
ИННОВАЦИОННАЯ РЕСУРСОВОСПРОИЗВОДЯЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ

А.Е. Воробьёв, В.П. Малюков,

А.И. Иванова

Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

В статье проанализирована инновационная ресурсовоспроизводящая технология использования подземных хранилищ, созданных методом растворения каменной соли через буровые скважины, для аккумулирования энергии сжатого воздуха на газотурбинных электростанциях во время снижения потребления энергии.

Ключевые слова: каменная соль, подземное растворение, выработка-емкость, сжатый воздух, газотурбинная электростанция.

Установка по сохранению энергии сжатого воздуха Compressed Air Energy Storage (CAES) аккумулирует энергию в форме давления воздуха во время снижения потребления энергии (в ночное время), затем использует такую энергию для выработки энергии при увеличении потребления энергии (в дневное время).

Инновационная ресурсовоспроизводящая технология использования подземных хранилищ, созданных методом растворения каменной соли через буровые скважины, для аккумулирования энергии сжатого воздуха на газотурбинных электростанциях во время снижения потребления энергии впервые была разработана и практически реализована специалистами ФРГ на воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции Хунторф. Отечественными специалистами впервые технология разрабатывалась в организации ВНИИПРОМГАЗ (впоследствии ООО «Подземгазпром»).

Концепция CAES зарекомендовала себя на двух действующих установках накопления энергии сжатого воздуха: в Хунторфе (ФРГ) и Макинтоше (штат Алабама, США).

Успешная эксплуатация этих двух установок продемонстрировала техническую целесообразность технологии CAES при предоставлении вспомогательных услуг, отслеживании нагрузки и временной выработки энергии.

На рис. 1 приведена схема обычной установки, работающей по технологии CAES.

Объем хранящегося воздуха, необходимого для стандартной установки CAES, обеспечивается геологическими структурами наиболее экономичным путем. Подземные выработки-емкости, созданные растворением каменной соли через скважины, водоносные горизонты, истощенные газо- и нефтеносные пласты и горные породы являются подходящими для хранения воздуха (подземные хранилища) в рамках технологии CAES.

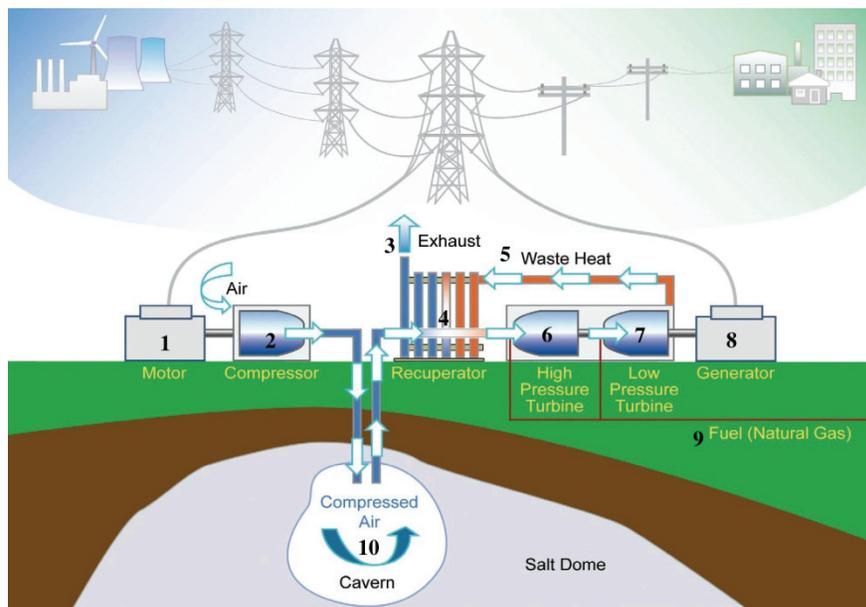


Рис. 1. Схема установки, работающей по технологии CAES:

- 1 — двигатель; 2 — компрессор; 3 — выхлопная труба; 4 — регенератор;
- 5 — отходящее тепло; 6 — турбина высокого давления; 7 — турбина низкого давления; 8 — генератор; 9 — топливо (природный газ);
- 10 — подземный резервуар сжатого газа

Возможность использования вырабатываемой ночью электроэнергии для покрытия пиков нагрузки реализуется с помощью воздушно-аккумулирующих газотурбинных установок.

Сжатие воздуха осуществляется в часы снижения нагрузки. Компрессорная группа воздушно-аккумулирующих газотурбинных электростанций (ВАГТЭ) приводится во вращение электрическим мотор-генератором (или отдельными электродвигателями), потребляющими недорогую электроэнергию. Воздух закачивается в подземный аккумулятор (подземное хранилище), где его энергия сохраняется (запасается).

В часы пика нагрузки, когда электроэнергия значительно дороже, воздух забирается из аккумулятора, подогревается за счет сжигания топлива и расширяется в турбинах, вращающих электрический генератор, который вырабатывает электроэнергию.

Эксплуатация подземных выработок-емкостей в каменной соли на воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции Хунторф. Первая установка такого типа эксплуатируется на ТЭС Хунторф (Huntorf) в ФРГ.

В подземные выработки-емкости в каменной соли подается воздух с давлением 6—7 МПа, охлажденный до 50 °С. Кратковременно минимально допустимое давление в выработке-емкости составляет 0,1 МПа. Минимально допустимое эксплуатационное давление для обеих выработок-емкостей составляет 2 МПа.

Подземный аккумулятор эксплуатируется при минимальном давлении воздуха на устье скважины, равном 4,3 МПа. Максимальное эксплуатационное дав-

ление воздуха на устье скважины подземного резервуара составляет 7 МПа. Скорость уменьшения давления в аккумуляторе в процессе отбора воздуха составляет не более 1,5 МПа/ч. Указанная величина скорости падения давления согласуется с условиями устойчивости при эксплуатации подземных резервуаров, созданных в каменной соли методом подземного растворения через вертикальные буровые скважины на глубинах до 900 м.

Отбор рассола из подземного аккумулятора при первоначальном заполнении воздухом осуществляется погружным насосом.

Опыт эксплуатации ТЭС считается успешным. Непрерывные наблюдения за содержанием солей в воздухе, поступающем из хранилища, показали, что вынос их незначителен, так что запроектированные для очистки воздуха фильтры не потребовались. Утечки воздуха из аккумуляторов составляют от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-5}\%$ за сутки. Действительные изменения температуры воздуха в аккумуляторах составляют 16 °С за цикл, а на входе в него — 23 °С. Они меньше, чем предполагалось при проектировании, вследствие более интенсивного теплообмена между воздухом и стенками выработки-емкости. В процессе заполнения аккумуляторов температура воздуха близка к температуре породы, равной 40 °С. Вследствие этого в них можно аккумулировать большее количество воздуха и обеспечить при снижении давления на 2 МПа работу с номинальной мощностью в течение 4,5 ч. После этого возможна работа еще в течение 1,5 ч с понижающимися расходом воздуха и нагрузкой до достижения температуры 10 °С на устье скважины. Более низкие температуры опасны, так как могут привести к обледенению клапанов перед газотурбинной установкой (ГТУ). Для предотвращения обледенения в первое время после включения ГТУ трубы, расположенные над поверхностью земли, оборудованы электроподогревом, с помощью которого температура воздуха в них поддерживается не ниже 10 °С. Если все же температура воздуха перед ГТУ оказывается более низкой, агрегат автоматически отключается.

После года эксплуатации ВАГТЭ деформаций стенок потолочины и дна подземной выработки-емкости, образования донных осадков, а также изменения герметичности аккумуляторов не наблюдалось. Геометрический объем аккумуляторов, определенный газодинамическими способами после года эксплуатации, составил 308 тыс. м³; близкое к этому значение было определено и после первого заполнения.

Проведенные звуколокационные измерения формы подземной выработки-емкости в двух взаимно-перпендикулярных сечениях показали, что изменения ее контуров, снятых ранее, практически отсутствуют (рис. 2). Даже в режиме генерирования при очень больших расходах воздуха, выноса солей из аккумулятора не наблюдается. Содержание солей (NaCl) в воздухе, выходящем из аккумулятора, не превышает 1 мг/кг и не вызывают коррозии деталей турбины. Практически вся соль, которая засасывается с воздухом из выработки, выводится из цикла ГТУ в выпадающем из воздуха конденсате в подземном аккумуляторе.

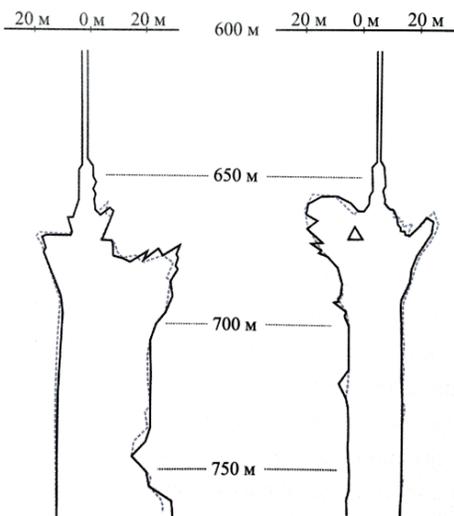


Рис. 2. Изменение контура выработки-емкости № 1 аккумулятора воздуха ВАГТЭ Хунторф с 1984 г. до 2001 г.: ----- — 1984 г.; ———— — 2001 г.

Колебания свободно висячих труб в выработке-емкости под действием движения по ним потока воздуха оказались незначительными. Они не ограничивают скорости воздуха и допускают эксплуатацию ВАГТЭ с номинальной нагрузкой от одного резервуара (выработки-емкости).

Хотя при проектировании принималась во внимание возможная коррозия труб при конденсации в них атмосферной влаги (их толщина выбрана большей, чем требуется по прочности), трубы были установлены без коррозионнозащитных покрытий.

20 лет регулярной эксплуатации ВАГТЭ подтвердили целесообразность устройства для аккумулярования воздуха двух независимых подземных резервуаров. При любых работах, связанных с ремонтом и профилактикой на одном резервуаре, другой резервуар обеспечивает нормальную эксплуатацию турбины.

По многим причинам может потребоваться опорожнение того или другого подземного резервуара со снижением давления в нем до атмосферного. Заполнение после этого пустого резервуара до давления 1,3 МПа намного проще от другого действующего резервуара.

Эксплуатация подземных выработок-емкостей на воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции Макинтош. Строительство подземного аккумулятора воздуха (подземной выработки-емкости в каменной соли) осуществлялось в течение двух лет. Удельная стоимость ВАГТЭ Макинтош составила 65 млн долл. или 590 долл./кВт. В настоящее время удельная стоимость аналогичных электростанций оценивается в 800—850 долл./кВт.

ВАГТЭ Макинтош была введена в промышленную эксплуатацию в середине 1991 г.

Подземный аккумулятор воздуха был создан в отложениях каменной соли через буровую скважину методом подземного растворения соли. Фактический

диаметр (пролет) подземной выработки-емкости составляет 48 м. Выработка-емкость расположена на глубине 460 м. Геометрический объем подземного резервуара составляет 624 тыс. м³.

За цикл работы давление воздуха в подземном аккумуляторе может изменяться от 7,62 МПа (конец зарядки) до 4,5 МПа (конец отбора). Рабочее давление на входе в ГТУ составляет 4,48 МПа на всех режимах эксплуатации. Расход воздуха при отборе из аккумулятора составляет 154 кг/с, отбор воздуха может продолжаться 26 ч.

Реализация инновационной ресурсовоспроизводящей технологии использования подземных хранилищ, созданных методом растворения каменной соли через буровые скважины, для аккумулирования энергии сжатого воздуха на газотурбинных электростанциях во время снижения потребления энергии, показала экономическую и технологическую эффективность и возможность совершенствования технологий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Воробьев А.Е.* Ресурсовоспроизводящие технологии горных отраслей: Учеб. пособие. — М.: МГГУ, 2001. [*Vorobiev A.E.* Resursovospriizvodiyaschie tekhnologii gornyx otraslei: Ucheb. posobie. — М.: MGGU, 2001.]
- [2] Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. [Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda, utv. rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 13 noyabrya 2009 g. № 1715-г.]
- [3] *Drew R.* A Case for Energy Storage // *Turbomachinery Int.* — 2010. — № 3. — P. 20—22.
- [4] *Makansi J.* Advancing Energy Storage // *Turbomachinery Int.* — 2010. — № 3. — P. 24—25, 28.
- [5] *Nakhamkin M., Kulkarni P., Schainker R., Key T.* New Utility Scale CAES Technology: Performance and Benefits (Including CO₂ benefits), 2007.

INNOVATIVE TECHNOLOGY OF UNDERGROUND COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE

**A.E. Vorobiev, V.P. Malyukov,
A.I. Ivanova**

Engineering Faculty
Peoples' Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

The article analyzes the innovative use of underground reservoirs created by the dissolution of rock salt through the drill holes for compressed air energy storage on gas turbine power plants while reducing energy consumption.

Key words: rock salt, underground dissolution, reservoir, compressed air, gas turbine power plant.