

HYDROENERGETYKA



TURBINY
WODNE

Ryszard Myhan
WYKŁAD 3

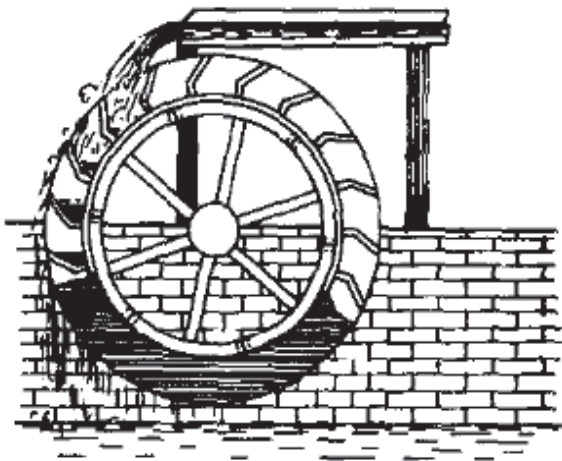
TURBINY WODNE - HISTORIA

- ⚙️ **Turbina wodna** (*turbina hydrauliczna*) - silnik wodny przetwarzający energię mechaniczną wody na ruch obrotowy za pomocą wirnika z łopatkami.
- ☀️ Poprzednikiem i wzorem dla turbin wodnych było **koło wodne**.
 - ⇒ Pierwsze koła wodne istniały już w I w pne.
 - ⇒ Koła wodne najczęściej wykorzystywano do napędu młynów wodnych i narzędzi np. w tartakach lub kuźniach.
 - ⇒ W niektórych krajach Bliskiego Wschodu i Azji Południowo-Wschodniej koła wodne używane są do podnoszenia wody.
 - ⇒ W XVI wieku w Polsce pracowało ok 3000 kół wodnych.

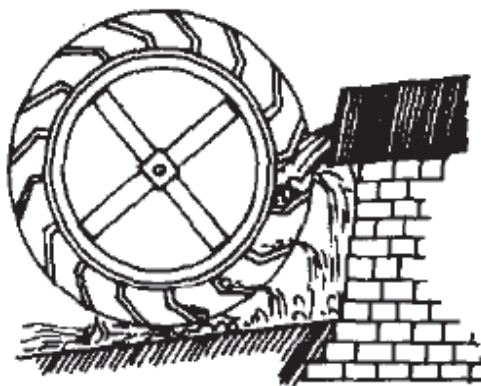
TURBINY WODNE - HISTORIA

- ☀ Zależnie od sposobu zasilania koła wodne dzielimy na:
- ⇒ **nasiębierne** (wykorzystuje głównie energię potencjalną wody) o największej wydajności,
 - ⇒ **śródsiebierne** (wykorzystuje energię potencjalną i kinetyczną wody),
 - ⇒ **podsiebierne** (wykorzystuje głównie energię kinetyczną wody)

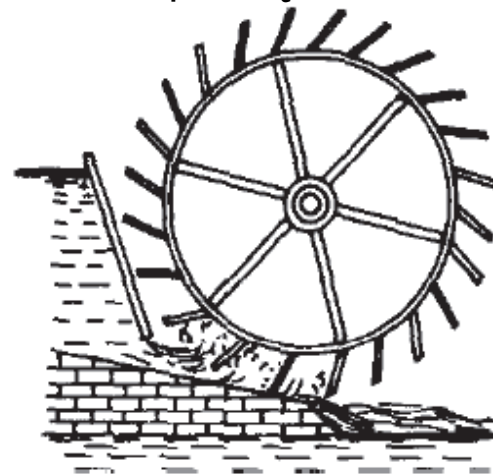
koło nasiębierne



koło śródsiebierne



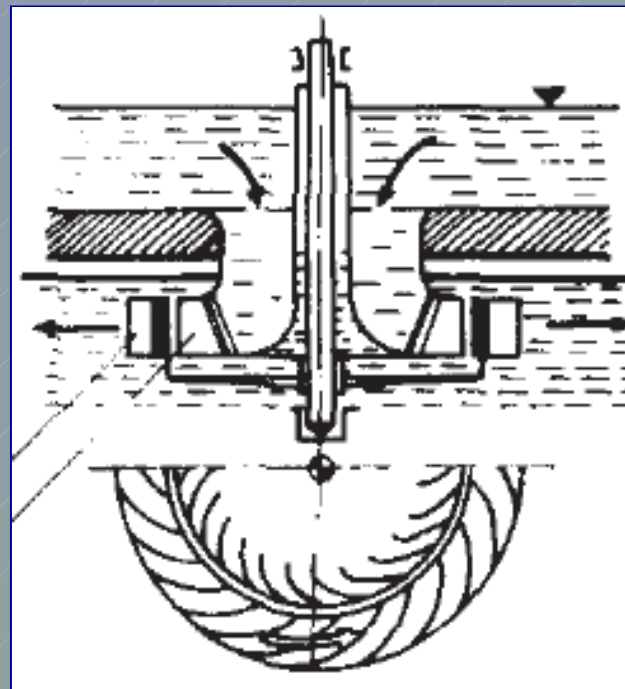
koło podsiebierne



TURBINY WODNE - HISTORIA

⚙️ Podstawę rozwoju turbin wodnych stanowiły prace teoretyczne **D. Bernuollego** (1730r.) i **L. Eulrea**, który po raz pierwszy zastosował aparat kierowniczy, oraz doświadczenia **J. Segnera** (młynek Segnera – 1750r.), jak i prof. **Bourdina** (1824r.), który jako pierwszy użył nazwy „turbina”.

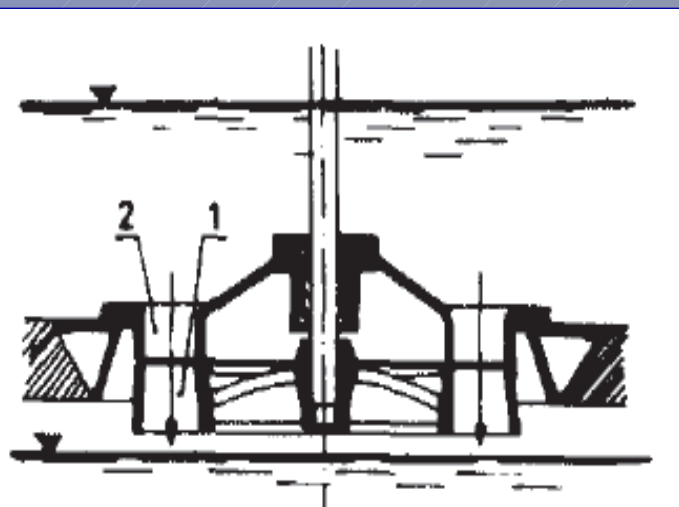
⚙️ Pierwszym rozwiązaniem turbiny wodnej, które znalazło praktyczne zastosowanie w przemyśle była **turbina B. Fourneyrona** (1827r.) z promieniowym przepływem wody.



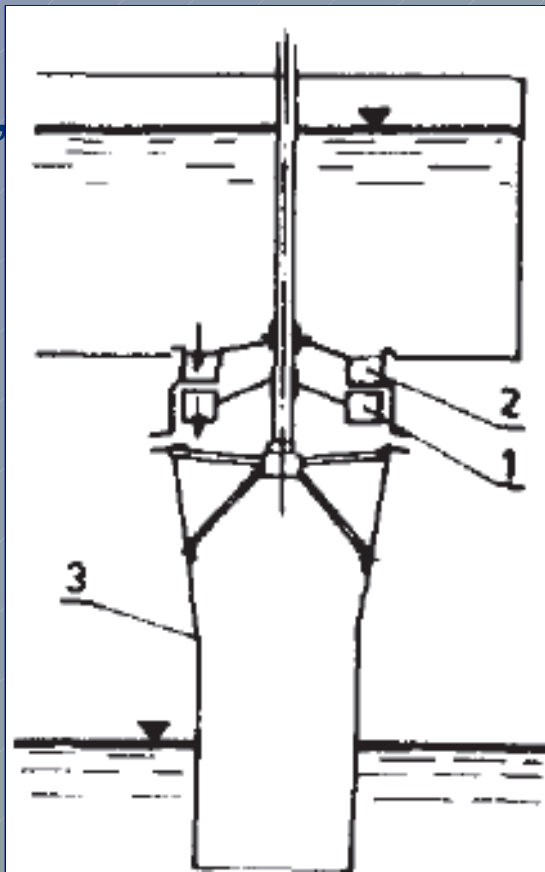
TURBINY WODNE - HISTORIA

⚙ Pierwsza turbina o typowym przepływie osiowym została skonstruowana przez **Filipa Girarda** (1828r.).

⚙ Kolejne rozwiązanie osiowej turbiny wodnej opracował **Henschel** (1841), który po raz pierwszy zastosował stożkową rurę ssawną.



Turbina Henschel-Jonval
1841 - 1843r.



Turbina Girarda, 1828r.

PODZIAŁ TURBIN WODNYCH

 Usystematyzowanie bardzo licznych i różnorodnych konstrukcji turbin wodnych wymaga stosowania wielu kryteriów podziału, z których podstawowymi są: **rodzaj**, **typ** i **system** turbiny.

Rodzaj turbiny:

- **turbiny reakcyjne** (*naporowe*) – przed wirnikiem turbiny ciśnienie wody jest większe od atmosferycznego, w czasie przepływu następuje zmiana ciśnienia;
- **turbiny akcyjne** (*natryskowe*) – ciśnienie wody jest równe ciśnieniu atmosferycznemu

PODZIAŁ TURBIN WODNYCH

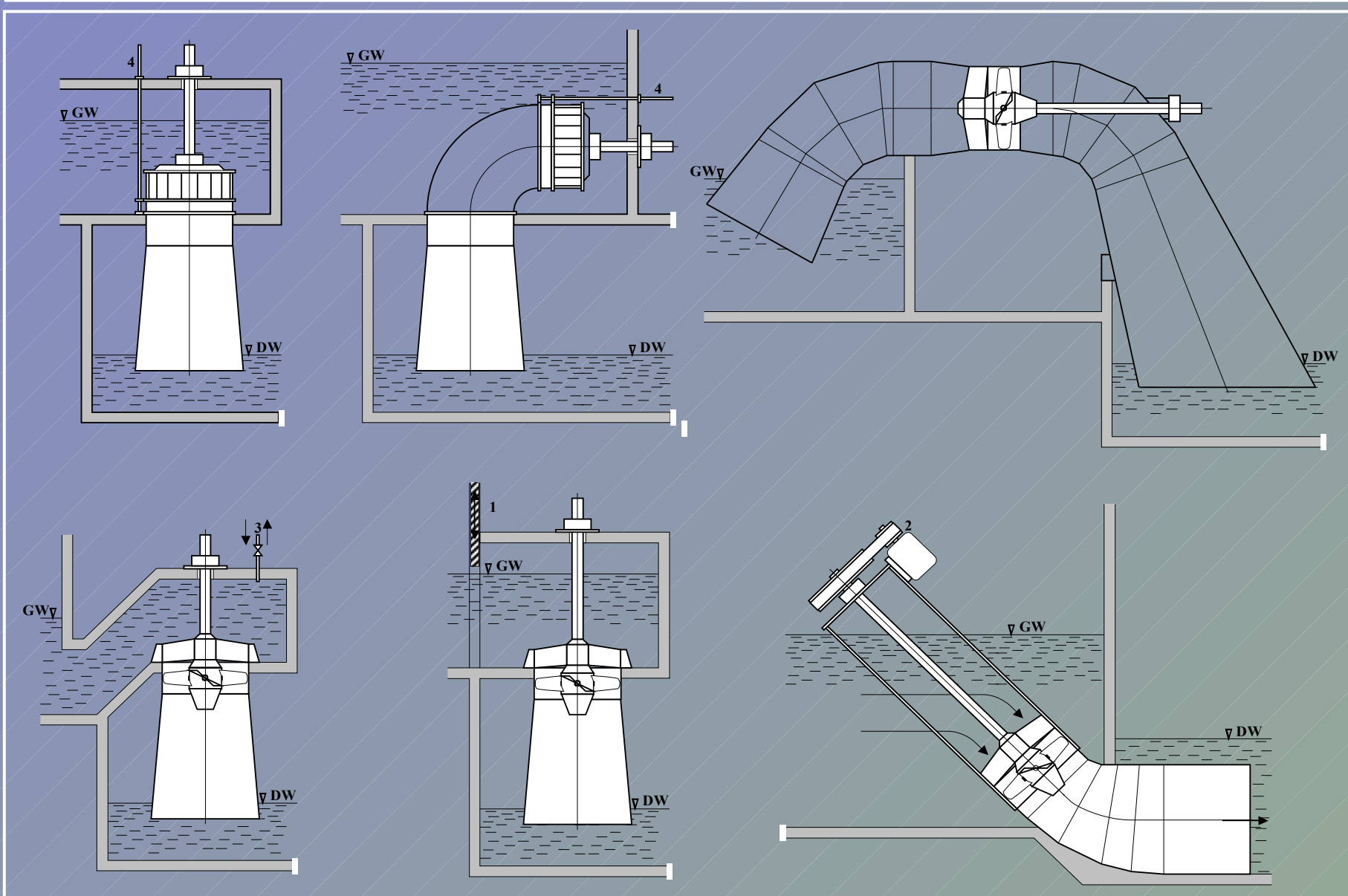
□ Typ turbiny:

- **Kaplana** (*śmigłowa*)
- **Francisa**
- **Peltona**
- **Deriaza**
- **Banki Michella**
- **Tesli**

□ System turbiny:

- wynika z przyjętych szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych np. turbina: w komorze otwartej, w spirali, lewarowa, z napływem kielichowy, bliźniacza itd., a także z położenia wału turbiny (pozioma, ukośna, pionowa), z liczby wirników.

SYSTEMY TURBIN WODNYCH



PODZIAŁ TURBIN WODNYCH

 Inne kryteria podziału uwzględniają zakres parametrów energetycznych:

- niskospadowe
- średnispadowe
- wysokospadowe

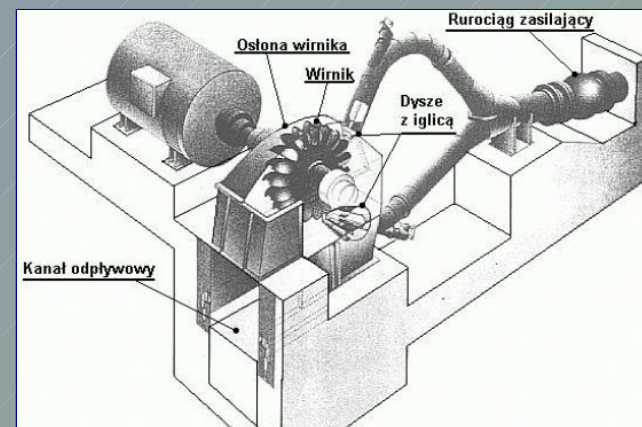
oraz zakres
szybkobieżności:

- wolnobieżne
- średnibieżne
- szybkobieżne

Typ turbiny	Zakres wyróżników szybkobieżności w ,	Zakres spadów H , m
<i>Kaplan (śmigłowa) wolnobieżna</i>	<i>350-500</i>	<i>70-30</i>
<i>Kaplan (śmigłowa) średnibieżna</i>	<i>501-750</i>	<i>30-10</i>
<i>Kaplan (śmigłowa) szybkobieżna</i>	<i>751-1100</i>	<i>10 i poniżej</i>
<i>Francis wolnobieżny</i>	<i>50-150</i>	<i>500-110</i>
<i>Francis średnibieżny</i>	<i>151-250</i>	<i>110-50</i>
<i>Francis szybkobieżny</i>	<i>251-450</i>	<i>50 i poniżej</i>
<i>Pelton wolnobieżny</i>	<i>2-15</i>	<i>1800-1000</i>
<i>Pelton średnibieżny</i>	<i>16-25</i>	<i>1000-700</i>
<i>Pelton szybkobieżny</i>	<i>26-50</i>	<i>700-100</i>
<i>Banki-Michella</i>	<i>30-200</i>	<i>100-5</i>

TURBINY AKCYJNE

- ⚙️ Energia potencjalna jest przetwarzana w aparacie kierującym na energię prędkości.
- ⚙️ Ciśnienie wody przed wejściem na łopatkę jest równe ciśnieniu atmosferycznemu.
- ⚙️ Wirnik turbiny akcyjnej jest zasilany na części obwodu i powierzchnie tylne łopatek nie stykają się z wodą.
- ⚙️ Wirnik umieszczony jest nad zwierciadłem wody dolnej, co powoduje straty spadu.

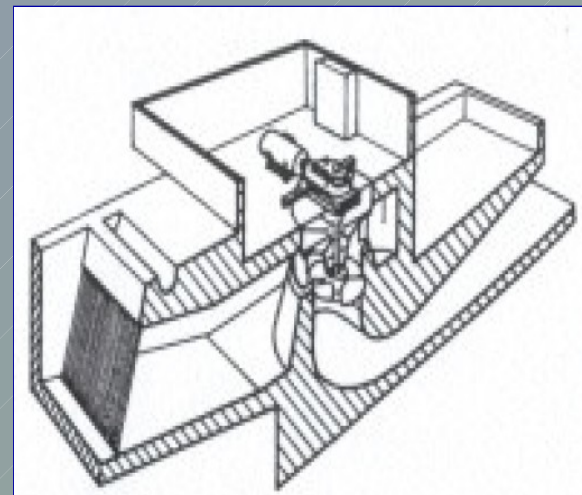


TURBINY REAKCYJNE

- ❁ Ciśnienie wody przy wejściu na łopatkę wirnika jest większe od atmosferycznego i maleje w czasie przepływu przez przestrzeń międzyłopatkowe wirnika.
- ❁ Podczas przepływu wody przez wirnik jej energia ciśnienia przemienia się w dodatkową energię kinetyczną.
- ❁ Woda przepływa między łopatkami wirnika, tworzącymi kanały konfuzorowe, wskutek czego doznaje przyśpieszenia i prędkość jej zwiększa się, a krzywizna łopatek wirnika powoduje zmianę kierunku ruchu wody.
- ❁ Wirnik turbiny reakcyjnej jest na całym obwodzie zasilany wodą, która przepływa przez niego strugą ciągłą i za pomocą rury ssącej jest doprowadzona do dolnego poziomu.

TURBINY REAKCYJNE

- ❁ Zastosowanie rury ssącej w turbinach reakcyjnych umożliwia wykorzystanie spadku między wirnikiem, a poziomem wody dolnej.
- ❁ W turbinie reakcyjnej woda wywiera na łopatkę dwojakie działanie:
 1. reakcyjne, wywołane ciśnieniem, pod którym woda przepływa przez wirnik z przyspieszeniem względem wirnika;
 2. akcyjne, wywołane krzywizną łopatki i zmianą kierunku ruchu wody.

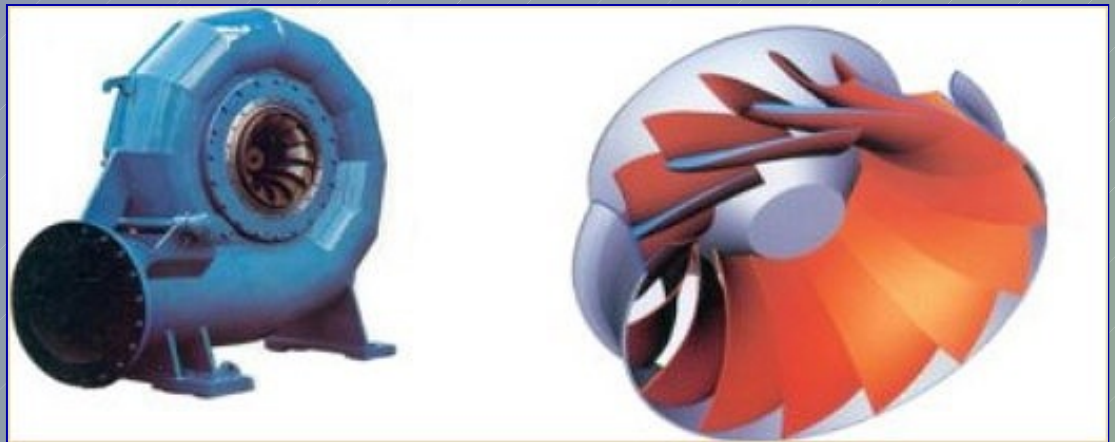


TURBINA FRANCISA

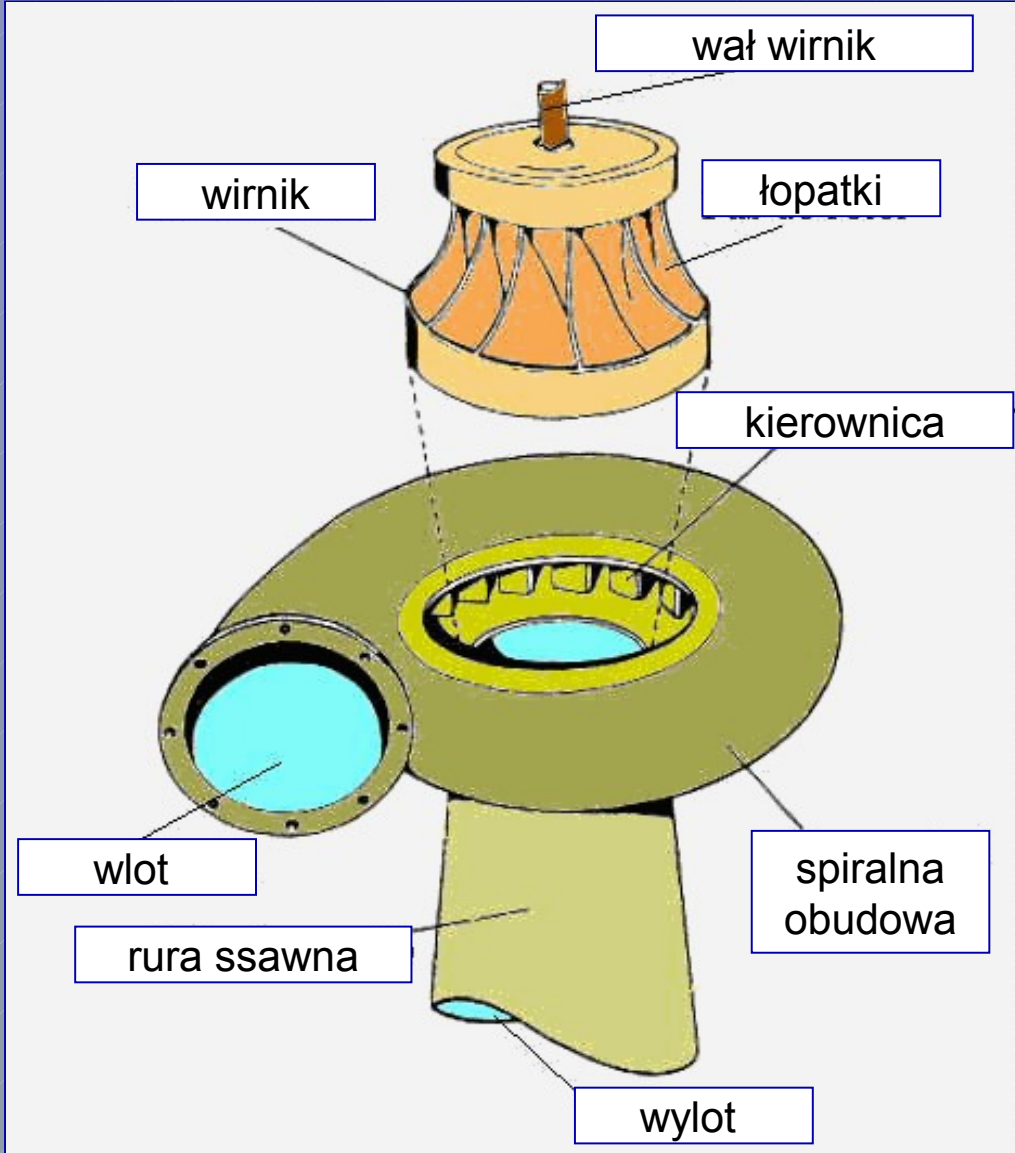
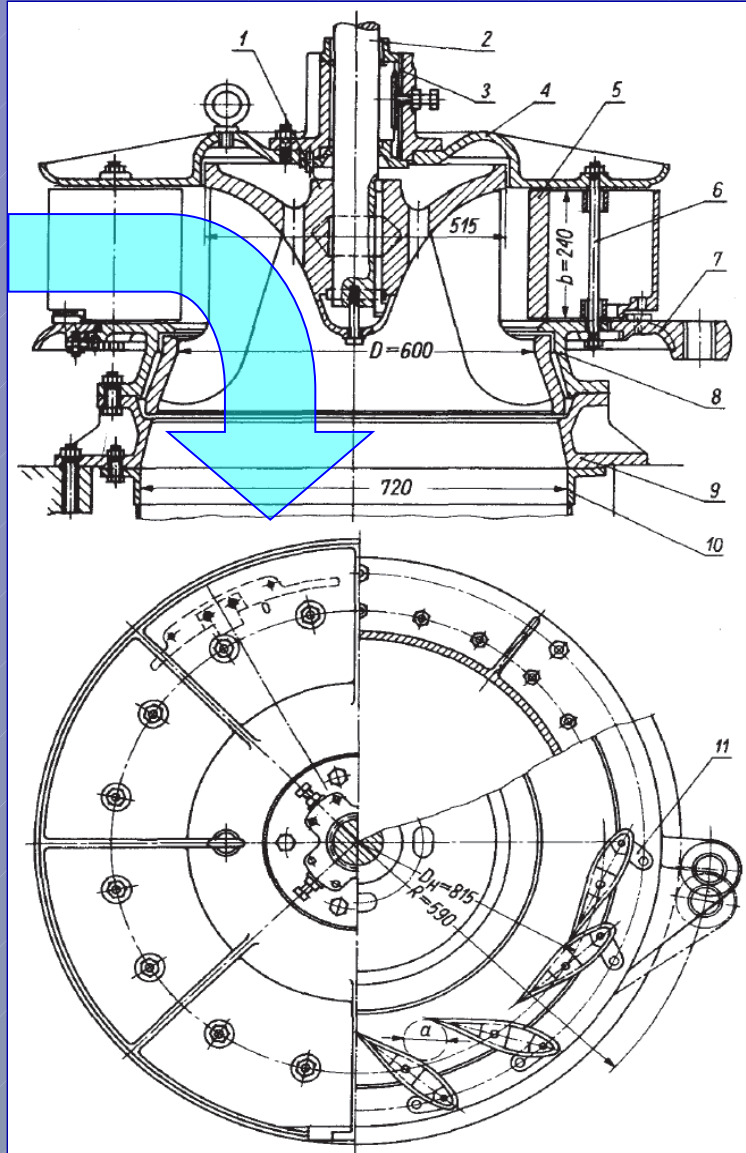
- ▶ **Turbina Francisa** - turbina wodna opracowana w 1849r. przez *Jamesa Francisa*.
- ▶ Część przepływową turbiny Francisa stanowią w kolejności: kierownica, wirnik, rura ssąca, a także w wielu przypadkach specjalnie ukształtowana obudowa spełniająca rolę elementu doprowadzającego wodę do kierownicy w postaci spirali, leja lub kotła.
- ▶ Przeznaczeniem kierownicy jest zapewnienie dopływu określonej ilości wody do wirnika oraz odpowiednie ukierunkowanie strugi.
- ▶ W wirniku następuje zasadnicza przemiana energii wody na energię mechaniczną, a także zmiana kierunku przepływu z promieniowego kierunku wylotu kierownicy na osiowy kierunek wylotu wirnika.

TURBINA FRANCISA

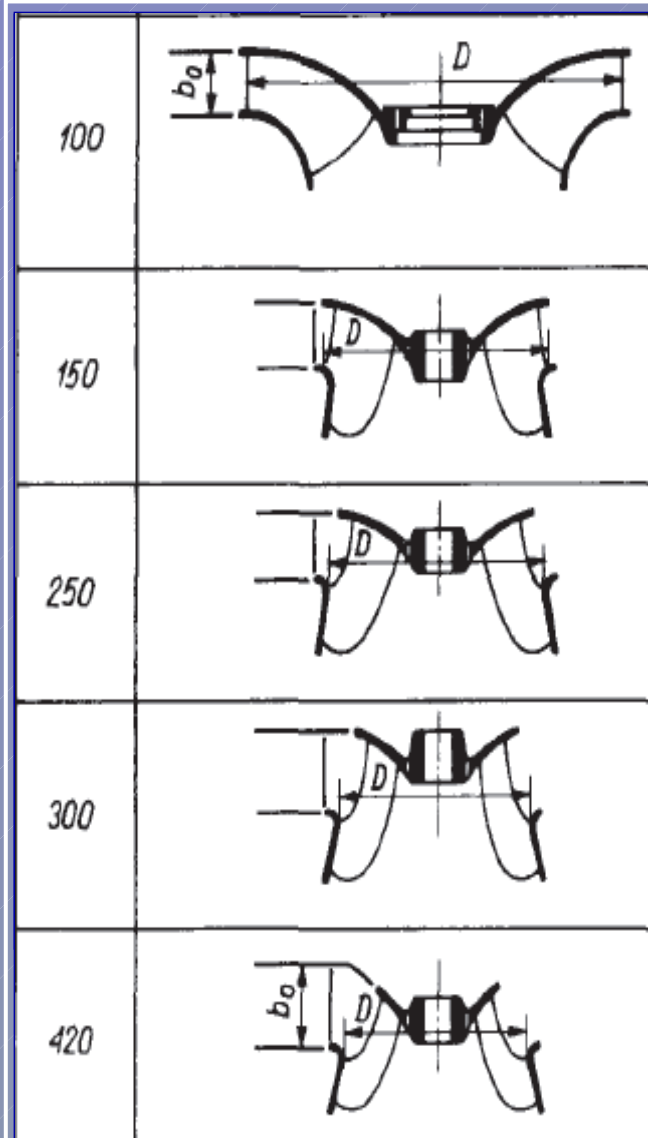
- ▶ Z wirnika woda odpływa prostoosiową lub zakrzywioną rurą ssącą, której działanie polega na wytworzeniu podciśnienia na wylocie wirnika – pozwala to na wykorzystanie części spadku odpowiadającej odległości osi wirnika od zwierciadła wody w kanale odpływowym.
- ▶ Jednocześnie rura ssąca stwarza warunki do odzyskania części energii kinetycznej opuszczającej wirnik, co jest szczególnie ważne w turbinach szybkoobrotowych.



TURBINA FRANCISA



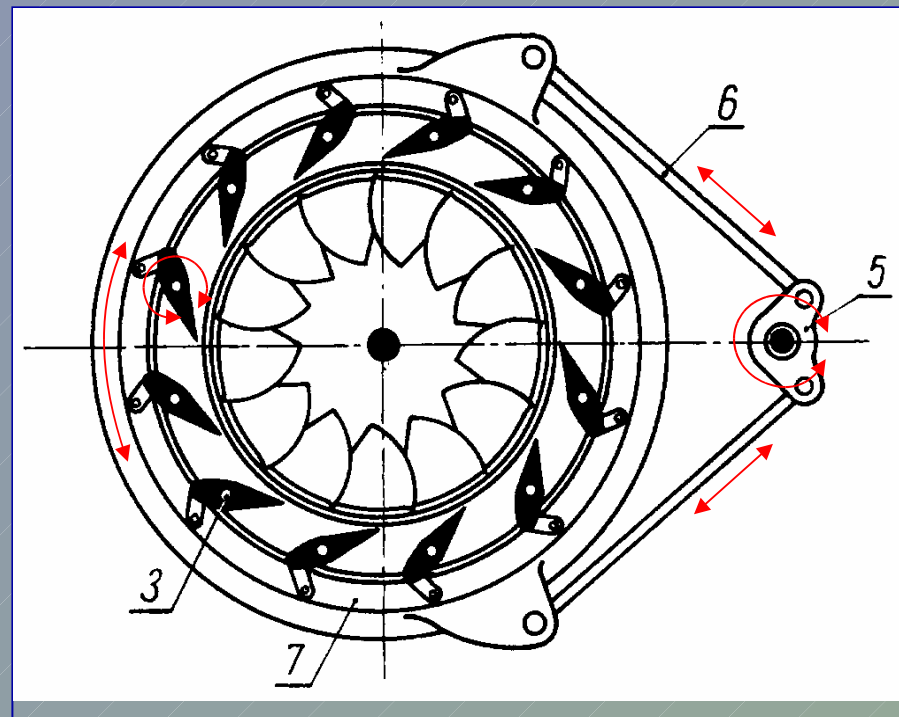
TURBINA FRANCISA - WIRNIK



- ▶ Wirnik turbiny Francisa składa się z dwu wieńców wewnętrznego (4) i zewnętrznego (5) oraz łączących je łopatek (6).
- ▶ W wieńcu wewnętrznym wykonuje się otwory odciążające, zapewniające zmniejszenie sił masowych wywołanych naporem hydraulicznym
- ▶ Kształt wirnika i samych łopatek jest ściśle związany z szybkobieżnością turbiny.

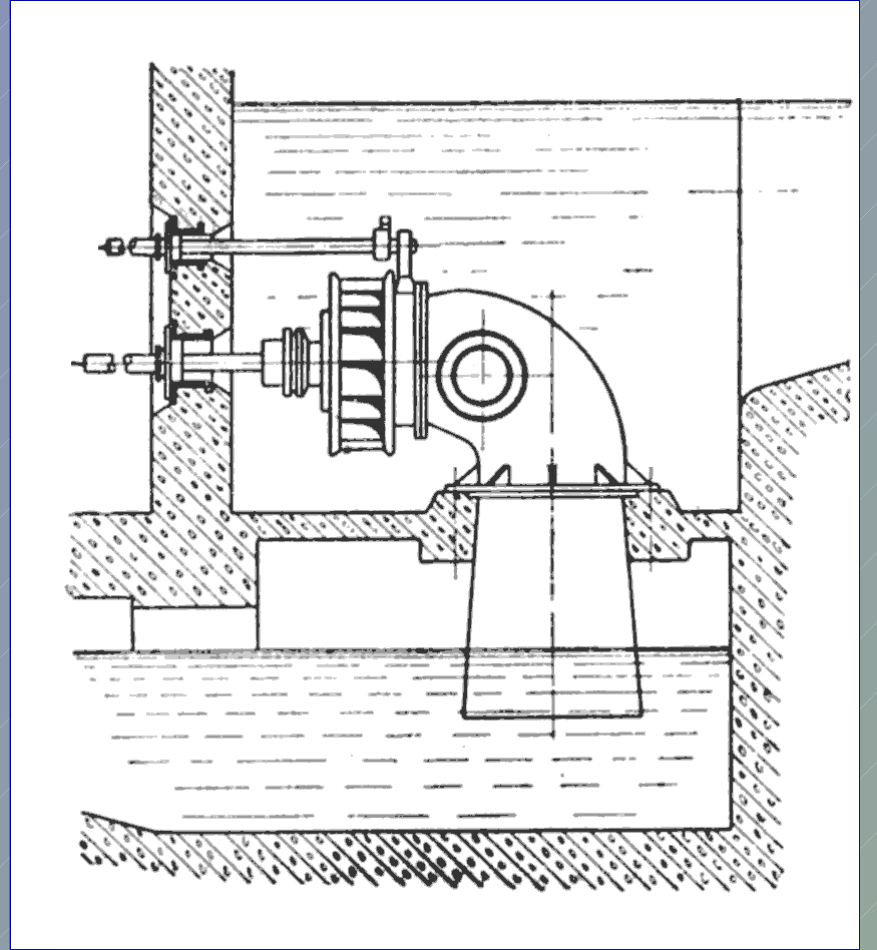
TURBINA FRANCISA - KIEROWNICA

- ▶ Podstawowymi elementami kierownicy są odpowiednio wyprofilowane, ruchome łopatki (3), obracające się wokół sworzni dystansowych, łączących podstawę kierownicy z jej pokrywą.
- ▶ Przesławianie łopatek kierownicy jest realizowane przez pierścień regulacyjny (7) i łączniki, a następnie przez cięgna (6) i dźwignę dwuramienna (5).

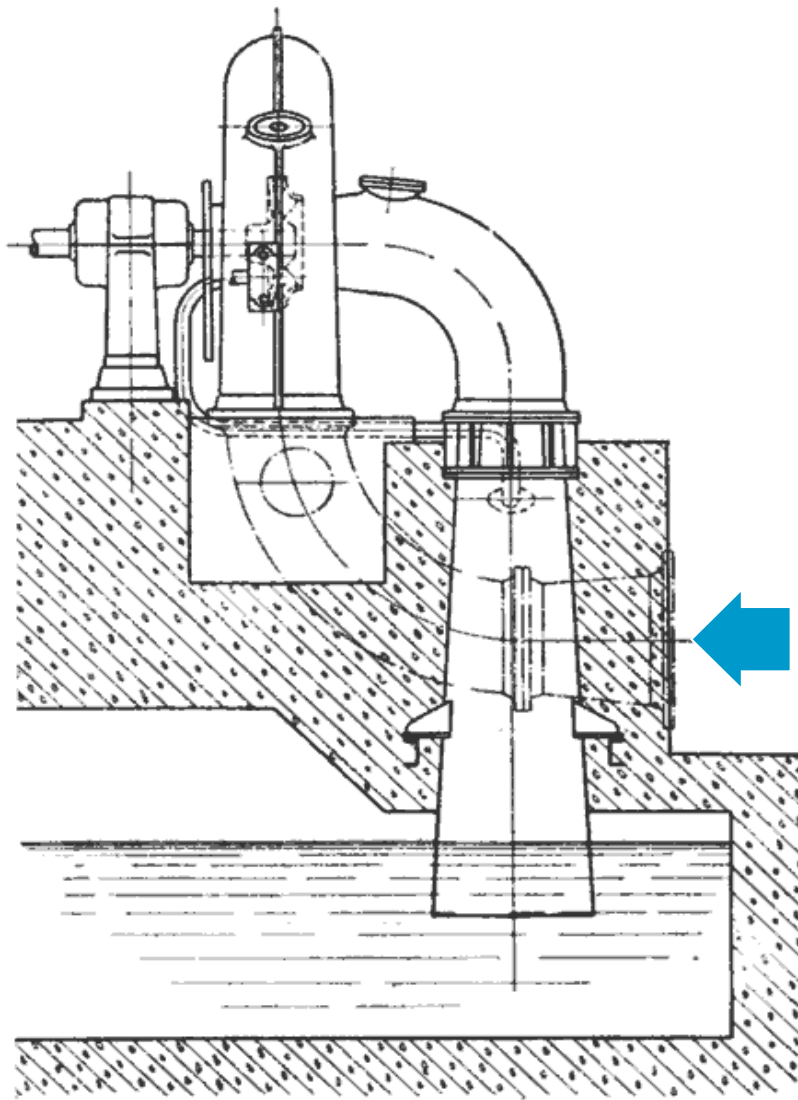
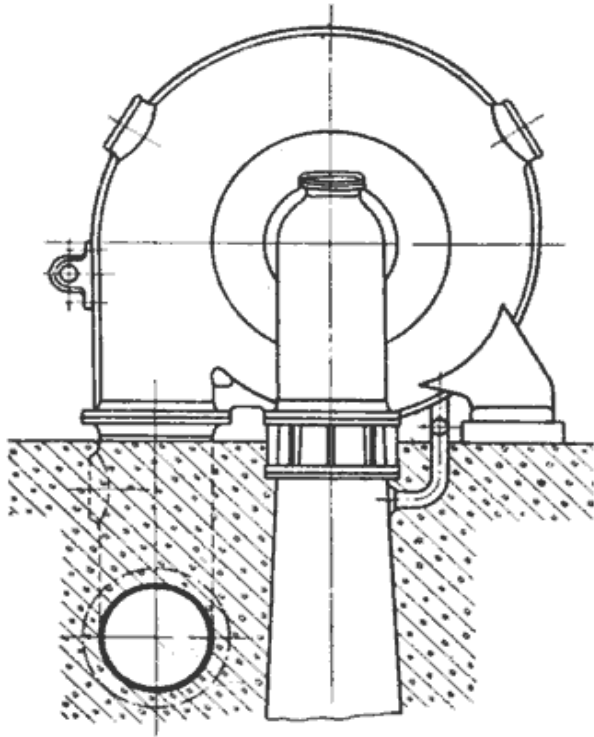


TURBINA FRANCISA - ZALETY

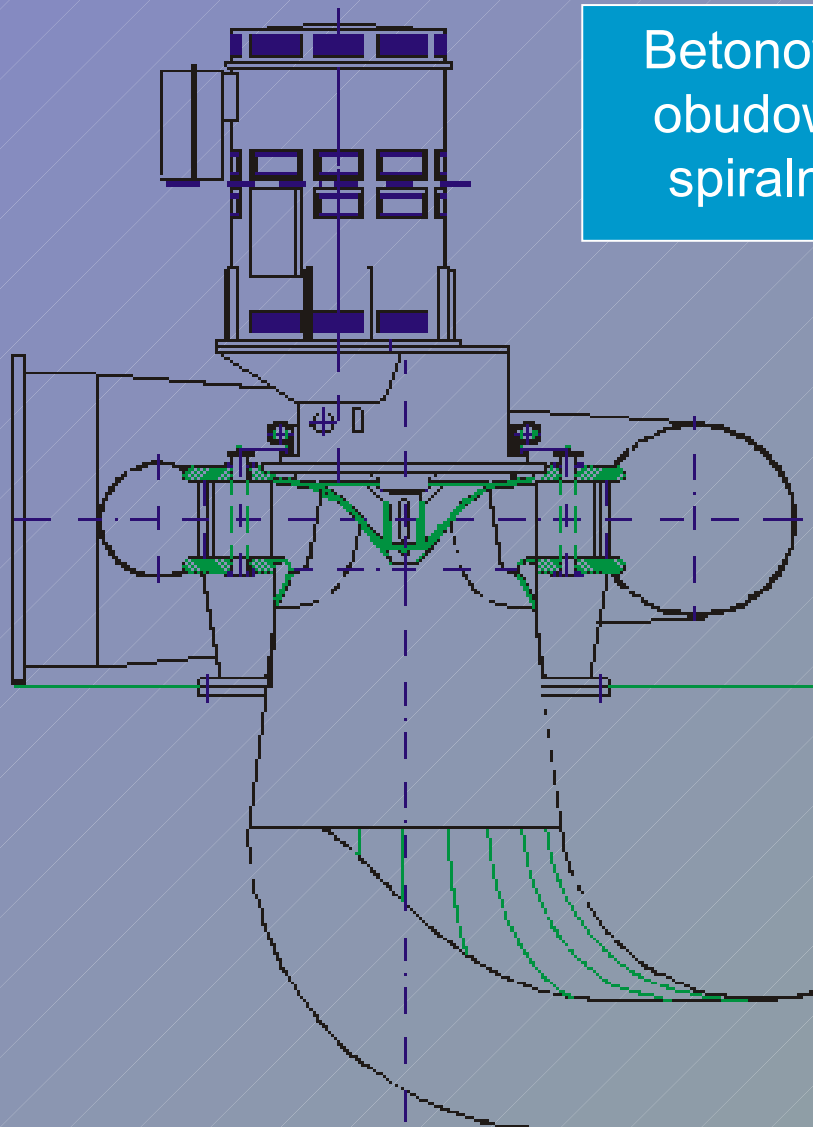
- ▶ Zasadniczą zaletą turbiny Francisa jest możliwość produkowania jej w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych.
- ▶ Pozwala to na odpowiednie dobranie turbiny do istniejących warunków lokalnych, budowli hydrotechnicznych i wyposażenia mechanicznego.
- ▶ W krajowych małych elektrowniach wodnych najczęściej są stosowane pionowe turbiny Francisa umieszczane w komorze otwartej, rzadziej zamkniętej, lub też turbiny o wale pionowym z krzywakiem, w spirali, bliźniacze i wielowirnikowe.



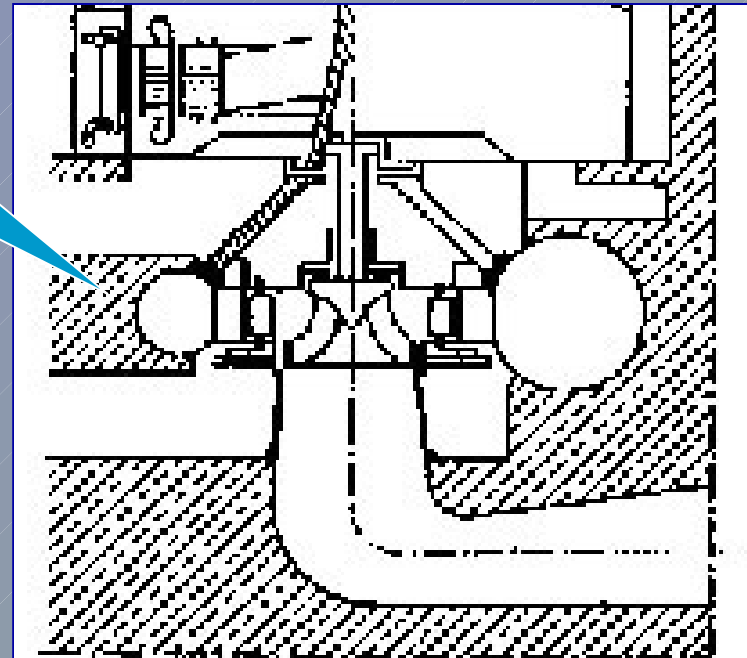
TURBINA FRANCISA



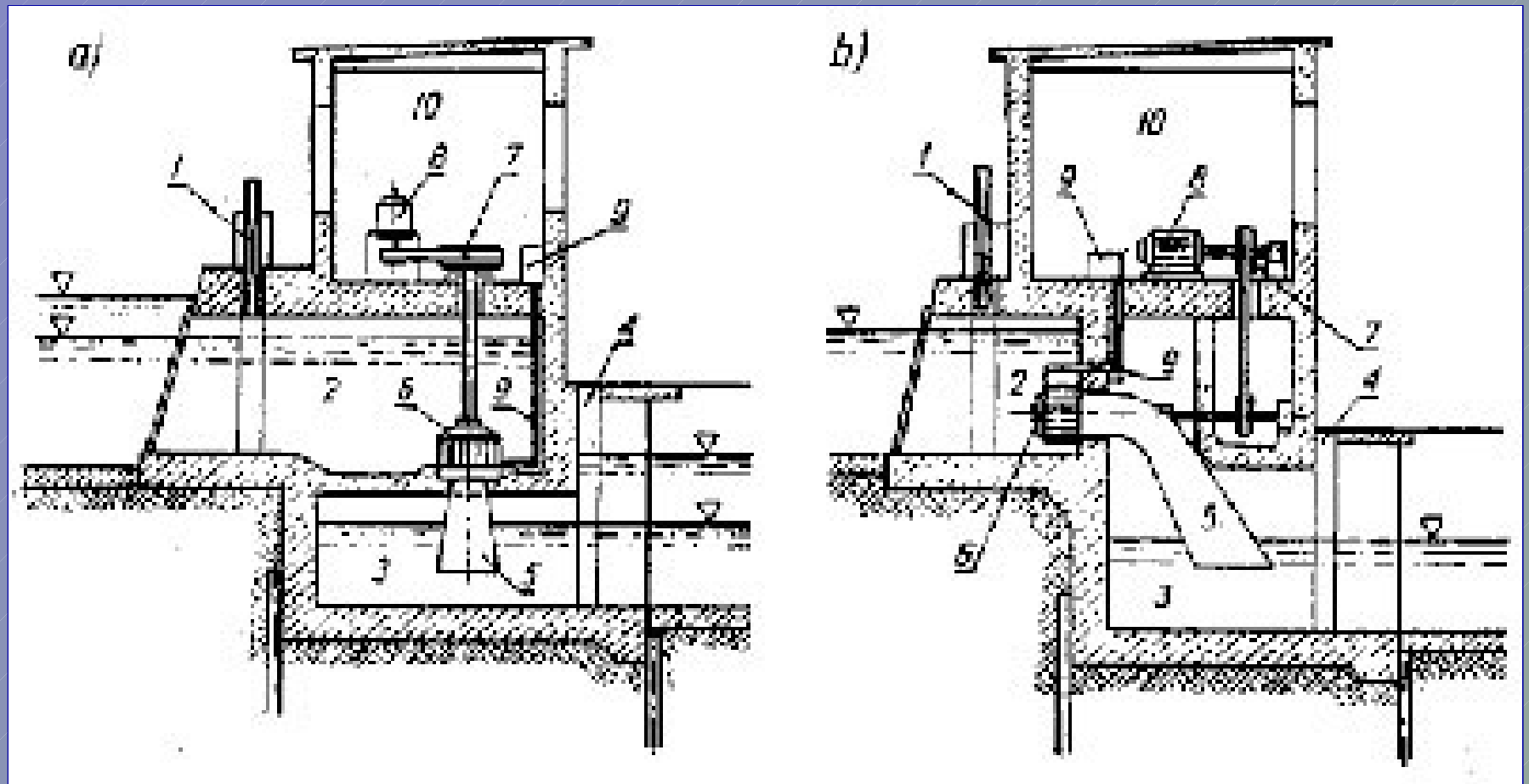
TURBINA FRANCISA



Betonowa
obudowa
spiralna



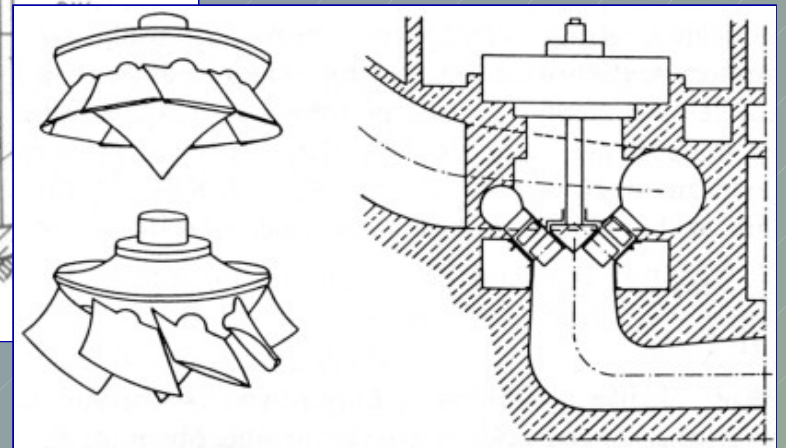
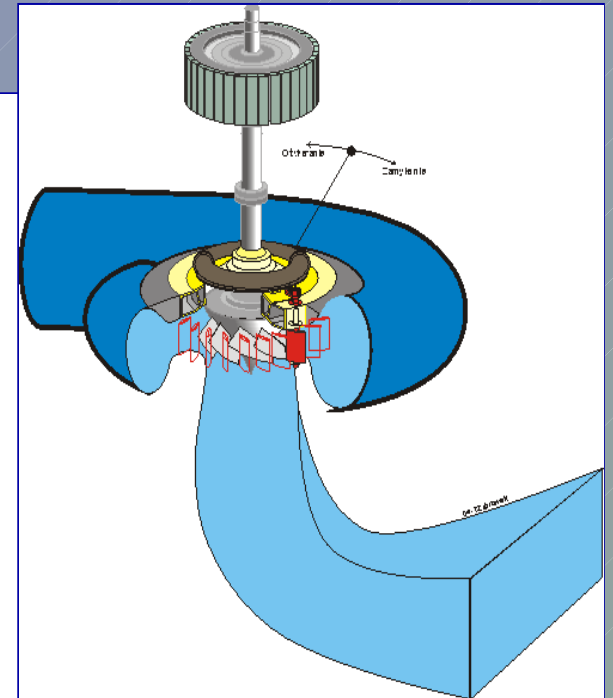
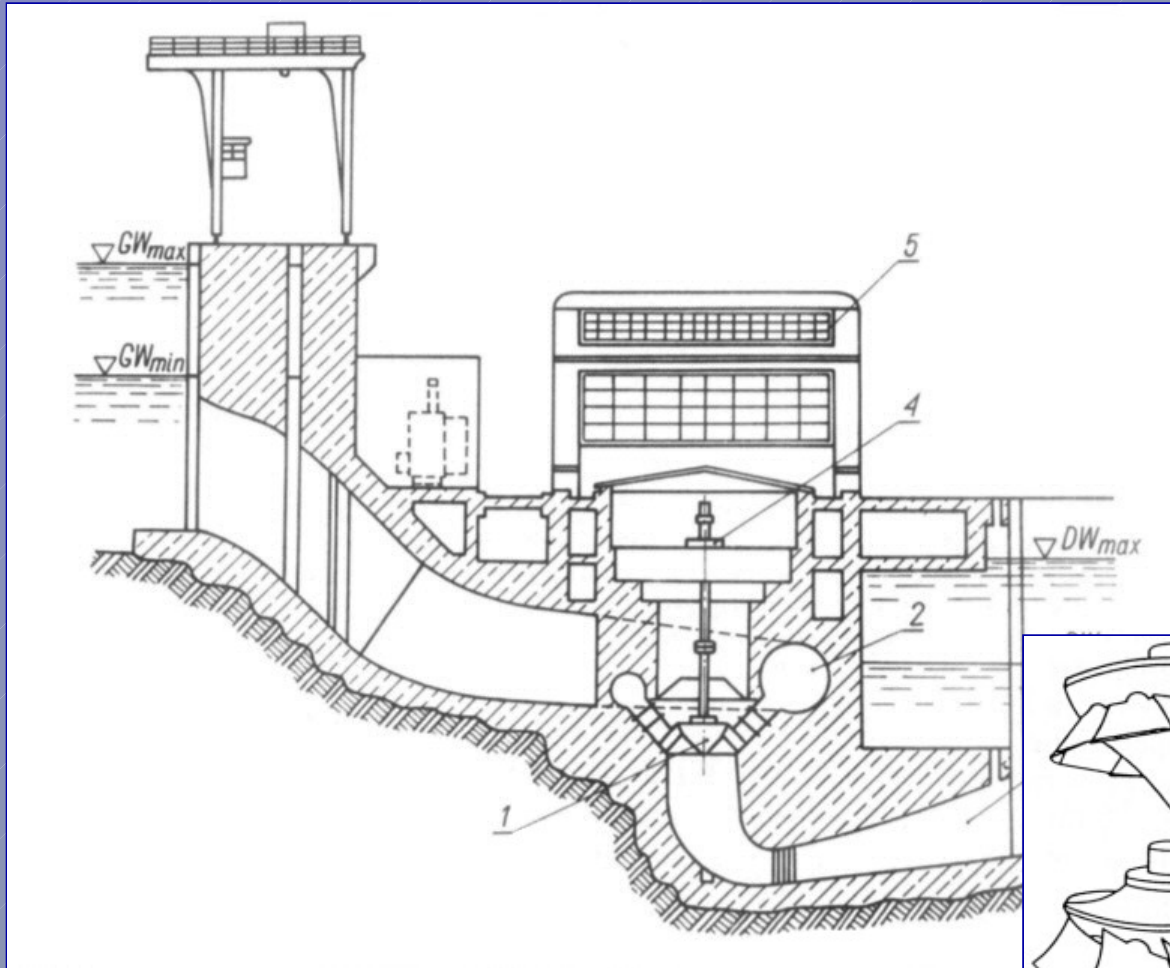
TURBINA FRANCISA



TURBINA DERIAZA

- ▶ **Turbina Deriaza** jest znacznie bardziej skomplikowana niż turbina Francisa, gdyż jej łopatki są przestawialne.
- ▶ Stosuje się w niej kierownice promieniowe jak również ukośne.
- ▶ Zakres spadów przewyższa turbiny Kaplana i przekracza 100 m.
- ▶ Turbiny Deriaza są odwracalne i przy odpowiedniej konstrukcji mogą pracować jako pompy co jest wykorzystywane w elektrowniach szczytowo pompowych

TURBINA DERIAZA

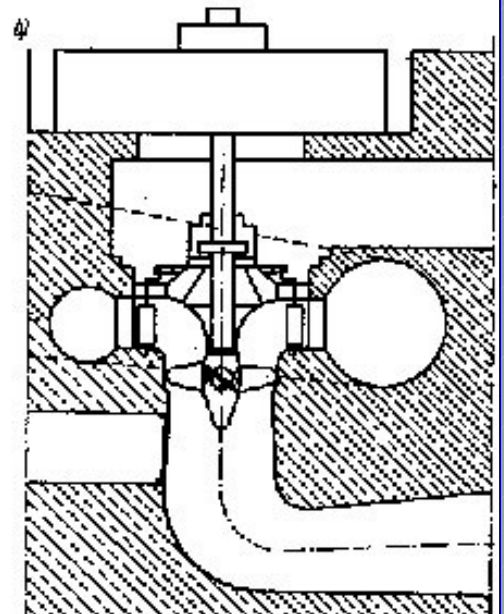


TURBINA KAPLANA

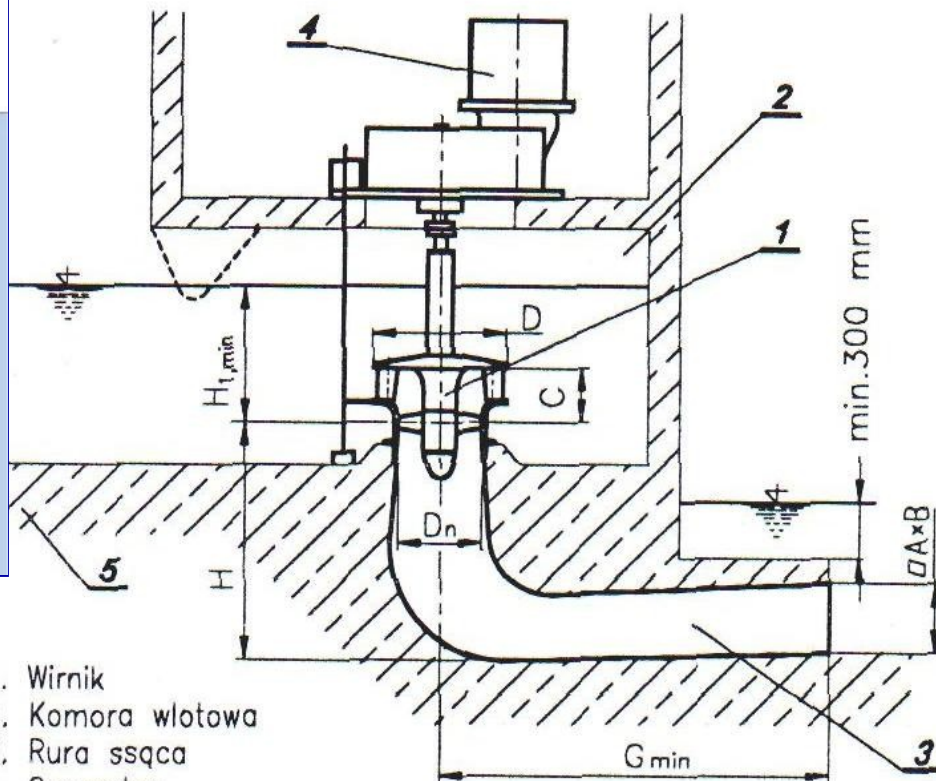
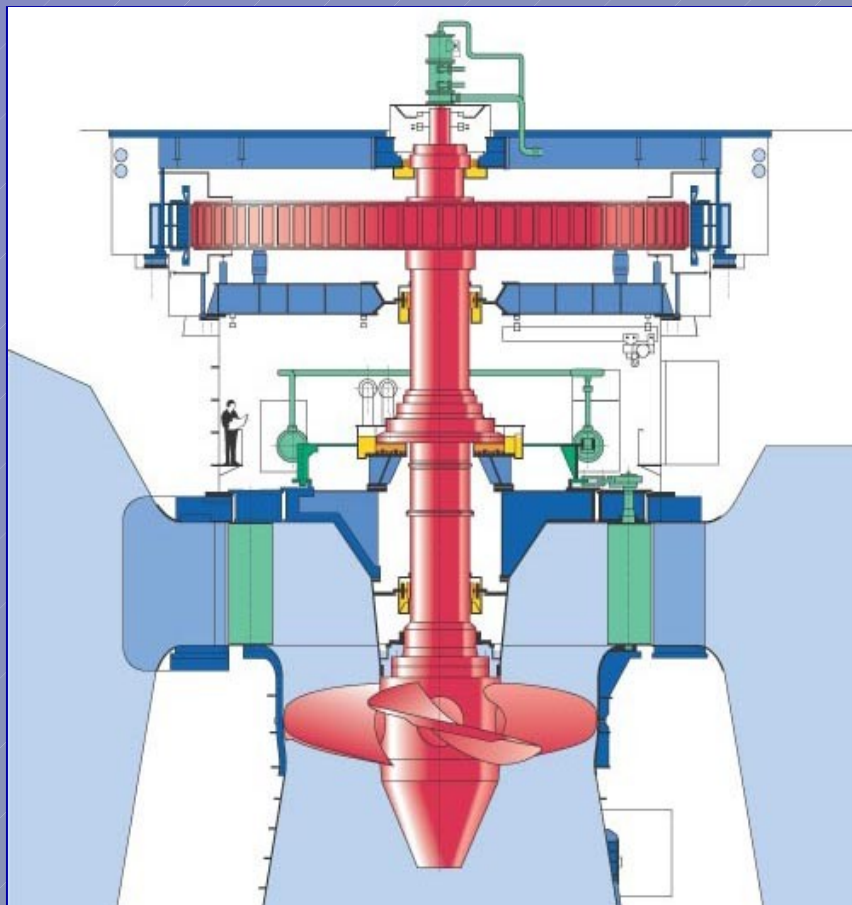
- ▶ **Turbina Kaplana** skonstruowana w 1912 roku przez *Viktora Kaplana*.
- ▶ Turbina Kaplana posiada pionowy wał (może być też poziomy) z wirnikiem wyposażonym w 2 do 8 łopatek w postaci śmigła.
- ▶ Łopatki osadzone w piaście wirnika są nastawialne podobnie jak łopatki kierownicy.
- ▶ Doprowadzenie i ujście wody realizowane jest podobnie jak w turbinie Francisa.
- ▶ Regulacja mocy turbiny może się odbywać dwustopniowo przez zmianę ustawienia kątów łopatek kierownicy i kąta ustawienia łopatek wirnika.

TURBINA KAPLANA

- ▶ Turbiny Kaplana pracują w zakresie spadów od $1 \div 50(70)$ m i uzyskują najwyższe sprawności spośród innych typów turbin, w znacznym zakresie zmian obciążenia od 40 do 100 %.
- ▶ Uzyskiwane sprawności są rzędu 90 %, a maksymalna sprawność to 93 %.



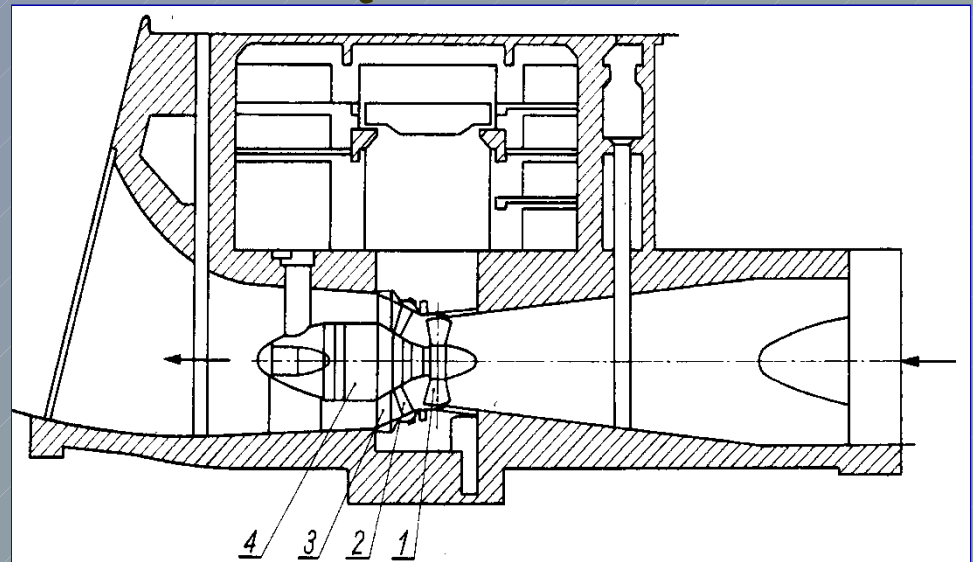
TURBINA KAPLANA



1. Wirnik
2. Komora wlotowa
3. Rura ssqca
4. Generator
5. Betony

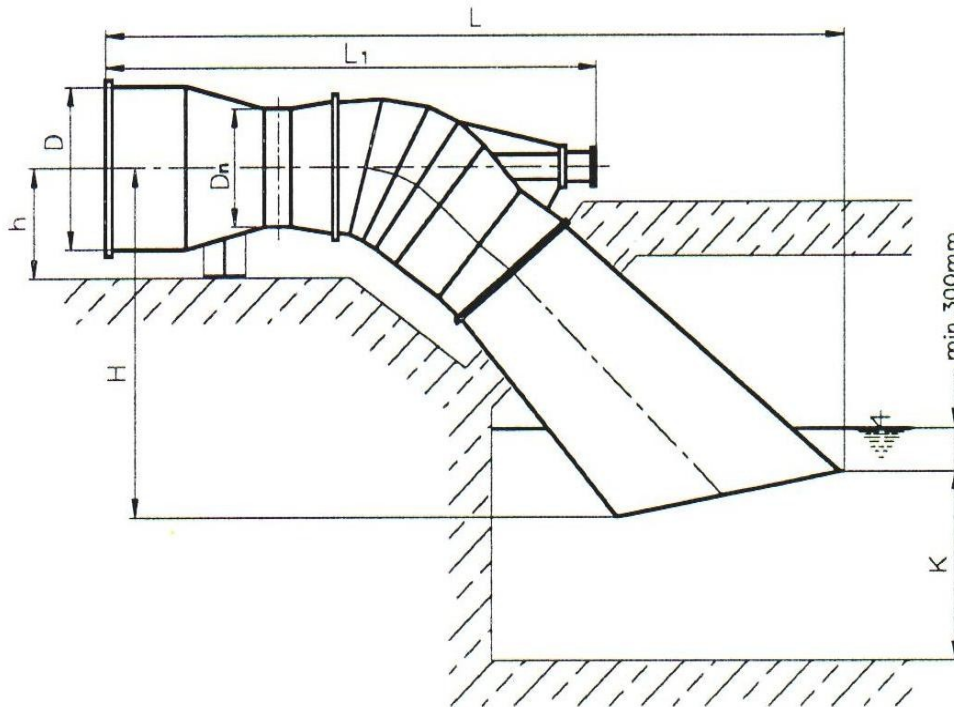
TURBINA RUROWA Z WIRNIKIEM ŚMIGŁOWYM

- ▶ **Turbina śmigłowa** to uproszczona wersja turbiny Kaplana z pojedynczą regulacją (tylko łopatek wirnika lub tylko kierownicy), stosowana w siłowniach średniej i małej mocy w obszarze niskich spadów (< 20 m).
- ▶ Znaczne uproszczenie kształtu części przepływowej turbiny rurowej powoduje istotne zmniejszenie strat hydraulicznych oraz upraszcza rozwiązanie budowli hydrotechnicznej.

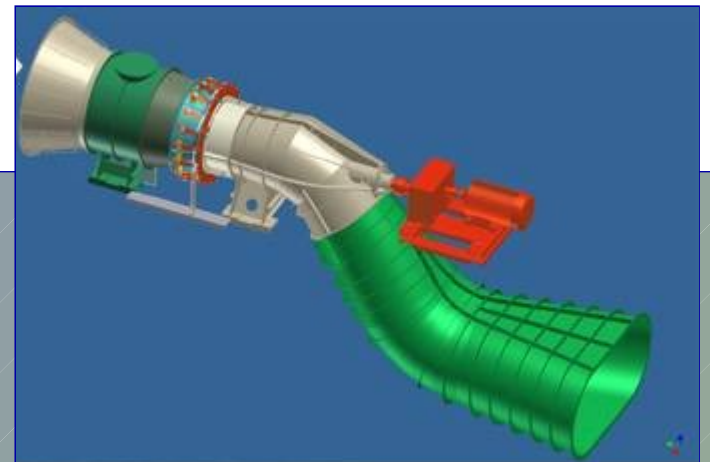


TURBINA RUROWA Z WIRNIKIEM ŚMIGŁOWYM

- Turbina rurowa z pojedynczo zagiętą rurą ssącą (typ K)

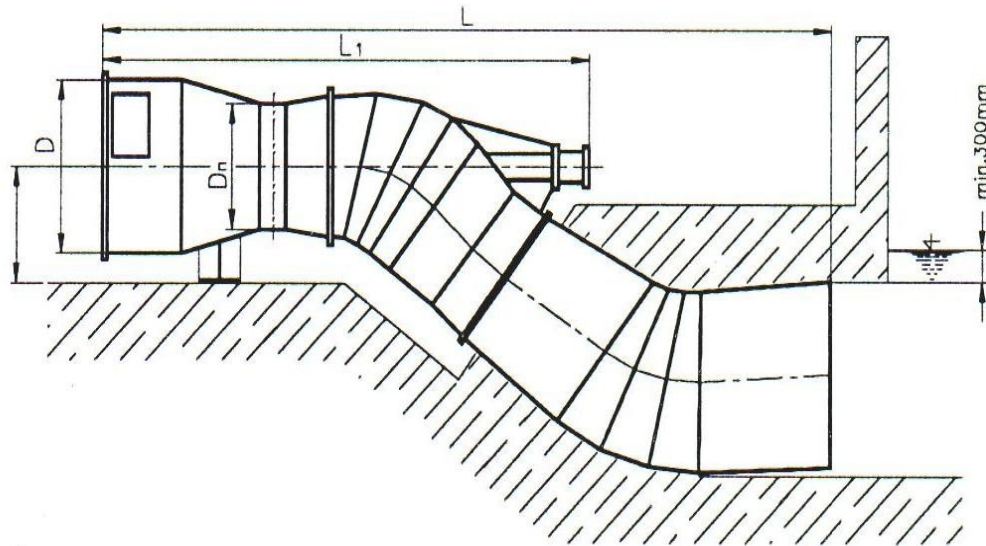


D_n	D	L_1	L	K	H	h	masa [t]
500	1000	3100	3340	960	1550	650	1,3
650	1000	3250	4160	1250	2000	650	2,1
900	1200	3500	5640	1750	2730	900	5,4
1100	1600	5800	7250	2100	3330	1100	7,0
1300	1800	6080	8090	2500	4120	1200	8,6



TURBINA RUROWA Z WIRNIKIEM ŚMIGŁOWYM

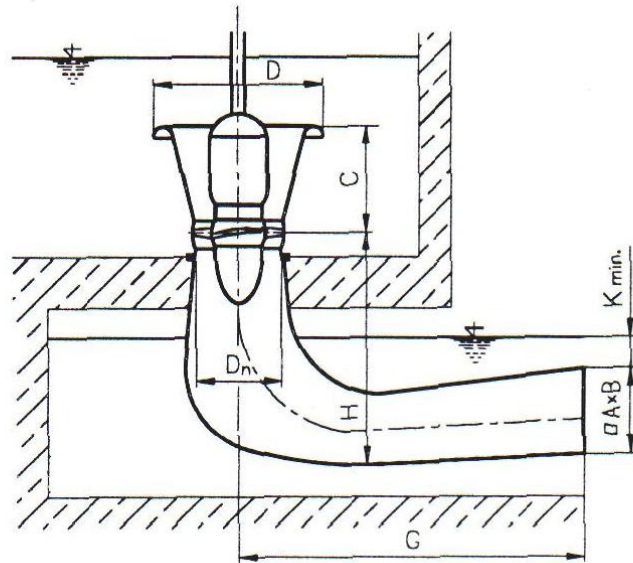
- Turbina rurowa z podwójnie zagiętą rurą ssącą (typ S)



D_n	D	L_1	L	h	masa [t]
500	1000	3100	4145	650	1,3
650	1000	3250	4100	650	2,1
900	1200	3600	5400	900	5,4
1100	1600	5800	7100	1100	7,0
1300	1800	6080	8050	1200	8,6

TURBINA RUROWA Z WIRNIKIEM ŚMIGŁOWYM

- **Turbina rurowa kielichowa**

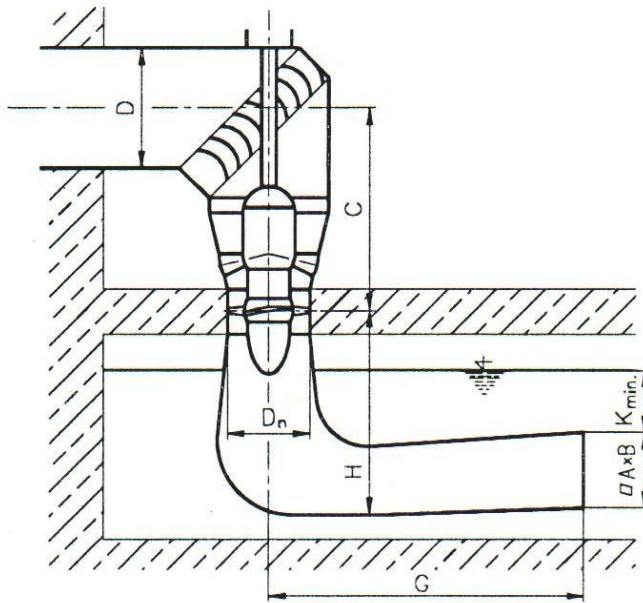


D _n	D	C	G	H	K _{min}	A	B
400	800	428	1440	996	240	1248	276
500	1000	510	1800	1245	250	1560	345
650	1300	633	2340	1618	265	2028	448
750	1500	715	2700	1867	280	2340	517
900	1800	838	3240	2241	290	2808	621
1100	2200	1002	3960	2739	310	3432	759

TURBINA RUROWA Z WIRNIKIEM ŚMIGŁOWYM

Turbiny rurowe pionowe (o pionowej osi wału)

- Turbina rurowa kątowa



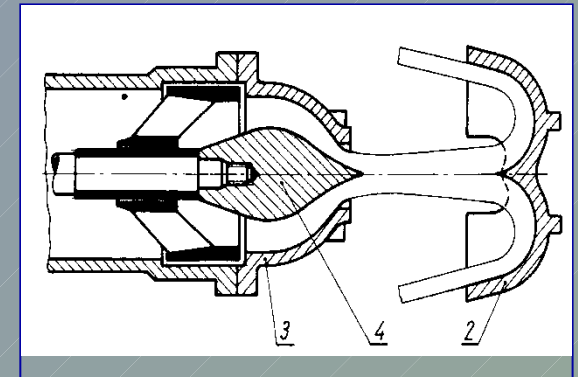
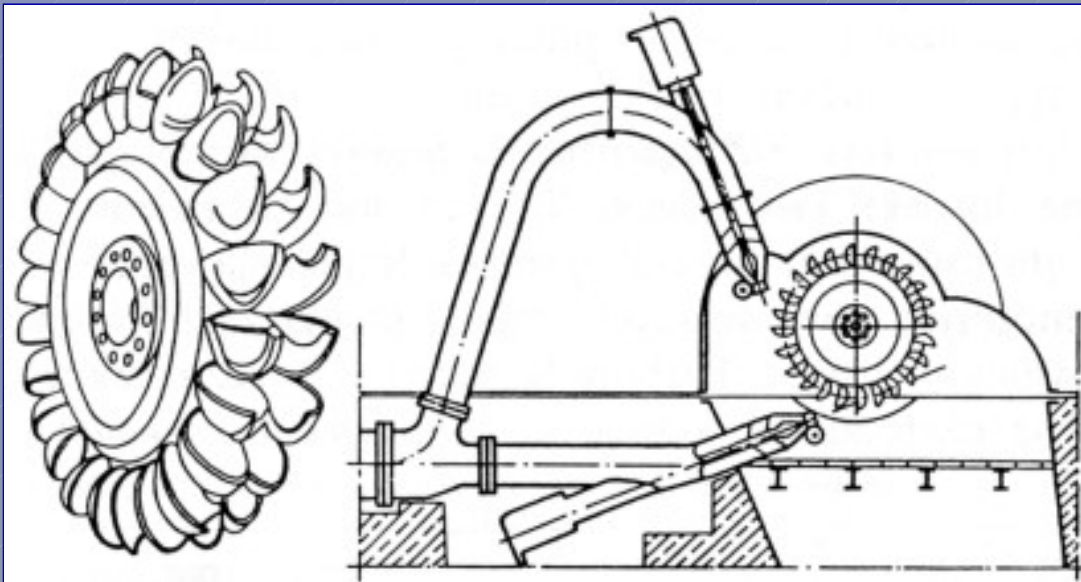
D_n	D	C	G	H	K_{min}	A	B
400	675	1070	1440	996	240	1248	276
500	795	1350	1800	1245	250	1560	345
650	973	1770	2340	1618	265	2028	448
750	1092	2050	2700	1867	280	2340	517
900	1271	2470	3240	2241	290	2808	621
1100	1509	3030	3960	2739	310	3960	759

TURBINA PELTONA

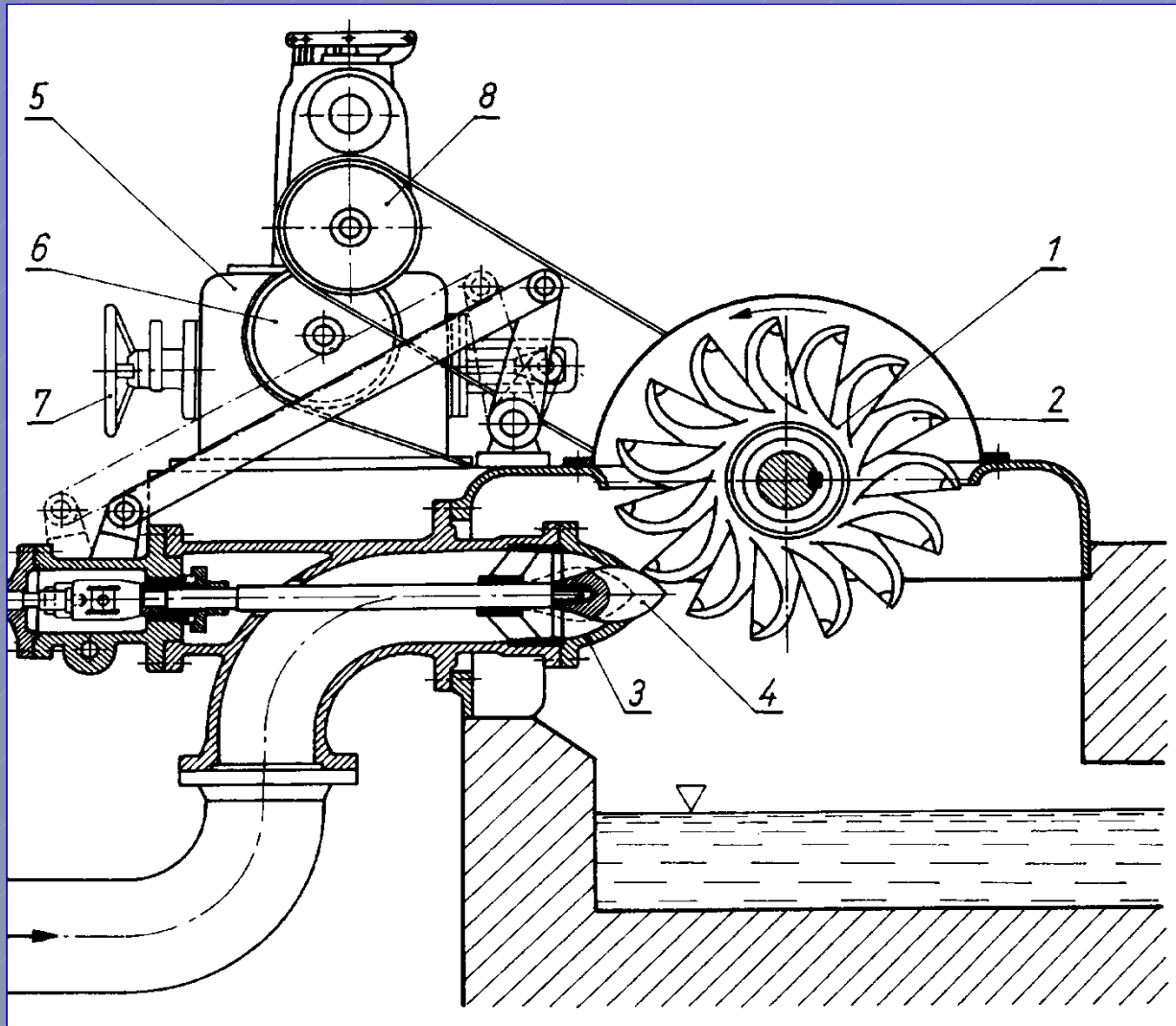
- ▶ **Turbina Peltona** (1880) jest rozwinięciem “koła natryskowego”, w którym łopatki są ustawione pod kątem 90 stopni do strumienia wody, a protoplastą dla obydwu jest koło młyńskie.
- ▶ Turbiny systemu Peltona stosuje się dla spadków $H > 500$ m, a w wyjątkowych wypadkach uzasadnionych konstrukcyjnie zamiast turbin Francisza od $H = 100$ m.
- ▶ W turbinie Peltona dla zwiększenia sprawności stosuje się zamiast prostych łopatek specjalnie wyprofilowane łopatki na kształt dwóch połączonych czarek (dwie półkolisty sfery), na których strumień wody dużo łagodniej zmienia kierunek.

TURBINA PELTONA

- ▶ Turbiny Peltona buduje się z wałami poziomymi i pionowymi.
- ▶ Przy wałach poziomych stosuje się max. dwie dysze wylotowe (przy większej ilości ze względu na zderzanie się strumieni z poprzedzającej dyszy moc maleje) a przy wałach pionowych do 6 dysz.

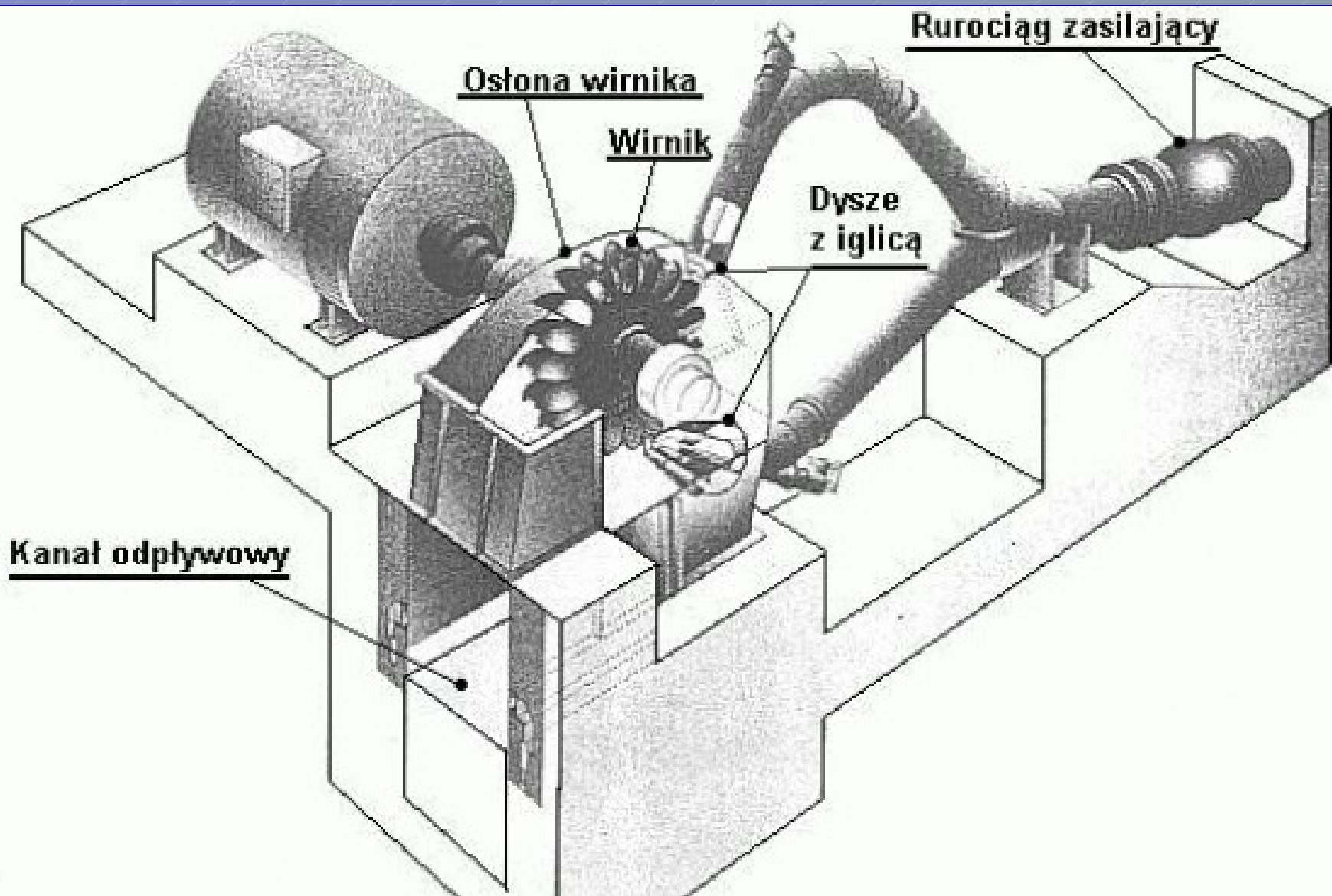


TURBINA PELTONA



- 1 - wirnik,
- 2 - łopatki (czarki),
- 3 - dysza,
- 4 - iglica,
- 5 - regulator,
- 6 - napęd pompy oleju regulatora,
- 7 - kółko do ręcznej regulacji,
- 8 - napęd wahadła regulatora

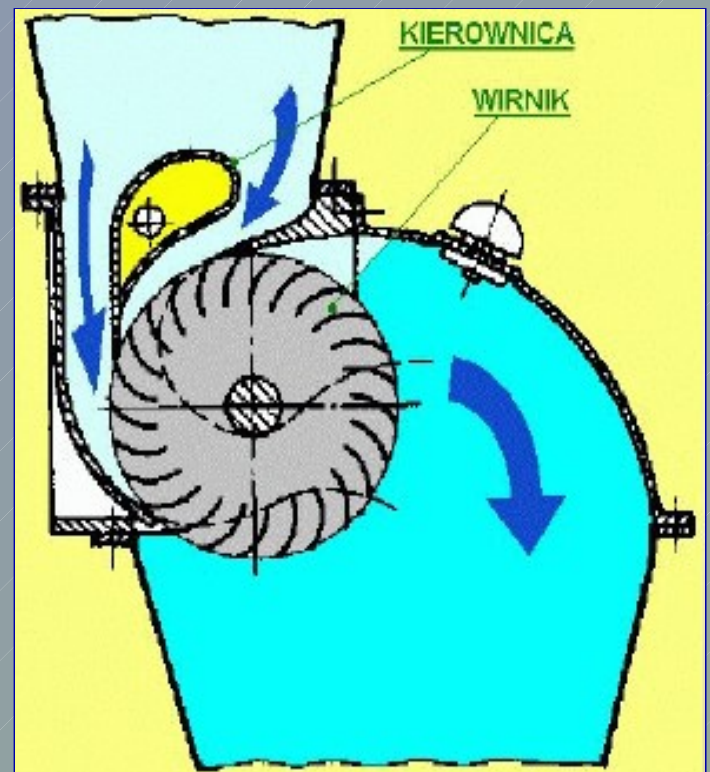
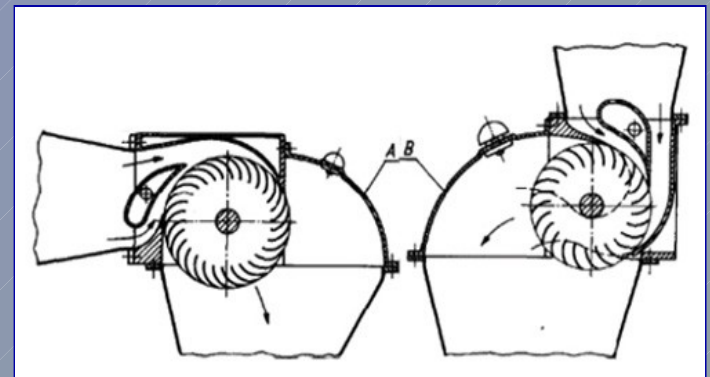
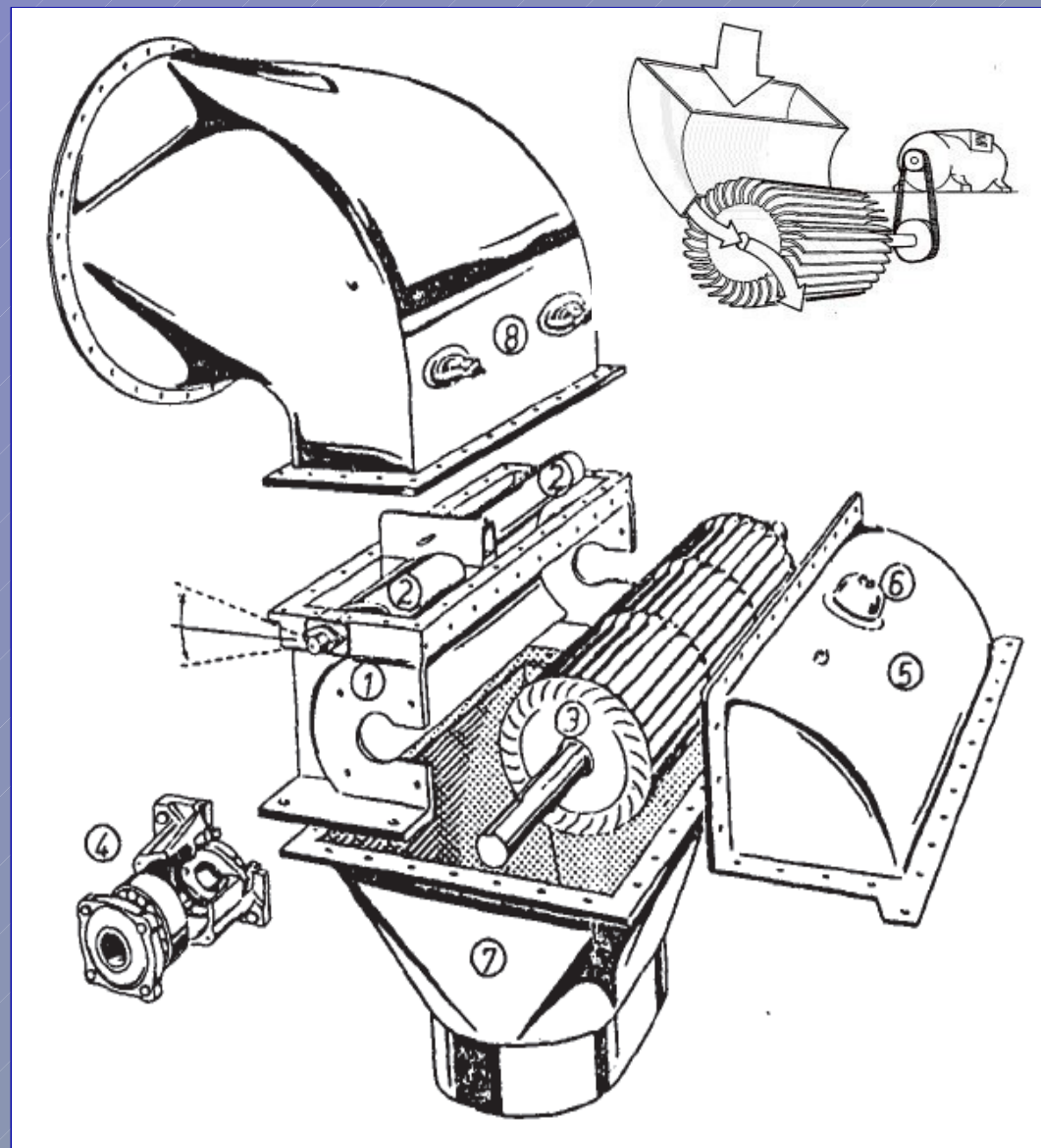
TURBINA PELTONA



TURBINA BANKI-MICHELLA

- ▶ **Turbina Banki-Michella** to akcyjna turbina przepływowa z szerokim strumieniem wody o przekroju prostokątnym, który przepływa dwukrotnie przez palisadę łopatkową wirnika.
- ▶ Wirnik zasilany jest poprzez odpowiednio wyprofilowaną 1-łopatkową kierownicę.
- ▶ W części konstrukcji turbin wprowadzono podział wirnika i kierownicy na dwie części wąską w proporcji $1/3$ długości i szeroką w proporcji $2/3$ długości dostosowując turbiny do trzech różnych natężeń przepływu.
- ▶ Turbiny tego typu są stosowane na spady od 2 do 50m i używa się ich w małych elektrowniach wodnych

TURBINA BANKI-MICHELLA



TURBINY WODNE - PORÓWNANIE

- ▶ Poszczególne typy turbin różnią się od siebie nie tylko rozwiązaniami konstrukcyjnymi, lecz także własnościami energetycznymi, oraz eksploatacyjno-ruchowymi (rozbieg, kawitacja, możliwości regulacyjne).
- ▶ Każdemu typowi turbiny jest przypisany określony zalecany zakres spadków i szybkobieżności.
 - **Dynamiczny wyróżnik szybkobieżności turbiny**
 - prędkość obrotowa, jaką miałaby turbina podobna do danej, pracujące pod spadem $H = 1\text{m}$ i dająca moc $N = 1\text{KM}$.
 - **Kinematyczny wyróżnik szybkobieżności turbiny**
 - prędkość obrotowa, jaką miałaby turbina podobna do danej, pracujące pod spadem $H = 1\text{m}$ z przełykiem $Q = 1\text{m}^3/\text{s}$.

TURBINY WODNE - PORÓWNANIE

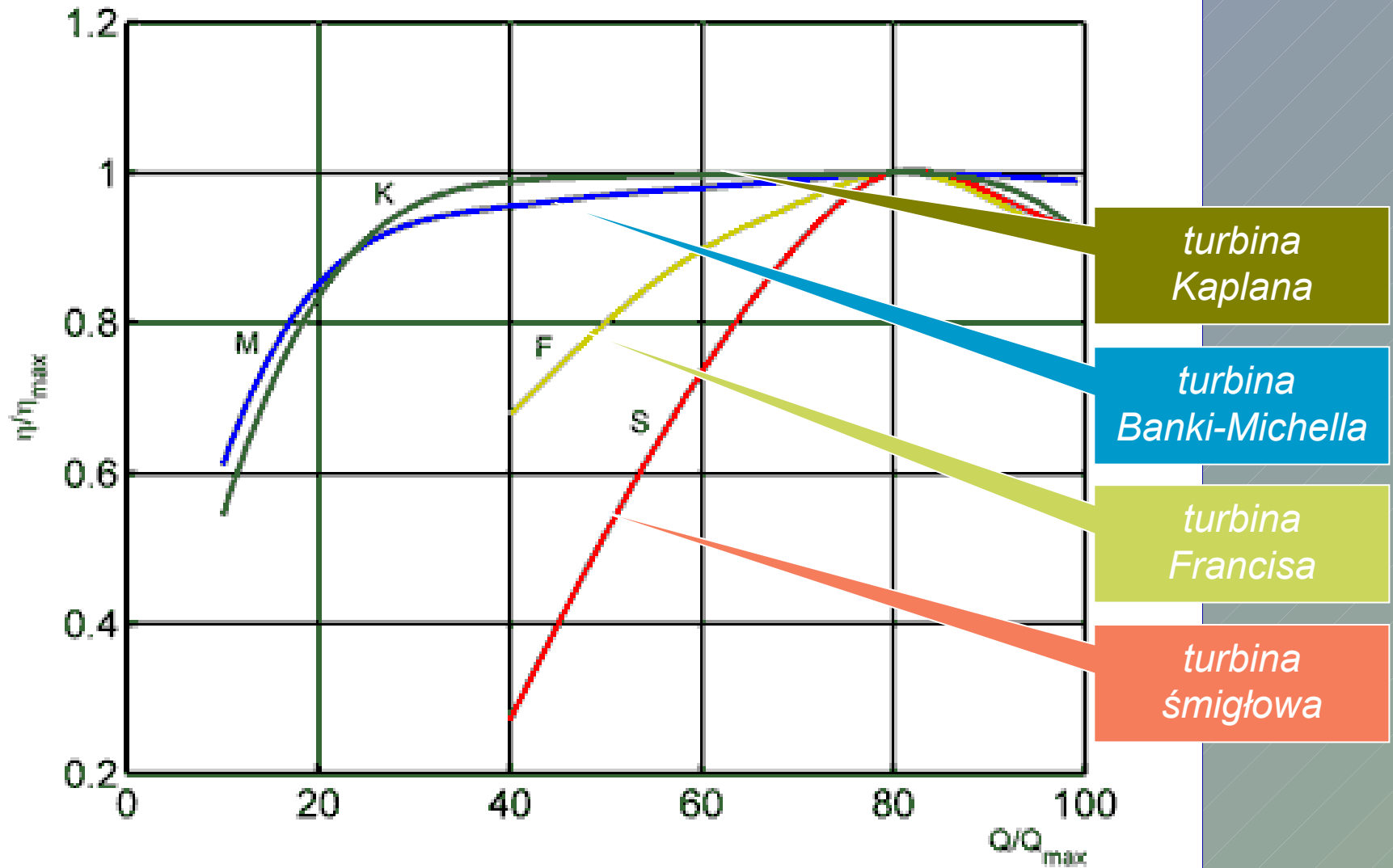
Wyróżnik szybkości i zakresy spadków przy jakich mogą pracować turbiny

Rodzaj turbiny		Wyróżnik szybkobieżności n_s	Zakres spadków H
Turbiny akcyjne (natryskowe)			
Peltona	wolnobieżna	2 ÷ 13	1800 ÷ 1000
	średniobieżna	13 ÷ 25	1000 ÷ 700
	szybkobieżna	26 ÷ 50	700 ÷ 100
Banki-Mitchalla		30 ÷ 200	100 ÷ 2
Turbiny reakcyjne (naporowe)			
Deriaza		50 ÷ 500	300 ÷ 13
Francisa	wolnobieżna	60 ÷ 150	500 ÷ 110
	średniobieżna	150 ÷ 300	110 ÷ 50
	szybkobieżna	300 ÷ 450	50 i mniej
Kaplana	wolnobieżna	450 ÷ 600	70 ÷ 30
	średniobieżna	600 ÷ 750	30 ÷ 10
	szybkobieżna	750 ÷ 900	10 i mniej

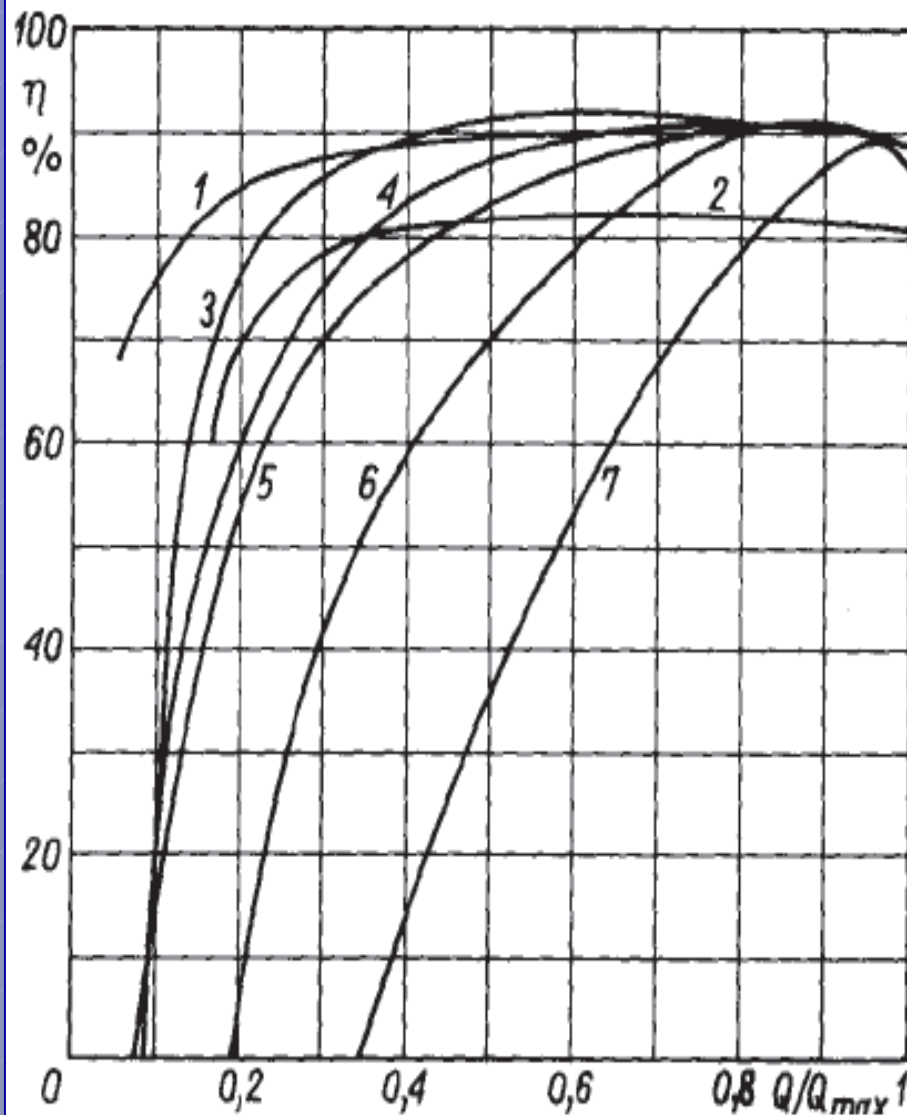
TURBINY WODNE - PORÓWNANIE

- ▶ Oceniając właściwości energetyczne turbin, należy porównać ich charakterystyki sprawnościowe.
- ▶ Z wykresów wynika, że dla różnych typów turbin (z wyjątkiem turbiny Banki-Michella) maksymalne wartości sprawności są sobie równe.
- ▶ Dla szerokiego zakresu przełyków kształty charakterystyk są jednak bardzo zróżnicowane:
 - Płaska charakterystyka zapewnia dobre efekty produkcyjne przy znacznych zmianach przełyku turbiny.
 - Przy stromej charakterystyce praca z dużą sprawnością jest możliwa jedynie dla bardzo wąskiego zakresu zmian przełyku.

TURBINY WODNE - PORÓWNANIE



TURBINY WODNE - PORÓWNANIE



Sprawność turbiny

1. Peltona
2. Banki-Michella
3. Kaplana (klasyczna $n_s=650$)
4. Kaplana (z pojedynczą reg. łopatek wirnika $n_s=700$)
5. Francisa ($n_s=200$)
6. Francisa ($n_s=400$)
7. Śmigłowa (regulowana kierownica $n_s=650$)

TURBINY WODNE - PORÓWNANIE

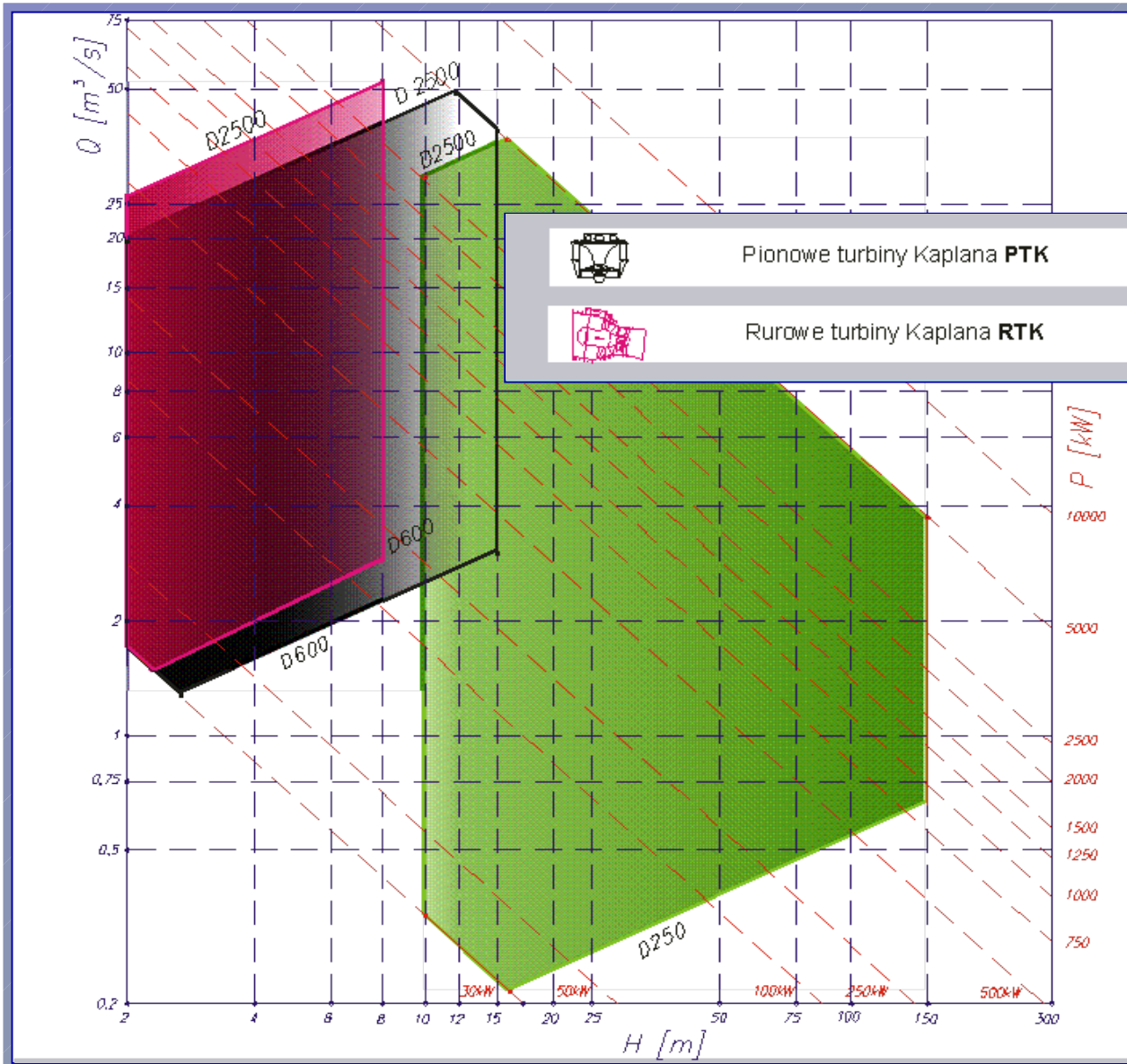
Współczynnik kawitacji

szybkobieżność	Turbina Francisa		Turbina Kaplana	
	n_s	σ	n_s	σ
wolnobieżna	50 - 150	0,03 -0,08	350 - 500	0,30 – 0,50
średnobieżna	151 - 250	0,08 – 0,15	501 -750	0,50 – 1,00
szybkobieżna	251 - 450	0,15 -0,30	751-1100	1,00 – 2,50

TURBINY WODNE - PORÓWNANIE

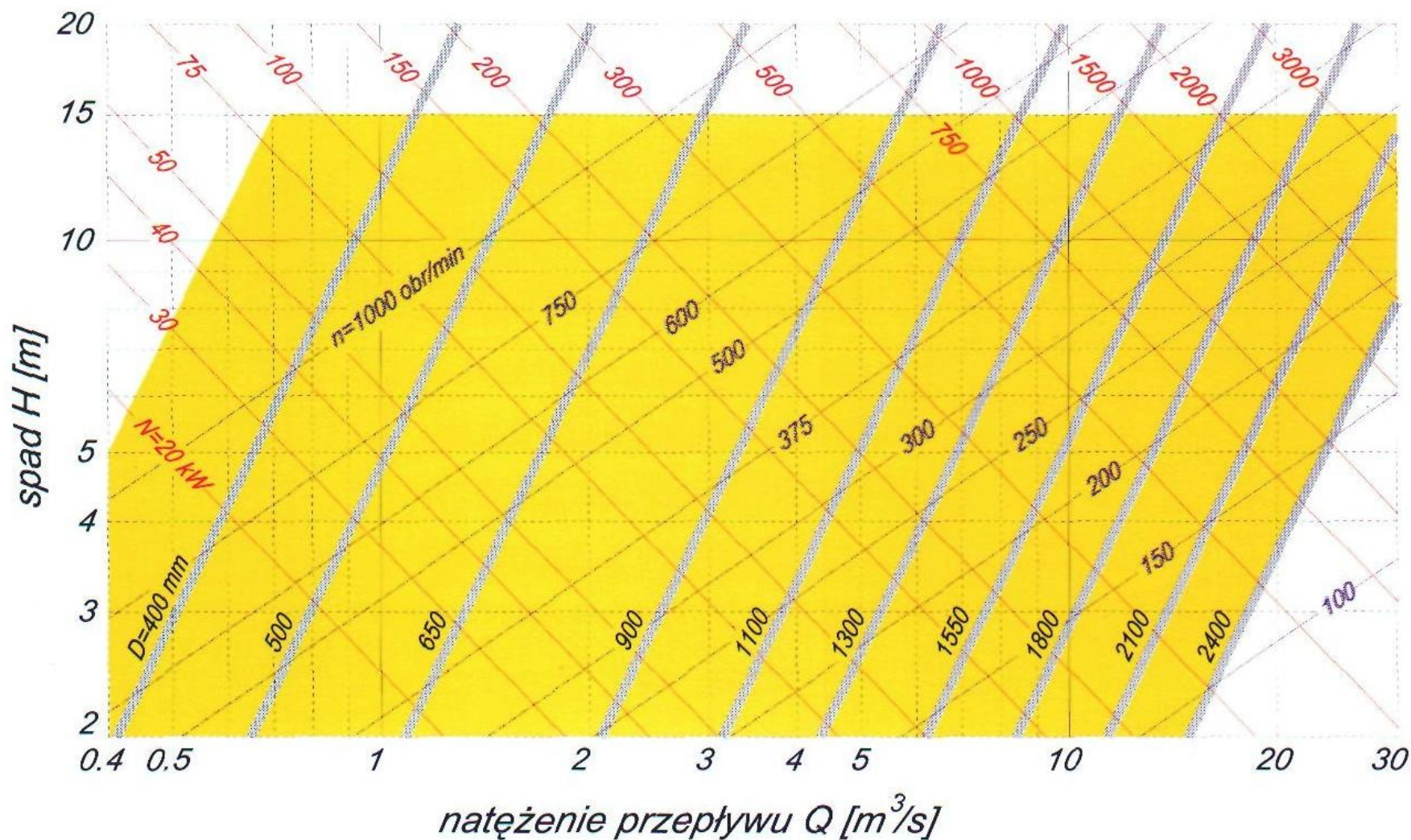
Typ i system turbiny	Spad H	Przełyk Q	Moc turbiny N_t	Minimalne częściowe obciążenie	Prędkość obrotowa n_t
	m	m ³ /s	kW	%	obr/min
Typ Kaplan					
- klasyczny	1,0 – 5,0	0,5 – 1,0	5 - 450	33	100 - 750
- rurowy A	1,5 – 6,0	3 - 12	40 - 600	20	15- - 400
- rurowy S	3,0 - 10	1 - 15	25 - 1200	20	180 - 1000
- rurowy Z	5,0 - 25	2,5 - 15	100 -3000	20	250 - 1000
Typ Francis					
- Reiffenstein	5,0 - 40	0,1 – 1,5	10 - 400	50	250 - 1500
- w komorze	20 - 80	0,1 – 2,0	12 - 500	40	600 - 1500
- w spirali	15-150	0,1 – 8,0	15 - 1200	40	150 - 150
Banki-Michella	2,0 - 50	0,02 – 7,0	10 - 500	16	150 - 1500
Typ Pelton					
- mini	15 – 50	0,025 – 0,2	10 – 50	15	500 -1500
- mały	40 -200	0,015 – 0,2	10 – 100	15	500 -1500
- poziomy	75 - 500	0,01 – 1,0	10 - 2000	15	500 -1500

TURBINY WODNE - PORÓWNANIE



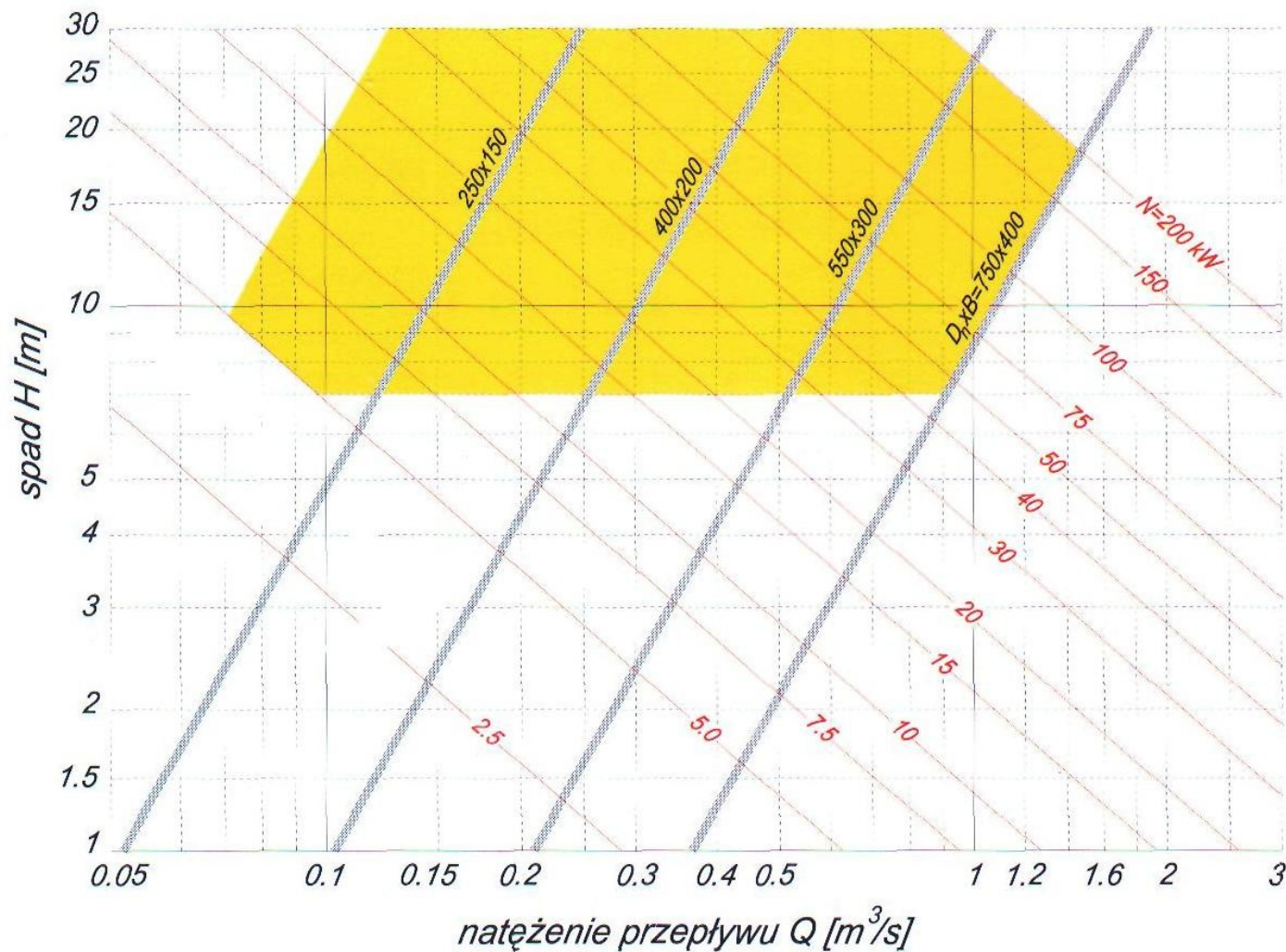
TURBINY WODNE - PORÓWNANIE

Parametry energetyczne turbin rurowych i turbin Kaplana



TURBINY WODNE - PORÓWNANIE

Parametry energetyczne średnispadowych turbin przepływowych Banki



TURBINY WODNE - PORÓWNANIE

Parametry energetyczne niskospadowych turbin przepływowych Banki

