

*Ильичев В. Ю., к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашины»
Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)», г. Калуга, Россия*

*Трутнев Д. С., магистрант кафедры «Тепловые двигатели и гидромашины»
Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)», г. Калуга, Россия*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОТУРБИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНОГО МЕТОДА

Аннотация: Статья посвящена решению важной задачи, которая ставится на начальных этапах проектирования мощных гидротурбин – разработке пошагового алгоритма подбора модельной турбины и пересчёта её основных параметров согласно исходным данным на проектирование. В разработанном алгоритме используются известные экспериментальные характеристики модельных турбин. Приведён пример проектирования гидротурбины, осуществлённого согласно алгоритму.

Ключевые слова: гидротурбина, модельный метод, алгоритм проектирования.

Annotation: The article is devoted to solving an important problem that is set at the initial stages of designing powerful hydraulic turbines - the development of a step-by-step algorithm for selecting a model turbine and recalculating its main parameters according to the initial design data. The developed algorithm uses the known experimental characteristics of model turbines. An example of the design of a hydraulic turbine, carried out according to the algorithm, is given.

Keywords: hydroturbine, model method, design algorithm.

Введение

Гидротурбины являются оборудованием для производства электроэнергии, обладающим особыми достоинствами: низкими эксплуатационными затратами (так как в них не используется топливо), высокими маневренными качествами, широтой диапазона изменения мощности, сравнительной простотой конструкции [1]. Однако на данный момент не существует полной математической модели для проектирования мощных гидротурбин ввиду сложности, происходящих в них процессов. На начальных этапах проектирования новой турбины представляется целесообразным воспользоваться опытом, накопленным при проектировании и эксплуатации гидротурбин в нашей стране (который во многом получен путём проб и ошибок, последовательного совершенствования конструкции при модернизации). Для широкого ряда гидротурбин существуют экспериментально полученные характеристики, позволяющие определить типоразмер турбины-прототипа (называемой модельной турбиной) для проектируемой установки. Это возможно благодаря тому, что гидротурбины, имеющие подобную геометрию рабочих объёмов, но разные размеры, имеют также и подобные приведённые характеристики [6]. Следовательно, размеры подобранных модельных турбин с разным типом рабочих колёс можно пересчитать для заданных исходных данных, а затем из всех пересчитанных выбрать турбину с типом рабочего колеса, наиболее полно соответствующим всем требованиям к параметрам и конструкции проектируемой гидротурбины.

Методы и материалы

Кратко суть метода состоит в следующем. При проектировании гидротурбин в качестве исходных данных используются напор H (м), расход Q (м³/с) и мощность N (кВт), причём мощность напрямую определяется расходом и напором. Напор представляет собой перепад высот между верхним и нижним бьефом плотины. Мощность и расход зависят от количества энергии,

необходимой потребителю и характеристиками водоёма, на котором устанавливается плотина. По этим данным можно выбрать возможные типы рабочих колёс для проектируемой турбины. После выбора типов рабочих колёс по исходным данным необходимо определить частоты их вращения n (об/мин) и диаметры рабочих колёс D (м), а также прочие параметры турбин с использованием специальной графической зависимости.

Для экспериментально отработанных рабочих колёс (модельных) турбин взаимная зависимость основных параметров при разных режимах работы приводится в виде характеристики, называемой универсальной [2; 3]. Пример такой характеристики для турбины РО-75-В приведён на рис. 1.

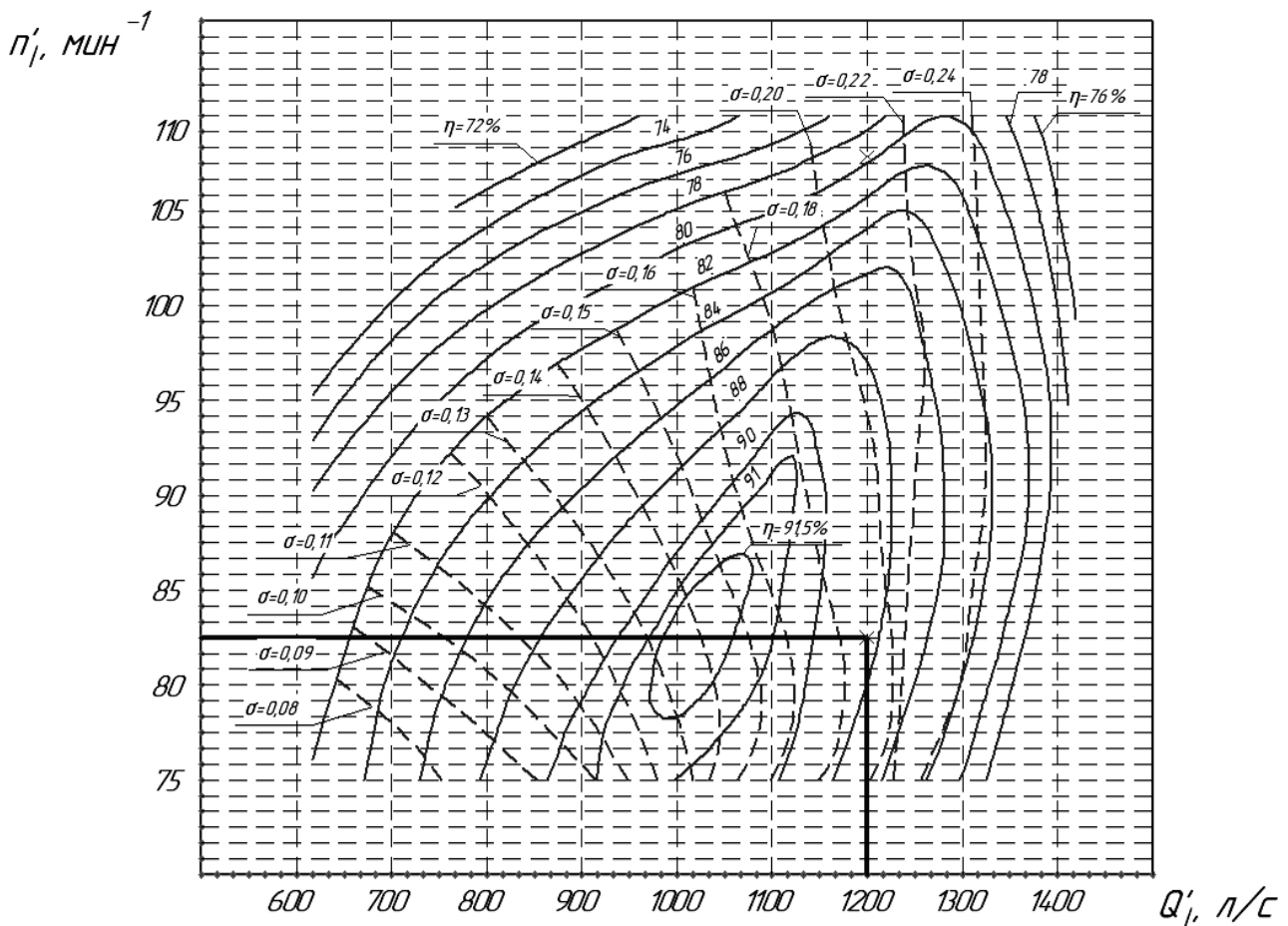


Рис. 1. Универсальная характеристика гидротурбины РО 75-В

Универсальная характеристика связывает следующие параметры рабочего колеса: коэффициент полезного действия (КПД) η , кавитационный коэффициент σ [7], приведённую частоту вращения n'_1 и приведённый расход

Q'_I . Она получается либо по опыту эксплуатации реальных гидротурбин, либо в результате испытаний небольших модельных турбин. В данной работе рассматриваются только экспериментальные характеристики крупных турбин.

Пересчитанные характеристики проектируемой гидротурбины можно получить с использованием универсальной характеристики и масштабных коэффициентов [5].

Далее более детально рассмотрим разработанный алгоритм проектирования новой гидротурбины с использованием характеристик модельных турбин.

Так как расход воды связан с напором и мощностью, то в качестве исходных данных достаточно задать только два из этих параметров: напор H_p и мощность N . Также важным требованием для проектируемой турбины является обеспечение заданной высоты отсасывания H_s .

Первым этапом алгоритма является определение максимального напора H_{\max} по известным уровням верхнего и нижнего бьефа плотины. Далее можно подобрать типы модельных гидротурбин (обычно возможны несколько таких вариантов), способные обеспечить данное значение максимального напора.

На втором этапе определяется пересчитанный диаметр рабочего колеса D_1 для каждой из выбранных модельных гидротурбин. Для определения расхода Q'_I и КПД η_m , которые используются в формуле для нахождения D_1 , необходимо определить расчётную точку на универсальной характеристике каждой выбранной модельной турбины. Расчётная точка выбирается в области значений максимального приведенного расхода $Q'_{I\max}$ на линии, соответствующей оптимальной приведенной частоте вращения $n'_{I\text{opt}}$. После определения D_1 рассчитываются предполагаемые КПД рассматриваемых машин и частоты их вращения.

Третьим этапом алгоритма является определение расчётных точек рассматриваемых универсальных характеристик уже по пересчитанным предполагаемым КПД и величинам приведённого расхода. Для найденных расчётных точек находятся значения Q'_I , η_m и σ .

На четвёртом этапе определяются допустимые высоты отсасывания и производится сопоставление полученных пересчитанных параметров рассматриваемых гидротурбин с выбором оптимального варианта конструкции.

Пример расчёта

В качестве примера применения разработанного алгоритма осуществим выбор конструкции гидротурбины для следующих исходных данных: $H_p=57$ м, $N=85000$ кВт, $H_s=4,5$ м.

Отметки бьефов плотины представлены в табл. 1.

Таблица 1. Отметки бьефов плотины

	расчётная	максимальная	минимальная
∇НУ	125	145	103
∇ВУ	68	79	60

Этап 1. Определяется максимальный напор гидротурбины, равный $145-79=66$ м, который могут обеспечить модельные турбины двух типов [6]:

- ПЛ70-В - осевого типа с поворотными лопастями;
- РО75-В - радиально-осевого типа.

Этап 2. Определяем диаметр рабочих колёс:

$$D_1^* = \left(\frac{N}{9,81 \cdot Q'_I \cdot \eta_M \cdot H_P^{1,5}} \right)^{0,5},$$

где значения Q'_I , м³/с и КПД модельных турбин η_M определяются по универсальным характеристикам. Данные значения находятся на пересечении линии, соответствующей оптимальной приведенной частоте вращения n'_{Iopt} , со значением максимального приведённого расхода Q'_{Imax} .

Для турбины ПЛ60-В расчётное значение диаметра равно 4 м, для РО75-В 4,5 м.

Зная диаметры рабочих колёс, можно вычислить частоты вращения турбин:

$$n^* = \frac{n'_{I_p} (H_p)^{0,5}}{D_1}$$

где n'_{I_p} , об/мин – значение приведённых частот вращения.

Полученные значения частот вращения турбин округляются до значений частот вращения синхронных генераторов $n_{\text{синхр}}$.

Для ПЛ70-В: $n_{\text{синхр}}=200$ (об/мин) – подходит гидрогенератор с 15 парами полюсов, для РО-75-В: $n_{\text{синхр}}=142,9$ (об/мин) – выбираем гидрогенератор с 21 парами полюсов.

Этап 3. По универсальным характеристикам находим расчётные точки турбин со следующими значениями Q_I' , η_m и σ :

для ПЛ70-В: $Q_I'=1,4$ м³/с; $\eta_m=0,849$; $\sigma=0,557$;

для РО75-В: $Q_I'=1,2$ м³/с; $\eta_m=0,79$; $\sigma=0,214$.

Этап 4. По данным, определённым на этапах 1-3, вычисляем допустимую высоту отсасывания для ПЛ70-В: $H_s^{\text{доп}}=-7,99$ м, для РО75-В: $H_s^{\text{доп}}=0,905$ м. Сравнивая полученные варианты турбин, для дальнейших расчётов выбираем турбину РО75-В, так как высота отсасывания $H_s^{\text{доп}}=-3,04$ м для этой турбины меньше необходимой $H_s=-4,5$ м.

Заключение

В результате исследования разработан алгоритм (последовательность операций) выбора типа рабочего колеса и расчёта основных характеристик гидротурбины, с использованием исходных данных и универсальных характеристик модельных турбин.

В дальнейшем планируется автоматизация указанного процесса путём создания базы данных аппроксимированных универсальных характеристик различных гидротурбин и её использование путём реализации описанного алгоритма в виде расчётно-аналитической программы, созданной с помощью современных средств программирования [4].

Библиографический список:

1. Васильев Ю.С., Петреня Ю.К., Георгиевская Е.В. Ресурс гидротурбин: подходы, мнения, тенденции. обзор российской литературы. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 6. С. 59-73.

2. Волков Ю.С., Мирошниченко В.Л., Рожено А.И. Моделирование универсальной характеристики гидротурбины. // Математика в современном мире. 2017. С. 391.

3. Волков Ю.С., Мирошниченко В.Л., Салиенко А.Е. Математическое моделирование универсальной характеристики поворотно-лопастной гидротурбины. // Машинное обучение и анализ данных. 2014. Т. 1. № 10. С. 1439-1450.

4. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Разработка программы для исследования термодинамического цикла Ренкина. // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 2. С. 32-36.

5. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А., Трутнев Д.С. Обобщённая методика автоматизированного проектирования обратимых гидротурбин. // Научное обозрение. Технические науки. 2019. № 5. С. 5-10.

6. Орго В.М. Основы конструирования и расчета на прочность гидротурбин. Л.: Машиностроение, 1978. 224 с.

7. Румахеранг В.М., Топаж Г.И., Захаров А.В. Методика расчетного определения кавитационных показателей гидротурбин. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. № 1 (142). С. 112-118.