojav prehodov iz tekočine v plinasto fazo in nazaj v homogeno kapljevino. Osnovni vzrok za nastanek kavitacije je lokalno zmanjšanja tlaka ob približno konstantni temperaturi. Soroden pojav je vrenje vode, kjer pa za razliko od kavitacije uparjanje nastopi zaradi povišanja temperature tekočine ob približno konstantnem tlaku. V obeh primerih nastanejo v tekočini mehurčki napolnjeni s paro in drugimi plini, ki se nahajajo v fluidu.

45

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- KAVITACIJA -

Zaključna faza kavitacijskega dogajanja je faza implozije ali kolapsa, ki nastopi ob pogoju povečanja tlaka. V tem primeru nastali prazni prostor (mehurček) v trenutku napolni kapljevina iz okolice. Pride lahko do silovitega trčenja in nastanka udarnega vala, ki se v naslednjem trenutku širi od mesta kolapsa na vse strani.

Poleg udarnega vala se pojavijo še drugi spremljevalni efekti, ki lahko destruktivno vplivajo na okolico, posebno na bližnje trdne stene.

46

**Turbostroji** *dr. Tom Bajcar*

**Hidravlika**

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRAĐENSTVO IN GEODEZIJU

**OBRATOVANJE TURBOSTROJEV**  
- KAVITACIJA -

Verjetno najbolj pogost problem, ki izvira iz kavitacije, je poškodba materiala povzročena pri imploziji kavitacijskih mehurčkov v bližini trdne površine.

Kolaps kavitacijskega mehurčka je silovit proces, ki generira zelo lokalizirane motnje in šoke z visokimi amplitudami v točki kolapsa. Če se ti kolapsi zgodijo blizu trdne površine, povzročijo trenutne lokalne obremenitve površine. Ponavljanje te obremenitve, zaradi množine mehurčkov ki implodirajo, lahko povzroči utrujanje materiala površine in odcepitev delčkov materiala. Za razliko od erozije zaradi trdnih delcev v toku, pri kateri obrabljena površina izgleda enakomerno obrabljena in opraskana zaradi večjih delcev, ima kavitacijska erozijska poškodba kristalen in nazobčan videz

47