

12. *Перельман Р. Г.* Эрозионная прочность деталей и энергоустановок летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 245 с.
13. *Яблоник Р. М.* Экспериментальное исследование эрозионной стойкости лопаточных материалов / Р. М. Яблоник, В. В. Поддубенко // Энергомашиностроение. – 1975. – № 11. – С. 29-31.
14. *Пряхин В. В.* Проблемы эрозии турбинных рабочих лопаток / В. В. Пряхин, О. А. Поваров, В. А. Рыженков // Теплоэнергетика. – 1984. – № 10. – С. 25–30.
15. *Baker D.* The resistance of materials to impact erosion damage / D. Baker, K. Jolliffe, D. Pearson // Phil. Trans. the Royal Society London. – Ser. A. – 1966. – **260**, № 1110. – P. 193–203.
16. *Поваров О. А.* Исследование эрозионного износа рабочих лопаток паровых турбин / О. А. Поваров, Б. Станиша, В. А. Рыженков // Теплоэнергетика. – 1988. – № 4. – С. 66–69.
17. *Гаркуша А. В.* Аэродинамика проточной части паровых турбин. – М.: Машиностроение, 1983. – 184 с.
18. *Воробьев Ю. С.* Колебания лопаточного аппарата турбомашин. – Киев: Наук. думка, 1988. – 224 с.
19. *Шубенко А. Л.* Влияние эрозии на основные эксплуатационные характеристики рабочей лопатки последней ступени цилиндра низкого давления мощной паровой турбины. Часть 1. Прогнозирование эрозионной опасности в последних ступенях энергетических турбин / А. Л. Шубенко, А. Э. Ковальский, Ю. С. Воробьев, Г. Н. Картмазов, В. Н. Романенко // Пробл. машиностроения. – 2009. – **12**, № 4. – С. 7–16.
20. *Ковальский А. Э.* Обоснование толщины и условий нанесения вакуумного противозерозионного покрытия для рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин / А. Э. Ковальский, Г. Н. Картмазов, В. В. Кунченко // Авиаци.-косм. техника и технология. – 2006. – № 6 (32). – С. 5–18.

Поступила в редакцию
05.12.09

УДК 621.224

А. В. Линник
В. Д. Хаитов

Открытое акционерное общество «Турбоатом»
(г. Харьков, E-mail: office@turboatom.com.ua)

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГИДРОТУРБОСТРОЕНИЯ В УКРАИНЕ

Дана оцінка технічного рівня вітчизняних гідротурбін. Освітлено накопичений досвід та роль ВАТ «Турбоатом» у створенні та виготовленні гідротурбінного обладнання, розглянуто конструктивні особливості гідравлічних турбін. Проведено аналіз стану наукових досліджень і експериментальної бази галузі в ВАТ «Турбоатом».

Дається оцінка технічного рівня вітчизняних гідротурбін. Висвітлено накопичений досвід та роль ВАТ «Турбоатом» у створенні та виготовленні гідротурбінного обладнання, розглянуто конструктивні особливості гідравлічних турбін. Проведено аналіз стану наукових досліджень і експериментальної бази галузі в ВАТ «Турбоатом».

Технический уровень гидротурбин

Технический уровень современных гидротурбин характеризуется следующими основными показателями:

- уровнем максимального КПД;
- коэффициентом быстроходности;
- уровнем кавитации и абразивного износа проточной части;
- уровнем пульсации давления в проточной части;
- уровнем вибрации опорных узлов (направляющий подшипник, крышка турбины);

– диапазоном работы турбины по напорам и мощности.

Уровень отечественных гидротурбин оценивается путем сравнения приведенных выше показателей с аналогичными показателями гидротурбин ведущих зарубежных фирм (в первую очередь, европейских фирм «VOITH SIEMENS», «ALSTOM», «ANDRITZ HYDRO» и др.)

Наиболее важным показателем является уровень КПД, который есть основной гарантийной сдаточной характеристикой турбины, подтверждаемой во время проведения приемосдаточных испытаний модельной турбины и натурных испытаний на гидроэлектростанциях (ГЭС). В современных тендерах на поставку электромеханического оборудования за невыполнение гарантированных значений КПД накладываются очень жесткие штрафные санкции: примерно 1 млн. дол США за 0,1% недостигнутого значения КПД.

Многообразие природных условий (сочетание напоров и расходов), особенности компоновки, строительства ГЭС приводит к тому, что в гидроэнергетике используют гидротурбины различных типов и классов.

Единственным на Украине заводом, производящим гидравлические турбины и предтурбинные затворы, является ОАО «Турбоатом» (ранее Харьковский турбинный завод). Ниже приводится номенклатура выпускаемого предприятием оборудования:

- гидротурбины поворотного-лопастного типа с маслonaполненными рабочими колесами и экологически чистыми рабочими колесами (без масла в полости втулки рабочего колеса в зоне уплотнения лопастей) на напоры 6,0...70,0 м мощностью 10,0...230,0 МВт;
- гидротурбины радиально-осевого типа на напоры 30,0...405,0 м мощностью 10,0...615,0 МВт;
- горизонтальные капсульные гидротурбины мощностью 5,0...40,0 МВт;
- обратимые гидромашины на напоры 50,0...170,0 м мощностью от 40,0...400,0 МВт;
- дисковые затворы диаметром от 1,0 до 7,6 м на напоры 10,0...230,0 м;
- шаровые затворы диаметром от 0,8 до 4,2 м на напоры до 600,0 м;
- встроенные цилиндрические затворы диаметром от 3,43 до 10,74 м на напоры до 310,0 м;
- турбины гидравлические для малых ГЭС мощностью до 25,0 МВт;
- миниГЭС мощностью до 800,0 кВт;
- микроГЭС мощностью 5,0...100,0 кВт.

На сегодняшний день заводом изготовлено около 500 реактивных гидравлических турбин и 480 затворов (предтурбинные и затворы для насосных станций).

Выпускаемые заводом типы турбин характеризуются следующими энергетическими показателями.

Капсульные гидротурбины применяются при низких напорах (максимум до 25 м) и больших расходах воды, значительно удешевляют стоимость строительства ГЭС и обладают повышенными энергетическими показателями (КПД и пропускная способность) благодаря прямоточному тракту.

Мощности таких турбин невелики (5,0...40,0 МВт), а диаметры рабочих колес значительны и достигают 6,0 м (Киевская, Каневская ГЭС), см. рис. 1.

В Украине горизонтальными капсульными гидротурбинами оснащены Киевская ГЭС – 20 агрегатов, Каневская ГЭС – 24 агрегата, Днестровская буферная ГЭС – 3 агрегата. Горизонтальные капсульные агрегаты экспортировались в Норвегию: ГЭС Клостерфосс – 2 гидротурбины; в Грецию: ГЭС Пурнари II – 2 гидротурбины; в Азербайджан: Еникендская ГЭС – 4 турбины, см. рис. 2. Производство горизонтальных капсульных гидротурбин находится в Украине на современном уровне. Они имеют высокие энергетические показатели и успешно конкурируют с лучшими иностранными фирмами (в оптимальном режиме уровень КПД составляет 92–92,55% на модели и 94,5–95% на натуре).

Поворотного-лопастные вертикальные турбины находятся на втором месте в мировой гидроэнергетике после радиально-осевых. По уровню КПД турбины производства ОАО «Турбоатом» не уступают зарубежным аналогам. Так, введенные в эксплуатацию в 2004–

2008 гг. гидротурбины Вилюйской ГЭС-3 (Россия) единичной мощностью 92,5 МВт, при расчетном напоре 22,7 м и диаметре рабочего колеса 7,5 м имеют КПД 95,1%.

Наиболее мощными турбинами этого типа являются гидротурбины, изготовленные ранее заводом для ГЭС Сальто Гранде (Аргентина – Уругвай) – 138,0 МВт, Шамкирской ГЭС (Азербайджан) – 195,0 МВт, Шулбинской ГЭС (Казахстан) – 230,0 МВт, Днестровской ГЭС-1 (Украина) – 120,0 МВт, Миатлинской ГЭС (Россия) – 113,0 МВт, см. рис. 3.

Для украинского энергетического рынка поворотнороторные турбины изготавливаются сегодня только при реконструкции оборудования ГЭС.

Радиально-осевые турбины нашли наиболее широкое применение в гидроэнергетике. В этом классе производство гидротурбин в Украине находится на мировом уровне.

В последние годы были поставлены в дальнее зарубежье мощные турбины для следующих гидроэлектростанций:

- ГЭС Пьедра дель Агила (Аргентина) – мощность турбины 356,0 МВт, расчетный напор 108,0 м, диаметр рабочего колеса 6,0 м;
- ГЭС Агуамильна (Мексика) – мощность турбины 325,0 МВт, расчетный напор 145,0 м, диаметр рабочего колеса 5,2 м;
- ГЭС Тери (Индия) – мощность турбины 255,0 МВт, расчетный напор 188,0 м, диаметр рабочего колеса 4,1 м;
- ГЭС Эль-Кахон (Мексика) – мощность турбины 380,33 МВт, расчетный напор 156,54 м, диаметр рабочего колеса 5,3 м.

В настоящее время ОАО «Турбоатом» изготавливаются две гидравлические турбины со встроенным кольцевым затвором для ГЭС Ла Йеска (Мексика) (максимальная мощность турбины 426,13 МВт, максимальный напор 186,7 м, диаметр рабочего колеса 5,3 м). Максимальное значение КПД модели составило 94,0% (в пересчете на натуру максимальное значение КПД будет 96,02%). Средневзвешенный КПД составил 95,72%. Благодаря высокому уровню украинских гидротурбин в данном классе в тендерных торгах по ГЭС Ла Йеска ОАО «Турбоатом» сумело опередить такие известные фирмы, как «VOITH SIEMENS», «ALSTOM», «VA TECH HYDRO».



Рис. 1. Монтаж роторной части гидроагрегата Каневской ГЭС, Украина

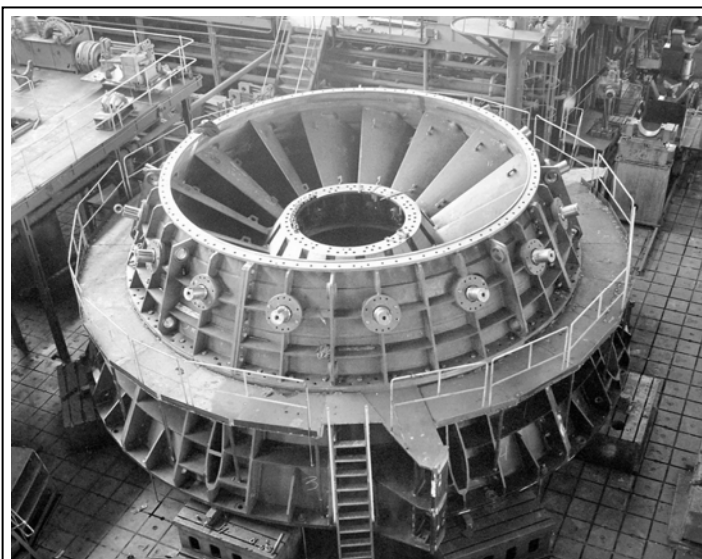


Рис. 2. Контрольная сборка направляющего аппарата гидротурбины Еникендской ГЭС, Азербайджан



Рис. 3. Рабочее колесо Шамкирской ГЭС, Азербайджан

Обратимые гидромашинны (насос-турбина)

Украинским турбостроителям принадлежит приоритет в создании и освоении в 1968–1978 гг. первых в СССР обратимых радиально-осевых гидромашин типа ОРО75-В-465, выполняющих последовательно функции турбины или насоса для Киевской ГАЭС. Они сыграли важную роль в развитии данного вида энергетического оборудования и гидроэлектростанций как в Украине, так и в России. С учетом опыта эксплуатации в 1986–1987 гг. была осуществлена модернизация обратимых гидромашин Киевской ГАЭС.

Модернизация включала замену установленных рабочих колес и лопаток направляющих аппаратов на новые с улучшенными гидродинамическими качествами, разработанные совместно Турбоатомом и ИПМаш НАН Украины, позволившие при тех же напорах повысить не только номинальную мощность в турбинном режиме более чем на 10% и КПД на 3–4% (в насосном КПД повышен на 2,2%), но, что особенно важно, существенно улучшить вибрационные показатели гидромашин во всех режимах работы ГАЭС, доведя их до уровня международных норм.

Сооружаемая в настоящее время Днестровская ГАЭС (рис. 5) комплектуется семью обратимыми гидромашинными, максимальная единичная мощность гидромашин в турбинном режиме составляет 390,0, в насосном режиме 420,0 МВт. Максимальный КПД (по данным модельных испытаний при пересчете на прототип) составляет соответственно 93,5 и 92,8%.

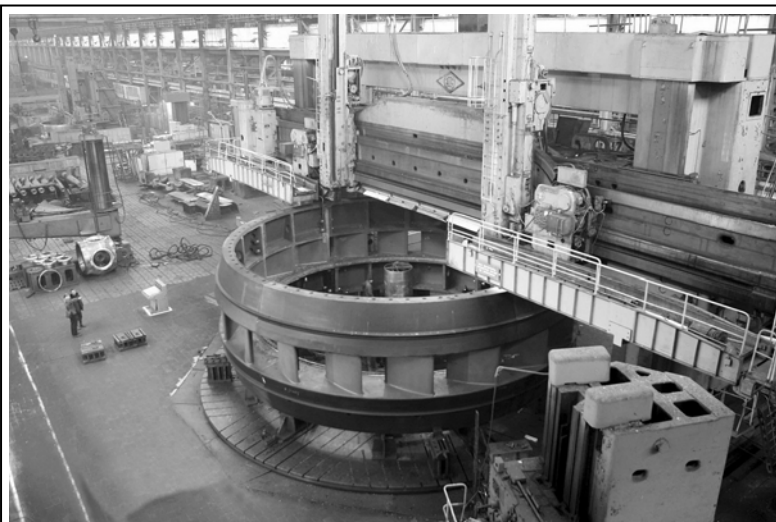


Рис. 4. Транспортировка рабочего колеса на стройплощадку ГЭС Эль Кахон, Мексика

Состояние научных исследований и экспериментальной базы отрасли

За прошедшее десятилетие произошел огромный скачок в развитии электроники и компьютерной техники, что, в свою очередь, дало возможность развиваться различным направлениям теоретических исследований в гидротурбиностроении. Появился ряд пакетов прикладных программ в области газо- и гидродинамики, которые позволили проектировать, в частности, гидромашинны на новом уровне. Но в тоже время это дало возможность вывести

на совершенно другой уровень и экспериментальные исследования. В соответствии с международной практикой приёмосдаточные испытания модели являются одной из основ для определения энергокавитационных качеств разрабатываемых конструкций гидротурбин. На сегодняшний день ни один контракт на поставку крупных гидротурбин не обходится без приёмосдаточных модельных исследований, которые дают возможность наиболее точно оценить и прогнозировать характеристики натуральных гидромашин (прототип). Они предполагают наличие у поставщика гидротурбинного оборудования гидравлических энергокавитационных стендов, соответствующих стандарту ИЕС 60193 и прошедших сертификацию.



*Рис. 5. Обработка статора гидромашины
Днестровской ГАЭС, Украина*

Гидротурбинная лаборатория ОАО «Турбоатом» является одной из крупнейших среди ведущих гидромашиностроительных фирм мира как по оснащённости экспериментальным, измерительным и вычислительным оборудованием, так и по возможности выполнения научно-исследовательских работ в области гидротурбостроения. В состав лаборатории входят шесть крупных гидравлических стендов для отработки энергетических, кавитационных, силовых, пульсационных и других специальных характеристик гидромашин и затворов. Стенды оснащены пускорегулирующей, контрольной и измерительной аппаратурой и полностью соответствуют требованиям Международного Кода ИЕС 60193, но, как и любое научно-исследовательское подразделение, гидротурбинная лаборатория требует постоянных капитальных вложений. Кроме гидравлических стендов, лаборатория располагает рядом специальных экспериментальных установок для проведения исследований по усовершенствованию узлов и механизмов гидротурбин и затворов, проверки работоспособности, надёжности и долговечности.

Силовое оборудование гидротурбинной лаборатории реконструировалось в последний раз в конце 80-х – начале 90-х годов. В настоящее время проводится модернизация двух основных энергокавитационных стендов ЭКС-100 и ЭКС-150. Измерительно-вычислительный комплекс в лучшем состоянии, т.к. требует меньших финансовых и трудовых затрат для внедрения, но также нуждается в модернизации, потому что морально устаревает.

Чтобы оставаться конкурентоспособным, поставщику мало иметь современный стенд, необходимо также уделять внимание качеству изготовления моделей рабочих колёс (точности изготовления и чистоте поверхности), применению современных материалов, позволяющих изготавливать детали высокого качества.

Стратегия развития гидроэнергетики в Украине

В мировой практике эксплуатации энергетических систем развитых стран принято считать, что в энергообъединениях с преимуществом генерации ТЭС и АЭС в структуре мощностей ГЭС и ГАЭС должны составлять не менее 15%. В балансе мощностей энергосистемы Украины гидроэлектростанции не превышают 9%, немногим лучше ситуация в России и других странах СНГ. Сложившаяся ситуация характеризует крайне неоптимальную струк-

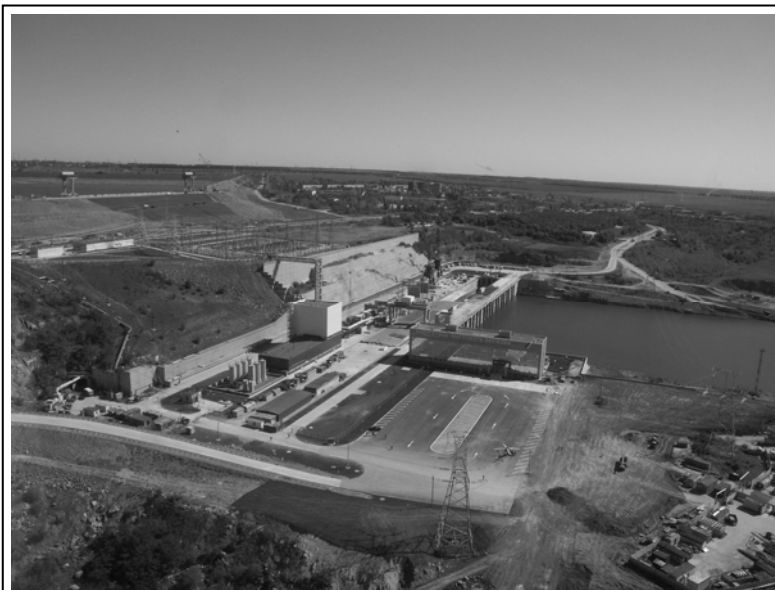


Рис. 6. Общий вид Ташлыкской ГАЭС, Украина

туру генерирующих мощностей и обуславливает дефицит как маневренных, так и регулирующих энергоисточников.

В Украине не предусматривается строительства новых крупных гидроузлов в ближайшее время. Первый, наиболее реальный путь ввода новых мощностей – это завершение строительства гидроэнергетических объектов, заложенных еще в советские годы и в которые вложены значительные средства.

Первым по значимости строительным объектом в гидроэнергетике, который

возводится в Украине, является Днестровская гидроаккумулирующая станция мощностью 2,8 млн. кВт. Она должна стать важным стабилизирующим звеном национальной энергосистемы, обеспечив надежную работу атомных станций. Днестровская ГАЭС будет нести до 30% циклической нагрузки и существенно уменьшит её колебания, улучшит качество вырабатываемой энергосистемой Украины электроэнергии. Первый агрегат Днестровской ГАЭС успешно прошел пусковые испытания как в насосном, так и турбинном режимах, и 21 декабря 2009 года государственная комиссия подписала Акт о приёме первого агрегата в опытно-промышленную эксплуатацию. Завершение строительства первой очереди Днестровской ГАЭС в составе трёх агрегатов запланировано на конец 2012 года.

Вторым по значимости строительным объектом является Ташлыкская ГАЭС (рис. 6), в настоящее время на ГАЭС эксплуатируются два агрегата, суммарная установленная мощность которых в режиме генерации электроэнергии составляет 302,0 МВт, в насосном режиме – 433,0 МВт. В 2010 году планируется ввести в эксплуатацию третий агрегат. Завершение строительства Ташлыкской ГАЭС в составе шести агрегатов позволит увеличить долю маневренных мощностей на 906,0 МВт.

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

Как правило, модернизация силового оборудования затрагивает основные рабочие органы турбины – рабочее колесо, лопатки направляющего аппарата и др. и не касается строительной части блока. С одной стороны, это снижает общие затраты, а с другой – ограничивает поиск оптимального решения по проточной части гидротурбины из-за сохранения, как правило, таких элементов тракта, как спиральная камера, статор, отсасывающая труба. Таким образом, в пределах существующих размеров блока и форм подвода и отвода требуется достичь максимально возможного уровня основных параметров турбины (номинальная и максимальная мощность, КПД, запасы по кавитации, допустимый диапазон работы по нагрузкам и др.) за счет совершенства рабочего процесса в основном в рабочем колесе. При этом решаются задачи не только обеспечения высокой надежности энергоустановок с учетом все более ужесточающихся требований энергосистем по режимам работы, но и вопросы обеспечения максимальной экологической безопасности. Для гидроэлектростанций Украи-

ны, оснащенных в значительной мере крупными поворотными лопастными турбинами с масломполненными рабочими колесами (нередко под большим давлением), отработавшими свой ресурс, данная проблема становится все более актуальной [1].

Из наиболее значимых в этой области следует отметить работы по модернизации оборудования ГЭС Днепровского каскада, которые составляют основу гидроэнергетики Украины.

Из 93 агрегатов, установленных на ГЭС Днепровского каскада, 78 осна-

щены поворотными лопастными гидротурбинами. В связи с тем, что основное оборудование каскада отработало по 30–50 лет, выработало свой нормативный ресурс, морально и физически устарело, не обеспечивало в полной мере современных требований энергосистемы, и было принято решение о его модернизации.

Для реализации поставленных задач в ОАО «Турбоатом» проведены комплексные расчетно-экспериментальные работы по созданию проточных частей с условием сохранения спиральных камер, статоров и отсасывающих труб действующих гидротурбин для всех ГЭС каскада.

Принятые решения при модернизации горизонтальных капсульных гидротурбин Киевской ГЭС позволили увеличить номинальную мощность гидротурбины с 17,2 до 21,0 МВт, средневзвешенный КПД – на 1,5%, а при номинальной мощности увеличение КПД составило 4,8%. Разработанная конструкция нового рабочего колеса дала возможность разгрузить от давления полость механизма поворота с 4,0 до 0,03 МПа, значительно увеличив экологическую безопасность ГЭС [2].

Отличительной чертой гидротурбин Каховской ГЭС является очень низкая для данной быстроходности отсасывающая труба (1,54D₁). Ограничения, обусловленные высотой отсасывающей трубы, вызвали определенные трудности при форсировке мощности модернизированной турбины. Математическое моделирование процесса течения в рабочих органах турбины с несколькими новыми расчетными вариантами рабочего колеса и направляющего аппарата позволило выбрать оптимальный вариант, который прошел всесторонние испытания на стенде в гидротурбинной лаборатории ОАО «Турбоатом». Применение новой лопастной системы и нового профиля лопаток направляющего аппарата дало возможность увеличить номинальную мощность турбины с 51,8 до 54,0 МВт исключительно за счет улучшения КПД (рис. 7). Увеличение КПД для различных режимов составило от 1 до 6% при сохранении или некотором увеличении кавитационных запасов и улучшении пульсационных характеристик [3]. Разработанная конструкция нового экологически чистого рабочего колеса позволяет полностью отказаться от необходимости заполнения маслом корпуса рабочего колеса (аналогичная конструкция рабочих колёс была в дальнейшем применена при модернизации гидротурбин Кременчугской ГЭС и Днепровской ГЭС-2).

В соответствии с принятой Программой реконструкции ГЭС Днепровского каскада работы по реабилитации гидроэлектростанций были поделены на два этапа. В результате реализации I этапа (завершен в 2002 г.) для трех ГЭС каскада было поставлено 18 комплек-



Рис. 7. Контрольная сборка рабочего колеса Каховской ГЭС, Украина

тов нового гидротурбинного оборудования, в том числе 10 для Киевской ГЭС, шесть для Днепро ГЭС – I и два для Каховской ГЭС.

Во второй этап реконструкции включены 64 агрегата, срок выполнения работ – декабрь 2017 года [4].

На сегодняшний день для ГЭС Днепровского каскада: реконструировано и введено в эксплуатацию 38 гидроагрегатов, в стадии монтажа находится четыре гидроагрегата, в стадии производства на ОАО «Турбоатом» – восемь гидротурбин. Всего же в результате модернизации, при минимальных капитальных затратах (20–30% от полной стоимости нового оборудования) установленная мощность ГЭС Днепровского каскада увеличится примерно на 350,0 МВт, существенно возрастут показатели надежности, эффективности и экологической безопасности, срок службы оборудования продлится еще на 40 лет.

Третьим направлением стратегического развития гидроэнергетики Украины является развитие малой энергетики.

В конце 60-х годов прошлого столетия в Украине работало около 1000 малых ГЭС (МГЭС). К настоящему времени сохранилось 160, из них работает только 74. Установленная мощность МГЭС составляет 106,0 МВт, выработка электроэнергии – от 278,0 до 395,0 млн. кВтч. в год в зависимости от метеорологических условий. При этом целесообразно экономический гидропотенциал малых рек Украины составляет около 3,75 млрд. кВтч. электроэнергии, то есть на сегодня освоено только порядка 10% потенциала.

Задачами, стоящими перед малой гидроэнергетикой, следует признать:

- реконструкцию действующих МГЭС;
- восстановление многих старых МГЭС, что потребует значительно меньших инвестиций и не принесет дополнительного экологического ущерба, связанного со строительством новых станций;
- восстановление законсервированных МГЭС, гидросооружения которых в настоящее время техногенно опасны для населенных пунктов;
- сооружение новых МГЭС на существующих водохранилищах водохозяйственного назначения;
- строительство новых МГЭС на реках Тиса и Днестр и на их притоках с целью комплексного решения проблем энергообеспечения западных областей и управляемой защиты прилегающих территорий от наводнений [5].

Литература

1. *Веремеенко И. С.* Полвека поиска и созидания – итоги и перспективы развития отечественного гидротурбостроения // Пробл. машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 4–25.
2. *Бугаец А. А.* Научные достижения гидротурбостроения и их внедрения в реконструкцию Днепровского каскада ГЭС / А. А. Бугаец, А. В. Линник // Гидроэнергетика Украины. – 2004. – № 2. – С. 15–20.
3. *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.
4. *Рассовский В. Л.* Второй этап реконструкции ГЭС – основа развития гидроэнергетики Украины // Энерг. политика Украины. – 2005. – № 7–8. – С. 67–70.
5. *Потаешник С. И.* Стратегия развития гидроэнергетики Украины на период до 2030 г. Концептуальные положения // Энерг. политика Украины. – 2005. – № 7–8. – С. 62–64.

Поступила в редакцию
11.02.10