

621
М 545
УДК 621.2

Методические указания к типовому расчету по курсам «Гидромеханика и гидравлические машины», «Гидротурбины и гидроэлектростанции». Цакирис Д. Х. М.: Моск. энерг. ин-т, 1989. — 24 с.

В методических указаниях приводится применяемая в настоящее время методика выбора гидротурбины на заданные условия ГЭС на основании главных универсальных характеристик модельных гидротурбин, рекомендуемых систем и типов.

Дан порядок выбора турбины, определения ее основных параметров, построения ее рабочих и эксплуатационной характеристик, определения основных размеров и выполнения габаритного эскиза турбинной установки.

Методические указания предназначены для использования студентами двух специальностей: 10.03 «Гидроэлектроэнергетика» и 12.11 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» при выполнении типового расчета по дисциплинам «Гидромеханика и гидравлические машины» и «Гидротурбины и гидроэлектростанции». Они будут использоваться также в курсовом и дипломном проектировании.

ВВЕДЕНИЕ

Целью типового расчета является приобретение практических навыков по вариантному выбору гидротурбины на заданные условия ГЭС, построению характеристик и определению размеров ее проточной части.

Выбор системы, типа и конструктивно-установочной схемы гидротурбины основан на применении теории подобия в сочетании с технико-экономическим анализом, в котором учитываются такие факторы, как размеры и масса турбины и связанного с ней генератора, заглубление здания ГЭС и др. В качестве основы применяются современные гидротурбины, универсальные характеристики которых получены при испытаниях их моделей.

В реальных условиях выбор гидротурбины тесно связан с водноэнергетическими расчетами и проектированием здания ГЭС, на которой они должны устанавливаться. Однако при выполнении настоящего типового расчета многие обстоятельства, которые надо учитывать при реальном проектировании, студентам еще неизвестны и не могут быть учтены в полной мере на данной стадии обучения.

Поэтому методика настоящего типового расчета содержит некоторые неизбежные отклонения от действительных условий. К ним относятся, например: а) упрощенное и условное определение рабочих напоров турбины (максимального, минимального и расчетного) без учета потерь напора в подводящих сооружениях и водоводах; б) задание допустимой высоты отсасывания турбины.

В реальном проектировании высота отсасывания определяется в результате нескольких сравнительных расчетов для турбин разных типоразмеров на основе технико-экономических сопоставлений различных вариантов, в чем важную роль играет отметка подошвы отсасывающей трубы (зависящая от высоты отсасывания, размера и типа турбины).

Данный типовой расчет выполняется каждым студентом по индивидуальному заданию и включает в себя следующие этапы.

1. Выбор системы и типа турбины, определение ее основных параметров.

2. Расчет и построение рабочих характеристик выбранной турбины.

3. Построение эксплуатационной характеристики турбины.

4. Разработка габаритного эскиза турбинной установки, выбор отметки расположения рабочего колеса.

Основные положения излагаемой методики соответствуют рекомендациям действующих стандартов по реактивным гидротурбинам. Эта методика недостаточно полно описывается в рекомендованной литературе и не входит в содержание читаемых лекций по дисциплинам «Гидромеханика и гидравлические машины» и «Гидротурбины и гидроэлектростанции».

СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Выбор гидротурбины

Необходимо выбрать систему и тип турбины, номинальный диаметр рабочего колеса D_1 и частоту вращения n таким образом, чтобы при наименьших размерах турбины и генератора и при возможно больших КПД обеспечить получение заданной номинальной мощности. При этом допустимая для этой турбины высота отсасывания должна соответствовать заданной величине (с точностью до $\pm 0,5$ м).

Выбор турбины производится по универсальным характеристикам (УХ), которые получаются при испытаниях моделей, проводимых по методике, рекомендуемой «Международным кодом модельных приемо-сдаточных испытаний гидравлических турбин» (Публикация № 193 Международной электротехнической комиссии).

Исходными данными при выборе турбины являются: мощность турбины N , кВт, расчетный по мощности напор H_p , м, максимальный напор H_{max} , м, минимальный напор H_{min} , м, и др.

1.1. Определение рабочих напоров гидротурбины:

$$\left. \begin{aligned} H_p &= \nabla B U_p - \nabla H U_p, \\ H_{max} &= \nabla B U_{max} - \nabla H U_{min}, \\ H_{min} &= \nabla B U_{min} - \nabla H U_{max}. \end{aligned} \right\} (1)$$

где ∇ — отметки горизонтов верхнего и нижнего уровней, м (указываются в задании).

В формулах (1) условно не учитываются потери энергии в водоподводящих сооружениях ГЭС, что вносит определенную погрешность в значения напоров.

1.2. Выбор системы и типа гидротурбины производится по величине максимального напора так, чтобы значение H_{max}

было бы близко к предельному напору $H_{пред}$ выбранного типа, но не превышало его, т. е. $H_{max} \leq H_{пред}$.

Рекомендуемые диапазоны напоров для различных систем реактивных гидротурбин следующие:

- для осевых поворотно-лопастных (ПЛ) 3—80 м;
- для диагональных поворотно-лопастных (ПЛД) 30—220 м;
- для радиально-осевых (РО) 30—600 м.

Эти диапазоны разбиты на ряд зон, каждая из которых покрывается одним (иногда двумя) типами турбин данной системы. Максимальные (предельные) значения напора $H_{пред}$ этих зон, входящие в обозначение (маркировку) типа турбины, следующие:

- для ПЛ: 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 м;
- для ПЛД: 50, 60, 70, 90, 115, 140, 170, 220 м;
- для РО: 45, 75, 115, 140, 170, 230, 310, 400, 500, 600 м.

Как видно из табл. 1—3, где приводятся основные параметры перечисленных типов турбин, в диапазоне напоров до 220 м на одни и те же заданные условия можно выбрать 2—3 типа турбин. Так, например, при $H_{max} \leq 20$ м выбираются два типа осевых турбин: горизонтальная капсульная и вертикальная; при $20 < H_{max} \leq 30$ м выбираются тоже два типа осевых турбин: ПЛ30а и ПЛ30б; при $30 < H_{max} \leq 40$ м выбираются три типа турбин: ПЛ40а, ПЛ40б и РО45; при $40 < H_{max} \leq 45$ м — три типа: ПЛ50, ПЛД50 и РО45; при $45 < H_{max} \leq 50$ м — два типа: ПЛ50 и ПЛД50; при $50 < H_{max} \leq 60$ м — три типа: ПЛ60, ПЛД60 и РО75 и т. д.

1.3. Определение номинального диаметра рабочего колеса D_1 , м, выбранных типов турбин (предварительно)

$$D_1 = [N / (9,81 Q' \eta_m H^{1,5})]^{0,5}, \quad (2)$$

где N , кВт и H_p , м — по заданию, а приведенный расход Q' , м³/с и КПД модельной турбины η_m принимаются в так называемой «расчетной» точке ее универсальной характеристики. Предварительно «расчетная точка» на УХ выбирается в области значений максимального приведенного расхода Q'_{1max} на линии, соответствующей оптимальной приведенной частоте вращения n'_{1o} .

Значения Q'_{1max} для рекомендуемых типов турбин указаны в табл. 1—3, откуда и следует их принимать и подставлять в формулу (2), а вместо значения η_m рекомендуется подставлять максимальное значение КПД модели η_{mo} , которое также указано в табл. 1—3.

Таблица 1

Основные параметры модельных осевых поворотно-лопастных гидротурбин

Параметры турбин	Типы горизонтальных турбин				Типы вертикальных поворотно-лопастных турбин							
	ПЛ-10ГК	ПЛ15-ГК	ПЛ20-ГК	ПЛ-25ГК	ПЛ120-В	ПЛ30а-В	ПЛ30б-В	ПЛ40а-В	ПЛ40б-В	ПЛ150-В	ПЛ160-В	ПЛ170-В
№ УХ	1	1а	2	2а	3	4	5	6	7	8	9	10
$H_{пред}$, м	10	15	20	25	20	30	30	40	40	50	60	70
$H_{мин}/H_{max}$	0,33	0,33	0,35	0,35	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
n'_{1o} , мин ⁻¹	150	145	155	145	146	126	130	125	123	116	116	106
Q'_{1o} , л/с	1800	1700	1580	1600	1160	890	1270	1020	1150	1000	1080	860
η_{mo}	0,924	0,916	0,918	0,917	0,92	0,912	0,911	0,913	0,904	0,906	0,913	0,902
Q'_{1max} , л/с	2800—3250	2400—3000	2000—2750	1700—2500	1800—2060	1450—1950	1460—2000	1250—1700	1270—1750	1200—1500	1160—1400	1000—1300
σ при Q'_{1max}	1,9—2,4	1,5—2,1	1,2—1,8	1,0—1,6	0,78—1,00	0,52—1,0	0,46—1,0	0,40—0,65	0,35—0,65	0,35—0,56	0,35—0,52	0,27—0,45
$D_{1м}$, м	0,460	0,460	0,460	0,460	0,500	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460
$H_{м}$, м	2—3	2,5—3	3,6	2,5—3	6—10	4	8	4	4	12	10—12	4
$t_{м}$, °С	16	6	18	18	20	5	21	10	20	21	20	4

Основные параметры
 модельных диагональных поворотно-лопастных гидротурбин

Параметры турбин	Типы диагональных поворотно-лопастных турбин							
	ПЛД50-В60°	ПЛД60-В60°	ПЛД70-В60°	ПЛД90-В45°	ПЛД115-В45°	ПЛД140-В45°	ПЛД170-В30°	ПЛД220-В30°
№ УХ	11	12	13	14	15	16	17	18
$H_{пред}$, м	50	60	70	90	115	140	170	220
$H_{min/max}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$n'_{г.о.}$, мин ⁻¹	113	111	107	85	83	85	80	82
$Q'_{г.о.}$, л/с	1100	1130	1020	820	830	800	650	570
$\eta_{г.о.}$	0,91	0,906	0,907	0,921	0,916	0,921	0,909	0,91
$Q'_{г.о. max}$, л/с	1250—1500	1200—1400	1100—1300	1000—1200	950—1100	900—1000	750—900	700—800
σ при $Q'_{г.о. max}$	0,33—0,52	0,30—0,50	0,27—0,40	0,26—0,38	0,23—0,30	0,18—0,26	0,16—0,20	0,13—0,18
$D_{г.о.}$, м	0,350	0,460	0,345	0,460	0,460	0,460	0,325	0,310
$H_{м.}$, м	5	12	3—6	4	4	4	4	5
$t_{м.}$, °С	16	20	3—7	12—18	6—11	5—7	29	16

Таблица 3

Основные параметры радиально-осевых гидротурбин

Параметры турбин	Типы вертикальных радиально-осевых турбин										
	РО45-В	РО75-В	РО115-В	РО140-В	РО170а-В	РО170б-В	РО230а-В	РО230б-В	РО310-В	РО400-В	РО500-В
№ УХ	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$H_{пред}$, м	45	75	115	140	170	170	230	230	310	400	500
H_{min}/H_{max}	0,60	0,60	0,60	0,60	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,70	0,80
$n'_{г.о.}$, мин ⁻¹	82,5	79	74,5	71	68	69	66	69	63,5	65	66
$Q'_{г.о.}$, л/с	1200	1010	900	760	625	585	535	500	400	237	327
$\eta_{г.о.}$	0,921	0,918	0,927	0,927	0,923	0,928	0,927	0,926	0,928	0,903	0,907
$Q'_{г.о. max}$, л/с	1350—1430	1150—1220	960—1080	850—940	700—790	650—690	590—640	550—590	450—510	290—310	260—275
σ при $Q'_{г.о. max}$	0,195—0,23	0,12—0,128	0,12—0,15	0,104—0,125	0,062—0,08	0,106—0,12	0,05—0,065	0,058—0,063	0,057—0,078	0,033—0,037	0,037—0,044
$D_{г.о.}$, м	0,460	0,460	0,5156	0,515	0,4355	0,5587	0,623	0,630	0,388	0,800	0,800
$H_{м.}$, м	4	4	4	4	4	4	4	4	30	5	5
$t_{м.}$, °С	8	7	2	4	7	4	8	7	20	19	19

Полученное по формуле (2) значение D_1 округляется до ближайшего стандартного значения, а именно (D_1 , в мм): 1250, 1400, 1600, 1800, 1900, 2000, 2120, 2240, 2360, 2500, 2650, 2800, 3000, 3150, 3350, 3550, 3750, 4000, 4250, 4500, 4750, 5000, 5300, 5600, 6000, 6300, 6700, 7100, 7500, 8000, 8500, 9000, 9500, 10000, 10600.

Для более полного и глубокого анализа возможных вариантов турбин на заданные параметры ГЭС целесообразно принимать для дальнейшего рассмотрения оба значения D_1 — большее и меньшее.

1.4. Определение максимального значения КПД натурной турбины $\eta_{нo}$

$$\eta_{нo} = 1 - (1 - \eta_{мо}) \cdot [0,25 + 0,75 (Re_m/Re_n)^{0,2}]. \quad (3)$$

Здесь и в дальнейшем индекс «н» относится к натурной, индекс «м» — к модельной турбине; $\eta_{мо}$ — максимальное значение КПД модели (указано в табл. 1—3); Re — число Рейнольдса, причем

$$(Re_m/Re_n)^{0,2} = (\nu_n/\nu_m)^{0,2} (D_{1м}/D_{1н})^{0,2} (H_m/H_n)^{0,1}, \quad (4)$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости воды, зависящий от ее температуры t .

Значения номинального диаметра модели $D_{1м}$, напора, при котором проводились ее испытания H_m , и температуры воды при испытаниях t_m указаны в табл. 1—3. В качестве $D_{1н}$ подставляется принятое стандартное значение D_1 , а H_n принимается равным H_p . Зависимость $\nu(t)$ приводится в табл. 4.

Таблица 4

Зависимость коэффициента кинематической вязкости воды от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	1,79	1,51	1,30	1,14	1,01	0,90	0,81	0,74

Значение средней температуры воды для натурной турбины принимается в зависимости от географического места расположения ГЭС.

1.5. Определение поправки КПД за счет масштабного эффекта и отношения КПД натурной и модельной турбины в оптимальном режиме:

$$\Delta\eta = \eta_{но} - \eta_{мо}, \quad (5)$$

$$m = \eta_{но}/\eta_{мо}. \quad (6)$$

1.6. Определение частоты вращения турбины:

$$n = n'_{1р} (mH_p)^{0,5} / D_1, \quad (7)$$

где $n'_{1р}$, об/мин — расчетное значение приведенной частоты вращения. Предварительно принимаем $n'_{1р} = n'_{1o}$ по табл. 1—3 (для ПЛ-турбин можно принимать $n'_{1р}$ и несколько выше n'_{1o} примерно на 5—10%).

Полученное по формуле (7) значение округляется до ближайшего (большого или меньшего) синхронного значения частоты вращения n_s , об/мин: 1500, 1000, 750, 600, 500, 428,6; 375, 333,3; 300, 250, 230,8; 214,3; 200, 187,5; 166,7; 150, 142,8; 136,4; 125, 115,4; 107,1; 100, 93,8; 90,9; 88,2; 85,7; 83,3; 78,9; 75; 71,4; 68,2; 65,2; 62,5; 60;

1.7. Уточнение расчетной приведенной частоты вращения:

$$n'_{1р} = n D_1 / (mH_p)^{0,5}, \quad (8)$$

где n , об/мин — принятое синхронное значение частоты вращения.

1.8. Определение рабочей зоны турбины на универсальной характеристике:

$$n'_{1\max} = n D_1 / (mH_{\min})^{0,5}, \quad (9)$$

$$n'_{1\min} = n D_1 / (mH_{\max})^{0,5}. \quad (10)$$

1.9. Определение «расчетной точки» турбины на универсальной характеристике. Вычисляется произведение

$$Q'_1 \cdot \eta_m = N / [9,81 D_1^2 (mH_p)^{1,5}], \quad (11)$$

где N , кВт — номинальная мощность по заданию; D_1 , м — выбранное стандартное значение; H_p , м — расчетный напор. Далее определяется, в какой точке УХ, расположенной на линии $n'_{1р} = \text{const}$, произведение Q'_1 и КПД модели дает значение, полученное по формуле (11). Поиск ведется методом последовательных приближений. Искомая точка, как правило, располагается в пределах $Q'_{1\max}$, указанных в табл. 1—3, но может и выходить за эти пределы. В табл. 1—3 указаны и номера УХ модельных турбин.

Для найденной «расчетной точки» выписываем из универсальной характеристики значения Q'_1 , η_m и коэффициента кавитации σ .

1.10. Определение допустимой высоты отсасывания

$$H_s^{\text{доп}} = 10 - \nabla / 900 - \sigma H - \Delta H_s + \Delta z_{\text{х.пл}}, \quad (12)$$

где $H = H_p$, м; σ — коэффициент кавитации турбины в «расчетной точке» (см. п. 1.9); ∇ — отметка расположения рабочего колеса натурной турбины (принимается ∇H_p); $\Delta H_s = 1,5$ м дополнительное заглубление рабочего колеса, учитывающее неточности определения σ при испытаниях моделей, масштабный эффект и антикавитационный запас; $\Delta z_{\text{х.пл}}$ — разность высотных отметок двух характерных плоскостей турбины: новой, относительно которой определяется H_s натурной турбины, и старой, относительно которой определялась $H_{s\text{м}}$ при кавитационных испытаниях моделей. $\Delta z_{\text{х.пл}}$ определяется следующим образом:

— для осевых горизонтальных капсульных турбин (ПЛ-ГК)

$$\Delta z_{\text{х.пл}} = -D_1/2;$$

— для осевых вертикальных ПЛ-турбин (ПЛ-В)

$$\Delta z_{\text{х.пл}} = 0;$$

— для вертикальных ПЛД-и РО-турбин

$$\Delta z_{\text{х.пл}} = B_0/2.$$

Здесь B_0 — высота направляющего аппарата (НА) турбины, которая пересчитывается с модели

$$B_0 = B_{0\text{м}} \cdot D_{1\text{м}} / D_{1\text{м}}, \quad (13)$$

где $B_{0\text{м}}$ — высота НА модельной турбины (указана на УХ); $D_{1\text{м}}$ — диаметр модели (указан на УХ, а также в табл. 1—3).

Примечания. 1. Расчеты по пп. 1.3—1.10 проводятся для всех типов турбин, выбранных в п. 1.2.

2. Если при округлении D_1 до стандартного и n до синхронного принимаются по два значения (большее и меньшее), то все дальнейшие расчеты проводятся для всех принятых значений D_1 и n .

1.11. Сопоставление различных вариантов турбин и выбор оптимального. Данные расчетов по всем рассматриваемым вариантам турбин сводятся в табл. 5.

При определении η_n в «расчетной точке» (см. 7 графу табл. 5) следует учесть поправку на масштабный эффект:

$$\eta_n = \eta_m + \Delta\eta, \quad (14)$$

где η_m — КПД модели в «расчетной точке»; $\Delta\eta$ — определенная по формуле (5) поправка.

Таблица 5

№ варианта	Марка турбины	D_1 , м	n , об/мин	$H_s^{\text{доп}}$, м	$\eta_{\text{но}}$	η_n в «расчетной точке»	$n'_{1\text{р}}$, об/мин	$n'_{1\text{о}}$, об/мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9

При сравнении различных вариантов турбин учитываются диаметр D_1 , определяющий размеры турбины и ее блока*; частота вращения n , влияющая на размеры и массу генератора; высота отсасывания $H_s^{\text{доп}}$, от величины которой и от высоты отсасывающей трубы зависит заглубление станции**; значение КПД в оптимальном режиме и в «расчетной точке»; расположение рабочей зоны на УХ и др. Следует иметь в виду также, что при больших колебаниях напора ГЭС, определяемых отношением $H_{\text{мин}}/H_{\text{мах}}$, как правило, поворотно-лопастные турбины предпочтительнее, чем жестколопастные (см. табл. 1—3).

По результатам анализа выявляются преимущества одного варианта по совокупности показателей. Этот вариант после согласования с консультантом принимается как оптимальный. Правильность выбора должна подтвердить и заданная в задании высота отсасывания H_s .

2. Расчет и построение рабочих характеристик гидротурбины

Для выбранной гидротурбины необходимо рассчитать и построить зависимости $\eta = f(N)$, $H_s^{\text{доп}} = f_1(N)$ и $Q = f_2(N)$ при нормальной (синхронной) частоте вращения n для четырех

* Ширина блока B каждого варианта турбины пересчитывается с модели (B_m указана на УХ). Значения B полезно включить в табл. 5 для сравнения.

** Высота заглубления подошвы отсасывающей трубы относительно уровня нижнего бьефа определяется так:

— для ПЛ-ГК: $h_s = -H_s + D_1$;

— для ПЛ-В: $h_s = -H_s + h - h_0$;

— для ПЛД и РО: $h_s = -H_s + h + B_0/2$,

причем значения высоты отсасывающей трубы h , высоты h_0 и B_0 пересчитываются с модели, для которой они указаны на УХ. Полученные значения h_s каждого варианта целесообразно включить в табл. 5 для сравнения.

значений напора, а именно: H_p , H_{\max} , H_{\min} и $H_{\text{ср}}$, причем среднее значение (с округлением до 0,5 м) определяется так:

$$H_{\text{ср}} = (H_p + H_{\max})/2, \text{ если } (H_{\max} - H_p) > (H_p - H_{\min});$$

$$H_{\text{ср}} = (H_p + H_{\min})/2, \text{ если } (H_{\max} - H_p) < (H_p - H_{\min}).$$

Расчет рабочих характеристик производится на основании УХ модели. Данные расчета рекомендуется свести в табл. 6. Пояснения к табл. 6.

2.1. Такие таблицы заполняются для каждого напора H_p , H_{\max} , H_{\min} , $H_{\text{ср}}$. Каждому напору соответствует определенное значение приведенной частоты вращения, определяемое по формуле

$$n'_1 = nD_1 / (mH)^{0,5} \quad (15)$$

2.2. В графы 2 и 3 табл. 6 записываются значения КПД модели и приведенного расхода, определяемые по универсальной характеристике модели в точках пересечения линии $n'_1 = \text{const}$ с изолиниями КПД. Рекомендуется пересчитать и режимы с наибольшим значением η_m при каждом n'_1 , которые определяются по УХ в середине между точками пересечения линии $n'_1 = \text{const}$ с центральной изолинией КПД.

Таблица 6

№ точек	Модель					Натура				
	$n'_1 =$ об/мин					$H =$ м; $k_Q =$ $k_N =$				
	η_m	$Q'_{1,2}$ м³/с	σ	$\eta_{m,\sigma}$	$Q'_{1,2}$ м³/с	η	Q м³/с	N кВт	$H_s^{\text{доп}}$ м	N_{σ} кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

2.3. В графы 4, 5 и 6 табл. 6 записываются значения коэффициента кавитации σ , КПД модели и приведенного расхода, определяемые по универсальной характеристике в точках пересечения линии $n'_1 = \text{const}$ с изолиниями σ . При этом значения $\eta_{m,\sigma}$ определяются с помощью линейной интерполяции.

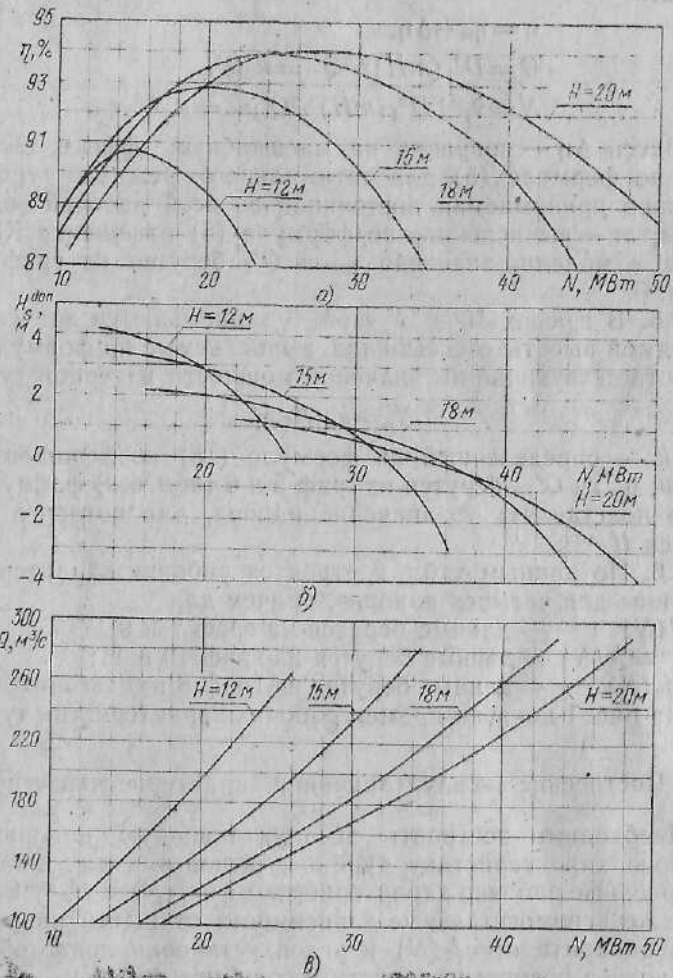


Рис. 1. Рабочие характеристики гидротурбины ПЛ20-В-600 при $n=100$ об/мин: а — характеристики $\eta=f(N)$; б — характеристики $H_s^{\text{доп}}=f_1(N)$; в — характеристики $Q=f_2(N)$

2.4. В графы 7, 8 и 9 табл. 6 записываются значения КПД, расхода и мощности натурной турбины, вычисленные по формулам

$$\eta = \eta_m + \Delta\eta, \quad (16)$$

$$Q = D^2_1 (mH)^{0,5} Q'_1 = k_Q Q'_1, \quad (17)$$

$$N = 9,81 D^2_1 (mH)^{1,5} Q'_1 \eta_m = k_N Q'_1 \eta_m. \quad (18)$$

Здесь $\Delta\eta$ — поправка на масштабный эффект, вычисленная по формуле (5) для оптимального режима турбины и условно принимаемая постоянной во всей рабочей зоне турбины; m — вычисленное по формуле (6) отношение КПД натурной и модели; значения η_m и Q'_1 берутся из граф 2 и 3 табл. 6.

2.5. В графах 10 и 11 табл. 6 записываются значения допустимой высоты отсасывания, вычисляемые по формуле (12), и соответствующие им значения мощности натурной турбины:

$$N_\sigma = k_N Q'_{1,\sigma} \eta_{m,\sigma}, \quad (19)$$

где k_N — определенный по формуле (18) коэффициент мощности; $\eta_{m,\sigma}$ и $Q'_{1,\sigma}$ берутся из граф 5 и 6 табл. 6. В формулу (12) надо подставлять то значение напора, для которого вычисляется $H_{\sigma, \text{доп}}$.

2.6. По данным табл. 6 строятся рабочие характеристики турбины для четырех напоров, причем для

$\eta = f(N)$ — данные берутся из граф 7 и 9;

$H_{\sigma, \text{доп}} = f_1(N)$ — данные берутся из граф 10 и 11;

$Q = f_2(N)$ — данные берутся из граф 8 и 9 табл. 6.

На рис. 1 показан пример рабочих характеристик турбины.

3. Построение эксплуатационной характеристики турбины

Необходимо построить эксплуатационную напорно-мощностную характеристику турбины, используя для этой цели построенные рабочие характеристики $\eta = f(N)$ и $H_{\sigma, \text{доп}} = f_1(N)$, а также вспомогательные зависимости открытий направляющего аппарата $a_0 = f_3(N)$ и углов установки лопастей рабочего колеса поворотно-лопастных турбин $\varphi = f_4(N)$.

3.1. Расчет зависимостей $a_0 = f_3(N)$ и $\varphi = f_4(N)$ проводится на основании универсальной характеристики турбины для четырех напоров (H_p , H_{max} , H_{min} , H_{cp}). Данные расчета рекомендуется свести в табл. 7 и 8.

3.2. В графы 2, 3 и 4 табл. 7 записываются значения открытия модели a_{0m} , КПД модели и приведенного расхода в

точках пересечения горизонтали $n'_1 = \text{const}$ с изолиниями a_{0m} на универсальной характеристике (значения η_m определяются интерполяцией).

Таблица 7

№ точек	Модель			Натура	
	$n'_1 =$	η_m	$Q'_1, \text{ м}^3/\text{с}$	$a_0, \text{ мм}$	$N, \text{ кВт}$
1	2	3	4	5	6

3.3. В графу 5 табл. 7 записываются значения a_0 натурной турбины, определяемые по формуле

$$a_0 = a_{0m} \cdot D_0 / D_{0m} \cdot z_{0m} / z_0^*, \quad (20)$$

где D_{0m} и z_{0m} — диаметр окружности расположения осей лопаток направляющего аппарата и число этих лопаток у мо-

Таблица 8

φ	Модель		Натура
	$n'_1 =$	$Q'_1, \text{ м}^3/\text{с}$	$N, \text{ кВт}$
1	2	3	4

дели (указаны на универсальной характеристике); D_0 и z_0 — то же для натурной турбины в соответствии со стандартом, причем для ПЛ- и РО-турбин

$$D_0 = 1,2 D_1, \quad (21)$$

а для ПЛД-турбин — согласно табл. 9.

* Открытия направляющего аппарата горизонтальных капсульных турбин a_0 на УХ указаны в градусах и одинаковы для модели и натурной, а зависимости $a_0(N)$ рассчитываются как и углы φ с помощью табл. 8.

Число лопаток z_0 принимается в зависимости от значения D_0 следующим образом:

- при $D_0 < 7$ м $z_0 = 20$,
- при $7 \leq D_0 < 10$ м $z_0 = 24$,
- при $D_0 \geq 10$ м $z_0 = 28$.

3.4. В графу 1 табл. 8 записываются значения угла φ модели, обозначенные на универсальной характеристике. Эти же значения угла φ принимаются и для натурной турбины.

Таблица 9

Соотношения D_0/D_1 ПЛД-турбин

Тип турбин	ПЛД50, ПЛД60, ПЛД70	ПЛД90, ПЛД115, ПЛД140	ПЛД170, ПЛД220
D_0/D_1	1,33—1,32	1,37—1,35	1,4—1,42

Примечание. Вычисленное по данным табл. 9 D_0 следует округлить до ближайшего стандартного значения. Ряд стандартных значений D_0 получается путем умножения ряда стандартных значений D_1 , приведенных в п. 1.3, на коэффициент 1,2, т. е. $D_{0\text{ ст}} = 1,2 D_1$.

3.5. В графы 2 и 3 табл. 8 записываются значения КПД модели и приведенного расхода, определяемые по универсальной характеристике в точках пересечения горизонтали $n'_1 = \text{const}$ с линиями угла установки φ (значения η_m определяются интерполяцией).

3.6. Мощность в графе 6 (табл. 7) и в графе 4 (табл. 8) определяется по формуле (18).

3.7. Используя данные табл. 7 и 8, строят зависимости $a_0 = f_3(N)$ и $\varphi = f_4(N)$ (для поворотно-лопастных турбин) для четырех напоров.

3.8. В координатах N, H наносятся изолинии КПД (8—10 кривых через 1—2% КПД), линии равных допустимых высот отсасывания $H_s^{\text{доп}}$ (4—5 линий), линии равных открытий направляющего аппарата a_0 и линии равных углов установки лопастей φ (для поворотно-лопастных турбин). Для этой цели графики зависимостей $\eta = f(N)$, $H_s^{\text{доп}} = f_1(N)$, $a_0 = f_3(N)$ и $\varphi = f_4(N)$ пересекаются горизонтальными линиями и точки их пересечения переносятся на поле N, H (по соответствующим значениям напора и мощности). Соединяя точки

равных КПД, равных $H_s^{\text{доп}}$ и т. д., получают эксплуатационную характеристику. На рис. 2 показан пример эксплуатационной характеристики.

3.9. На эксплуатационной характеристике проводится линия ограничения мощности, причем:

а) на участке от H_{max} до H_p линия ограничения, как правило, является вертикальной прямой ($N = \text{const}$) и соответствует значению номинальной мощности турбины (ограничение по генератору);

б) на участке от H_p до H_{min} линия ограничения является наклонной линией и соответствует постоянству одного из следующих параметров:

$a_0 = \text{const}$ (ограничение по $a_{0\text{ max}}$);

$\varphi = \text{const}$ (ограничение по φ_{max});

$H_s^{\text{доп}} = \text{const}$ (ограничение по $H_s^{\text{доп}}_{\text{ min}}$).

При этом ограничивающее значение принятого параметра (a_0, φ или $H_s^{\text{доп}}$) соответствует величине этого параметра в «расчетной точке» и определяется из построенных графиков $a_0 = f_3(N)$, $\varphi = f_4(N)$, $H_s^{\text{доп}} = f_1(N)$ для H_p и заданной номинальной мощности. Из этих же графиков определяется и значение мощности N^* , которое соответствует линии ограничения при H_{min} (рис. 2).

Конструктивная реализация линии ограничения проще всего осуществляется при $a_0 = \text{const}$ или $\varphi = \text{const}$. Поэтому следует отдавать им предпочтение.

3.10. Указания.

а) На эксплуатационной характеристике необходимо замкнуть те изолинии КПД, которые замыкаются в поле характеристики (в пределах от H_{min} до H_{max}). Для этого по формуле (16) определяется соответствующее значение η'_m и по нему на универсальной характеристике находится изолиния $\eta'_m = \text{const}$ (если на универсальной характеристике такая изолиния отсутствует, то ее следует провести мягким карандашом, используя интерполяцию). Далее на универсальной характеристике определяются верхняя и нижняя горизонталы $n'_1 = \text{const}$, являющиеся касательными к изолинии $\eta'_m = \text{const}$, и в точках касания определяются значения n'_1, Q'_1 , по которым рассчитываются по формулам (15) и (18) значения H и N точек замыкания кривой на эксплуатационной характеристике.

б) Рекомендуется строить каждую группу графиков на отдельном листе миллиметровой бумаги 12 формата. Масштабы должны быть удобными для пользования (одинаковыми для всех графиков).

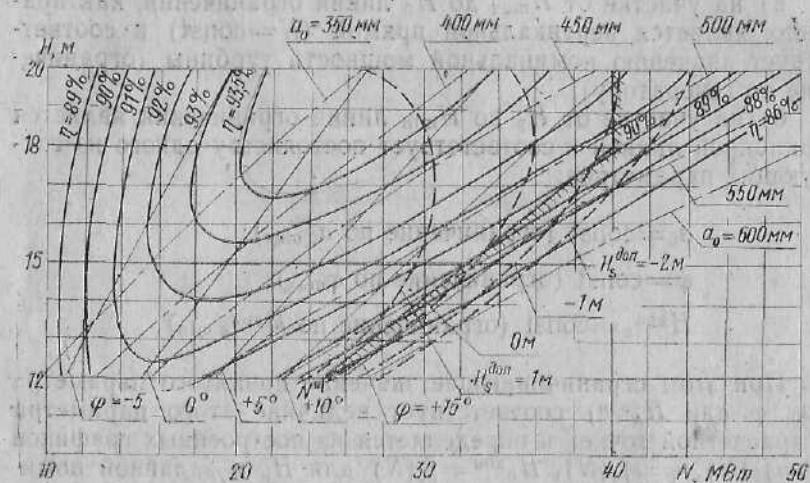


Рис. 2. Эксплуатационная характеристика гидротурбины ПЛ20-В-600 при $n=100$ об/мин

в) На эксплуатационной характеристике за линией ограничения мощности необходимо иметь хотя бы по одной изолинии каждого параметра с тем, чтобы можно было бы определить значения этих параметров в любой точке линии ограничения от H_{\min} до H_{\max} .

г) Все графики именуется рисунками, нумеруются и сопровождаются подрисовочными подписями. Необходимо оставлять поле для подшивки в пояснительную записку.

4. Разработка габаритного эскиза турбинной установки

4.1. На миллиметровой бумаге 12 формата вычертить в масштабе 1:20; 1:50; 1:100 или 1:200 габаритный эскиз установки турбины (рис. 3). Все характерные размеры проточной части пересчитать с модельной турбины (по эскизу, помещенному в левой части универсальной характеристики), за исключением размера D_0 , который уже выбран в п. 3.3.

На чертеже размеры указываются либо все в м, либо все в мм.

4.2. Определить возможные отметки расположения рабочего колеса, т.е. отметки характерной плоскости турбины

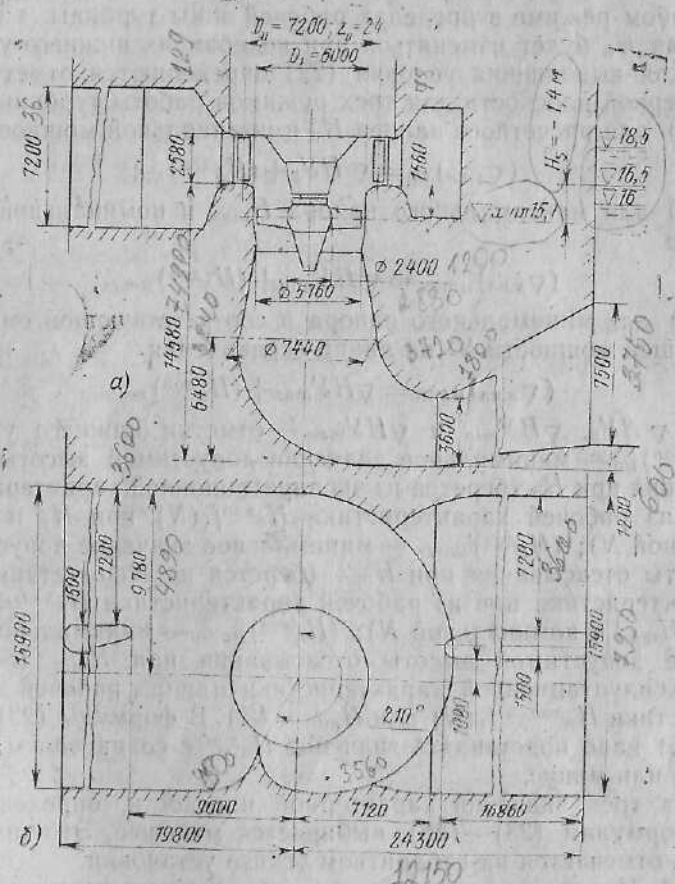


Рис. 3. Габаритный эскиз установки гидротурбины ПЛ20-В-600: а — разрез проточной части турбины; б — план турбины

(оси вращения колеса для ПЛ-ГК, оси поворота лопастей рабочего колеса для ПЛ-В, или середины высоты направляющего аппарата для ПЛД- и РО-турбин), исходя из условия бескавитационной работы турбины

$$H_s \leq H_s^{\text{доп}}, \quad (22)$$

где H_s — фактическая; $H_s^{\text{доп}}$ — допустимая высота отсасывания в данном режиме работы турбины. Значение $H_s^{\text{доп}}$ может быть определено из эксплуатационной характеристики в любом режиме в пределах рабочей зоны турбины, а фактическая H_s будет изменяться при колебаниях нижнего уровня.

Для выполнения условия (22) определяются отметки характерной плоскости для трех режимов работы турбины:

а) для расчетного напора H_p и номинальной мощности

$$(\nabla_{\text{х.пл}})_{\text{нр}} = \nabla H_{У_p} + (H_s^{\text{доп}})_{\text{нр}}, \quad (23)$$

б) для максимального напора H_{max} и номинальной мощности

$$(\nabla_{\text{х.пл}})_{\text{нmax}} = \nabla H_{У_{\text{min}}} + (H_s^{\text{доп}})_{\text{нmax}}, \quad (24)$$

в) для минимального напора и соответствующей ему наибольшей мощности N^* на линии ограничения

$$(\nabla_{\text{х.пл}})_{\text{нmin}} = \nabla H_{У_{\text{max}}} + (H_s^{\text{доп}})_{\text{нmin}}, \quad (25)$$

где $\nabla H_{У_p}$, $\nabla H_{У_{\text{min}}}$ и $\nabla H_{У_{\text{max}}}$ — отметки нижнего уровня; $(H_s^{\text{доп}})_{\text{нр}}$ — минимальное значение допустимой высоты отсасывания при H_p (берется из эксплуатационной характеристики или из рабочей характеристики $H_s^{\text{доп}} = f_1(N)$ при H_p и номинальной N); $(H_s^{\text{доп}})_{\text{нmax}}$ — минимальное значение допустимой высоты отсасывания при H_{max} (берется из эксплуатационной характеристики или из рабочей характеристики $H_s^{\text{доп}} = f_1(N)$ при H_{max} и номинальной N); $(H_s^{\text{доп}})_{\text{нmin}}$ — минимальное значение допустимой высоты отсасывания при H_{min} (берется из эксплуатационной характеристики или из рабочей характеристики $H_s^{\text{доп}} = f_1(N)$ при H_{min} и N^*). В формулы (23), (24) и (25) надо подставлять значение $H_s^{\text{доп}}$ с сохранением знака плюс или минус.

Из трех значений характерной плоскости, определенных по формулам (23) — (25), выбирается меньшее. Это значение $\nabla_{\text{х.пл}}$ отмечается на габаритном эскизе установки.

4.3. Исходя из принятой $\nabla_{\text{х.пл}}$ и соответствующего ей значения $H_s^{\text{доп}}$, определяют и отмечают на габаритном эскизе заданные в задании отметки $H_{У}$. Например, если $\nabla_{\text{х.пл}}$ выбрана по H_p и равна 15,1 м, то, откладывая на чертеже в принятом масштабе значение $(H_s^{\text{доп}})_{\text{нр}} = -1,4$ м, получим $\nabla H_{У_p}$ (см. рис. 3). Другие заданные отметки $\nabla H_{У_{\text{min}}}$ и $\nabla H_{У_{\text{max}}}$ отмечаются уже по отношению к $\nabla H_{У_p}$ (с соблюдением масштаба).

5. Оформление расчетно-пояснительной записки

Типовой расчет оформляется в виде расчетно-пояснительной записки, содержащей задание, все расчеты, таблицы, графики, текст, обосновывающий принятые решения, список использованной литературы и содержание. В тексте следует давать ссылки на источники, рисунки и таблицы, которые должны быть пронумерованы. Текст надо писать ручкой на одной стороне бумаги формата 11.

Записка должна иметь обложку из более плотной бумаги (ватмана), на которой следует указать:

МЭИ, кафедра гидромеханики и гидромашин

ТИПОВОЙ РАСЧЕТ

ВЫБОР ГИДРОТУРБИНЫ ДЛЯ ГЭС И ПОСТРОЕНИЕ ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Студент гр. (группа, фамилия и инициалы студента)

Консультант (звание, фамилия и инициалы консультанта)

Москва, год окончания расчета