

УДК 621.362

UDC 621.362

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

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

АНАЛИЗ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ХРАНЕНИЯ ТЕПЛА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАКОПИТЕЛЕ ЭНЕРГИИ

ANALYSIS OF HEAT TRANSFER AND ECONOMIC FEASIBILITY OF HEAT STORAGE IN A HIGH-TEMPERATURE ENERGY STORAGE DEVICE

Чадаев Алексей Николаевич
Аспирант
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Chadaev Alexey Nikolaevich
Postgraduate student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Мутугуллина Ирина Александровна
Канд. техн. Наук, доцент
SPIN – код автора: 8425-6136
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Mutugullina Irina Alexandrovna
Cand.Tech.Sci., Associate Professor
RSCI SPIN-code: 8425-6136
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Зиангиров Айдар Фаилевич
Студент
SPIN – код автора: 3338-8985
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Ziangirov Aydar Failevich
Student
RSCI SPIN-code: 3338-8985
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

В статье рассматривается задача повышения эффективности агропромышленного производства посредством внедрения высокотемпературных тепловых аккумуляторов. Особое внимание уделяется анализу влияния температуры аккумулирующего материала и величины допустимого теплового потока на итоговую стоимость устройств. Предложена методика расчета теплового накопителя с двумя контурами изоляции: внутренние экраны, выполненные из вольфрама, и наружный слой минеральной ваты, предназначенной для работы при относительно умеренных температурах. Итерационный алгоритм позволяет подобрать оптимальные геометрические размеры изоляционных слоев в зависимости от требуемых тепловых характеристик и заданных пределов потерь энергии. В работе рассмотрен процесс разрядки накопителя, реализуемый через серию стационарных режимов с понижением температуры графитовой сердцевины пошагово на 100 °С, что дает возможность оценить динамику утечки тепла и время эксплуатации устройства. Приведены количественные результаты по стоимости тепловых аккумуляторов различных емкостей (от малых до больших), работающих в диапазоне температур от 800 до 2000 °С. Показано, что при ослабленных требованиях к изоляции и высоких допусках на утечки тепла наиболее экономичен высокотемпературный аккумулятор (2000 °С). Однако при стремлении

The article addresses the challenge of improving the efficiency of agro-industrial production through the implementation of high-temperature thermal storage systems. Special attention is paid to the analysis of the impact of the temperature of the heat-accumulating material and the magnitude of the permissible heat flux on the final cost of the devices. A calculation method for the thermal energy storage system with two insulation layers is proposed: the internal screens made of tungsten and an outer layer of mineral wool designed to operate at relatively moderate temperatures. The iterative algorithm allows for the selection of optimal geometric dimensions of the insulation layers depending on the required thermal characteristics and specified limits of energy losses. The study examines the discharge process of the thermal energy storage system, implemented through a series of steady-state regimes with a stepwise decrease in the temperature of the graphite core by 100 °C, which makes it possible to evaluate the dynamics of heat leakage and the service life of the device. Quantitative results are presented regarding the cost of thermal storage systems of various capacities (from small to large) operating in the temperature range of 800 to 2000 °C. It has been demonstrated that under weakened insulation requirements and high tolerances for heat leakage, the most economical option is a high-temperature accumulator (2000 °C). However, when striving to minimize heat losses and, consequently, increasing the thickness of insulation layers, the

минимизировать тепловые потери и, соответственно, увеличении толщины теплоизоляционных слоев, оптимальной становится промежуточная температура, вплоть до 800 °С

optimal solution becomes an intermediate temperature, down to 800 °C

Ключевые слова: АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ТЕПЛОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ, ГРАФИТ, ВОЛЬФРАМОВЫЕ ЭКРАНЫ, МИНЕРАЛЬНАЯ ВАТА

Keywords: AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, THERMAL ENERGY STORAGE, HIGH-TEMPERATURE HEAT CARRIER, GRAPHITE, TUNGSTEN SCREENS, MINERAL WOOL

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-206-038>

Введение. Современный агропромышленный комплекс активно стремится к повышению эффективности производственных процессов, включая внедрение ресурсосберегающих технологий и оптимизацию энергоснабжения. В условиях возрастающего спроса на продукцию сельскохозяйственного назначения существенное значение приобретает вопрос надежного и экономически целесообразного обеспечения теплом. Тепловая энергия может использоваться в растениеводстве, животноводстве, переработке сельхозпродуктов и других подотраслях АПК для поддержания требуемых температурно-влажностных условий, сушки и термообработки сырья, а также для отопления и вентиляции производственных и складских помещений.

В аграрном секторе критически важен фактор стабильности теплового режима, поскольку колебания температур способны снижать урожайность культур, влиять на сроки созревания и качество конечной продукции. Дополнительно, в животноводстве потребность в тепле и горячей воде напрямую связана с санитарно-гигиеническими нормами и здоровьем поголовья. По этой причине поиск решений, позволяющих запасать и сохранять тепловую энергию, становится одним из приоритетных направлений развития отрасли.

В условиях, когда традиционные источники энергии могут подвергаться сезонным или ценовым колебаниям, наличие эффективных технологий накопления тепла дает возможность сглаживать пики нагрузки,

<http://ej.kubagro.ru/2025/02/pdf/38.pdf>

обеспечивать дополнительную автономию хозяйств, а также снижать затраты на отопление и горячее водоснабжение. Такой подход повышает надежность функционирования агропредприятий и способствует их устойчивому развитию.

Устройства аккумулирования тепла способны накапливать избыточную энергию в моменты, когда ее производство или закупка обходятся дешевле (например, при использовании возобновляемых источников энергии либо при специальных тарифах), и выделять ее в периоды повышенного спроса. При этом востребованными становятся разработки, позволяющие сохранять тепловую энергию при высоких температурах, где традиционные решения часто оказываются недостаточно эффективными или экономически целесообразными. Использование инновационных материалов и конструктивных решений открывает широкие перспективы в плане повышения эффективности отопительных систем, систем сушки и технологических линий в АПК, что в конечном итоге влияет на конкурентоспособность сельского хозяйства в целом.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Вопросам аккумулирования тепловой энергии уделяется значительное внимание в научно-технической литературе, поскольку способность хранить и использовать тепло в нужный момент напрямую влияет на устойчивость производственных процессов. С развитием высокотемпературных тепловых носителей и улучшенных изоляционных материалов в исследовательском сообществе наблюдается повышенный интерес к созданию устройств, работающих при экстремальных температурных режимах. Это связано с желанием минимизировать теплопотери и одновременно оптимизировать затраты на производство и эксплуатацию энергетического оборудования.

Во многих работах, посвященных повышению энергетической эффективности в АПК, подчеркивается важность рационального использования тепла, особенно в периоды пикового энергопотребления. При этом часто возникает необходимость поддерживать высокую температуру технологических процессов (к примеру, в системах сушки зерна или переработки продукции животноводства). Однако существующие решения с классическими изоляционными слоями нередко оказываются недостаточно экономичными или долговечными при температурах, выходящих за рамки 1000–1200 °С.

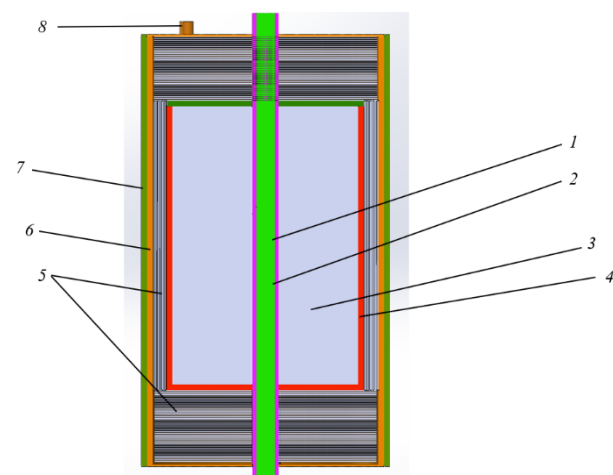


Рисунок 1 – Тепловой накопитель энергии: 1 - высокотемпературный теплоноситель (олово); 2 – вольфрамовый цилиндр; 3 – графит; 4 – оболочка (вольфрамовая или графит); 5 – экранирование графитовое или вольфрамовое; 6 – керамика/метал – корпус; 7- теплоизоляция; 8 – входной патрубок для выкачки аргона

Актуальность проблемы хранить тепловую энергию именно в высокотемпературном диапазоне обусловлена возможностью снижать общий расход топлива или электроэнергии за счет более эффективной переработки и последующего использования аккумулированного тепла. Успешная реализация подобных установок в агропромышленном комплексе может обеспечить не только сокращение производственных затрат, но и более гибкий график работы оборудования, в том числе при нестабильных условиях поставки энергоресурсов.

В ряде публикаций рассмотрены перспективные материалы, такие как графит и другие углеродистые структуры, способные поглощать и удерживать тепло на высоких уровнях. Одновременно ведутся исследования по применению тугоплавких металлических элементов (вольфрам, титановые сплавы) в качестве защитных оболочек и экранов, позволяющих снизить интенсивность лучистого теплообмена. Сочетание таких решений открывает новые возможности в создании компактных и при этом высокоэффективных накопителей тепла для нужд аграрного сектора.

В работе [1] была разработана модель теплового накопителя энергии, которую планируется совершенствовать для широкого внедрения в агропромышленные технологии (рис. 1).

Цель исследований. Целью данной работы является проверить целесообразность хранения тепловой энергии при максимально возможной температуре теплоаккумулирующего материала и определить экономические и технические преимущества (или недостатки) такого подхода применительно к задачам агропромышленного комплекса.

Материалы и методы исследований. В ходе исследования использовались расчетные и аналитические методы, основанные на учете теплопередачи через несколько концентрических слоев изоляции. Для упрощения анализа применялась модель циклически работающего накопителя тепла, который накапливает энергию при нагреве и последовательно ее отдает во время разрядки. При построении расчетной схемы было сделано несколько предположений: предполагалось стационарное течение процессов в каждом анализируемом режиме, размеры канала с расплавленным оловом были приняты достаточно малыми, а температура внешней поверхности аккумулирующего блока из графита считалась постоянной.

Первый контур теплоизоляции включает в себя вольфрамовые экраны и прослойку аргона между ними, что обеспечивает комбинированное сдерживание теплопередачи: за счет отражения лучистого потока высокоплотным вольфрамом и пониженной теплопроводности аргонового газа. При расчетах учитывалась суммарная теплопередача, состоящая из кондуктивной, конвективной и радиационной составляющих. Второй контур теплоизоляции представлен минеральной (базальтовой) ватой, способной эффективно работать при умеренно высоких температурах и отличающейся низкой стоимостью.

Расчет толщин каждого слоя проводился итерационным методом: задавалось приближение температуры между соседними поверхностями, вычислялся соответствующий тепловой поток, и затем полученные результаты сравнивались с базовыми значениями. Если условие допустимого расхождения (не более 5%) не выполнялось, коррекция расчетов продолжалась с измененным шагом температуры или толщины слоя. Аналогичным образом подбирались толщина второго контура. После определения параметров изоляционных слоев исследовался процесс разрядки накопителя, при котором температура рабочей поверхности снижалась с каждым шагом на фиксированное значение. Это позволяло оценить период эксплуатации устройства и потенциальные теплотери, а также определить экономические аспекты при различных режимах хранения тепла.

Результаты исследований. На основании выполненных расчетов выявлено, что толщина слоев изоляции, необходимая для поддержания высокой температуры графитовой сердцевины, растет при снижении допустимого теплового потока. Для малых тепловых аккумуляторов, где высота аккумулирующего элемента равна его диаметру, была проведена серия расчетов при различных температурах (от 800 до 2000 °C с шагом 200 °C) и разбросе теплового потока через изоляцию.

Из кривых, соответствующих разным температурам накопленного материала, хорошо заметно, что при значительной величине проходящего теплового потока (то есть при тонкой изоляции) наиболее экономичным оказывается вариант с температурой 2000 °С. Однако по мере уменьшения Q кривые для высокотемпературных режимов сближаются с вариантами хранения при 1400–1800 °С. В определенной зоне значений теплового потока наблюдается выравнивание стоимости аккумуляторов, а при еще большем снижении потока более выгодным становится вариант с $t=1200$ °С. При дальнейшей оптимизации толщины изоляции и еще меньших теплотерях самым рентабельным решением в итоге оказывается устройство с 800 °С. Указанный переход обусловлен изменением материалов и конструктивных особенностей изоляции при температурах ниже 1260 °С, где уже отсутствует необходимость вольфрамовых экранов (рис. 2).

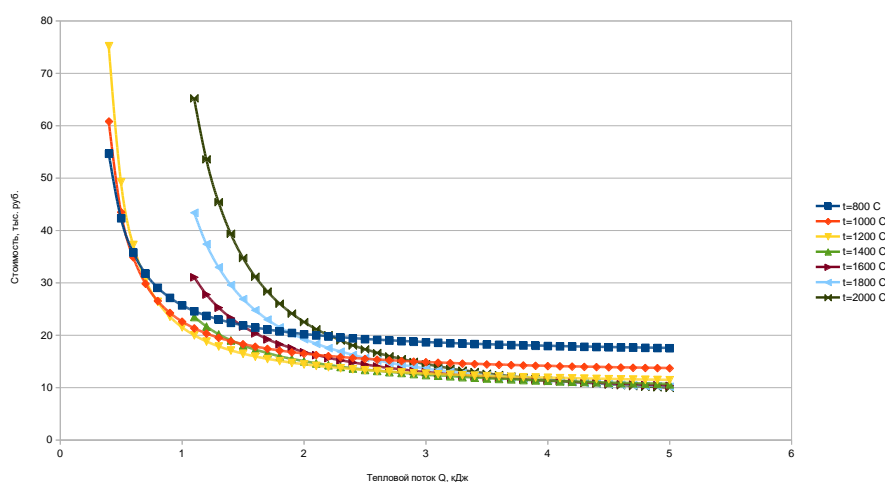


Рисунок 2 – Зависимость стоимости малого теплового аккумулятора от величины теплового потока Q через теплоизоляцию для различных температур теплоаккумулирующего материала

Таким образом, видно, что универсального ответа на вопрос о выборе оптимальной температуры для хранения тепла не существует:

решение зависит от требуемого уровня теплопотерь и планируемого времени удержания тепловой энергии.

Выводы. 1. Проведенные расчеты показывают, что при больших разрешенных теплопотерях (тонком изоляционном слое) выгоднее всего использовать высочайшие температуры теплоаккумулирующего материала, поскольку снижаются затраты на материалы при относительно низкой изоляции. 2. При уменьшении теплопотока, то есть при увеличении толщины теплоизоляции, целесообразность хранения тепла при температуре 2000 °С постепенно утрачивает экономическое преимущество, и оптимальным вариантом становятся промежуточные значения (1400–1800 °С). 3. Выбор температуры хранения тепловой энергии должен осуществляться комплексно с учетом технических возможностей, экономической обоснованности и уровня теплопотерь, которые допустимы в конкретном сельскохозяйственном процессе.

Библиографический список

1. Чадаев, А. Н. Оценка процесса переноса энергии в тепловом накопителе с высокотемпературным рабочим телом при его разрядке / А. Н. Чадаев, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, А. А. Абдуллина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2024. – Т. 24, № 4. – С. 73-85.

References

1. Chadaev, A. N. Ocenka processa perenosa jenergii v teplovom nakopitele s vysokotemperaturnym rabochim telom pri ego razrjadke / A. N. Chadaev, A. V. Dmitriev, V. Je. Zinurov, O. S. Dmitrieva, A. A. Abdullina // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jenergetika. – 2024. – T. 24, № 4. – S. 73-85.