

Увод у енергетику - ТУРБОМАШИНЕ

Проф. др Александар Гајић
Кабинет 429



1. УВОД

1.1 ДЕФИНИЦИЈЕ

Задатак турбомашине је да произведе рад из енергије флуидне струје, или да повећа енергију флуидне струје трошећи рад. Ово се постиже дејством флуида на лопатице радног кола које се обрће, најчешће, константном угаоном брзином, или дејством лопатица радног кола на струју флуида.

Турбомашине које производе рад трошећи енергију флуидне струје зову се **турбине**. У зависности од врсте флуида који кроз њих струји постоје **водне, парне и гасне турбине**. Ово су **моторне машине**. Ове машине дају снагу потребну за покретање радних машина, најчешће генератора електричне енергије.

Турбомашине које повећавају енергију струје трошећи рад моторне машине, најчешће електромотора наизменичне струје, су **пумпе, компресори, дувалке и вентилатори** – зависно од врсте флуида који кроз њих тече, као и остварене промене притиска и густине.

У принципу, у већини турбомашина може се остварити преношење енергије у оба смера, те изводимо закључак да турбине могу да раде као пумпе или ако компресори и обрнуто. Међутим, у савременим условима инверзан процес се остварује само у **пумпама-турбинама** специјално пројектованим за ту сврху. У осталим машинама супротно-смерни процеси су могући, али се остварују на веома неповољан начин, па се не примењују.

Турбомашине могу да служе и као **преносници енергије**. У том случају се у заједнички оклоп смештају пумпа и турбина. Пумпно вратило се спаја са вратилом покретачке – моторне, а турбинско са вратилом покретане – радне машине. Тако се добијају хидродинамички мењачи или хидродинамичке спојнице – зависно од тога да ли се у преносу истварује или не остварује промена обртног момента.

1.2. Енергија флуидне струје

Енергија флуидне струје је унутрашња и кинетичка.

Унутрашња енергија обухвата потенцијалну, топлотну, хемијску и електричну. За активирање неких видова унутрашње енергије потребне су допунске радње. Тако за ослобођење хемијске енергије горива треба да се обави процес сагоревања.

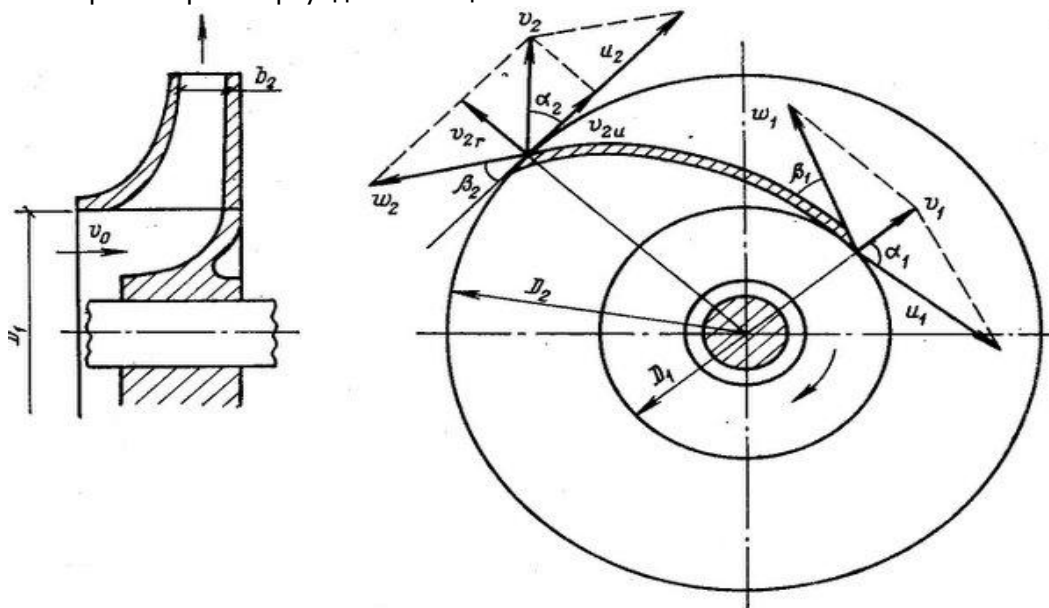
При проучавању размене енергије у турбомашинама разматраће се промена кинетичке и унутрашње енергије при чему ће се под **унутрашњом** енергијом подразумевати енергија **положаја и притиска и унутрашња** топлотна енергија.

При размени енергије у турбомашинама мења се, у општем случају, и **кинетичка и унутрашња енергија флуидне струје**.

1.3. Принцип рада

Најважнији део сваке турбомашине је **обртно (радно) коло** са лопатицама. Обрћући се, коло путем лопатица прима енергију флуида и преноси је на вратило, односно, трошећи рад са вратила делује преко лопатица на флуид повећавајући му енергију. За рад кола

неопходно је **да постоји сила која делује између кола и флуида**. На слици 1. приказано је пумпно коло у коме је струјање релативно. Са слике се види да је апсолутна брзина флуидне честице \vec{v} једнака векторском збиру обимске (преносне) брзине кола \vec{u} и релативне брзине флуидне честице \vec{w} .



Слика 1. Струјање кроз коло пумпе

Обимна компонента ове силе условљава пренос енергије (или снаге) са обртних лопатица на флуид (пумпа, компресор, вентилатор) или са флуида на лопатице (турбина).

Због дејства ових сила, флуид, при пролазу кроз коло, мења правац струјања, односно скреће. Без скретања флуида нема ни преношења енергије. Тачније речено, интензитет преноса енергије сразмеран је струјном скретању: јача скретања условљена су већим силама по јединици протока.

У турбомашинама се радни процес одвија непрекидно. Ако се занемаре пулсације протока и притиска, може се узети да је сила којом флуид и лопатице међусобно делују стална, не мења се у току времена. Због тога се ове машине, за разлику од клипних, одликују равномерним радом без већих потреса и вибрација. Поред тога су знатно простије конструкције, а веће брзине струјања условљавају, за исте радне перформансе, мањи габарит и мању потрошњу материјала. Главна им је предност одсуство кривајног механизма, неуравнотежених осцилаторних маса и сложеног механизма за отварање и затварање вентила.

1.4. Подела турбомашина

По смеру преношења енергије турбомашине се деле у две групе. У првој групи су **моторне машине: турбине**, а у другој **радне: пумпе, компресори и вентилатори**.

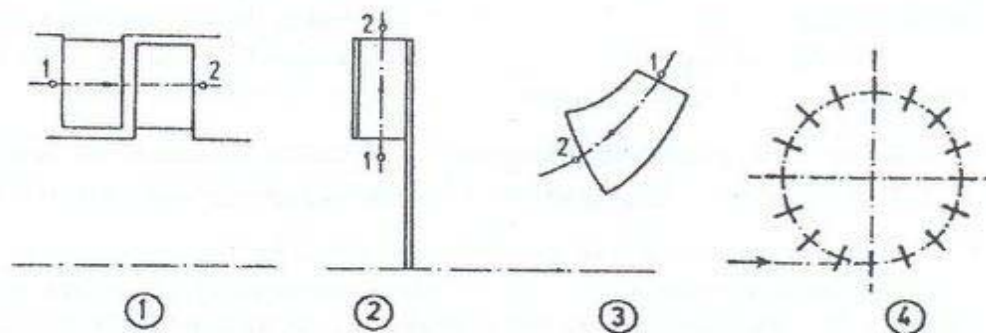
При проласку кроз турбомашину мења се притисак и брзина флуида, а може да се мења и густина. Промена густине је праћена променом температуре, јер се при томе мења и топлотно стање флуида.

Водне турбине и пумпе спадају у групу машина кроз које струји слабо стишљив флуид, тако да у њима, при променама притиска који се остварују у колу, не настаје промена густине, те се флуид сматра нестишљивим. Ово су хидрауличне турбомашине.

Парне и гасне турбине и турбокомпресори чине групу топлотних турбомашина. У њима се, поред промене притиска и брзине кретања флуида, остварује и промена густине праћена променом температуре флуида.

Вентилатори су машине кроз које струје гасови (ваздух, димни и разни технички гасови), дакле стишљив флуид. Но како се у њима остварују мали пораст притиска, то се густина

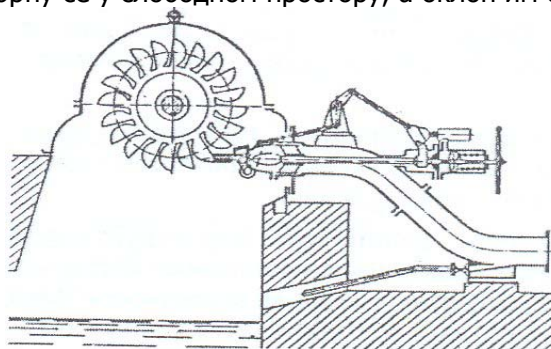
гаса од улаза до излаза из машине повећава само за неколико процената. Стога су ове машине по конструкцији сличне компресорима, али се прорачунавају на основу претпоставке о нестишљивом флуиду, дакле као и хидрауличне машине.



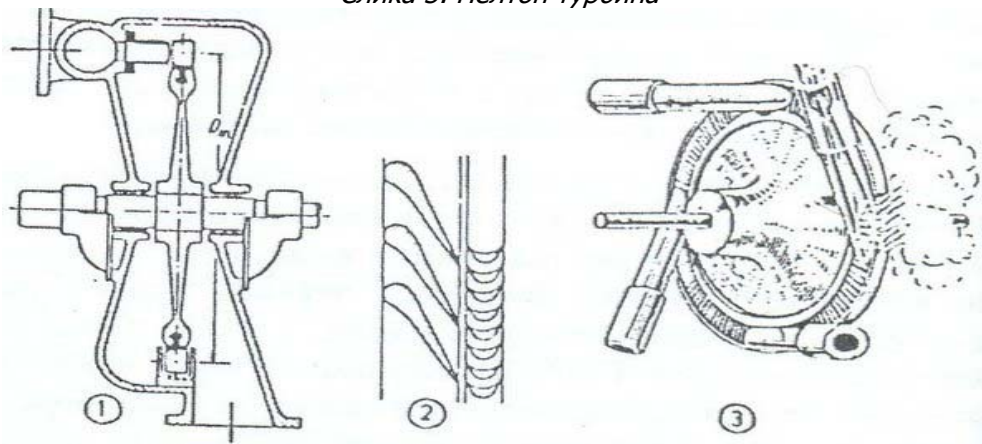
Слика 2. Облици кола

Машине могу да се поделе и према **облику кола**. Оне су **осне или аксијалне**, сл.2.1, ако им брзине леже у равнима тангентним на цилиндри саосне са осом кола. Струјање кроз **радијална кола**, сл.2.2, је од осе ка периферији или обрнуто, а путање флуидних честица леже у равнима нормалним на осу. Када је улаз у коло радијалан, а излаз осни, или обрнуто, машина је **радијално-осна**, сл. 2.3. За машине са проточним струјањем по конусним или њима блиским површинама каже се да су са **дијагоналним колима**. Праве се и машине, али само као турбине, са тангентним прилажењем струје колу, сл. 2.4 и слика 3.

При проласку флуида кроз кола неких турбина, мења му се само кинетичка енергија, а не и притисак. Такве турбомашине су **слободно-млазне или акцијске**, сл. 3, 4 и 5. Кола ових турбина су отворена и обрћу се у слободном простору, а оклоп им служи само за заштиту.

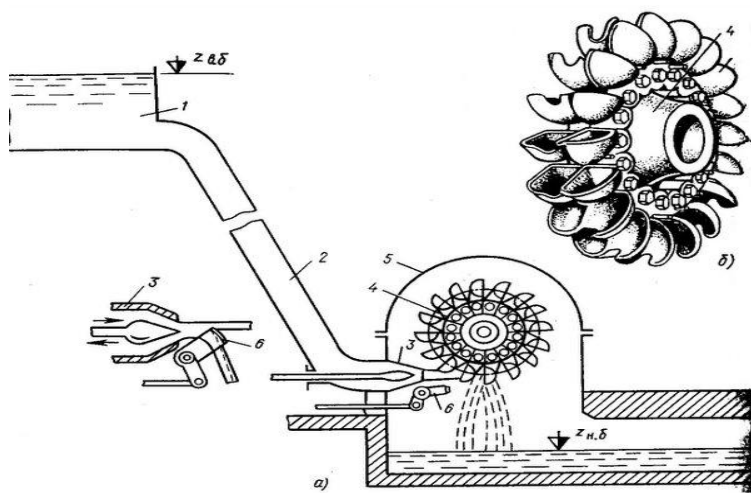


Слика 3. Пелтон турбина



Слика 4. Акцијске топлотне турбине

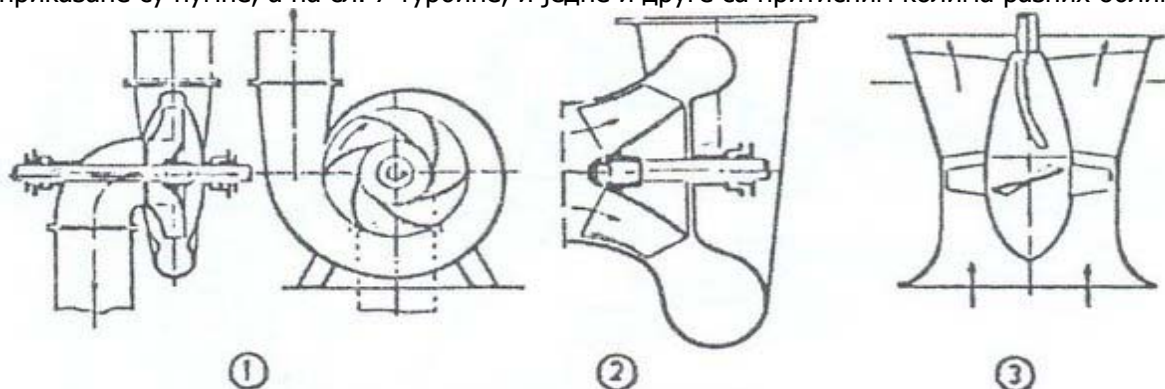
На слици 4 као радни флуид се користи гас (пара), док је на слици 5 радни флуид течност (вода).



Слика 5. Акцијске водне турбине

Слободно-млазни или акцијски процес подесан је само за турбине, без обзира на врсту флуида.

Кола у којима се мењају и кинетичка енергија и притисак су притисна или реакцијска, сл. 6 и 7. Она су, због континуалне промене притиска од улаза до излаза, оклопљена. На сл. 6 приказане су пумпе, а на сл. 7 турбине, и једне и друге са притисним колима разних облика.

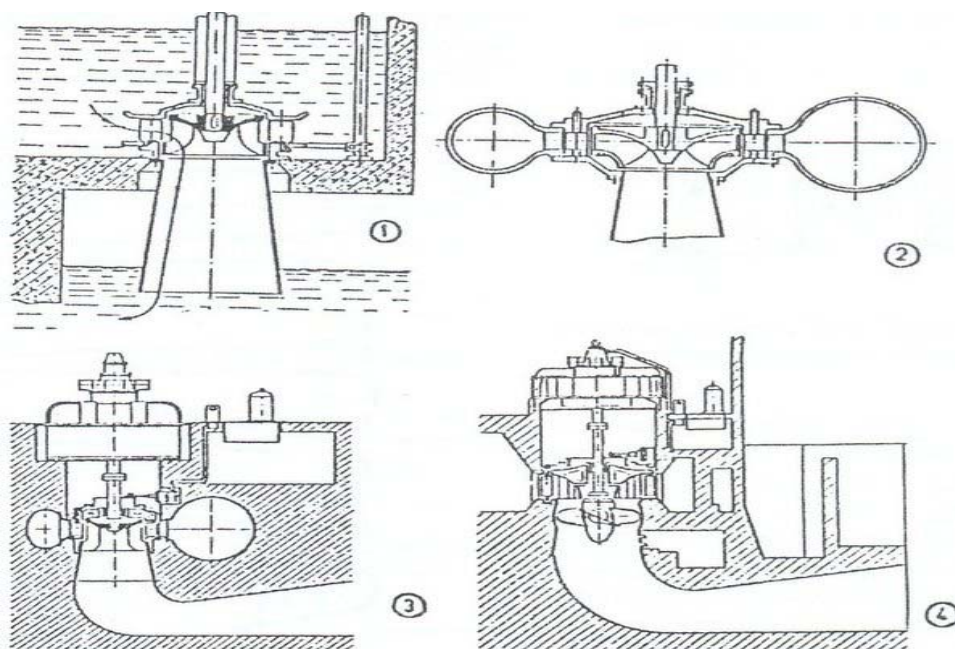


Слика 6. Пумпе – 1. Радијалне; 2. Радиаксијалне; 3. Аксијалне

Притисни или реакцијски процес је веома подесан за све турбомашине: турбине (водне, парне и гасне), пумпе, компресоре и вентилаторе.

У акцијским турбинама механичка енергија се добија на рачун промене кинетичке енергије флуидне струје. Због тога у колу, од улаза до излаза, опада брзина флуидних честица, уз непромењени притисак. У реакцијским турбинама у колу опадају и кинетичка енергија и притисак остварујући рад кола. У реакцијским колима пумпи, компресора и вентилатора остварује се истовремено пораст притиска и повећање кинетичке енергије радног флуида уз трошење механичког рада.

Процес преношења енергије не може се увек обавити у једном колу турбомашине, него се распоређује на неколико ступњева. Постоје, дакле, једностепене и вишестепене турбомашине.



Слика 7. Водне турбине – 1.2 и 3 – Радијалне; 4. Аксијалне

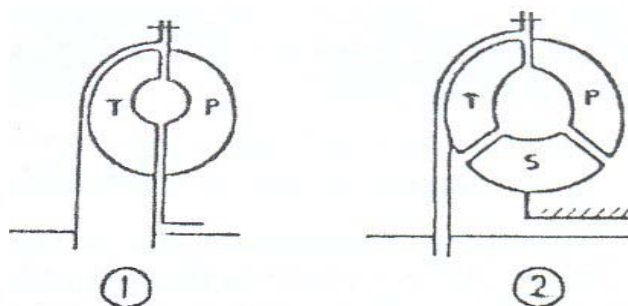
Да би турбомашина континуално и усталено трансформисала енергију флуидне струје у механичку, или обрнуто, потребно је да се њено коло обрће и да кроз њега непрекидно тече радни флуид.

Хидродинамички преносници чине посебну групу турбомашина које у истом оклопу садрже пумпно и турбинско коло. Кроз радни простор преносника циркулише, по затвореном кругу, радни флуид, а то је најчешће минерално уље, лакших фракција. Преносници служе за остваривање везе водећег и вођеног вратила при практично истој брзини обртања (хидродинамичке спојнице) или за успостављање везе између њих при променљивој брзини излазног вратила, зависној од радних услова (хидродинамички мењачи) сл. 8.

Слика 8. Хидродинамички преносници

1. Спојница; 2. Мењач

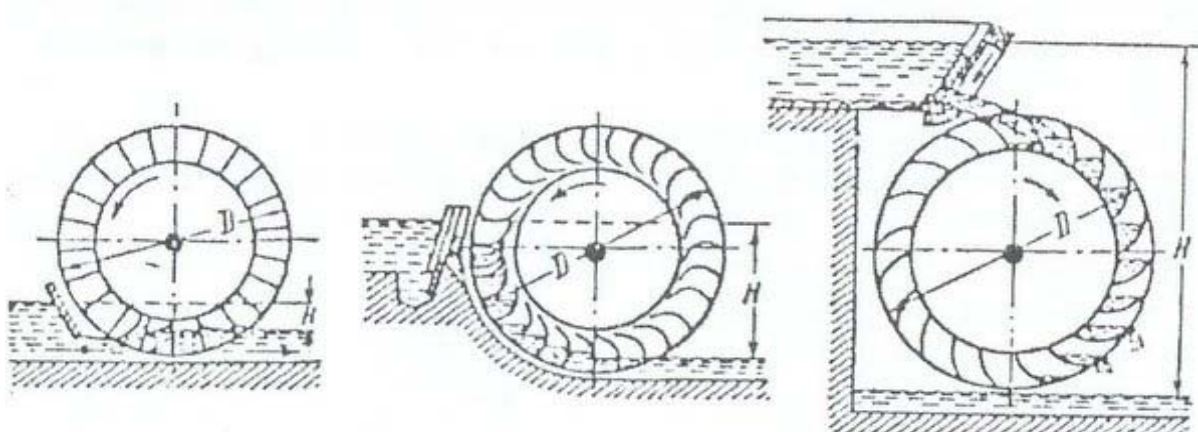
Ознаке:
P- пумпа;
T-турбина;
S-спроводни апарат



Све турбомашине раде на истом принципу: скретањем струје оствареним дејством лопатица радног кола, које се непрекидно обрће, преноси се енергија флуидне струје на коло или обрнуто. Међутим, зависно од смера преношења енергије, врсте флуида, радних параметара флуида и машине (проток, притисак на улазу, промена притиска у машини, снага, брзина обртања, величина машине), турбомашине се конструкцијски међусобно врло много разликују. Понекад се тешко и види да две машине припадају истој врсти.

1.5 Историјски развој турбомашина

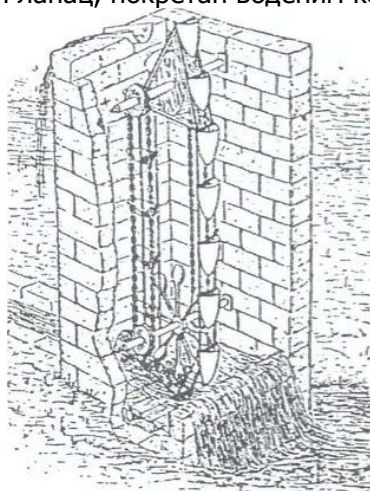
Почеци градње. Први подаци о напорима да се енергија садржана у флуиду (води или ваздуху) искористи, сежу у давна времена. Познато је да су се у време пре нове ере користила водена кола, сл.9.



Слика 9. Водна кола

Обртала су се под дејством тежине воде, довођене подножно, бочно или вршно. Служила су најчешће за покретање млинова за жито или за ваљање сукна, али и за друге сврхе. Предпоставља се да прва водена кола потичу из Месопотамије и њој суседних земаља Мале Азије.

Упоредо се радило и на подизању воде са нижег нивоа на виши, у првом реду за потребе наводњавања. Први уређаји те врсте били су бескрајни ланци са кофицама, покретани снагом људи или животиња. Доцније се користи енергија воденог тока за погон. На сл. 10 је приказан бескрајни ланац, покретан воденим колом уграђеном у подножју.



Слика 10. Уређај за наводњавање



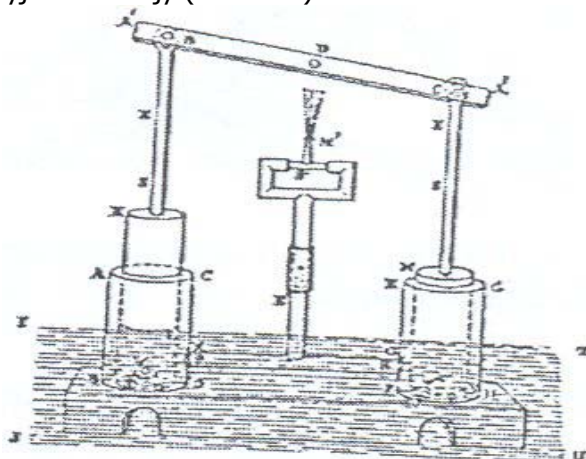
Слика 11. Принцип реакције - Еолипил

Податке о томе даје Филон Византијски (Phylon of Bisantium) из трећег века пре нове ере. Ктезибије (Ctesibius) из Александрије описује 135 год. пре нове ере александријске бунаре. Страбо (Strabo) наводи, 88 год. пре нове ере, да су за време грчког краља Митридата VI грађени бунари по Малој Азији.

Херон Александријски, Ктезибијев ученик, 120. год. пре нове ере, проналази принцип реакције, што показује дејством млаза водене паре у еолипилу (обртној лопти), сл. 11, прототипу примитивне парне турбине. Он је описао и ветрењачу, али су оба уређаја испробана само као играчке. До практичног коришћења водене паре за добијање механичке енергије у клипној машини или турбини долази више од хиљаду година доцније. Ветрењаче су грађене већ у то време у Вавилону, а у Египту нешто касније.

Пумпе. За подизање воде на виши ниво дуго су служили већ поменути, сл. 10, бескрајни ланци са кофицама. У Египту је од 3-ег столећа пре нове ере примењиван и Архимедов завртањ, с којим се могла вода дизати до висине од 4m. У Александрији је око 190. год. пре

нове ере израђена од бронзе двоцилиндрична ватрогасна клипна пумпа, сл. 12, а конструкција се приписује Ктесибију (Ctesibius).

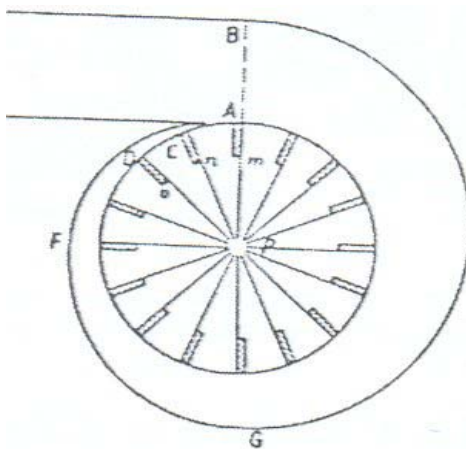


Слика 12. Клипна пумпа

Око 1700. године почиње озбиљнији рад на примени клипних пумпи, покретаних вакуумом оствареним кондензовањем водене паре. Класично решење клипне пумпе покретане експанзијом паре у парној клипној машини остварио је Американац Вортингтон (Wortington), 1840-1850. год.

Прва израђена аксијална пумпа са десет просторно закривљених дрвених лопатица пронађена је у Португалији 1772. год., а потиче из 5-ог столећа нове ере и служила је за одводњавање рудника бакра Сан Доминго (San Domingos). Ипак градња турбопумпи почиње релативно касно, јер је требало да се пре тога дође до теоријских предзнања. У том погледу су веома значајна разматрања Леонарда да Винчија (Leonardo Da Vinci, 1452-1490.) о могућности коришћења центрифугалне силе. Прва чисто радијална пумпа са спиралом и равним радијалним лопатицама припада француском физичару Папену (Denis Papin), а израђена је 1687. год. и патентирана 1689. год., сл. 13.

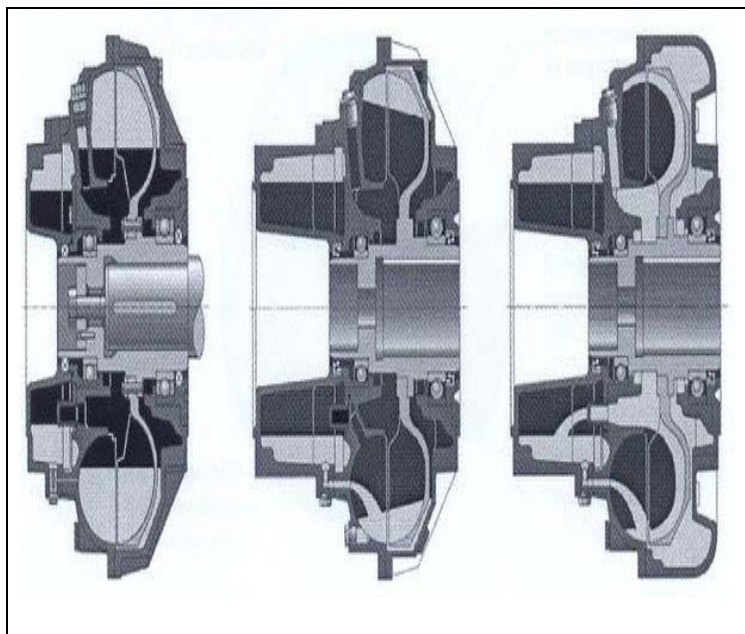
Радијално коло са закривљеним лопатицама појављује се у Бостону 1818. год. у фирми Масачусетс (Massachussets).



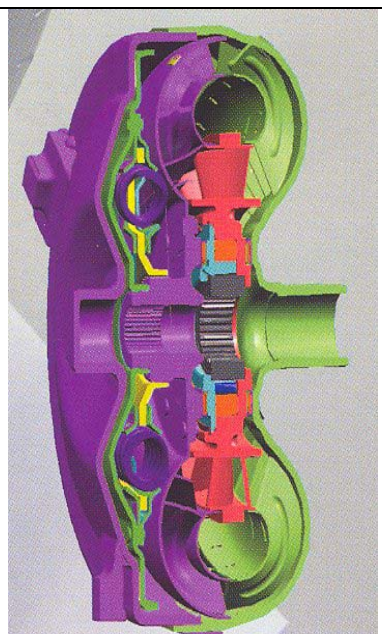
Слика 13. Прва центрифугална пумпа

Хидродинамички пренос. Идеју за градњу хидродинамичких преносника формулисао је 1685. год. Денис Папен (Denis Papin). Прво остварење савремених преносника који садрже у заједничком оклопу пумпу и турбину, сл. 8, припада Херману Фетингеру (Hermann Föttinger, 1877-1945.) и патентирано је 1905. године.

Први хидродинамички преносници грађени су за потребе бродоградње и то је остало све до Првог светског рата. Шира примена преносника почиње пред Други светски рат, а нарочито после њега. Користе се при градњи лаких и тешких возила, гусеничара, локомотива и за погон стационарних машина у тешким условима рада (бушаће гарнитуре, рудничке и грађевинске машине и слично). Једно од савремених решења хидродинамичких спојница је приказано на слици 14., а хидродинамичких мењача на сл. 15.



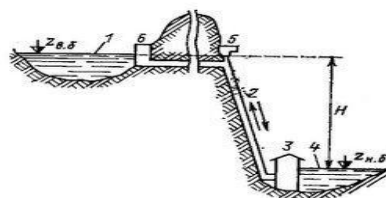
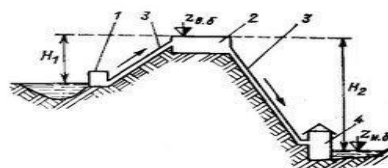
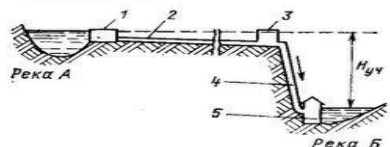
Слика 14. Хидродинамичка спојница



Слика 15. Хидродинамички мењач

1.6 Турбине и хидроелектране

У хидроелектранама се врши трансформација потенцијалне енергије воде механичку (водна турбина), а потом у електричну (електрични генератор). Располагаива енергија се може изразити **брuto падом** H_{br} [m], који представља **разлику нивоа између горњег и доњег језера**, што је приказано на слици 16.



Слика 16. Шематски прикази хидроелектрана

Доводећи воду кроз резервоар један део енергије се трансформише у топлоту (губи се искористива енергија) па је **нето пад** једнак:

$$H = H_{br} - H_{gub.} \quad (1)$$

Вода на улазу у турбину има своју брзину, односно **кинетичку енергију по јединици масе** изражену у облику:

$$E_K = \frac{c^2}{2} \left[\frac{m^2}{s^2} = \frac{J}{kg} \right], \quad (2.1)$$

притисак $p [N/m^2 = Nm/m^3 = J/m^3]$ односно притисну енергију:

$$E_{pr} = p / \rho \left[\frac{J}{kg} \right], \quad (2.2)$$

и наравно на висинској коти z на улазу потенцијална енергија тог флуида изражена је у облику:

$$E_p = z \cdot g \left[m \cdot \frac{m}{s^2} = \frac{J}{kg} \right]. \quad (2.3)$$

Укупна енергија флуида (воде) на улазу у турбину биће збир сва три вида поменуте енергије, тј.:

$$E = \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + g \cdot z \quad (3)$$

Разлика укупних енергија по јединици масе испред E_I и E_{II} иза турбине представљаће **јединични рад струје** који се узима флуиду ради трансформације у механичку енергију на радном колу, а чији израз гласи:

$$Y = g \cdot H = E_I - E_{II} = \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + g \cdot z \right)_I - \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + g \cdot z \right)_{II}, \quad (4)$$

где је ознака **I улаз у турбину**, а ознака **II излаз из турбине**.

Теоријски могућа искористива снага турбине, **хидрауличка снага**, би била:

$$P_{th} = \rho \cdot Q \cdot Y \left[\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m^3}{s} \cdot \frac{J}{kg} = \frac{J}{s} = W \right], \quad (5)$$

где су:

ρ - $[kg/m^3]$ – густина радног флуида;

Q - $[m^3/s]$ – запремински проток и

Y - $[J/kg]$ - јединични струјни рад.

Због губитака енергије при струјању кроз коло (трење, вртложење,...), запреминских губитака (процуривање кроз процепе), механичких губитака у лежиштима обртних делова, стварна излазна снага је та која се добија на вратилу турбине и она је мање вредности од хидрауличке, теоријски максимално могуће.

Однос стварно добијене снаге P и хидрауличка снага P_{th} , која се одузме флуиду представља укупни степен корисности η , који се дефинише на следећи начин:

$$\eta = \frac{P}{P_{th}} = \frac{P}{\rho \cdot Q \cdot Y}. \quad (5)$$

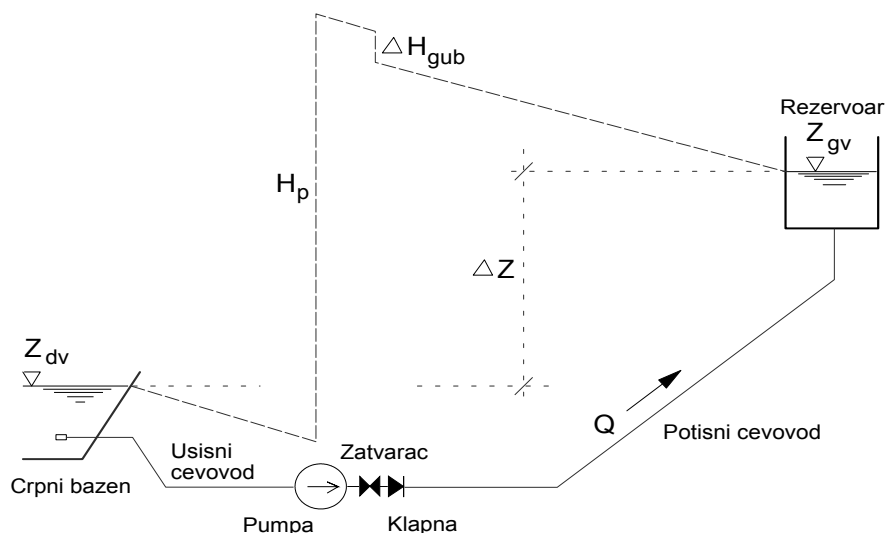
Степен корисности је бездимензијска величина која говори о квалитету трансформисања енергије.

1.7 Пумпне станице

Системи који служе за транспорт течности понекад су веома једноставни, као у примеру приказаном на сл.17. Пумпа прихвата воду која дотиче из усисног базена и потискује је у потисни резервоар. На слици је приказана заштитна и регулациона арматура: неповратни вентил - клапна која треба да спречи повратно струјање и затварач који служи за регулацију протока и за пуштање пумпе у рад.

При транспорту воде из базена у резервоар пумпа пре свега треба да савлада **ГЕОДЕЗИЈСКУ ВИСИНУ** - H_{geo} - која представља разлику нивоа између ових резервоара. Израз за геодезијску висину има следећи облик:

$$H_{geo} = \Delta Z = Z_{gv} - Z_{dv} . \quad (6)$$



Слика 17. Пумпна станица са једном машином

Осим тога у усисном и потисном цевоводу се због струјања течности јављају губици, па је **НАПОР ПУМПЕ – Н** - укупна енергија коју течност добија проласком кроз пумпу изражена висином стуба те течности:

$$H_{geo} = H_{geo} + \Sigma H_{gub} . \quad (7)$$

Јединични рад струје дефинисан као укупна енергија која се од улаза до излаза из пумпе преда јединици масе флуида износи :

$$Y = g \cdot H = E_{II} - E_I = \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + g \cdot z \right)_{II} - \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + g \cdot z \right)_I , \quad (8)$$

где је ознака **I улаз у пумпу**, а ознака **II излаз из пумпе**.

Снага коју флуид добија (**корисна, хидрауличка снага**) износи $P_{th} = \rho \cdot Q \cdot Y$ [W] и она је мања од улазне снаге P на вратилу пумпе због хидрауличких губитака насталих струјањем око лопатица радног кола, запреминских губитака и механичких губитака.

Укупни степен корисности пумпе износи:

$$\eta = \frac{P_{th}}{P} = \frac{\rho \cdot Q \cdot Y}{P} . \quad (9)$$