

ГИДРОТЕХНИКА

А. А. АСЛАМАЗЯН

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ ГИДРОТУРБИН
ПРИ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Вопросы, связанные с энергетическими испытаниями гидротурбин, работающих в установившихся (статически) режимах, получения их характеристик, а также методика пересчета этих характеристик, хорошо разработаны и широко применяются в области гидромашиностроения. Однако указанные вопросы в случае работы турбины в неуставившихся (динамических) режимах мало изучены и нет единой методики получения ее динамических характеристик.

При исследовании ряда вопросов, относящихся к устойчивости гидроэнергосистем, допускают [1—3], что статические характеристики гидротурбины могут быть применены во всех случаях исследования неуставившихся режимов. Такое допущение хотя и позволяет вести исследования по динамическим режимам, однако полученные результаты нуждаются в строгой экспериментальной проверке, ибо указанное допущение принимается без должного анализа и оценки влияния всех действующих факторов на явление.

Многообразность сложных явлений, имеющих место в динамических режимах работы турбины, а также при изучении вопросов, связанных с устойчивостью гидроэнергосистем, не имеет соответствующего математического выражения, и без опытов нельзя оценить влияние всех действующих факторов.

В свете изложенного возникает необходимость в установлении методики экспериментального исследования динамических режимов и получения динамических характеристик гидротурбин. С этой целью в лаборатории моделирования энергосистем Института энергетики и гидравлики Академии наук Армянской ССР проведены экспериментальные исследования гидротурбины при ее работе в неуставившихся режимах.

Опыты проводились с рабочим колесом К-245 при $\varphi = +5^\circ$, $D = 0,3$ м для трех различных схем его установки.

Схема I. Установка рабочего колеса в открытой камере (рис. 1) с направляющим аппаратом поворотного лопаточного типа, с числом лопаток $z = 12$ высотой $b = 0,11$ м. Испытания проводились без отсасывающей трубы с постоянным напором $H = 1,1$ м. Эта схема дала возможность получить статические и динамические характеристики рабочего колеса в чистом виде без наличия колебания давления в какой-либо части турбины.

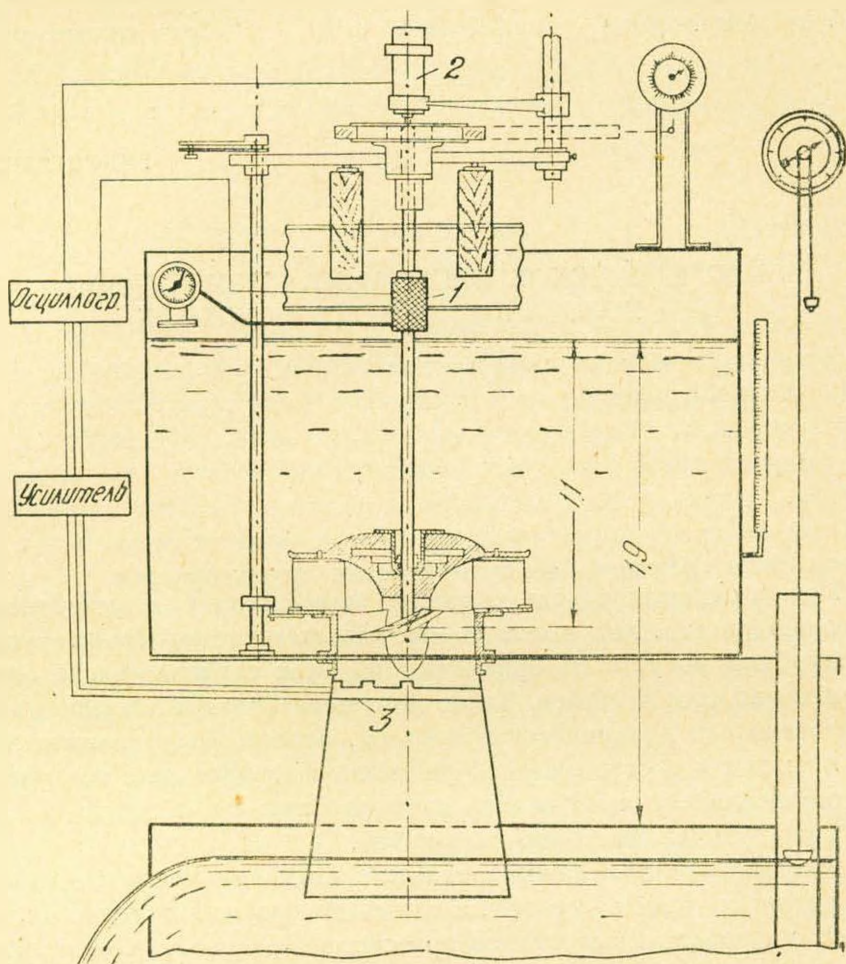


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Схема II. Испытание рабочего колеса на том же стенде, что и при схеме I, но с прямоосной отсасывающей трубой длиной $l = 1,35$ м выходным диаметром $D = 0,58$ м. Максимальный напор $H = 1,9$ м.

Во второй схеме исследовано влияние на характеристики только, отсасывающей трубы.

Схема III. Рабочее колесо испытывалось на динамической модели с горизонтальным валом, металлической спиральной камерой, поворотно-лопаточным направляющим аппаратом с $z = 12$. Подводящий трубопровод модели имел длину $L = 69$ м, диаметр $D_0 = 0,64$ м и толщину стенок $\delta = 4$ мм. Отсасывающая труба длиной $l = 3$ м, выходным диаметром $D = 0,7$ м. Максимальный напор $H = 5,9$ м. Таким образом, благодаря последовательному испытанию рабочего колеса в трех указанных схемах, имелась возможность исследовать в отдельности влияние отсасывающей трубы, спиральной камеры и трубопровода на характеристики турбины, работающей в условиях динамических и статических режимов.

Методика экспериментирования турбины при статических режимах общеизвестна. Вкратце опишем методику экспериментирования динамических режимов работы турбины, проводимых при разных постоянных открытиях направляющего аппарата. Динамический режим создавался следующим образом: полностью заторможенное рабочее колесо при определенном открытии a_0 , напора H_0 и расхода Q_0 , мгновенно освобождалось и на осциллографе производилась синхронная запись по времени всех основных переменных.

При испытании по схеме I регистрировались число оборотов и угловое ускорение вала турбины; по схеме II — число оборотов, угловое ускорение вала турбины и колебание давлений в трех точках отсасывающей трубы; по схеме III — число оборотов и угловое ускорение вала турбины, движущий момент на валу турбины, расход воды через турбину, колебание давления в трех точках отсасывающей трубы, давление за направляющим аппаратом, т. е. над рабочим колесом.

Измерение всех неэлектрических величин производилось датчиками, которые в основном были изготовлены в лаборатории института.

Регистрация скорости вращения производилась путем записи напряжения датчика двухстрелочного дистанционного тахометра переменного тока ТЭ-45 (1, рис. 1), непосредственно на осциллограф или по дифференциальной схеме, согласно рис. 2—а.

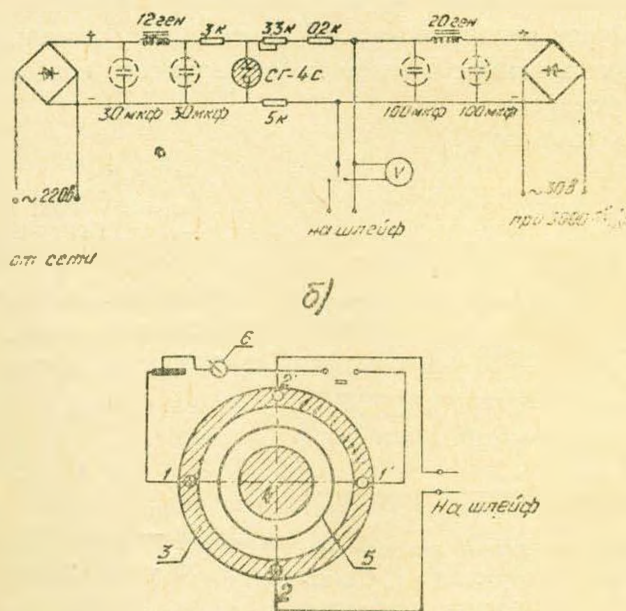


Рис. 2. а) Принципиальная схема тахогенератора;
б) принципиальная схема датчика ускорения.

Регистрация углового ускорения. В первые два этапа работы не было возможности измерять непосредственно вращающий момент на валу из-за отсутствия динамометра и взамен момента на осцил-

лографе регистрировалось угловое ускорение вала турбины, что позволило определить вращающий момент по времени

$$M_{\theta} = f(t_{\theta}).$$

Для этой цели был использован датчик типа ДИС-3 (2) рис. 1 изготовленный ИНИ МЭП. Принцип действия датчика состоит в следующем: в пазах статора (рис. 2—б) обычного асинхронного двигателя расположены две обмотки (1—1) и (2—2), магнитные оси которых взаимно перпендикулярны.

В воздушном зазоре между статором (3) и неподвижным сердечником (4) вращается пустотелый цилиндр (5), изготовленный из немагнитного материала и насаженный на вал датчика.

При возбуждении обмотки (1—1) постоянным током во вращающемся цилиндре возникают токи, направленные по оси обмотки (2—2). Изменение скорости вращения цилиндра (5) вызывает изменение потока, пронизывающего обмотку (2—2). Поскольку вращающий момент турбин пропорционален ускорению вращения цилиндра, т. е.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J}, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость вращения,

J — момент инерции вращающихся масс,

то электродвижущая сила, наводимая в обмотке (2—2) датчика, также будет пропорциональна вращающему моменту турбины. Для получения зависимости момента по времени необходима тарировка записи ускорения.

Согласно условию (1)

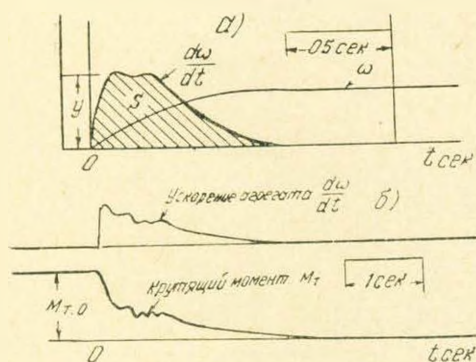


Рис. 3. а) Осциллограмма записи ускорения и угловой скорости. б) Осциллограммы записи ускорения и момента.

$$\omega = \int_0^t \frac{d\omega}{dt} dt. \quad (2)$$

На рис. 3—а дана осциллографическая запись ускорения и скорости, по схеме 1, откуда

$$\omega = \int_0^t m y dt = S,$$

где m — масштаб ординаты y ; S — площадь записи ускорения, показанная штриховкой, опреде-

ляется с помощью планиметра.

Масштаб для ординаты y равен:

$$m = \frac{\omega}{S (1 \text{ см} \cdot t)} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{сек}^2},$$

значение ординаты,

$$y_{\text{исм}} = \frac{\omega}{St} J \text{ кг. м.} \quad (3)$$

Пользуясь аналогичными осциллографическими записями для каждого эксперимента, по формуле (3) определялись ординаты y и зависимость $M_d = f(t_d)$.

Регистрация момента вращения производилась струнным динамометром [5], который был использован при исследованиях по схеме III.

Это устройство дает возможность измерять момент на валу при скоростях вращения до 2000 об/м, с точностью, достаточной для практических лабораторных работ.

На валу при помощи хомутов закрепляются два кронштейна, между которыми поперек вала натягивается тонкая стальная струна. При деформации вала, под влиянием крутящего момента, кронштейны получают относительное перемещение, натягивая или ослабляя струну. В зависимости от этого меняется частота собственных колебаний струны. Колебание струны индуцирует в адаптере ток соответствующей частоты, который с помощью вращающегося трансформатора передается на усилитель.

Выход схемы осуществлен через устройство, дающее ток, пропорциональный изменению момента.

На рис. 3—б дана одновременная запись ускорения датчиком ДИС-3 и крутящего момента динамометром, по которой видна совершенно одинаковая форма записи. Обработка этих осциллограмм показала совершенно тождественные результаты.

Регистрация давления производилась тензометрическими датчиками. Для отсасывающей трубы было изготовлено специальное устройство (3), рис. 1, обтекаемой формы с тремя тензометрическими датчиками, которое устанавливается в начале отсасывающей трубы по радиусу поперечного его сечения у стенки, в середине радиуса и в центре. В корпусе тензометрических датчиков на продольной упругой металлической пластинке с двух сторон закреплены проволочные тензометры сопротивления. Пластика одним концом упирается о мембрану, которая воспринимает на себя изменения давления воды. Эти колебания мембраны вызывают изменения прогиба пластинки, т. е. электрического сопротивления проволочных датчиков. Электрическая мостовая схема, два плеча которой являются указанными датчиками, а два плеча находятся в усилителе, выходит из равновесного состояния, и появившийся в диагонали ток, пропорциональный изменению давления, подается на осциллограф. Другой конец упругой металлической пластинки упирается в регулировочный винт, который служит для регулирования предварительного изгиба пластинки, т. е. выбора оптимального участка характеристики.

Для обработки записи давлений строились эпюры давлений для

трех точек измерения. Суммарная эпюра осреднялась по длине радиуса и с ее помощью строились кривые изменения напора в зависимости от времени.

Кроме этого, для замера давления в трубопроводе в сечении у входа в спиральную камеру и в камере рабочего колеса установлены подобные датчики несколько больших размеров, с диаметром мембраны, равным 25 мм.

На рис. 4—а дана осциллографическая запись колебаний давления в отсасывающей трубе при работе по II схеме. Запись по времени разбита на I, II III зоны, соответствующие начальному статическому

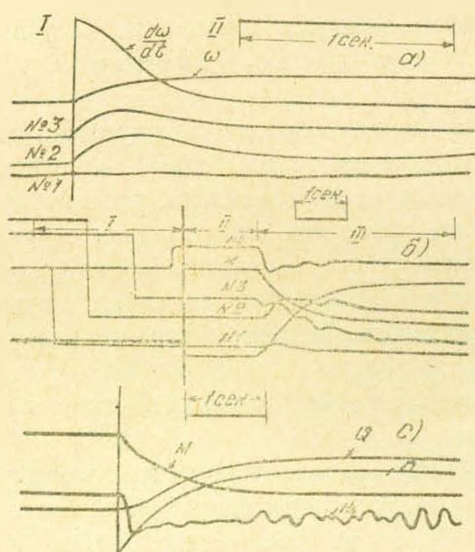


Рис. 4. а) Осциллографическая запись колебания давления в отсасывающей трубе по схеме II. б) Осциллографическая запись колебания давления над рабочим колесом, в отсасывающей трубе по схеме III. в) Осциллографическая запись изменений M , Q , n и H .

a_0 , Q_0 , H_0 , затем динамическому и новому установившемуся режимам. Запись № 1 показание датчика, установленного у стенки отсасывающей трубы. № 3—в центре трубы и № 2—в середине радиуса трубы.

Как видно, первые доли секунды динамического режима, мгновенно увеличенный расход заполняет вакуумное пространство над рабочим колесом. В результате этого на величину снятого давления соответственно уменьшается напор. В дальнейшем вакуум постепенно восстанавливается. На осциллограмме дана также запись ускорения и скорости вала турбины.

На рис. 4—б дана осциллографическая запись колебаний давлений в трех точках отсасывающей трубы № 1, 2 и 3

и над рабочим колесом № 4, по схеме III.

Как видно, при мгновенном сбросе нагрузки резко падает давление у входа в турбинную камеру и в отсасывающей трубе, что вызывает колебание напора до конца динамического режима в области рабочего колеса, и напор не восстанавливается до своего первоначального значения.

Измерение расхода при динамических режимах по схемам I и II не было произведено, за неимением соответствующей аппаратуры. При статических режимах расход измерялся с помощью прямоугольного, тонкостенного водослива, установленного в нижнем отводящем резервуаре модельной установки. Замер толщины слоя воды над водо-

сливом производился тастером и поплавком. В наших подсчетах допускалось, что для условий $H = \text{const}$, $a_0 = \text{const}$ расход зависит только от скорости вращения турбины, т. е. при одинаковых значениях чисел оборотов динамического и статического режимов значения расходов одинаковые — $Q_d = Q_c$, иными словами, форма и наклон кривой $Q = f(n)$ для обоих режимов работы турбины остаются неизменными.

При исследовании по схеме III имелась возможность измерять расход при динамических режимах с помощью устройства, сконструированного в лаборатории института [6] по принципу переменного перепада на суживающемся участке. Это устройство имеет достаточную для лабораторных работ чувствительность и слабо реагирует на волновые явления, происходящие в трубопроводе.

Первичным прибором расходомера служит мембранный дифференциальный манометр с проволочными тензодатчиками. При изменении расхода воды в трубопроводе меняется перепад давления в дифманометре, который преобразуется в электрический ток и регистрируется на осциллографе. На рис. 4 — представлена осциллографическая запись показаний расходомера, динамометра, чисел оборотов по записи напряжения датчика скоростей и давления над рабочим колесом. Результаты обработки осциллограммы подтвердили правильность нашего допущения, так как данные, полученные расходомером при динамических режимах, достаточно хорошо ложатся на статические кривые $Q_c = f(n_c)$. Перед опытом измерительные приборы были протарированы, и была установлена зависимость между ординатой записи и абсолютным значением записываемых величин.

Обработка данных и анализ погрешностей по всем измерениям показывают, что ошибка не превышает 5%.

В результате обработки опытных данных и расчета с учетом влияния инерционного момента и изменения динамического напора [7] с достаточной полнотой выявлены надежность и допустимая точность использованной аппаратуры. Полученные динамические характеристики и их сопоставление со статическими частично опубликованы в работе автора [7].

Институт энергетики и гидравлики
АН Армянской ССР

Поступило 15.III 1959

Հ. Ա. ԱՌԱՄԵՋԱՆ

ՀԻԴՐԱՏՈՒՐԻԿԱՆԵՐԻ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԸ
ԶՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ՌԵԺԻՄՆԵՐՈՒՄ

Ա Վ Փ Ո Փ Ն Շ Մ

Հոգիածում նշում է, որ չնայած հաստատված սեփականում աշխատող հիդրոտուրբինների էներգետիկ փորձարկումների և նրանց խարակտերիստիկ կորերի ստացման մեթոդը մշակված է մանրամասնորեն և իր լայն կիրառու-

թիւնն է գտել տուրբինաշինարարութիւն մեջ, սակայն չհաստատված ուժիմներում աշխատող տուրբինների վերաբերյալ այդ հարցը մնում է դեռ չմշակված:

Ներկա հոգվածում առաջարկվում է տուրբինների չհաստատված ուժիմներում էներգետիկ փորձարկումների մեթոդ, որը մշակվել և կիրառվել է լաբորատոր պայմաններում:

Հոգվածում բերված են էքսպերիմենտալ սարքի ու չափող գործիքների նկարագրութիւնը, ինչպես և գրանցված մեծութիւնների մշակումը:

Օգտագործված չափող գործիքները զլխավորապես մշակված և պատրաստված են էներգետիկայի և հիդրավլիկայի ինստիտուտի մոդելացման լաբորատորիայում և նրանց հիմքում դրված էն ոչ իներցիոն լարային տենդոմետրիկ սովիչներ:

Այդ փորձարկումների ժամանակ չափվել և օսցիլոգրաֆով գրանցվել են ջրի ելքի, ճնշման, արագութիւն, արագացման և պտտող մոմենտի փոփոխութիւնները ըստ ժամանակի, որոնց միջոցով կառուցվել են չհաստատված ուժիմներում աշխատող տուրբինային իարակտերիստիկ կորերը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Tenot A. Turbines hydrauliques et regulateurs automatiques de vitesse. 1935, т. IV.
2. Егуазаров И. В. Моделирование явлений неустановившегося волнового движения безнапорного и напорного потока. „Известия ОН АН СССР“, № 10, 1953.
3. Овсепян К. Х. Динамическая модель Водно-энергетического института АН АрмССР и ее задачи. Научные доклады Высшей школы „Энергетика“. № 1, 1958.
4. Картвелишвили И. А. Неустановившиеся режимы в силовых узлах гидроэлектростанций. ГЭИ, 1953.
5. Хачиян М. Г. Струнный динамометр для измерения крутящего момента. „Известия АН Армянской ССР“, (серия техн. наук), № 5, 1958.
6. Овсепян К. Х., Хачиян М. Г. Расходомер для регистрации расхода при нестационарных режимах. „Известия АН Армянской ССР“, № 3, 1950.
7. Асламазян А. А. Научные доклады Высшей школы „Энергетика“, № 2, 1958.