

УДК 621.224

**И.С. ВЕРЕМЕЕНКО**, д-р техн. наук; главный конструктор ООО «Харьковтурбоинжиниринг»;  
**А.В. РУСАНОВ**, д-р техн. наук; зам. директора ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
**В.Н. ДЕДКОВ**, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
**Е.С. АГИБАЛОВ**, гл. инженер ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
**С.В. ГЛАДЫШЕВ**, нач. отдела ООО «Харьковтурбоинжиниринг»

## РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ГИДРОТУРБОСТРОЕНИЯ В ИПМАШ НАН УКРАИНЫ

Приведено описание основного и вспомогательного оборудования энергокавитационных стендов ЭКС-15 и ЭКС-30 лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины. Показано, что гидравлические характеристики стендов и применяемых средств измерения, а также используемые процедуры градуировок первичных датчиков обеспечивают точность измерений, отвечающих требованиям кода модельных приемо-сдаточных испытаний гидротурбин и обратимых гидромашин МЭК 60193.

**Ключевые слова:** энергокавитационный стенд, методы измерения, погрешности измерения, процедуры градуировки.

### Введение

История создания отрасли гидромашиностроения в Украине неразрывно связана с именем выдающегося ученого, основателя научной школы гидромеханики и авиации в Украине академика АН УССР Георгия Федоровича Проскуры. В 1914 г. Г.Ф. Проскура возглавил гидравлическую лабораторию в Харьковском практическом технологическом институте (ныне НТУ «ХПИ») и на ее основе создал кафедру гидромеханики и авиации. В 1908–1914 гг. вышли из печати научные работы Г.Ф. Проскуры, которые стали первыми в Украине учебниками гидромеханического профиля и именно с этого момента начата подготовка инженеров-гидромашиностроителей. Под руководством Г.Ф. Проскуры впервые в Украине стали проводится расчетные и экспериментальные исследования ветродвигателей, гидротурбин, насосов, гидродинамических передач, систем гидропневмоавтоматики и регулирования, процессов кавитации в гидромашинах и др., были разработаны насосы и гидротурбины разных типов. Эти работы послужили основой для практического обеспечения производства насосов в городах Сумы, Кишинев, Бердянск и др. Г.Ф. Проскура всегда придавал большое значение экспериментальной проверке разработанных теоретических положений и сопоставлению результатов теоретических и экспериментальных исследований, полученных на гидроаэродинамических стендах.

В 1944 г. академиком Г.Ф. Проскурой была организована Лаборатория проблем быстроходных машин и механизмов, на базе которой после ряда реорганизаций в 1972 г. был создан Институт проблем машиностроения НАН Украины. В связи с запуском в 1953 г. в Украине на Харьковском турбинном заводе производства гидротурбин в институте были начаты исследования по расчетному и экспериментальному изучению рабочего процесса и разработке проточных частей гидротурбин различных типов. Результаты исследований были использованы ОАО «Турбоатом» при создании гидротурбинного оборудования ряда отечественных и зарубежных ГЭС.

---

© И.С. Веремеенко, А.В. Русанов, В.Н. Дедков, Е.С. Агибалов, С.В. Гладышев, 2014

С 1972 г. наряду с традиционной тематикой в ИПМаш НАН Украины начаты научно-исследовательские работы по изучению рабочего процесса и созданию проточных частей обратимых гидромашин (насос-турбин). Для проведения экспериментальных исследований разработанных проточных частей обратимых гидромашин в 1974 г. был создан экспериментальный стенд, позволивший провести первые испытания моделей обратимых гидромашин средней быстроходности.

В период с 1984 по 1989 гг. были созданы два новых универсальных гидродинамических стенда для модельных исследований обратимых гидромашин, гидротурбин, насосов и агрегатов микрогэс, оснащенных датчиками с частотным выходом и ПЭВМ «Нейрон», что позволило автоматизировать обработку экспериментальных данных.

На стендах лаборатории гидромашин проведены экспериментальные исследования разработанных в ИПМаш НАН Украины проточных частей обратимых гидромашин, предназначенных для ГАЭС Украины (Киевской, Днестровской, Константиновской, Каневской) и целого ряда ГАЭС стран СНГ и дальнего зарубежья (Кубанской, Пана-Ярвинской, Ингурской, Краснодарской – все СНГ, Тэри ГАЭС – Индия), оборудование для которых разрабатывало на той или иной стадии ОАО «Турбоатом». На базе разработанных модельных проточных частей с рабочими колёсами ОРО75/5219 и ОРО/5217 ОАО «Турбоатом» были спроектированы и изготовлены натурные обратимые гидромашин для Киевской и Днестровской ГАЭС.

После модернизации Киевской ГАЭС мощность каждого натурального агрегата увеличилась примерно на 10 % при повышении КПД на 3 % в турбинном и на 3,2 % в насосном режимах, в 1,4–2 раза снизился уровень пульсаций давления в проточной части, в 2,5–3 раза уменьшилась динамическая составляющая момента на лопатках направляющего аппарата в обоих режимах работы.

Обратимые гидромашин Днестровской ГАЭС являются уникальными по мощности и напору, поскольку при их создании использовались принципиально новые решения по рабочему колесу, узлу статора, применению встроенного кольцевого затвора между статором и направляющим аппаратом. Диаметр рабочего колеса гидроагрегата равен  $D_1 = 7,3$  м, мощность в турбинном режиме 330 МВт, максимальный напор в насосном режиме  $H_{\max} = 165,6$  м, максимальный КПД в турбинном и насосном режимах равен 93,7 % и 92,8 % соответственно. Первая очередь Днестровской ГАЭС имеет в своём составе 3 обратимых гидроагрегата, первый из которых эксплуатируется с 2009 г., в 2013 г. заканчивается монтаж второго, а в 2014 г. планируется завершение монтажа третьего агрегата ГАЭС.

Гидродинамические стенды лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины по своим параметрам и оснащению являются уникальными сооружениями, не имеющими аналогов в Национальной академии наук Украины, имеют статус «национального достояния» и предназначены для выполнения научно-исследовательских работ по изучению рабочего процесса в гидромашин (гидротурбины, насосы, обратимые гидромашин), проведения исследований и получения экспериментальных характеристик моделей гидромашин.

Всего с 1975 года в лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины были разработаны и исследованы свыше 50 вариантов моделей проточных частей насос-турбин, а также гидромашин радиально-осевого, поворотно-лопастного и диагонального типов.

### **Гидродинамические стенды лаборатории**

В состав лаборатории гидромашин [1] входят два замкнутых гидродинамических стенда ЭКС-15 и ЭКС-30, которые являются универсальными установками, обеспечивающими проведение комплексных экспериментальных исследований при создании высокоэффективных проточных частей гидромашин. Гидросистема двух стендов выполнена общей и располагается на трёх этажах стендового корпуса ИПМаш НАН Украины. Это позволяет на каждом из стендов использовать оба циркуляционных насоса, которые могут быть включены как последовательно, так и параллельно в каждый из стендов для обеспечения требуемых параметров испытаний. В подвальном помещении расположено все силовое гидромеханическое и электротехническое оборудование.

В связи с возросшими требованиями к проведению модельных испытаний гидромашин, которые регламентируются международным стандартом МЭК 60193 [2] ООО «Харьковтурбоинжиниринг», при участии ИПМаш НАН Украины в 2006–2009 гг., провело реконструкцию и модернизацию основного и вспомогательного оборудования стендов, в том числе гидросистемы стенда ЭКС-15, энергосилового оборудования, системы управления и поддержания стабильности режима испытаний, первичных датчиков, преобразующих физические величины (напор, расход, момент на валу гидромашин, частоту вращения и т.п.) в электрические сигналы и измерительно-вычислительного комплекса [3].

В 2008–2013 гг. ИПМаш НАН Украины выполнил подобную реконструкцию и модернизацию гидросистемы, основного и вспомогательного оборудования стенда ЭКС-30, в том числе произвел замену первичных датчиков и измерительно-вычислительного комплекса. В настоящее время гидродинамические стенды лаборатории ИПМаш НАН Украины соответствуют всем рекомендациям международного стандарта МЭК 60193, что позволяет с учетом высокой квалификации сотрудников проводить исследовательские и приемо-сдаточные испытания моделей вертикальных реактивных гидромашин всех типов. Так, в 2008 г. на стенде поворотнлопастных гидротурбин ЭКС-15 проведены приемо-сдаточные модельные испытания по одному из зарубежных заказов, обеспечив все требования контракта и условий, предусмотренные стандартом МЭК 60193.

В подвальном помещении размещена уникальная градуировочная установка УГ-1 [4] для калибровки расходомерных устройств, установленных на вертикальных участках трубопроводов на уровне первого этажа. На втором этаже располагаются модельные блоки с балансирными динамометрами постоянного тока, напорные баки, баки нижнего бьефа, пульта управления и измерительно-вычислительный комплекс. Общий вид гидродинамических стендов лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины ЭКС-15 и ЭКС-30 приведен на рис. 1 и рис. 2.

### **Модели**

Модели гидротурбин с вертикальным расположением вала состоят из подводящего водовода, спиральной камеры со статором, направляющего аппарата, ротора с рабочим колесом и отсасывающей трубы. Спиральная камера с тавровыми или круглыми сечениями представляет собой сварную металлическую конструкцию, являющуюся несущим элементом для других узлов модели и покрытую изнутри антикоррозионной краской. Лопатки статора и направляющего аппарата выполняются на станке с ЧПУ из бронзы. Лопастид радиально-осевых и поворотнлопастных рабочих колес выполняются, как правило, из бронзовых отливок с последующей обработкой на станке с ЧПУ, а верхний и нижний ободы – из нержавеющей стали.

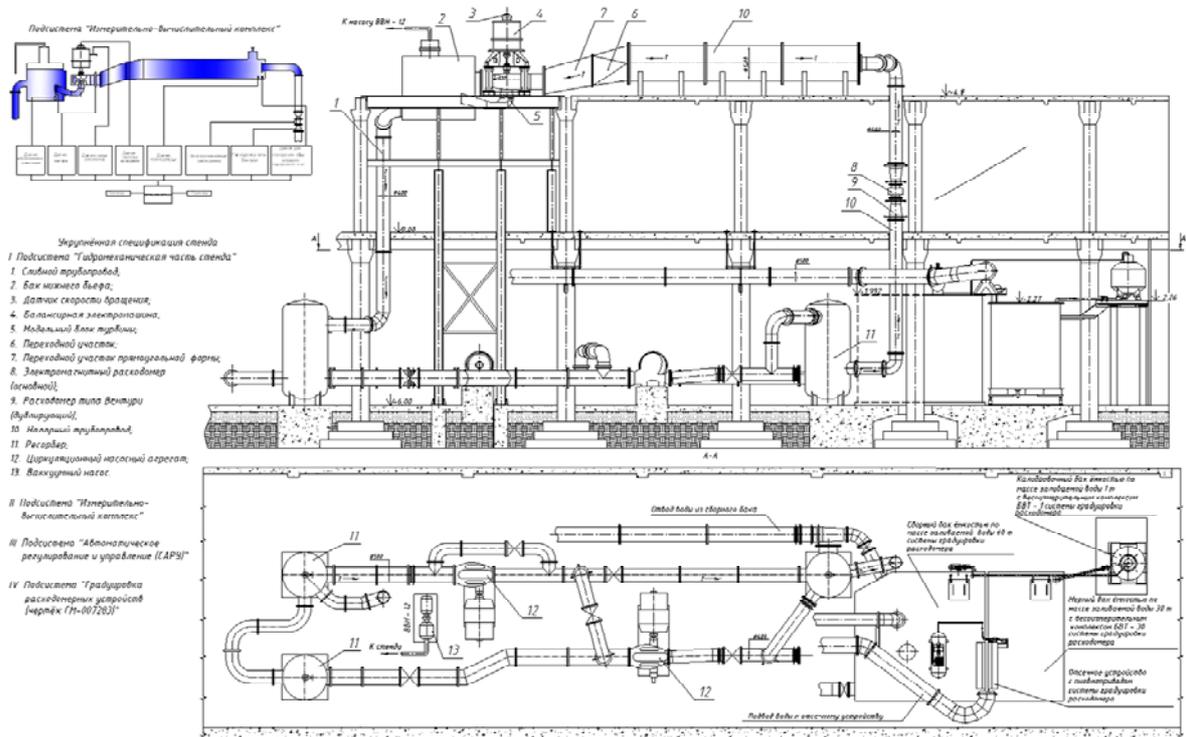


Рис. 1 – Схема энергокавитационного стенда ЭКС-15

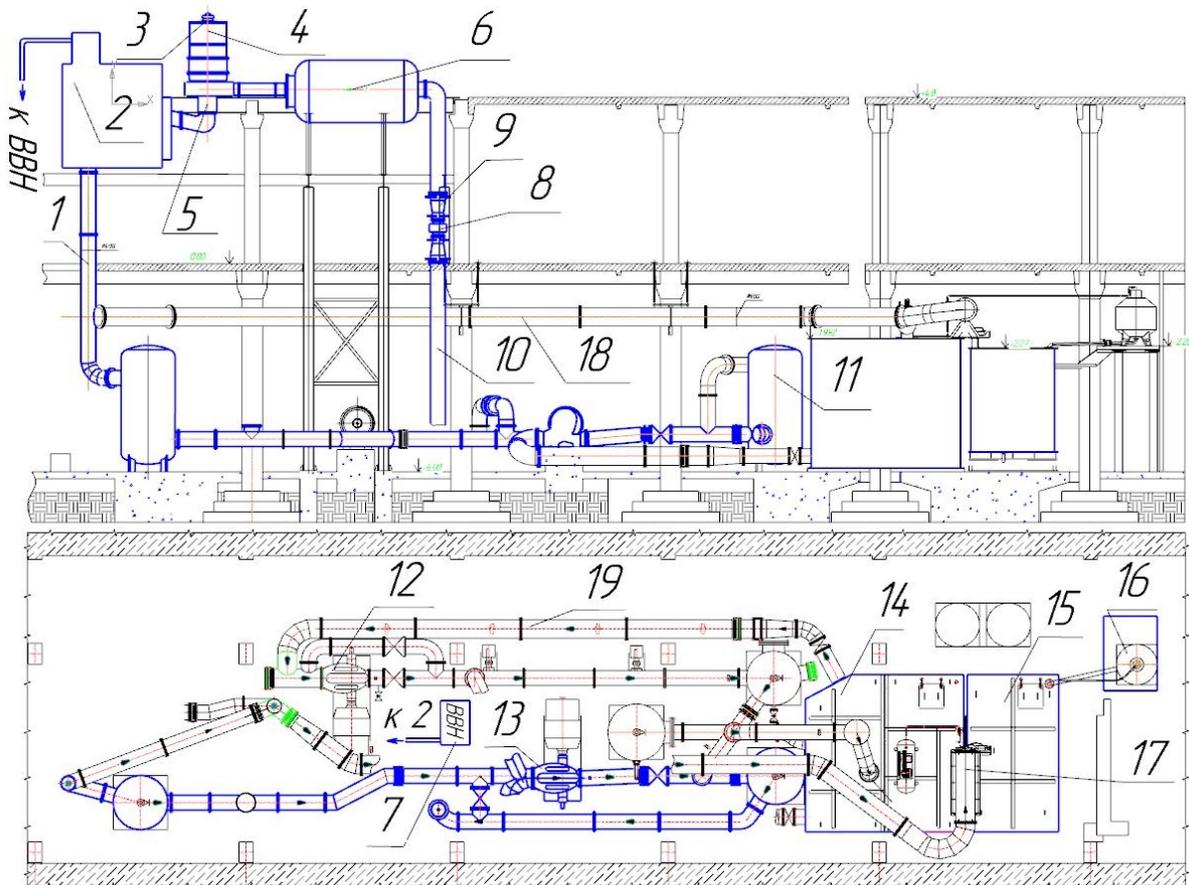


Рис. 2 – Схема энергокавитационного стенда ЭКС-30

Камера рабочего колеса и вертикальный диффузор выполняется в двух вариантах: прозрачные из оргстекла для проведения визуальных наблюдений потока за рабочим колесом и металлические из нержавеющей стали. Отсасывающая труба включает конус, колено и горизонтальный диффузор, которые изготавливаются сварными из листовой стали с оребрением и внутренним антикоррозионным покрытием.

Генератор устанавливается на опорной раме и центрируется с валом модели. Установка генератора и спиральной камеры на одной опоре, наличие эластичных компенсаторов на подводе и отводе модели позволяют исключить возможность расцентровки валов при проведении испытаний в широком диапазоне давлений и вакуума и обеспечивают постоянство механических потерь в роторе и зазорах «лопасть – камера» в рабочем колесе. Типовой диаметр рабочего колеса составляет 350–380 мм.

На рис. 3. показана типовая конструкция модели ПЛ гидротурбины, разработанная ООО «Харьковтурбоинжиниринг», предназначенная для установки на стенд ЭКС-15.

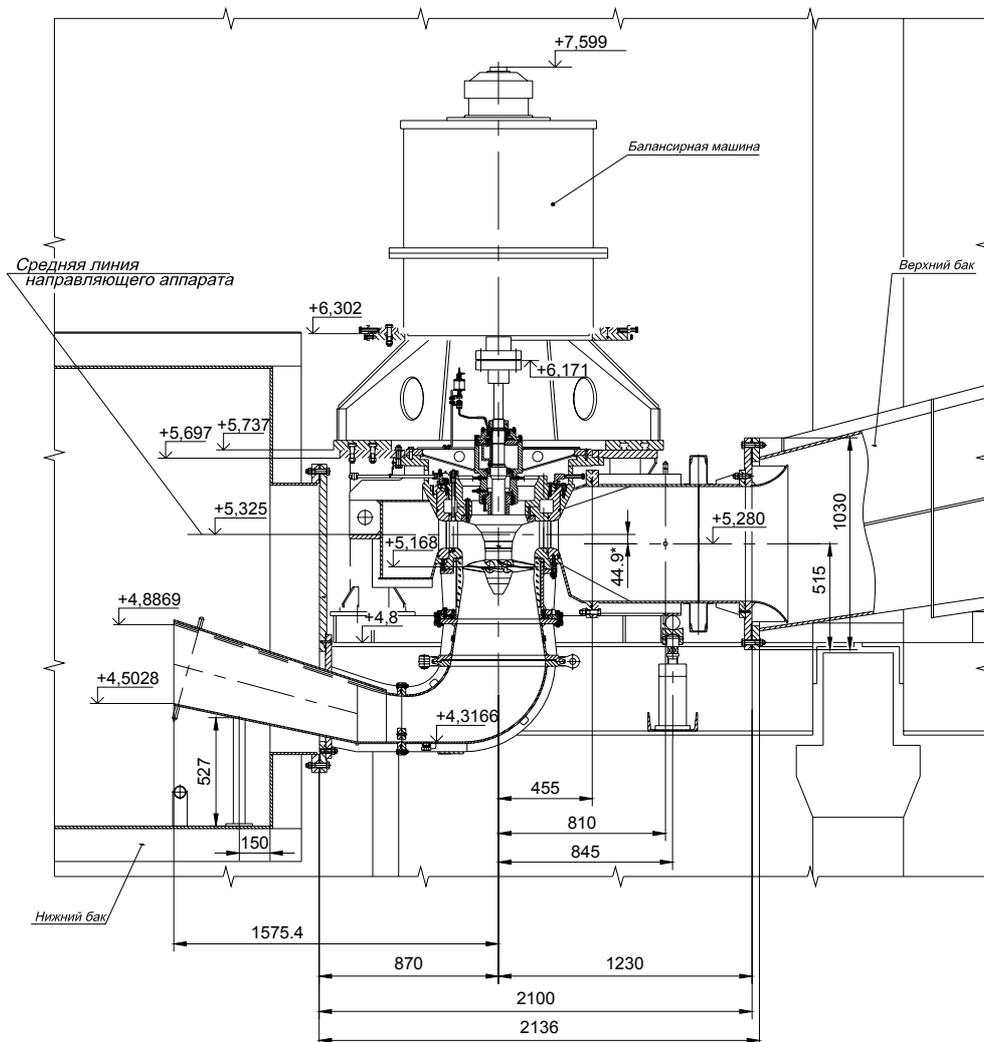


Рис. 3 – Установка модельной турбины ПЛ30-В-35 на стенде ЭКС-15

На рис. 4 и рис. 5 показан общий вид рабочего колеса ПЛ типа и установка модельного блока гидротурбины на энергокавитационном стенде ЭКС-15.



Рис. 4 – Общий вид модели рабочего колеса



Рис. 5 – Модельный блок, установленный на энергокавитационном стенде ЭКС-15

### Методы измерения

Широкие оперативные возможности системы управления стендов обеспечивают удобство установки и стабильность режимов испытаний, автоматизированная система измерений и математической обработки режимных параметров позволяют получать характеристики моделей гидротурбин с высокой степенью достоверности с обеспечением соблюдения критериев моделирования, предусмотренных МЭК 60193, а также других требований, предъявляемых к приемо-сдаточным испытаниям.

Измерительно-вычислительные комплексы созданы с использованием современных персональных ЭВМ и РМЕ-модулей для обработки и преобразования аналоговых и частотных сигналов первичных датчиков стенда в цифровой код, который по *CAN*-шине передается в компьютер, и обрабатывается с помощью специально разработанного прикладного программного обеспечения (ПО) комплекса.

При создании данного комплекса, структурная схема которого приведена на рис. 6, использованы рекомендации МЭК 60193. Основную задачу управления комплексом выполняет персональный компьютер (ПК), на базе которого создана система автоматизированного сбора и обработки информации при испытаниях моделей гидромашин, а прикладное ПО позволяет реализовать следующие функции:

- генерацию базы данных датчиков стенда;
- получение градуировочных характеристик первичных датчиков стенда;
- коррекцию нулевых значений первичных датчиков;
- осреднение полученных значений и преобразование их в физические величины для получения протокола испытаний и построения характеристик;
- градуировку расходомерных устройств стендов;
- построение энергетических и кавитационных характеристик;
- хранение полученных экспериментальных данных.

На рис. 7 приведена типичная универсальная характеристика модели поворотно-лопастной гидротурбины, полученная в результате проведенных на стенде ЭКС-15 модельных испытаний. Она построена при помощи прикладного программного обеспечения в результате математической обработки полученных экспериментальных данных.

На рис. 8 изображена типичная кавитационная характеристика модели гидротурбины для одного из режимов.

На рис. 9 показаны типичные результаты визуальных наблюдений течения в рабочем колесе модели гидротурбины для одного из кавитационных режимов, а на рис. 10 – амплитудная и частотная характеристики пульсаций давления в проточной части модели гидротурбины.

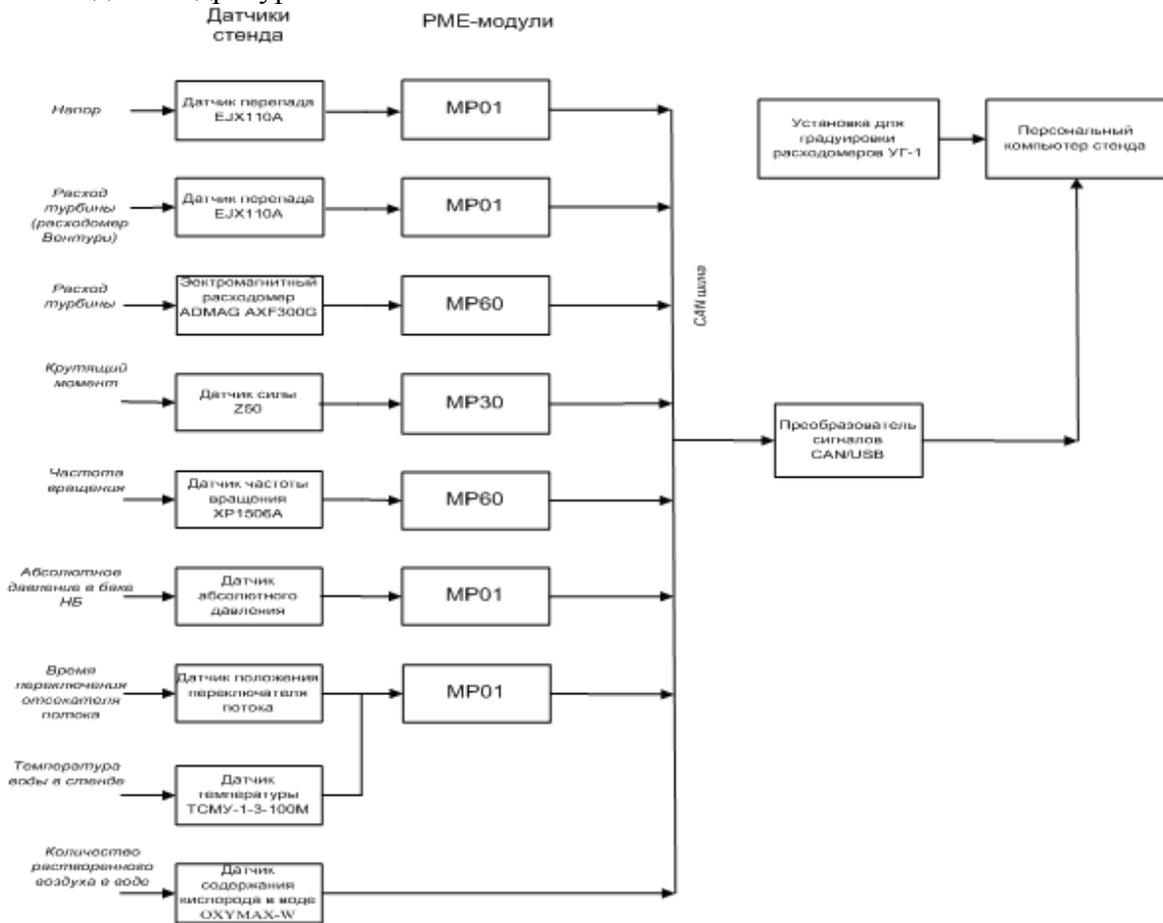


Рис. 6 – Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса стенда ЭКС-15

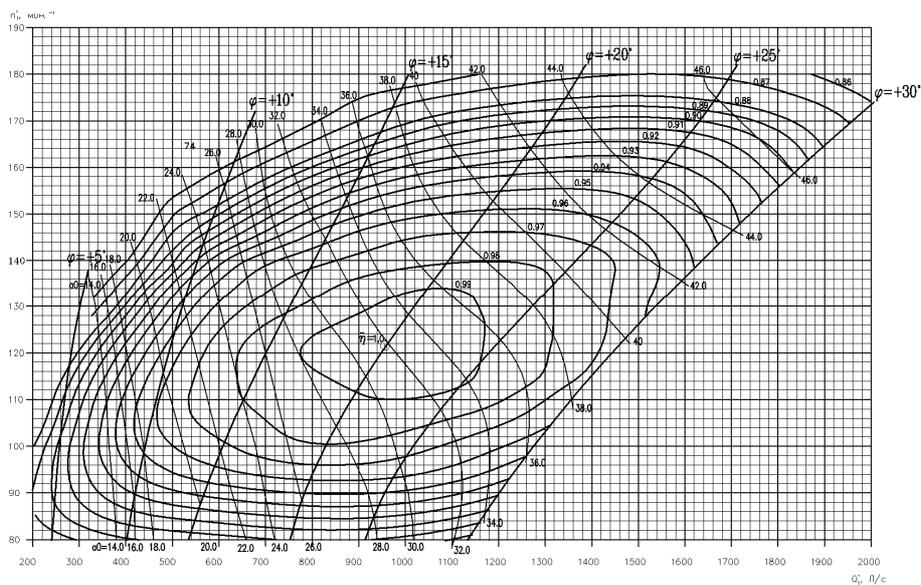


Рис. 7 – Универсальная характеристика модели поворотно-лопастной гидротурбины

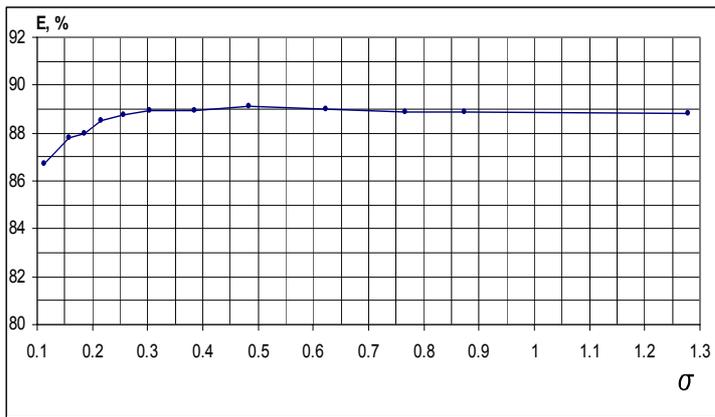


Рис. 8 – Кавитационные характеристики модели поворотнo-лопастной гидротурбины



Рис. 9 – Фотография течения в рабочем колесе модели поворотнo-лопастной гидротурбины ПЛ30-В-35

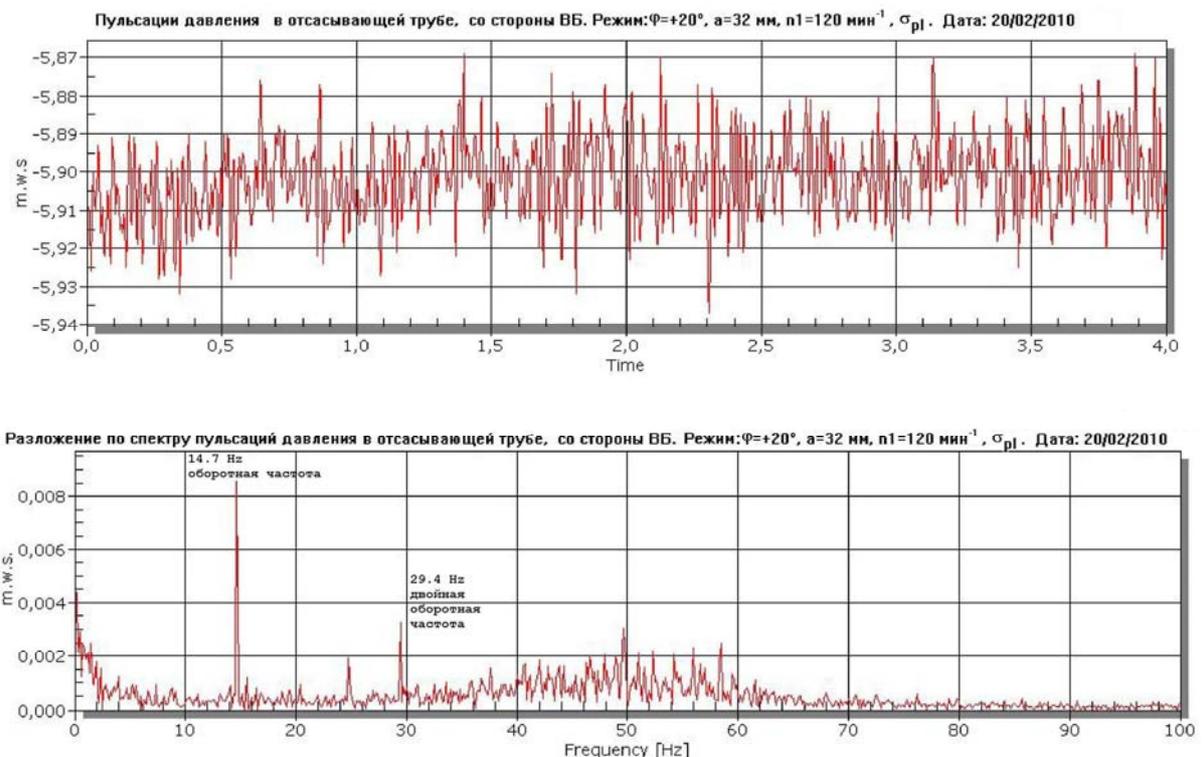


Рис. 10 – Пульсации давления в проточной части модели и их частотный спектр

### Процедуры градуировки

Регулярно (обычно каждый год) или при проведении прямо-сдаточных испытаний выполняется калибровка первичных датчиков измерительно-вычислительного комплекса стендов. Калибровка датчиков напора и абсолютного давления фирм *Yokogawa* (Япония) и *ABB* (Германия) проводится при помощи грузопоршневого манометра класса 0,02 % на месте установки датчиков без их демонтажа. Преобразователи силы класса 0,02 % для измерения крутящего момента динамометра калибруются на месте установки при помощи гирь класса М1. Фотоэлектрические датчики частоты вращения откалиброваны с использованием счетчика импульсов. Электромагнитные расходомеры стендов класса 0,2 % фирмы

*Yokogawa* (Японія) калібруються весовим методом при допомозі унікальної градуировочной установки УГ-1 [4], которая підключається к гидросистеме стендов. В состав установки входять: сборная емкость об'ємом 65,0 м<sup>3</sup>, установленная на фундаменте; мерный бак об'ємом 30,0 м<sup>3</sup>, установленный на весах БВТ-30/5,0; калибровочный бак об'ємом 1,0 м<sup>3</sup>, установленный на весах БВТ-1/0,1, который калибруется на месте установки при помощи гирь класса М1; переключатель потока со временем переключения 0,05–0,1 с, обеспечивающееся пневмоприводом, и компрессорная установка. Метрологические характеристики установки соответствуют требованиям рабочего эталона 1-го разряда, так как граница допустимой относительной ошибки при измерении объема воды и среднего объемного расхода на протяжении времени заполнения мерного бака составляет ± 0,062 %.

В таблице 1 проведено сравнение погрешностей измерения основных параметров модельных гидротурбин в соответствии с рекомендациями МЭК 60193 и полученных в результате проведенных градуировок для стендов ЭКС-15 и ЭКС-30, которое подтверждает достигнутый уровень. При проведении прямо-сдаточных испытаний модели поворотно-лопастной гидротурбины на стенде ЭКС-15 определенные в соответствии с МЭК 60193 значения среднеквадратичной суммарной погрешности КПД составляли ± (0,23...0,25) %.

Таблица 1

Сравнение погрешности измерения параметров модельных гидротурбин

Параметр	Погрешности измерения	
	Требования МЭК 60193, %	Достигнутое значение, %
Частота вращения	± 0,075	± 0,03
Напор	± 0,100	± 0,10
Крутящий момент	± 0,100	± 0,10
Расход	± 0,200	± 0,20
КПД модели	± 0,250	± 0,25

### Типы измерений

Модельные испытания гидротурбины включают измерения следующих параметров:

- 1) значения КПД в поле характеристики модели;
- 2) разгонные характеристики модели;
- 3) кавитационные срывные характеристики;
- 4) визуальные наблюдения за процессом кавитации;
- 5) величину осевой силы;
- 6) значений пульсаций давления в проточной части и их частотные спектры;
- 7) величины крутящего момента на лопатках направляющего аппарата и лопастях рабочего колеса;
- 8) характеристик в 4-х квадрантах;
- 9) содержания воздуха в воде;
- 10) определение расхода методом Винтер-Кеннеди т.п.

Основные параметры испытательного оборудования экспериментальных стендов ИПМаш НАН Украины приведены в таблице 2.

Параметры гидродинамических стендов ИПМаш НАН Украины

Маркировка стендов	Диаметр рабочего колеса модели, мм	Напор, м	Расход, м <sup>3</sup> /с	Мощность приводных двигателей постоянного тока циркуляционных насосов, кВт	Мощность балансирующего мотор-генератора, кВт
ЭКС-30 (для испытаний моделей РО гидромашин)	350-400	≤25 (30)	≤0,3 (≤0,5)	≤160	≤180
ЭКС-15 (для испытаний моделей ПЛ гидромашин)	350-380	≤12 (15)	≤0,56 (≤0,7)	≤160	≤200

### **Выводы**

Гидродинамические стенды лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины после проведенной модернизации отвечают всем требованиям международного стандарта МЭК 60193, что позволяет с учетом многолетнего опыта исследований проводить исследовательские и приемо-сдаточные испытания моделей вертикальных реактивных гидромашин всех типов.

**Список литературы:** 1. *Веремеенко, И.С.* Совершенствование гидродинамических стендов лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины [Текст] / И.С. Веремеенко, В.Н. Дедков, Е.С. Агибалов и др. // Пробл. машиностроения. – 2006. – 9, № 1. – С. 24-31. 2. МЭК 60193. Модельные приемо-сдаточные испытания гидравлических турбин насосов, гидроаккумулирующих станций и насос-турбин. – 1999. – 567 с. 3. *Веремеенко, И.С.* Модернизация энергокавитационных стендов лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины [Текст] / И.С. Веремеенко, С.В. Гладышев, В.Н. Дедков и др. // Пробл. машиностроения. – 2010. – 13, № 5. – С. 3-12. 4. *Веремеенко, И.С.* Установка УГ-1 для градуировки расходомеров энергокавитационных стендов [Текст] / И.С. Веремеенко, С.В. Гладышев, В.Н. Дедков // Метрологія та прилади. – 2010. – № 2. – С. 42-47.

*Поступила в редколлегию 10.09.13*

УДК 621.224

**Развитие экспериментальной базы гидротурбостроения в ИПМаш НАН Украины** [Текст] / **И.С. Веремеенко, А.В. Русанов, В.Н. Дедков, Е.С. Агибалов, С.В. Гладышев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 1(1044). – С. 12-21. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X.

Наведено опис основного і допоміжного обладнання енергокавітаційних стендів лабораторії гідромашин ЕКС-15 і ЕКС-30. Показано, що гідравлічні параметри стендів і використаних засобів вимірювання, а також вживані процедури градувань первинних датчиків стендів забезпечують точність вимірювань, що відповідають вимогам коду модельних прийнятно-здавальних випробувань гідротурбін і оборотних гидромашин МЭК 60193

**Ключові слова:** енергокавітаційний стенд, методи вимірювання, похибки вимірювання, процедури градування.

In this article, description is given of the main and auxiliary equipment of the power & cavitation test rigs ЭКС-15 and ЭКС-30 in the hydro machinery laboratory belonging to the Institute of Mechanical Engineering Problems at Ukraine's National Academy of Sciences. It has been shown that hydraulic characteristics of the test rigs and applied measuring instruments, as well as applied calibration procedures of primary sensing elements provide for such precision of measurements that corresponds to the requirements of the Code IEC 60 193: Model Acceptance Tests of Hydro Turbines and Reversible Hydraulic Machines.

**Keywords:** Power & cavitation test rig, measurement method, measurement error, calibration procedure.