

¹ А. В. Линник¹ С. А. Рябова¹ В. Д. Варенко¹ А. В. Рябов² О. Н. Хорев, канд. техн. наук¹ Публичное акционерное общество «Турбоатом», г. Харьков,

e-mail: office@turboatom.com.ua

² Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков,

e-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua

УДК 621.224

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ПЛ20 ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ГИДРОТУРБИН КРЕМЕНЧУГСКОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Наведено результати комплексних розрахунково-теоретичних і експериментальних досліджень проточних частин модельних гідротурбін ПЛ20 для модернізації Кременчуцької гідроелектростанції. Експериментальні дослідження проведені на універсальному енергокавітаційному стенді ПАТ «Турбоатом». Наведено експериментальні залежності відносного коефіцієнта корисної дії моделі від приведеної витрати, а також порівняння енергетичних і кавітаційних показників випробуваних проточних частин з удосконаленими лопатями робочих коліс і лопатками направляючого апарата для оптимальних режимів роботи гідротурбіни.

Ключові слова: поворотно-лопатева гідротурбіна, проточна частина, універсальний енергокавітаційний стенд, модельні випробування, робоче колесо.

Введение

В балансе генерирующих мощностей объединенной энергосистемы Украины основу составляют ТЭС и АЭС. ГЭС и ГАЭС предназначены для выравнивания графика суточного потребления энергии, покрывая пиковую часть нагрузки, а их доля в энергосистеме Украины не превышает 10–12%. В то же время в практике эксплуатации энергетических систем развитых стран принято считать, что доля ГЭС и ГАЭС в структуре мощностей должна составлять не менее 15–20% [1].

В Украине гидропотенциал крупных рек практически исчерпан, и строительство новых крупных гидроузлов в ближайшее время не предусматривается. Существует три направления стратегического развития гидроэнергетики Украины [2]. Первым направлением является ввод новых мощностей – это завершение строительства гидроэнергетических объектов, заложенных в конце прошлого века. Первый по значимости объект в гидроэнергетике Украины Днестровская ГАЭС с суммарной проектной мощностью семи агрегатов 2268 МВт в турбинном режиме, 2947 МВт – в насосном режиме. Три гидроагрегата первого этапа введены в эксплуатацию в период с 2009 по 2016 гг. Второй объект – Ташлыкская ГАЭС с установкой шести агрегатов общей мощностью 906 МВт в турбинном режиме и 1299 МВт в насосном. Первый и второй гидроагрегаты пущены в 2006–2007 гг.

Ввод в эксплуатацию гидроагрегатов Днестровской и Ташлыкской ГАЭС позволит увеличить долю маневренных мощностей и станет важным стабилизирующим звеном национальной энергосистемы, существенно уменьшит колебания нагрузки, улучшит качество вырабатываемой энергосистемой электроэнергии.

Вторым направлением является развитие малой энергетики.

В конце 60-х годов прошлого столетия в Украине работало около 1000 малых ГЭС. К настоящему времени сохранилось 160, из них работает только 74. Установленная мощность малых ГЭС составляет 106 МВт, выработка электроэнергии – от 278 до 395 млн. кВт·ч. в год в зависимости от метеорологических условий. При этом экономический гидропотенциал малых рек Украины составляет около 3,75 млрд. кВт·ч, то есть на сегодня он освоен только на 10% [3].

Третье направление развития гидроэнергетики – модернизация морально и физически устаревшего оборудования гидроузлов, отработавшего 40–50 лет. Это направление рассматривается как приоритетное, поскольку позволяет добиться положительных результатов при значительно меньших затратах (капитальные затраты в 2–3 раза меньше, чем при новом строительстве).

© А. В. Линник, С. А. Рябова, В. Д. Варенко, А. В. Рябов, О. Н. Хорев, 2016

Модернизация гидротурбин (ГТ) представляет собой совершенствование основных рабочих органов проточных частей (ПЧ): рабочего колеса (РК) и направляющего аппарата (НА) в пределах существующих размеров подводящих и отводящих органов. Цель модернизации – достижение максимально возможного уровня основных показателей турбины: номинальной и максимальной мощности, КПД, запасов по кавитации, допустимого диапазона работы по нагрузкам за счет усовершенствования рабочего процесса, в первую очередь, в РК.

В данной статье приведены результаты разработки моделей ПЧ ГТ для модернизации Кременчугской ГЭС и исследования их на гидравлическом стенде экспериментального комплекса специального конструкторского бюро «Турбогидромаш» (гидротурбинная лаборатория) ПАО «Турбоатом».

1. Разработка элементов ПЧ гидротурбин ПЛ20 Кременчугской ГЭС

1.1 Основные характеристики

На Кременчугской ГЭС установлено 12 вертикальных поворотно-лопастных гидротурбин, введенных в эксплуатацию в 1960–1962 гг. Основное оборудование Кременчугской ГЭС выработало свой нормативный ресурс, является морально и физически устаревшим и не соответствует в полной мере современным требованиям энергосистемы. Поэтому главными задачами реконструкции электростанции является продление срока ее эксплуатации, увеличение мощности, повышение эффективности, надежности и безопасности оборудования и конструкций, соответствие требованиям защиты окружающей среды, улучшение качества производимой энергии, а также создание современных условий работы. Основные характеристики гидроагрегатов до реконструкции представлены ниже.

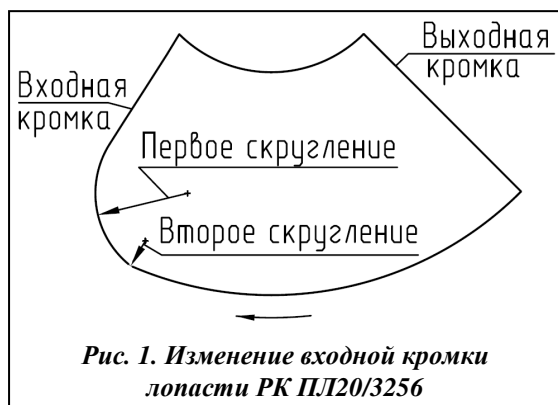
Тип гидротурбины	ПЛ20/661-В-800
Диаметр рабочего колеса D , м	8,0
Частота вращения синхронная n_c , мин ⁻¹	62,5
Мощность турбины, МВт:	
– номинальная P_p при расчетном напоре;	58
– максимальная P_{max}	58
Напоры нетто, м:	
– максимальный H_{max} ;	16,9
– расчетный H_p ;	14,2
– минимальный H_{min}	9,55
Расход при расчетном напоре Q_p , м ³ /с	485

На сегодняшний день проведено два этапа модернизации ПЧ ГТ Кременчугской ГЭС.

В 2005 г. выполнены работы первого этапа модернизации двух агрегатов (станционный № 2 и № 3). Замена подлежали РК и НА. Основными показателями выполнения контрактных условий было обеспечение значений номинальной мощности турбины при расчетном напоре $P_p = 62$ МВт; максимальной мощности при максимальном напоре $P_{max} = 63,8$ МВт и достижение средневзвешенного КПД $\eta_{ср\ взв} = 91,4\%$ при неизменных значениях синхронной частоты вращения $n_c = 62,5$ мин⁻¹ и диаметра рабочего колеса $D = 8$ м. Напоры нетто были изменены: максимальный $H_{max} = 17,7$ м; минимальный $H_{min} = 8,7$ м; расчетный $H_p = 14,0$ м; средневзвешенный $H_{ср\ взв} = 13,7$ м.

В 2012 г. выполнены работы второго этапа модернизации трех агрегатов (станционный № 7, № 8 и № 9). Замена подлежали РК, камера РК и НА. После модернизации элементов ПЧ ГТ должна иметь следующие параметры: номинальная мощность турбины при расчетном напоре $P_p = 64$ МВт; максимальная мощность при максимальном напоре $P_{max} = 64$ МВт; средневзвешенный КПД не менее $\eta_{ср\ взв} = 91,4\%$. Синхронная частота вращения, диаметр РК, напоры нетто имеют такие же значения, как и на первом этапе.

Для достижения заданных параметров проведен комплекс расчетно-теоретических и экспериментальных исследований по созданию лопастных систем, оптимально согласующихся с существующими на станции подводящими и отводящими органами.



При расчетно-теоретических исследованиях лопастных систем гидромашин использовался подход, основанный на комплексном решении двух двумерных задач: прямой осесимметричной задачи осредненного движения жидкости [4, 5] и задачи обтекания решеток профилей на осесимметричных поверхностях тока [6]. В такой квазитрехмерной постановке определялись кинематика потока в ПЧ и оценивались энергокавитационные показатели РК и НА [7].

1.2 Проектирование РК для первого этапа модернизации Кременчугской ГЭС

Сначала были выполнены комплексные расчетно-теоретические и экспериментальные исследования модели ПЧ с базовым, установленным на станции РК ПЛ20/661, и НА с профилем типа ВН-31. Это РК имеет такие параметры: количество лопастей $z_{л} = 4$; втулочное отношение $d_{вт} = 0,4D$; диаметр горловины $D_r = 0,973D$. Результаты экспериментальных исследований показали, что эта ПЧ не соответствовала требованиям технического задания по энергокавитационным показателям, поэтому РК и лопатки НА подлежали замене.

Разработка новой лопастной системы РК проводилась на базе лучших ПЛ РК на напоры $H = 20$ м, имеющих в номенклатуре ПАО «Турбоатом». В результате были разработаны РК ПЛ20/3256 и ПЛ20/3271у.

При проектировании РК ПЛ20/3256 проводились расчетно-теоретические работы, направленные на улучшение энергокавитационных качеств. При построении профилей РК применен новый закон распределения толщин вдоль сечения лопасти, толщина выбрана минимально допустимой для уменьшения стеснения потока и улучшения кавитационных качеств, но при этом достаточной для обеспечения необходимого запаса прочности лопасти. С целью повышения КПД на режимах максимальной мощности турбины было уменьшено втулочное отношение РК до $d_{вт}=0,37D$. Дополнительные сечения лопастей при переходе к меньшей втулке получены путем плавной графической экстраполяции втулочных сечений. Далее в два шага выполнялась оптимизация формы входной кромки (у исходного РК она в плане прямая) с помощью скругления ее периферийного участка радиусами (рис. 1) с оценкой энергокавитационных показателей после каждого шага. В ПЧ установлен НА с новым профилем лопатки типа УП-32-2. Расчетные исследования показали, что применение более совершенной формы лопастной системы РК и замена лопаток НА позволили увеличить быстроходность гидротурбины, повысить уровень КПД ПЧ и улучшить ее кавитационные показатели.

При проектировании РК ПЛ20/3271у втулочное отношение также уменьшено до $d_{вт} = 0,37D$. Переход к меньшему втулочному отношению привел к удлинению лопастей до 10% в радиальном направлении. Также выполнено увеличение густоты решетки в зоне от среднего до периферийных сечений. Предполагалось, что увеличение перекрутки лопасти и густоты решеток приведет к повышению быстроходности и улучшению кавитационных показателей. Из прочностных соображений было выполнено утолщение корневых сечений лопасти. Одним из путей улучшения энергетических качеств ПЧ являлось достижение оптимального согласования потока в лопастных системах НА и РК. В ПЧ установлен новый НА с тем же типом профиля лопатки УП-32-2. По результатам расчетных исследований РК ПЛ20/3271у имело преимущества перед колесом ПЛ20/3256 по уровню КПД и кавитационным показателям.

1.3 Проектирование РК для второго этапа модернизации Кременчугской ГЭС

Проектирование нового рабочего колеса ПЛ20/3300 выполнялось на базе ранее разработанного РК ГТ Новосибирской ГЭС. Анализ результатов проведенных расчетно-теоретических работ показал необходимость проведения дополнительных мероприятий по увеличению его пропускной способности и повышению КПД. Выполнено уменьшение диаметра втулки с $d_{вт} = 0,41D$ до $d_{вт} = 0,4025D$, и увеличение диаметра горловины до $D_r = 0,98D$. Количество лопастей нового РК $z_{л} = 5$ осталось неизменным. Увеличение диаметров втулки и горловины было недостаточным для повышения быстроходности РК, поэтому проводились изменения формы лопастной системы РК в два шага (рис. 2).

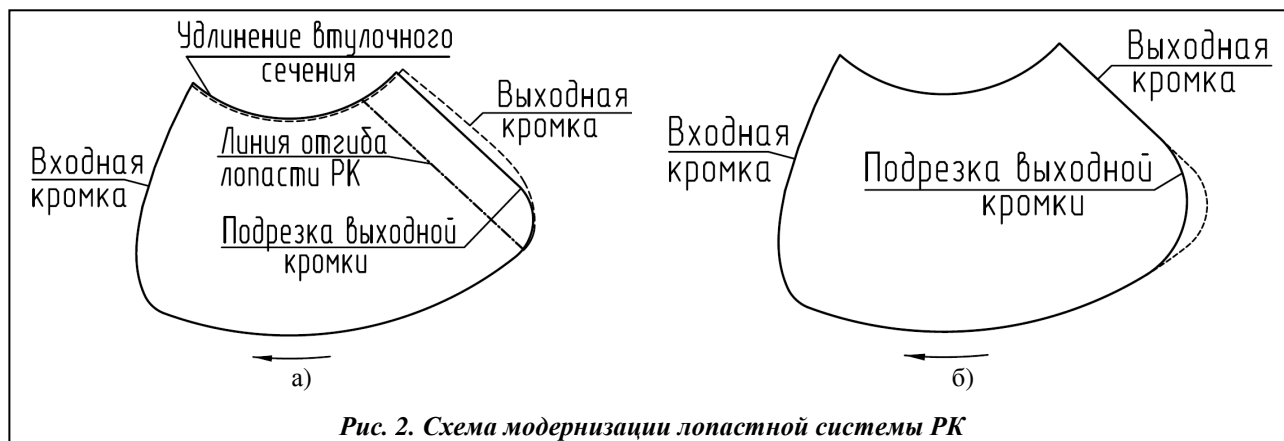


Рис. 2. Схема модернизации лопастной системы РК

Первый заключался в уменьшении густоты решетки и в увеличении выходных углов лопасти, т. е. была выполнена подрезка выходной кромки в плане на 3° и ее отгиб (рис. 2, а). На втором выполнено увеличение радиуса скругления выходной кромке лопасти РК (рис. 2, б), а также скругление торцов периферийной области лопасти. Для исследования выбран такой же профиль лопатки НА, как и для первого этапа модернизации. Результаты расчетно-теоретических работ показали улучшение энергокавитационных качеств ПЧ с РК ПЛ20/3300 и новым НА относительно базовой.

Для подтверждения результатов расчетных исследований и получения универсальных характеристик проведены модельные испытания гидротурбин на энергокавитационном стенде.

2. Испытательный стенд ЭКС-100 ПАО «Турбоатом»

Энергокавитационный стенд ЭКС-100 ПАО «Турбоатом» представляет собой установку с замкнутым контуром циркуляции воды и предназначен для проведения энергетических, кавитационных, пульсационных, силовых и других испытаний моделей гидротурбин, насосов и обратимых гидромашин [8]. 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 IEC60193, и других требований, предъявляемых к прямо-сдаточным испытаниям [9].

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. Основные параметры стенда ЭКС-100 представлены ниже. Схема универсального энергокавитационного стенда ЭКС-100 показана на рис. 3.

Основные параметры стенда ЭКС-100

Максимальный напор испытаний H_{\max} , м	100
Расход, соответствующий максимальному напору, Q , м ³ /с	1,4
Максимальный расход Q_{\max} , м ³ /с	2,8
Напор, соответствующий максимальному расходу, H , м	50
Мощность балансирной машины P , кВт	500
Диапазон давлений в баке нижнего бьефа P_{abs2} , кгс/см ²	0,05...2,0
Объем воды в стенде V , м ³	350

Испытания модельных ПЛ ГТ выполняются в объеме режимов, охватывающих весь диапазон эксплуатации прототипа и включают такие испытания:

- энергетические;
- кавитационные;
- разгонные;
- измерение пульсаций давления потока и колебания крутящего момента на валу;

- измерение крутящих моментов на лопатках направляющего аппарата;
- определение осевого гидравлического усилия;
- тарирование спирального расходомера Винтер–Кеннеди.

3. Испытания модельных ПЧ ГТ ПЛ20 Кременчугской ГЭС

3.1 Основные параметры модели

Модели ПЧ ГТ Кременчугской ГЭС выполнены геометрически подобными прототипу в масштабе 1/17,3913 (равен отношению диаметров модельного и натурного РК). Принятый диаметр РК модели ($D = 460$ мм) удовлетворяет требованиям Кода ИЕС60193.

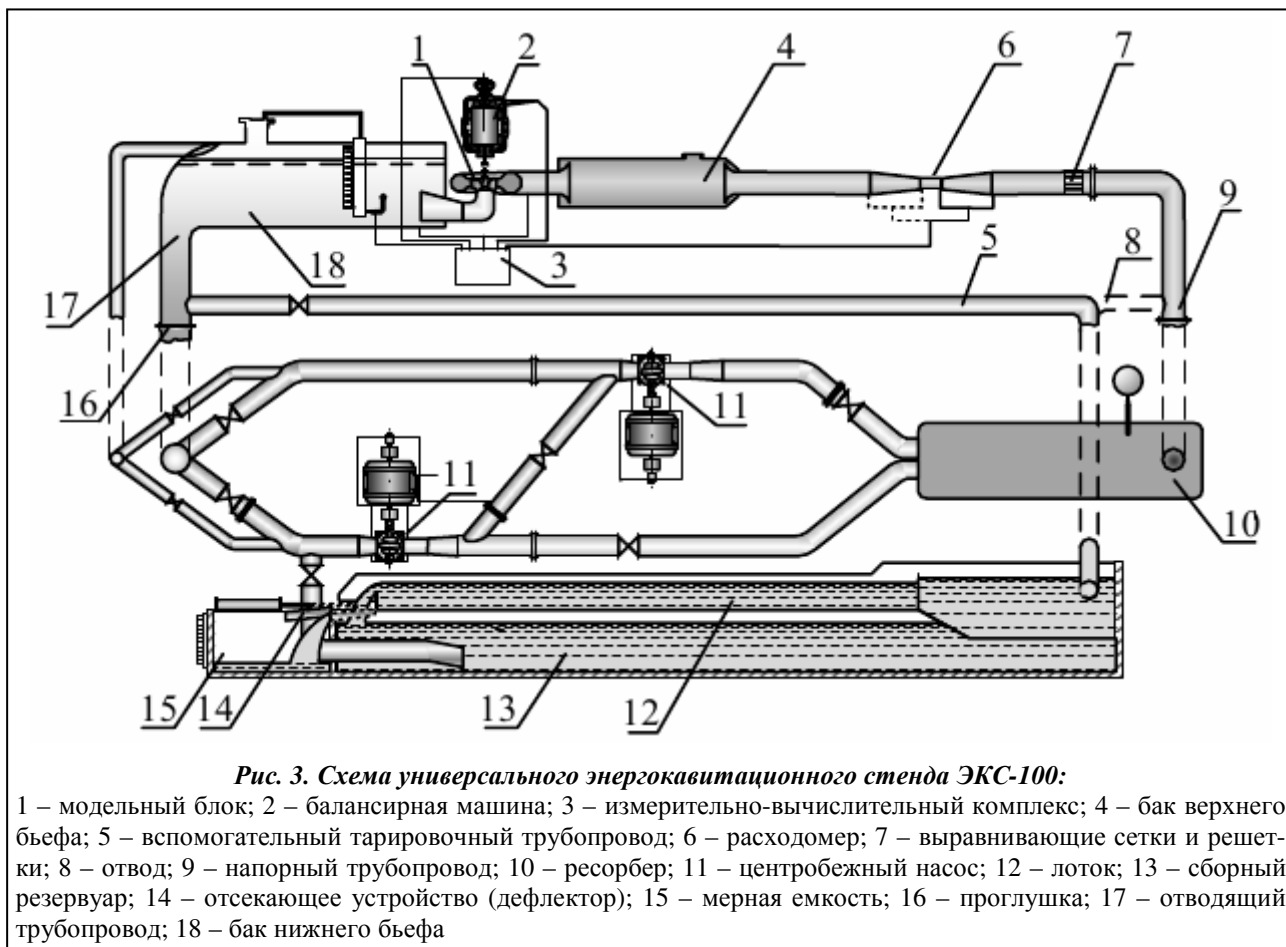
ПЧ модельной осевой ПЛ ГТ Кременчугской ГЭС включает СК, статор, НА, РК и отсасывающую трубу (ОТ).

Основные характеристики элементов ПЧ модельных ГТ: СК с трапециевидальными меридиональными сечениями, развитыми вниз, и углом охвата в плане $\varphi_{\text{сп}} = 180^\circ$; решетка статора имеет 17 колонн, включая зуб спирали; лопатки НА симметричного профиля УП-32-2 высотой $b_0 = 0,4D$, диаметром расположения осей поворота лопаток $D_0 = 1,1625D$. Параметры рабочих колес описаны выше. Основные характеристики ОТ: высота $h = 1,915D$, длина $L = 4,1D$, колено типа 4А (рис. 4).

3.2 Испытания модельных ГТ для первого и второго этапов модернизации ГТ ПЛ20 Кременчугской ГЭС

Проведены экспериментальные исследования моделей ПЧ с РК ПЛ20/661, ПЛ20/3256, ПЛ20/3271у, ПЛ20/3300 и различными вариантами профилей лопаток НА типа ВН-31 и УП-32-2. Они включали энергетические и кавитационные испытания.

В процессе энергетических испытаний модельных ПЧ с исследуемыми РК и НА определялись значения КПД, расхода и мощности модели при различных углах установки лопастей РК β , с интервалом $\Delta\beta = 5^\circ$. На каждом β испытания проводились в широком диапазоне приведенной частоты вращения, при открытиях НА (от $a_0 = 5$ мм до $a_0 = 40$ мм, с шагом $\Delta a = 5$ мм), обеспечивающих получение



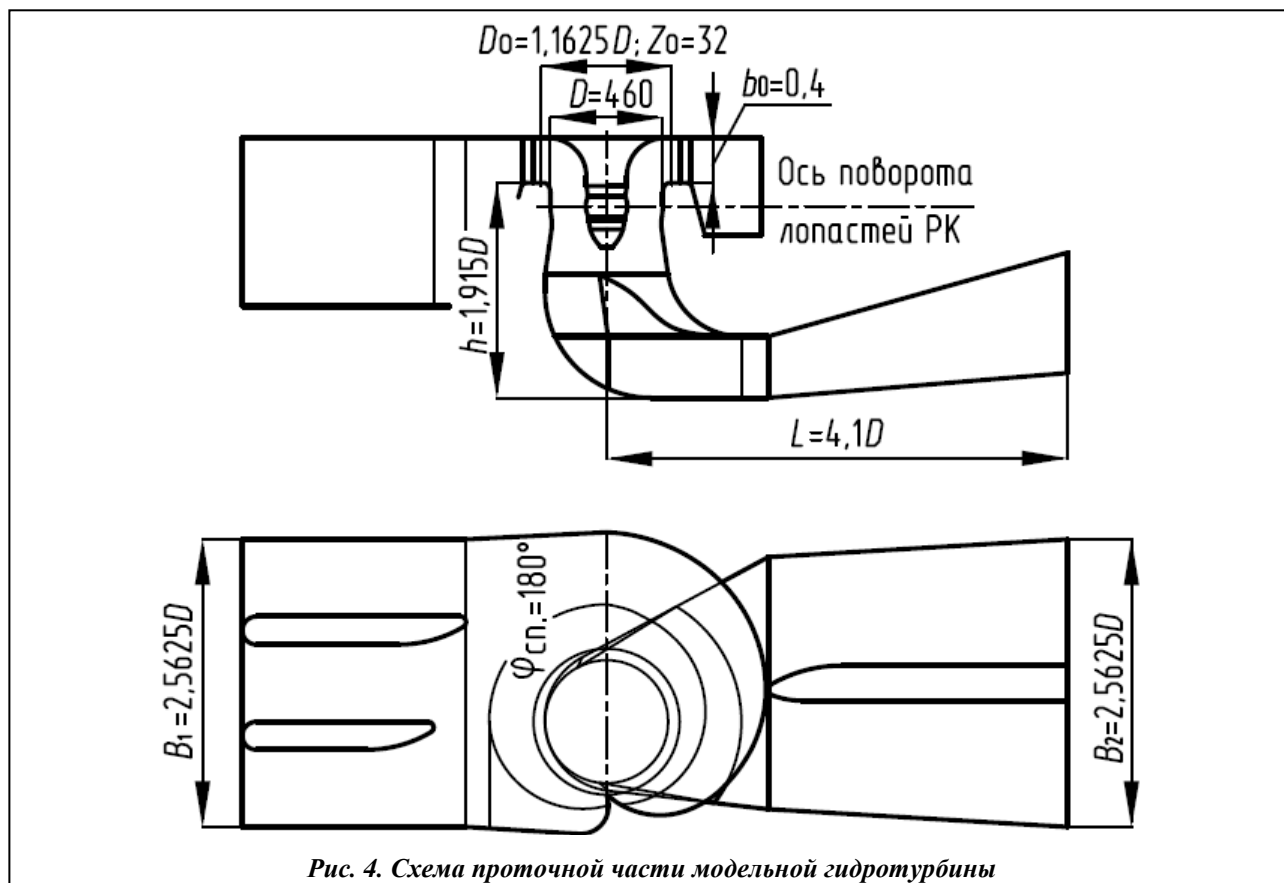


Рис. 4. Схема проточной части модельной гидротурбины

ние значений максимального КПД в комбинаторных точках.

На основании результатов модельных испытаний построены главные универсальные характеристики модельных ПЛ ГТ в координатах $n_1' - Q_1'$ (приведенная частота вращения – приведенный расход модели).

Кавитационные испытания проводились с целью определения критического коэффициента кавитации σ при углах установки лопастей РК, охватывающих весь диапазон работы прототипа по нагрузкам от 40 до 100% при значениях приведенной частоты вращения n_1' , соответствующей фиксированным напорам ГЭС. По результатам измерений строились срывные зависимости $\eta_m, Q_1', P_1' = f(\sigma)$, по которым определялось значение коэффициента кавитации σ_1 , в соответствии с требованием Кода ИЕС60193.

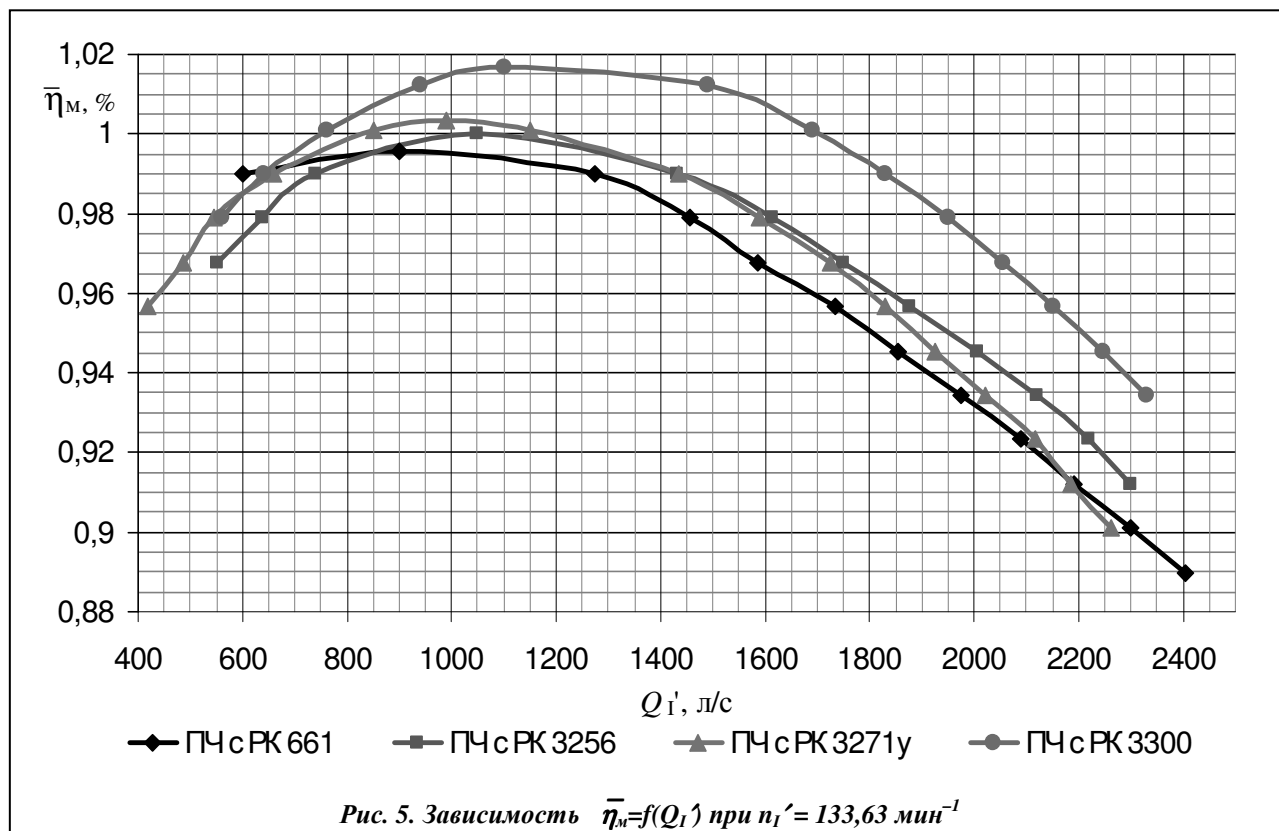
На рис. 5 представлены зависимости относительного КПД модели от приведенного расхода базовой и модернизированных ПЧ при $n_1' = 133,63 \text{ мин}^{-1}$, соответствующей расчетному напору $H_p = 14,0 \text{ м}$. Под относительным КПД η_m понимается отношение КПД проточных частей с модернизированным и базовым РК.

Как видно из приведенного графика, в результате разработки новых ПЧ при модернизации ГТ Кременчугской ГЭС удалось повысить значения КПД во всем диапазоне расходов как на первом этапе модернизации, так и на втором.

В таблице приведены параметры оптимальных режимов, значения относительного максимального КПД модели η_m и критического кавитационного коэффициента $\sigma_{кр}$ в испытанных ПЧ.

Из анализа приведенных в таблице данных видно, что в оптимальной зоне РК ПЛ20/3271у по своим показателям превосходит как базовое стационарное ПЛ20/661, так и модернизированное ПЛ20/3256. Приведенный расход у РК ПЛ20/3271у на 125 л/с больше, а относительный КПД модели на 1 % выше, чем у базового. Модернизированная ПЧ с РК ПЛ20/3256 уступает по величине приведенного расхода на 13 л/с и КПД на 0,7% колесу ПЛ20/3271у.

Приведенная частота вращения РК ПЛ20/3271у возросла на $7,5 \text{ мин}^{-1}$ по отношению к базовому и на $4,5 \text{ мин}^{-1}$ по отношению к модернизированному ПЛ20/3256. Критический коэффициент



кавитации у РК ПЛ20/3271у выше на 0,01 по сравнению с базовым колесом. Полученное значение $\sigma_{кр}$ обеспечивается требуемыми запасами по высотам отсасывания. Рабочее колесо ПЛ20/3256 имеет худшие кавитационные показатели по сравнению с другими колесами и поэтому в дальнейшем в проекте модернизации не рассматривалось как приоритетное.

Результаты испытаний ПЧ с РК ПЛ20 для первого и второго этапов модернизации ГТ Кременчугской ГЭС

Марка РК		Профиль лопатки НА	Оптимальный режим			
			Приведенная частота вращения n'_1 , мин ⁻¹	Приведенный расход Q'_1 , л/с	КПД $\bar{\eta}_m$, %	Критический кавитационный коэффициент $\sigma_{кр}$
Базовое РК	ПЛ20/661	ВН-31	140	1000	100	0,3
Первый этап	ПЛ20/3256	УП-32-2	143	1112	100,3	0,415
	ПЛ20/3271у	УП-32-2	147,5	1125	101	0,31
Второй этап	ПЛ20/3300	УП-32-2	133,5	1175	101,7	0,25

РК ПЛ20/3300 с пятью лопастями спроектировано достаточно быстроходным, кавитационно стойким и с более высокими энергетическими показателями по сравнению со стационарным ПЛ20/661. Так, приведенный расход РК ПЛ20/3300 увеличился на 175 л/с и КПД на 1,7% по сравнению с базовым колесом. Критический коэффициент кавитации уменьшился на 0,05.

По результатам эксперимента выявлено влияние старого профиля лопаток НА типа ВН-31 и нового УП-32-2 на характеристики гидротурбин. Замена старого профиля лопатки НА на новый привела к смещению линии ограничения мощности в сторону больших значений приведенных расходов на главных универсальных характеристиках моделей, а также увеличению КПД как в оптимуме, так и на линии 5% запаса по мощности. Поэтому по совокупности энерго-кавитационных показателей РК ПЛ20/3271у и РК ПЛ20/3300 с новыми профилями лопаток НА были приняты в рабочие проекты для первого и второго этапов модернизации.

В этих ПЧ проведены заключительные комплексные модельные испытания. Кроме энергетических и кавитационных выполнены разгонные, пульсационные испытания, измерения моментов на лопатках НА, измерения моментов и осевого гидравлического усилия на лопастях РК.

Проведены контрольные модельные испытания в присутствии представителей Заказчика, результаты испытаний подтвердили выполнение контрактных условий по обеспечению значений мощности турбины, достижению средневзвешенного КПД и др. согласно функциональным гарантиям.

Заключение

Выполнен комплекс расчетно-теоретических и экспериментальных исследований по разработке лопастных систем для модернизации гидротурбин ПЛ20 Кременчугской ГЭС. Приведены экспериментальные зависимости относительного КПД модели от приведенного расхода, а также сравнение энергетических и кавитационных параметров испытанных ПЧ на оптимальных режимах работы. Показано преимущество усовершенствованных ПЧ как по энергетическим, так и кавитационным показателям.

Согласно условиям контракта для реконструкции ГТ Кременчугской ГЭС ПАО «Турбоатом» подтвердил основные показатели турбин: номинальную и максимальную мощность, значения КПД, кавитационные показатели.

Усовершенствованные РК ПЛ20/3271у были изготовлены и смонтированы на гидроагрегатах № 2 и № 3, НА с профилем лопатки типа УП-32-2 на гидроагрегате № 3 был заменен, а на № 2 его замена не выполнялась по требованию Заказчика. Выполнен ввод в эксплуатацию гидроагрегатов № 2 и № 3.

Гидроагрегат № 7 с РК ПЛ20/3300 и лопатками НА типа УП-32-2 введен в эксплуатацию после модернизации. Гидроагрегаты № 8 и № 9 находятся на этапе реконструкции.

Планируется третий этап реконструкции Кременчугской ГЭС – двух агрегатов (станционный № 1 и № 4).

Литература

14. Субботин, В. Г. Оборудование ОАО «Турбоатом» для гидроэлектростанций Украины: модернизация, реабилитация и перспективы создания новых типов / В. Г. Субботин, Е. В. Левченко, В. Н. Ефименко // Гидроэнергетика Украины. – 2009. – № 2. – С. 33–43.
15. Линник, А. В. Современный уровень и основные направления развития гидротурбостроения в Украине / А. В. Линник, В. Д. Хаитов // Пробл. машиностроения. – 2010. – Т. 13, № 1. – С. 11–18.
16. Поташиник, С. И. Стратегия развития гидроэнергетики Украины на период до 2030 г. Концептуальные положения // Энерг. политика Украины. – 2005. – № 7–8. – С. 62–64.
17. Этинберг, И. Э. Гидродинамика гидравлических турбин / И. Э. Этинберг, Б. С. Раухман. – Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с.
18. Этинберг, И. Э. Теория и расчет проточной части поворотно-лопастных гидротурбин / И. Э. Этинберг. – Л.: Машиностроение, 1965. – 350 с.
19. Раухман, Б. С. Расчет обтекания пространственных решеток профилей гидротурбин с программированием на ЭЦВМ. РТМ 24.023.07. – Л. – 1972. – 33 с.
20. Гладышев, С. В. Разработка проточных частей поворотно-лопастных гидротурбин в ОАО «Турбоатом» / С. В. Гладышев // Пробл. машиностроения. – 2003. – Т. 6, № 2. – С. 74–84.
21. Линник, А. В. Экспериментальный стенд ПАО «Турбоатом» для физического моделирования гидродинамических процессов в проточных частях моделей поворотно-лопастных гидротурбин / А. В. Линник, А. В. Рябов // Пробл. машиностроения. – 2014. – Т. 14, № 3. – С. 11–18.
22. МЭК 60193. Модельные приемо-сдаточные испытания гидравлических турбин, насосов, гидроаккумулирующих станций и насос-турбин. – 1999. – 569 с.

Поступила в редакцию 06.09.16