

А. В. Линник
А. В. Рябов
 ОАО «Турбоатом»,
 Харьков,
 e-mail:
 riabov_a_v@mail.ru

УДК 621.224

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ОАО «ТУРБОАТОМ» ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ МОДЕЛЕЙ ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНЫХ ГИДРОТУРБИН¹

Ключові слова:
 енергокавітаційний стенд,
 гідротурбіна,
 модельні дослідження,
 похибка вимірювання

Наведено опис основного та допоміжного обладнання енергокавітаційного стенду ЕКС-100 гідротурбінної лабораторії ВАТ «Турбоатом». Показано, що гідравлічні стенди і засоби вимірювання, що застосовуються, а також застосовані процедури градування первинних датчиків забезпечують точність вимірювань, які відповідають вимогам коду модельних прийомо-здавальних випробувань гідротурбін та оборотних гідромашин ІЕС 60193.

Введение

ОАО «Турбоатом» является одним из ведущих предприятий в мире по выпуску гидротурбинного оборудования [1]. Оно осуществляет полный цикл создания гидромеханического оборудования: проведение научно-исследовательских работ, проектирование, изготовление и авторский надзор монтажа, испытаний и гарантийной эксплуатации оборудования. Высокий технологический уровень гидротурбинного производства позволяет создавать уникальные гидроагрегаты.

Новые прогрессивные конструкции, обеспечивающие высокую надежность и экономичность изготавливаемых объединением гидромашин и гидрозатворов с высокими энергетическими и кавитационными показателями, создаются на основе всесторонних теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в экспериментальном комплексе специального конструкторского бюро «Турбогидромаш» (гидротурбинная лаборатория предприятия).

Исследования выпускаемого гидромеханического оборудования выполняются на стендах, которые по своим параметрам и оснащению измерительной аппаратурой отвечают требованиям всех международных стандартов в области гидротурбостроения. Экспериментальное оборудование гидротурбинной лаборатории включает 6 гидравлических стендов и несколько установок для исследования отдельных узлов и механизмов гидрооборудования. Большинство стендов универсальные, оснащены стационарными градуировочными устройствами и оборудованы пультами управления. Это позволяет оперативно, исходя из потребностей производства, исследовать проточные части гидромашин и затворов, решать вопросы надежности разрабатываемых узлов и механизмов.

1. Описание испытательного стенда ЭКС-100

Экспериментальный стенд ЭКС-100 представляет собой установку с замкнутым контуром циркуляции воды, предназначенную для проведения энергетических, кавитационных, пульсационных, силовых и других испытаний моделей гидротурбин, насосов и обратимых гидромашин. Широкие оперативные возможности стенда, устойчивость режимов, оснащенность разнообразными приборами и средствами их градуирования, автоматизированная система измерений и математической обработки результатов позволяют получать характеристики моделей гидромашин с высокой степенью достоверности, обеспечивают соблюдение критериев моделирования, предусмотренных международным кодом ІЕС60193 [2] и других требований, предъявляемых к приемо-сдаточным испытаниям.

Стенд имеет паспорт метрологической аттестации, а также апробирован путем сравнительных испытаний одних и тех же моделей гидротурбин в лабораториях NEL (Великобритания) и SKD Blansko (Чехия), при которых получена хорошая сходимость результатов. Вид стенда показан на рис. 1.

Стенд ЭКС-100 характеризуется следующими основными параметрами:

Максимальный напор испытаний $H_{\max} = 100,0$ м
 Расход, соответствующий H_{\max} $Q = 1,4$ м³/с

Максимальный расход	$Q_{\max} = 2,8 \text{ м}^3/\text{с}$
Напор, соответствующий Q_{\max}	$H = 50,0 \text{ м}$
Мощность балансирной машины	$P = 500,0 \text{ кВт}$
Диапазон давлений в баке НБ	$p_{abs_2} = 0,05 \dots 2,0 \text{ кгс/см}^2$
Объем воды в стенде	$V = 350,0 \text{ м}^3$

Основное оборудование стенда расположено на двух ярусах монолитной железобетонной арочной конструкции. На нижнем ярусе, на отметке -5 м , расположены насосные агрегаты, задвижки, ресорбер. На верхнем, на отметке $+6,5 \text{ м}$, – напорный бак-расширитель верхнего бьефа и вакуумный бак нижнего бьефа, расходомеры, модельная установка. Разница в $11,5 \text{ м}$ между ярусами создает благоприятные бескавитационные условия работы основных насосов и регулирующих задвижек.

При испытаниях турбинных режимов вода подается центробежными насосами через ресорбер, напорный трубопровод и расходомер к модели. После модели вода поступает в бак нижнего бьефа и по отводящему трубопроводу возвращается к всасывающим патрубкам насосов.

На стенде обеспечивается равномерность поля скоростей перед расходомерным устройством и на входе в спиральную камеру благодаря наличию протяженных стабилизирующих участков напорного трубопровода, выравнивающих сеток и решеток, а также плавным формам участков расширения и сужения потока. Перед модельной турбиной расположен расширенный напорный бак, что позволяет устанавливать турбины с широким подводом, а также правого или левого вращения без существенного изгиба подвода.

Бак нижнего бьефа имеет диаметр $3,5 \text{ м}$ и длину 10 м , что исключает влияние стенок на выходящий из модели поток. В верхней части бака установлен уравнивательный бачок для увеличения подтопления рабочего колеса при необходимости. Плавно сужающимся коленом-переходником бак соединен с трубопроводом, отводящим воду к всасывающим патрубкам насосов.

Условия испытаний, соответствующие заданному значению коэффициента кавитации σ , создаются изменением давления над поверхностью воды в баке нижнего бьефа.

На отметке -5 м , за напорными патрубками насосов, установлен ресорбер. Его емкость (объем 100 м^3) выполнена трехсекционной, с последовательным расположением секций, что способствует уменьшению скорости потока и полному растворению воздуха, выделившегося из воды в зонах пониженного давления.

Для измерения расхода стенд укомплектован двухсторонними трубами Вентури различных калибров, которые устанавливаются в зависимости от типа и размера модели. В центральную часть трубы Вентури вмонтирован электромагнитный расходомер. В процессе испытаний их показания периодически сверяются для исключения грубой ошибки. Градуирование расходомеров производится на месте их установки в стенде посредством подключения вспомогательного трубопровода, соединяющего стенд с лабораторной системой калибровки расходомерных устройств.

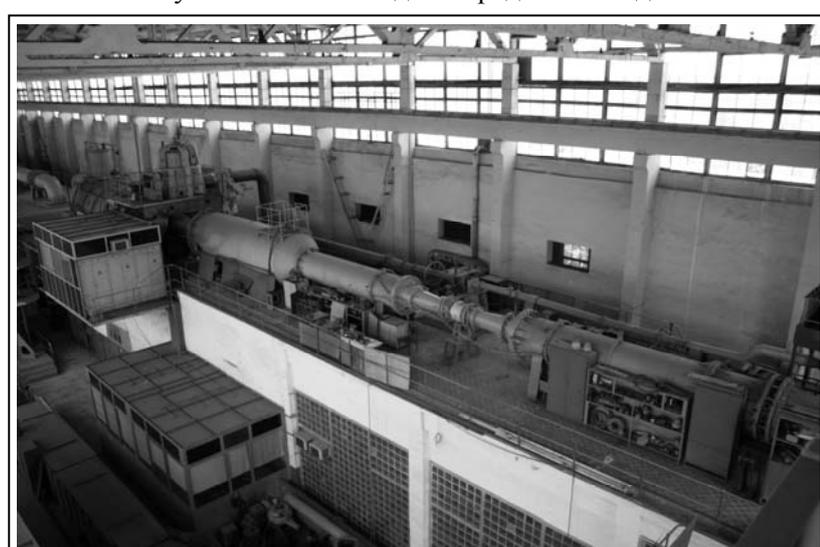
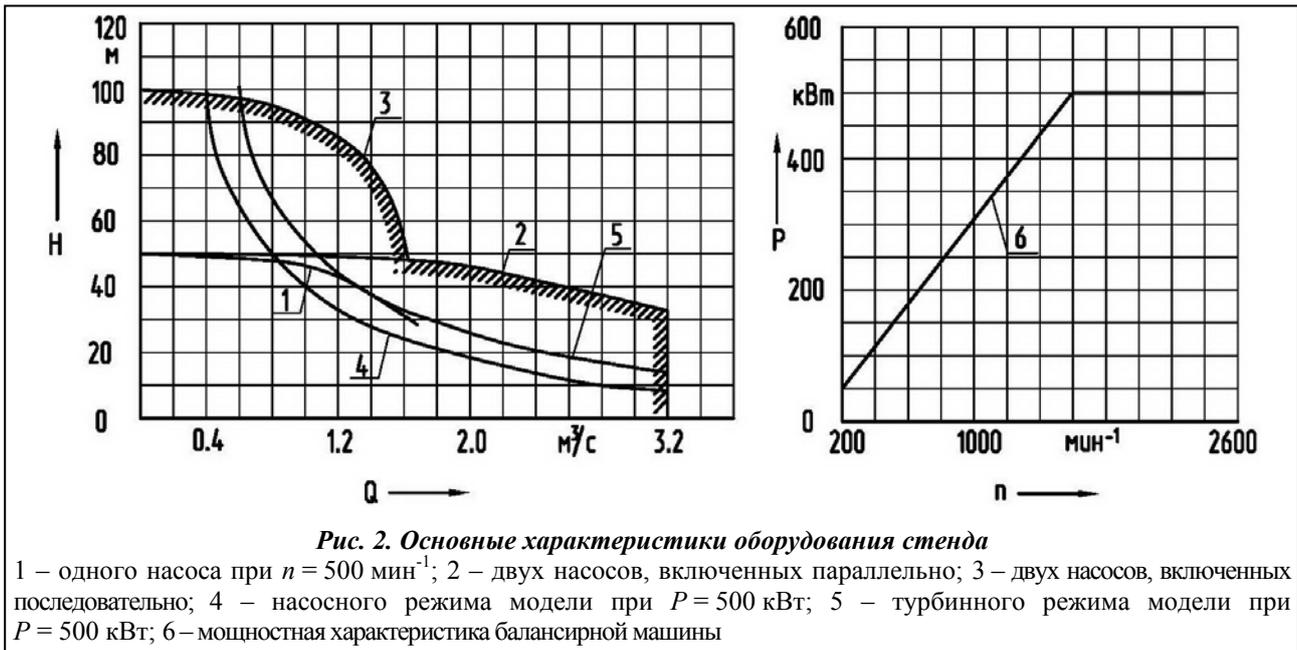


Рис. 1. Внешний вид энергокавитационного стенда

Путем переключения трубопроводов обеспечивается возможность градуирования расходомеров как при турбинном, так и при насосном направлениях потока. В процессе градуирования стенд работает по открытому контуру с забором воды из сборного резервуара.

Силовое оборудование стенда ЭКС-100 включает два центробежных насоса с приводными двигателями постоянного тока мощностью 700 кВт каждый и балансирную машину (мотор-генератор) постоянного тока мощностью 500 кВт , работающую при испыта-



ниях моделей гидротурбин как генератор, а насосов – как двигатель. Съем мощности с балансирной машины осуществляется через нагрузочный агрегат с рекуперацией в общую электросеть или набором сопротивлений. Работа мотор-генератора и приводных двигателей насосов на постоянном токе позволяет в широком диапазоне плавно изменять режимы испытаний моделей гидромашин. Система задвижек и трубопроводов обеспечивает включение насосов раздельно, последовательно и параллельно, направляет воду по замкнутому или открытому контурам циркуляции. На рис. 2 приведена гидравлическая характеристика стенда в координатах $Q-H$ и мощностная характеристика балансирной машины.

Управление стендом осуществляется с пульта (рис. 3), расположенного рядом с моделью гидромашин. На пульте установлены пускорегулирующая и контрольно-измерительная аппаратура, а также измерительно-вычислительный комплекс на базе персонального компьютера (ПК), обеспечивающие выход на заданный режим испытаний и поддержание его стабильности, автоматизацию измерений, математической обработки и регистрации параметров исследуемых режимов.

Модель турбины с вертикальной линией валов размещается на специальной площадке между баками верхнего и нижнего бьефов. Модель турбины подвешивается к нижней плоскости массивной рамы, лежащей на двух монолитных железобетонных арочных колоннах, а балансирная машина устанавливается сверху. Рама перемещается в продольном направлении, а установленная на ней балансирная машина – в поперечном. Таким образом, испытываемая модель может располагаться в любом положении в пределах перемещения рамы и балансирной машины.

Валы модельной гидротурбины и мотор-генератора центруются с точностью $0,05 \text{ мм}$ и соединяются упругой втулочно-пальцевой муфтой. Установка тормозного генератора и модели турбины на одной опоре, эластичные компенса-

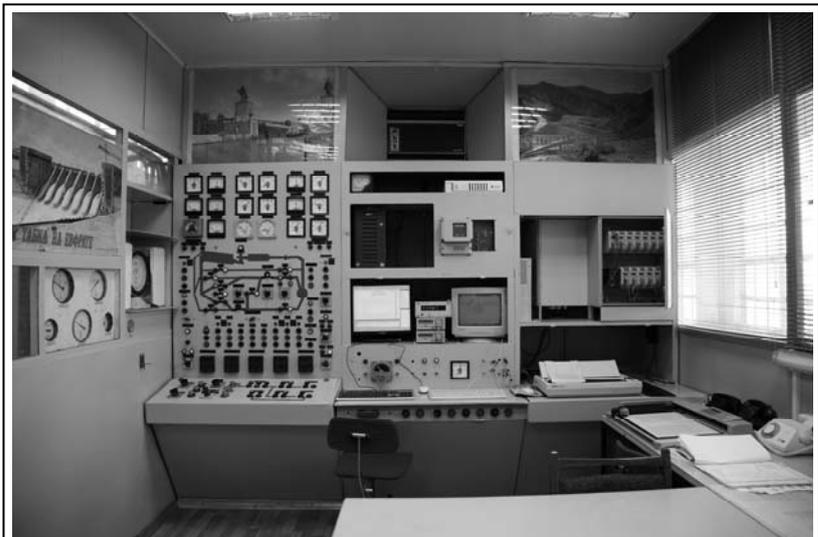
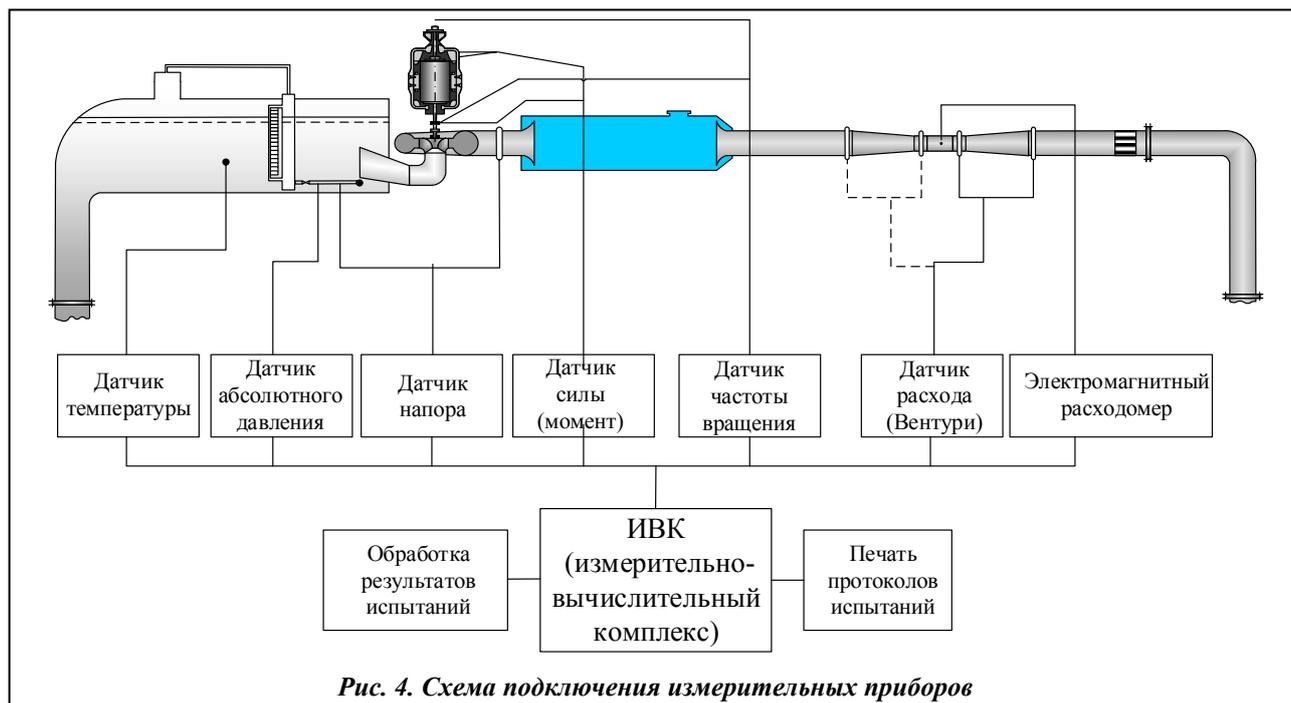


Рис. 3. Пульт управления стендом



торы на подводе и отводе позволяют исключить существенную расцентровку валов в широком диапазоне давлений и вакуума и обеспечивают постоянство механических потерь в роторе и зазорах в уплотнениях. Модели гидромашин, устанавливаемые на стенде, изготавливаются повышенной прочностью и жесткости, обеспечивая возможность проведения различных видов испытаний.

2. Измерение основных параметров

При проведении энергетических, кавитационных и разгонных испытаний моделей гидромашин на стенде измеряются следующие параметры:

расход воды через модель	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$
располагаемый напор	$H, \text{ м}$
крутящий момент на валу модели	$T_m, \text{ кгс}\cdot\text{м}$
частота вращения	$n, \text{ мин}^{-1}$
абсолютное давление в баке нижнего бьефа	$p_{abs_2}, \text{ м.вод.ст.}$
температура воды	$\theta, \text{ }^\circ\text{C}$
общее содержание воздуха в воде	%

Измерения, за исключением воздухоподдержания, производятся с помощью комплекта вибро-частотных датчиков-преобразователей и вторичной аппаратуры. Сигналы от датчиков поступают на пульт управления в ПК измерительно-вычислительного комплекса и после «мгновенной» обработки служат ориентиром для настройки режима, а в процессе замера ПК производит их счет и осреднение за 10 секунд. Параллельно сигналы от датчиков поступают и на электронные частотомеры, обеспечивая возможность визуального контроля их частоты. Все измерительные устройства стенда снабжены средствами градуировки, позволяющими оперативно, без демонтажа, производить их поверку. Схема подключения измерительных приборов к стенду приведена на рис. 4.

Располагаемый напор определяется как разность полной удельной энергии потока на входе и выходе модельной турбины

$$H = \left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} + z_1 - z_2 \right) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g},$$

где p_1 – давление на входе модельной турбины, кгс/м²; p_2 – давление на выходе модельной турбины, кгс/м²; v_1 – средняя скорость на входе модельной турбины, м/с; v_2 – средняя скорость на выходе мо-

дельной турбины, м/с; z_1, z_2 – возвышение точки замера над отметкой сравнения, м; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Перепад давлений ($\Delta p = p_1 - p_2$) определяется с помощью дифференциального датчика-преобразователя перепада давления.

Двухкамерный диафрагмовый датчик через разделительные сосуды, заполненные водой и маслом, соединяется со стендом. Одна из камер соединяется с коллектором, установленным на подводящем трубопроводе модельной турбины, другая – с коллектором на диффузоре отсасывающей трубы вблизи его выходного сечения. Точки замера давлений p_1 и p_2 при измерении дифференциальным датчиком приводятся к одной плоскости и, соответственно, разница отметок z_1 и z_2 равна нулю. Разность давлений в камерах датчика вызывает упругую деформацию двух виброструн, изменяя частоту их собственных колебаний. Приращение частоты выходного сигнала при номинальной нагрузке составляет 600...700 Гц. Параллельно с этим датчиком установлен дублирующий датчик фирмы Rosemount 3051С, класса 0.075.

Градуировка датчика осуществляется с помощью образцового грузопоршневого манометра МП-2.5 класса 0.05, поверяемого Государственной метрологической службой. Градуирование производится путем 2-3-х-разового нагружения-разгружения и осреднения показаний. Получаемая в результате рабочая характеристика датчика-преобразователя напора вводится в память ПК и используется при испытаниях.

Скоростной напор вычисляется по соответствующим данному режиму средним скоростям потока в сечениях на входе и выходе модели по формуле

$$\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g} \cdot \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) = K_v \cdot Q^2,$$

где Q – объемный расход модели, м³/с; A_1, A_2 – площади входного и выходного сечений модели, м².

Погрешность определения располагаемого напора складывается из неточностей измерения перепада давления и скоростей потока. Погрешность Δp зависит в основном от класса датчика и определяется статистическим путем по результатам его градуировки. Обработка результатов градуирований показала, что погрешность измерения Δp в диапазоне изменения располагаемого напора $H = 10...50$ м не превышает $\pm 0,075$ % от измеряемой величины.

Погрешность определения скоростей зависит от неточности определения расхода и измерения площадей A_1 и A_2 . Согласно расчету, ее величина на порядок меньше погрешности измерения Δp . Таким образом, погрешность определения располагаемого напора принимается $f_n = \pm 0,075$ %.

Расход воды через модель измеряется двухсторонней симметричной трубой Вентури и электромагнитным расходомером. Используется расходомер с внутренним диаметром 0,38 м, обеспечивающий измерение расхода до 1,100 м³/с.

Перепад давления на водомере Вентури измеряется дифференциальным двухкамерным датчиком, аналогичным применяемому для измерения напора, но с пределом 0,5 кгс/см². Градуируется датчик расхода также аналогично напорному – образцовым грузопоршневым манометром класса 0.05.

Расходомеры градуируются в рабочем положении (рис. 5). Для этого подсоединяется специальный трубопровод, направляющий воду, прошедшую через расходомеры, в мерную емкость и включающий протечки или приток воды на всей трассе градуирования.

Мерная емкость представляет собой железобетонный облицованный стальным листом резервуар, сечением 4x5 и высотой 3,8 м. Герметичность резервуара проверяется при полном заполнении по изменению уровня за 24 часа. Калибруется мерная емкость путем заполнения порциями воды по 1 т, отмеряемыми на рычажных весах, поверенных образцовыми гирями. Соответствующий уровень измеряется по шкале водомерного стекла с ценой деления 1 мм, а на нижнем и верхнем рабочих участках шкалы – также и датчиками уровня. В результате определяется зависимость приведенной к постоянной температуре (15 °С) массы воды в резервуаре от ее уровня, используемая в дальнейшем при градуировании расходомеров.

Сущность градуирования расходомера заключается в том, что в определенный момент проходящая через него вода посредством отсекающего устройства направляется в мерную емкость. При

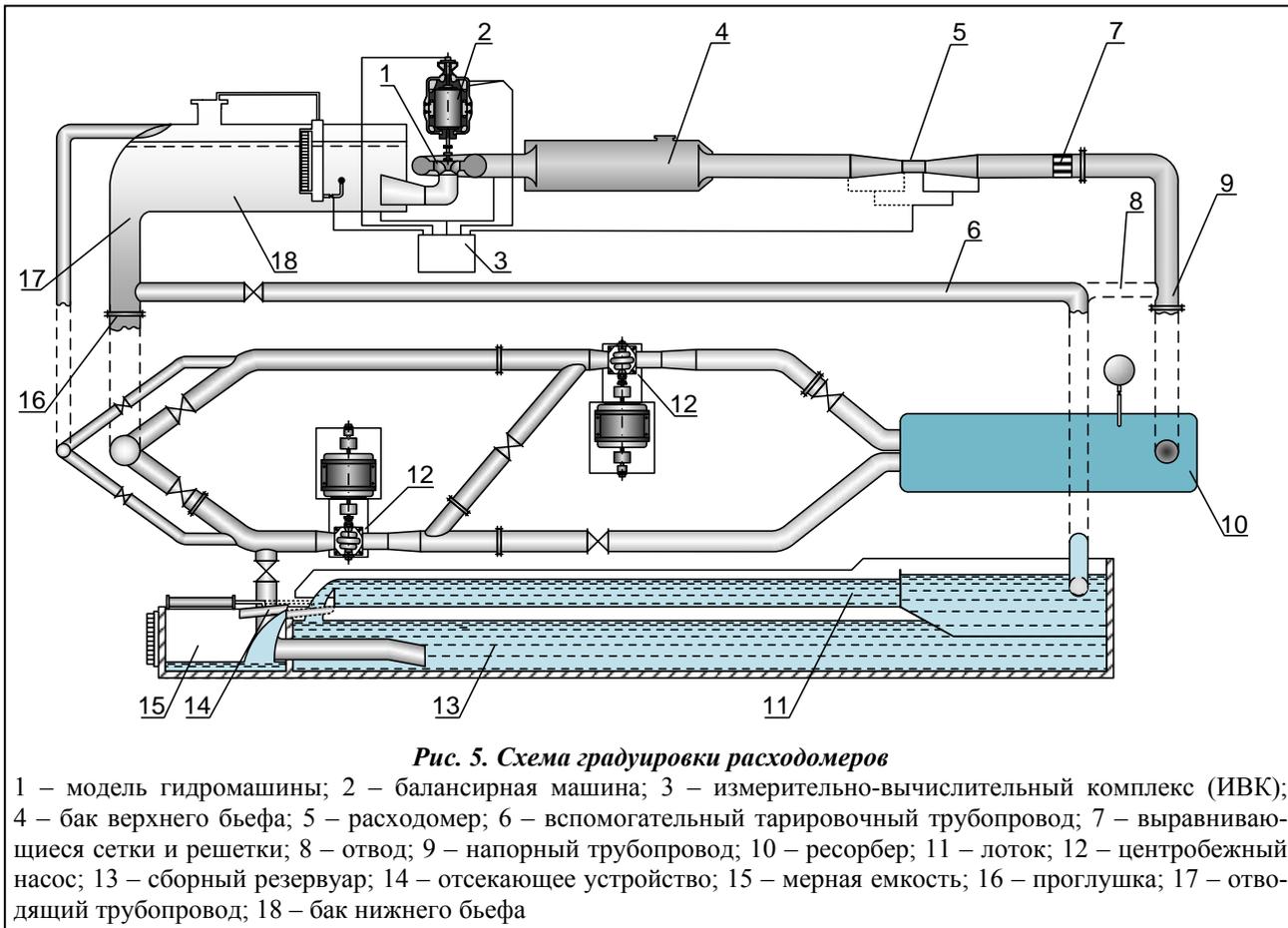


Рис. 5. Схема градуировки расходомеров

1 – модель гидромашин; 2 – балансирующая машина; 3 – измерительно-вычислительный комплекс (ИВК); 4 – бак верхнего бьефа; 5 – расходомер; 6 – вспомогательный тарировочный трубопровод; 7 – выравнивающие сетки и решетки; 8 – отвод; 9 – напорный трубопровод; 10 – ресорбер; 11 – лоток; 12 – центробежный насос; 13 – сборный резервуар; 14 – отсекающее устройство; 15 – мерная емкость; 16 – проглушка; 17 – отводящий трубопровод; 18 – бак нижнего бьефа

этом в течение всего времени ее заполнения непрерывно ведется счет импульсов датчика водомера Вентури и электромагнитного расходомера. Отсчет времени заполнения мерной емкости производится электронным частотомером, включаемым и выключаемым автоматически при пересечении отсекающим устройством середины струи водослива. Структурная схема измерения времени заполнения представлена на рис. 6.

Датчиками (или по водомерному стеклу) мерной емкости измеряются начальный и конечный уровни залитой воды, по тарировочной зависимости определяется соответствующая масса воды при

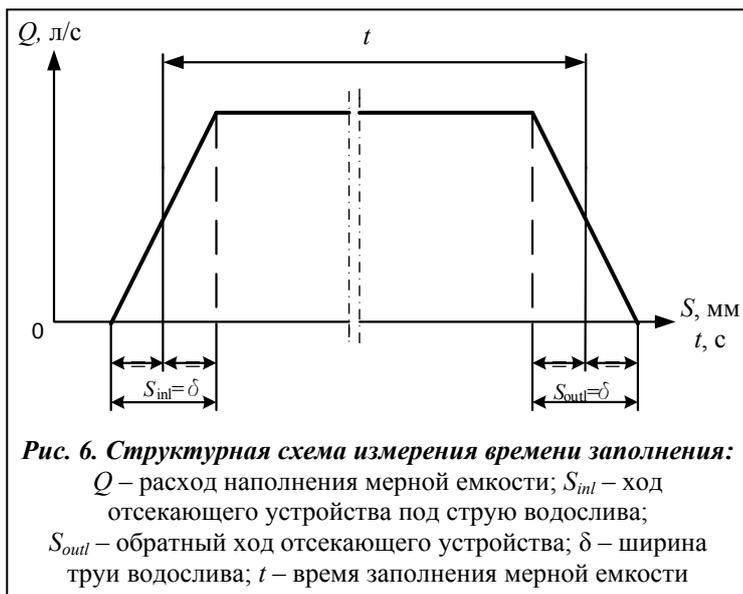


Рис. 6. Структурная схема измерения времени заполнения:

Q – расход наполнения мерной емкости; S_{in} – ход отсекающего устройства под струю водослива; S_{out} – обратный ход отсекающего устройства; δ – ширина струи водослива; t – время заполнения мерной емкости

температуре 15 °С, и с учетом плотности воды при текущей температуре рассчитывается фактическая масса залитой воды G .

Тогда массовый и объемный расходы определяются соответственно как $\rho \cdot Q = \frac{G}{t}$ и $Q = \frac{G}{\rho \cdot t}$.

По результатам градуировки для водомера Вентури рассчитывается коэффициент расхода (C_1), исходя из зависимости $C_1 = \frac{\rho \cdot Q}{\sqrt{\Delta p}}$, где Δp – измеренный датчиком перепад давления в водомере Вентури.

Для электромагнитного расходо-

мера рассчитывается коэффициент пропорциональности (C_2) по соотношению $C_2 = \frac{Q}{R}$, где R – показания электромагнитного расходомера, Гц.

Погрешность градуирования водомера Вентури зависит от погрешностей составляющих компонентов: градуировочной зависимости мерной емкости ($\pm 0,1\%$) и погрешности определения функциональной зависимости.

Расчет относительной погрешности функции $\rho \cdot Q = C_1 \cdot \sqrt{\Delta p}$, выполненный способом наименьших квадратов по отклонениям значений C_1 отдельных опытов, показал, что она составляет $f_c = \pm 0,17\%$, с вероятностью 0,95. Тогда среднеквадратичная погрешность определения расхода будет

$$f_Q = \pm \sqrt{f^2 + f_c^2} = \pm \sqrt{0,1^2 + 0,17^2} = \pm 0,197\% \approx \pm 0,2\%.$$

Аналогичный результат получен и для линейной зависимости $Q = C_2 \cdot R$ электромагнитного расходомера.

Величина крутящего момента измеряется с помощью мотор-генератора, выполненного по схеме балансирной установки. На балансирный статор генератора, имеющий рычаг длиной 1,5 м, передается развиваемый моделью движущий момент (за исключением потерь на трение), который определяется как произведение силы на радиус ее приложения

$$T = F \cdot r, \text{ кгс}\cdot\text{м},$$

где F – усилие на рычаге, кгс; r – длина рычага, м.

Статорный рычаг имеет секторное окончание с радиусом 1,5 м, что обеспечивает постоянство длины рычага при провороте статора под нагрузкой. Через гибкую ленту рычаг соединен с датчиком силы. Изменение усилия на рычаге, воздействуя на датчик, вызывает пропорциональное изменение колебаний его чувствительного элемента. Приращение частоты колебаний при номинальной нагрузке датчика 100 кгс составляет 1500 Гц. Градуируется датчик силы поверенными спецгрузами.

Кроме этого, на валу ротора модели в месте фланцевого соединения установлен датчик момента Т10F фирмы «НВМ», дублирующий измерение развиваемого моделью момента крутящего. Это позволяет контролировать стабильность измерений, а также регистрировать динамику процесса и пульсации момента.

Погрешность определения крутящего момента составляет $f_T = \pm 0,11\%$.

Частота вращения модели измеряется тахогенератором и преобразующим устройством измерительно-вычислительного комплекса. Используемый тахогенератор выдает 120 импульсов за оборот, а частота вырабатываемых им импульсов связана со скоростью вращения вала турбины соотношением

$$\omega = \frac{n \cdot z}{60} = \frac{n \cdot 120}{60} = 2n, \text{ Гц},$$

где n – число оборотов вала в минуту; z – число импульсов тахогенератора за один оборот вала.

Число импульсов N , вырабатываемых тахогенератором за время отсчета ($t=10$ с), равно $t \cdot \omega$. Тогда $n = \frac{N}{t \cdot 2} = \frac{N}{20}$, мин⁻¹. Погрешность измерения частоты вращения определяется как

$f_n = \pm (\Delta t + \frac{1}{N}) \cdot 100\%$, где Δt – предельная погрешность задания времени измерения, равная $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ с; $\frac{1}{N}$ – возможная ошибка в определении числа импульсов из-за рассогласования начала импульса и времени отсчета.

Максимальная погрешность будет иметь место при минимальной частоте вращения, которая при типовых испытаниях равна примерно 500 мин⁻¹, то есть

$$f_n = \pm (1 \cdot 10^{-6} + \frac{1}{10 \cdot 2 \cdot 500}) \cdot 100\% = \pm 0,01\%.$$

Достоверность измерения проверяется сличением с дублирующей системой тахометр – электронный частотомер.

Абсолютное давление (p_{abs_2}) измеряется вибросредототным датчиком. Чувствительной частью датчика являются два сильфона, связанные с виброструной. Один из сильфонов глубоко завакуумирован, второй – соединяется через разделительный сосуд с баком нижнего бьефа. Разностью давлений в сильфонах определяется их взаимное перемещение и соответствующее ему изменение частоты колебаний виброструны. Приращение частоты выходного сигнала датчика при кавитационных испытаниях – до 1000 Гц. Градуируется датчик по образцовому манометру абсолютного давления класса 0.07 фирмы «Wallace Tiernan Pennwalt». Согласно выполненным градуировкам, погрешность датчика в рабочем диапазоне нагрузки не превышает $\pm 0,0025 \text{ кгс/см}^2$. Коррекция шкалы (дрейфа нуля) манометра и датчика проводится путем измерения атмосферного давления и сличения показаний с высокоточным образцовым ртутным барометром. Разность отметок базового уровня модели и датчика абсолютного давления измеряется при помощи сообщающихся сосудов с точностью $\pm 0,001 \text{ м}$.

Напор h_{va} , эквивалентный давлению парообразования при фактической температуре, определяется по таблице В.4 ИЕС60193 [2].

Температура воды в стенде измеряется датчиком температуры, введенным в поток через стенку бака нижнего бьефа. Соответствующие текущей температуре значения плотности воды и давления парообразования рассчитываются измерительно-вычислительным комплексом (ИВК) по справочным данным. Характеристика датчика контролируется по образцовому ртутному термометру с ценой деления $0,1^\circ\text{C}$.

3. Автоматизированная система измерений

В процессе испытаний моделей гидромашин измерения и обработка их результатов производятся ИВК, состоящим из персонального компьютера, комплекта счетчиков импульсных сигналов, вибросредототных датчиков-преобразователей, согласующих элементов и линий связи. ИВК имеет 12 частотных входных каналов для измерения параметров энергокавитационных и других видов испытаний.

Управление работой ИВК осуществляется по специальному программному пакету, обеспечивающему выполнение всех технологических операций: градуировка датчиков, коррекция начальных показаний датчиков, непосредственно испытания и построение характеристик.

С использованием программы «Градуировка» производится градуирование датчиков дискретными статическими нагрузками с созданием файла градуировочных таблиц зависимости частоты сигнала от нагрузки $R = f(F)$.

По программе «Коррекция» создается файл отклонений начальных значений выходных сигналов датчиков (дрейфа «нуля»), вызванных изменениями температуры, атмосферного давления, других факторов.

Для измерений энергокавитационных параметров используется программа «Испытание». По ее команде на заданный промежуток времени (1, 10 или 30 секунд) открываются счетчики ИВК, в которые поступают сигналы от датчиков. По окончании цикла измерений по градуировочным таблицам методом линейной интерполяции и с учетом данных «Коррекции» определяются первичные значения режимных параметров в физических единицах. Они пересчитываются в величины, характеризующие испытуемый режим гидромашин (напор, расход, крутящий момент на валу и т.д.). Измеренные и вычисленные величины в виде графика и таблицы выводятся на экран монитора. Протокол испытаний регистрируется в памяти ПК и на принтере.

По программе «Граф» рабочие характеристики выводятся на печать, а по отдельной специальной программе рассчитываются и строятся пропеллерные характеристики поворотнo-лопастных гидротурбин и универсальная – радиально-осевых.

Проверка работоспособности ИВК выполняется программой контроля «Тест». В этом режиме производится опрос датчиков и осреднение измеренных за мерный интервал значений частот. Зафиксированные ИВК показания датчиков сравниваются с дублирующими измерениями электронными частотомерами, аттестованными метрологической службой. Максимальное отклонение между показаниями частотомера и ИВК не должно превышать 1Гц, что составляет $\approx 0,01 \%$.

4. Оценка погрешностей определения КПД и коэффициента кавитации σ

Погрешность характеристик складывается из частных ошибок измерения отдельных параметров, оцениваемых на основании контрольных поверок приборов и статистической обработки их результатов. Согласно оценке, данной в предыдущих подразделах, возможная погрешность измерения отдельных параметров во время испытаний составляет

частоты вращения	$f_n = \pm 0,01\%$;
крутящего момента	$f_T = \pm 0,11\%$;
напора	$f_H = \pm 0,075\%$;
расхода	$f_Q = \pm 0,2\%$;
абсолютного давления	$\Delta p_{abs_2} = \pm 0,0025 \text{ кгс/см}^2$.

Предельная погрешность определения КПД рассчитывается через частные погрешности составляющих параметров по уравнению, рекомендованному МЭК [2]

$$f_\eta = \pm \sqrt{f_n^2 + f_T^2 + f_H^2 + f_Q^2} = \pm \sqrt{0,01^2 + 0,11^2 + 0,075^2 + 0,2^2} = \pm 0,24\% .$$

Погрешность определения коэффициента полезного действия принимается равной $\pm 0,24\%$.

Погрешность определения коэффициента кавитации σ складывается из неточностей измерения отдельных параметров, необходимых для его расчета. Поскольку погрешности измерения высоты установки датчика абсолютного давления относительно базового уровня модели и определения давления парообразования и плотности воды – величины малого порядка, то ими можно пренебречь. Тогда погрешность определения σ можно рассчитать по формуле

$$f_\sigma = \pm \sqrt{f_{p_{abs_2}}^2 + f_H^2} = \pm \sqrt{(1,25 \dots 0,25)^2 + 0,1^2} = \pm 1,25 \dots \pm 0,3\% .$$

Для достижения более высокой точности измерений на стенде устанавливаются датчики с пределами измерений в соответствии с характеристиками испытываемой модели гидромашины.

Выводы

Гидравлические стенды экспериментального комплекса специального конструкторского бюро «Турбогидромаш» (гидротурбинная лаборатория) ОАО «Турбоатом» отвечают всем международным требованиям в области проведения исследований реактивных гидромашин всех типов и быстроходности. Стенды позволяют выполнять любые испытания, которые предусмотрены международным стандартом IEC 60193, а также и другие исследования, включая прямо-сдаточные испытания в присутствии представителей Заказчика.

Литература

1. Линник, А. В. Современный уровень и основные направления развития гидротурбостроения в Украине / А. В. Линник, В. Д. Хайтов // Пробл. машиностроения. – 2010. – Т. 13, № 1. – С. 11-18.
2. МЭК 60193. Модельные приёмо-сдаточные испытания гидравлических турбин, насосов, гидроаккумулирующих станций и насос-турбин. – 1999. – 569 с.
3. Lynnyk, O.V. Up-to-date level and main trends in development of hydraulic turbine construction in Ukraine / O. V. Lynnyk, V. D. Khaitov // J. Mech. Eng. – 2010. – V. 13, № 3. – P. 11–18.
4. IEC 60193: Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests. – 1999. – 569 p.

Поступила в редакцию 28.08.14