

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 45: ТРАДИЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

Наведено короткий науково-технічний огляд про сучасний стан і перспективи розвитку світової гідроенергетики. Розглянуті основні схеми побудови і види гідралічних електричних станцій (ГЕС). Вказані переваги і недоліки ГЕС перед іншими видами електричних станцій, що генерують електрику. Приведені основні технічні характеристики найбільших ГЕС світу і України. Відмічена важлива роль гідроенергетики в об'ємах річного вироблення електроенергії у ряді країн світу. Позначені проблемні завдання в галузі гідроенергетики світу і України. Бібл. 21 рис. 13.

Ключові слова: гідроенергетика, гідроелектростанції, гідротурбіни, електрогідрогенератори, характеристики гідроелектростанцій, проблеми і перспективи розвитку світової гідроенергетики.

Приведен краткий научно-технический обзор о современном состоянии и перспективах развития мировой гидроэнергетики. Рассмотрены основные схемы построения и виды гидравлических электрических станций (ГЭС). Указаны преимущества и недостатки ГЭС перед другими видами электрических станций, генерирующих электричество. Приведены основные технические характеристики крупнейших ГЭС мира и Украины. Отмечена важная роль гидроэнергетики в объемах годовой выработки электроэнергии в ряде стран мира. Обозначены проблемные задачи в области гидроэнергетики мира и Украины. Библ. 21, рис. 13.

Ключевые слова: гидроэнергетика, гидроэлектростанции, гидротурбины, электрогидрогенераторы, характеристики гидроэлектростанций, проблемы и перспективы развития мировой гидроэнергетики.

Введение. По большому счету, природа на планете Земля сотворила удивительное вещество – воду, молекула которой, как всем нам известно, состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Это вещество в обычной молекулярной форме (легкая вода, состоящая из атомов изотопа водорода ^1H – протия и изотопа кислорода ^{16}O [1]) является основой жизнедеятельности всего сущего на нашей планете (возможно и не только на планете Земля!). Именно на ней базируются все основные физико-химические процессы обмена веществ в растительном и животном мире. По мере развития землянами цивилизации люди научились в своей жизнедеятельности использовать не только внутримолекулярную энергию воды, но и ее потенциальную энергию для приведения вначале в круговое вращение деревянных агрегатов с каменными жерновами мельниц для получения из зерна сельскохозяйственных культур муки и далее выпечки хлеба, а позже и круглого металлического ротора электрогенератора, вырабатывающего в обмотках своего статора электроэнергию. Для увеличения запасов в воде потенциальной энергии на пути ее движения и ее напора потребовалось сооружение железобетонных плотин (рис. 1) и соответственно огромных водохранилищ с большим перепадом (в десятки и сотни метров) уровней воды до и после плотин. В этой связи потребовались дорогостоящие и надежно работающие гидротехнические сооружения, обеспечивающие работу каждой мощной гидравлической электрической станции (ГЭС). Возможность серьезных аварий с прорывом плотины на таких сооружениях специалистами-гидроэнергетиками должна быть сведена к минимуму. В противном случае материальный ущерб и неизбежная гибель людей могут принимать огромных масштабов. Одним из подтверждений тому могут служить данные об одной из самых крупных аварий в истории мировой гидроэнергетики при прорыве плотины водохранилища Байньцяо на реке Жухэ (провинция Хэнань, Китай, 1975 г.), приведшей к гибели

примерно 171 тыс. человек и числу пострадавших в количестве около 11 млн. граждан КНР [2]. Данная катастрофа на китайской ГЭС по нанесенному обществу ущербу сопоставима с потрясшей весь цивилизованный мир атомной бомбардировкой США 6 августа 1945 г. японского г. Хиросима, за одно мгновение фактически полностью стертого с людьми и их домами с «лица» нашей планеты [3]. Какова роль ГЭС сейчас в балансе выработки в мире и Украине электроэнергии? Каковы перспективы развития гидроэнергетики? Постараемся ниже дать ответы на эти вопросы.

Целью статьи является составление краткого научно-технического обзора о современном состоянии и перспективах развития в мире гидроэнергетики.



Рис. 1. Впечатляющая и завораживающая наше воображение энергетическая мощь речной воды, сбрасываемой через открытые водоводы в железобетонной плотине с искусственно созданного водохранилища современной ГЭС [2]

1. Физические основы гидроэнергетики. Начнем с того, что укажем, что гидроэнергетика базируется на ГЭС – электростанциях, использующих в качестве стабильного источника энергии потенциально-кинетическую энергию водных масс [2]. Обычно ГЭС строят на полноводных реках, сооружая на них необходимые плотины и водохранилища. На рис. 2 приведена принципиальная схема построения ГЭС, содер-

© М.И. Баранов

жащая следующие основные устройства [2, 4]: массивную железобетонную плотину с напорными водоводами; машинный зал с установленными в нем гидроагрегатами, содержащими гидротурбины и электрогенераторы. Мощный поток воды с водохранилища по водоводам с помощью лопаток направляется на лопасти рабочего колеса гидротурбины, приведенной на рис. 3 конструкции. Круговое вращение лопастей рабочего колеса этой гидротурбины вызывает соответствующее вращение ее вертикально установленного массивного металлического вала, на котором установлен вращающийся обычно в горизонтальной плоскости ротор электрогенератора, обеспечивающий создание вращающегося и синусоидально изменяющегося во времени сильного магнитного поля с индукцией около 1 Тл в воздушном зазоре между ротором и статором электрогенератора (см. рис. 3).



Рис. 2. Принципиальная типичная схема построения ГЭС [2]

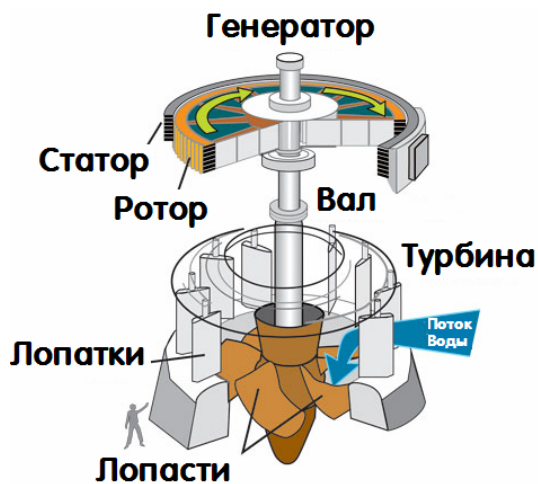


Рис. 3. Блочно-конструктивная схема, поясняющая принцип работы гидротурбины и физический механизм выработки электрической энергии на современной ГЭС [2]

Благодаря фундаментальному явлению электромагнитной индукции [1] в обмотках статора электрогенератора, пространственно и пофазно разнесенных между собой на 120° , вырабатывается трехфазная электродвижущая сила и соответственно высокий электрический потенциал. Наличие этого потенциала обеспечивает протекание переменного с промышленной частотой 50 Гц трехфазного электрического тока в первичной обмотке трансформатора, подключенного с одной стороны к выходным клеммам электрогенератора, а с другой стороны – к высоковольтной линии электропередачи, поставляющей электричество соответствующим потребителям. Элек-

трическая мощность ГЭС определяется главным образом напором и расходом воды, поступающей на лопасти ее гидротурбин. В меньшей мере она зависит от коэффициента полезного действия (КПД) гидротурбин (до 80 %) и электрогенераторов (до 98 %) [2, 4]. Из-за того, что по природным законам уровень воды в водохранилищах в течение года меняется, то специалисты-гидроэнергетики традиционно пользуются понятием циклической мощности ГЭС (например, в течение года, месяца, недели и суток) [2, 4].

1.1. Основная классификация ГЭС. В зависимости от принципа использования возобновляемых природных ресурсов и способа концентрации водных масс можно выделить ГЭС следующего типа [2, 4]:

- приплотинные ГЭС (железобетонные плотины, полностью перегораживающие реку, поднимают уровень ее воды до необходимой отметки; вода к гидротурбинам поступает непосредственно с русла реки);

- плотинные ГЭС (сооружаются при более высоких напорах речной воды, когда железобетонные плотины полностью перегораживают реку; здание ГЭС располагается за железобетонной плотиной в ее нижней части, а вода к гидротурбинам поступает по специальным напорным тоннелям или водоводам);

- деривационные ГЭС (сооружаются там, где велик уклон горной реки; необходимая концентрация речной воды для эффективной работы ее гидротурбин создается путем безнапорной или напорной деривации (термин «деривация» происходит от лат. слова «derivatio» – «отведение» [5]); вид применяемой на ГЭС деривации (вид отвода воды от основного русла реки) зависит от характера наклона (уклона) водовода, подающего речную воду к лопастям гидротурбин);

- гидроаккумулирующие ГЭС (сооружаются с целью сглаживания пиковых электрических нагрузок потребителей электроэнергии; вода в них предварительно мощными насосами закачивается с реки в специальный железобетонный верхний бассейн, а в нужный момент времени она по напорным водоводам с данного бассейна направляется на гидротурбины);

- приливные ГЭС (сооружаются обычно в скалистых местах каньонного типа с высоким уровнем морского прилива, достигающим в мире до 19 м [6]; железобетонная плотина с установленными у ее основания в специальных круглых каналах обратимыми гидротурбинами создает во время прилива огромный прибрежный бассейн морской или океанической воды; энергия этой движущейся воды используется гидротурбинами как во время прилива, так и отлива);

- волновые ГЭС (сооружаются в прибрежной морской акватории с высокими волнами; этот тип ГЭС преобразует потенциальную энергию морской воды, закачиваемую самими волнами в специальные емкости на поверхности моря, в электроэнергию).

В зависимости от уровня напора воды, подаваемой на гидротурбины, ГЭС подразделяются на [2, 4]:

- высоконапорные ГЭС (уровень напора воды в водоводах к ее гидротурбинам более 60 м);

- средненапорные ГЭС (уровень напора воды в водоводах к ее гидротурбинам от 25 до 60 м);

- низконапорные ГЭС (уровень напора воды в водоводах к ее гидротурбинам от 3 до 25 м).

В зависимости от уровня вырабатываемой электрогенераторами электрической мощности ГЭС подразделяются на следующие основные виды [2, 4]:

- мощные ГЭС (вырабатываемая ими электрическая мощность составляет более 25 МВт);
- среднемощные ГЭС (вырабатываемая ими электрическая мощность составляет от 5 до 25 МВт);
- маломощные (вырабатываемая ими электрическая мощность составляет не более 5 МВт).

1.2. Классификация и основные конструкции гидротурбин. На ГЭС в зависимости от уровня напора воды применяются разные конструкции гидротурбин. Различают следующие виды гидротурбин [2, 4]:

- поворотные лопастные гидротурбины (рис. 4);
- радиально-осевые гидротурбины (рис. 5);
- ковшовые гидротурбины (рис. 6).



Рис. 4. Общий вид новой современной мощной поворотной лопастной гидротурбины в момент ее установки на ГЭС [7]



Рис. 5. Общий вид перевозимого на ГЭС рабочего колеса современной мощной радиально-осевой гидротурбины [7]

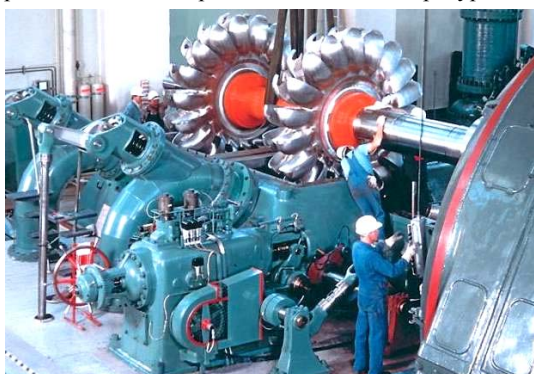


Рис. 6. Общий вид ковшовой гидротурбины, работающей на высоконапорной ГЭС, в момент ее техобслуживания (справа от двух ковшовой гидротурбины по продольной оси массивного стального вала виден корпус гидрогенератора) [7]

На рис. 4 приведен общий вид мощной поворотной лопастной гидротурбины для современной ГЭС [7].

Данный тип гидротурбины (реактивная турбина «Каплана» [7]) устанавливается на средненапорных и низконапорных ГЭС. Лопастей сложной формы в этой гидротурбине могут поворачиваться одновременно вокруг своей горизонтальной оси. Благодаря этому и изменению положения ее лопаток (см. рис. 3) регулируется вырабатываемая гидротурбиной мощность [7].

Поток воды в поворотной лопастной гидротурбине движется вдоль ее оси. Продольная ось этой турбины может располагаться как вертикально, так и горизонтально. При вертикальном расположении оси поток воды перед поступлением в рабочую камеру гидротурбины закручивается в спиральной камере, а затем спрямляется с помощью обтекателя. Это необходимо для равномерной подачи воды на лопасти такой турбины и соответственно уменьшения ее износа.

На рис. 5 представлен общий вид рабочего колеса мощной радиально-осевой гидротурбины, предназначенной для установки в машинном зале крупнейшей в России Саяно-Шушенской ГЭС плотинного типа с установленной мощностью до 6400 МВт [2, 4].

Радиально-осевые гидротурбины (реактивная турбина «Фрэнсиса» [7]) используются на высоконапорных ГЭС. Поток воды в этой гидротурбине вначале движется радиально (от периферии к ее центру), а затем – в осевом вертикальном направлении на выход с гидротурбины. Этот вид гидротурбин используется на ГЭС при создаваемых их плотинами напорах воды до 600 м и развиваемых ими мощностях до 640 МВт [7]. Из всех известных типов гидротурбин радиально-осевые гидротурбины обладают самым высоким КПД. Их недостаток – менее пологая рабочая характеристика, чем у поворотной лопастной гидротурбин [4, 7].

На рис. 6 приведен общий вид ковшовой гидротурбины, устанавливаемой на высоконапорных ГЭС.

Конструктивно ковшовые гидротурбины (турбина «Пелтона» [7]) сильно отличаются от поворотной лопастной и радиально-осевых гидротурбин. Они, как и паровые турбины [8], устанавливаются на общем с гидрогенератором горизонтальном массивном стальном валу. В этом типе гидротурбин вода под большим напором подается через сопла (практически как и водяной пар) по касательной к окружности, проходящей через середину каждого из ее высокопрочных ковшовой специальной формы, размещенных по обе стороны ее колеса (см. рис. 6). Струи воды, вылетающие с сопел с большой скоростью, приводят в круговое вращение данную гидротурбину и спаренный с ней стальной вал электрогенератора. В ковшовой гидротурбине использование кинетической энергии высокоскоростных струй речной воды, обусловленных созданием плотинной с помощью водохранилища напором воды, осуществляется при атмосферном давлении. Ковшовые гидротурбины (рис. 7) применяются при напорах воды в 300 м и более [7, 9]. Мощность ковшовой гидротурбины может достигать 200-250 МВт при расходах воды в них до 100 м³/с. При напорах воды до 700 м (при ее избыточном давлении до 70 атм) ковшовые гидротурбины конкурируют на ГЭС с радиально-осевыми гидротурбинами. При больших напорах воды их использование на ГЭС на сегодня остается безальтернативным [7]. Недостаток ковшовой

гидротурбин – их неэффективность при небольших напорах и высокие требования к подаваемой на них речной воде (она не должна содержать песка и других включений, приводящих к сильному износу рабочих поверхностей стальных элементов турбины).



Рис. 7. Укрупненный вид нового рабочего колеса современной мощной ковшовой гидротурбины до его установки в машинном зале высоконапорной ГЭС [10]

1.3. Основные виды и характеристики электрогенераторов ГЭС. Электрогенераторы, применяемые на ГЭС с поворотными лопастными и радиально-осевыми гидротурбинами, обычно представляют собой синхронную явнополюсную электрическую машину вертикального исполнения (рис. 8), приводимую во вращение от гидротурбины той или иной конструкции. Отметим, что имеются отдельные конструкции маломощных электрогенераторов горизонтального исполнения, включая и капсульные обратимые гидрогенераторы, применяемые на приливных ГЭС [4, 6]. Электрогенераторы с указанными гидротурбинами имеют малую частоту кругового вращения (до 500 об/мин) и сравнительно большой наружный диаметр (до 20 м) [11]. Именно данные характеристики определяют вертикальное исполнение электрогенераторов на всех ГЭС с поворотными лопастными и радиально-осевыми гидротурбинами. При их горизонтальном исполнении обеспечение жесткости и механической прочности элементов подобных электротехнических устройств становится технически не реализуемой задачей [11]. На ГЭС с ковшовыми гидротурбинами используются гидротурбогенераторы горизонтального исполнения, частота вращения ротора которых в зависимости от их полюсности (при наличии 4-х или 2-х магнитных полюсов) может достигать 1500 или 3000 об/мин [8]. На гидроаккумулирующих ГЭС используются обратимые электрогенераторы, работающие как в режиме выработки электроэнергии, так и ее потребления в период закачки речной воды в верхний бассейн такой ГЭС. От обычных электрогенераторов они отличаются специальной конструкцией подпятника, позволяющей их ротору вращаться в обе стороны [11]. Электрогенераторы проектируются специально под частоты вращения и мощности применяемых на ГЭС гидротурбин (например, под единичные мощности радиально-осевых гидротурбин величиной 640 МВт [4, 7]).



Рис. 8. Общий вид машинного зала мощной ГЭС в момент подъема ротора одного из ее крупногабаритных электрогенераторов вертикального исполнения [4]

Электрогенераторы ГЭС на большую единичную мощность (см. рис. 8) устанавливают обычно вертикально на подпятниках с соответствующими направляющими подшипниками [11]. Их выполняют трехфазными на промышленную частоту 50 Гц. В них применяют высокоэффективные воздушные системы охлаждения с теплообменниками типа «воздух-вода».

2. Крупнейшие ГЭС мира. К числу действующих крупнейших ГЭС мира относятся следующие [2]:

- ГЭС «Три ущелья» установленной мощностью 22400 МВт (КНР, р. Янцзы, г. Сандоупин; среднегодовая выработка электроэнергии – 98 млрд. кВт·ч);
- ГЭС «Итайпу» установленной мощностью 14000 МВт (Бразилия/Парагвай, р. Парана, г. Фос-ду-Игуасу; среднегодовая выработка электроэнергии на данной межгосударственной станции – 92 млрд. кВт·ч);
- ГЭС «Силоду» установленной мощностью 13900 МВт (КНР, р. Янцзы; среднегодовая выработка электроэнергии – 64,8 млрд. кВт·ч);
- ГЭС «Гури» установленной мощностью 10300 МВт (Венесуэла, р. Карони; среднегодовая выработка электроэнергии – 40 млрд. кВт·ч);
- ГЭС «Тукуруи» установленной мощностью 8300 МВт (Бразилия, р. Токантинс; среднегодовая выработка электроэнергии – 21 млрд. кВт·ч);
- ГЭС «Саяно-Шушенская» установленной мощностью 6400 МВт (Россия, р. Енисей, г. Саяногорск; среднегодовая выработка электроэнергии – 23,5 млрд. кВт·ч);
- ГЭС «Красноярская» установленной мощностью 6000 МВт (Россия, р. Енисей, г. Дивногорск; среднегодовая выработка электроэнергии – 20,4 млрд. кВт·ч);
- ГЭС «Черчилл-Фолс» установленной мощностью 5400 МВт (Канада, р. Черчилл; среднегодовая выработка электроэнергии – 35 млрд. кВт·ч);
- ГЭС «Братская» установленной мощностью 4520 МВт (Россия, р. Ангара, г. Братск; среднегодовая выработка электроэнергии – 22,6 млрд. кВт·ч).

На рис. 9 приведен общий вид крупнейшей в РФ Саяно-Шушенской ГЭС мощностью 6,4 ГВт, построенной на крупной сибирской р. Енисей и являющейся типичной ГЭС плотинного типа (на ее фотоизображении видны спускающиеся с плотины высотой 242 м вниз к машинному залу с 10 радиально-осевыми гидротурбинами по 640 МВт каждая 10 водоводов) [4, 7].

Печальная статистика в области мировой гидроэнергетики на наших «глазах» коснулась и этой

современной мощной ГЭС. 17 августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС произошла крупная авария с большими разрушениями в машинном зале, повлекшая за собой гибель 75 работников электростанции [2, 4]. Понадобилось около двух лет на ее восстановление.



Рис. 9. Общий вид крупнейшей в России Саяно-Шушенской ГЭС плотинного типа мощностью 6400 МВт (р. Енисей) [4]

3. Крупнейшие гидроаккумулирующие ГЭС мира. Вкратце остановимся на гидроэлектростанциях, главным предназначением которых является «снятие» в энергосистемах своих стран пиковых электрических нагрузок потребителей (например, в вечернее время суток, когда люди возвращаются после работы домой и включают устройства, потребляющие из сети электричество). Ликвидировать возникающий при этом дефицит электроэнергии за счет увеличения объема ее выработки на тепловых электростанциях [8], атомных электростанциях [12] и обычных гидроэлектростанциях оказывается технически невозможно. Указанные электростанции для стабильности работы своих энергоблоков и соответственно энергосистемы страны в целом должны работать в своем «крейсерском» режиме, исключая любые действия по их переводу на маневренный график работы в короткий срок. Для этих целей нужны дополнительные энергетические мощности и ресурсы. Одним из таких ресурсов и являются гидроаккумулирующие ГЭС, использующие свои предварительно заполненные из нижнего бьефа водой верхние бассейны (водохранилища) в период пиковых нагрузок потребителей для выработки с помощью гидротурбин и электрогенераторов на этих ГЭС дополнительных потоков мощности в энергосистеме, повышающих надежность ее функционирования [13]. На рис. 10 приведен общий вид водохранилища гидроаккумулирующей ГЭС (вблизи р. Миссури, в 80 км от г. Миссисипи, США), имеющего вместимость 5,55 млрд. литров [15]. Эта ГЭС в период пиковой нагрузок развивает мощность до 440 МВт.



Рис. 10. Потрясающий общий вид с высоты «птичьего полета» огромного железобетонного водохранилища на вершине удаленного от городов горного массива современной гидроаккумулирующей электростанции «Таум Саук» (США) [13]

Одной из крупнейших в мире гидроаккумулирующих ГЭС должна стать создаваемая еще с 1983 г. в Украине вблизи р. Днестр (Черновицкая обл.) Днестровская гидроэлектростанция с мощностью в генерирующем режиме, равной около 2268 МВт (мощность в насосном режиме – примерно 2847 МВт) [14].

4. Гидроэнергетика Украины. Отечественная гидроэнергетика фактически началась с сооружения в период 1927-1932 гг. на р. Днепр (г. Запорожье) крупнейшей на то время в Европе Днепровской ГЭС с установленной мощностью 1548 МВт [14]. На рис. 11 приведен общий вид гидротурбинного зала этой ГЭС.



Рис. 11. Современный вид гидротурбинного зала Днепровской ГЭС с установленной мощностью 1548 МВт [15]

На рис. 12. представлен общий вид железобетонной плотины и машинного зала легендарной Днепровской ГЭС, не один раз «пережившей» в 20-м веке радостные и трагические события в своей истории [4].



Рис. 12. Общий современный вид Днепровской ГЭС [15]

В настоящее время в годовом балансе выработки в Украине электроэнергии ГЭС занимают третье место после атомных и тепловых электростанций. Установленная мощность (около 4,7 ГВт) всех ГЭС страны составляет примерно 8 % от общей мощности Единой энергетической системы Украины [16, 17]. Среднегодовой объем выработки электроэнергии отечественными ГЭС составляет примерно 10,8 млрд. кВт·ч [18]. Основной используемый в стране гидроэнергетический потенциал сосредоточен на базе ГЭС Днепровского гидрокаскада, включающего [17]: Днепровскую ГЭС (мощность – 1548 МВт); Кременчугскую ГЭС (мощность – 682 МВт); Каневскую ГЭС (мощность – 444 МВт); Киевскую ГЭС (мощность – 408 МВт); Каховскую ГЭС (мощность – 351 МВт); Среднеднепровскую ГЭС (мощность – 352 МВт). К этому следует добавить Днестровскую-1 ГЭС (мощность – 702 МВт), а также ряд гидроаккумулирующих электростанций Украины [16, 17]: Днестровскую (мощность – 2268 МВт); Ташлыцкую (мощность – 302 МВт); Киевскую (мощность – 235 МВт). Кроме того, в Украине в сельской местности эксплуатируется 49 так называемых малых ГЭС, которые вырабаты-

вают до 200 млн. кВт·ч электроэнергии в год [6, 17]. Отметим, что стоимость электроэнергии от ГЭС гораздо ниже, чем от тепловых станций Украины [2, 4].

5. Преимущества и недостатки ГЭС. Основными преимуществами ГЭС в сравнении с другими видами электростанций является следующее [2, 4]:

- отсутствие топливной составляющей при производстве электроэнергии на ГЭС способствует снижению зависимости стоимости электроэнергии от изменения в мире стоимости органического топлива;
- использование на ГЭС для производства электроэнергии возобновляемых источников энергии, что способствует глобальным усилиям человечества в борьбе за сокращение выбросов в земную атмосферу парниковых газов и вредных химических соединений;
- ГЭС являются ключевым элементом обеспечения системной надежности функционирования единой электроэнергетической системы любой страны;
- стоимость вырабатываемой ГЭС мира электроэнергии ниже (примерно до двух раз), чем на других видах электростанций традиционной энергетики;
- срок эксплуатации технических сооружений и энергоагрегатов ГЭС выше, чем на тепловых и атомных станциях (основной причиной тому является отсутствие в энергоагрегатах ГЭС высокоинтенсивных тепловых процессов при выработке электроэнергии; минимальный срок службы мощных ГЭС – 50 лет);
- гибкость работы ГЭС, связанная с весьма быстрым уменьшением выработки на ней электроэнергии при наличии избытка последней в энергосистеме (энергоагрегаты ГЭС за время до 1,5 мин допускают изменение режима своей работы от «холодного» пуска до полного принятия электрической нагрузки);
- низкие эксплуатационные расходы, связанные с наличием на ГЭС сравнительно небольшого количества обслуживающего его энергоагрегаты персонала.

К основным недостаткам мощных ГЭС указанного выше типа следует отнести следующее [2, 19, 20]:

- из-за создания при ГЭС огромных водохранилищ приходится затоплять большие территории с плодородными землями, что становится причиной ряда негативных изменений в окружающей природе (вывод из сельскохозяйственного оборота больших площадей земель; наличие в водохранилищах застойных явлений, ухудшающих качество речной питьевой воды; плотины станций перекрывают рыбам путь к нерестилищам);
- стоимость сооружения ГЭС (при средней мировой стоимости производимой ими электроэнергии до 5 центов USA/кВт·ч) выше, чем тепловых и атомных электростанций той же электрической мощности;
- крупные аварии на плотинах мощных ГЭС неминуемо приводят к катастрофическим наводнениям ниже по течению реки с тяжелыми последствиями;
- заиление dna водохранилищ ГЭС, неминуемо приводящее к возрастанию внешнего горизонтального давления на железобетонную плотину и дополнительному образованию в водохранилищах метана и парниковых газов, поступающих в земную атмосферу;
- необходимость переселения большого числа людей, проживающих на территории будущих водохранилищ ГЭС (по данным Всемирной комиссии по пло-

тинам в 2000 г. начало строительства ГЭС привело к переселению до 60 млн. человек во всем мире).

6. Объемы выработки ГЭС электроэнергии в промышленно развитых странах мира. По состоянию на 2012 г. гидроэнергетика обеспечивала производство электроэнергии до 21 % от общего годового объема вырабатываемого в мире электричества [4, 11]. Установленная мощность на ГЭС мира составляла в это время около 715 ГВт. Мировыми лидерами по выработке на ГЭС электроэнергии в ее абсолютных значениях являются в настоящее время КНР, Канада и Бразилия. Лидерами по производству на ГЭС электроэнергии на одного гражданина являются Норвегия, Исландия и Канада [4]. На начало 2000-х годов наиболее активное в мире гидростроительство проводила КНР, для которой гидроэнергия является пока основным потенциальным источником энергии в стране. Следует заметить, что сейчас КНР реализует самую масштабную в мире программу строительства на своей территории новых мощных атомных электростанций [12]. Отметим, что в 1990 г. бывший СССР вышел на второе место в мире (сразу после США) по установленной мощности ГЭС, составившей 65 ГВт [4]. Тогда СССР по производству электроэнергии на ГЭС при ее годовом объеме в 233 млрд. кВт·ч занимал третье место в мире после США и Канады [11]. В настоящее время Россия при установленной мощности своих гидроэнергоагрегатов в 45 ГВт (пятое место в мире) вырабатывает на ГЭС только примерно 165 млрд. кВт·ч/год (также пятое место в мире) [4]. На рис. 13 приведена структурная схема распределения в настоящее время установленной мощности среди тепловых, атомных и гидроэлектростанций России [4, 11].

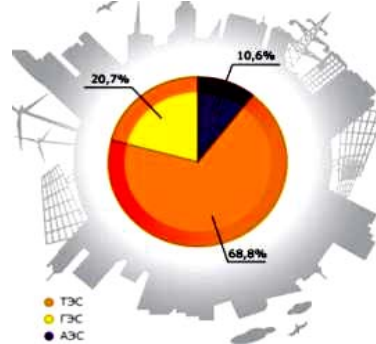


Рис. 13. Структура распределения установленной мощности электростанций в Единой энергетической системе России по традиционным видам генерации электроэнергии [4]

Из данных рис. 13 видно, что доля электроэнергии, вырабатываемой ГЭС России, в общем объеме ее годового производства не превышает 21 %. Основная доля электроэнергии в России (около 69 %) вырабатывается сейчас на ее тепловых электростанциях [4, 8]. На мощные атомные электростанции России приходится чуть более 10 % от суммарного годового объема производства электричества. Укажем, что гидроэнергетика России по своему энергоэкономическому потенциалу, составляющему около 852 млрд. кВт·ч/год, занимает второе место в мире после КНР [4]. Однако, по степени освоения своих громадных гидроэнергоресурсов Россия уступает практически всем промышленно развитым странам нашего мира.

7. Проблемные задачи гидроэнергетики. Глобальной проблемой нашей цивилизации является сохранение безопасного для человечества состояния окружающей среды. В этой связи одной из проблемных задач мировой гидроэнергетики, использующей возобновляемые и экологически чистые гидроэнергоресурсы, является повышение надежности и уровня безопасности гидротехнических сооружений мощных ГЭС. Эти мероприятия должны исключать крупные аварии на плотинах мощных ГЭС. Другой ее проблемной задачей является сведение к минимуму негативных экологических последствий от сооружения и эксплуатации мощных ГЭС. Для ее решения требуются большие финансовые инвестиции в защитные мероприятия по минимизации отрицательного влияния мощных ГЭС на окружающую среду. При этом акценты необходимо делать на поддержание высокого качества воды водохранилищ и обеспечение прохода в весенний период рыбы на свои нерестилища. Гидроэнергетика является относительно высокоманевренной подотраслью энергетики. Поэтому третьей проблемной задачей в области гидроэнергетики является увеличение мощностей ее гидроаккумулирующих станций в общем объеме мощностей энергосистемы, в том числе и в Объединенной энергетической системе Украины. По мнению специалистов-гидроэнергетиков гидроаккумулирующие станции должны иметь суммарные мощности до 10-12 % от общей мощности всех электростанций страны [21]. В этом случае при подключении таких ГЭС к общей энергосистеме обеспечивается оптимальное прохождение и регулирование пиковых электрических нагрузок в вечернее время суток, а также создается необходимый нагрузочный резерв энергосистемы при аварийных ситуациях.

8. Перспективы развития ГЭС в мире и Украине. Прогнозы экспертов указывают на неуклонное возрастание в мире потребления электроэнергии и водных ресурсов. Так, согласно имеющимся прогнозам мировое потребление электричества в период с 2000 г. по 2300 г. возрастет в два раза [21]. В этой связи возрастает роль и гидроэнергетики в тех странах, где имеются неосвоенные гидроэнергоресурсы. Отметим, что по состоянию на 2007 г., в котором ГЭС мира было произведено электроэнергии в объеме около 3050 млрд. кВт·ч, неосвоенный в мире гидроэнергетический потенциал составлял примерно 5680 млрд. кВт·ч [21]. Между континентами нашей планеты этот энергоэкономический потенциал распределялся следующим образом [21]: Азия – 3380 млрд. кВт·ч (60 %); Южная Америка – 930 млрд. кВт·ч (16 %); Африка – 750 млрд. кВт·ч (13 %); Северная и Центральная Америка – 350 млрд. кВт·ч (6 %); Европа – 220 млрд. кВт·ч (4 %); Австралия и Океания – 50 млрд. кВт·ч (1 %). В Украине гидроэнергетический потенциал равнинных рек использован практически полностью [18]. Поэтому для Украины сейчас актуально развитие гидроаккумулирования энергии, энергетический потенциал которого может полностью обеспечить энергосистему страны в дефиците «пиковой» электроэнергии. Согласно данным [21] неосвоенный гидроэнергетический потенциал находится, в основном, в слаборазвитых и развивающихся странах мира. При планировании развития энергетики в этих странах в первую очередь намечается освоение своих гидроресурсов. Прогнозы

развития до 2030 г. мировой энергетики указывают на то, что удельный вес гидроэнергетики (до 21 %) в мировом энергетическом балансе пока сохранится [21].

Выводы.

1. Выполненный научно-технический обзор развития мировой гидроэнергетики свидетельствует о том, что ГЭС по годовому объему производимой ими электроэнергии (до 21 % выработки в мире) в настоящее время в промышленно развитых странах занимают третье место после мощных тепловых и атомных электростанций. Основным неосвоенным на сегодня в мире резервом гидроэнергоресурсов (до 3380 млрд. кВт·ч) сосредоточен в странах Азии.

2. Гидроэнергетика со своими сравнительно маневренными энергоагрегатами, использующими только возобновляемые и экологически чистые водные энергоресурсы, способна за счет сооружения мощных гидроаккумулирующих ГЭС разгружать в энергосистемах возникающие в вечернее время суток пиковые нагрузки потребителей и создавать нагрузочные резервы для повышения устойчивости функционирования энергосистем в аварийных режимах их работы.

3. Для защиты и сохранения на Земле окружающей среды необходимо повышать экологическую безопасность эксплуатируемых и вновь создаваемых в мире мощных обычных ГЭС и аккумулирующих ГЭС.

4. В ближайшей перспективе гидроэнергетика продолжит вместе с тепло- и ядерной энергетикой оставаться основными источниками электроэнергии для развивающейся цивилизации на нашей планете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Гидроэлектростанция>.
3. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 40: Научное открытие метода взрывной имплозии для получения сверхкритической массы ядерного заряда и украинский «след» в американском атомном проекте «Манхэттен» // *Электротехника і електромеханіка*. – 2017. – №5. – С. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.01.
4. <http://greenevolution.ru/enc/wiki/gidroelektrostanciya-ges>.
5. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
6. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 32: Альтернативная энергетика: состояние и перспективы развития // *Электротехника і електромеханіка*. – 2016. – №3. – С. 3-16. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.01.
7. <http://www.cshp.ru/gidroenergetika/eto-interesno/tipyi-gidroturbini>.
8. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 43: Традиционная энергетика. Тепловые электрические станции: состояние и перспективы их развития // *Электротехника і електромеханіка*. – 2018. – №2. – С. 3-10. doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.01.
9. <http://blog.rushydro.ru/?p=4158>.
10. http://elektrogenerator.net/smallhydropower/pelton_turbines.html.
11. <http://bibliofond.ru/view.aspx?id=657541>.
12. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 44: Традиционная энергетика. Атомные электрические станции: ретроспектива, состояние и перспективы их развития // *Электротехника і електромеханіка*. – 2018. – №3. – С. 3-16. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.01.
13. <http://electricalschool.info/energy/1911-princip-raboty-gidroelektrostancii.html>.
14. <http://frend.org.ua/post138322582>.
15. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Днепрогэс>.

16. https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_гидроэлектростанций_Украины.
17. https://uk.wikipedia.org/wiki/Гідроенергетика_України.
18. http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=93710&cat_id=35082.
19. <http://myelectro.com.ua/98-gidroenergetika/111-glavnye-dostoinstva-i-nedostatki-gidroelektrostantsij>.
20. Непорожний П.С., Обрезков В.И. Введение в специальность: гидроэлектроэнергетика. – М.: Энергоиздат, 1982. – 304 с.
21. http://energetika.in.ua/ua/books/book-3/part-2/section-6/Розділ_6.

REFERENCES

1. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
2. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Гидроэлектростанция> (accessed 13 May 2017). (Rus).
3. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 40: The scientific opening of the method of explosive implosion for the obtaining above critical mass of nuclear charge and Ukrainian «track» in the «Manhattan» American atomic project. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.01.
4. Available at: <http://greenevolution.ru/enc/wiki/gidroelektrostanciya-ges> (accessed 22 June 2016).
5. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
6. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 32: Alternative energy: state and prospects of development. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.3, pp. 3-16. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.01.
7. Available at: <http://www.cshp.ru/gidroenergetika/eto-interesno/tipyi-gidroturbin> (accessed 05 May 2017).
8. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 43: Traditional power engineering. Thermal power plants: state and prospects of their development. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.2, pp. 3-10. doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.01.
9. Available at: <http://blog.rushydro.ru/?p=4158> (accessed 15 April 2016). (Rus).
10. Available at: http://elektrogenerator.net/smallhydropower/pelton_turbines.html (accessed 05 September 2016). (Rus).
11. Available at: <http://bibliofond.ru/view.aspx?id=657541> (accessed 26 October 2016). (Rus).
12. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 44: Traditional power engineering. Nuclear power stations: retrospective view, state and prospects of their development. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.3, pp. 3-16. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.01.
13. Available at: <http://electricalschool.info/energy/1911-princip-raboty-gidroelektrostancii.html> (accessed 05 May 2014). (Rus).
14. Available at: <http://frend.org.ua/post138322582> (accessed 22 July 2016). (Rus).
15. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Dnieper_Hydroelectric_Station (accessed 12 May 2017).
16. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_гидроэлектростанций_Украины (accessed 02 February 2017). (Rus).
17. Available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/Гідроенергетика_України (accessed 12 June 2017). (Ukr).
18. Available at: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=93710&cat_id=35082 (accessed 10 May 2015). (Ukr).

19. Available at: <http://myelectro.com.ua/98-gidroenergetika/111-glavnye-dostoinstva-i-nedostatki-gidroelektrostantsij> (accessed 10 October 2015). (Rus).
20. Neporozhniy P.S., Obrezkov V.I. *Vvedenie v spetsial'nost': gidroelektroenergetika* [Introduction to the specialty: Hydro-power]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 304 p. (Rus).
21. Available at: http://energetika.in.ua/ua/books/book-3/part-2/section-6/Розділ_6 (accessed 15 September 2016). (Rus).

Поступила (received) 28.08.2017

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с.,
НИПКИ «Молния»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841,
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 45: Traditional power engineering. Hydraulic power plants: state and prospects of their development.

Purpose. Preparation of brief scientific and technical review about the state, achievements, problems and prospects of development of world hydraulic power engineering. **Methodology.** Known scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of the opened scientific and technical information, present in scientific monographs, journals and internet sources, high meaningfulness in area of hydraulic power engineering. **Results.** A brief analytical scientific and technical review is resulted about the present state, achievements, problem tasks and prospects of development of hydraulic power engineering in the industrially developed countries of the world. Considerable progress is marked in development and creation of technical base of modern hydraulic power engineering including powerful hydraulic turbines and hydraulic electric generators. Existent classification of the hydraulic power plants (HPPs) is resulted. Basic types and constructions of powerful hydraulic turbines, in-use on modern HPPs are presented. Basic kinds and technical descriptions of powerful hydraulic electric generators used at modern HPPs are indicated. Information is resulted about the largest in the world ordinary HPPs and hydraulic heat-sink HPPs. Hydraulic power engineering of Ukraine is considered and descriptions of basic domestic HPPs are described. Advantages and failings of HPPs are marked in comparison with the thermal and nuclear power plants. Information is presented about absolute volumes of electric power produced by HPPs in a number of the industrial developed countries of the world. Quantitative indexes are resulted for today in the world of reserve of hydraulic power resources on the continents of our planet. A conclusion is done that this reserve of hydraulic power resources is mainly concentrated in the countries of Asia. It is indicated that hydraulic power engineering of the world produces presently up to 21 % of electric energy in annual world in the electrical energy balance. Some problem tasks of world hydraulic power engineering are indicated. Certain prospects are outlined in development of hydraulic power in the world and in Ukraine. **Originality.** Systematization is executed as short structured of scientific and technical review of the scientific and technical materials touching functioning of such important sector of world economy as hydraulic power engineering known from the open sources in informative space. Material is expounded from positions of scientist-electrophysics in an accessible for a wide reader new informatively-rich content form. **Practical value.** Popularization and deepening for students, engineers and technical specialists and researchers of front-rank scientific and technical knowledge in area of modern hydraulic power engineering extending their scientific range of interests and promoting further development of scientific and technical progress in society. References 21, figures 13.

Key words: hydropower engineering, hydraulic power plants, hydraulic turbines, hydraulic electric generators, characteristics of hydraulic power plants, problems and prospects of development of world hydropower engineering.