

УДК 621.928.6

UDC 621.928.6

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОВОЙ
НАКОПИТЕЛЬ С
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РАБОЧИМ
ТЕЛОМ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ**

**ENERGY-EFFICIENT THERMAL STORAGE
SYSTEM WITH A HIGH-TEMPERATURE
WORKING MEDIUM FOR AGRICULTURAL
INDUSTRIAL FACILITIES**

Зинуров Вадим Эдуардович
Канд. техн. наук
SPIN – код автора: 1564-3438
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Zinurov Vadim Eduardovich
Cand.Tech.Sci.
RSCI SPIN-code: 1564-3438
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Якимов Николай Дмитриевич
Д-р физ.-мат. наук, профессор
SPIN – код автора: 2960-4372
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Yakimov Nikolay Dmitrievich
Dr.Sci.Phys.-Math., Professor
RSCI SPIN-code: 2960-4372
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Чернова Олеся Станиславовна
Студент
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Chernova Olesia Stanislavovna
Student
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

В условиях роста потребности в энергоэффективных технологиях для агропромышленных объектов тепловые накопители с высокотемпературными рабочими средами приобретают особую актуальность. В данной статье рассматривается разработка и исследование теплового накопителя с двусторонним преобразованием энергии, способного аккумулировать избыточную электрическую энергию в виде тепла и возвращать её в виде электричества при необходимости. Применение графита позволяет накопителю эффективно сохранять тепловую энергию при температурах до 2500°C, что обеспечивает стабильное тепловое снабжение при переменном энергопотреблении. Конструкция накопителя включает двухслойную систему теплоизоляции с внутренним слоем из вольфрамовых экранов и внешним — из минеральной ваты. Такое сочетание позволяет значительно уменьшить теплопотери, сохраняя необходимую температуру внутри системы при минимальных затратах на изоляционные материалы. На выходе система оснащена многозонными термофотоэлектрическими (TPV) преобразователями, которые преобразуют тепловую энергию в электрическую. Проведённые исследования демонстрируют, что предложенный тепловой накопитель позволяет существенно

With the increasing demand for energy-efficient technologies in agricultural industrial facilities, thermal storage systems using high-temperature working media are becoming highly relevant. The main working material in the storage system is graphite powder, known for its high thermal conductivity, thermal stability, and cost-effectiveness, making it ideal for use in high-temperature environments. Graphite enables the storage system to efficiently retain thermal energy at temperatures up to 2500°C, providing stable heat supply under fluctuating energy demand. The storage design includes a two-layer insulation system with an inner layer of tungsten screens and an outer layer of mineral wool. This combination significantly reduces heat loss, maintaining the necessary internal temperature with minimal costs for insulation materials. At the output, the system is equipped with multiband thermophotovoltaic (TPV) converters that convert thermal energy into electrical energy. The research findings demonstrate that the proposed thermal storage system can substantially improve energy efficiency in agricultural industrial facilities, reducing heating costs and supporting facility autonomy, even under unstable power supply conditions

повысить энергоэффективность агропромышленных объектов, снижая затраты на отопление и обеспечивая автономность объектов даже в условиях нестабильного энергоснабжения

Ключевые слова: ТЕПЛОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ДВУСТОРОННЕЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ, ГРАФИТ, МНОГОЗОННЫЕ TPV-ЭЛЕМЕНТЫ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ РАБОЧИЙ МАТЕРИАЛ

Keywords: THERMAL STORAGE SYSTEM, AGRICULTURAL INDUSTRIAL COMPLEX, BIDIRECTIONAL ENERGY CONVERSION, GRAPHITE, MULTIBAND TPV CELLS, ENERGY EFFICIENCY, HIGH-TEMPERATURE WORKING MATERIAL

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-204-010>

Введение. Современное развитие агропромышленного сектора требует внедрения энергоэффективных решений, способных обеспечить устойчивое функционирование при интенсивных нагрузках. В условиях глобальных вызовов, таких как нехватка энергоресурсов и изменение климата, использование тепловых накопителей приобретает особую значимость. Эти системы позволяют аккумулировать и сохранять избыточную тепловую энергию, что открывает новые возможности для обеспечения стабильного температурного режима, особенно в северных регионах с нестабильными условиями. Применение высокотемпературных рабочих сред в тепловых накопителях способствует более эффективному хранению и последующему распределению тепла, что может существенно сократить затраты на отопление в сельскохозяйственных комплексах.

Задача создания таких накопителей также важна с учетом тенденции к снижению углеродного следа и минимизации воздействия на окружающую среду. Высокотемпературные рабочие среды, благодаря своим уникальным свойствам, могут обеспечить более высокую плотность энергии, что делает их особенно привлекательными для агропромышленных хозяйств с непрерывным циклом производства. Применение аккумулирующих устройств становится важным элементом энергосберегающих технологий в тепличном хозяйстве и других сферах, где требуется постоянная поддержка температурного режима.

<http://ej.kubagro.ru/2024/10/pdf/10.pdf>

Кроме того, накопители с высокотемпературными рабочими средами открывают перспективы для интеграции с возобновляемыми источниками энергии, такими как солнечная энергия. Такие комбинации могут использоваться для аккумуляирования избыточного тепла, что особенно актуально в период высокой солнечной активности. Таким образом, тепловые накопители становятся не только инструментом для оптимизации производственных процессов, но и важным звеном в создании устойчивых энергоэффективных решений, способных поддерживать автономность сельскохозяйственных объектов.

Состояние исследований и актуальность проблемы.

Исследования показывают, что накопление тепловой энергии особенно актуально в условиях необходимости круглогодичного производства сельскохозяйственной продукции. Традиционные решения зачастую не обеспечивают достаточной энергоэффективности и надежности, что увеличивает затраты и снижает эффективность производственных процессов. Современные исследования направлены на создание высокотемпературных тепловых накопителей, способных сохранять тепло в течение длительного времени и отдавать его при необходимости.

Одним из наиболее перспективных направлений является использование материалов с высокой теплоемкостью, таких как керамика и специализированные металлические сплавы, обладающие устойчивостью к высоким температурам. Благодаря таким материалам увеличивается продолжительность эксплуатации накопителей и повышается их теплоаккумулирующая способность. В то же время, значительное внимание уделяется развитию эффективных систем теплоизоляции, способных минимизировать потери тепла и повысить экономичность работы накопителей.

Цель исследований. Целью работы является разработка модели теплового накопителя энергии (TES) с высокотемпературным рабочим телом.

Материалы и методы исследований. Для разработки новой модели устройства был осуществлен анализ перспективной существующей конструкции. На основе этого было создано математическое описание, которое базируется на основе основных законов теплообмена. Одной из перспективных конструкций является Thermal Energy Grid Storage (TEGS). Данная технология позволяет аккумулировать электрическую энергию в виде тепла и затем, при необходимости, преобразовывать её обратно в электрическую. Основное преимущество TEGS состоит в её высокой гибкости и возможности интеграции с источниками возобновляемой энергии, что особенно важно для стабильности сельскохозяйственных объектов в условиях сезонных изменений и переменного энергопотребления.

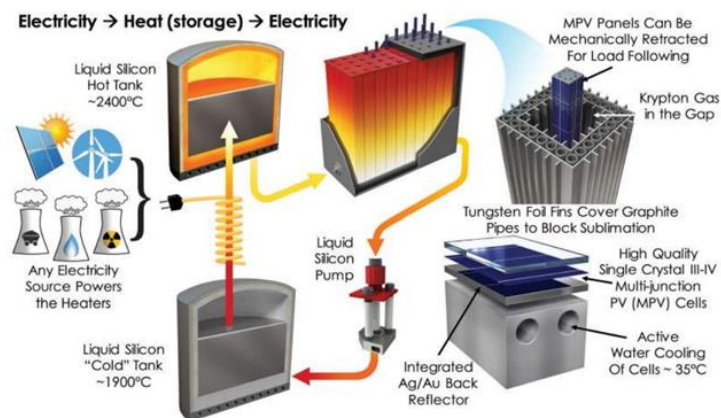


Рисунок 1 – Схематическое описание работы TEGS [1]

Система TEGS состоит из нескольких ключевых компонентов (рис. 1): высокотемпературного аккумулирующего материала, эффективной изоляции, нагревательных и излучающих элементов, а также термофотоэлектрических (TFE) преобразователей, которые обеспечивают обратное преобразование тепла в электричество. В качестве накопителя

тепла в TEGS-системах чаще всего используются материалы, способные выдерживать экстремально высокие температуры, такие как жидкий кремний или графит. Эти вещества обеспечивают высокую плотность энергии, но требуют особого подхода к изоляции для минимизации потерь тепла. Системы TEGS включают высокоэффективные теплоизоляционные материалы, которые позволяют поддерживать высокую температуру в течение длительного времени без существенных потерь.

В основе работы теплового накопителя с двусторонним преобразованием энергии лежат несколько этапов, каждый из которых обеспечивает эффективное использование и преобразование накопленной энергии.

На первом этапе избыточная электрическая энергия, поступающая от источников, таких как солнечные панели или ветровые турбины, преобразуется в тепло. Нагревательный элемент повышает температуру аккумулирующего материала, например олова или жидкого кремния, до 2000–2400°C, что позволяет эффективно удерживать энергию в компактных размерах системы. После этого специальная изоляция помогает сохранить тепло на длительный срок, минимизируя потери.

При необходимости тепловая энергия преобразуется в излучение через нагревательные элементы, такие как графитовые трубки, которые излучают свет, включая инфракрасное излучение. Заключительный этап включает преобразование этого излучения в электричество с помощью многозонных термофотоэлектрических преобразователей. Их многослойная структура позволяет поглощать фотоны разной энергии, обеспечивая высокую эффективность преобразования, достигая примерно 40%, и минимизируя тепловые потери.

Для создания модели теплового накопителя энергии (рис. 2) на основе принципов TEGS (рис. 1) была разработана математическая модель, учитывающая основные процессы теплопередачи. В рамках данной модели

радиационный теплообмен описывается с помощью закона Стефана-Больцмана, который определяет интенсивность излучения в зависимости от температуры. Конвекционный теплообмен между компонентами системы описывается с использованием эмпирических коэффициентов теплоотдачи, а также уравнений теплового потока. Для учёта теплопроводности используется дифференциальное уравнение теплопередачи в твёрдых телах, что позволяет точно рассчитать распределение температуры внутри накопителя.

Результаты исследований. В результате разработки модели теплового накопителя на основе анализа систем TEGS и созданной математической модели, была получена эффективная конструкция теплового накопителя с двусторонним преобразованием энергии. Этот накопитель предназначен для хранения избыточной электрической энергии, которая преобразуется в тепло, а затем может быть повторно использована в форме электричества или тепловой энергии в моменты повышенного спроса. Благодаря высокой теплопроводности и термостойкости графита, устройство способно удерживать значительное количество тепла даже при очень высоких температурах, что делает его оптимальным материалом для систем долговременного накопления.

В начале электрическая энергия от возобновляемых источников поступает на нагревательный элемент, который передаёт её аккумулирующему материалу в виде тепла. Для передачи и отвода тепловой энергии в накопителе используется жидкометаллический теплоноситель – олово, благодаря его низкой температуре плавления (около 232°C), высокой теплопроводности и устойчивости к перегреву. Нагретое олово проходит через вольфрамовый канал и передает тепловую энергию графиту, который достигает температур порядка $2000\text{-}2500^{\circ}\text{C}$. Вольфрам, обладающий высокой точкой плавления (около 3420°C) и устойчивостью к деформациям при нагреве, выбран для конструкции

внутренних каналов и корпуса накопителя, что обеспечивает надёжность конструкции.

При необходимости преобразования тепла обратно в электричество в накопителе задействуются термофотоэлектрические преобразователи (TPV). Эти устройства состоят из нескольких слоев полупроводников с различными значениями ширины запрещённой зоны, что позволяет им эффективно поглощать фотоны с широким спектром энергии. При нагреве графитовый порошок начинает излучать свет, который фокусируется и направляется на TPV-ячейки, где он преобразуется в электрическую энергию. Многозонная структура TPV-преобразователей минимизирует тепловые потери, позволяя эффективно использовать весь спектр излучения и достигая высокой эффективности преобразования. Это делает систему особенно ценной для распределённых энергетических комплексов, позволяя гибко и экономично регулировать потребление и производство энергии.

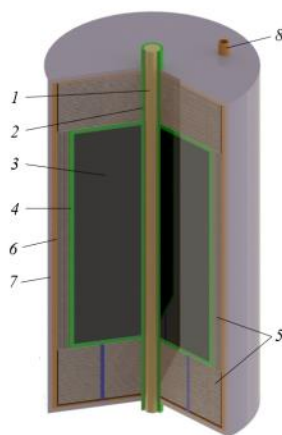


Рисунок 2 – Модель TES: 1 – теплоноситель; 2 – канал; 3 – теплоаккумулирующий материал; 4 – оболочка; 5, 6 – теплоизоляция; 7 – оболочка; 8 – патрубок

Особое внимание при проектировании накопителя уделено теплоизоляции, так как задача эффективного удержания тепла требует минимизации теплопотерь в условиях значительных температур. Накопитель использует двухслойную изоляцию: внутренний слой

выполнен из вольфрамовых экранов, которые выдерживают экстремальные температуры, а внешний слой состоит из минеральной ваты, менее устойчивой к нагреву, но обладающей хорошими изоляционными свойствами. Такой подход к изоляции был выбран для экономии средств и сохранения прочности: вольфрамовая изоляция минимизирует воздействие высоких температур на внешние слои, защищая более экономичный слой минеральной ваты, которая не способна выдерживать температуру внутренней части системы. Вместе эти слои обеспечивают надёжную и эффективную изоляцию, позволяя сохранить тепло в накопителе в течение длительного времени.

Проектный подход к теплоизоляции и использование современных TRV-элементов позволили создать универсальный накопитель, способный не только накапливать избыточную электроэнергию, но и возвращать её в форме электричества, если возникает потребность.

Выводы. 1. Разработанный тепловой накопитель с двусторонним преобразованием энергии позволяет эффективно аккумулировать избыточную электрическую энергию в виде тепла и возвращать её в систему в форме электричества. 2. Использование графита в качестве теплоаккумулирующего материала обеспечивает высокую теплоёмкость и устойчивость к экстремальным температурам. 3. Двухслойная теплоизоляция с внутренним слоем из вольфрама и внешним из минеральной ваты минимизирует теплопотери, поддерживая стабильные температуры и оптимизируя затраты на изоляционные материалы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20061, <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>.

Библиографический список

1. Amy C. et al. Thermal energy grid storage using multi-junction photovoltaics //Energy & Environmental Science. – 2019. – Т. 12. – №. 1. – С. 334-343.

References

1. Amy C. et al. Thermal energy grid storage using multi-junction photovoltaics //Energy & Environmental Science. – 2019. – Т. 12. – №. 1. – С. 334-343.