

**А.Э. Кокосадзе**

## **ПОДЗЕМНОЕ ГИДРОАККУМУЛИРОВАНИЕ**

Представлены особенности конструкций подземных гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС). Рассмотрено новое направление в подземной энергетике – комплекс ГАЭС – атомная электростанция. Изучена возможность использования отработанных горных выработок для гидроаккумулирования. Современные подземные ГАЭС могут быть выполнены как в заново проходимых выработках через вертикальные шахты, так и спиралевидные подходные туннели.

Ключевые слова: подземное, гидроаккумулирование, станция, машинный зал, нижний бассейн, отработанная горная выработка.

**Г**рафик энергопотребления современных замкнутых энергосистем характеризуется существенной неравномерностью: пиковыми нагрузками в дневное время (максимум энергопотребления) и провалами в ночное время (минимум энергопотребления).

Для выравнивания этой неравномерности предложены так называемые гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), состоящие из верхнего и нижнего бассейнов, соединенных между собой напорным водоводом, подающим воду на так называемые обратимые гидроагрегаты, расположенные и заглубленные около нижнего бассейна.

Обратимые гидроагрегаты представляют собой совмещенную на одном валу гидротурбину и насос, в генераторном режиме вырабатывают электроэнергию (в дневное время, снимая пики энергопотребления) а в ночное время перекачивают воду из нижнего бассейна в верхний, «заряжая» станцию, используя избытки энергии в ночное время.

Естественно, что на перекачку воды в верхний бассейн требуется больше электроэнергии, чем может быть выработано при работе станции в генераторном режиме. Но за счет разницы в цене вырабатываемой электроэнергии в дневное время (пиковые мощности) и ночное время (избыток мощности) станция всегда оказывается рентабельной.

Известен случай, когда была налажена продажа пиковой и аварийной мощности, вырабатываемой на ГАЭС, расположенной на территории одной Европейской страны, в энергосисте-

му соседней страны – это свидетельствует об эффективности эксплуатации станции [1].

Первые ГАЭС появились в Западной Европе в конце XIX в. Так, в 1882 г. в Швейцарии, в окрестностях Цюриха, была построена установка Леттем с двумя насосами общей мощностью в 103 кВт. Спустя 12 лет, подобная установка заработала на одной из итальянских прядильных фабрик. Если к началу XX в. общее число ГАЭС в мире не превышало четырех, то уже к началу 1960-х оно достигло 72, а к 2010 г. – 460.

Первая подземная ГАЭС Котолия мощностью 2х30 МВт при напоре 149 м сооружена с 1932 г. в Италии в составе ГЭС на реке Велино.

К 1976 г. в разных странах мира запроектировано и введено в эксплуатацию более 100 подземных ГАЭС и число их постоянно возрастает.

В 1967 г. на Всемирном энергетическом конгрессе в Москве шведскими инженерами был предложен проект подземной станции, в котором нижний бассейн и машзал были выполнены под землей на глубине 450 м. Верхний бассейн располагался на поверхности и был соединен с обратимыми гидроагрегатами в машзале и нижним бассейном вертикальными водоводами. Для доступа к выработкам машзала и нижнего бассейна предложено использовать наклонный спиралевидный туннель. Однако неизвестно, был ли реализован этот проект.

Создание подземных гидротехнических объектов связано с необходимостью учета ряда важных факторов: возрастающей опасности террористических актов и объемов природных катаклизмов по всему земному шару, включая вулканическую и сейсмическую активность, которое отмечаются за последние 30 лет почти повсеместно, возрастание числа катастроф антропогенного происхождения, а также астероидно-кометная опасность и глобальной активация гравитационно-динамических возмущений в околоземном космическом пространстве, имеющими ярко выраженный резонансный или циклический характер. В течение ряда лет институты Гидропроект им. С.Я. Жука, «Оргэнергострой» и другие выполняли научно-исследовательские и предпроектные работы по так называемой Ленинградской ГАЭС с подземным нижним бассейном (ГАЭС ПБ). Станция мощностью 1200 МВт имела напор 1200 м, подземный машзал, трансформаторное помещение и выработки нижнего бассейна емкостью 2 млн куб м. Ее предполагалось разместить в гранитах типа «рапакиви» Фенноскандинавского кристаллического щита [1].

Доступ к подземным выработкам осуществляли через вертикальные стволы — один ствол для выдачи породы, второй — шахтный водовод для подачи воды из верхнего бассейна через водоводы машзала в выработки нижнего бассейна и третий ствол — для выдачи электрической мощности на поверхность в энергосистемы. Возможно наличие четвертого ствола для спуска персонала и подачи ремонтного оборудования для нормальной эксплуатации станции.

Позднее институтами «Оргэнергострой», Гидропроект им. С.Я. Жука, НИИ КМАруда, ТулГУ были выполнены предпроектные проработки по подземной Губинской ГАЭС мощностью 1200 МВт и напором 300 м, использующей в качестве нижнего бассейна около 10 млн куб. м отработанных камерных выработок шахты им. Губкина, расположенных в диапазоне глубин 250–300 м.

Шахта им. Губкина эксплуатируется более 50 лет, добыча железистых кварцитах высокой прочности (коэффициент крепости по Протодяконову более 30) выполняется скважинной отбойкой и выдачей породы через выпускные воронки [2].

По экономическим соображениям выработки нижнего бассейна предпочтительно выполнять без крепи т.к. в них в период эксплуатации станции не предполагается наличие людей.

Однако институтом Гидропроект им. С.Я. Жука была принята попытка на стадии предпроектных проработок обосновать возможность на глубине 950 м в угольной шахте создание нижний бассейна, изолируя уголь от воды путем нанесения на лоток и стены выработок слой набрызг-бетона. За счет большого напора наличие крепи в нижнем бассейне станция может оказаться рентабельной.

В США был приложена идея двухступенчатой подземной ГАЭС с первым промежуточным машзалом и нижним бассейном на глубине 1500 м и вторым машзалом и нижним бассейном на глубине 3000 м.

Преимущества подземной компоновки ГАЭС перед наземной станции заключаются в следующем:

- меньший отвод поверхностных земель — только для верхнего бассейна;
- нет необходимости в наличии в поверхностном рельефе существенных перепадов высот, что проблематично для Средневропейской равнины;
- возможность создания станции на равнинных рельефах;
- лучшее восприятие поверхностных динамических нагрузок;

- возможность унификации подземной компоновки, что позволит значительно снизить стоимость типовой станции [3].

Вопросы проектирования высоконапорных ГАЭС ПБ получили дальнейшее развитие на Международном симпозиуме по гидроаккумулированию в 1972 г. в Афинах, где группа канадских инженеров представила проект ГАЭС ПБ мощностью 3000 МВт при напоре около 1000 м. Воздействие подземных ГАЭС на окружающую среду можно оценить, как относительно сильное в части поверхностного ландшафта, гидрологических условий, качества воды, состояния живых организмов в воде, социально-экономических условий района строительства и незначительное по отношению к местному климату, почвенно-растительному покрову в зоне подтопления верхнего наземного бассейна, животному миру, геологической среде [3].

Наиболее крупной ГАЭС в мире считают станцию Эдисон в США мощностью до 3000 МВт, а самой высоконапорной (около 1767 м) – ГАЭС Рейзек-Крайсек в Австрии.

В ближайшие годы ожидают значительное увеличение строящихся и эксплуатируемых ГАЭС. Наиболее интенсивно гидроаккумулирование развито в США (39 ГАЭС–20 800 МВт), Японии (20 000 МВт), Италии (7000 МВт) и т.д. [3].

ГАЭС получили достаточно широкое распространение в мире – в 2005 г. их общее число составило 460, в настоящее время строится около 40 новых станций во многих странах мира.

Специфика ГАЭС позволяет обеспечивать двойное регулирование мощности энергосистемы – в генераторном и нагрузочном режимах, что допускает использование станций для решения следующих задач:

- в Единой энергосистеме России – регулирование суточного графика нагрузки, напряжения и частоты;
- регулирование режимов работы изолированных «тепловых» энергосистем;
- оптимизации работы тепловых и атомных электростанций, улучшению их технико-экономических показателей, снижению вредных выбросов в биосферу;
- совместная работа с приливными электростанциями;
- быстрое введение аварийногорезерва генерирующей мощности [3].

Зарубежный опыт возведения ГАЭС свидетельствует о целесообразности их размещения либо в центрах энергопотребления в промышленных или урбанизированных районах страны, либо рядом с неманевренными мощными энергоисточниками.

ГАЭС могут быть успешно использованы для повышения надежности энергоснабжения мегаполисов, для чего несколько станций сравнительно небольшой мощности размещают по периметру мегаполиса или внутри города и обеспечивают их связями высоковольтными линиями электропередачи с основными узловыми распределительными подстанциями города. В этом случае в аварийной ситуации можно подхватывать нагрузку отделившихся ТЭС, осуществлять адресное аварийное резервирование генерирующей мощности и т.п. В качестве верхних бассейнов таких ГАЭС могут быть использованы акватории рек в черте города или вблизи его, или другой естественный водоем достаточной емкости, а нижние бассейны и помещения машинных залов — под землей. Такая компоновка в минимальной степени повлияет на наземные экосистемы города и не потребует отведения больших площадей.

Примером такого подхода служит наличие двух ГАЭС вблизи города Нью-Йорка (США): Бленхейм-Джилльбао (1000 МВт, 1973) и Корнуэлл (2000 МВт, 1982), возведенных после знаменитой энергоаварии 1965 г. в дополнении к построенной в 1961 г. ГЭС-ГАЭС Льюистон-Тусканора мощностью 2200 МВт. Особенность первой станции состоит в наборе 1000 МВт за 3 мин из резервного состояния, а в насосном режиме полная нагрузка может быть снята за 10 с. Запуск насосного режима осуществляется вспомогательными пусковыми электродвигателями за 5 мин, при полном наборе нагрузки за 7 мин [3].

Ведутся научно-исследовательские работы по подземной ГАЭС в районе Санкт-Петербурга (Выборг) мощностью 1200—1500 МВт с напором 1200 м. Однако, следует отметить, что широкое ведение взрывных работ в этом районе требует детальных согласований с Министерством обороны РФ

Разработано предложение по строительству подземной ГАЭС мощностью 1000 МВт в г. Москве при напоре до 1300 м.

Использование ГАЭС в изолированных энергосистемах, не располагающими мощными гидроресурсами или другими мобильными мощностями рассмотрим на примере Японии, где при избыточной мощности ГАЭС — 49% по отношению к суммарной мощности АЭС — планируется возведение новых подземных ГАЭС, где верхним бассейном служит море.

Из вышесказанного следует, что не вызывает сомнения необходимость развития в России и в мире гидроаккумулирования, поскольку ГАЭС позволяет оптимизировать работу ТЭС и АЭС и энергосистем в целом, обеспечить нормативное качество элект-

роэнергии в нормальных режимах, снизить переток мощности по межсистемным связям, повысить надежность и живучесть энергосистем, а в ряде случаев радиационную безопасность АЭС в аварийных ситуациях, облегчить условия послеаварийного восстановления энергосистем в случае крупной системной аварии, а также оказать благоприятное влияние на общехозяйственные процессы страны: сгладить наводнения, создать запасы воды для ирригации, бытового потребления и т.д.

Эти технологические и энергетические возможности ГАЭС носят в общем то больше качественный, чем количественный характер и поэтому подчас их трудно оценить строго экономически.

В настоящее время считается, что наиболее экономичными по стоимости строительства могут быть крупные высоконапорные подземные ГАЭС мощностью 1000–3000 МВт и напором более 1000 м с высоконапорными обратимыми гидроагрегатами, возможно с многоступенчатыми радиально-осевыми насосотурбинами единичной мощностью 300–500 МВт типа ГАЭС Альто-Герссо, 1000 МВт, напор 955 м, Италия или Гранд-Мезон, 1800 МВт с напором 920 м, Франция.

Подвод воды от водоприемника ВВ к подземному машинному залу (МЗ) ГАЭС осуществляют напорными водоводами (НВ): металлическими – Киевская ГАЭС или сталежелезобетонными – Загорская и Кайшадорская ГАЭС или напорными туннелями (Ташлыкская и Днестровская ГАЭС).

Исследование и разработка предпроектной документации для ГАЭС с подземными бассейнами (ГАЭС ПБ) представляет собой новое направление отечественной науки. В их составе для НВ используют расположенные глубоко под землей, искусственно созданные подземные выработки, в основном, в скальных породах или в отработанных горных выработках. Напор на таких ГАЭС может составить 1000 м и более.

Эффективность ГАЭС ПБ зависит от совокупности следующих основных факторов: природные условия (в первую очередь топогеология выбранной площадки, определяющие напор, мощность, длину водоводов, сейсмичность, неотектонику и т.д.); возможность использования существующих водохранилищ; размещение в центре нагрузок энергосистемы; типы и параметры электростанций энергосистемы; наличие линий электропередач (ЛЭП) для выдачи мощности; параметры оборудования; к.п.д. цикла аккумулирования и т.д. Увеличение напора в целом является положительным фактором, позволяя уменьшить объ-

ем водоемов, габариты здания ГАЭС, что, однако, может привести к удлинению водоводов. ГАЭС как при высоких, так и средних напорах.

Как правило, современные ГАЭС стремятся разместить ближе к центру нагрузок энергосистемы, во многих случаях рядом с мощными ТЭС и АЭС так, что ГАЭС становятся их спутниками. Например, Ташлыкская ГАЭС расположена рядом с Южно-Украинской АЭС.

На ГАЭС верхний и нижний бассейны рассчитаны на размещение гидроаккумулирующей емкости. Кроме того, в одном из водоемов (обычно расположенном на реке) предусматривают емкость для компенсации потерь воды на испарение и фильтрацию из водоемов.

В здании МЗ подземной ГАЭС ПБ с помощью гидроэлектрического, механического и вспомогательного оборудования, а также систем управления электрическую энергию, забираемую из энергосети, преобразуют в механическую энергию воды, аккумулируемую в верхнем водоеме, а затем происходит обратное преобразование механической энергии воды в электрическую, выдаваемую на поверхность энергопотребителю через шахтный ствол.

Здания ГАЭС с обратимыми гидроагрегатами состоят из насос-турбины и двигателя-генератора (двухмашинная схема). В МЗ для обеспечения работы в насосном режиме требуется увеличение отрицательной высоты всасывания Н S насос-турбины, т.е. большее заглубление рабочего колеса под уровень НБ, что при открытом расположении здания приводит к необходимости дополнительного его заглубления в основание и увеличению высоты, но практически не влияет на конструкцию подземного МЗ.

Для равнинных регионов, к которым относится основная часть Европейской части России, в развитии ГАЭС характерно стремление к увеличению напора не совмещенных ГАЭС (без ТЭС) и обеспечения минимального воздействия на природную среду, что привело к изучению схем станций шахтного типа с подземным расположением как машинного зала, так и нижнего бассейна (а в одном проекте американских инженеров даже верхнего бассейна), создаваемых, в основном в скальных породах на глубинах более 500 м (американский проект двух ступенчатой ГАЭС с общим напором 3 км). При этом развивается направление использования в качестве нижнего подземного бассейна отработанных горнорудных выработок, карстовые по-

лости или специально пройденные системы галерей. Стоимость сооружения или обустройства верхних бассейнов для вновь сооружаемых станций может достигать до 30% общей стоимости станции. В качестве верхнего бассейна может служить существующий водоем прудов-охладителей поверхностных ТЭС и АЭС, а также естественный водоем в виде речной акватории или морского залива (японский проект ГАЭС Ататаки).

Примером такой компоновки может служить ГАЭС Саммит (США) напором 660 м мощностью 1500 МВт (шесть обратимых гидроагрегатов по 250 МВт) с нижним бассейном в существующей известняковой шахте.

Площадка ГАЭС Маунтин Хоуп (США) мощностью 2000 МВт охватывает районы добычи руды, где верхний бассейн выполнен за счет расширения существующего озера, а в качестве нижнего бассейна на глубинах до 750 м используют отработанные горнорудные выработки.

Таким образом, современные подземные ГАЭС, служащие для снятия пиковых нагрузок, поддержания частоты в энергосистеме и т.д., с напорами до 3000 м и мощностью до 3000 МВт могут быть выполнены, как в заново проходимых выработках через вертикальные шахты, так и спиралевидные подходные туннели, а также с использованием отработанных горных выработок, желательна в сочетании с АЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейнман Л. Б., Чесноков С. А. Подземные гидроаккумулирующие электростанции. – М.: Информэнерго, 1983. – 59 с.
2. Чесноков С. А., Шейнман Л. Б. Подземные ГАЭС в отработанных горных выработках. – М.: Информэнерго, 1985. – 65 с.
3. Синюгин В. Ю., Маргук В. И., Родионов В. Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. – М.: ЭНАС, 2008. – 352 с.
4. Кокосадзе А. Э. Конструктивно-технологические решения подземных энергокомплексов ГАЭС-АЭС // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 6. – С. 259–262.
5. Кокосадзе А. Э. Подземное гидроаккумулирование в энергетике // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С. 340–346. **ГИАС**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*Кокосадзе Александр Элгуджевич* – первый заместитель генерального директора – исполнительный директор, ЗАО «Институт Оргэнергострой», e-mail: post@ioes.ru, член Ядерного общества России и Тоннельной ассоциации России.



## **UNDERGROUND PUMPED-STORAGE STATIONS**

The features of the constructions the underground pumped-storage stations are presented. The new trend of underground power – complex pumped-storage station- nuclear power station are considered. The possibility of use the worked out mined excavations for underground pumped-storage stations are studied. Modern underground pumped storage plant can be performed in the newly passable workings via a vertical shaft and a spiral access tunnel

Key words: underground, pumped-storage, station, machine hall, lower basin worked out mined excavation.

### **AUTHOR**

*Kokosadze A.E.*, First Deputy General Director –Executive Director, JSC «Institute Orgenergostroy», Moscow, Russia, e-mail: post@ioes.ru, Fellow of the Nuclear Society of Russia and Tunneling Association of Russia.

### **REFERENCES**

1. Sheynman L. B., Chesnokov S. A. *Podzemnye gidroakkumuliruyushchie elektrostantsii* (Underground hydroelectric pumped storage power plants), Moscow, Informenergo, 1983, 59 p.
2. Chesnokov S. A., Sheynman L. B. *Podzemnye GAES v otrabotannykh gornykh vyrobokakh* (Underground hydroelectric pumped storage power plants in mined-out cavities), Moscow, Informenergo, 1985, 65 p.
3. Sinyugin V. Yu., Marguk V. I., Rodionov V. G. *Gidroakkumuliruyushchie elektrostantsii v sovremennoy elektroenergetike* (Underground hydroelectric pumped storage power plants in modern electrical energy industry), Moscow, ENAS, 2008, 352 p.
4. Kokosadze A. E. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no 6, pp. 259–262.
5. Kokosadze A. E. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 2, pp. 340–346.



## **ГОМЕОСТАТИКА ПРОТИВ СХОЛАСТИКИ**

### **НЕКОТОРЫЕ ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ГОМЕОСТАТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

– Восстановление природного ландшафта после окончания вредных для природы горных работ (рекультивация). Сейчас эта работа регулируется нормативами восстановления. Хотя, эффективнее было бы проводить творческие конкурсы архитектурных мастерских.

в) Гомеостатические методы поддержания здоровья людей и удлинения их жизни

– Описание эталонных моделей здоровья.

– Изучение обменных процессов в человеческих организмах и разработка способов их восстановления в случаях отклонений от нормы.

– Разработка нормативов гомеостатического регулирования питания, дыхания потребления жидкостей, медикаментозного лечения.

*Продолжение на с. 335*