Конструкции, характеристики и методы регулирования гидротурбин

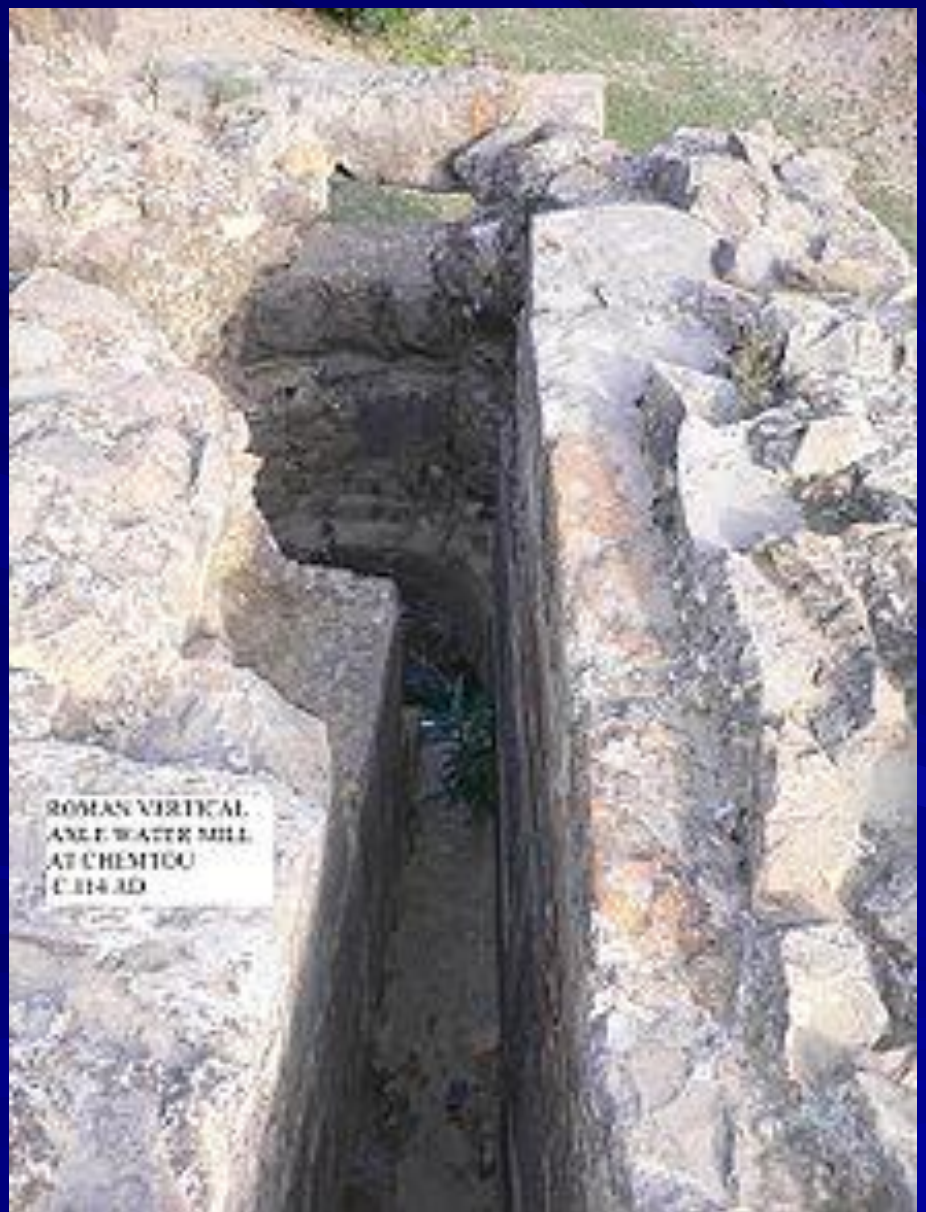
Гидротурбина – это гидродвигатель динамического типа

Основные типы гидротурбин

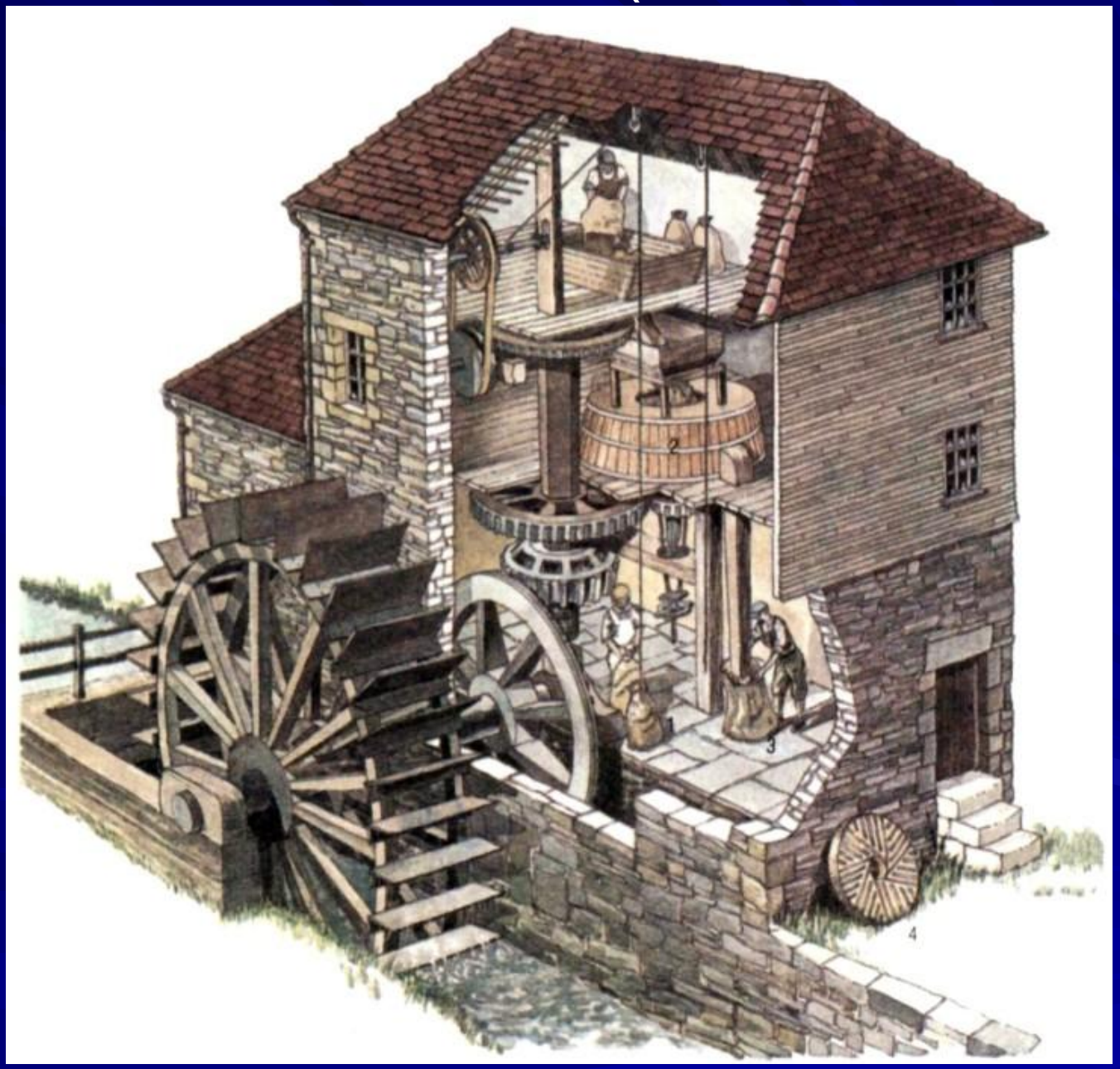
1. Поворотно-лопастные*
2. Пропеллерные*
3. Диагональные
4. Радиально-осевые*
5. Ковшовые*
6. Двукратного действия
7. Наклонно-струйные
8. Центростремительные
9. Вихревые

* - наиболее часто применяемые в гидроэнергетике типы гидротурбин

Рабочая камера гидротурбины античных времен



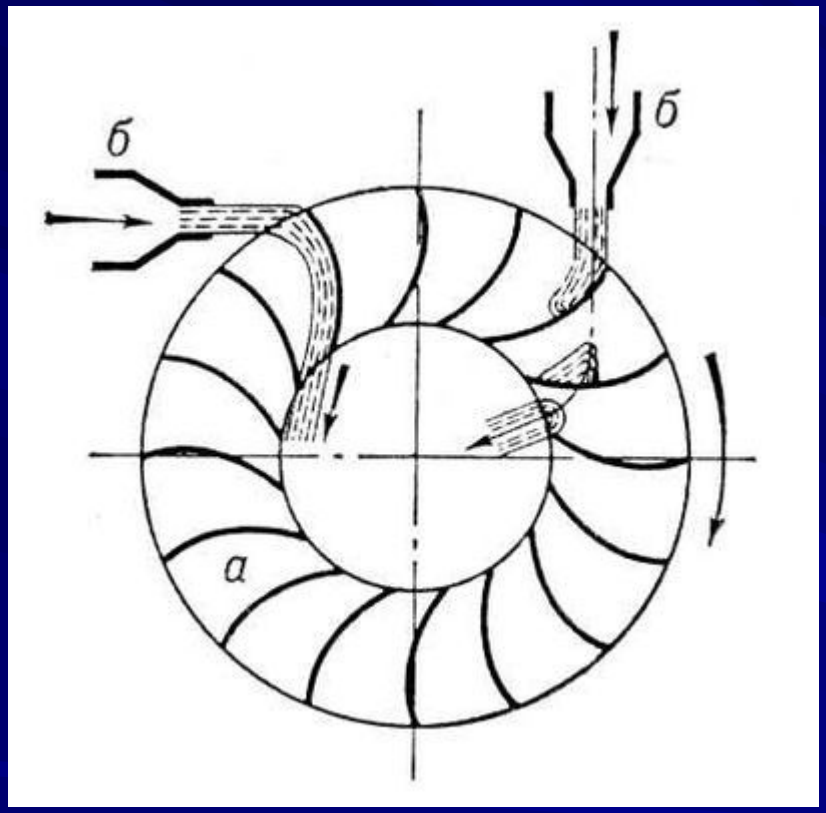
Водяная мельница (подливное колесо)

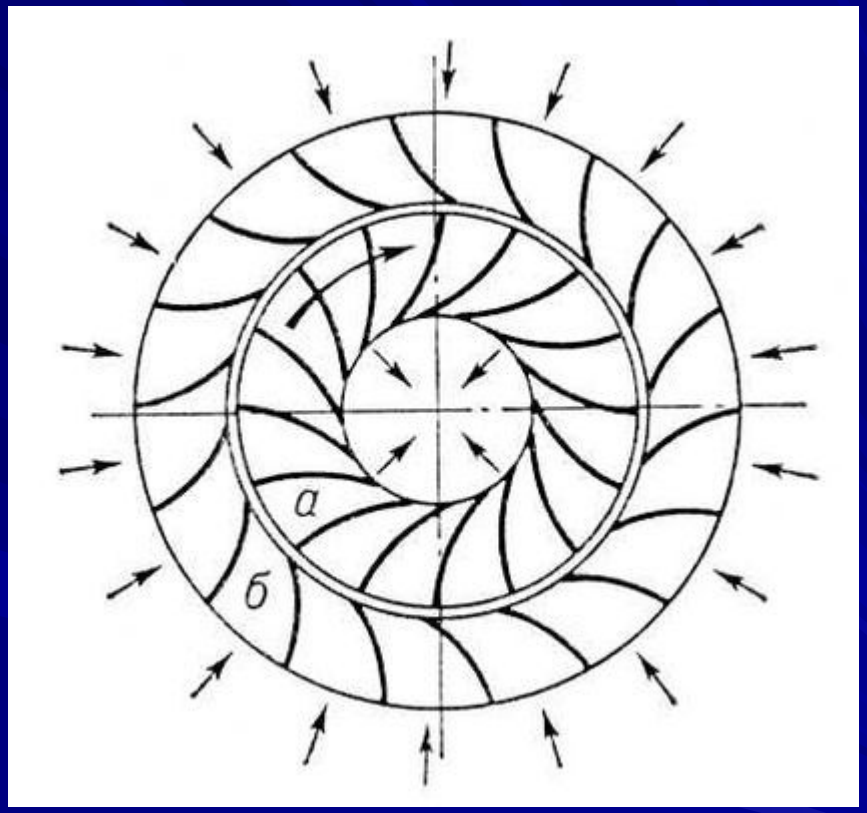


Водяная мельница (наливное колесо)

Простейшая схема получения энергии с водяного колеса

Принцип работы активной (слева) и реактивной (справа) гидротурбин





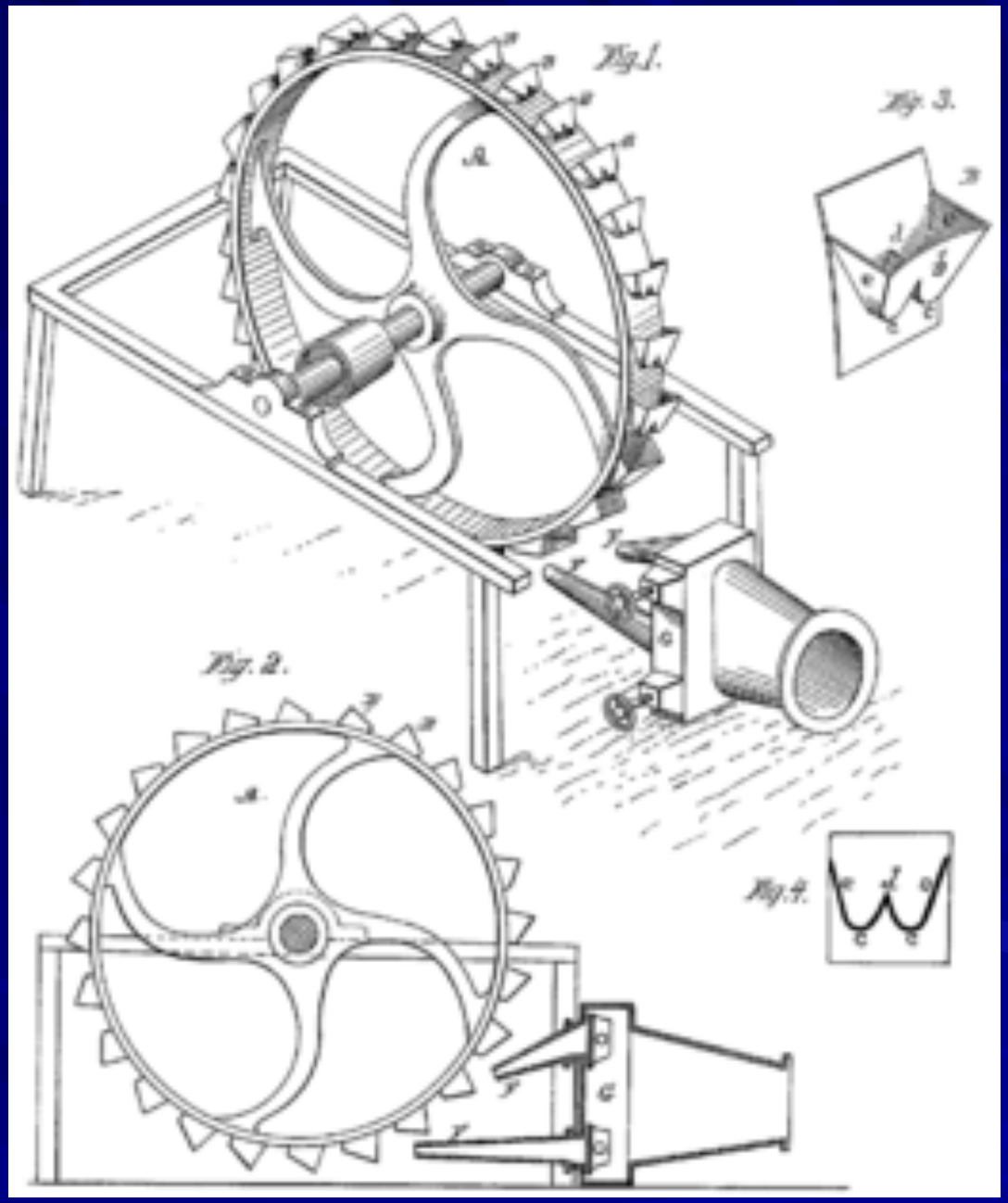
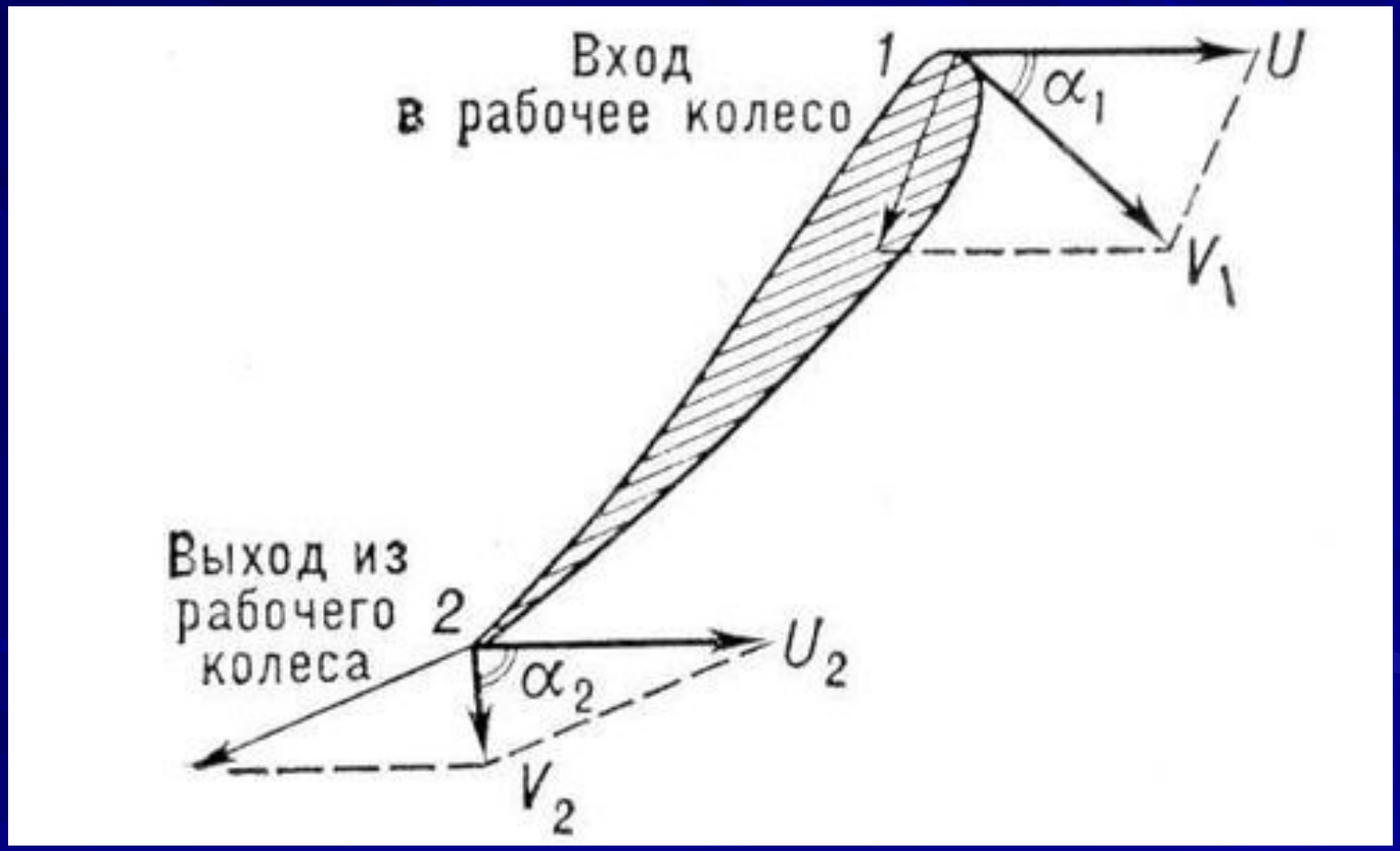
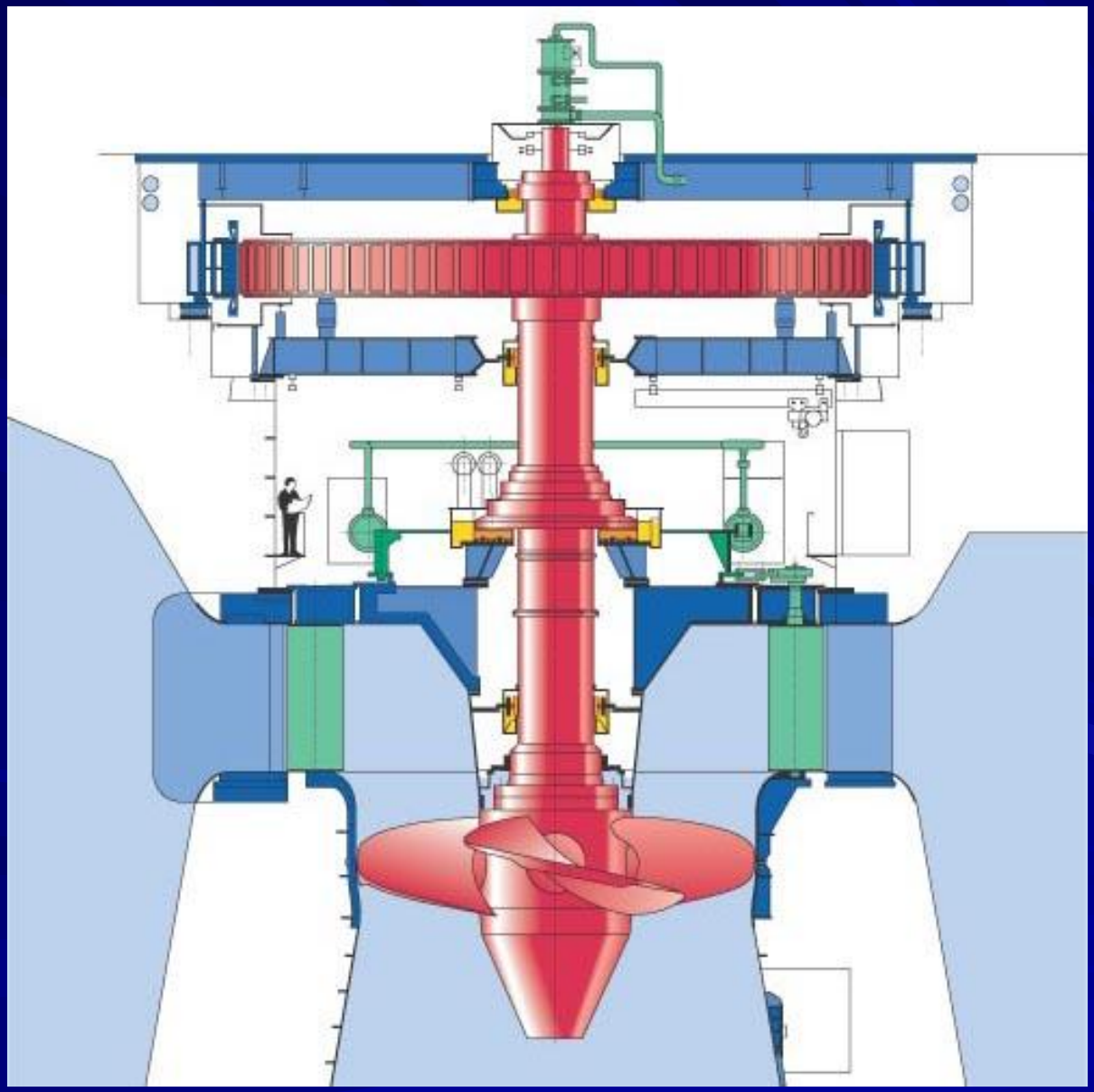


Fig. 1.
Fig. 3.
Fig. 2.
Fig. 4.

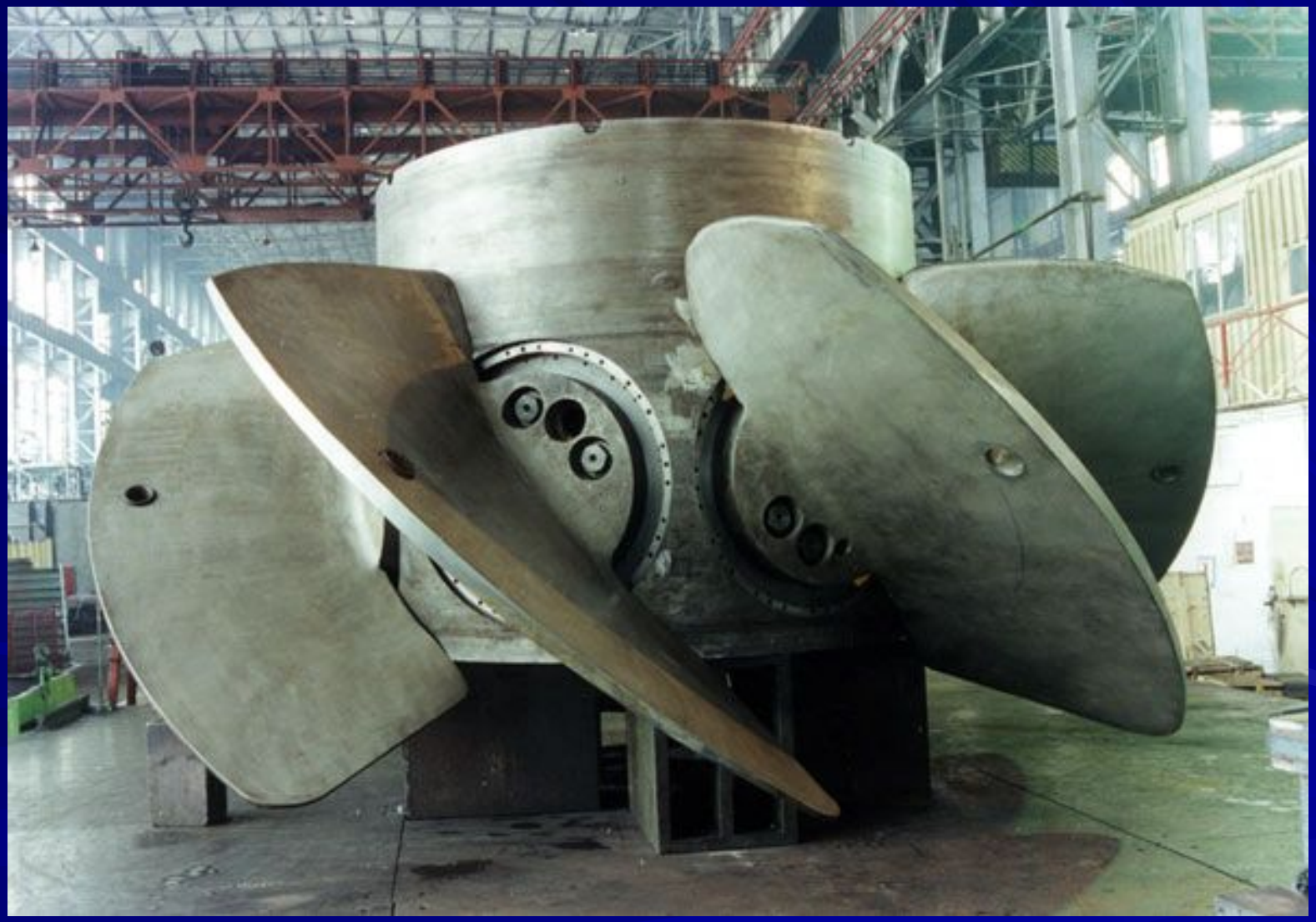
Треугольники скоростей на входе и выходе лопасти гидротурбины



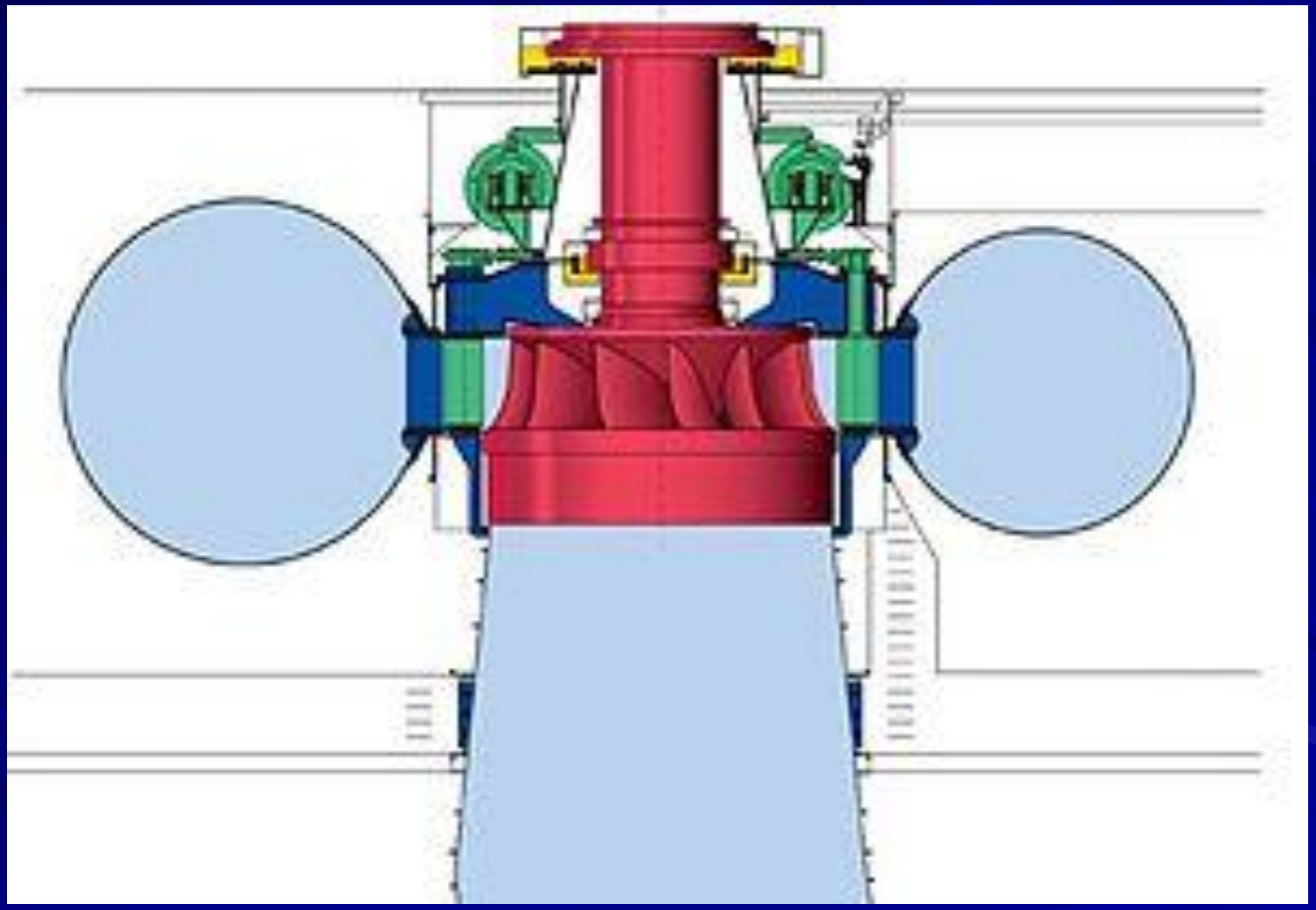
Гидротурбоагрегат с поворотно-лопастной турбиной



Рабочее колесо осевой гидротурбины



Гидротурбоагрегат с радиально - осевой турбиной



3D схема проточной части радиально-осевой турбины

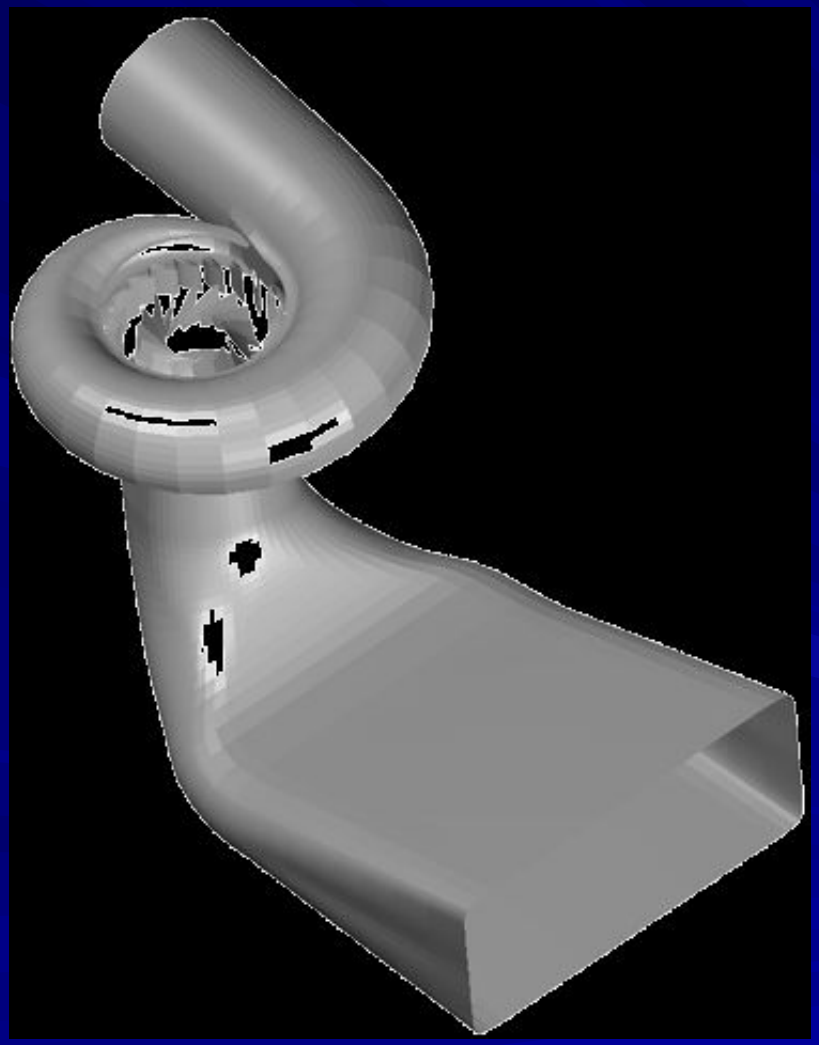
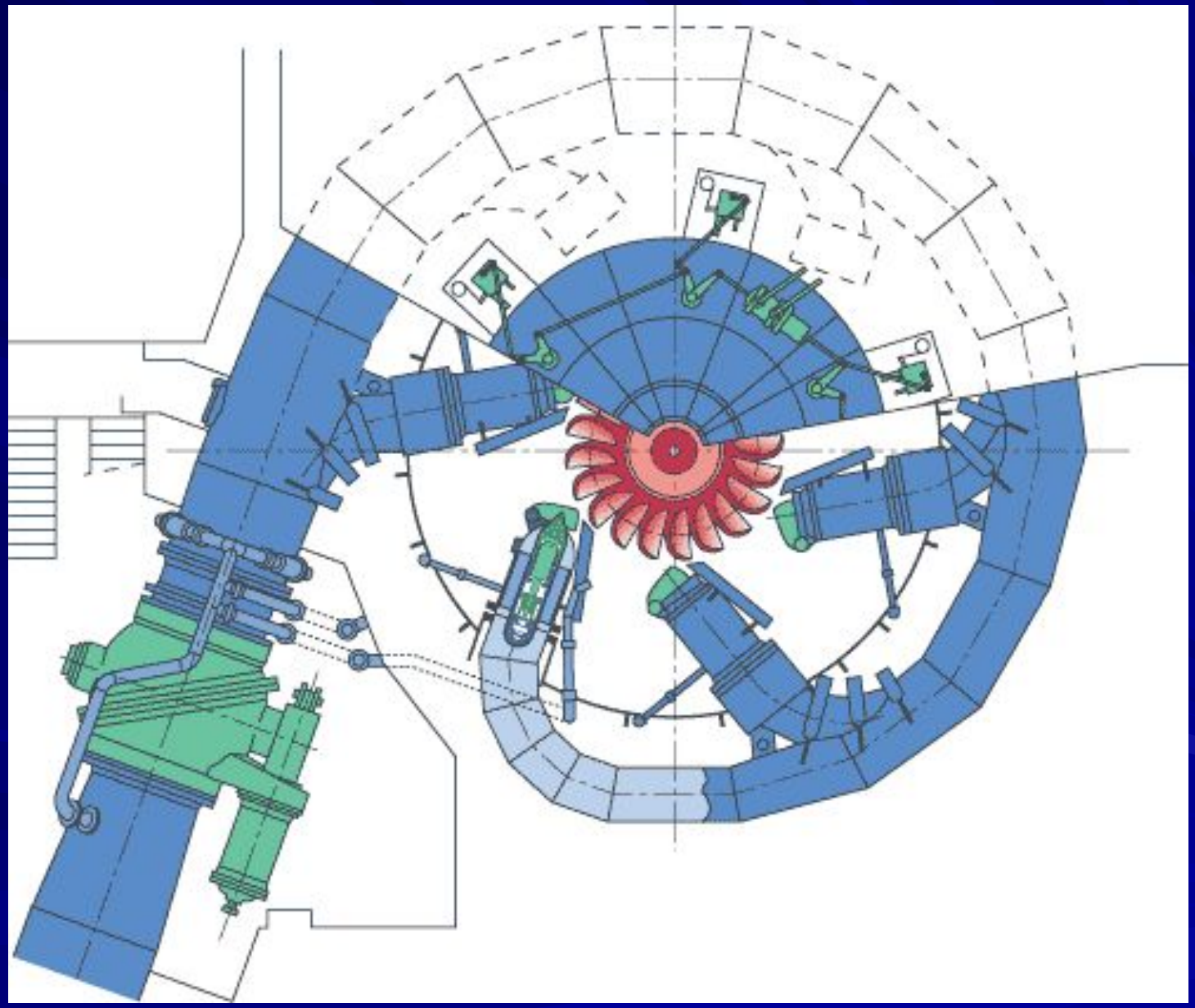
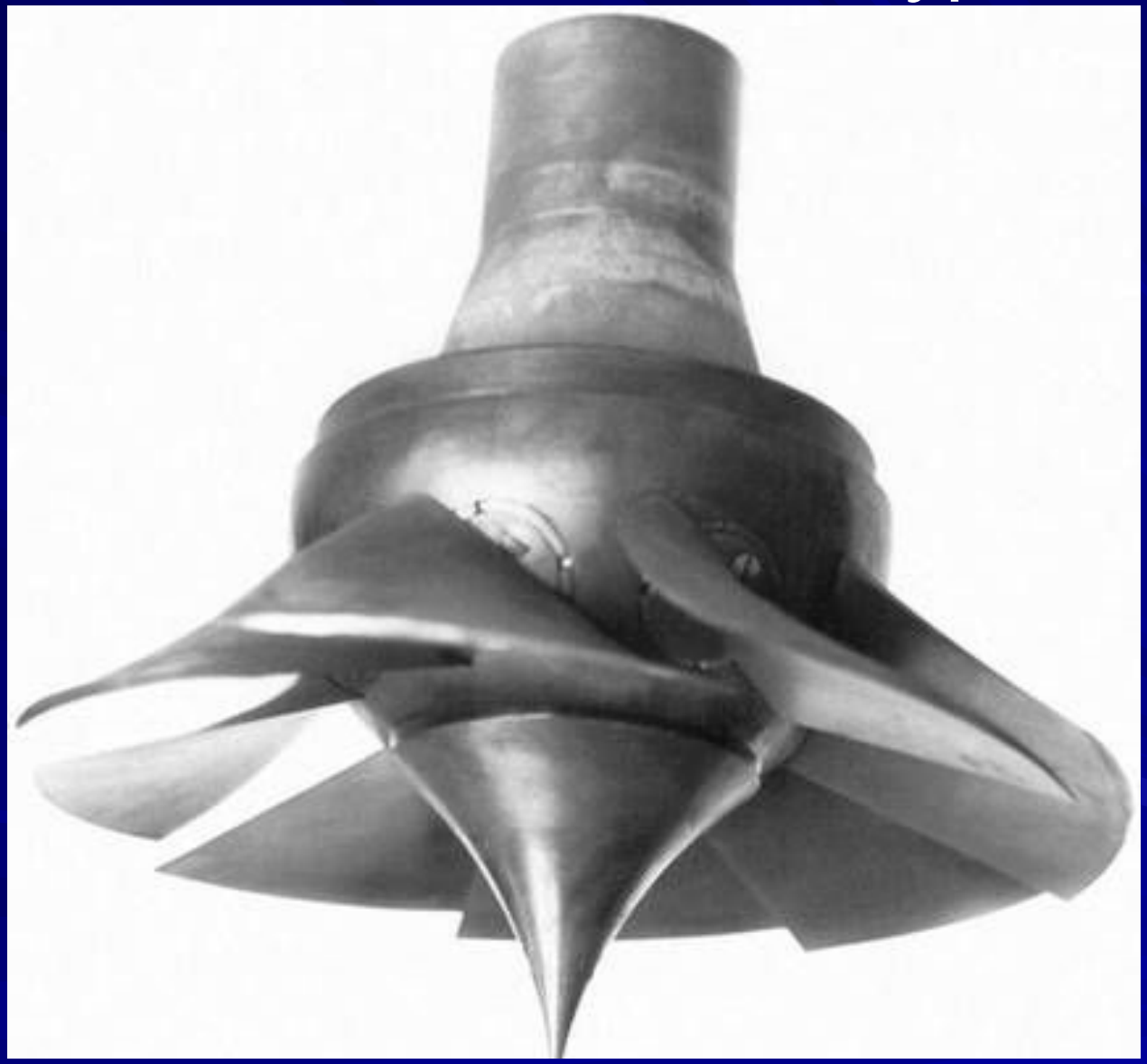


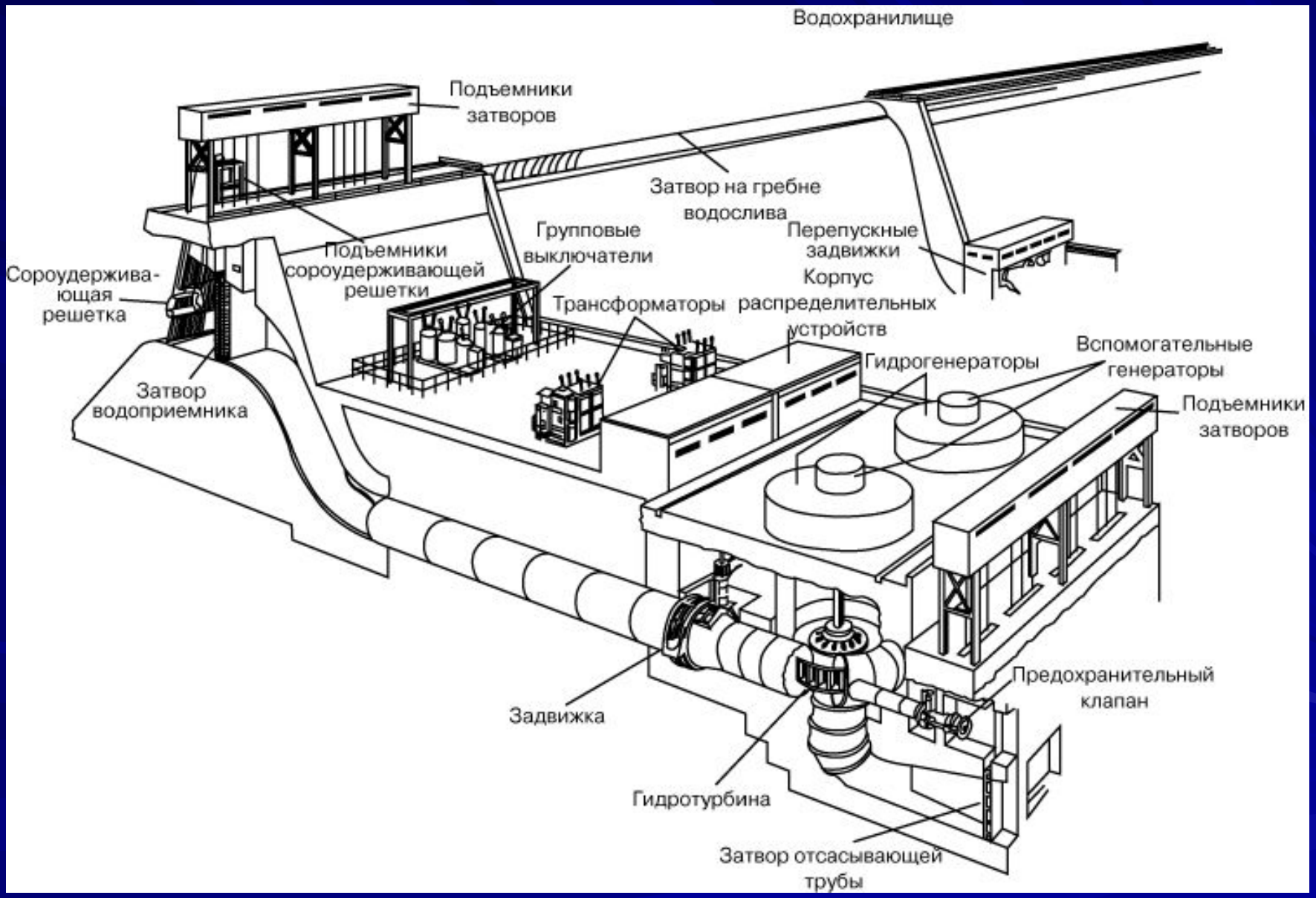
Схема ковшовой гидротурбины



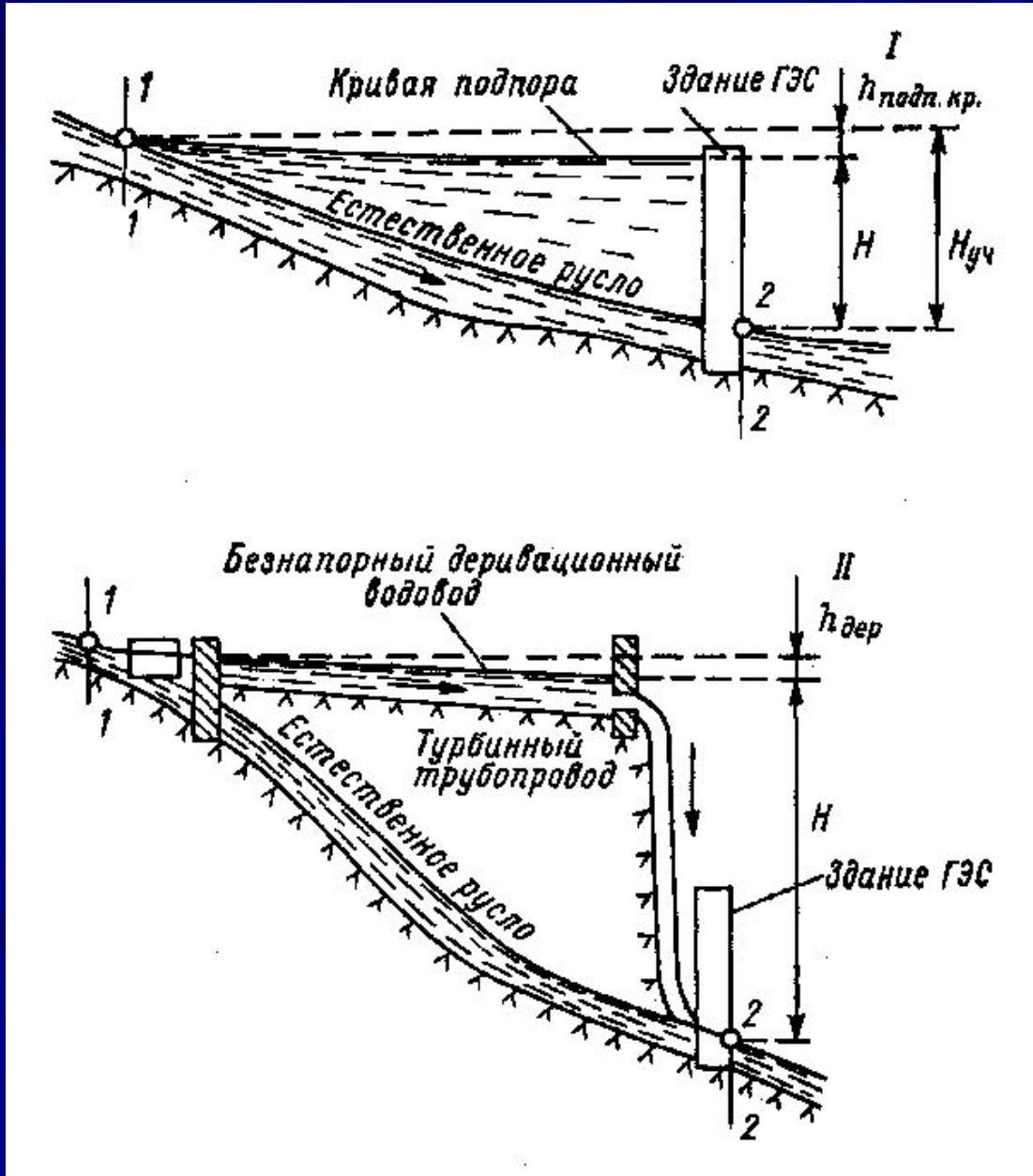
Колесо диагональной турбины



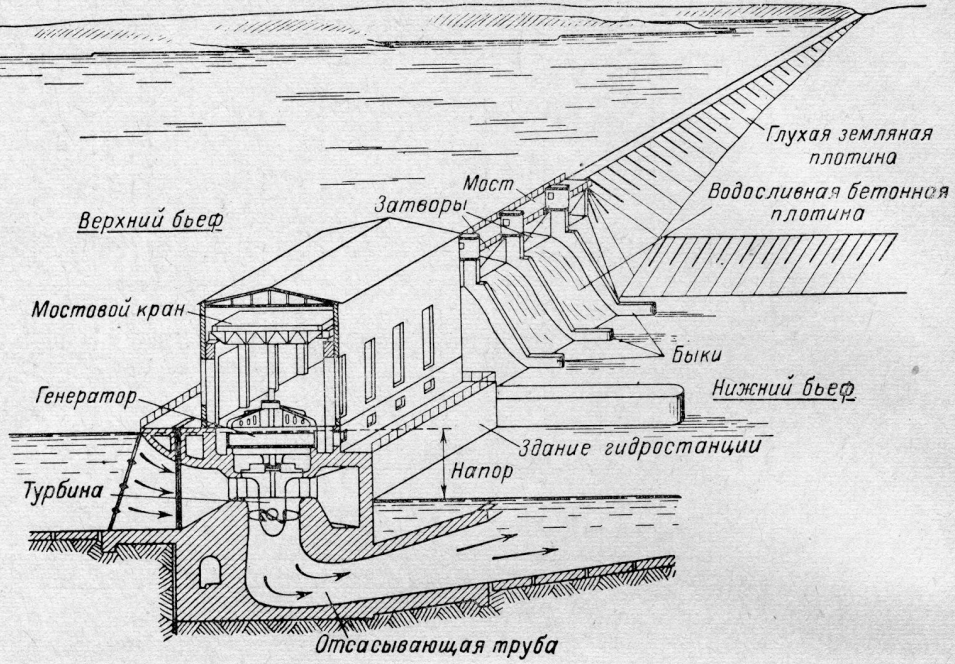
Общая схема ГЭС



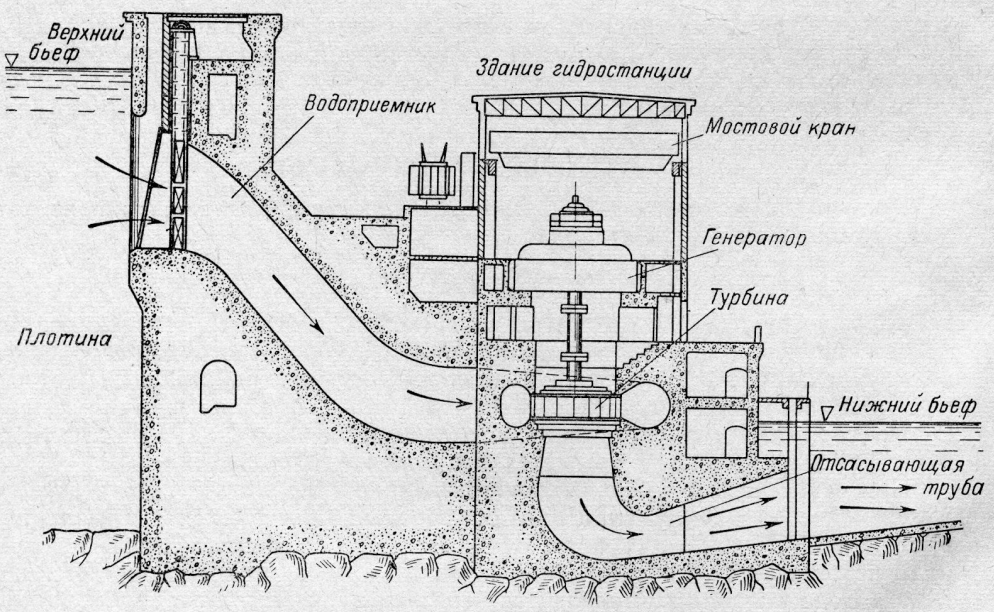
Русловая и деривационная ГЭС



Гидроэлектро станция руслового типа



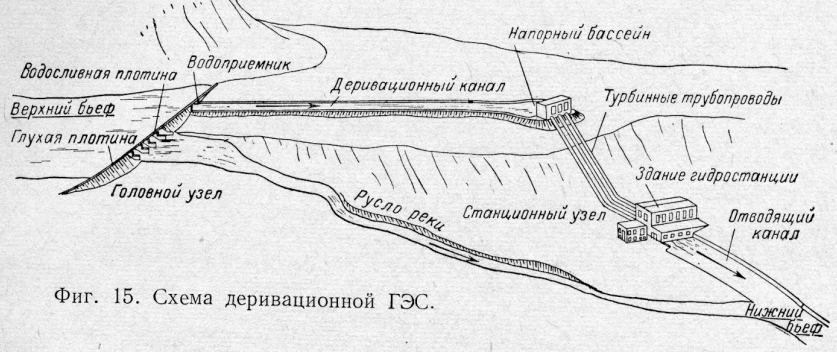
Фиг. 6. Гидростанция руслового типа.



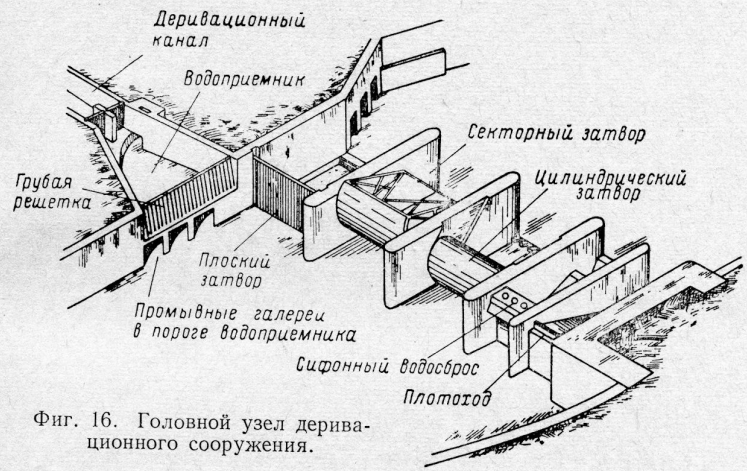
Фиг. 7. Приплотинный вариант русловой ГЭС.

Русловая ГЭС с плотиной арочного типа (Чиркейская ГЭС)

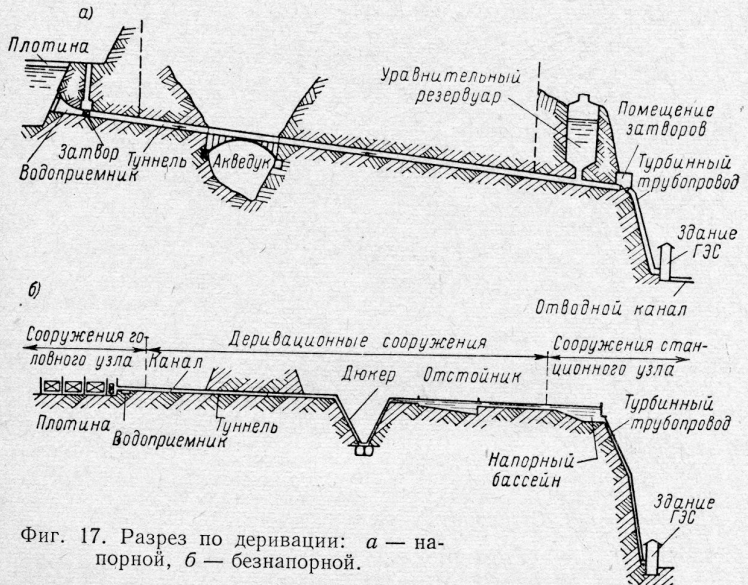
Гидроэлектростанция деривационного типа



Фиг. 15. Схема деривационной ГЭС.



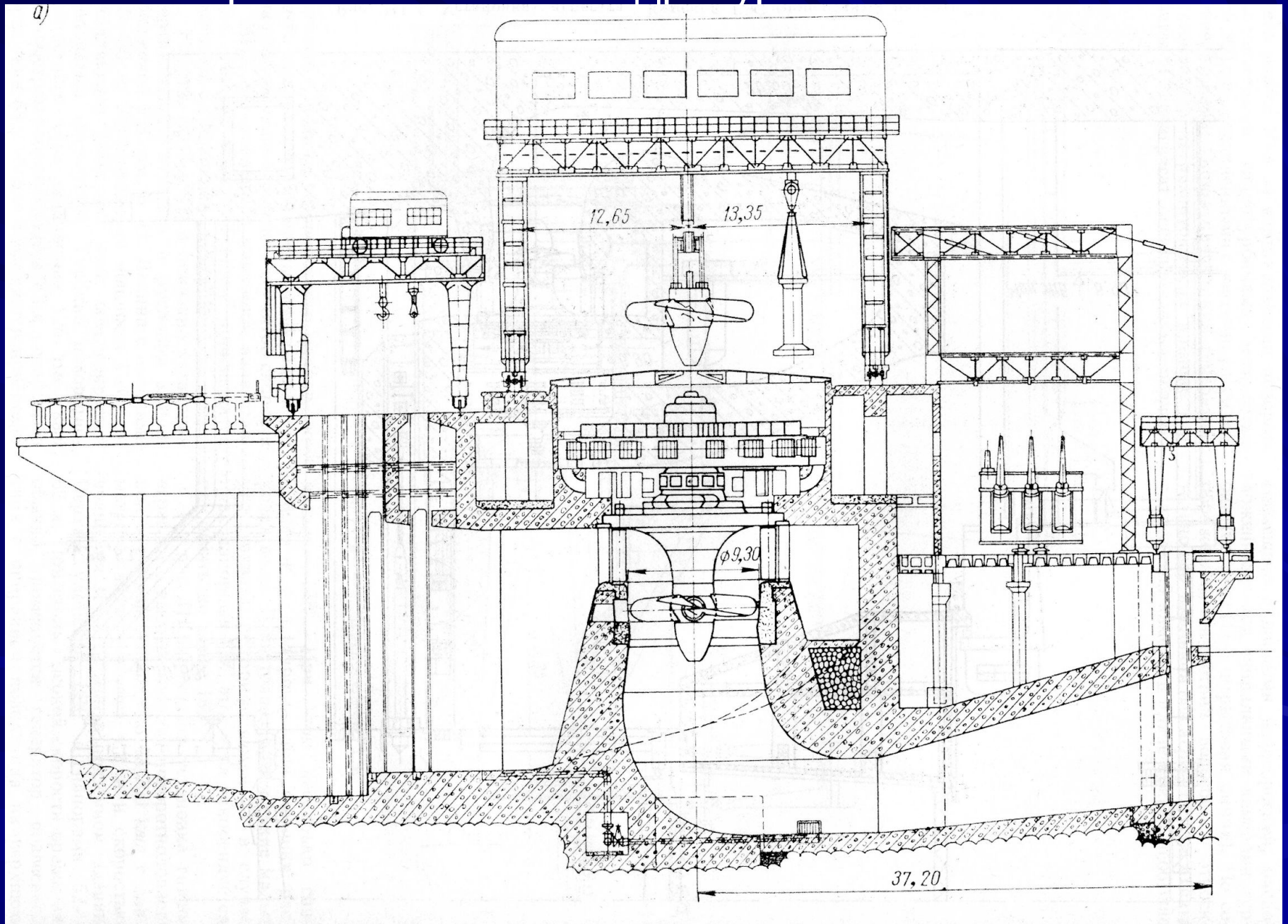
Фиг. 16. Головной узел деривационного сооружения.



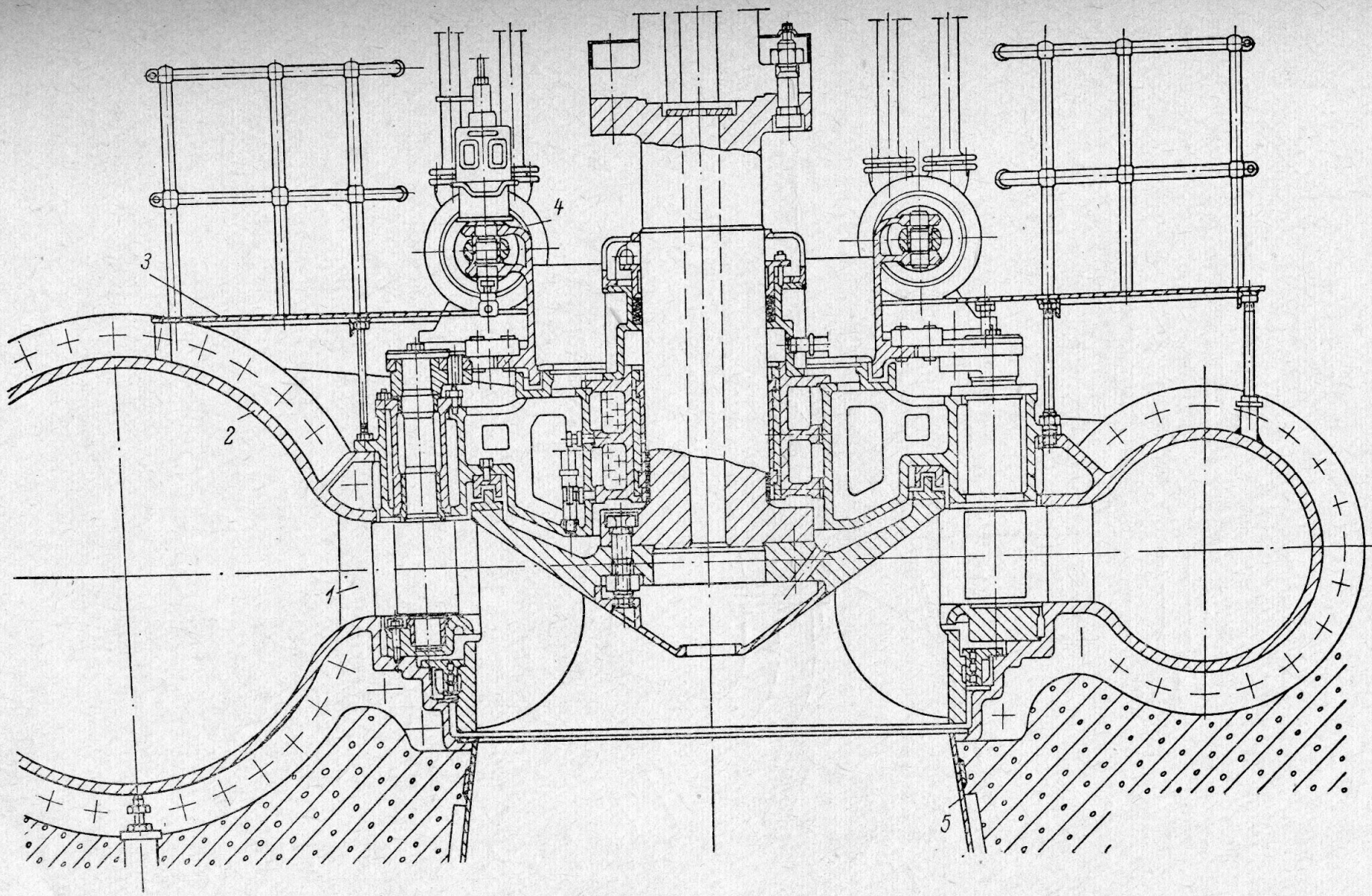
Фиг. 17. Разрез по деривации: *а* — напорной, *б* — безнапорной.

Деривационная ГЭС

Поворотно-лопастная гидротурбина в составе ГЭС

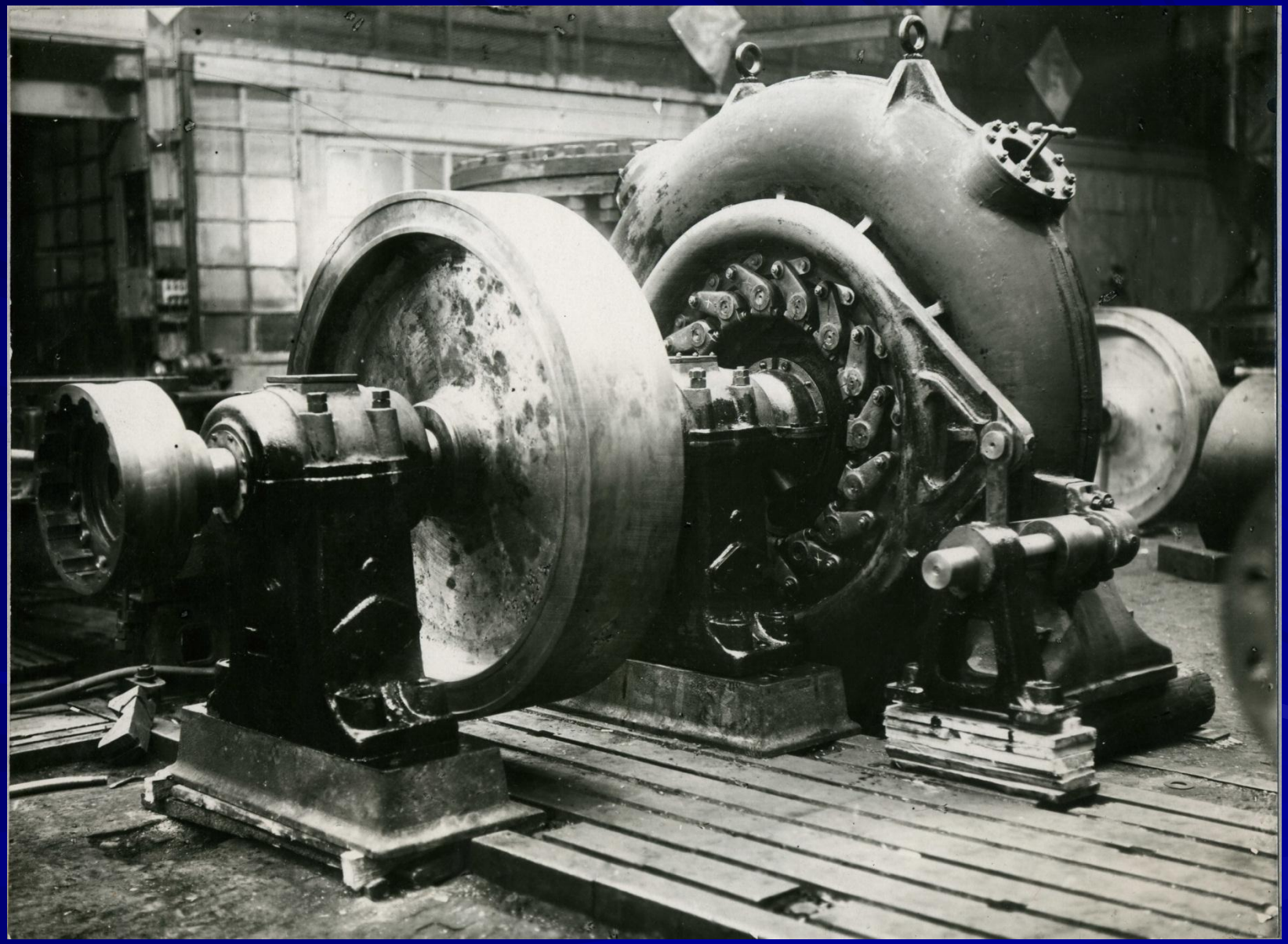


Радиально-осевая гидротурбина

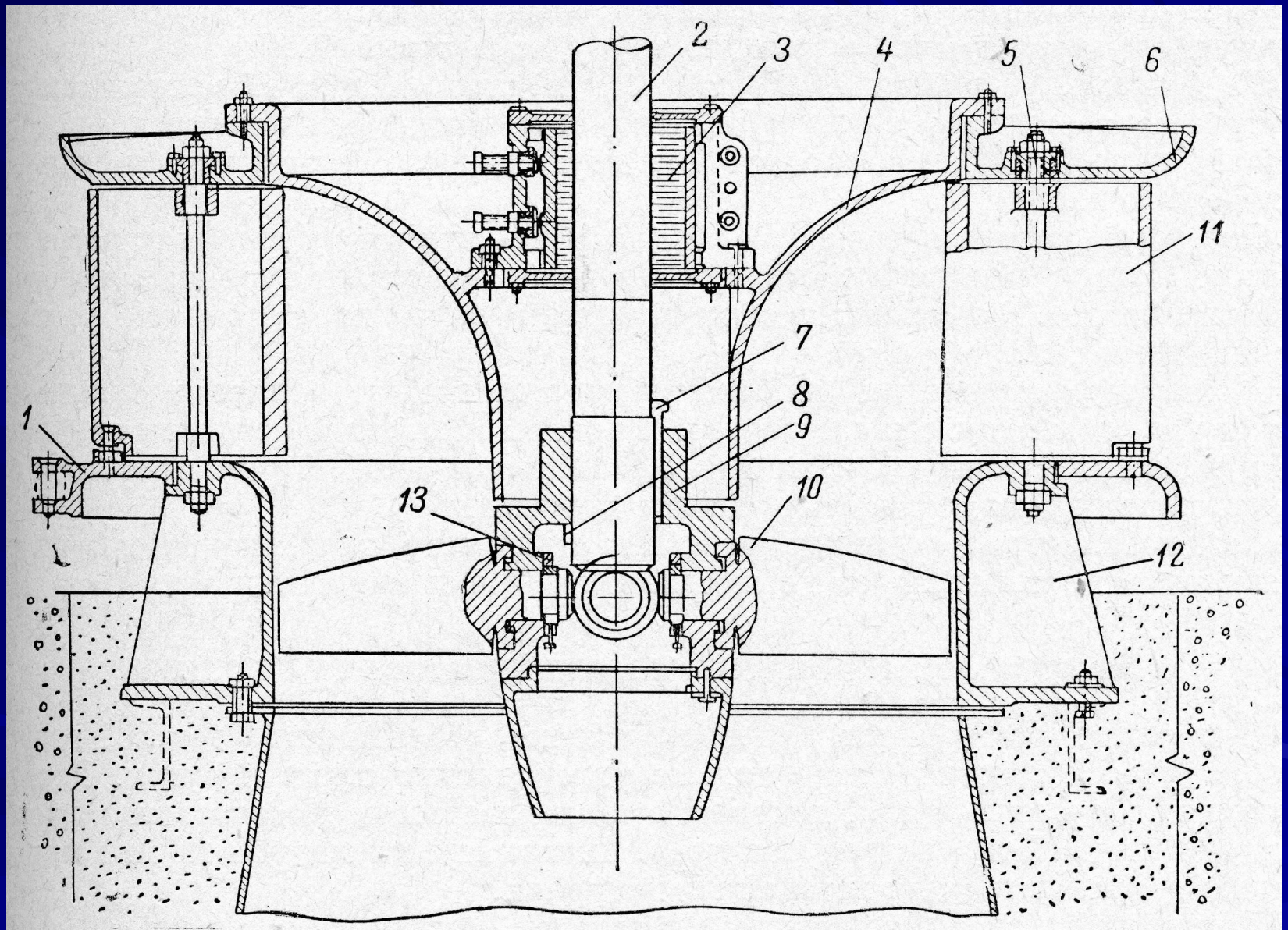


Фиг. 78. Разрез по мощной высоконапорной радиальноосевой турбине.

Радиально-осевая турбина с горизонтальным валом и маховиком (очень старая конструкция) в сборочном цеху



Пропеллерная турбина (осевая турбина однократного регулирования)



Фиг. 80. Пропеллерная турбина небольшого размера.

Шестисопловая ковшовая турбина в составе гидроагрегата

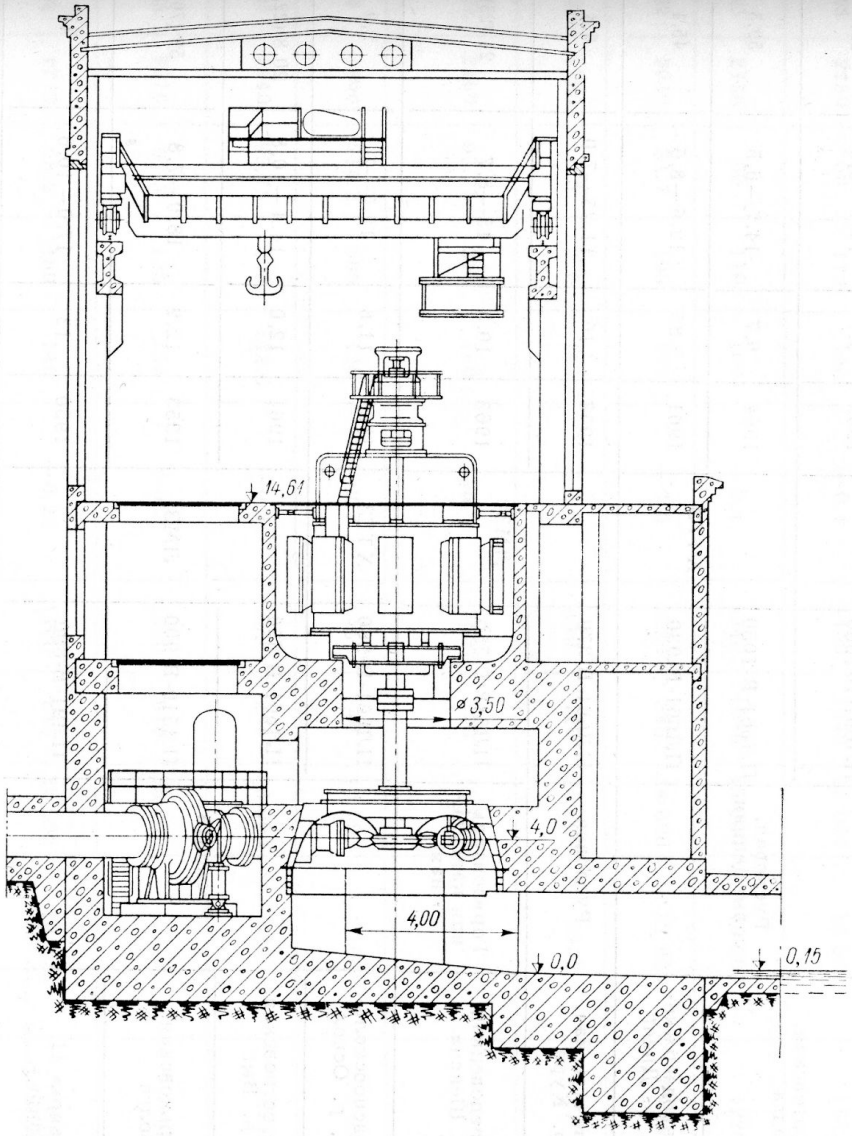


Рис. III.21. Установка агрегата Татевской ГЭС (поперечный разрез)

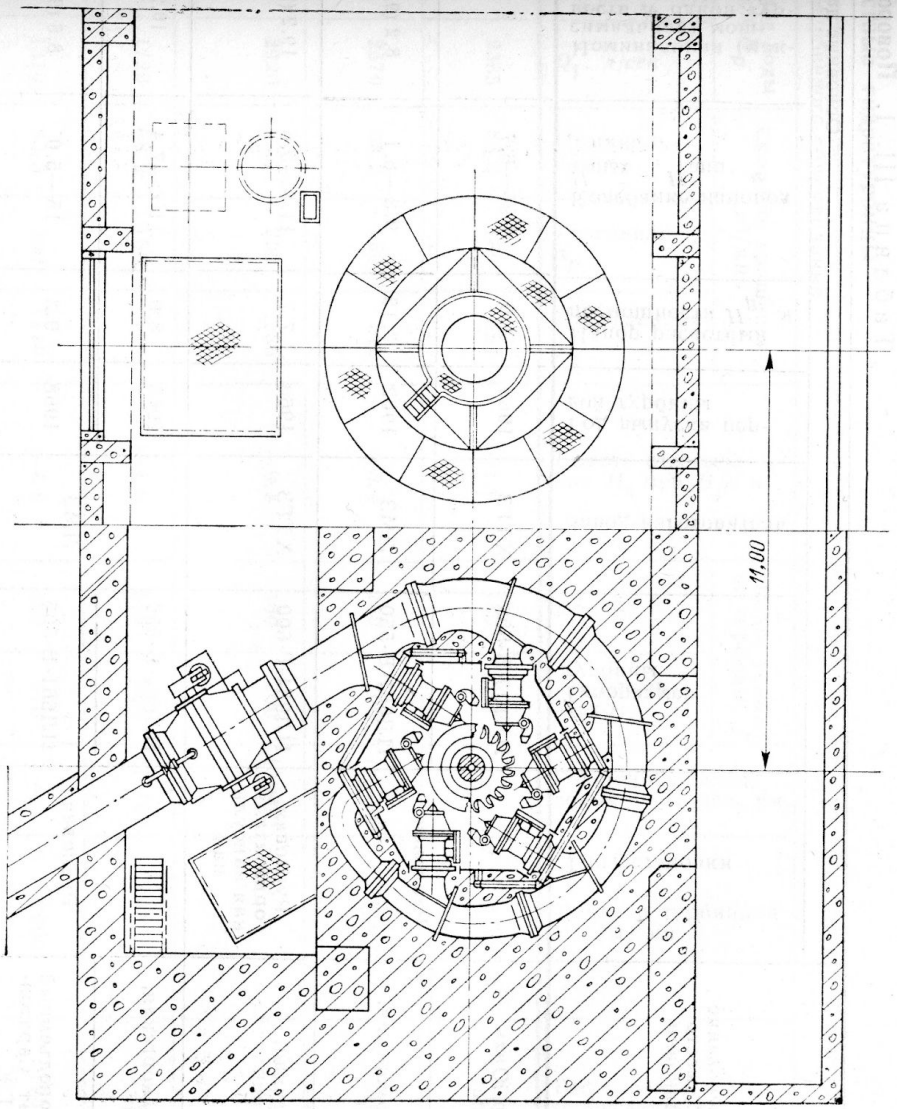
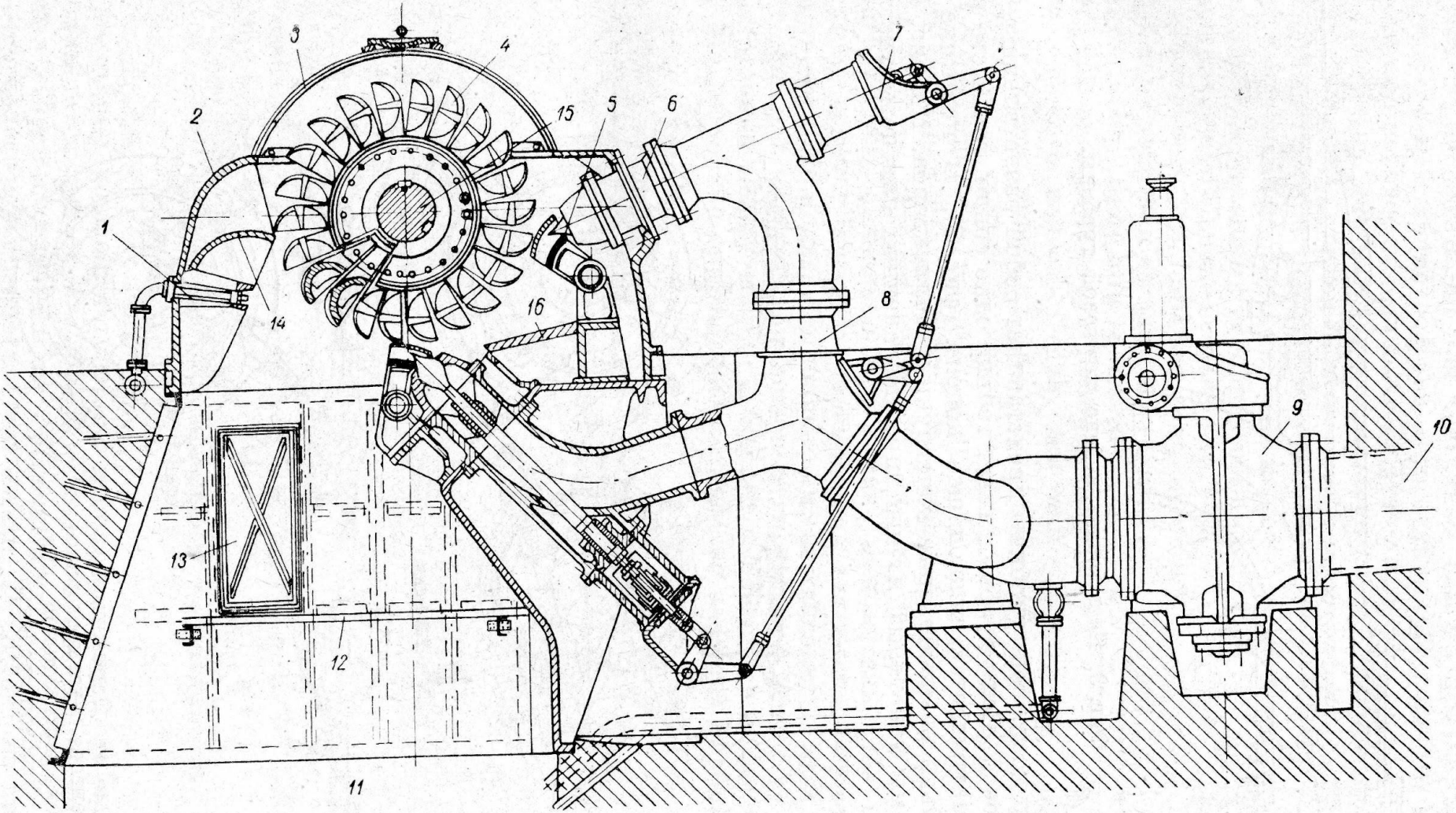


Рис. III.22. Установка агрегата Татевской ГЭС (план)

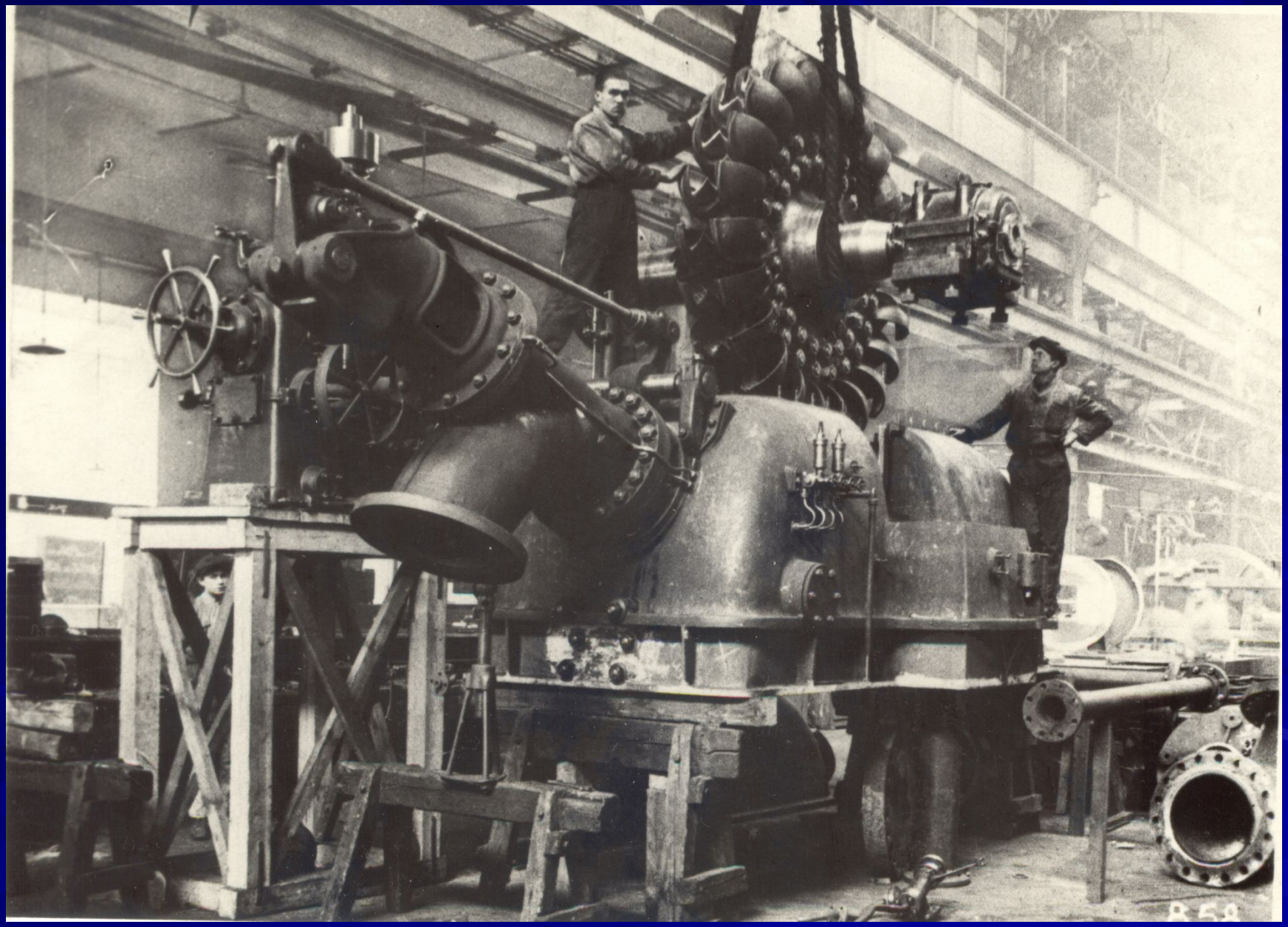
Двухсопловая ковшовая гидротурбина

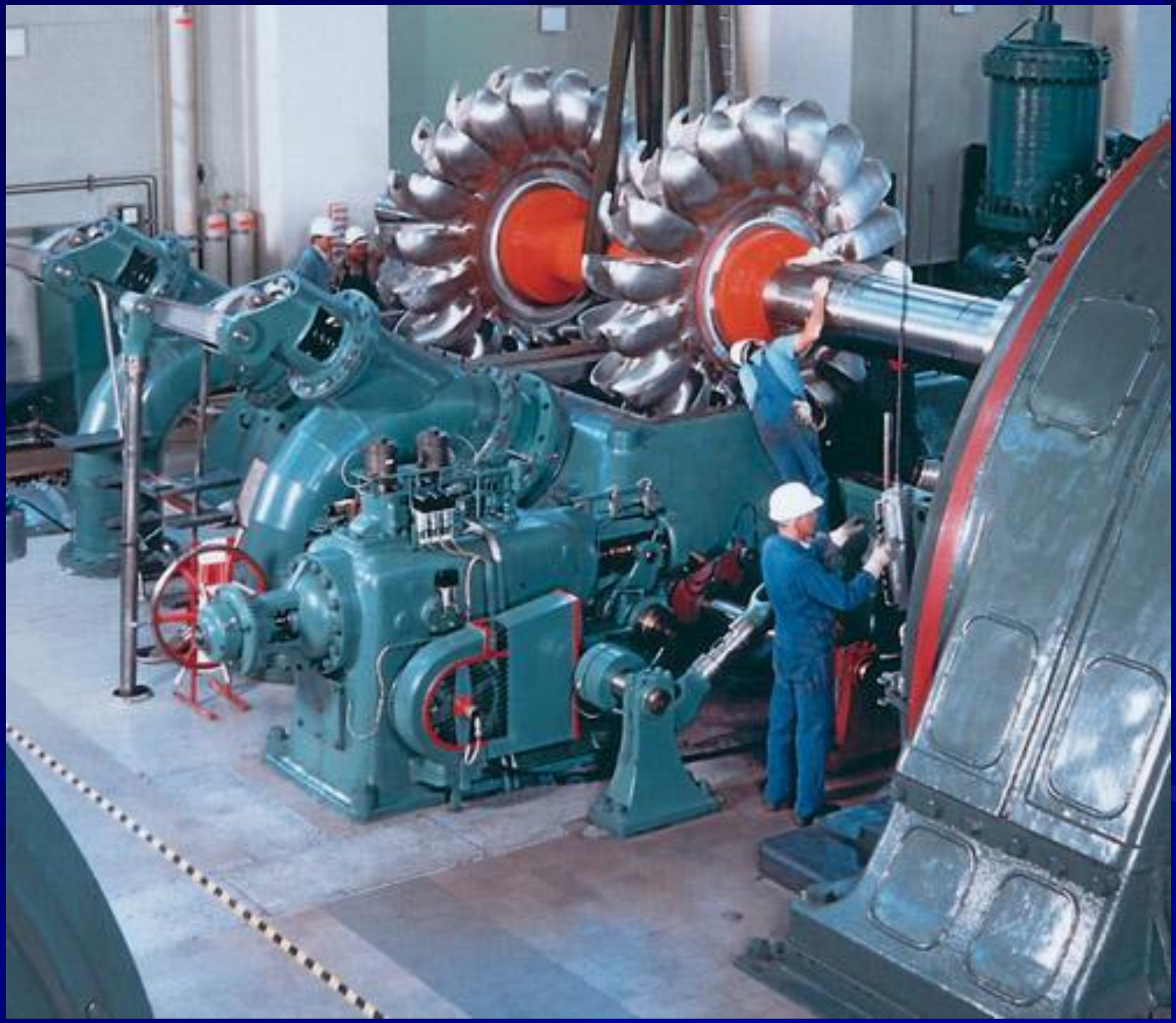


Фиг. 2. Горизонтальная двухсопловая ковшовая турбина Гизельдон ГЭС:

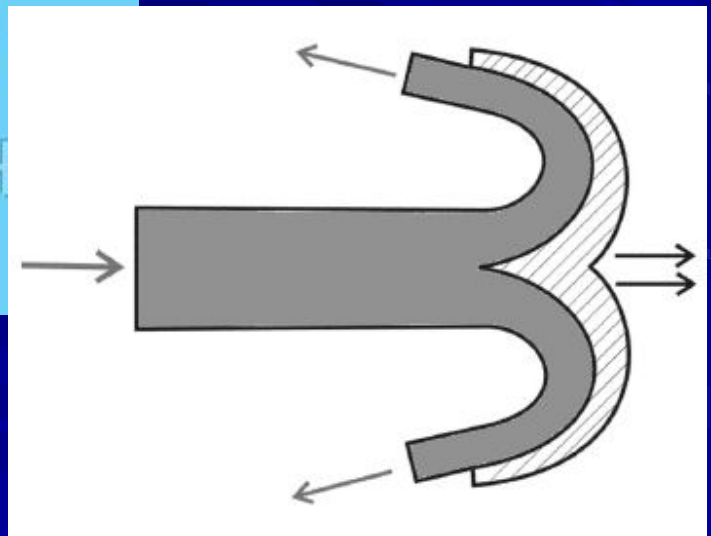
1 — тормозное сопло; *2* — станина кожуха; *3* — крышка кожуха; *4* — рабочее колесо; *5* — дефлектор (отсекатель); *6* — сопло; *7* — механизм управления иглой; *8* — коллектор; *9* — шаровой затвор; *10* — напорный трубопровод; *11* — отводной канал; *12* — решетка; *13* — дверь; *14* — отражатель; *15* — вал; *16* — защитный экран.

Монтаж ковшовой гидротурбины



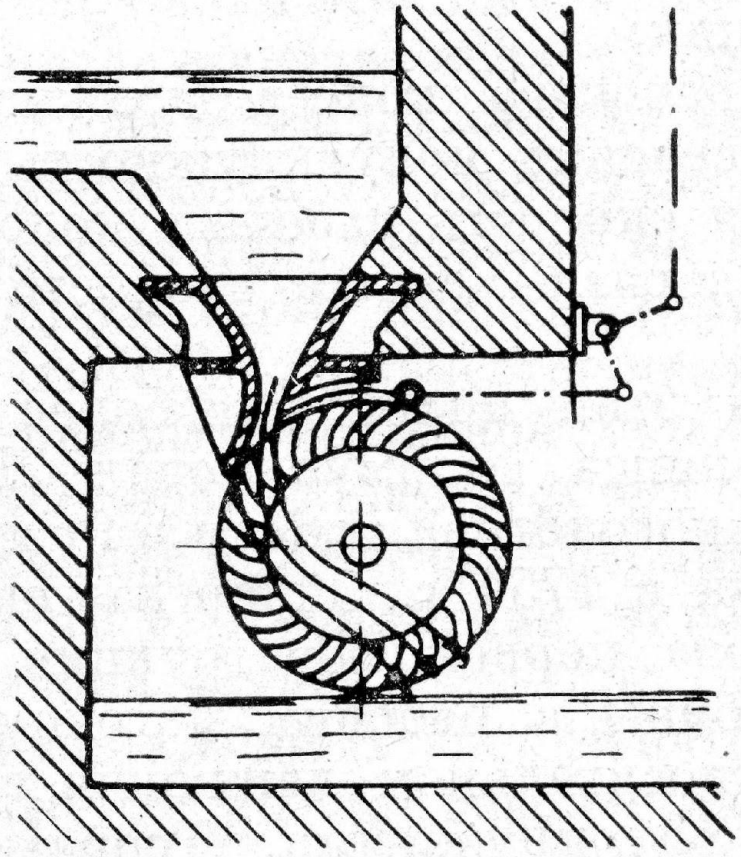


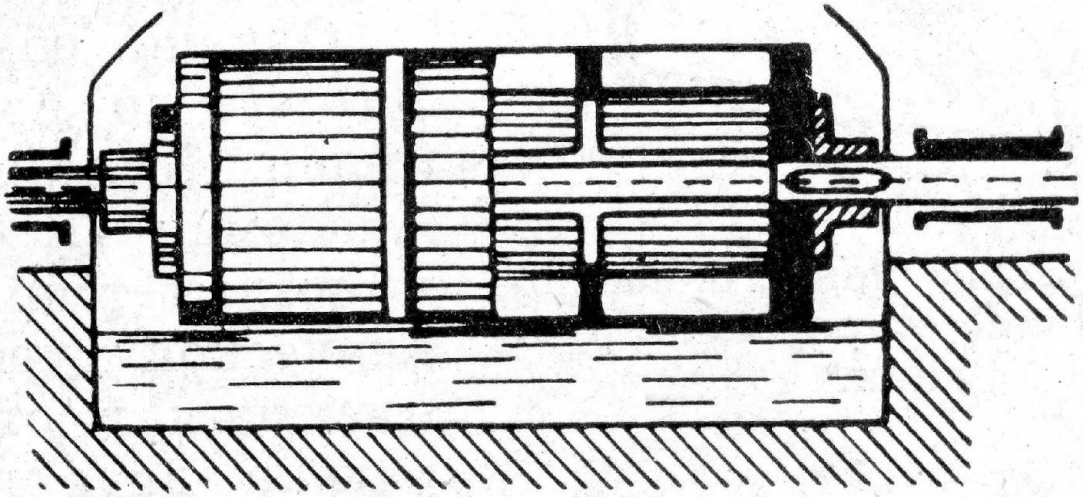
Колесо ковшовой гидротубины



Двукратная гидротурбина (турбина двойного действия)

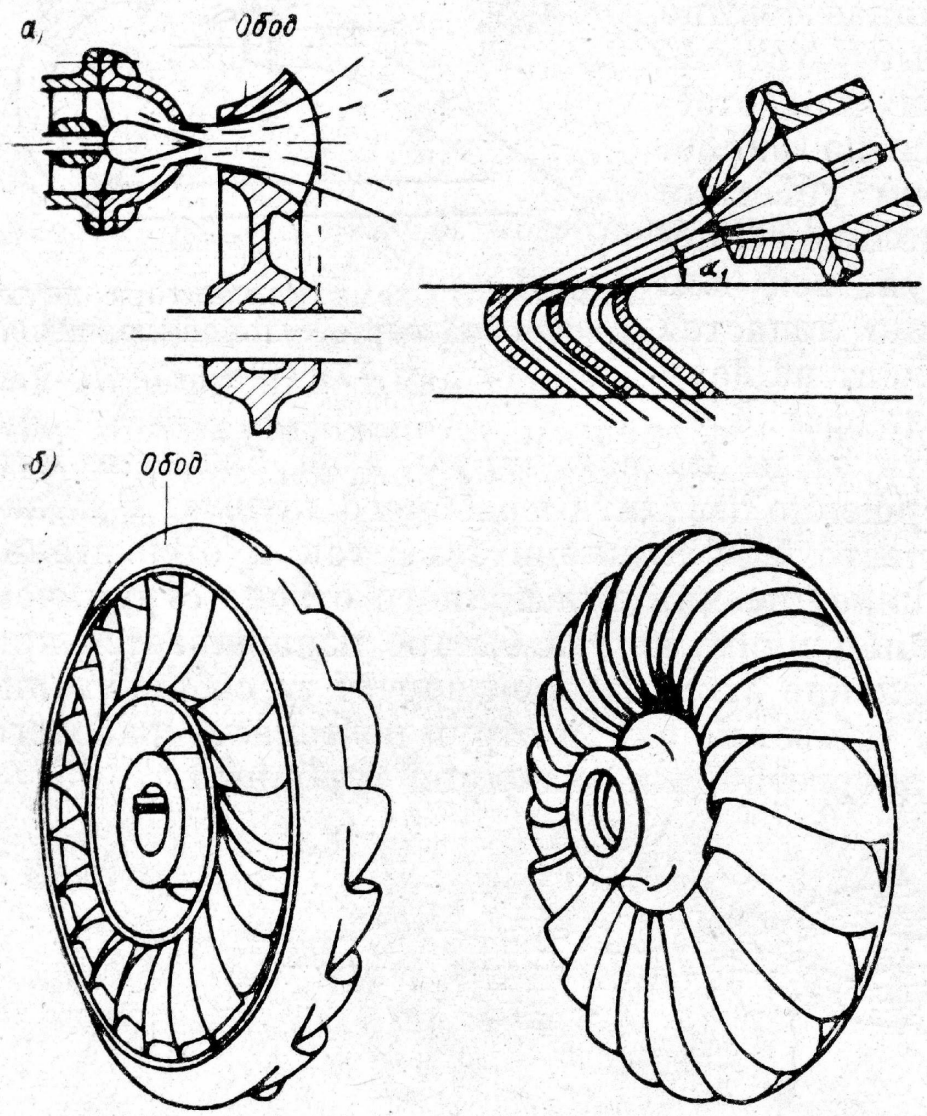
как к. п. д. ковшовых турбин при
изменениях меньше падает, чем к.
реактивных турбин. При малых мо
стях ковшовые турбины могут устан
ваться и при напорах значительно
ше 200 *м*. При угледобыче для пр





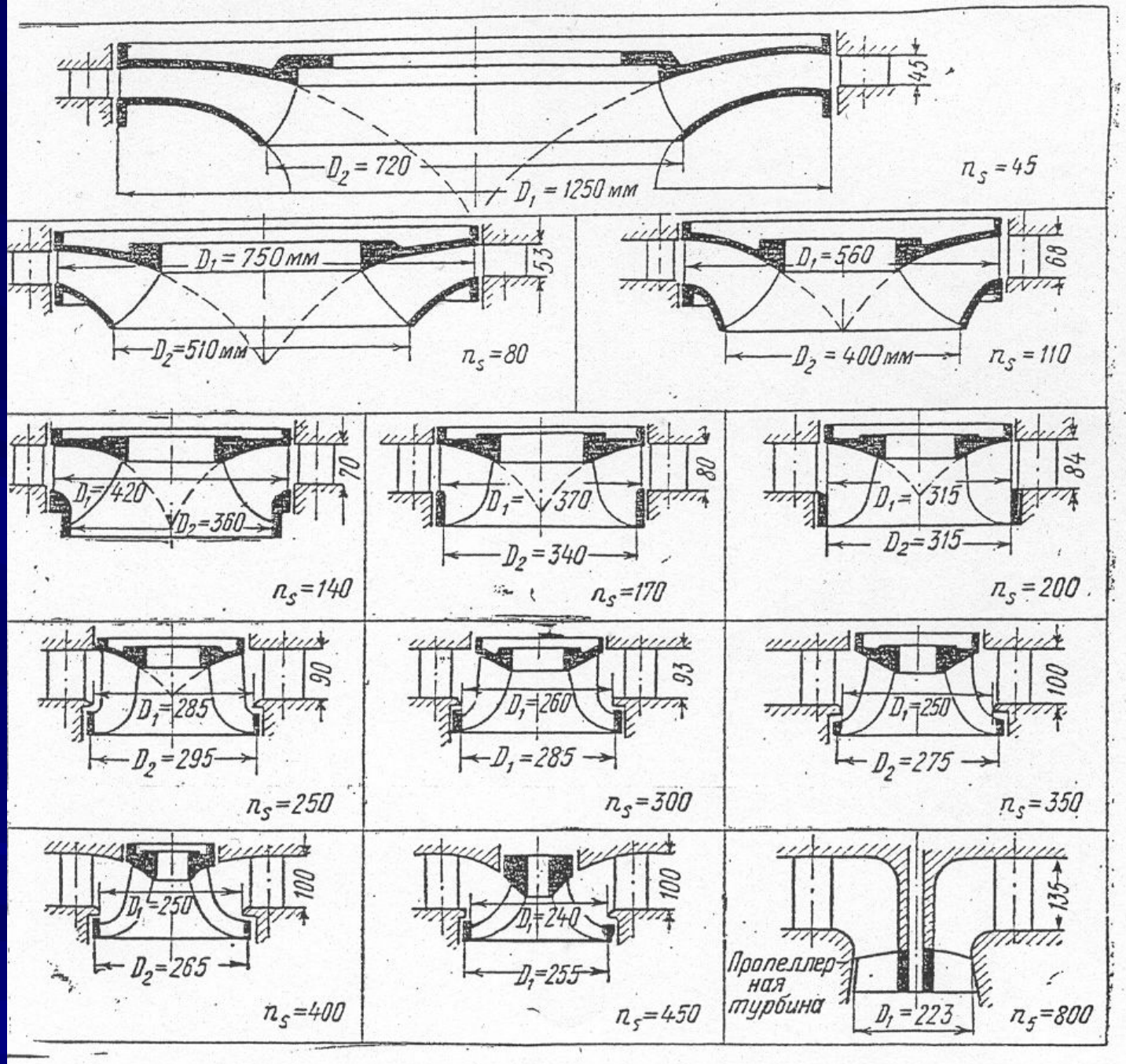
Фиг. 8. Схема двукратной турбины.

Наклонно-струйная гидротурбина



Фиг. 7. Схема наклонноструйной турбины: *а* — обтекание лопастей напорной струей, выходящей из сопла; *б* — рабочее колесо со стороны входных и выходных кромок.

Типы турбин	Пределы n_s	Область применения по H, *м*
Пропеллерные и поворотнолопастные:	$n_s = n\frac{\sqrt{N}}{H\sqrt[4]{H}}$	
Быстроходные . .	950—750	5—12
Средней быстроходности	750—550	12—22
Тихоходные . . .	550—350	22—40
Радиальноосевые:		
Быстроходные . .	400—250	20—50
Средней быстроходности	250—150	50—120
Тихоходные . . .	150—70	120—300
Ковшевые	50—10	800—2000



Фиг. 55. Рабочие колеса различной быстроходности.

Рабочие характеристики гидротурбин

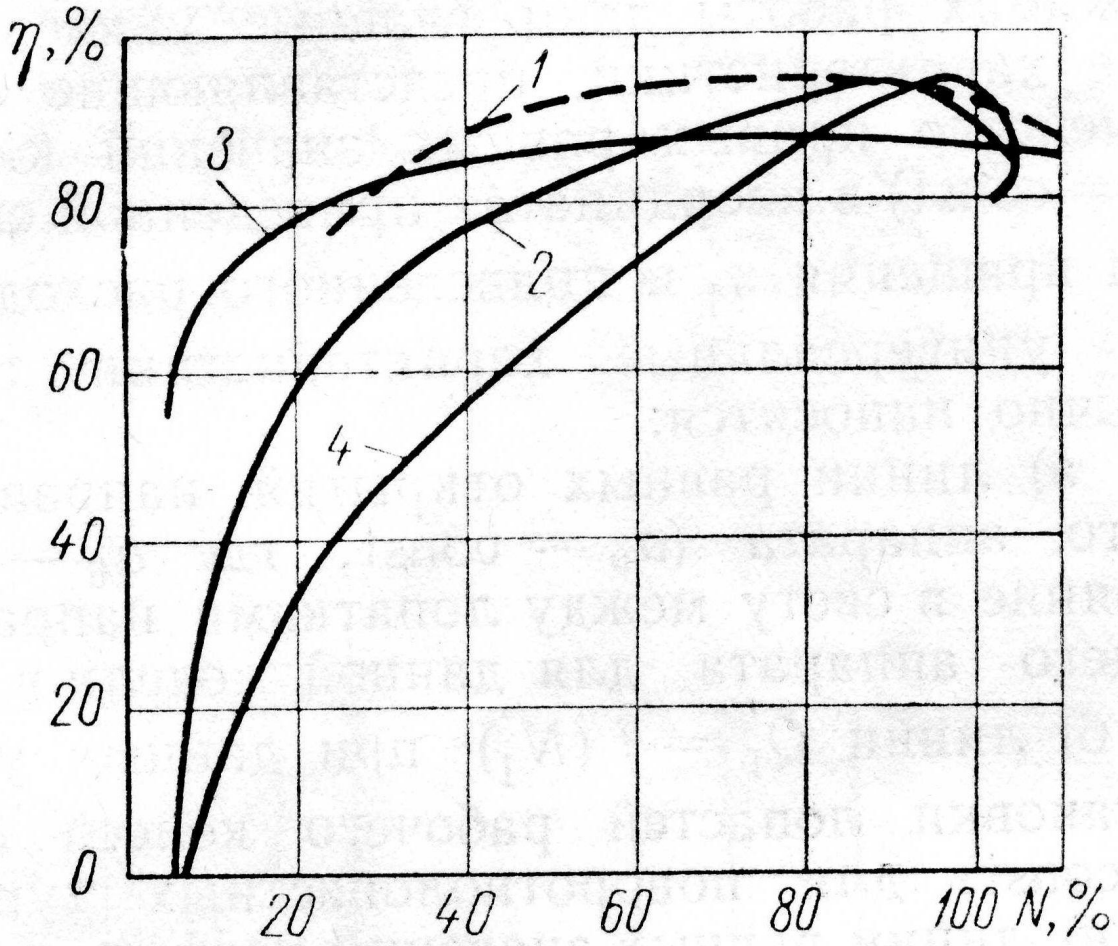
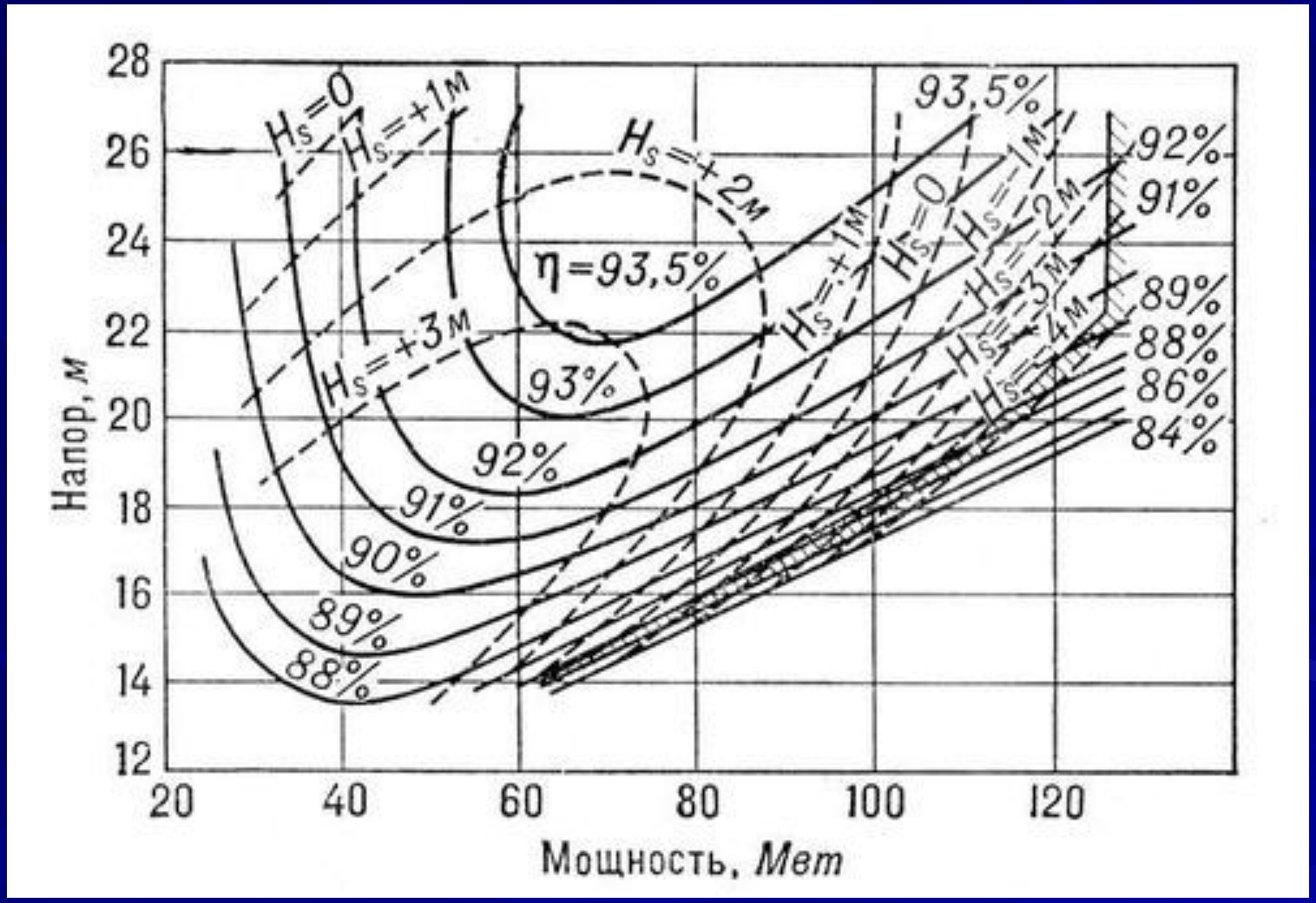


Рис.I.5. Рабочие характеристики современных мощных гидротурбин различных систем и быстроходностей:

1 — поворотнолопастная, $n_s = 625$; *2* — радиально-осевая, $n_s = 300$; *3* — ковшовая, $n_s = 20$; *4* — пропеллерная, $n_s = 570$

Эксплуатационная характеристика радиально-осевой гидротурбины



Универсальная характеристика поворотно-лопастной гидротурбины

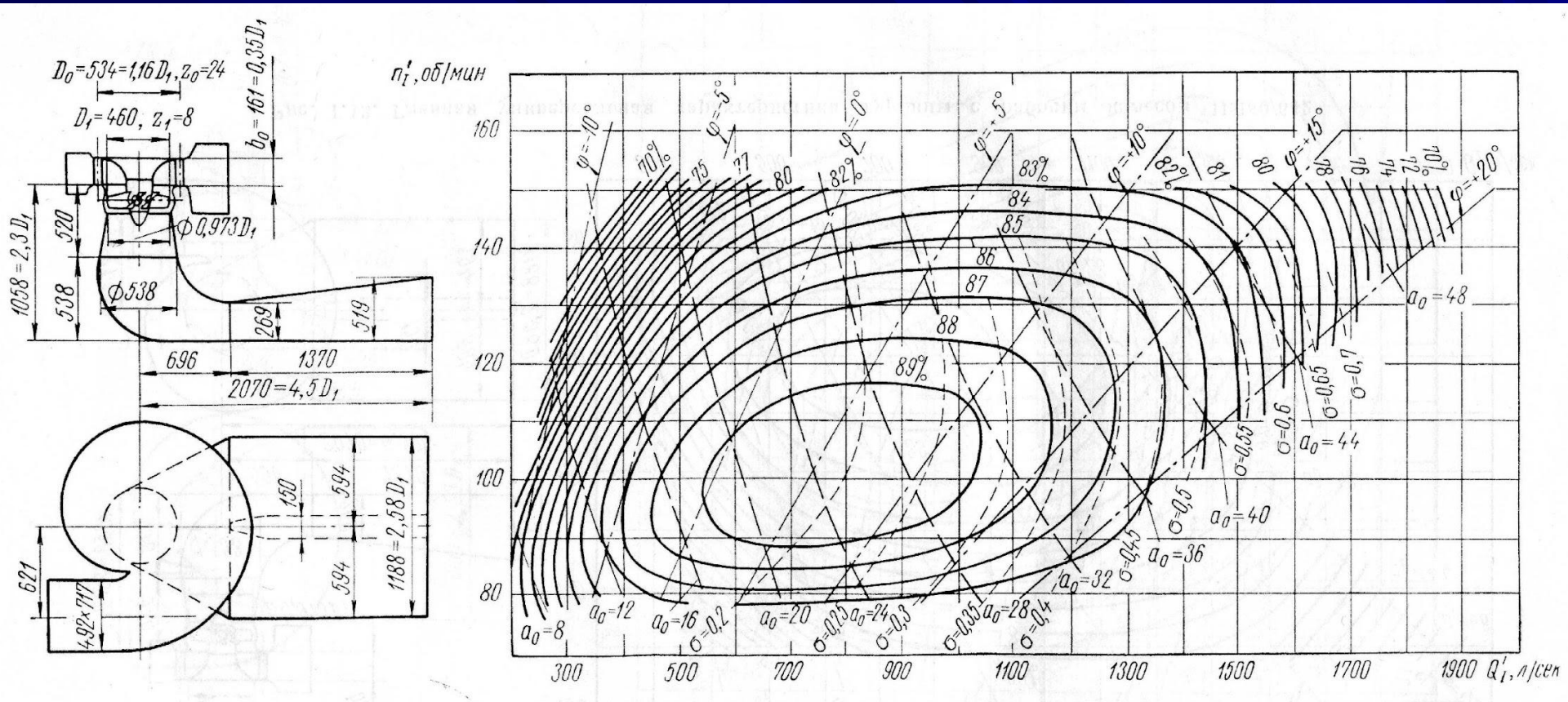


Рис. I. 12. Главная универсальная характеристика турбины с рабочим колесом ПЛ60/5А

Универсальная характеристика радиально-осевой гидротурбины

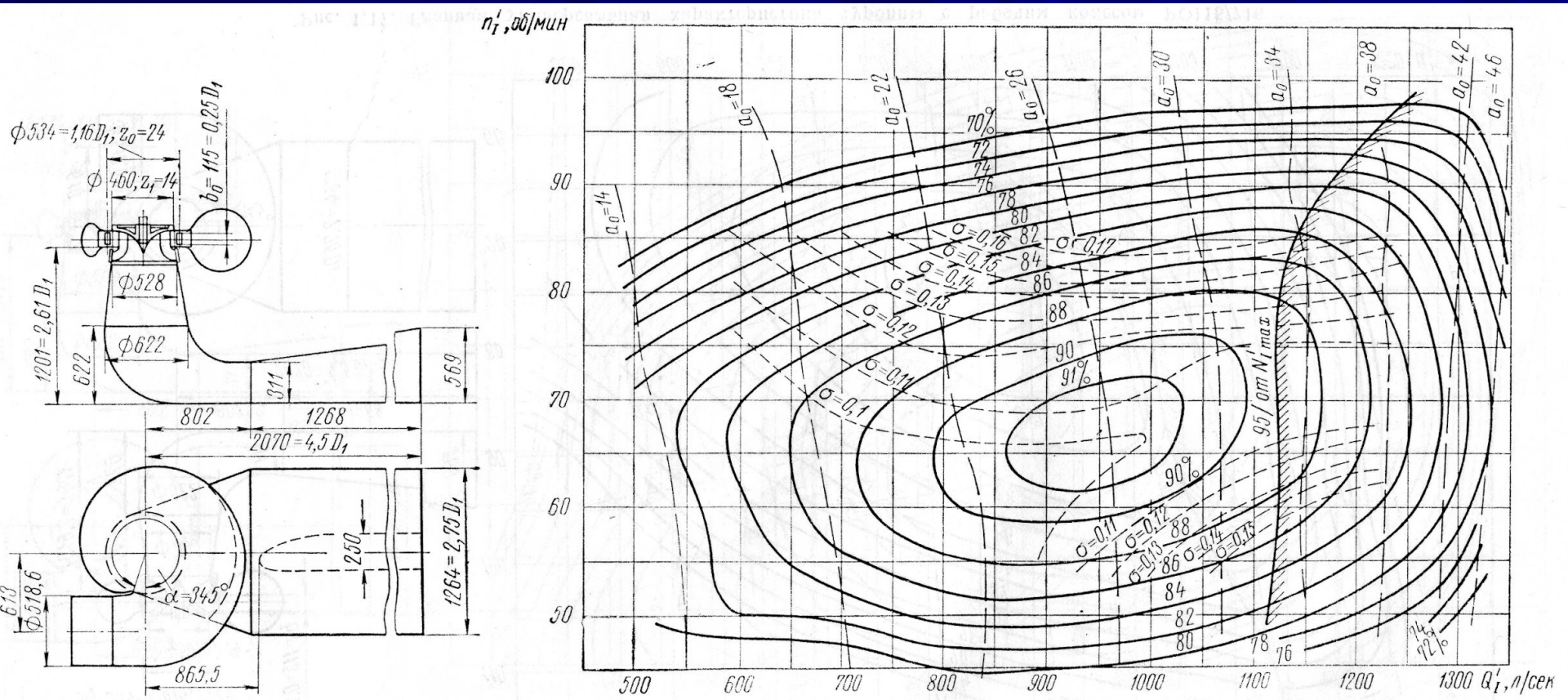


Рис. 1.16. Главная универсальная характеристика турбины с рабочим колесом РО115/697

Универсальная характеристика ковшовой гидротурбины

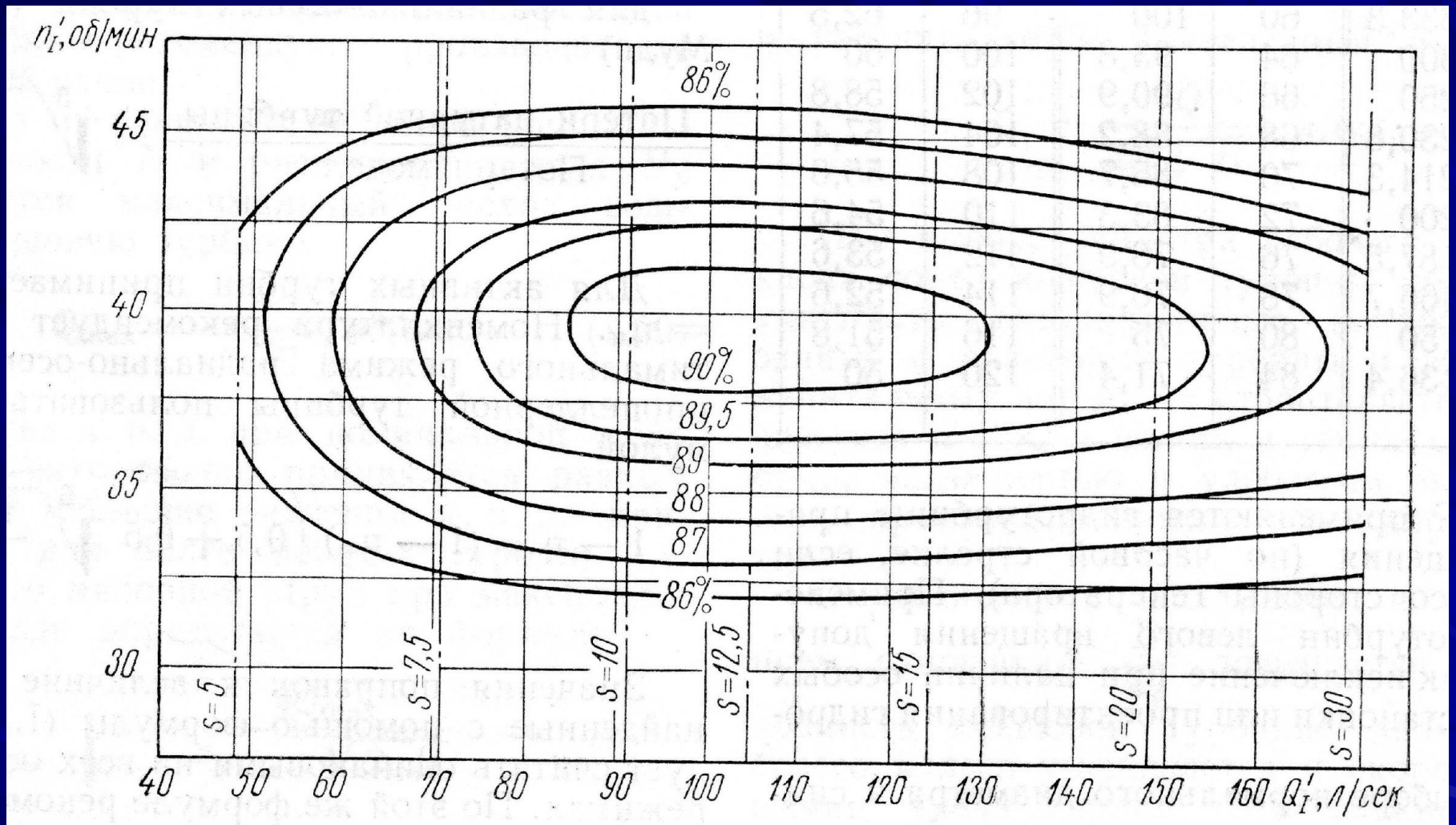
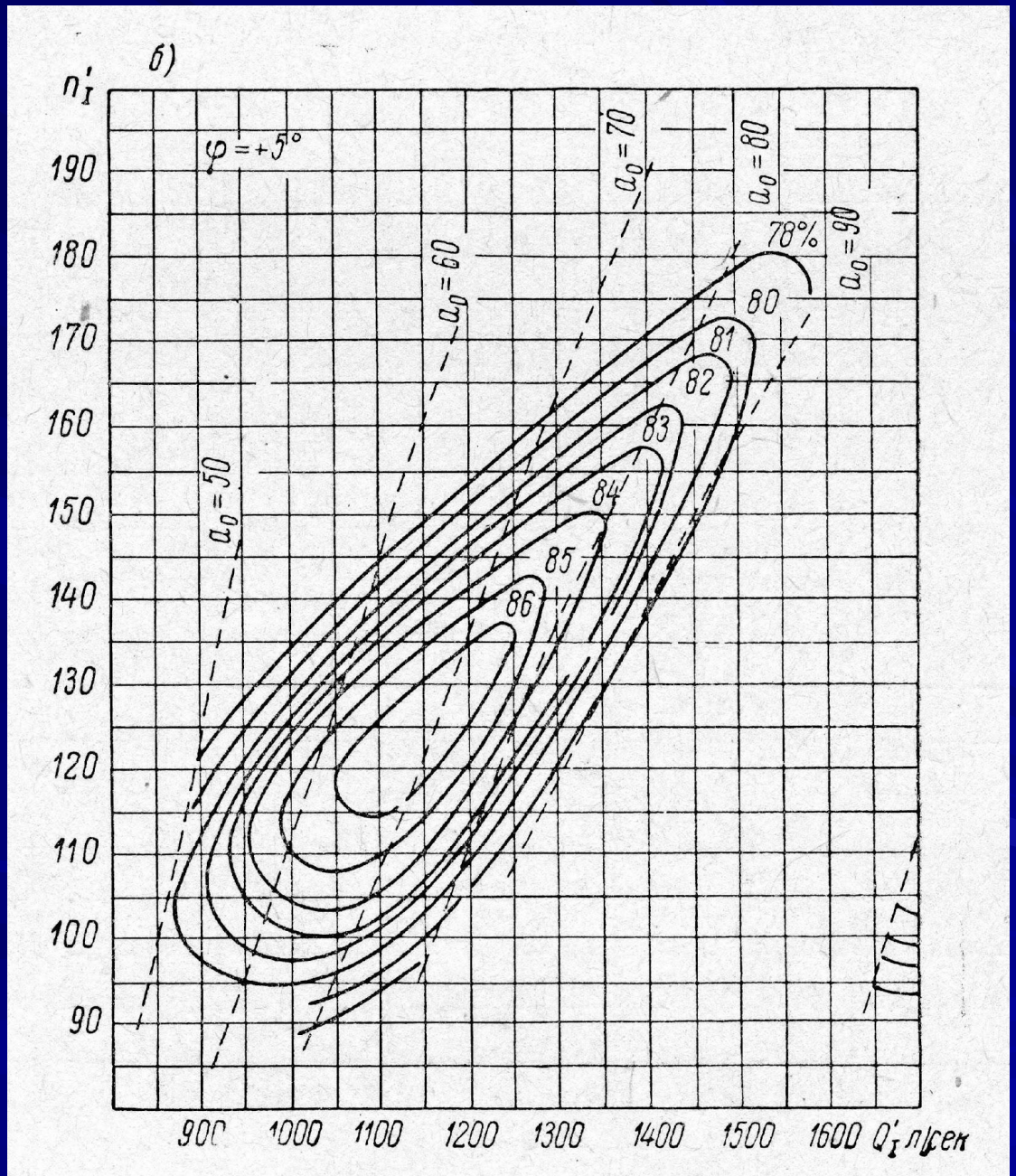
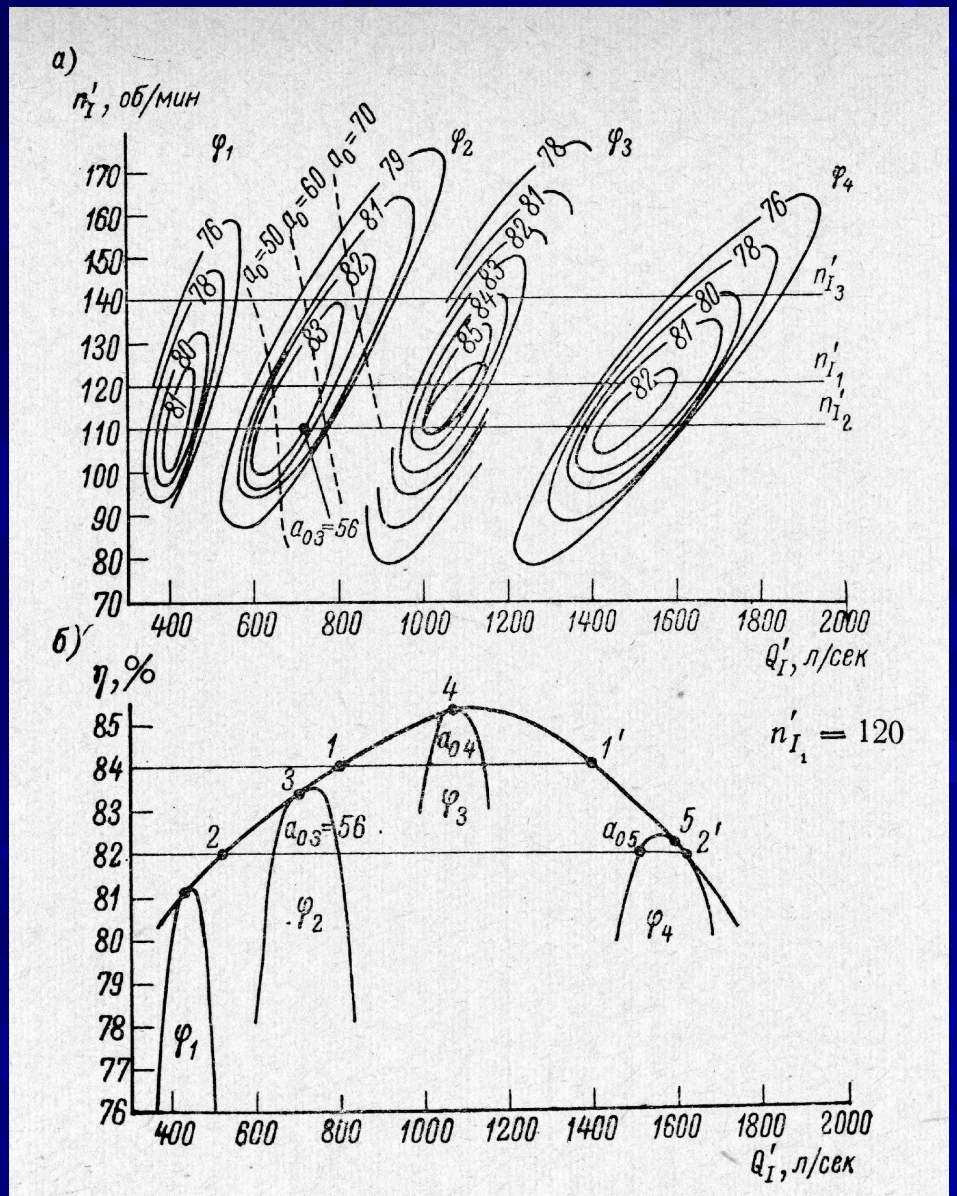


Рис. I.23. Универсальная характеристика ковшовой турбины с рабочим колесом К-560. Вертикальная шестисопловая установка. Данные модели: $D_1 = 335$ *мм*; $z_1 = 20$; $d_0 = 36$ *мм* (испытано при напоре 40 *м*; s — ход иглы в *мм*)

Универсальная характеристика пропеллерной гидротурбины



Построение универсальной характеристики поворотно-лопастной гидротурбины с учетом комбинаторной зависимости

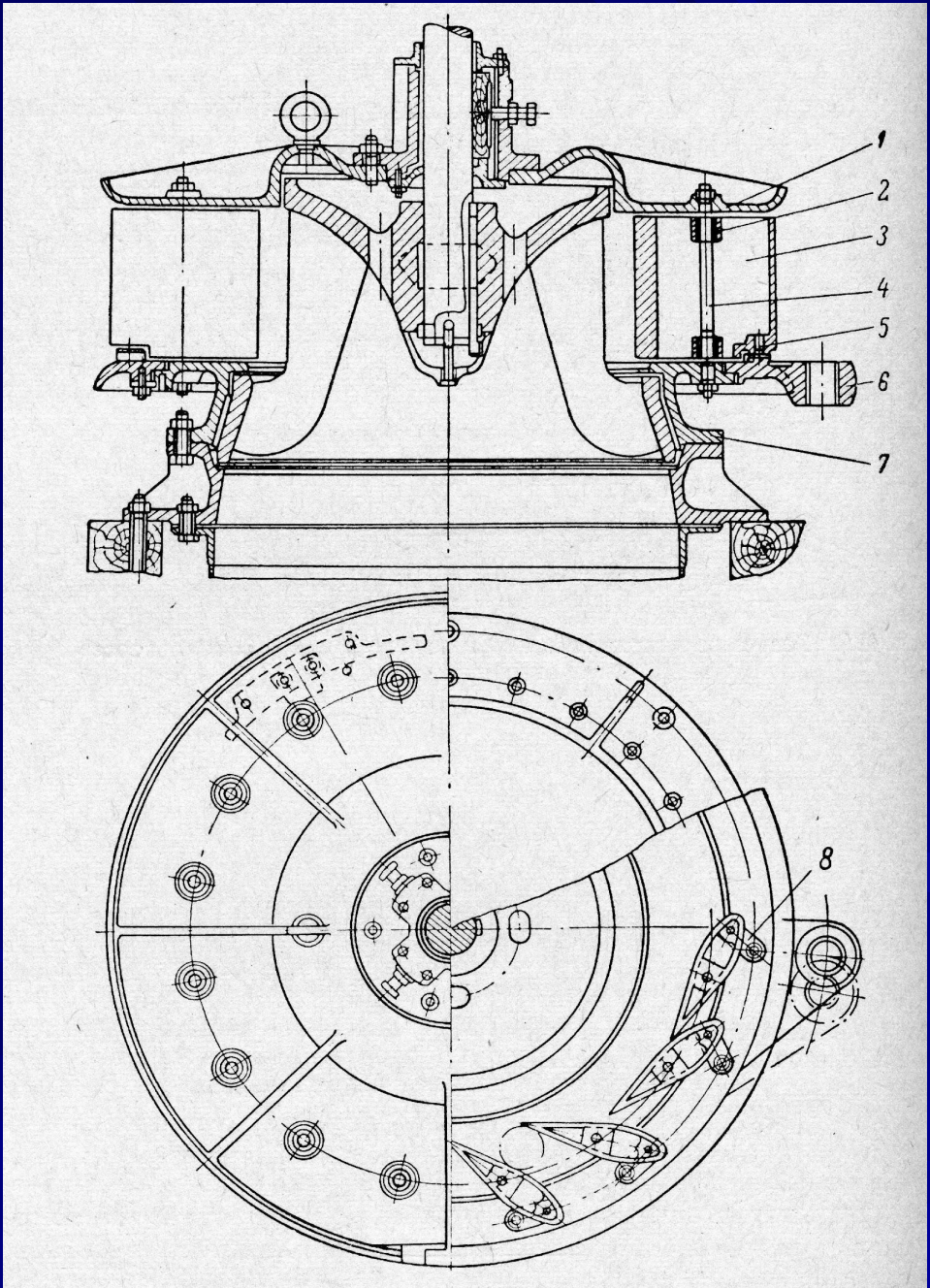


Методы регулирования различных гидротурбин

1. Радиально-осевые и пропеллерные турбины – турбины однократного регулирования, регулируются поворотом лопастей направляющего аппарата, установленного перед входом в колесо турбины
2. Поворотно-лопастные гидротурбины – турбины двукратного регулирования, регулируются как поворотом лопастей направляющего аппарата на входе в колесо, так и путем изменения в ходе работы угла установки лопастей рабочего колеса. При этом должна соблюдаться комбинаторная зависимость между углами поворота лопастей двух лопастных решеток – неподвижной и вращающейся (направляющего аппарата и колеса).
3. Ковшовые гидротурбины регулируются путем изменения проходного сечения соплового аппарата за счет поступательного движения регулировочной иглы.
4. Наклонно-струйные турбины с точки зрения регулирования аналогичны ковшовым.
5. Турбины двойного действия регулируются дросселированием
6. Любые малые турбины могут регулироваться дросселированием, однако это невыгодно с энергетической точки зрения и поэтому для больших турбин неприменимо.

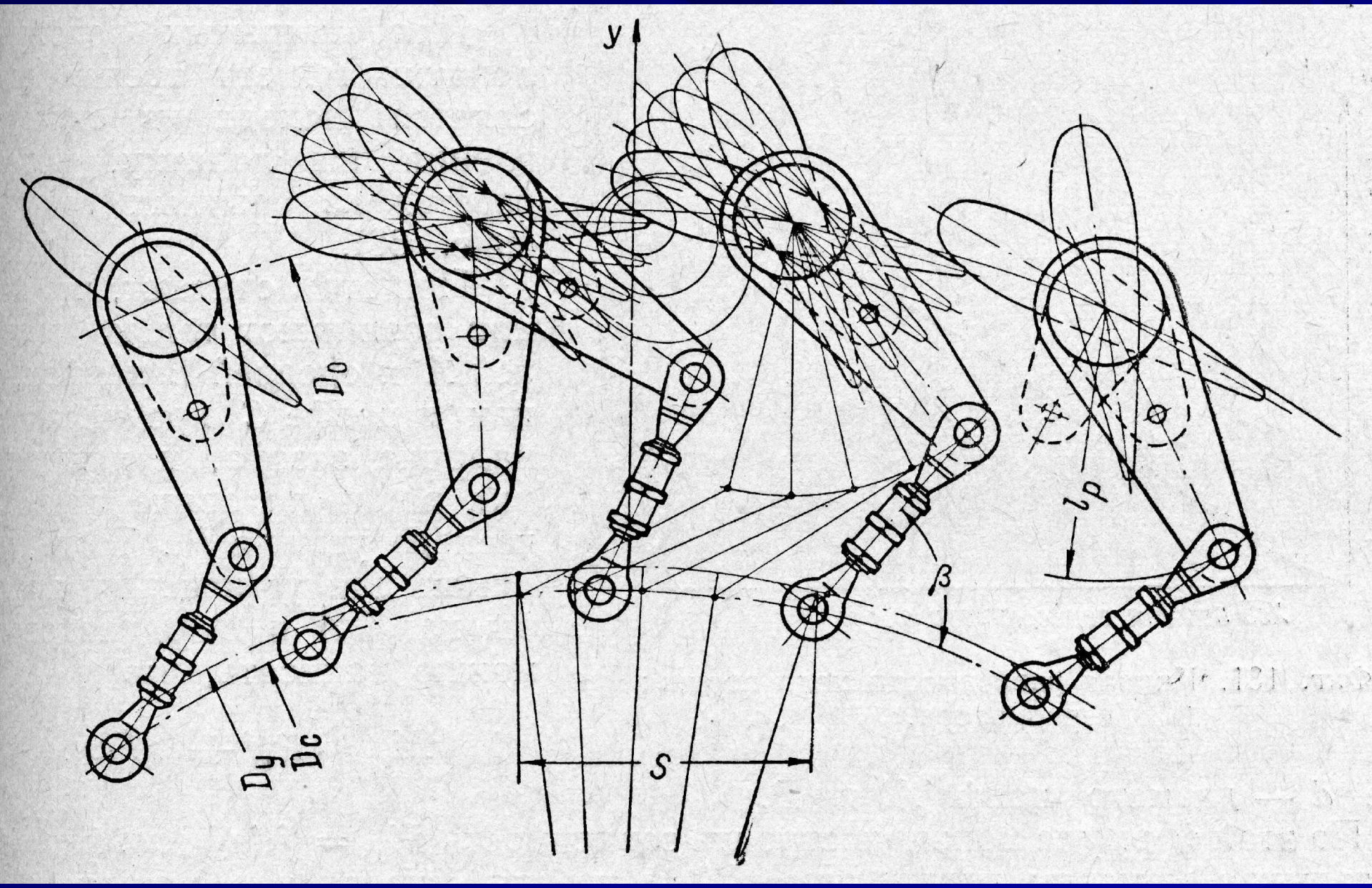
Любое регулирование турбин имеет целью поддерживать строго *постоянную* частоту вращения вала электрогенератора при *переменной* мощности на клеммах генератора. Соответственно, в основе алгоритмов управления лежит обратная связь по частоте вращения вала. Для малых турбин, включенных в общую сеть, можно в ряде случаев обойтись без устройств регулирования, т.к. роль опорной частоты играет сетевой ток от внешнего источника.

Конструкция направляющего аппарата турбины

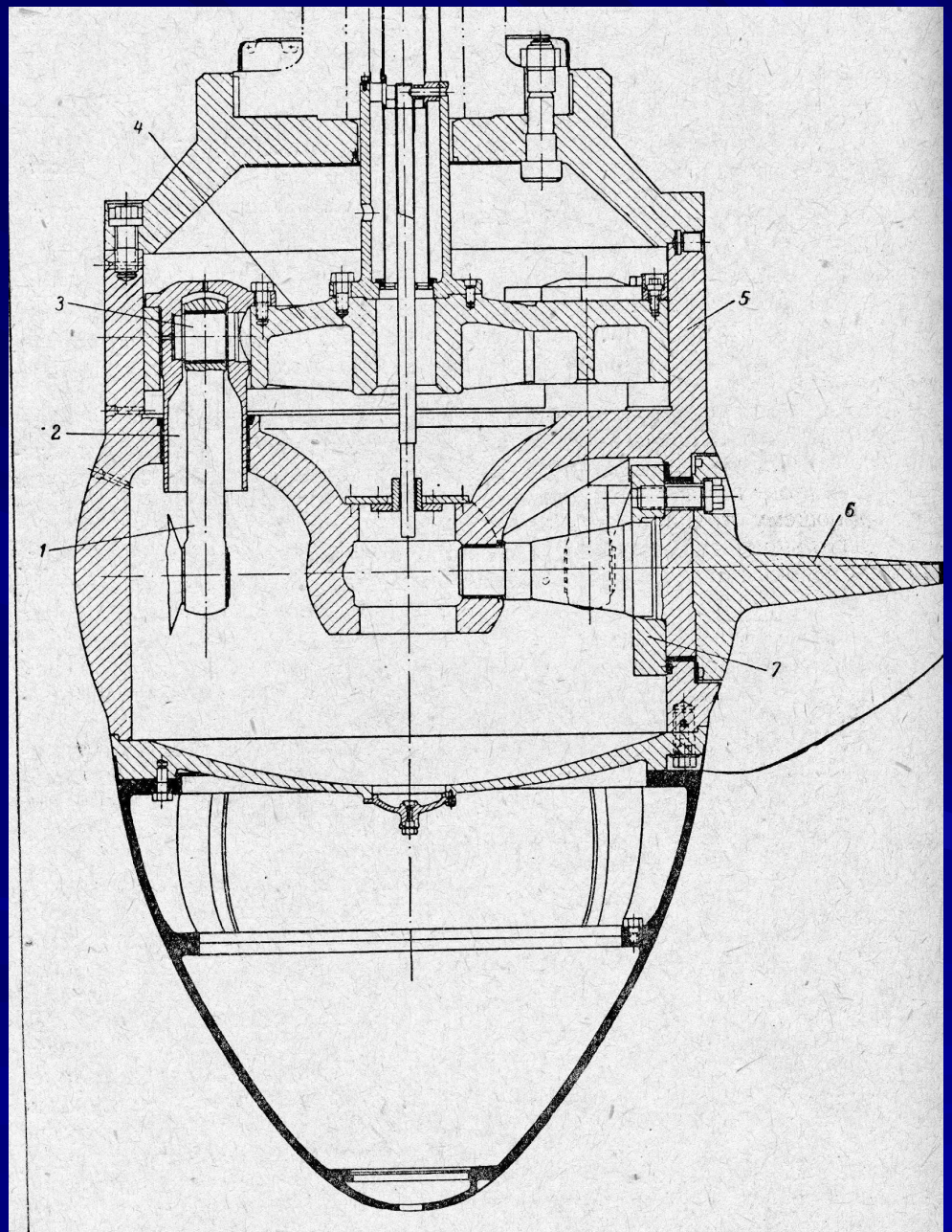


Фотография направляющего аппарата

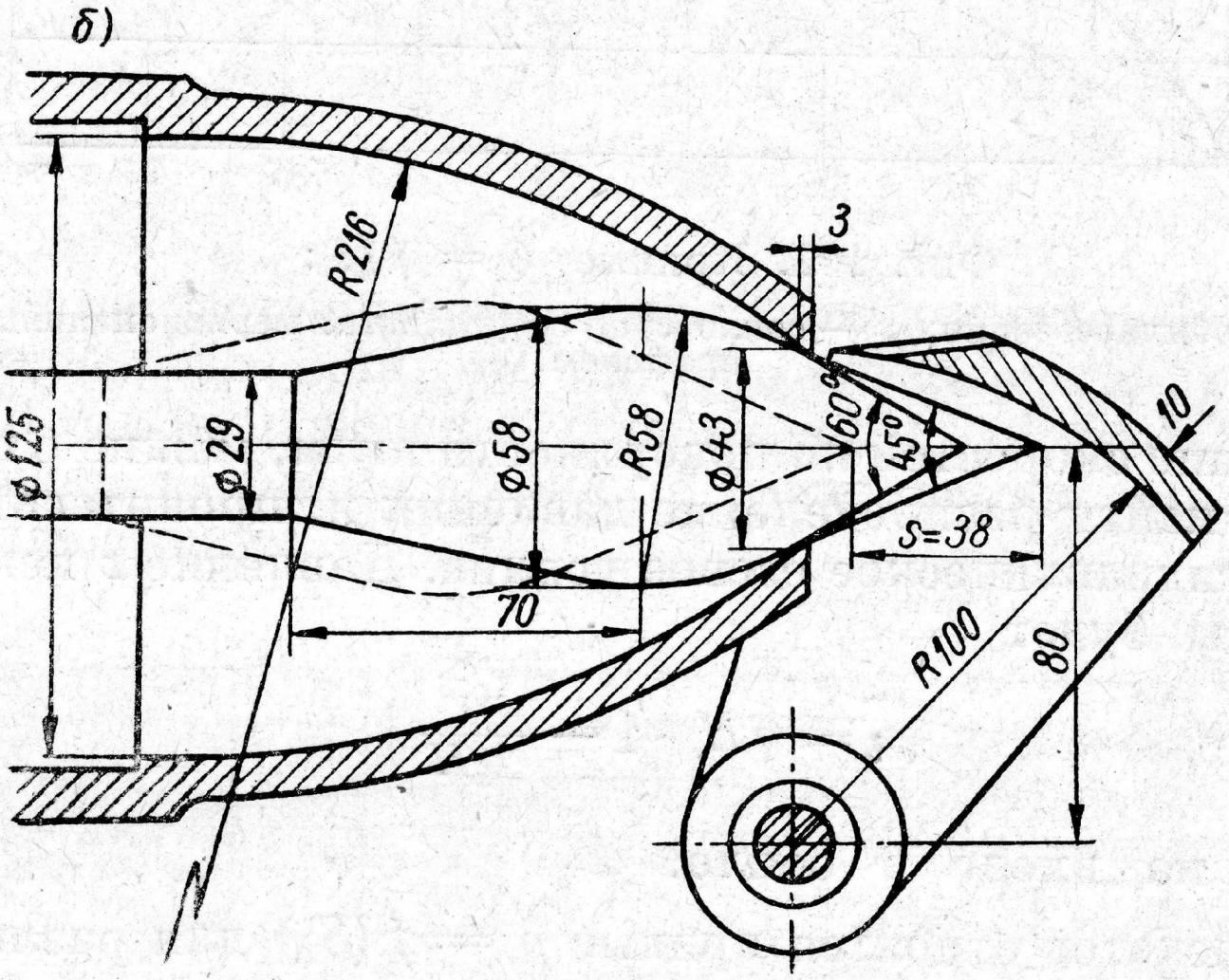
Кинематика направляющего аппарата



Один из вариантов механизма поворота лопастей во втулке колеса поворотно-лопастной гидротурбины

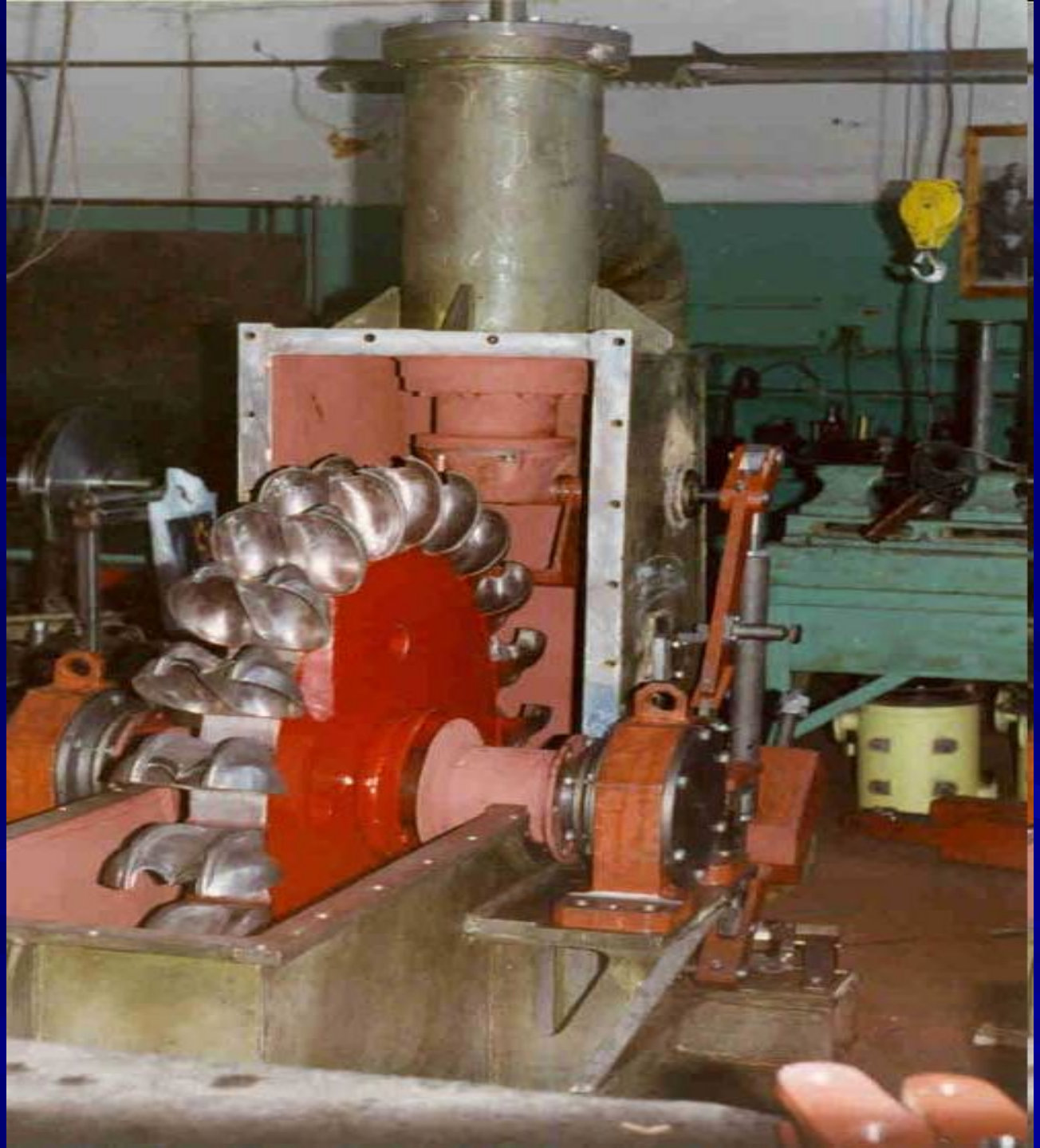


Элемент управления ковшовой гидротурбины



Фиг. 103. Рекомендуемые профили сопел: *а* — со средней степенью сжатия ($\gamma = 80°$, $\alpha = 54°$); *б* — с малой степенью сжатия ($\gamma = 60°$, $\alpha = 45°$).

Сборка пропеллерной гидротурбины для миниГЭС



Ковшовая гидротурбина

Ковшовые турбины

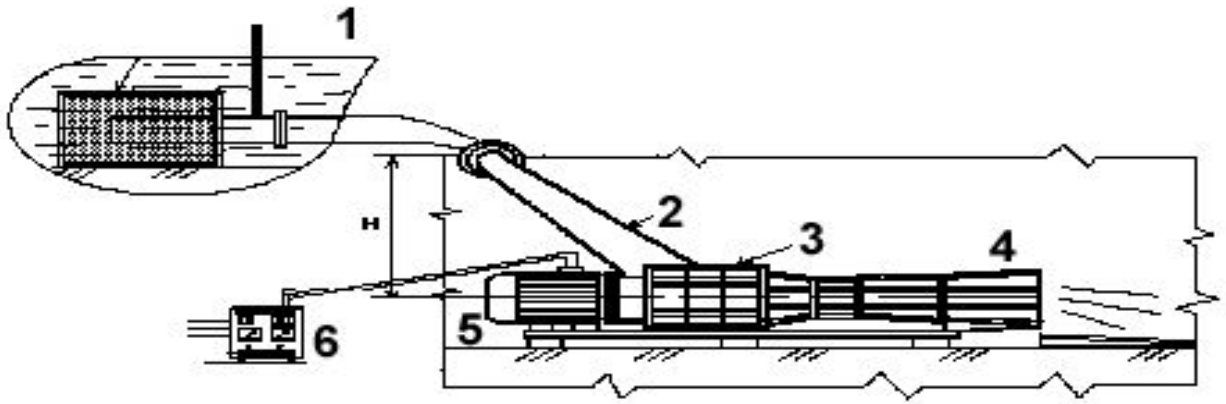
Пропеллерные гидроагрегаты по 550 КВт

МикроГЭС

Схема микроГЭС

В комплект поставки входят: водозаборное устройство (1), водовод (2), энергоблок (турбина-3, генератор-5), выпускной коллектор (4) и устройство автоматического регулирования (6).

Схема установки микроГЭС



Основные технические характеристики микрогидроэлектростанций

Микрогидроэлектростанции с пропеллерными турбинами

Параметры	Тип МикроГЭС					
	МикроГЭС 10Пр		МикроГЭС 15Пр	МикроГЭС 50Пр		МикроГЭС 100Пр
Мощность,кВт	0,6-4,0	2,2-10,0	3,5-15,0	10,0-30,0	10,0-50,0	40,0-100,0
Напор,м	2,0-4,5	4,5-10,0	4,5-12,0	2,0-6,0	4,0-10,0	6,0-18,0
Расход,$м^3/с$	0,07-0,14	0,10-0,21	0,10-0,30	0,3-0,8	0,4-0,9	0,5-1,2
Частота вращения, $мин^{-1}$	1000	1500	1500	600	750	1000
Номинальное напряжение, В	230		400	230, 400		230, 400
Номинальная частота тока, Гц	50		50	50		50

Микрогидроэлектростанции с диагональной и ковшовой турбинами

Параметры	Тип МикроГЭС		
	МикроГЭС 20ПрД	МикроГЭС 100К	МикроГЭС 200К
Мощность,кВт	10 - 20	до 100	до 180
Напор,м	8-18	40-250	
Расход,$м^3/с$	0,08-0,17	0,015-0,060	0,015-0,100
Частота вращения, $мин^{-1}$	1500	600; 750; 1000; 1500	
Номинальное напряжение, В	230,400	230 , 400	
Номинальная частота тока, Гц	50	50	

Агрегаты миниГЭС

Гидроагрегаты с пропеллерными турбинами

Параметры	Тип гидроагрегата				
	ГА1	ГА8	ГА14	Пр15	Пр30
Мощность,кВт	100-330	150-1800	20-300	до 130,0	до 200,0
Напор,м	3,5-9,0	6,0-22,0	2,0-7,2	2,0-12,0	4,0-18,0
Расход,$м^3/с$	2,3-6,2	2,5-11,0	2,5-5,75	0,44-1,5	0,38-1,3
Частота вращения ротора турбины, $мин^{-1}$	200-360	300-600	250-375	600; 750; 1000	750; 1000; 1500
Номинальное напряжение,В	400	400; 6000; 10000	400	230/400	230/400
Номинальная частота тока, Гц	50	50	50	50	50

Гидроагрегаты с радиально-осевыми турбинами

Параметры	Типгидроагрегата			
	ГА2	ГА4	ГА9	ГА11
Мощность,кВт	до 950	550	3300	5600
Напор,м	30-100	25-55	70-120	100-160
Расход,$м^3/с$	0,35-0,9	0,4-1,0	0,8-3,2	1,5-4,0
Частота вращения ротора турбины,$мин^{-1}$	1000; 1500	1000	600; 750; 1000	750; 1000
Номинальное напряжение,В	400; 6000	400; 6000	6000; 10000	6000;10000
Номинальная частота тока, Гц	50	50	50	50

Гидроагрегаты с ковшовыми турбинами

Параметры	Тип гидроагрегата	
	ГА-5	ГА-10
Мощность,кВт	145-620	290-3300
Напор,м	150-250	200-450
Расход,$м^3/с$	0,17-0,32	0,19-0,90
Частота вращения ротора турбины $мин^{-1}$	500;600	600;750;1000
Номинальное напряжение, В	400; 6000	400; 6000; 10000
Номинальная частота тока, Гц	50	50

Гидроаккумулирующие станции (ГАЭС)

Загорская (Сергиев-Посадская) ГАЭС

Строительство ГАЭС началось в 1974, закончилось в 2003. Состав сооружений ГАЭС:

- земляная плотина на реке Кунья;
- дамбы, образующие верхний бассейн;
- напорные водоводы;
- здание ГАЭС.

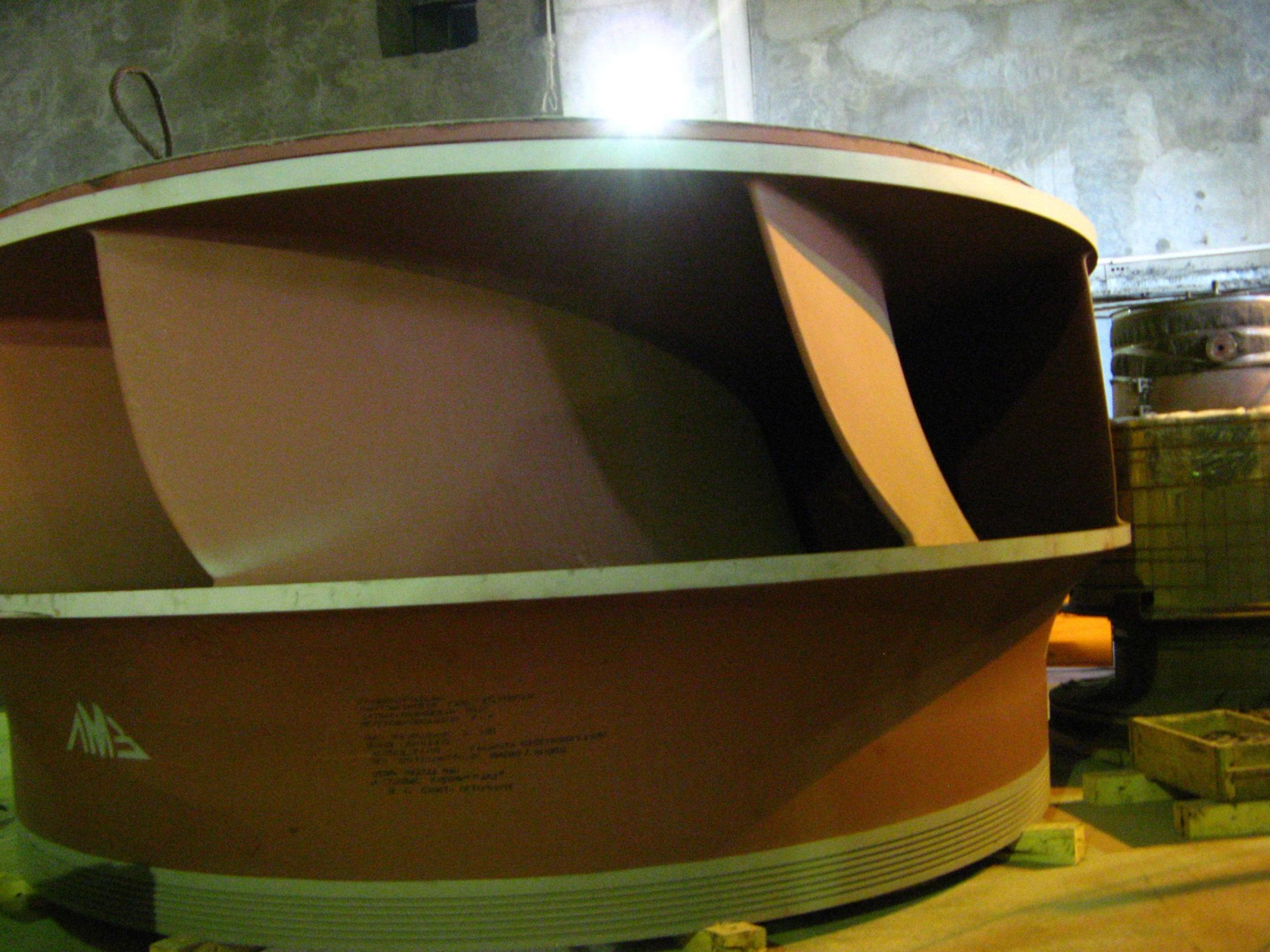
Мощность ГАЭС — 1200/1320 МВт (в турбинном/насосном режимах), среднегодовая выработка — 1 932 млн кВт*ч.

В здании ГАЭС установлено 6 обратимых гидроагрегатов радиально-осевого типа мощностью по 200/220 МВт, работающих при расчётном напоре 100 м.

ГАЭС создала 2 небольших водохранилища — в нижнем бьефе, на реке Кунья, и в верхнем бьефе.

Сейчас строится 2 очередь ГАЭС, мощностью 840 МВт.

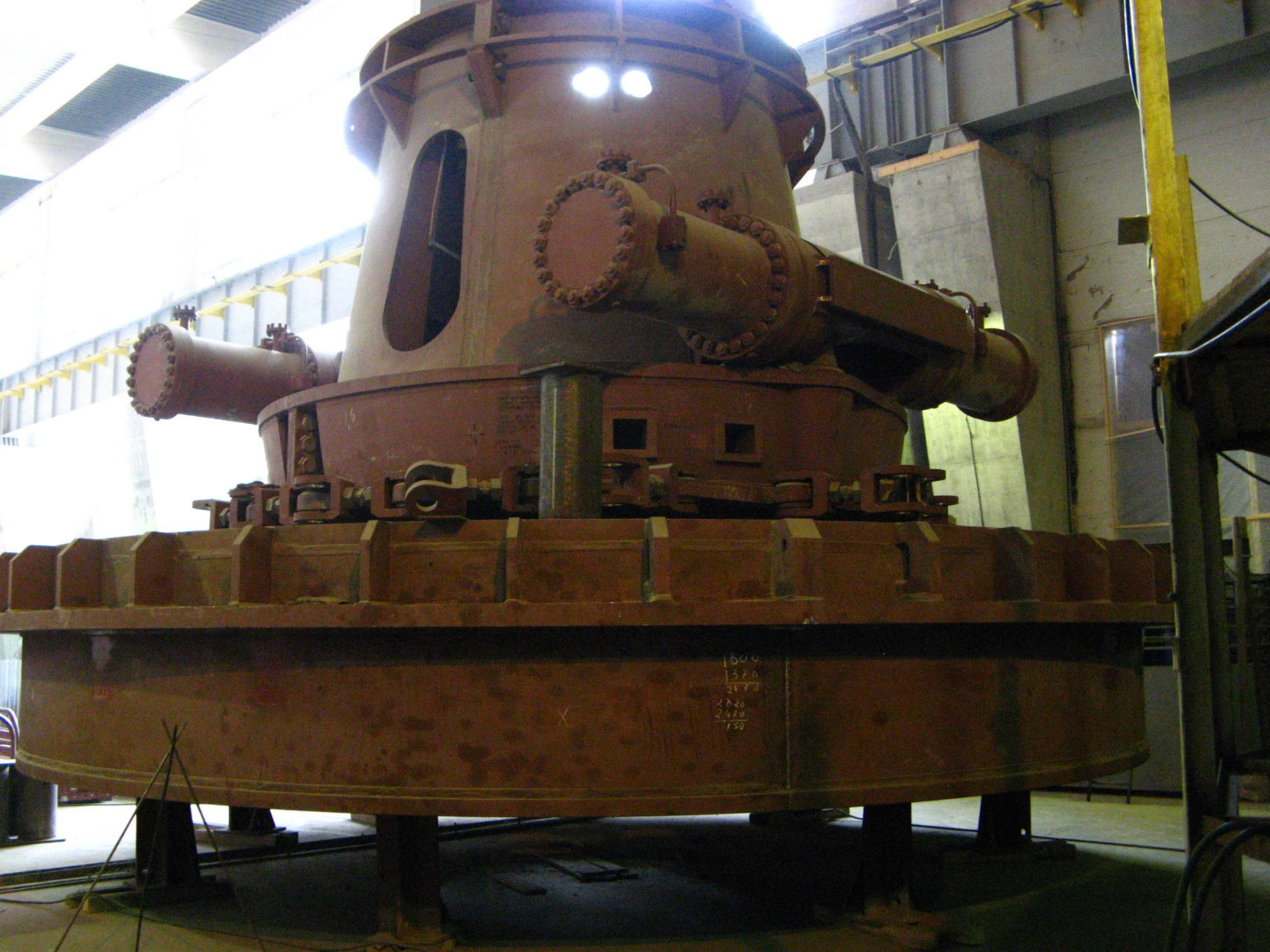
Фотографии Загорской ГАЭС

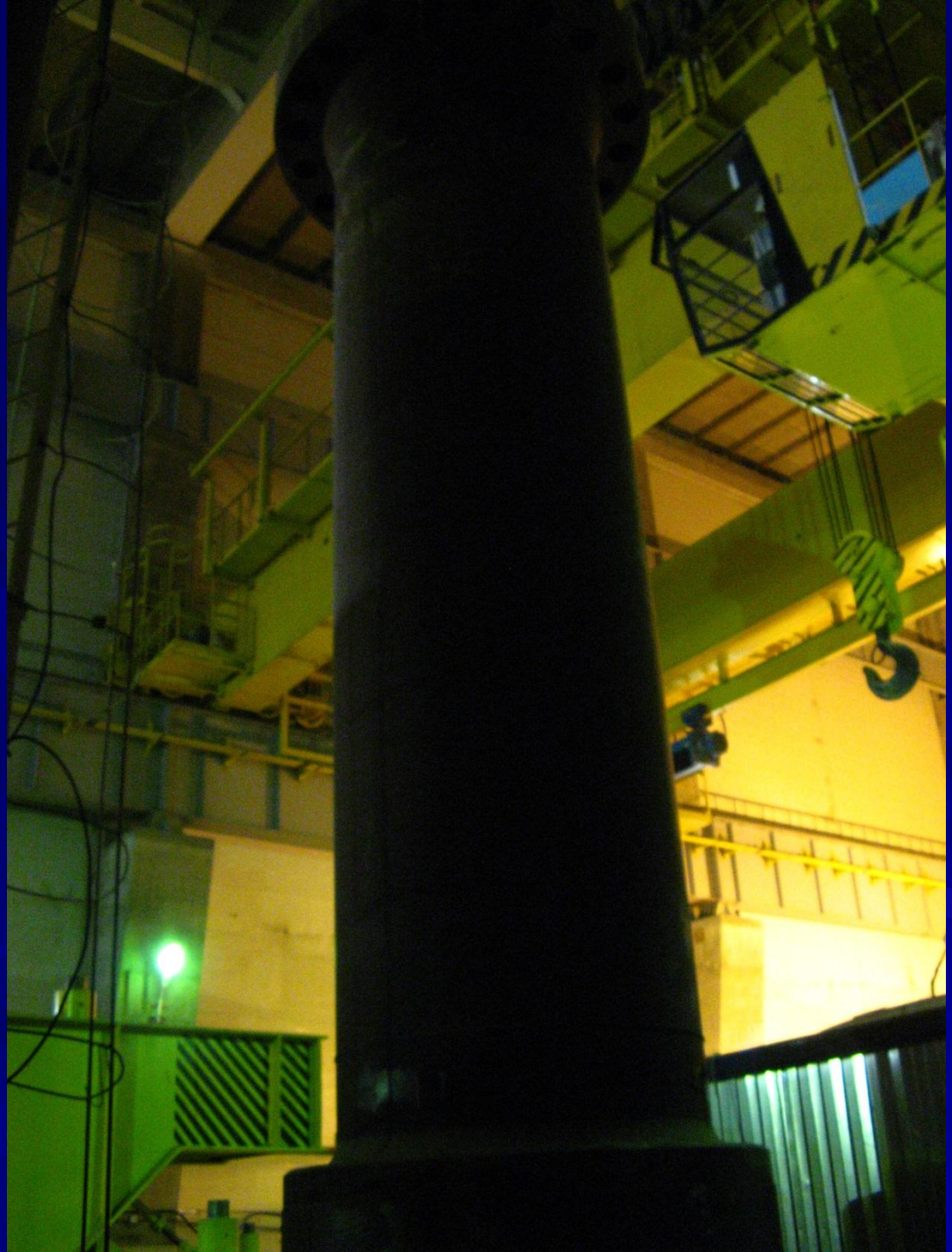


ГРУЗОПОЛУЧАТЕЛЬ:
ОАО"ЗАГОРСКАЯ ГАЗС - 2", РОССИЯ
141342, МОСКОВСКАЯ ОБЛ.
СЕРГИЕВО-ПОСАДСКИЙ Р - Н

ПОС. БОГОРОДСКОЕ Д. 100
ЗАКАЗ 20184475
МЕСТО N. 2 / 110 ГАБАРИТЫ 6382X6382X29
ВЕС БРУТТО/НЕТТО, КГ 104600 / 101900

ОТПР. ФИЛИАЛ ОАО
"СИЛОВЫЕ МАШИНЫ" "ЛМЗ"
В Г. САНКТ - ПЕТЕРБУРГЕ





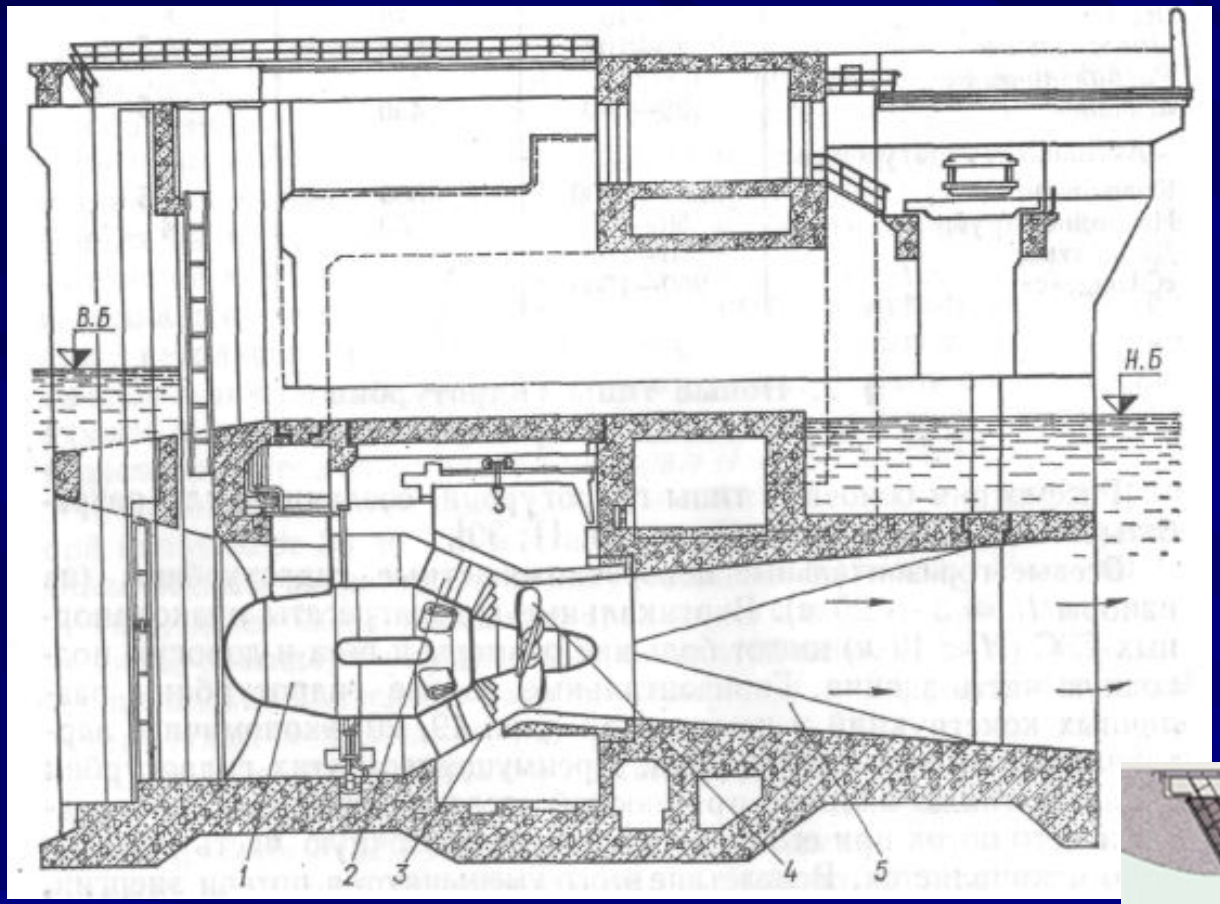
HET
KOGA

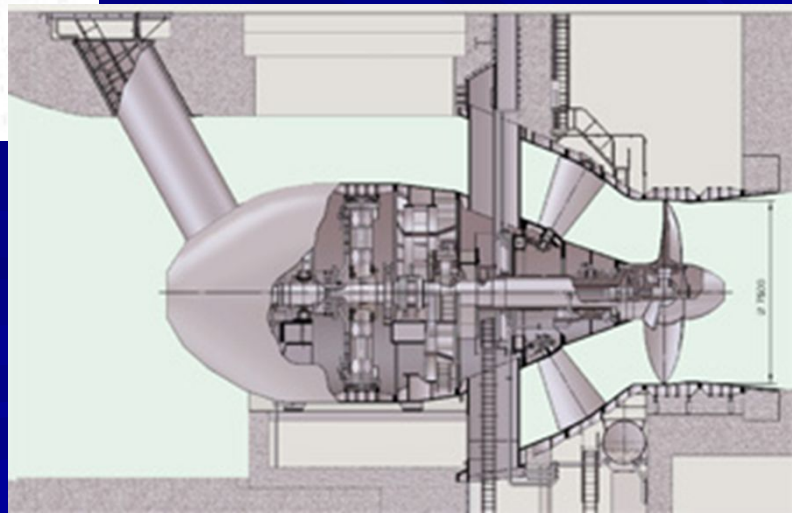
Киевская ГАЭС

Рабочий напор – 73 м.

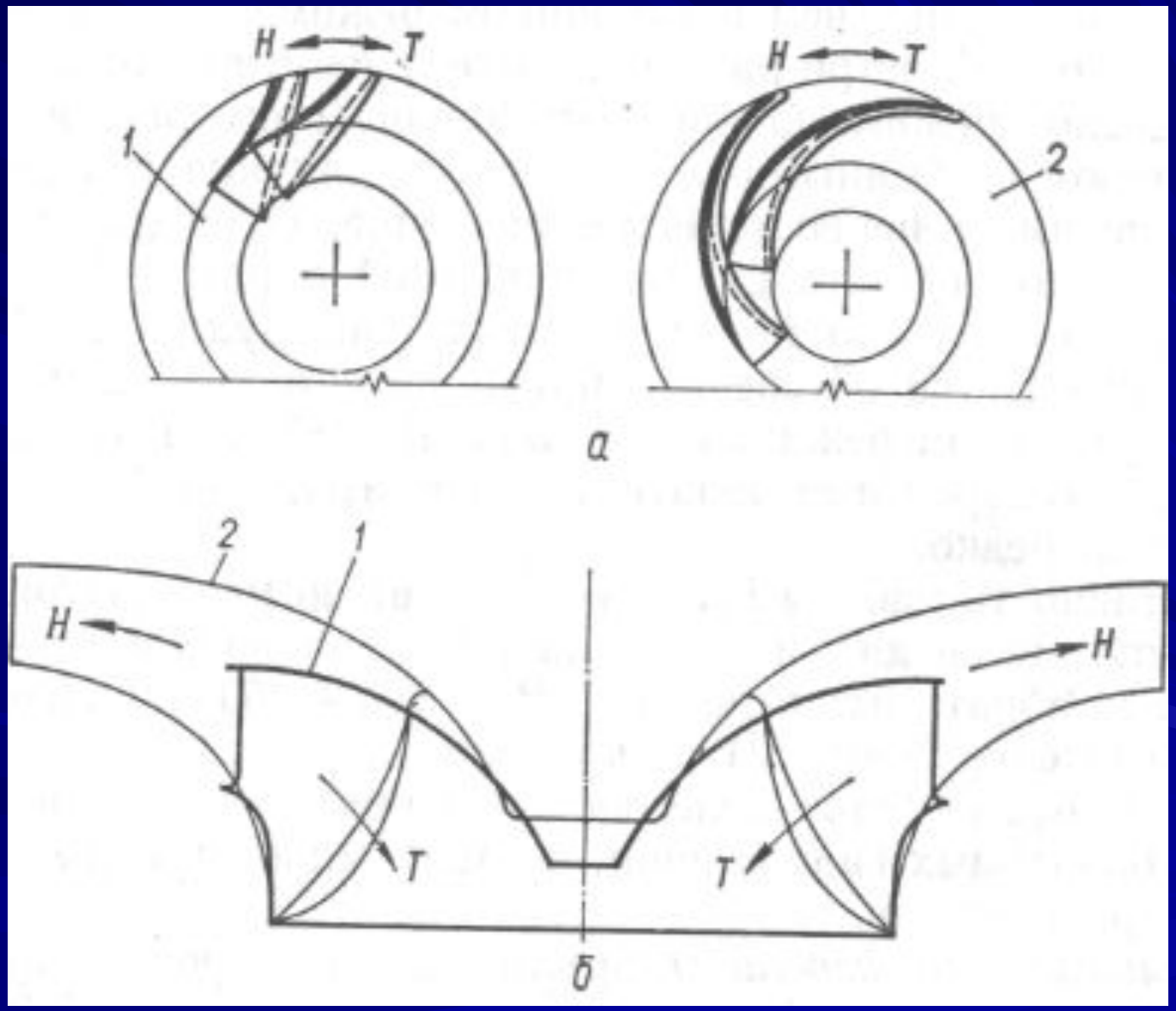
Мощность – 235 МВт

Обратимая гидромашина осевая капсульного типа

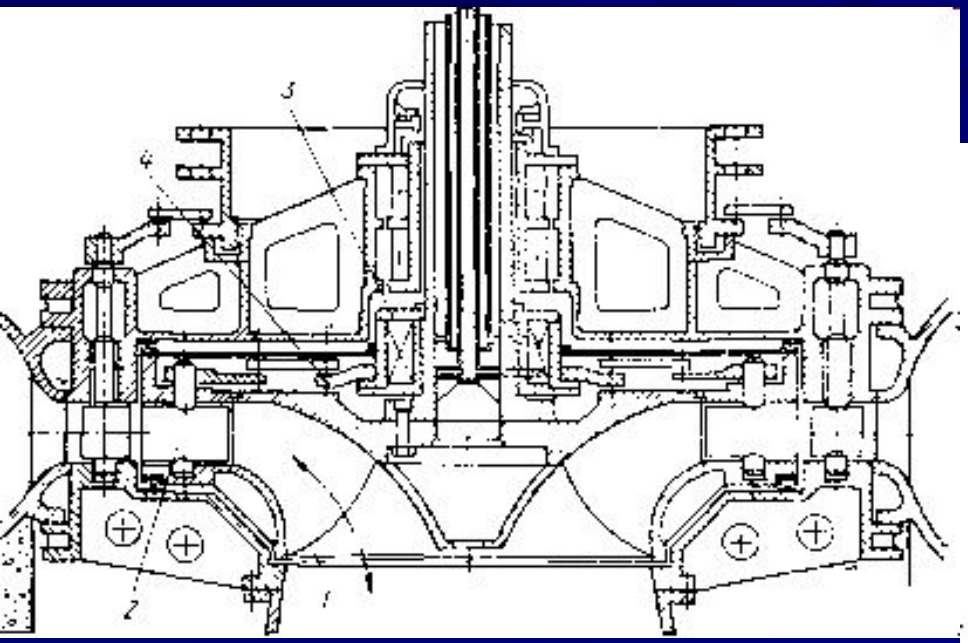


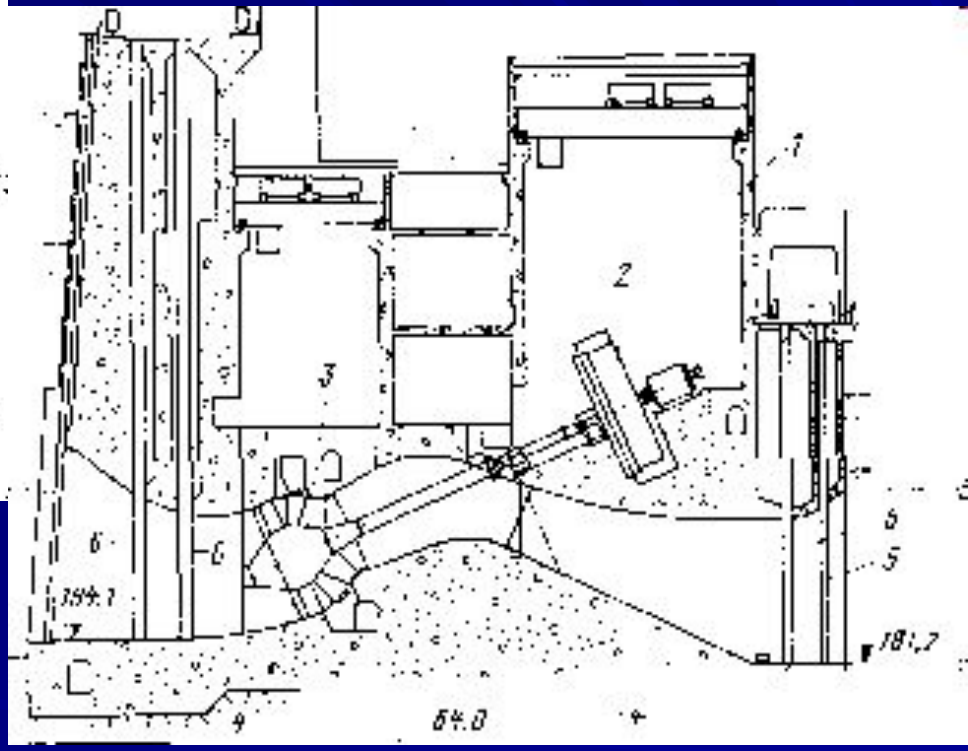


Сравнение насосного и турбинного колеса

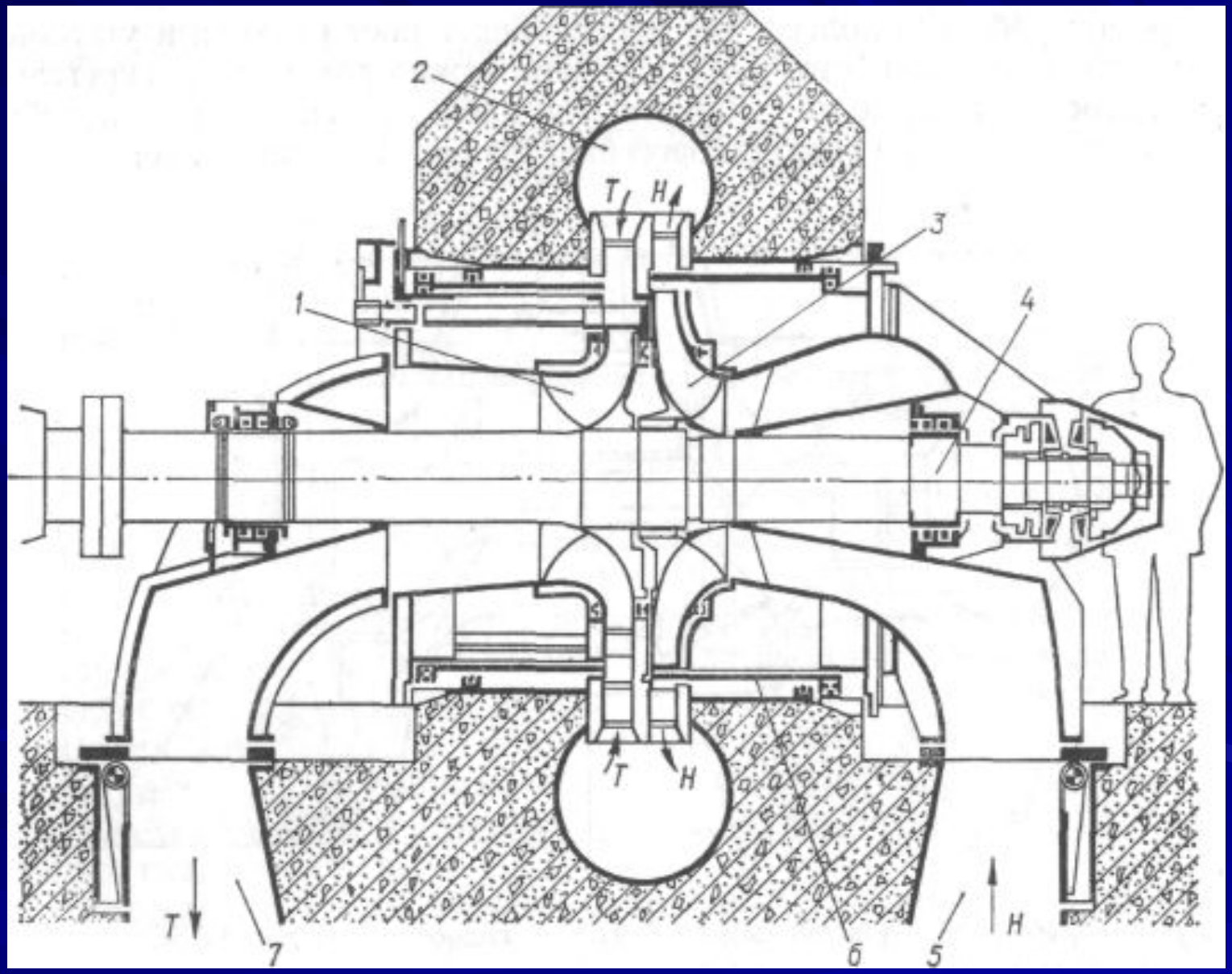


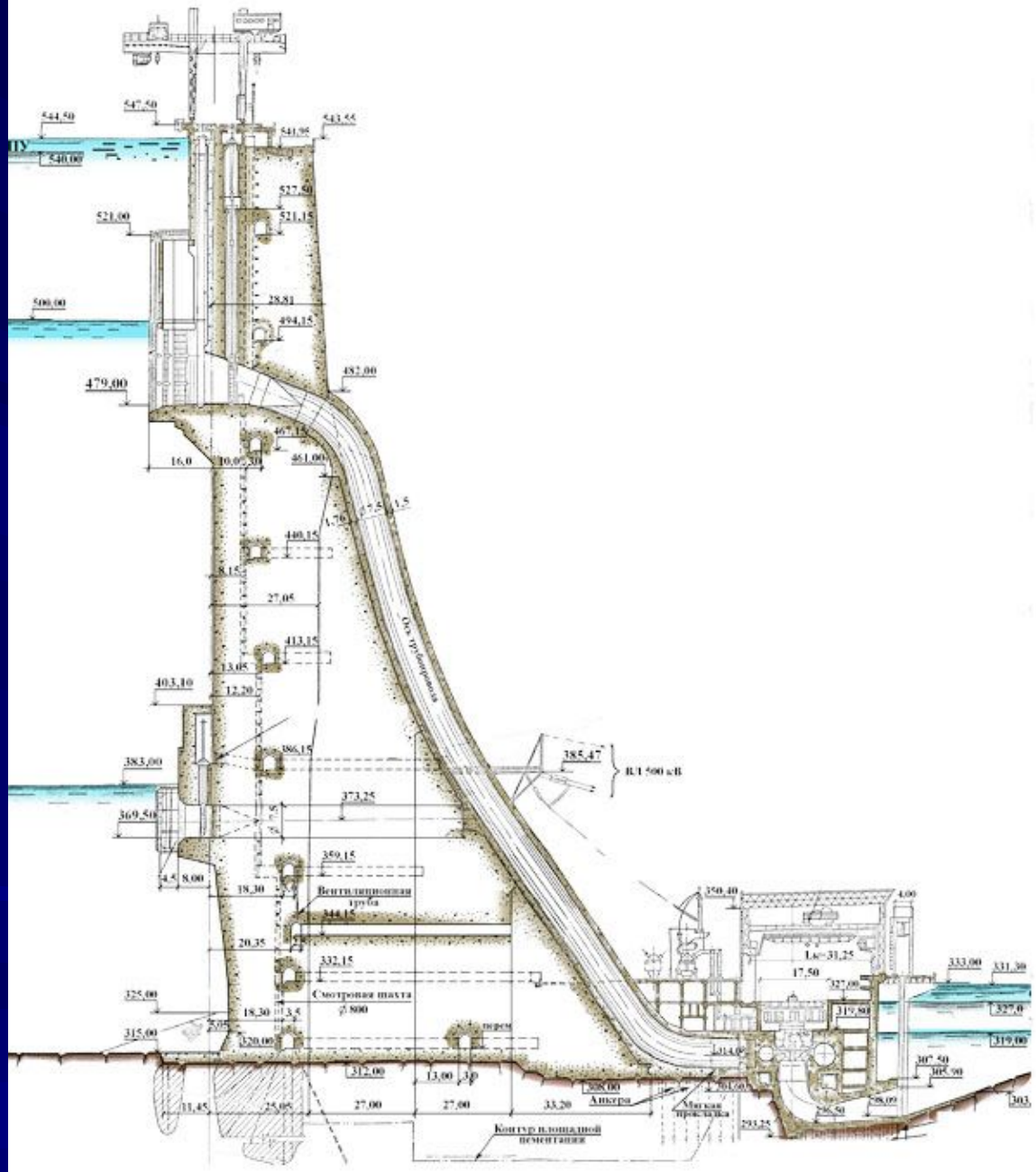
Обратимые гидромашины





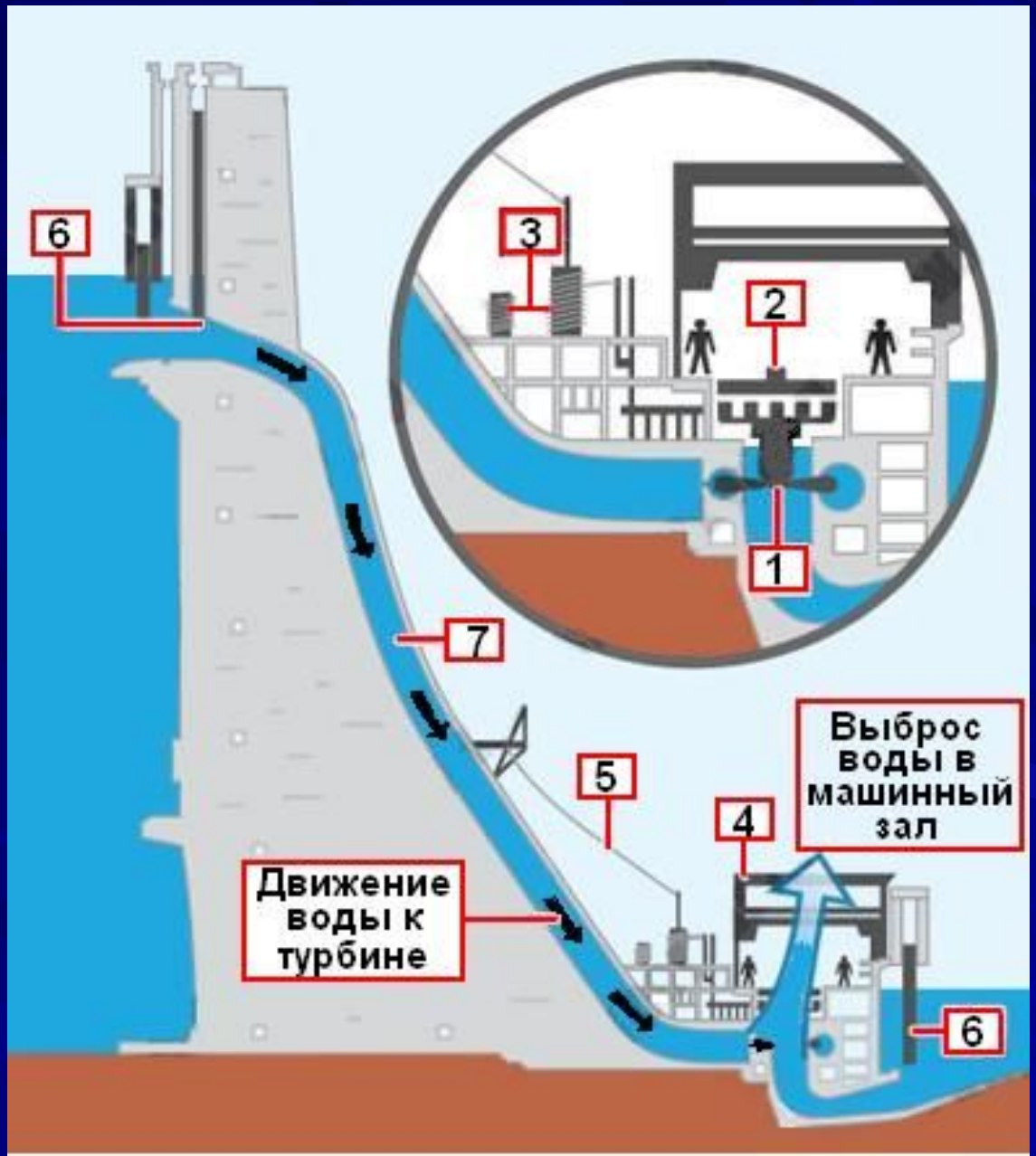
Обратимая гидромашина «Изоджир»





- Разрез плотины и машзала СШ ГЭС

Упрощенная схема аварии на СШГЭС



Порядок расчета гидротурбины (для РО и ПЛ)

1. Исходные данные – Нмакс, Нр, Нмин, мощность (или расход), высота отсасывания Hs
2. Выбор типа турбины по коэффициенту быстроходности, напору и сводному графику характеристик
3. Есть универсальная характеристика выбранной модельной турбины – с нее берем величину приведенного расхода, по нему определяем диаметр D1 из формулы подобия. Находим приведенную частоту вращения (опт.)
4. Находим n и округляем до ближайшего значения синхронной частоты вращения
5. Уточняем К.П.Д. с учетом Re
6. Проверяем величину высоты отсасывания

Определение приведенных величин и ns

Если обозначить полный к.п. д. через η, гидравлический к. п. д. — через $\eta_г$ и объемный к. п. д. — через η_q, то точные уравнения для приведенных величин примут вид:

$$\left.\begin{aligned} n_1' &= \frac{nD_1}{\sqrt{H}}\sqrt{\frac{\eta_г}{\eta_{г_м}}}; \\ Q_1' &= \frac{Q}{D_1^2\sqrt{H}}\cdot\frac{\eta_{q_м}}{\eta_q}\sqrt{\frac{\eta_г}{\eta_{г_м}}}; \\ N_1' &= \frac{N}{D_1^2 H\sqrt{H}}\cdot\frac{\eta\eta_{q_м}}{\eta_м\eta_q}\sqrt{\frac{\eta_г}{\eta_{г_м}}}. \end{aligned}\right\} \quad (1.7)$$

Здесь индексом $м$ обозначены значения к. п. д. модели, без индекса даны к. п. д. натурной гидротурбины, для которой подсчитываются приведенные величины.

$$n_s = 1{,}167\,\frac{n\sqrt{N}}{H^{\frac{5}{4}}\sqrt{H}},$$

$$n_s = 3{,}65 n_1'\sqrt{Q_1'\eta}.$$

Типы турбин	Пределы n_s	Область применения по H, *м*
Пропеллерные и поворотнолопастные:		
Быстроходные . .	950—750	5—12
Средней быстроходности	750—550	12—22
Тихоходные . . .	550—350	22—40
Радиальноосевые:		
Быстроходные . .	400—250	20—50
Средней быстроходности	250—150	50—120
Тихоходные . . .	150—70	120—300
Ковшевые	50—10	800—2000

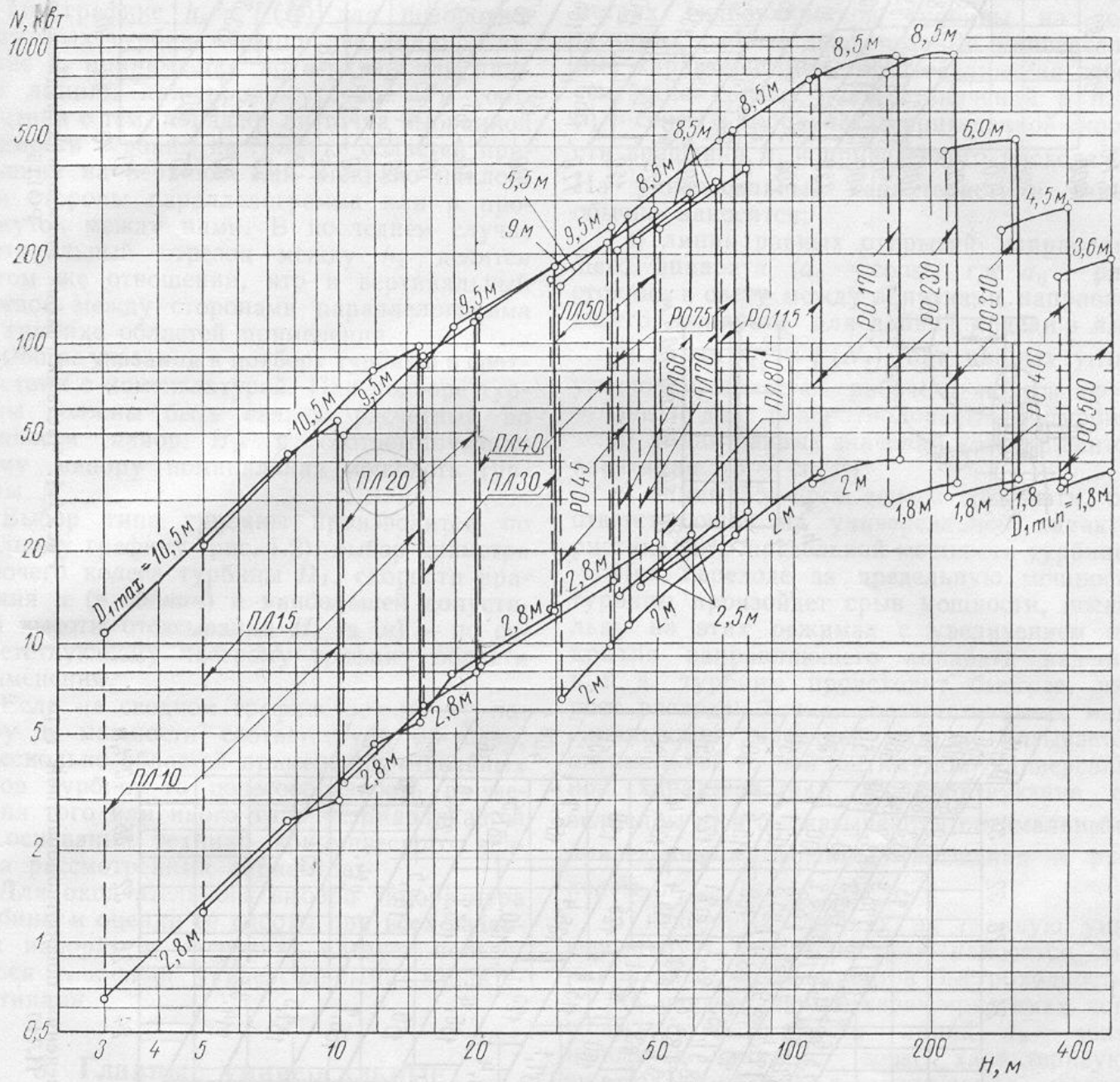


Рис. I.2. Сводный график областей применения вертикальных поворотнолопастных и радиально-осевых гидротурбин

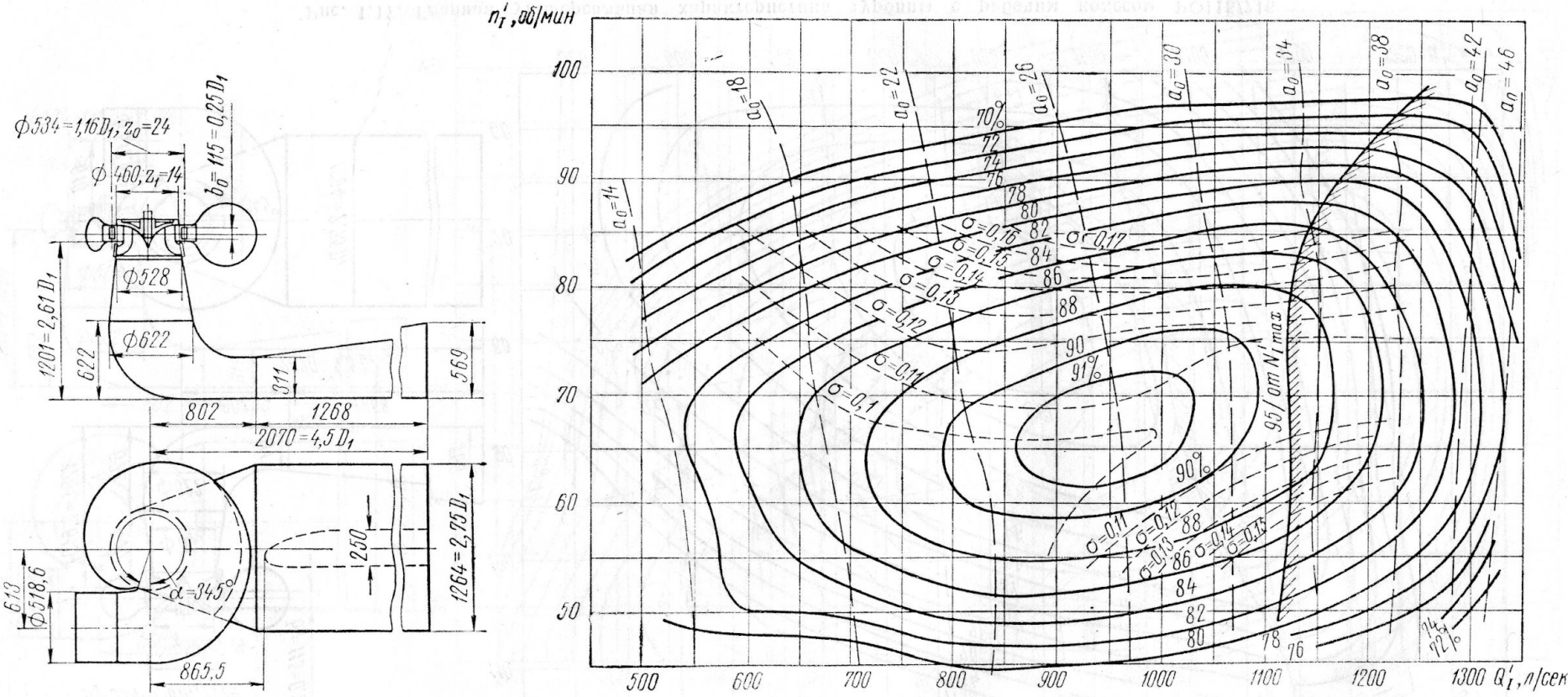


Рис. I.16. Главная универсальная характеристика турбины с рабочим колесом РО115/697

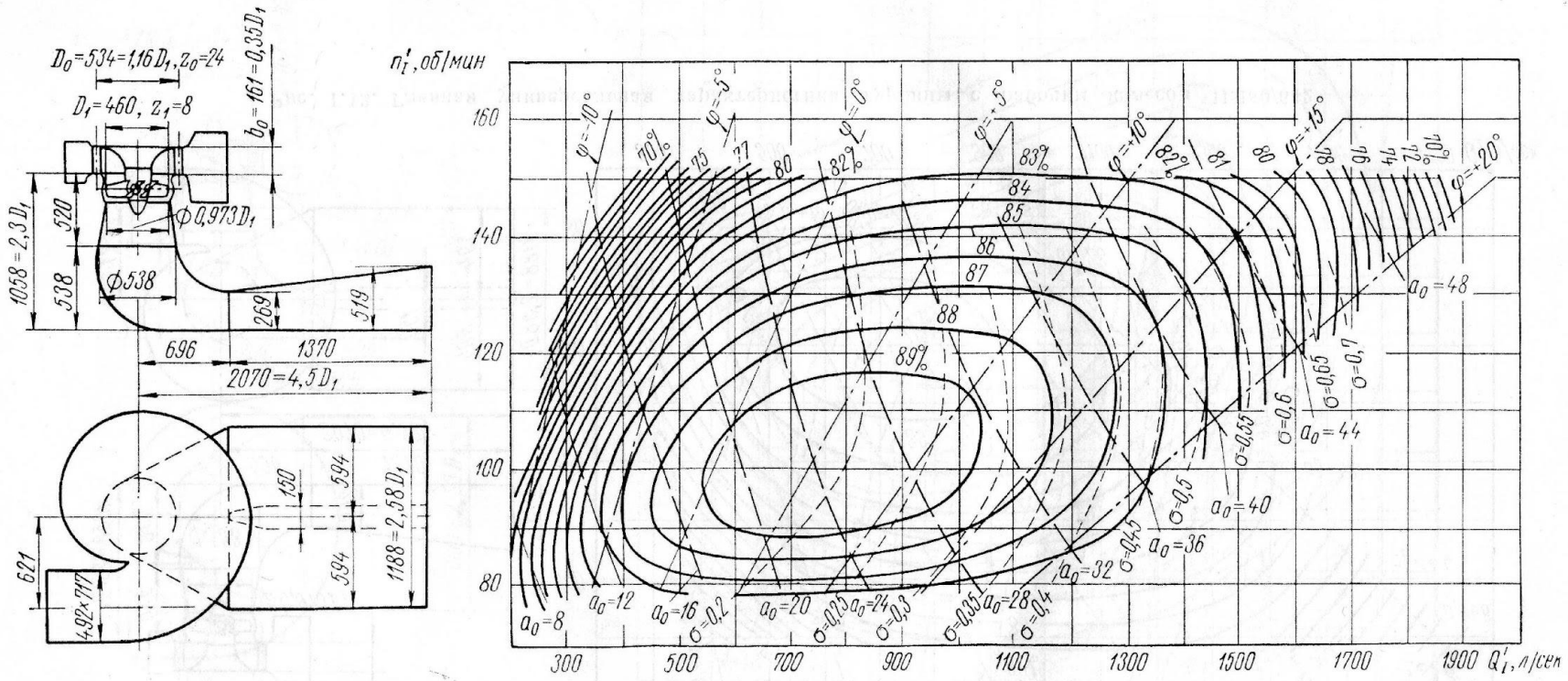


Рис. I. 12. Главная универсальная характеристика турбины с рабочим колесом ПЛ60/5А

Предварительный выбор диаметра рабочего колеса производится по формуле

$$D_1 = \sqrt{\frac{N}{9{,}81\eta Q_1' H_p \sqrt{H_p}}} \text{ м}, \quad (I.11)$$

после чего округляется до ближайшего нормального. Значения нормальных диаметров турбины даны в табл. I.2.

При расчетах по формуле (I.11) предварительно принимается для поворотнолопастных турбин $\eta = 0{,}86 \div 0{,}88$, для радиально-осевых $\eta = 0{,}88 \div 0{,}90$ (бо́льшие значения η соответствуют бо́льшим значениям D_1). Величина Q_1' выбирается на универсальной характеристике по предельным значениям σ с учетом допустимых высот отсасывания. При отсутствии ограничений по высоте отсасывания Q_1' принимается соответствующим линии 5%-ного запаса мощности при $n_1' = n_{1\,опт}'$. В формулу (I.11) Q_1' подставляется в *м³/сек*.

Скорость вращения определяется по расчетному, или средневзвешенному, напору из уравнения

$$n = \frac{n_1' \sqrt{H_p}}{D_1} \text{ об/мин}. \quad (I.12)$$

Значение n_1' выбирается равным или несколько выше $n_{1\,опт}'$. При выборе расчетного

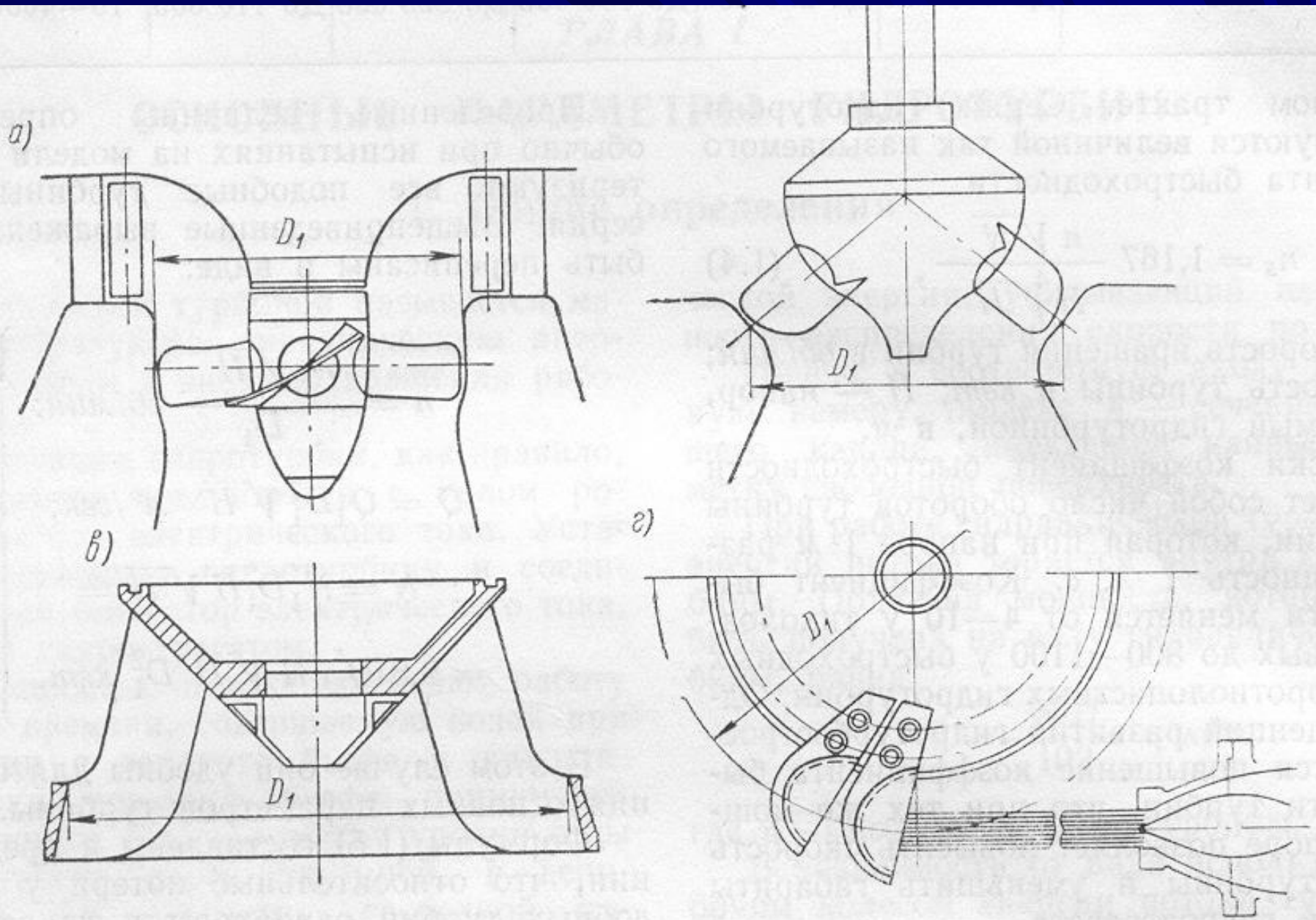


Рис. I.1. К определению номинального диаметра рабочего колеса гидротурбины

Таблица I.5. **Синхронная скорость вращения гидроагрегатов**

Число полюсов ротора	Синхронная скорость вращения, *об/мин*	Число полюсов ротора	Синхронная скорость вращения, *об/мин*	Число полюсов ротора	Синхронная скорость вращения, *об/мин*
12	500	48	125	88	68,2
14	428,6	52	115,4	90	66,7
16	375	56	107,1	92	65,2
18	333,3	60	100	96	62,5
20	300	64	93,8	100	60
24	250	66	90,9	102	58,8
26	230,8	68	88,2	104	57,4
28	214,3	70	85,7	108	55,6
30	200	72	83,3	110	54,6
32	187,5	76	78,9	112	53,6
36	166,7	78	76,9	114	52,6
40	150	80	75	116	51,8
44	136,4	84	71,4	120	50

При пересчете приведенных величин с модели на натуру учитывается масштабный эффект (уменьшение относительной величины потерь в турбине с ростом ее диаметра). Для пересчета значений к. п. д. с модели на натуру во всей зоне универсальной характеристики Международный Код модельных испытаний гидротурбин (публикация МЭК № 193) рекомендует следующие формулы:

для пропеллерных и поворотнолопастных турбин (формула Хаттона)

$$\frac{\text{Потери натурной турбины}}{\text{Потери модели}} = 0{,}3 + 0{,}7\sqrt[5]{\frac{\mathrm{Re}_м}{\mathrm{Re}}}, \qquad (I.16)$$

где индекс $м$ относится к модели, Re — число Рейнольдса, причем

$$\mathrm{Re} = \frac{D_1}{\nu}\sqrt{2gH}.$$

Здесь H — напор в $м$; D_1 — диаметр рабочего колеса в $м$; ν — кинематическая вязкость жидкости;

для радиально-осевых турбин (формула Муди)

$$\frac{\text{Потери натурной турбины}}{\text{Потери модели}} = \sqrt[5]{\frac{D_{1м}}{D_1}}. \qquad (I.17)$$

Для активных турбин принимается $\eta = \eta_м$. Номенклатура рекомендует для оптимального режима радиально-осевой или пропеллерной турбины пользоваться формулой

$$1 - \eta = (1 - \eta_м)\left(0{,}5 + 0{,}5\sqrt[6]{\frac{\mathrm{Re}_м}{\mathrm{Re}}}\right). \qquad (I.18)$$

Формула для подсчета высоты отсасывания имеет вид

$$H_s = 10{,}0 - \frac{\nabla}{900} - (\sigma + \Delta\sigma)H \ м. \qquad (I.19)$$

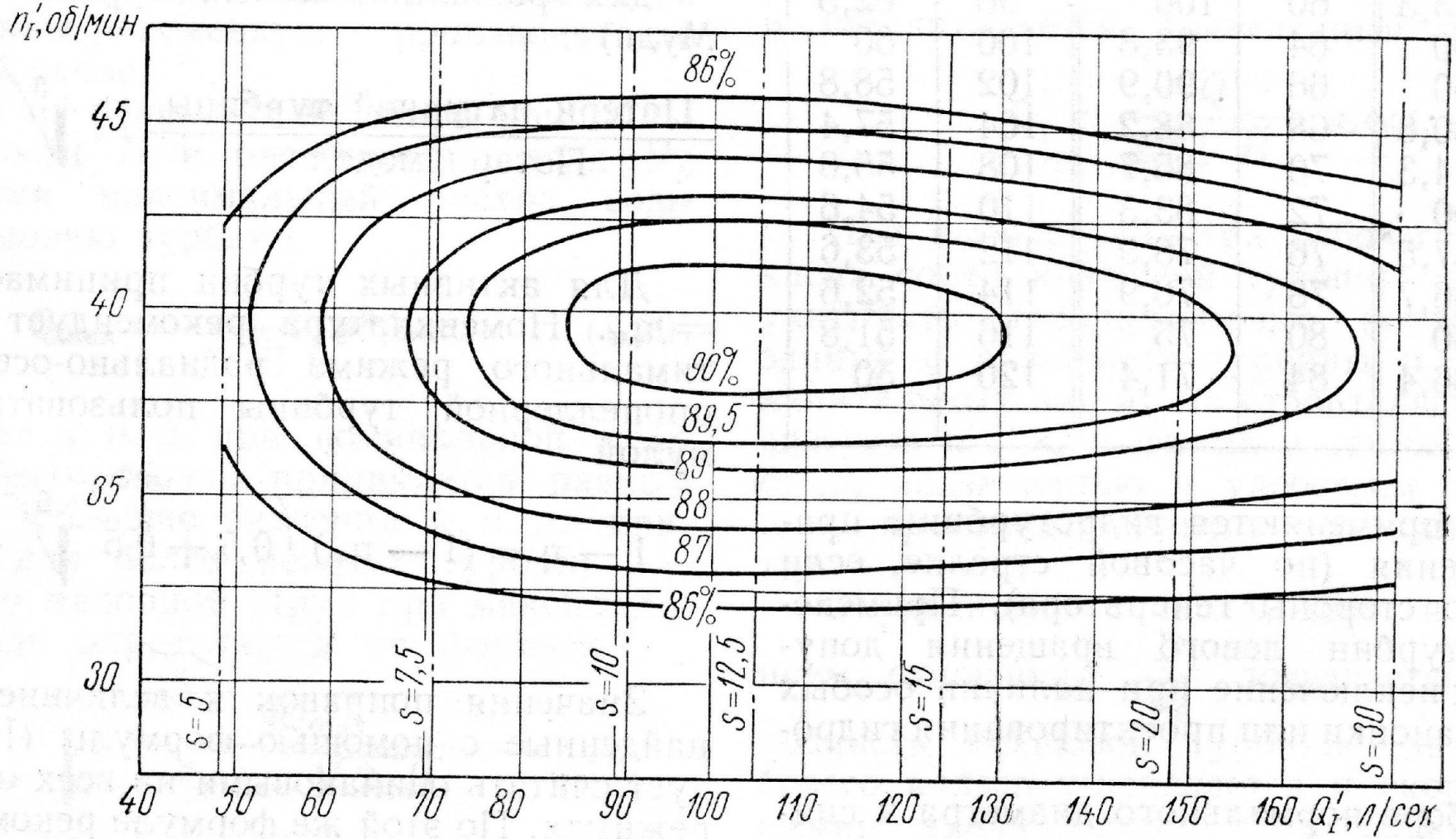


Рис. I.23. Универсальная характеристика ковшовой турбины с рабочим колесом К-560. Вертикальная шестисопловая установка. Данные модели: $D_1 = 335$ *мм*; $z_1 = 20$; $d_0 = 36$ *мм* (испытано при напоре 40 *м*; s — ход иглы в *мм*)

Отношение разгонной скорости вращения к нормальной при данном напоре называется коэффициентом разгона

$$k_p = \frac{n_p}{n}. \qquad (I.26)$$

Величина коэффициента разгона составляет:

У радиально-осевых и ковшовых турбин	1,7—1,9
У поворотнолопастных турбин при сохранении комбинаторной зависимости	2,0—2,2
У поворотнолопастных турбин при нарушении комбинаторной зависимости	2,4—2,6

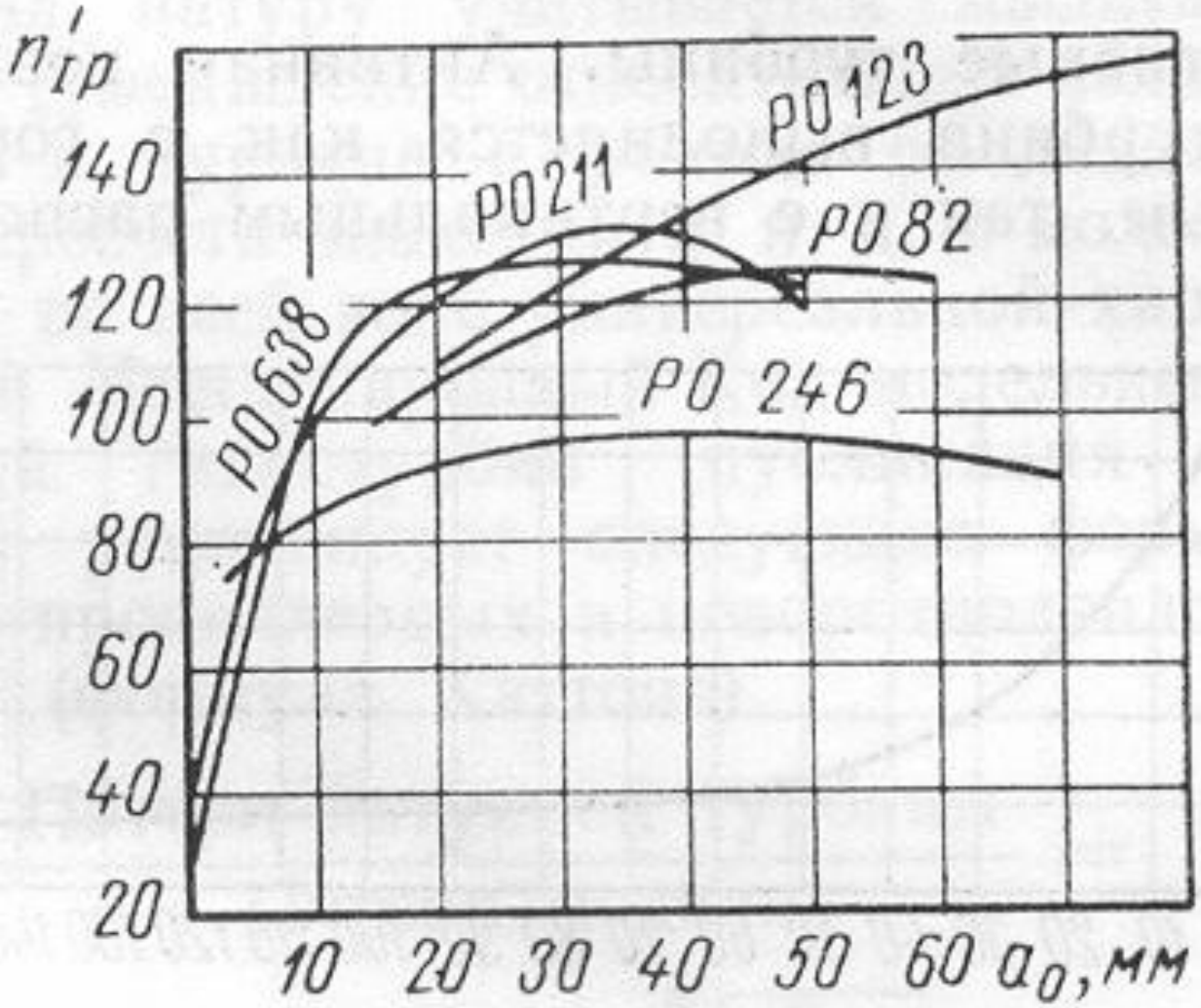


Рис. 1.25. Разгонные характеристики некоторых радиально-осевых колес