

УДК 621.224

И. С. Веремеенко, д-р. техн. наук***С. В. Гладышев*****В. Н. Дедков**, канд. техн. наук****Е. С. Агибалов******Л. О. Шелудяков****

* ООО «Харьковтурбоинжиниринг»

(г. Харьков, E-mail: khte@online.kharkov.ua)

** Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины

(г. Харьков, E-mail: dedkov@ipmach.kharkov.ua)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭНЕРГОКАВИТАЦИОННЫХ СТЕНДОВ ЛАБОРАТОРИИ ГИДРОМАШИН ИПМАШ НАН УКРАИНЫ

Представлено описание гидродинамических стендов лаборатории гидравлических машин ИПМаш НАН Украины с указанием их энергетических параметров и характеристик разработанного измерительно-вычислительного комплекса. Описана проведенная ООО «Харьковтурбоинжиниринг» совместно с лабораторией гидромашин ИПМаш НАН Украины модернизация основного оборудования стендов, включающая создание установки для градуировки расходомеров весовым способом и измерительно-вычислительного комплекса, которые обеспечивают возможность проводить комплексные энергокавитационные и приемосдаточные испытания моделей гидромашин в соответствии с требованиями МЭК 60193.

Наведено опис гідродинамічних стендів лабораторії гідралічних машин ИПМаш НАН України з зазначенням їх енергетичних параметрів і характеристик розробленого вимірювально-обчислювального комплексу. Описано проведену ООО «Харківтурбоінжиніринг» сумісно з лабораторією гідромашин ИПМаш НАН України модернізацію основного обладнання стендів, яка включає створення установки для градуювання витратомірів ваговим способом і вимірювально-обчислювального комплексу, котрі забезпечують можливість проводити комплексні енергокавітаційні та приймальноздавальні випробування моделей гідромашин відповідно до вимог МЕК 60193.

Введение

Наличие экспериментальных энергокавитационных стендов, оборудованных современной измерительной аппаратурой, является необходимым условием для создания новых высокоэффективных проточных частей гидромашин и успешного выполнения контрактов на поставку гидротурбинного оборудования различных типов. Ведущие в области гидротурбостроения мировые фирмы, к числу которых можно отнести *Alstom* (Франция), *Andritz VA TECH HYDRO* (Австрия), ОАО «ЛМЗ» (Россия), ОАО «Турбоатом» (Украина) и ряд других, занимающиеся разработкой проточных частей гидромашин, имеют в своем распоряжении, как правило, хорошо оснащенные экспериментальные стенды, которые периодически совершенствуются. Периодической модернизации подвергаются гидросистема стендов, энергосиловое оборудование, которое включает приводы циркуляционных насосов и балансирных динамометров, система управления и поддержания стабильности режима испытаний, первичные датчики, преобразующие физические величины (напор, расход, момент на валу гидромашин, частоту вращения и т. п.) в электрические сигналы и измерительно-вычислительный комплекс стенда.

Лаборатория гидромашин ИПМаш НАН Украины располагает двумя универсальными энергокавитационными стендами, уникальность которых в Национальной академии наук

Украины подтверждается присвоением им статуса «национального достояния». В работе [1] проведено описание стендов лаборатории, анализ технического состояния стендов ИПМаш НАН Украины на 2003 г. применительно к требованиям международного стандарта «МЭК 60193» [2] и намечены пути их совершенствования. Настоящая статья посвящена описанию проведенной реконструкции и модернизации всех перечисленных составляющих гидродинамических стендов ИПМаш НАН Украины, проведенной ООО «Харьковтурбоинжиниринг» (ХТИ) совместно с лабораторией гидромашин ИПМаш НАН Украины.

Характеристика экспериментальных стендов лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины

Энергокавитационные стенды лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины [1], введенные в эксплуатацию в 1987 году, являлись для своего времени определенным достижением, так как позволяли проводить селективные экспериментальные научно-исследовательские работы по изучению рабочего процесса не только по вертикальным радиально-осевым (РО) и поворотн-лопастным (ПЛ) гидротурбинам, но и по обратимым гидромашинам различного типа, а также по насосам с получением комплексных энергокавитационных характеристик испытываемых моделей гидромашин.

В состав лаборатории гидромашин входят два энергокавитационных гидродинамических стенда – ЭКС-30 (для РО гидромашин) и ЭКС-15 (для ПЛ гидромашин), которые являются универсальными установками, обеспечивающими проведение комплексных экспериментальных исследований при создании 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 для обеспечения требуемых испытательных параметров. В подвальном помещении расположено все силовое гидромеханическое и электротехническое оборудование. Расходомерные устройства установлены на вертикальных участках трубопроводов на уровне первого этажа. На втором этаже располагаются модельные блоки с мотор-генераторами постоянного тока, напорные баки, баки нижнего бьефа, пульта управления и измерительно-вычислительный комплекс. Основные технические параметры гидродинамических стендов ИПМаш НАН Украины до модернизации и после (в скобках) указаны в табл. 1, а схема стенда ЭКС-15 – на рис. 1.

Международный стандарт «МЭК 60193» издания 1999 г. [2], заменивший ранее действующий стандарт МЭК 193 издания 1965 г. [3], выдвинул более жесткие требования к точности определения КПД модели и соответственно к первичным датчикам и погрешностям измеряемых основных параметров испытываемых модельных гидромашин, а также по обеспечению возможности калибровки на рабочем месте непосредственно на стенде основных устройств по измерению напора, расхода, частоты вращения и крутящего момента на роторе и др. Стенды лаборатории гидромашин ИПМаш, разработанные около 20 лет тому назад, не отвечали этим новым нормам МЭК, касающимся условий проведения модельных приемосдаточных испытаний гидромашин, в том числе по:

Таблица 1. Параметры гидродинамических стендов ИПМаш НАН Украины

Маркировка стендов	Диаметр рабочего колеса модели, мм	Напор, м	Расход, м ³ /с	Мощность приводных двигателей постоянного тока циркуляционных насосов, кВт	Мощность балансирного 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 (≤ 0,70)	≤ 160	≤ 200

- величине безразмерного критерия гидродинамического подобия (число Рейнольдса) при испытаниях ($Re \geq 4 \cdot 10^6$), в то время как предыдущие нормы допускали при испытаниях модельных турбин радиально-осевого типа $Re \geq 2,5 \cdot 10^6$, а турбин поворотно-лопастного типа $Re \geq 2 \cdot 10^6$;
- классу точности применяемой измерительно-вычислительной аппаратуры для определения основных параметров испытываемых модельных турбин с обеспечением суммарной погрешности по КПД, соответствующей достигнутой на стендах ведущих в области гидротурбостроения мировых фирм не более $\pm 0,25\%$;
- возможности калибровки непосредственно на рабочем месте штатных измерительных устройств для замера не только частоты вращения модельной установки, крутящего момента на валу, напора нетто, но и, что особенно важно, для замера расхода, погрешность измерения которого в наибольшей степени (до 80%) влияет на суммарную погрешность определения КПД;
- обеспечению необходимой стабильности поддержания системой автоматического регулирования и управления (САРУ) заданных режимов эксплуатации (частоты вращения) приводных двигателей циркуляционных насосов стендов и работы модельной турбины во всем диапазоне испытаний;
- обеспечению полного геометрического подобия (в пределах допусков МЭК 60193) проточной части модельной турбины выбранному прототипу, что, как следствие, требует исключения какого-либо искажения в процессе испытаний проточного тракта модели за счет влияния деформаций со стороны сопрягаемых с блоком деталей стенда и др.

Проект энергетического силового оборудования, системы автоматического регулирования и управления (САРУ) стендами был разработан институтом «Тяжпромэлектропроект» (г. Харьков) в 1982 г. и основывался на требованиях существующих тогда стандарта МЭК 193 [3], а также на соответствующей технической измерительно-вычислительной базе, применяемой в тот период для определения основных параметров испытываемых модельных гидромашин, далекой от совершенства по нынешним меркам. На стендах отсутствовала система калибровки расходомерных устройств, что делало невозможным проведение приемосдаточных модельных испытаний в соответствии с требованиями нового стандарта МЭК 60193 [2], установленные на стендах главные циркуляционные насосы, а также система автоматического регулирования и управления не обеспечивали достижения необходимого напора при испытаниях и соответственно соблюдения подобия по числу Рейнольдса.

В соответствии с проведенной оценкой существующего технического состояния стендового оборудования лаборатории гидромашин ИПМаш, с учетом отсутствия системы калибровки расходомерных устройств, неподготовленности строительной части существующих фундаментов подвального помещения стендового корпуса для размещения баков емкостью около 100 м^3 с оборудованием калибровки, а также с учетом пришедшей в негодность аппаратуры САРУ «Харьковтурбоинжиниринг» (ХТИ) совместно с ИПМаш НАН Украины, на основании договора о научно-техническом сотрудничестве разработали Программу реабилитации лаборатории гидромашин института, рассчитанную на 2 этапа (1-й этап 2003–2004 гг., 2-й этап – 2005–2007 гг.).

На первом этапе на стендах была проведена глубокая модернизация существующей системы САРУ, направленная на совершенствование подсистемы возбуждения и регулирования приводных двигателей циркуляционных насосных установок, а также подсистемы автоматического управления и регулирования с целью более стабильного поддержания заданных режимов испытаний. Разработанные схемы были реализованы путем практически полной замены морально устаревшей и пришедшей в негодность аппаратуры САРУ на современную, повышенной точности и надежности. Это позволило существенно улучшить стабильность поддержания режимов работы насосных агрегатов и испытываемой модели, а также расширить испытательные параметры стендов как по напорам, так и по расходам при тех же диаметрах модели.

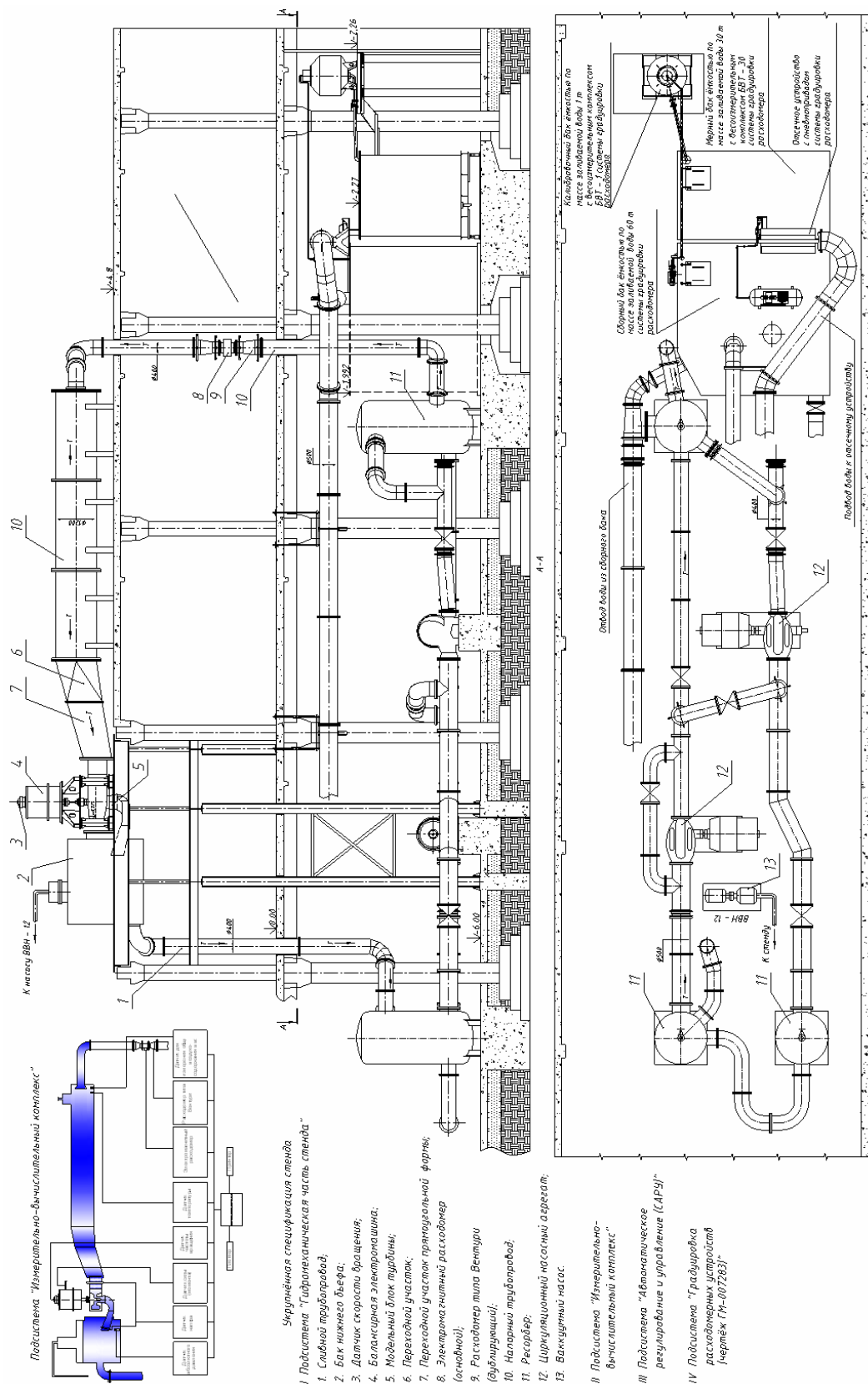
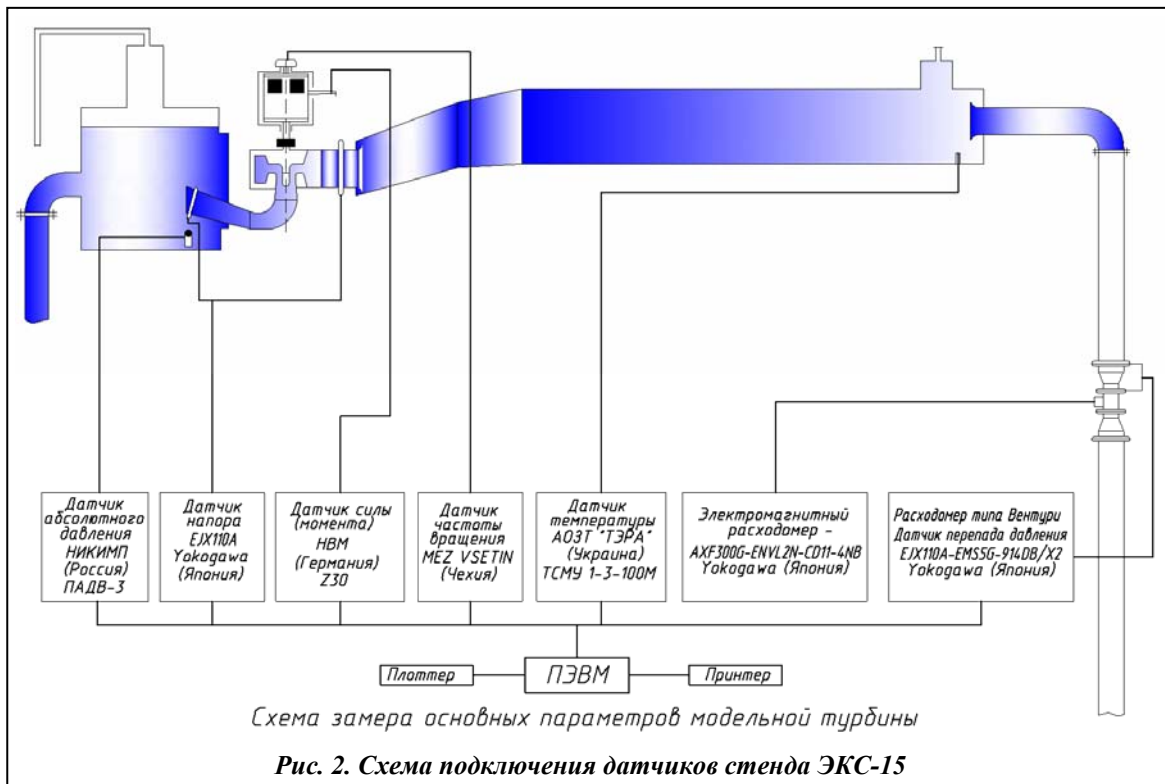


Рис. 1. Схема энергокавитационного стенда ЭКС-15

На втором этапе (2005–2007 гг.) ХТИ совместно с ИПМаш НАН Украины был выполнен под руководством главного конструктора Веремеенко И. С. комплексный рабочий проект модернизации стендов. Он включал в полном объеме разработку системы калибровки расходомерных устройств весовым способом с размещением ее внутри лабораторного корпуса в подвальном помещении на самостоятельном фундаменте, изолированном от основного фундамента здания лаборатории, разработанном специалистами Харьковского государственного университета строительства и архитектуры, новый измерительно-вычислительный комплекс с аппаратурой более высокого класса точности и надежности, модельный блок для средненапорных поворотно-лопастных турбин типа ПЛ30 и ПЛ40 с несколькими образцами рабочих колес (р. к.) и камер р. к., замену одного из циркуляционных насосов для расширения возможности по расходам при калибровке расходомеров и др. На основании выполненного проекта ХТИ были размещены заказы на изготовление нестандартного оборудования (до 30 т), модельного блока, на закупку средств измерения основных параметров испытуемых моделей и др., что позволило с участием ведущих специалистов лаборатории гидромашин ИПМаш в 2007 г. и 1-м квартале 2008 г. осуществить комплексную модернизацию стендов гидромашин ИПМаш и успешно провести на стенде ЭКС-15 в апреле 2008 г. модельные приемосдаточные испытания для одного из зарубежных заказов в соответствии с техническими требованиями и стандартом МЭК 60193.

На рис. 2 приведена схема подключения первичных датчиков для измерения напора, расхода, крутящего момента, частоты вращения, абсолютного давления, воздухосодержания, температуры воды к стенду ЭКС-15.

Применение датчиков дифференциального давления для измерения напора с погрешностью 0,04% фирм АВВ (Германия) и Yokogawa (Япония), тензодатчиков для измерения крутящего момента с погрешностью 0,02% фирмы НВМ (Германия), электромагнитного расходомера с относительной погрешностью 0,2% фирма Yokogawa (Япония) позволило измерять такие параметры, как напор, расход, крутящий момент с погрешностями, которые могут обеспечить среднеквадратичную суммарную погрешность определения КПД $\pm (0,23...0,25)\%$, что соответствует уровню, достигнутому лучшими отечественными и зарубежными лабораториями.



В табл. 2 приведены достигнутые значения погрешности определения основных параметров на стенде ЭКС-15 при испытании модельных турбин поворотно-лопастного типа до и после модернизации лаборатории.

Таблица 2. Сравнение погрешностей измерения параметров модельных гидротурбин

Погрешность определяемых параметров	Погрешности измерения %			
	Рекомендации МЭК, % 1965г.	Техническое состояние, % 2003г.	Рекомендации МЭК, % 1999г.	Достигнутые значения, % 2008г.
Систематическая погрешность измерения частоты вращения	±0,1	±0,03	±0,075	±0,03
Систематическая погрешность измерения напора	±0,15	±0,15	±0,1	±0,1
Систематическая погрешность измерения крутящего момента	±0,2	±0,13	±0,1	±0,1
Систематическая погрешность измерения расхода	±0,3	±0,304	±0,2	±0,2
Систематическая погрешность измерения КПД	±0,39	±0,36	±0,25	±0,23
Случайная погрешность определения КПД	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
Общая погрешность определения КПД	±0,4	±0,38	±0,27	±0,25

Достигнутые значения систематических погрешностей измерения основных параметров, представленные в таблице, получены на основании проведенных градуировок средств измерения и подтверждены соответствующими свидетельствами и аттестатами, выданными Харьковским региональным центром государственного предприятия «Госстандартметрология».

Установка для градуировки расходомеров

Наиболее точное на сегодняшний день определение массового и объемного расхода воды, протекающего по трубопроводу, позволяет получить применение метода статического взвешивания, который успешно используется при создании национальных эталонов расхода воды в ряде стран и рекомендован МЭК 60193 [2]. Этот метод и применен при создании установки для градуировки расходомеров стендов УГ-1.

Основной особенностью разработанной установки является максимальное использование основного гидромеханического и электротехнического оборудования стендов ИПМаш НАН Украины и гидросистемы стендов, к которым установка присоединяется при проведении градуировки расходомеров. Установка размещена в подвальном помещении стендового корпуса ИПМаш НАН Украины. Она состоит из следующих основных частей:

- сборная емкость объемом 65,0 м³, установленная на фундаменте ;
- мерный бак объемом 30,0 м³, установленный на весах БВТ-30/5,0;
- калибровочный бак объемом 1,0 м³ установленный на весах БВТ-1/0,1;
- переключатель потока с пневмоприводом;
- компрессорная установка РМ 3128;
- трубопроводы и арматура;
- электротехническая часть с приборами и шкафом управления;

- компьютер для измерения параметров, обработки, управления и отображения информации;
- вспомогательное оборудование (циркуляционные насосы Д2000-21, откачивающие насосы NM 5012/DE, NM 40/12CE, NM 32/12SE и задвижки).

Основными узлами созданной установки, принципиально определяющими его метрологические характеристики, являются весоизмерительное устройство и переключатель потока.

На рис. 3 приведена схема установки калибровочного и мерного баков весоизмерительных систем БВТ-1-0,1 и БВТ-30-5,0. Калибровочный бак весоизмерительного устройства БВТ-1-0,1 установлен на четырех тензорезисторных датчиках массы типа ВК-2-1000-С3 фирмы "Flintec" (Германия). Мерный бак весоизмерительного устройства БВТ-1-0, БВТ-30-5,0 установлен на четырех тензорезисторных датчиках массы типа СРР 20t-С3 фирмы "BILANCIAT" (Италия) с узлами встройки. Сигнал с датчиков передается на цифровой терминал D-400 фирмы "BILANCIAT" и далее в компьютер установки.

Для переключения потока воды из сборного бака в мерный служит переключатель потока с пневматическим приводом, приведенный на рис. 4. Основным требованием, предъявляемым к этому устройству, является симметричность его движения и быстродействие.

Принципиальная схема подключения установки УГ-1 для градуировки расходомеров к стенду ЭКС-15 приведена на рис. 5.

Вода закачивается из успокоительного отсека сборного бака Е2 по трубопроводу

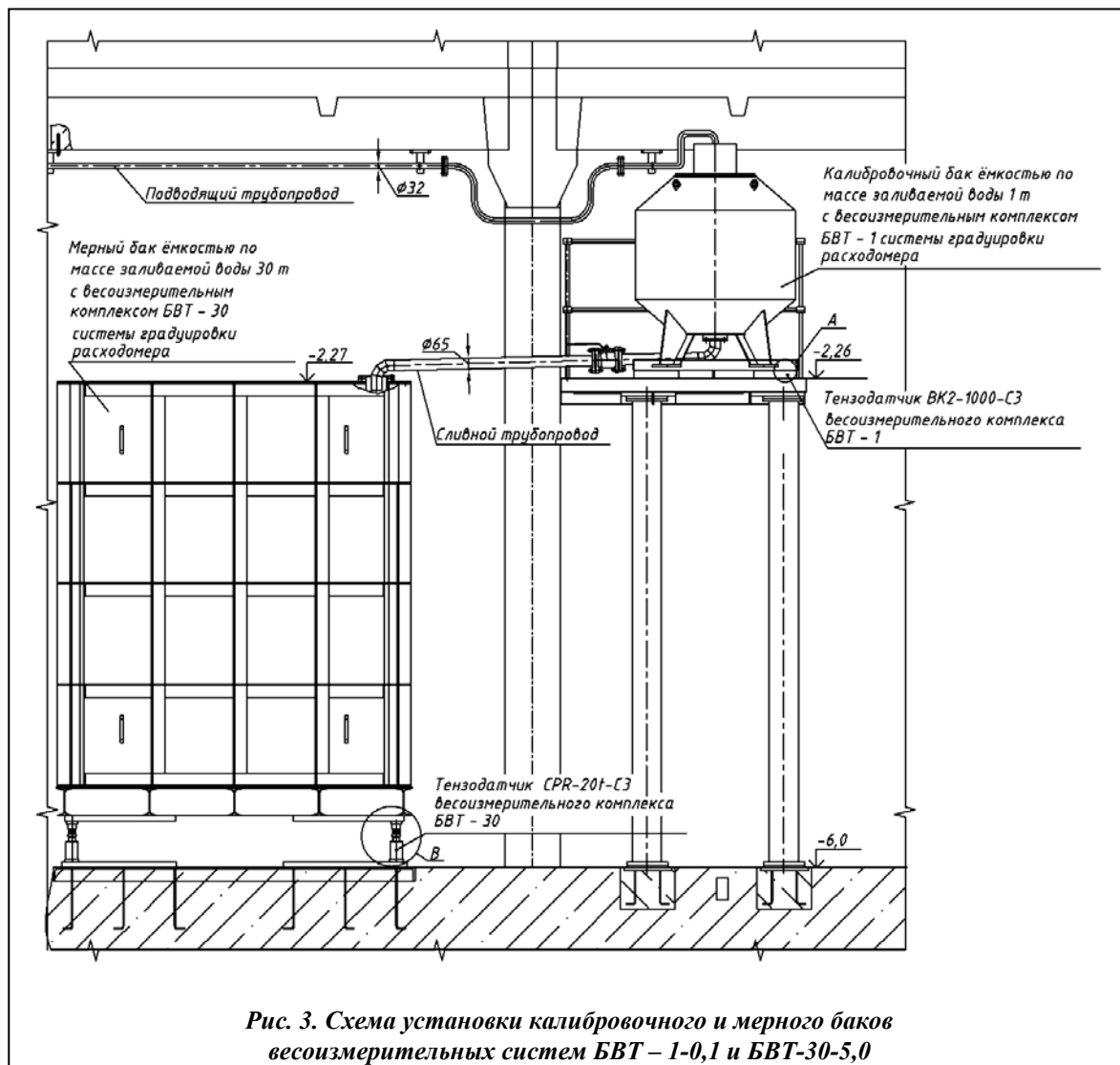
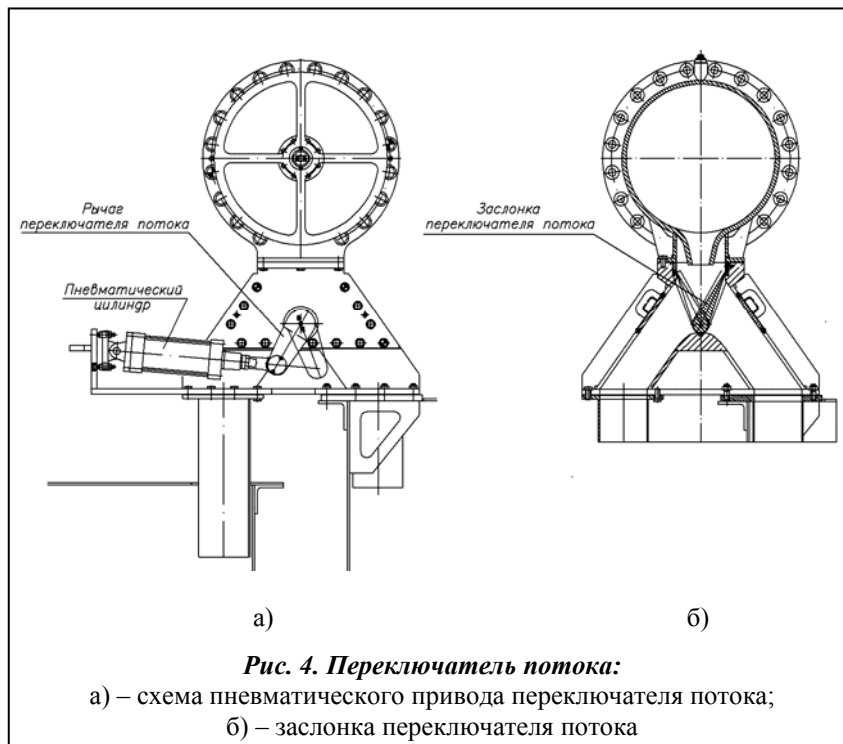


Рис. 3. Схема установки калибровочного и мерного баков весоизмерительных систем БВТ-1-0,1 и БВТ-30-5,0



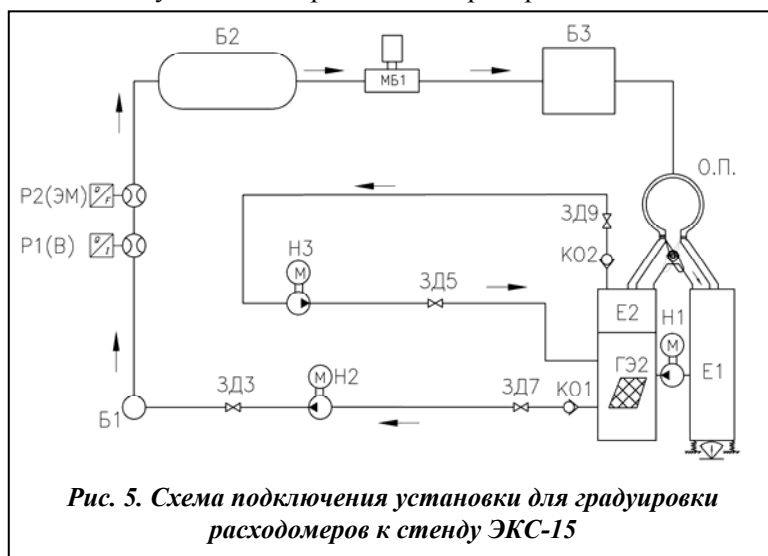
циркуляционным насосом стенда Н2 в гидросистему гидродинамического стенда и через демпфирующий бак Б1 проходит через градуируемый расходомер Р1 и далее через напорный бак Б3, модельный блок МБ1, бак нижнего бьефа Б1 по трубопроводу поступает в переключатель потока О.П., который направляет воду в сборный бак Е2. В сборном баке вода при помощи циркуляционного насоса Б2 перекачивается из приемного в успокоительный отсек, обеспечивая тем самым постоянный уровень

воды на входе в насос Н2. Величины заданных расходов поочередно устанавливаются за счет регулирования режима работы приводов циркуляционного насоса и балансирующего динамометра.

Проведенная метрологическая аттестация установки для градуировки расходомеров УГ-1, подтвержденная свидетельством, выданным Харьковским региональным центром ГП «Госстандартметрология», показала, что метрологические характеристики установки соответствуют требованиям рабочего эталона 1-го разряда, так как допустимая относительная ошибка при измерении объема воды и среднего объемного расхода на протяжении времени заполнения мерного бака составляет $\pm 0,062\%$ [4].

Модернизация измерительно-вычислительного комплекса стендов

В настоящее время из-за морального и физического устаревания компонентов предыдущего измерительно-вычислительного комплекса (ИВК), описанного в [1], проведена его модернизация с использованием современных персональных ЭВМ офисного исполнения и РМЕ-модулей для обработки и преобразования сигналов первичных датчиков стенда, а



также разработкой соответствующего прикладного программного обеспечения (ПО) комплекса.

При разработке 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,

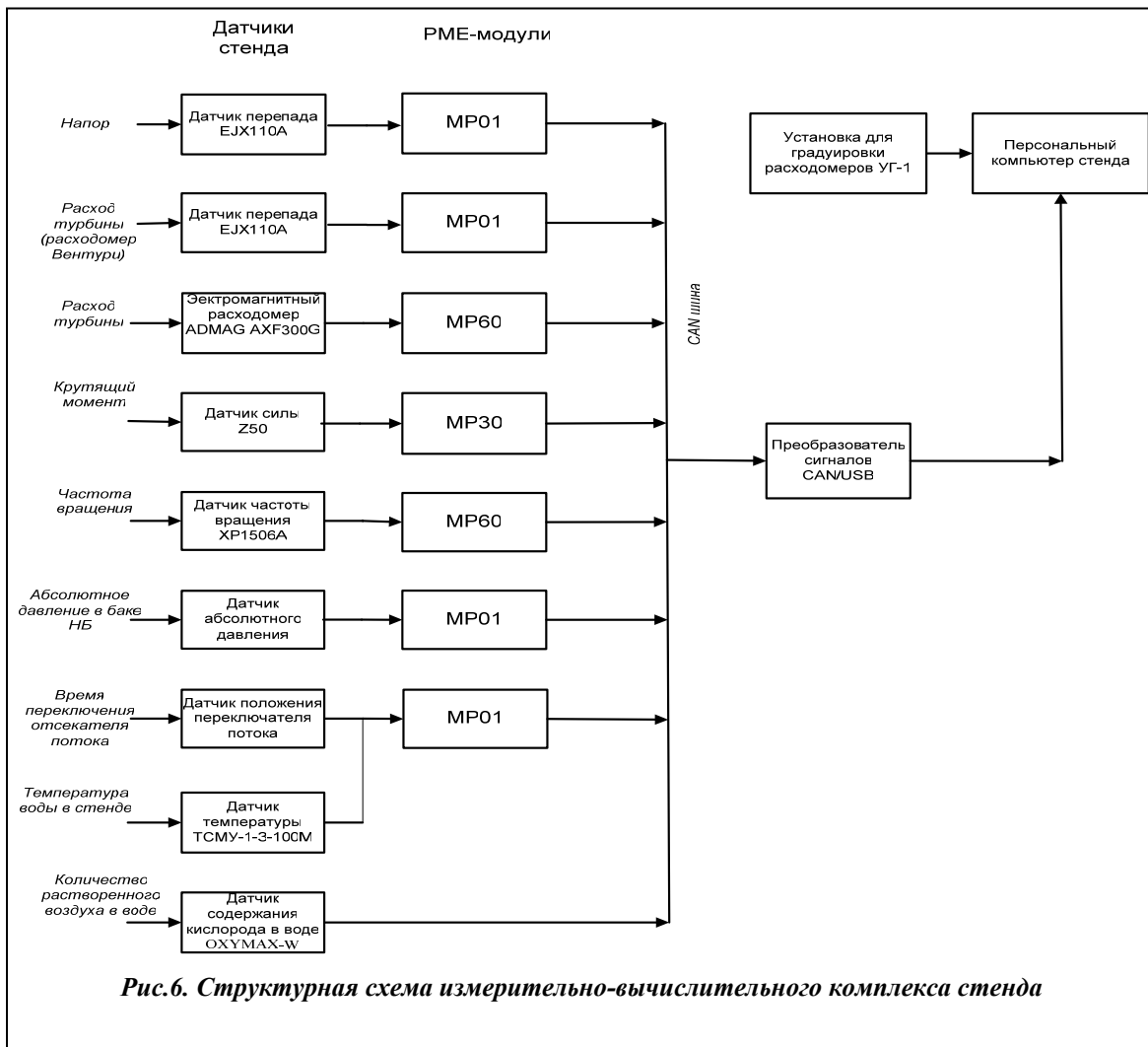


Рис.6. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса стенда

а прикладное ПО позволяет реализовать следующие функции:

- генерацию базы данных датчиков стенда;
- получение градуировочных характеристик первичных датчиков стенда;
- коррекцию нулевых значений первичных датчиков;
- усреднение 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.

Дополнительно к описанным работам за счет финансирования работ Национальной академией наук Украины в рамках «национального достояния» сотрудниками лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины в 2007–2009 гг. проведены переоснащение измерительно-вычислительного комплекса стенда ЭКС-30 комплектом аппаратуры, с характеристиками, аналогичными примененным на стенде ЭКС-15, в частности, датчиками дифференциального давления фирмы АВВ (Германия), электромагнитным расходомером фирмы Yoko-gawa (Япония), а также грузопоршневым манометром класса 0,02 для градуировок первичных датчиков, наладка всех систем стенда и выполнено подключение гидросистемы стенда ЭКС-30 к созданной ранее градуировочной установке УГ-1.

Выполненная комплексная модернизация стендов гидромашин ИПМаш НАН Украины позволила в 2008 г. провести на стенде поворотно-лопастных гидротурбин ЭКС-15

приемосдаточные модельные испытания для одного из зарубежных заказов, обеспечив все требования контракта и условия, предусмотренные стандартом МЭК 60193 [2].

Выводы

После проведения большого объема работ по форсированию параметров стендов, созданию установки для градуировки расходомеров и разработке современного измерительно-вычислительного комплекса гидродинамические стенды ИПМаш НАН Украины соответствуют требованиям МЭК 60193, что позволяет использовать их для проведения исследовательских комплексных энергокавитационных и приемосдаточных испытаний моделей гидромашин.

Литература

1. Совершенствование гидродинамических стендов лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины / И. С. Веремеенко, В. Н. Дедков, Е. С. Агибалов, Ю. Б. Мосцевенко // Пробл. машиностроения. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 24–31.
2. МЭК 60193. Модельные приемосдаточные испытания гидравлических турбин насосов, гидроаккумулирующих станций и насос-турбин. – 1999. – 567 с.
3. Рекомендация МЭК. Первое дополнение к публикации № 193. – 1974. – 21 с.
4. Веремеенко И. С. Установка УГ-1 для градуировки расходомеров энергокавитационных стендов / И. С. Веремеенко, С. В. Гладышев, В. Н. Дедков и др. // Метрологія та прилади. – 2010. – № 2. – С. 42–47.

Поступила в редакцию
27.04.10

УДК 621.165

Д. А. Переверзев, д-р техн. наук

А. Г. Лебедев, канд. техн. наук

Ж. А. Шелехина

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, E-mail: shuben @ kharkov.ua)

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЪЕДИНЕННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ И ПАРОТУРБИННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ

Развиты методы и выполнен большой объем исследований экономичности совместной работы газотурбинного и паротурбинного энергоблоков в виде энергокомплекса: высокотемпературная газотурбинная надстройка (ГТН) – паротурбинный энергоблок со сверхкритическими и суперкритическими начальными параметрами пара (ГТН-ПТУ). Результаты показали, что при паротурбинном энергоблоке с электрической мощностью 300 МВт и более, с начальными параметрами пара 24–25 МПа и 540–550 °С, с ГТН мощностью 450–500 МВт при начальной температуре газа 1300 °С – КПД-нетто энергокомплекса достигает 52–53%. При повышении начальной температуры газа в ПТУ до 1500 °С КПД увеличивается еще на 2%. При этой ГТН и суперкритических начальных параметрах пара 30 МПа и 650 °С в ПТУ КПД-нетто энергокомплекса может достигать 56%, а при повышении их до 40 МПа и 750 °С – 58% и более. Путем дальнейшего совершенствования энергокомплексов их КПД-нетто в перспективе при начальной температуре газа 1500 °С может быть доведен до 60%.

Розвинені методи і виконаний великий обсяг досліджень економічності спільної роботи газотурбінного і паротурбінного енергоблоків у вигляді енергокомплексу: високотемпературна газотурбінна надбудова (ГТН) – паротурбінний енергоблок з надкритичними і суперкритичними початковими параметрами пари (ГТН-ПТУ). Результати показали, що при паротурбінному енергоблоці з електричною потужністю 300 МВт і більш, з по-