

АНАЛИЗ АВТОНОМНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Тамаров В. В. (ИТМО)

Научный руководитель – профессор, доктор технических наук, Бараненко А. В. (ИТМО)

Введение. Надежное охлаждение в отдаленных регионах имеет решающее значение для сохранения продуктов питания и хранения товаров, чувствительных к температуре, включая лекарства. В местах, не подключенных к централизованной электросети, отсутствие централизованного электроснабжения требует автономных решений для охлаждения, способных поддерживать три температурных уровня: $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (быстрая заморозка), $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (замороженное хранение) и $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (охлажденное хранение). В данном исследовании рассматриваются три независимые конфигурации холодильных установок: парокомпрессионная система с солнечным электропитанием и аккумуляторным хранилищем, парокомпрессионная система с дизель-генератором и криогенная система охлаждения на основе жидкого азота. Во всех случаях для стабилизации тепловых нагрузок, снижения пиковых нагрузок на энергопотребление и повышения автономности работы интегрированы холодовые аккумуляторы на основе веществ с фазовым переходом (ВФП).

Основная часть. Технический анализ основан на термодинамическом моделировании многоступенчатых парокомпрессионных циклов и криогенных процессов охлаждения в сочетании с моделированием нестационарного теплообмена в аккумуляторах с фазопереходными веществами. Модель учитывает производительность компрессора, поведение при частичной нагрузке, условия окружающей среды и тепловую инерцию, обеспечиваемую блоками ВФП. Для уровней $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в качестве кандидатов на роль ВФП рассматриваются солевые гидраты и водные растворы, а для быстрой заморозки при $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ оцениваются низкотемпературные эвтектические смеси. Гидраты солей признаны подходящими для накопления холода благодаря высокой скрытой теплоте фазового перехода.

Система, работающая на солнечной энергии, использует фотоэлектрические модули и аккумуляторные батареи для привода компрессора. Интеграция в систему охлаждения аккумулятора холода с ВФП значительно снижает требуемую емкость батареи за счет смещения пиковых нагрузок охлаждения и обеспечения прерывистой работы компрессора. Аналогичные эффекты выравнивания нагрузки при использовании тепловых аккумуляторов были продемонстрированы в таких исследованиях, как [1] и [2]. Однако производительность системы сильно зависит от изменчивости солнечной радиации и деградации батареи в условиях низких температур.

Система с дизельным двигателем обеспечивает высокую надежность и предсказуемую выходную мощность, при этом компрессор работает независимо от наличия солнечной энергии. Блоки с веществом с фазовым переходом снижают частоту циклов работы генератора и расход топлива за счет сглаживания переходных нагрузок. На техническую эффективность влияют КПД генератора при частичной нагрузке и требования к техническому обслуживанию в отдаленных регионах.

Система на жидком азоте исключает механическое сжатие и использует прямое криогенное охлаждение. Термодинамическую эффективность необходимо оценивать на основе жизненного цикла, учитывая энергию, необходимую для сжижения азота. Хотя

выбросы на месте минимальны, энергоемкость на этапе производства значительна. Криогенные системы хранения холода и их эксергетические характеристики были проанализированы в таких работах, как [3], и в недавних исследованиях в журнале Energy. Экономический анализ сравнивает капитальные затраты, логистику поставок топлива или расходных материалов, техническое обслуживание и замену компонентов на протяжении всего жизненного цикла. Солнечные системы демонстрируют более высокие капитальные затраты, но более низкие эксплуатационные расходы. Дизельные системы имеют умеренные капитальные затраты с постоянными расходами на топливо. Системы, работающие на жидком азоте, требуют стабильных цепочек поставок и влекут за собой постоянные расходы на криогенное вещество.

Экологическая оценка учитывает выбросы парниковых газов, местное загрязнение и потребность в энергии на протяжении всего жизненного цикла. Системы, работающие на солнечной энергии, демонстрируют самые низкие эксплуатационные выбросы. Дизельные системы производят прямые выбросы CO₂ и NO_x. Системы, работающие на жидком азоте, переносят выбросы на стадию ожижения.

Выводы. Сравнительный анализ показывает, что конфигурация системы охлаждения с использованием солнечной энергии и интеграцией аккумуляторов холода с ВФП является экологически более предпочтительной и экономически целесообразной при достаточном наличии солнечных ресурсов. Система с дизельным двигателем обеспечивает надежность и операционную независимость, но оказывает большее воздействие на окружающую среду. Конфигурация с жидким азотом предлагает механическую простоту и возможность быстрого охлаждения, но сильно зависит от логистики поставок и энергоемкости на начальном этапе. Интеграция аккумуляторов холода значительно повышает стабильность системы и снижает пиковую потребность в энергии во всех конфигурациях, что делает их критически важным компонентом автономных холодильных систем.

Список использованных источников:

1. Nie B., Palacios A., Zou B., Liu J., Zhang T. Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 134. – Art. 110340. – DOI: 10.1016/j.rser.2020.110340
2. Rathod M. K., Banerjee J. Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials // Thermal Science and Engineering Progress. – 2021. – Vol. 22. – Art. 100807. – DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100807
3. Zhang Y., Wang Y., Liu Y., et al. The dynamic performance of a compact LN₂ depressurization cryocooling system // Cryogenics. – 2023. – Vol. 132. – Art. 103682. – DOI: 10.1016/j.cryogenics.2023.103682