

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ НА СЖИЖЕННОМ ВОЗДУХЕ, ИНТЕГРИРОВАННОЙ С УСТАНОВКОЙ СЖИЖЕНИЯ ЗЕЛЕННОГО ВОДОРОДА**

**Аабдани Х.<sup>1</sup>**

**Научный руководитель – доктор техн. наук, проф. Рассохин В.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
houssamaabdani1997@gmail.com

Работа выполнена в рамках темы НИР №1 «Моделирование и оптимизация системы хранения энергии на сжиженном воздухе, интегрированной с установкой сжижения зеленого водорода».

### **Введение**

Растущее использование возобновляемых источников энергии создает проблемы, поскольку производство электроэнергии становится более непредсказуемым из-за естественной неопределенности солнечных и ветровых энергетических ресурсов. Система сталкивается с существенными трудностями в поддержании надежного энергоснабжения, поскольку ее конструкция ориентирована на производство энергоемких продуктов, в том числе водорода. Зеленый водород служит важным источником энергии для декарбонизации промышленности, транспорта и производства электроэнергии, однако его производство и хранение требуют значительных энергетических ресурсов.

Операции по производству водорода достигают пикового энергопотребления на этапе сжижения, который требует систем охлаждения для достижения температурных уровней, близких к 20 К. Этот этап требует высокого потребления электроэнергии, что приводит к значительному снижению общей эффективности водородных энергетических систем.

Система хранения энергии в виде жидкого воздуха, которая хранит электрическую энергию в виде криогенного потенциала, обеспечивает рекуперацию энергии посредством процесса регазификации [1]. Исследовательское сообщество сосредоточило свои усилия на изучении возможности интеграции технологии LAES с системами хранения тепловой энергии и системами рекуперации криогенного холода, что приводит к повышению эффективности работы обеих технологий [2–4]. Цель данного исследования — представить всесторонний обзор технических возможностей, существующих для соединения систем LAES с установками по сжижению экологически чистого водорода.

### **Основная часть**

Стандартная система LAES работает с помощью ряда ступеней сжатия, которые сжимают воздух, а затем передают сжатый воздух в криогенную систему, которая производит жидкий воздух, который хранится в изолированных резервуарах и позже преобразуется обратно в газ для выработки механической и электрической энергии. Система испытывает значительные потери энергии, поскольку она должна отводить тепло, производимое во время сжатия, и при этом требует чрезвычайно низких температур для охлаждения воздуха. Интеграция устройств хранения тепловой энергии вместе с криогенными системами рекуперации холода представляет собой основной метод повышения эффективности систем LAES.

Результаты исследований показывают, что стандартные системы LAES, в которых отсутствует тепловая интеграция, имеют проблемы с эффективностью, поскольку в процессе сжижения воздуха они испытывают значительные потери

эксергии [1]. Система использует накопители тепловой энергии, которые позволяют повторно использовать тепло сжатия на этапе расширения, что приводит к повышению эффективности работы [3]. Система достигает лучших результатов благодаря использованию холодной энергии, которая высвобождается при регазификации жидкого воздуха.

Исследование посвящено конкретно тому, как системы хранения энергии LAES работают вместе с установками по сжижению водорода. Криогенное охлаждение, возникающее при расширении жидкого воздуха, может быть использовано для предварительного охлаждения водорода, что значительно снижает нагрузку на системы охлаждения водорода. Технологическая интеграция позволяет системам снизить потребность в охлаждении на 40–60 %, что, согласно результатам недавних исследований, приводит к сокращению энергозатрат и эксплуатационных расходов [2].

Комплексная интеграция тепловых и криогенных энергетических потоков создает каскадную энергетическую структуру, которая благодаря своей конструкции обеспечивает максимальную энергоэффективность. Технология LAES предоставляет еще одно преимущество, поскольку ее объемная энергетическая плотность превосходит энергохранилищную емкость традиционных методов, таких как хранение энергии сжатого воздуха и гидроаккумулирующие электростанции, которые используют свои методы хранения [4].

### **Выводы**

Результаты анализа показывают, что общая энергоэффективность гибридных энергетических комплексов может быть значительно повышена за счет объединения установок по производству и сжижению экологически чистого водорода с системами хранения энергии в виде жидкого воздуха. Использование технологий хранения тепловой энергии и криогенного рекуперации холода может привести к повышению эффективности эксплуатации на 65–72%, сокращению энергии, необходимой для сжижения водорода, на 20–30% и снижению общих эксплуатационных расходов.

Существует потребность в исследованиях, посвященных разработке динамических эксплуатационных моделей, оптимизации материалов для теплового хранения и повышению надежности криогенных компонентов, с целью практической реализации водородных систем LAES. Результаты, представленные в этом обзоре, могут быть применены при концептуальном проектировании и оптимизации гибридных энергетических систем, направленных на крупномасштабную интеграцию возобновляемых источников энергии и развитие водородной инфраструктуры.

### **Литература**

1. Damak C., et al. Хранение энергии в жидком воздухе (LAES) как технология крупномасштабного хранения для интеграции возобновляемых источников энергии: обзор исследований и ближайшие перспективы LAES // *International Journal of Refrigeration*. 2019. URL: <https://hal.inrae.fr/hal-03176291v1>.
2. Tafone A., et al. Хранение энергии в жидком воздухе (LAES), интегрированное в водородную экономику: технико-экономическая оптимизация рекуперации холода от регазификации жидкого водорода // *Journal of Energy Storage*. 2025. DOI: 10.1016/j.est.2025.117763.
3. International Renewable Energy Agency (IRENA). Перспективы инноваций: накопление тепловой энергии. Abu Dhabi : IRENA, 2020. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA\\_Innovation\\_Outlook\\_TES\\_2020](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020)
4. Wang Y., Yuting E. Технические особенности и тенденции развития систем хранения энергии в виде жидкого воздуха // *E3S Web of Conferences*. 2025. Vol. 606. Art. 02006. URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2025/06/e3sconf\\_icnaoe2024\\_02006.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2025/06/e3sconf_icnaoe2024_02006.pdf)