

Исследование радиальноосевой гидротурбины
двойного регулирования

канд. техн. наук ГОХМАН А. М., инж. САМСОНОВ В. Г.

1. Способы регулирования гидротурбин.

Регулирование реактивных гидротурбин по мощности и напору осуществляется при помощи изменения открытия направляющего аппарата. У поворотнлопастных гидротурбин (в том числе и диагональных) помимо открытия направляющего аппарата изменяется угол установки лопастей рабочего колеса. Характеристика последних отличается тем, что при режимах, отличных от оптимального, к.п.д. сохраняет высокие значения, близкие к максимальному. Это не наблюдается у турбин, имеющих одинарное регулирование (например, открытие направляющего аппарата). В 1962г. в СССР А. М. Гохманом была предложена схема двойного регулирования радиальноосевых гидротурбин (авт. свидетельство № 165988), осуществляемая при помощи изменения открытия направляющего аппарата и высоты проточной части от выхода из статора и до выхода из рабочего колеса.

Это регулирование обеспечивает такую форму потока, которая соответствует малым потерям в рабочем колесе и отсасывающей трубе, в зоне между минимальной и максимальной высотой изменяемой проточной части. Следовательно, РОДР (радиальноосевая гидротурбина двойного регулирования) должна сочетать хорошие кавитационные качества, присущие радиальноосевым гидротурбинам с пологостью характеристики $\eta = \eta(Q'_r)$, присущей поворотнлопастным турбинам.

2. Описание РОДР.

РОДР, диаметром $D_1=350$ мм, представленная на рис. I имеет спиральную камеру (4), спроектированную по закону $V_u r = const$, статор (5) с прикрепленными к нему крышкой турбины (8) и нижним кольцом направляющего аппарата (3).

Направляющий аппарат имеет перемещающуюся вдоль оси турбины дополнительную верхнюю подвижную крышку (7). В подвижной крышке и нижнем кольце направляющего аппарата размещены поворотные шайбы (6) с прорезями, через

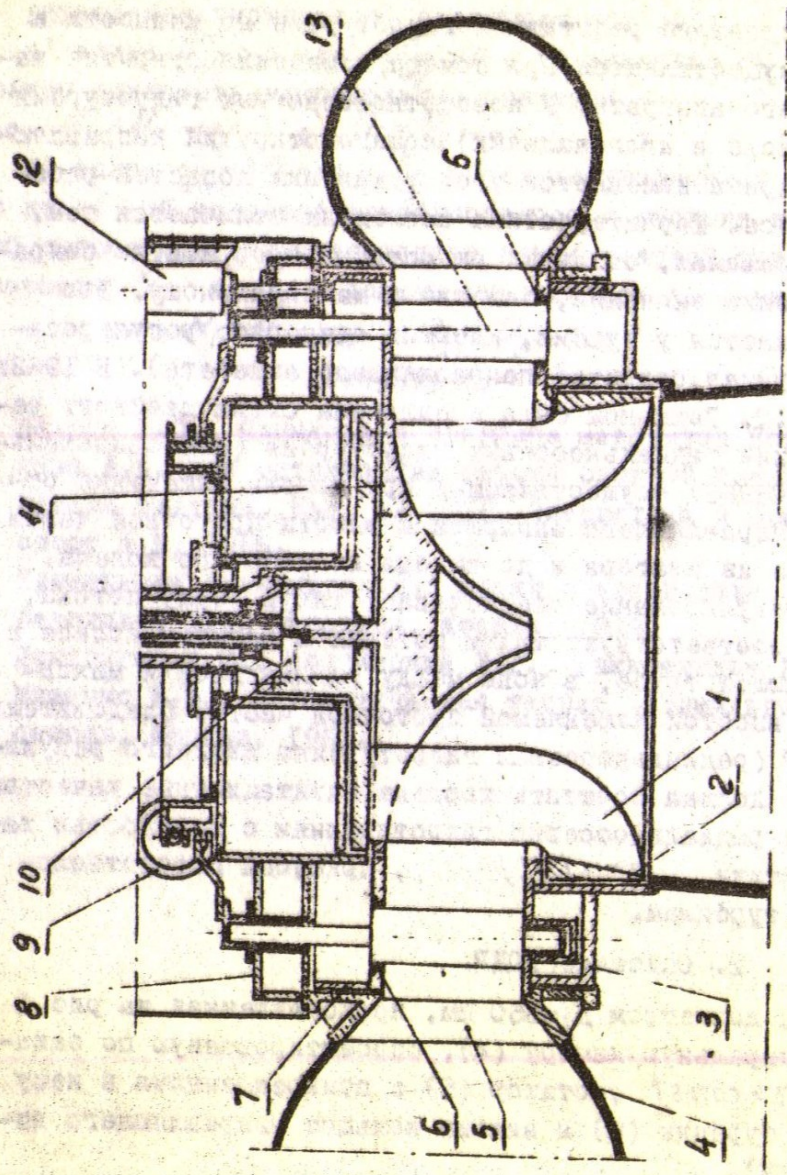


Рис. 1. Разрез по турбине РОДР

которые проходят лопатки (13), имеющие возможность поворачиваться вокруг своих осей при помощи сервомоторов (9), изменяя открытие. Всего лопаток 32; 16 из них (через одну) перемещаются вдоль оси турбины вместе с подвижной крышкой направляющего аппарата при помощи сервомоторов (12), утопая в карманы нижнего кольца. Густота решетки направляющего аппарата $l/t = 1,075$, профиль лопатки асимметричный с положительной кривизной. Рабочее колесо (2) получено на базе колеса РО 170/638^а ($\bar{b}_0 = 0,20$) путем приведения лопасти (1) в диапазоне от $\bar{b}_0 = 0,10$ до $\bar{b}_0 = 0,20$ к цилиндру и удлинения до $\bar{b}_0 = 0,30$ по этому цилиндру. Лопасти рабочего колеса пронизывает подвижный обтекатель (11), который может перемещаться вдоль оси турбины при помощи сервомотора (10). Число лопастей рабочего колеса $Z = 15$, а угол конусности рабочего колеса $\alpha = 13^\circ$. Отсасывающая труба с коленом 4Н имеет глубину $h = 2,55D_1$ и длину $L = 4,5D_1$. Высота проточной части изменялась путем перемещения на один уровень подвижных крышек направляющего аппарата и обтекателя рабочего колеса. Диапазон изменения высоты $\bar{b}_0 = 0,15 \div 0,30$.

3. Результаты исследований и их анализ.

Энергетические и кавитационные испытания модели РОДР 170/638^д были проведены в 1965 г. во ВНИИГидромаше с моделью, имеющей максимальную высоту $\bar{b}_0 = 0,25D_1$, а в 1967 году - в Лаборатории водных турбин ЛМЗ с моделью, имеющей максимальную высоту $\bar{b}_0 = 0,30$.

В процессе испытаний были получены универсальные характеристики, соответствующие относительным высотам направляющего аппарата и рабочего колеса $\bar{b}_0 = 0,15 ; 0,20 ; 0,25 ; 0,30$, по методике, принятой для моделей обычных радиально-осевых гидротурбин. На рис. 2 представлены разрезы $\eta = \eta(Q'_r)$ "пропеллерных" универсальных характеристик при $n'_r = 70$ об/мин. Из рассмотрения рис. 2 видно, что при изменении высоты \bar{b}_0 характеристики $\eta = \eta(Q'_r)$ смещаются по расходу. Обгибающая этих "пропеллерных" кривых представляет собой кривую комбинаторного режима.

Следует отметить, что в поворотнлопастной гидротур-

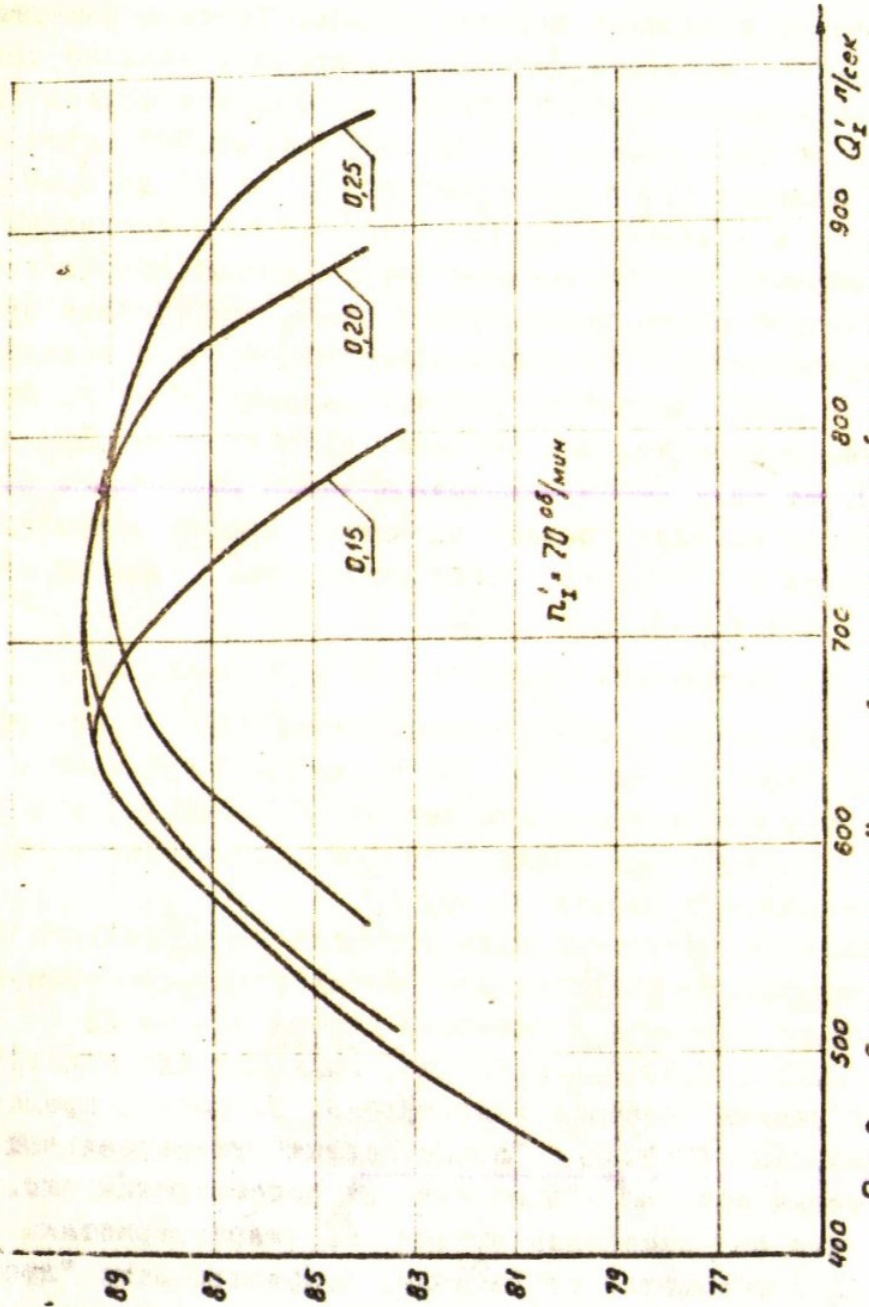


Рис. 2. "Пропеллерные" и комбинаторная рабочие характеристики $\eta = \eta(Q_1)$ при $n_1' = 70 \text{ об/мин}$ РОДР-638.

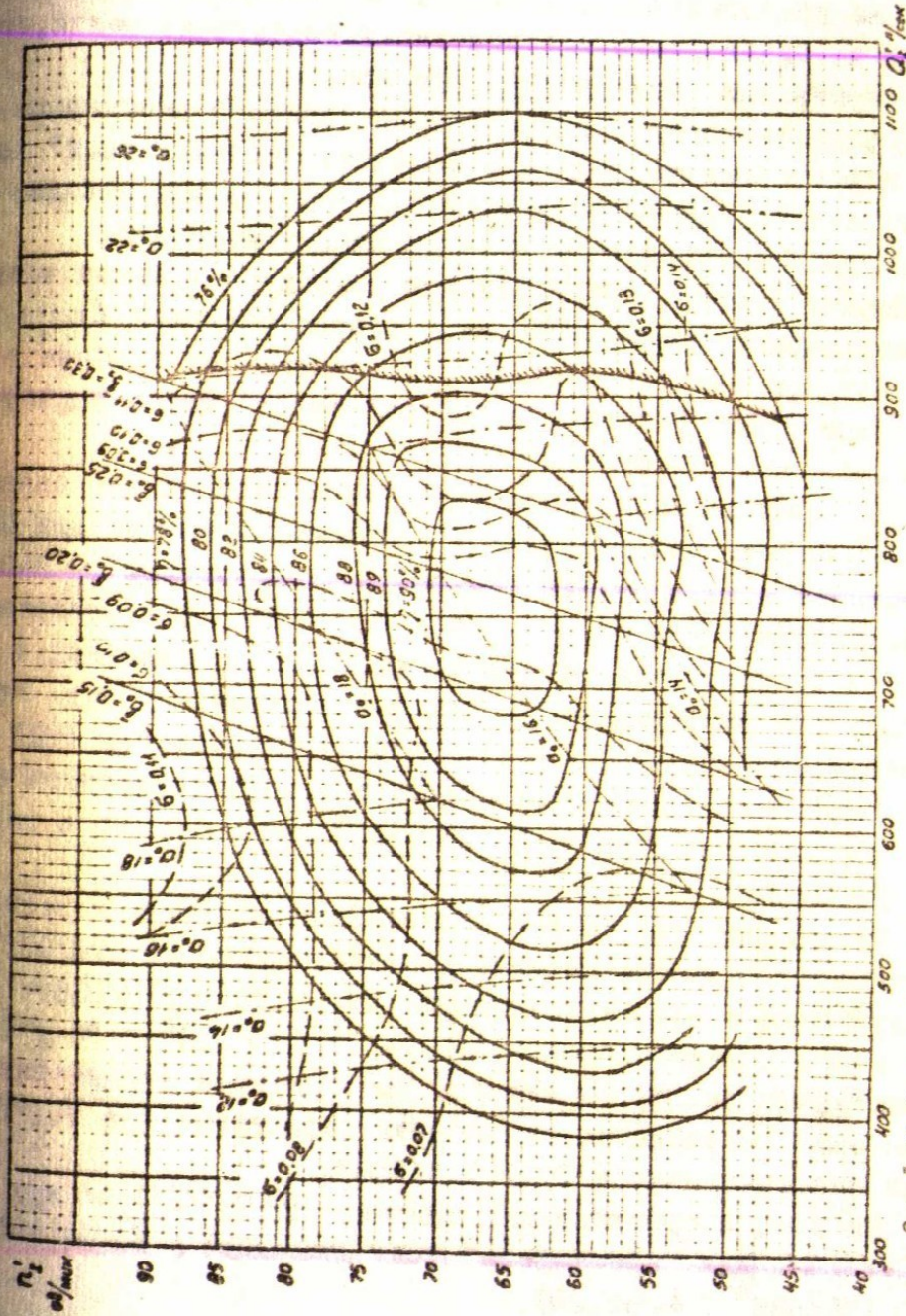


Рис. 3 Главная универсальная характеристика радиально-ходовой гидромеханической передачи с боковыми потерями (с учетом потерь на ступице)

бине некомбинаторная зона регулирования, соответствующая минимальному и максимальному углам установки лопастей, не представляет практического интереса, ибо диапазон комбинаторного регулирования достаточно велик, чтобы покрыть всю зону работы агрегата.

В радиальноосевой гидротурбине двойного регулирования играет большую роль правая часть "пропеллерной" характеристики, соответствующей \bar{b}_{0max} , так как диаметр турбины определяется по 5% запасу мощности.

Помимо этого, в РОДР большую роль играет левая часть "пропеллерной" характеристики, соответствующей \bar{b}_{0min} , так как при напорах близких к максимальному турбина в основном будет работать в "пропеллерной" части универсальной характеристики.

По "пропеллерным" характеристикам построена главная универсальная характеристика способом, принятым для поворотнлопастных турбин (см. рис.3). Полученные на ЛМЗ зависимости $\eta = \eta(Q_1')$ при $n_1' = const$ были сопоставлены с результатами исследований РОДР, проведенных в 1965 г. во ВНИИГидромаше. Величина оптимума к.п.д. практически совпадает. Универсальную характеристику РОДР I70/638^Д необходимо было сравнить с характеристикой базового рабочего колеса РО I70/638^А, испытанного в той же установке.

Характеристика такого колеса была получена пересчетом следующим образом: имелась характеристика РО I70/638^С, полученная в той же установке, что и РОДР I70/638^А. Кроме этого имелись характеристики РО I70/638^А и РО I70/638^В, полученные на другом стенде. По этим трем характеристикам была получена перестроенная характеристика РО I70/638^А для сопоставления с РОДР I70/638^А.

На рис. 4 представлены кривые $\eta = \eta(Q_1')$ при $n_1' = const$ для "пропеллера" РОДР I70/638^А ($\bar{b}_0 = 0,20$) и РО I70/638^А ($\bar{b}_0 = 0,20$).

Несовпадение кривых обусловлено:

- 1) различием форм спиральной камеры, числа и относительного диаметра расположения лопаток направляющего аппарата.
- 2) наличием уступа на входе в направляющий аппарат;
- 3) различием форм лопасти рабочего колеса.

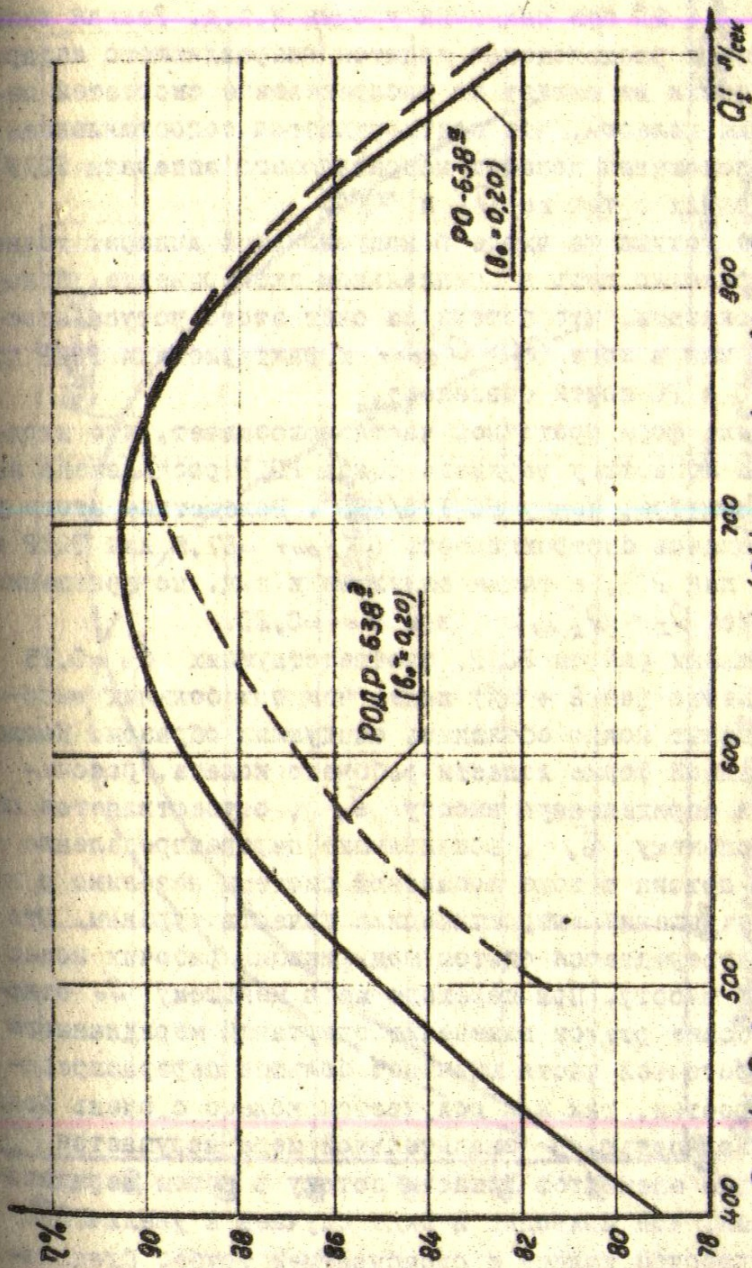


Рис. 4. Рабочие характеристики $\eta = \eta(Q_i)$ при $n_1 = 70 \text{ об/мин}$ для пропеллера PDP-638 ($\beta_0 = 0.20$) и PO-638 ($\beta_0 = 0.20$).

Спиральная камера РОДР имеет более низкий коэффициент скорости K_v по сравнению с РО, что позволяет увеличить расход на $1 + 2\%$ без снижения уровня к.п.д. Разная величина диаметра расположения лопаток направляющего аппарата практически не влияет на распределение скоростей перед рабочим колесом, что подтверждается сопоставлением углового положения лопаток направляющего аппарата РОДР и РО при одних и тех же Q'_r и n'_r .

Влияние уступа на входе в направляющий аппарат точно оценить возможно лишь в специальном эксперименте, однако можно сказать, что потери за счет этого уступа невелики, так как в зоне $Q'_r > Q'_{r\text{opt}}$ характеристики РОДР при $\bar{b}_o = 0,20$ и РО почти совпадают.

Сравнение форм проточной части показывает, что входная кромка лопасти у верхнего обода РОДР расположена на большем диаметре, чем у РО 170/638^а. Вследствие этого у РОДР понизилась быстроходность ($n'_{r\text{opt}} = 67,5$ для РОДР и 69 об/мин для РО), а также снизился к.п.д. по сравнению с РО в зоне $Q'_r < Q'_{r\text{opt}}$ при $\bar{b}_o = 0,20$.

При режимах работы РОДР, соответствующих $\bar{b}_o = 0,15$ к.п.д. заметно (на $2 + 3\%$) ниже, чем при больших высотах. Этот факт можно объяснить следующим образом: Когда при неизменной форме лопасти рабочего колеса, рассчитанного на определенную высоту \bar{b}_o , осуществляется переход к большему \bar{b}_o , возникающее перераспределение скоростей потока в зоне лопастной системы невелико и не вызывает ухудшения энергетических качеств турбины. Это хорошо подтверждается опытом модификации рабочих колес на большую высоту. При переходе же к меньшему \bar{b}_o относительно более резкое изменение очертаний меридианного сечения проточной части вызывает большее перераспределение скоростей, так как получается колесо с очень большой диффузорностью. В значительной мере нарушается соответствие элементов лопасти потоку в новом меридианном сечении, что приводит в ряде случаев к увеличению потерь в рабочем колесе и отсасывающей трубе. Следовательно, при проектировании лопасти колеса РОДР расчетным должен быть режим, соответствующий работе при \bar{b}_o , близком к минимальному с последующей проверкой обтекания при больших высотах.

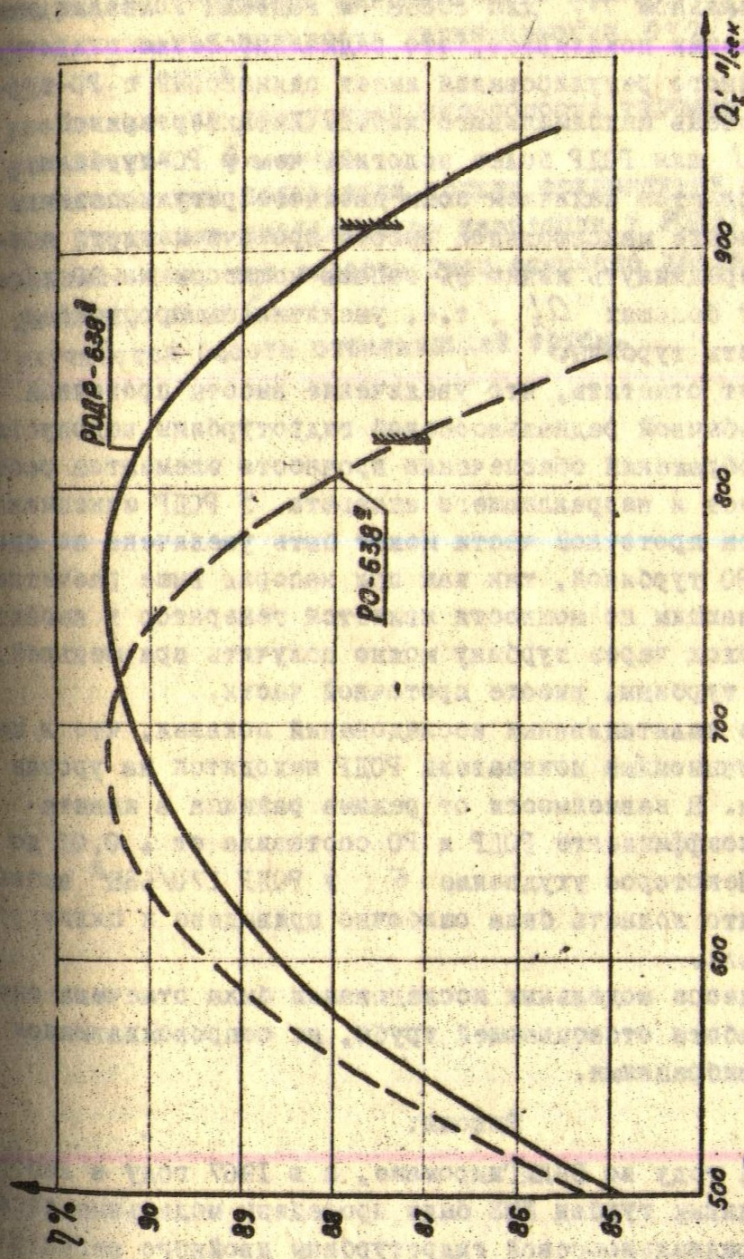


Рис. 5. Зависимость $\eta = \eta(Q_2)$ для PD-638 при $n_1 = 69$ об/мин и PDDP-638 при $n_1 = 67$ об/мин.

На рис. 5 представлен разрез характеристики $\eta = \eta(Q'_T)$ при оптимальном n'_T для РО638^а и РОДР638^д. Анализ этих характеристик показывает, что радиальноосевая гидротурбина двойного регулирования имеет одинаковый с РО-турбиной уровень максимального к.п.д. Характер кривой $\eta = \eta(Q'_T)$ для РОДР более пологий, чем у РО-турбины, что объясняется наличием зоны двойного регулирования.

Увеличение максимальной высоты проточной части позволило передвинуть линию 5% запаса мощности на 90 л/сек в сторону больших Q'_T , т.е. увеличилась пропускная способность турбины.

Следует отметить, что увеличение высоты проточной части у обычной радиальноосевой гидротурбины недопустимо из соображений обеспечения прочности элементов рабочего колеса и направляющего аппарата. У РОДР максимальная высота проточной части может быть увеличена по сравнению с РО турбиной, так как при напорах выше расчетного ограничивающим по мощности является генератор и необходимый расход через турбину можно получить при меньшей, чем у РО турбины, высоте проточной части.

Анализ кавитационных исследований показал, что в целом кавитационные показатели РОДР находятся на уровне РО турбин. В зависимости от режима разница в кавитационном коэффициенте РОДР и РО составила от + 0,01 до - 0,03. Некоторое ухудшение σ у РОДР I70/638^д вызвано тем, что лопасть была ошибочно приведена к цилиндру ниже \bar{b}_{amin} .

В процессе модельных исследований была отмечена спокойная работа отсасывающей трубы, не сопровождавшаяся шумом и вибрациями.

Выводы:

В 1965 году во ВНИИГидромаше, а в 1967 году в лаборатории водяных турбин ДМЗ были проведены модельные исследования радиальноосевой гидротурбины двойного регулирования, которое осуществляется путем изменения открытия лопаток направляющего аппарата и высоты проточной части в зоне от выхода из статора до выхода из рабочего колеса.

Анализ полученных результатов показал, что у РОДР

по сравнению с РО турбиной:

- а) сохраняется уровень максимального к.п.д.;
- б) увеличивается пологость характеристик $\eta = \eta(a_1')$ при $n_1' = const$.
- в) увеличивается пропускная способность турбины за счет увеличения \bar{G}_{0max} ;
- г) кавитационные показатели должны сохраняться (некоторое ухудшение коэффициента кавитации у РОДР170/638^Д вызвано тем, что лопасть была ошибочно приведена к цилиндру ниже \bar{G}_{0min}).
- д) улучшается работа отсасывающей трубы.