

УДК 621.311.25:621.039.004.14:338.5.001.5

К вопросу о конкурентоспособности системы аккумуляции тепловой энергии как способа организации маневренного режима АЭС

Н. И. Абросимова, М. М. Каверзнев

Сведения об авторах

Абросимова Надежда Игоревна — аспирантка кафедры Атомных электрических станций МЭИ, e-mail: ani-mpei@rambler.ru
Каверзнев Михаил Михайлович — кандидат технических наук, доцент кафедры Атомных электрических станций МЭИ

Выполнены оценки конкурентоспособности системы аккумуляции тепловой энергии (САТЭ) на основе высокотемпературного теплоносителя (ВТТ) в составе энергоблока АЭС типа ВВЭР и рассмотрены некоторые способы ее повышения.

Приведены варианты исполнения системы аккумуляции, отличающиеся схемой замещения регенеративных подогревателей штатной паротурбинной установки (ПТУ).

В качестве конкурирующей технологии рассмотрены системы прямого аккумуляции электроэнергии на основе жидкометаллических аккумуляторов (Liquid Metal Battery — LMB) с полупроводниковыми инверторами в качестве преобразователей. Количественными критериями сравнения служат удельные затраты на единицу мощности (\$US/кВт) и на единицу емкости системы (\$US/кВт•ч).

Показано, что LMB-системы + инверторы в случае подтверждения их анонсированных характеристик по названным критериям близки или превосходят существующие варианты исполнения САТЭ.

Описаны способы повышения удельных показателей САТЭ: использование инертных наполнителей и форсировочных возможностей ПТУ, оптимизация температурных параметров ВТТ.

Оценки затрат на оборудование при изменении его технических характеристик сделаны на основе подходов Cost Estimating (оценки стоимости), широко применяемых в целях технико-экономического обоснования проектов АЭС IV поколения.

Доказано, что реализация рассмотренных способов совершенствования САТЭ АЭС позволяет улучшить удельные показатели по емкости примерно вдвое, по мощности — примерно на 30%. Оптимизация температур дает дополнительный выигрыш по затратам на единицу емкости порядка 5%.

Возможность столь существенного улучшения характеристик относительно простыми способами позволяет технологии теплового аккумуляции шанс сохранить свою нишу в современных проектах энергоблоков АЭС.

Ключевые слова: паротурбинная установка, маневренный режим, система аккумуляции тепловой энергии, высокотемпературный теплоноситель, жидко-металлические батареи, конкурентоспособность, Cost Estimating.

About the competitiveness of a thermal energy storage system as a way of setting up the NPP load following mode

N. I. Abrosimova, M. M. Kaverznev

Information about authors

Abrosimova Nadezhda I. — Ph.D.-student of Nuclear Power Plants Dept., MPEI, e-mail: ani-mpei@rambler.ru
Kaverznev Mikhail M. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Nuclear Power Plants Dept., MPEI

The article estimates the competitiveness of the thermal energy storage system (TESS) based on a high-temperature coolant (HTC) used as part of a VVER-based NPP unit. Some ways of improving the TESS competitiveness are considered.

A few storage system versions differing in the equivalent process circuit of the regenerative heaters of the regular steam-turbine plant are presented.

The direct electric energy storage systems based on using a Liquid Metal Battery (LMB) with solid-state inverters as DC/AC converters are considered as an alternative technology.

The specific expenditures per unit power (\$US/kW) and per unit capacity (\$US/kWh) of the system serve as quantitative criteria.

It is shown that the LMB-systems in combination with inverters are close to or outperform the existing versions of TESS in terms of the above-mentioned criteria provided that their declared characteristics are confirmed.

Possible ways to improve the specific TESS indicators are described, in particular, the use of inert fillers and utilization of the steam-turbine plant boosting capacities, and optimization of the HTC temperature parameters.

The expenditures for the equipment (with varying its technical characteristics) were evaluated using the Cost Estimating approaches, techniques widely used for feasibility studies in substantiating the implementation of Generation IV NPP designs.

It is shown that, by implementing the considered ways of improving the NPP TESS, the system specific indicators can be improved approximately by a factor of 2 in capacity and by about 30% in power. The optimization of temperatures gives an additional gain of around 5% in expenditures per unit capacity.

The possibility of such a significant improvement of TESS characteristics by using relatively simple methods gives the thermal storage technology a chance to preserve its place in the modern designs of NPP units.

Key words: steam turbine plant, load-following mode, thermal energy storage system, high-temperature coolant, liquid metal batteries, competitiveness, Cost Estimating.

Введение

Системы аккумулирования тепловой энергии (САТЭ) применительно к энергоблокам АЭС представляют интерес как способ обеспечить приемлемые технико-экономические показатели работы электростанции в режиме суточного регулирования, позволяя при этом сохранить базовый режим работы реакторной установки (РУ), что весьма желательно с точки зрения надежности и безопасности ядерного объекта.

САТЭ в проектах отечественных АЭС прошли весьма долгий путь от использования дорогостоящих аккумуляторов тепла на горячей воде в проекте Татарской АЭС [1] до весьма совершенной системы [2], использующей в качестве аккумулирующей среды высокотемпературный теплоноситель (ВТТ), включенный в качестве опции в проект НВАЭС-2 [3].

Современная САТЭ, на примере названного проекта, позволяет аккумулировать несколько сот МВт·часов электроэнергии с КПД около 80% и обеспечивает беспрецедентно низкие удельные показатели затрат – примерно на порядок ниже, чем гидро-аккумулирующие станции (ГАЭС) – в силу использования форсировочных возможностей уже установленного оборудования и относительно невысоких дополнительных затрат.

Отдавая должное возможностям системы и достижениям ее разработчиков, следует понимать, что САТЭ, как и другие способы косвенного аккумулирования, вызваны к жизни сложностью прямого аккумулирования электроэнергии и, отчасти, преобразования постоянного тока в переменный в промышленных масштабах с приемлемой экономикой.

Между тем проблема трансформации, в свое время предопределившая гибель энергетики постоянного тока, на сегодня практически снята. Колоссальный прогресс силовой электроники сделал полупроводниковый инвертор из экзотики бытовым прибором и обеспечил преобразование токов в диапазоне от единиц ватт в быту до нескольких ГВт для ЛЭП постоянного тока.

Обычно производители силовой электроники, такие как Siemens, ABB, Alstom Grid, не публикуют информацию о стоимости проекта, ссылаясь на коммерческую тайну. Не претендуя на всеобъемлющее исследование вопроса, приведем некоторые оценки на основе обще-

доступных источников, достаточные для целей дальнейшего изложения.

На примере проложенной под Ла-Маншем 8 ГВт 40 км линии, современная высоковольтная линия электропередачи постоянного тока (HVDC) требует приблизительных затрат на преобразовательные станции для биполярной линии на 500 кВ мощностью 2000 МВт около £110М, что дает примерное значение удельных капитальных затрат на преобразователи 82,5 \$US/кВт (при курсе английского фунта к доллару США 1,5).

Остается нерешенным вопрос прямого аккумулирования электроэнергии в больших объемах.

Классический способ прямого аккумулирования — химическое аккумулирование, несмотря на более чем полуторазековую историю, мог предложить до последнего времени возможность накопления энергии в объемах до нескольких МВт·ч в системах и целях, в которых их применение практически безальтернативно или вопрос цены вторичен (системы резервного питания или военного назначения). Дороговизна химического аккумулирования вкупе с ограниченным сроком службы и необходимостью многократной замены за время службы современной АЭС (50 — 60 лет) делают их малопригодными для крупномасштабной энергетики.

Часто упоминаемые в популярной литературе накопители на маховиках, сверхпроводниках и т.п. до сих пор представляют из себя скорее экзотику или игрушки физиков, нежели промышленные системы.

В связи с этим весьма интересна разработка группой проф. Д. Садовэя (D. Sadoway, MIT) технологии «жидко-металлических аккумуляторов» (Liquid Metal Battery — LMB) [4]. Не вдаваясь в подробности, следует отдать должное оригинальности мышления и практической хватке американских коллег: им удалось создать практически вечный аккумулятор (коэффициент потери емкости 0,00021% за цикл, что означает срок службы 96 лет при 20% потере емкости) и довести дело до промышленного образца [5]. Цена на сайте не указана, однако, по заявлениям руководителя группы и других авторов, предложенная технология позволит «напрямую» аккумулировать электроэнергию в промышленных масштабах при затратах 50 — 100 \$US/кВт·ч емкости устройства для лабораторного масштаба производства. Основным недостатком — работа при температуре плавления компонентов

(изначальный вариант – магний-сурьма, около 700 °С) требует поиска более легкоплавких сред, что может вызвать некоторое удорожание системы (в [6] называется цифра 65 \$US/кВт·ч), однако поиск далеко не закончен.

Судя по имеющимся данным, у технологии LMB весьма высокий потенциал. Несколько более популярным языком, подчеркнем: если анонсы разработчиков верны, то им удалось по цене в два раза ниже общеизвестного автомобильного свинцово-кислотного создать практически вечный аккумулятор, позволяющий выдерживать огромные токовые нагрузки при заряде/разряде.

В истории науки и техники не раз встречались случаи, когда совершенные, отточенные десятилетиями (если не веками) использования технологии уступали место новым, порой менее изящным, но более современным и экономически выгодным.

В связи с этим отнюдь неспроста представляется вопрос о конкурентоспособности САТЭ, закладываемых в проекты перспективных АЭС отечественной разработки, с альтернативными технологиями, а также о возможности, перспективах и способах повышения конкурентоспособности систем теплового аккумулирования.

Чаховский vs. Sadoway

Детальное сравнение технико-экономических показателей требует учета всех видов затрат и эффекта на протяжении всего жизненного цикла объекта, подтвержденных опытом эксплуатации, и учета достаточно достоверных прогнозов на будущее. Анализ, результаты которого обычно приводятся в виде приведенных затрат на выпуск единицы продукции (LCOE — the levelized cost of electricity) с расшифровкой структуры, весьма трудоемок и не всегда надежен в силу, например, того же отсутствия данных по опыту использования сравниваемых систем.

В связи с этим на первом этапе имеет смысл сравнивать некие укрупненные показатели, к слову, более удобные для восприятия большинству практиков.

Ниже приведены оценки удельных стоимостных показателей на единицу мощности и единицу емкости устройства для различных технологий аккумулирования: САТЭ в четырех вариантах реализации применительно к энергоблоку АЭС ВВЭР-1200 (В.М. Чаховский, [3]) и инверторных систем на основе жидких аккумуляторов (D.R. Sadoway, [4]).

Сравнение производилось следующим образом.

С некоторой степенью условности в аккумулирующей системе на основе химических аккумуляторов и инверторов может быть выделена и оценена стоимость собственно аккумулирующей части и преобразующей системы. Отнесение соответствующих оценок стоимости к техническим показателям устройства (объему накопленной электроэнергии за один цикл зарядки/разрядки и выдаваемой мощности для аккумуляторов и преобразователей соответственно) позволяет получить соответствующие технико-экономические показатели — удельные затраты на кВт выдаваемой мощности и кВт·ч емкости аккумулирующей системы.

По аналогии с этим, в САТЭ может быть выделена часть, отвечающая собственно за накопление энергии (ВТТ), и часть, отвечающая за преобразование (теплообменники, насосы и т.п.). Стоимость ПТУ, трансформаторов и других элементов АЭС не учитываем — мы используем их «факультативно», затраты на их создание отнесены к собственно АЭС, не к САТЭ.

Показатели приведены в долларах США при курсе 1\$US = 30 руб.

Для LMB-систем с инверторными преобразователями, как было показано выше, соответствующие удельные показатели составляют 50 \$US/кВт·ч и 82,5 \$US/кВт.

Весьма интересные результаты оценки приведены в таблице и на рисунке

Технико-экономические характеристики САТЭ в различных вариантах (по данным [3])

Параметр	Варианты с различной степенью вытеснения РП/ мощностью			
	САТЭ			
	1	2	3	4
Приrost пиковой мощности с учетом разной степени «вытеснения» регенеративных отборов пара, МВт(э)	65	101	163,3	205,4
Разгрузка турбоустановки в режиме зарядки АТ, МВт (э)	62,1	84,8	134	162
Выработка пиковой электроэнергии в часы «пик» на энергоблоке с САТЭ, МВт·ч/сут	260	401	653,2	821,6
Потребность ВТТ для аккумулирования теплоты, т	10056	13720	21600	26160
Стоимость ВТТ, млн.руб.	603,36	823,2	1296	1569,6
Стоимость оборудования, включая арматуру и трубопроводы, баки АТ и вспомогательных систем, млн руб.	476	620	690	774,8
Суммарные капитальные затраты в САТЭ, млн руб.	1079,36	1443,2	1986	2371,4
Удельные затраты на кВт пиковой мощности, \$US/кВт	244,1	204,6	140,8	125,7
Удельные затраты на кВт·ч емкости системы, \$US/кВт·ч	77,4	68,4	66,1	63,7

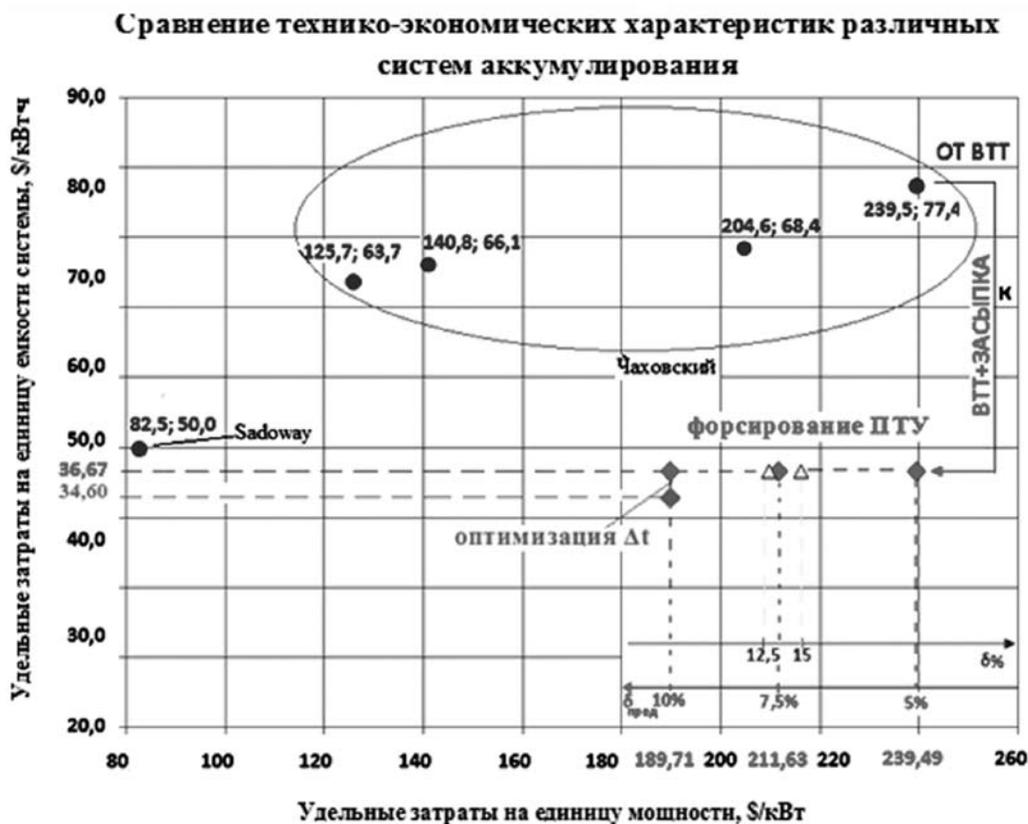


Рис. 1. Сравнение технико-экономических характеристик различных систем аккумулярования:

LMB-технология + инверторы (Sadoway) и САТЭ в различных конфигурациях (Чаховский). Правая верхняя точка примерно соответствует параметрам САТЭ в проекте НВАЭС-2

Как видно из результатов оценок, LMB-технология с полупроводниковыми инверторами в качестве преобразователей, если верить анонсируемым показателям, весьма близка к технологии теплового аккумулярования по показателям удельной емкости (в пределе превосходит ее), и существенно превосходит ее по удельным затратам на мощность.

При этом, чисто электрическая LMB-система не требует даже минимального вмешательства в тепловую схему ПТУ и компоновку машзала и, в принципе, может быть установлена в любом месте площадки АЭС или вне ее.

В части эксплуатации система на основе необслуживаемых аккумуляторов также может иметь существенные преимущества по эксплуатационным затратам, темпу сброса/набора нагрузки и т.д.

По опыту использования многих технических систем и объектов, проигрыш по одному из показателей делает вопрос выбора технологии делом технико-экономического обоснования. Фиаско по двум параметрам может предопределить проигрыш технологии, сохранение ее только в нишевых областях.

В связи с этим небезынтересно представлять, каковы возможные направления совершенствования САТЭ и степень их влияния на характеристики системы.

О путях совершенствования САТЭ

Работы по тепловому аккумулярованию имеют длительную историю и обширнейшую библиографию, даже краткое описание которых потребовало бы отдельной работы. Специалисты НИУ МЭИ и кафедры АЭС также не оставались «в стороне от прогресса», в частности, работы по технико-экономическому обоснованию вариантов нового поколения САТЭ на основе ВТТ в инициативном порядке ведутся на кафедре АЭС в содружестве со специалистами АО «ВНИИАЭС» и ЗАО «Исследовательский центр «ЭРКО» более 10 лет [7].

Детальное рассмотрение способов совершенствования систем теплового аккумулярования не является целью данной статьи. Отметим лишь, что у САТЭ, в отличие от химического аккумулярования, есть гигантский потенциал удешевления — возможность применять бесплатные или условно-бесплатные среды — воду, горные породы, грунт.

Пытливый ум исследователей предлагает широчайший спектр весьма изощренных способов использования таких сред: подземные аккумуляторы воды [8], позволяющие уйти от использования наземных сосудов под давлением; подземные массивы пород [9], способные накапливать ГВт-годы энергии и превращающие

АЭС в сложный комплекс с геотермальной электростанцией. Платой за это, увы, является усложнение конструкции аккумулятора, системы подвода/отвода теплоты и, в конечном счете, существенное удорожание системы.

Ниже приведены оценки влияния некоторых достаточно очевидных способов совершенствования САТЭ на удельные характеристики системы.

Использование инертных наполнителей

Первым, интуитивно понятным способом удешевления собственно аккумулятора на основе весьма дорогостоящего ВТТ является использование тех или иных инертных наполнителей, уменьшающее количество теплоносителя и низводящее его роль в пределе (при искусственном снижении пористости, если такое удастся осуществить с приемлемыми затратами) до функций собственно переноса тепла.

В качестве примера на рисунке показано изменение удельных показателей САТЭ при использовании в качестве инертного наполнителя гранитной щебенки с естественной пористостью при современном уровне цен (пористость засыпки 0,26; теплоемкость 0,85 кДж/кг·К; плотность материала 2600 кг/м³; цена 2000 руб/м³).

На примере крайней правой точки удельные затраты на емкость снижаются примерно в 2 раза.

Использование форсировочных возможностей ПТУ

В оригинальной работе [10] рассматривалась задача оптимизации степени форсирования ПТУ САТЭ, включая вариант использования турбины с мощностью выше номинальной мощности энергоблока. Критерием оптимальности служил минимум срока окупаемости САТЭ. Дабы избежать трудоемких расчетно-конструкторских проработок, при оценке затрат были использованы подходы Cost Estimating [11], широко использующиеся при сравнительной технико-экономической оценке вариантов проектов АЭС IV поколения.

С использованием этих результатов можно показать, что форсирование штатной ПТУ энергоблока ВВЭР-1200 с 5,4 до 10% сверх номинала позволяет улучшить удельные показатели САТЭ по мощности примерно на треть (см. рисунок).

Дальнейшее форсирование ПТУ до 12,5 — 15% (в модели заложены дополнительные затраты на модернизацию) несколько ухудшает эти параметры.

Оптимизация температурных напоров в теплообменниках САТЭ и диапазона нагрева ВТТ

В идеальном варианте параметры функционирования САТЭ должны быть заданы таким образом, чтобы минимально влиять на работу реакторной установки и ПТУ. Это диктует условие постоянства температуры

питательной воды (ПВ) на входе в парогенератор (ПГ) независимо от режима работы САТЭ и ПТУ (базовый режим, зарядка, разрядка).

В то же время максимальную температуру нагрева ВТТ можно менять теоретически от температуры питательной воды до температуры греющего пара (острый пар из ПГ), что влияет на температурные напоры в теплообменниках зарядки и разрядки (а значит, на площадь трубчатки и стоимость, причем с противоположным знаком), а также на количество (и стоимость) ВТТ, что позволяет выполнить оптимизацию по минимуму суммарных затрат на теплообменники САТЭ и ВТТ.

Оценки показывают, что оптимизация диапазона нагрева ВТТ и температурных напоров дает дополнительный выигрыш по удельным затратам на емкость порядка 5% (см. рисунок).

Выводы

Полученные оценки показывают, что весьма совершенные и относительно дешевые системы косвенного аккумулирования электроэнергии на основе САТЭ с ВТТ в составе АЭС имеют серьезных потенциальных конкурентов в лице систем прямого аккумулирования на основе жидко-металлических аккумуляторов с полупроводниковыми инверторами.

Использование достаточно простых способов совершенствования САТЭ (засыпка, полное использование форсировочных возможностей ПТУ, оптимизация тепловых напоров) позволяет улучшить удельные показатели САТЭ по емкости примерно вдвое, по мощности на 30%, как минимум, сохранив конкурентные преимущества САТЭ и свою нишу в энергетике.

Приходится констатировать, что показатель, по которому проект САТЭ существенно отстает от конкурирующих зарубежных проектов — темп доведения инноваций до промышленных образцов и их внедрения, — что, впрочем, уже не относится к собственно науке и технологиям.

Литература

1. **Чаховский В.М.** Тепловые аккумуляторы на АЭС // Атомная энергия. 1984. Т. 56. № 6. С. 389 — 396.
2. **Сопленков К.И., Чаховский В.М., Воронин А.Л.** Система аккумулирования тепловой энергии (САТЭ) повысит конкурентоспособность АЭС в условиях суточного регулирования электрических нагрузок. М.: ФГУП «ЦНИИАтоминформ», Центр «Атом-инновация», 2007.
3. **Бельский А.А., Чаховский В.М.** Оценка технической возможности и экономической целесообразности работы АЭС с ВВЭР в маневренных режимах за счет использования тепловых аккумуляторов энергии во втором контуре [Электрон. ресурс]. <http://www.rosenergoatom.info> (дата обращения 05.09.16).

4. **Kim H. e. a.** Liquid Metal Batteries: Past, Present, and Future // Chem. Rev. 2013. V. 113. Iss. 3. P. 2075 — 2099.

5. **AMBRI.** Liquid metal battery cell technology [Электрон. ресурс].www.ambri.com (дата обращения 15.09.16).

6. **Wang K. e. a.** Lithium–antimony–lead liquid metal battery for grid-level energy storage // Nature. 2014. V. 514 P. 348 — 350.

7. **Каверзнев М.М., Фатеев В.В.** Оценка технико-экономической эффективности создания пиковых мощностей на основе комплексов АЭС+САТЭ // Вестник МЭИ. 2006. № 5. С. 94 — 97.

8. **Глазков В.В., Синкевич О.А., Чикунов С.Е.** Подземные водяные тепловые аккумуляторы для

АЭС — новые перспективы // Вестник МЭИ. 2011. № 3. С. 23 — 30.

9. **Forsberg Ch.** Hybrid baseload nuclear power for variable electricity and fuels // Nuclear News. 2012. P. 34 — 37

10. **Абросимова Н.И.** Оценка оптимальной пиковой мощности энергоблока ВВЭР-1200 с САТЭ на основе подходов Cost Estimating // Вестник МЭИ. 2015. № 3. С. 22 — 27.

11. **Cost estimating guidelines for generation IV nuclear energy systems. Revision 4.2.** OECD Nuclear Energy Agency, 2007.

Статья поступила в редакцию 21.06.2016