

УДК 697.328

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

ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО СЕКТОРА

Нафиков Инсаф Рафитович

Канд. техн. наук

SPIN – код автора: 7227-8017

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

Биккулов Рустем Ядкарлович

Канд. техн. наук

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Зинурова Карина Ирековна

Магистрант

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

В статье выполнена численная оценка влияния температуры окружающего воздуха на эффективность заряда высокотемпературного теплового накопителя энергии (ТНЭ), применимого в гибридных схемах энергоснабжения агропромышленного комплекса АПК, включая отопление теплиц при совместной работе с возобновляемыми источниками энергии и технологиями Power-to-Heat. Расчёт выполнен в нестационарной постановке теплопроводности для многослойного ограждения с граничным условием третьего рода на наружной поверхности. Приняты $\delta=100$ мм и $\alpha_{\text{нар}}=10$ Вт/(м²·К); рассмотрены $t_{\text{окр}}=5, 10, 20$ и 30 °С при длительности заряда 8 ч. Критериями служили эффективность $\eta(\tau)$ и приведённые теплотери $\Delta\eta(\tau)=(1-\eta)\cdot 10^3$. Установлено, что $\Delta\eta(\tau)$ возрастает монотонно, а повышение $t_{\text{окр}}$ снижает накопленные потери на всём интервале времени. При $\tau=7,983$ ч получены $\Delta\eta=22,584\%$, $21,981\%$, $20,746\%$ и $19,475\%$ соответственно для $5-30$ °С, что эквивалентно приросту η на $0,00311$ ($\approx 0,31$ п.п.) при переходе от 5 к 30 °С. Отклонения $\eta(t_{\text{окр}})-\eta(20$ °С) нарастают после прогрева ограждения и достигают $-0,001838$; $-0,001235$ и $+0,001271$ для $t_{\text{окр}}=5, 10$ и 30 °С. Показано, что представления $\Delta\eta(\tau)$ и $\eta(t_{\text{окр}})-\eta(20$ °С) повышают чувствительность сравнения режимов при $\eta\approx 1$ и удобны для сезонной корректировки энергетического баланса тепличных комплексов. Результаты могут использоваться при выборе теплоизоляции ТНЭ, оценке доли замещения топлива ВИЭ-теплом и настройке алгоритмов заряда в условиях переменной

UDC 697.328

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

INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE EFFICIENCY OF AN ENERGY STORAGE UNIT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL SECTOR

Nafikov Insaf Rafitovich

Cand.Tech.Sci.

RSCI SPIN-code: 7227-8017

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

Bikkulov Rustem Yadkarovich

Cand.Tech.Sci.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Zinurova Karina Irekovna

Master's Degree student

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

The article presents a numerical assessment of how ambient air temperature affects the charging efficiency of a high-temperature thermal energy storage unit (TES), applicable in hybrid energy-supply schemes for the agro-industrial complex (AIC), including greenhouse heating in combination with renewable energy sources and Power-to-Heat technologies. The calculation is carried out in a transient heat-conduction formulation for a multilayer enclosure with a third-kind (convective) boundary condition on the outer surface. The insulation thickness is taken as $\delta = 100$ mm and the external heat-transfer coefficient as $\alpha_{\text{out}} = 10$ W/(m²·K); ambient temperatures $t_{\text{amb}} = 5, 10, 20,$ and 30 °C are considered for an 8 h charging period. The performance metrics are the charging efficiency $\eta(\tau)$ and the reduced heat losses $\Delta\eta(\tau) = (1-\eta)\cdot 10^3$. It is found that $\Delta\eta(\tau)$ increases monotonically with time, while increasing t_{amb} reduces the accumulated losses over the entire time interval. At $\tau = 7,983$ h, $\Delta\eta$ values of $22,584\%$, $21,981\%$, $20,746\%$, and $19,475\%$ are obtained for $5-30$ °C, respectively, which corresponds to an increase in η by 0.00311 (≈ 0.31 percentage points) when moving from 5 to 30 °C. The deviations $\eta(t_{\text{amb}})-\eta(20$ °C) grow after the enclosure warms up and reach $-0,001838$, $-0,001235$, and $+0,001271$ for $t_{\text{amb}} = 5, 10,$ and 30 °C, respectively. It is shown that the use of $\Delta\eta(\tau)$ and $\eta(t_{\text{amb}})-\eta(20$ °C) improves the sensitivity of comparing operating modes at $\eta\approx 1$ and is convenient for seasonal adjustment of the energy balance of greenhouse complexes. The results can be used to select TES insulation, evaluate the share of fuel substitution by RES-based heat, and tune charging control algorithms under variable ambient temperature

температуры окружающего воздуха и ограниченной мощности энергосистемы хозяйства

and limited on-site power capacity

Ключевые слова: ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ, ТЕПЛОВОЕ АККУМУЛИРОВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАРЯДА, ПРИВЕДЁННЫЕ ТЕПЛОПТЕРИ, ТЕМПЕРАТУРА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ, ТЕПЛИЧНОЕ ОТОПЛЕНИЕ

Keywords: HIGH-TEMPERATURE THERMAL ENERGY STORAGE, THERMAL ENERGY STORAGE, CHARGING EFFICIENCY, REDUCED HEAT LOSSES, AMBIENT TEMPERATURE, THERMAL INSULATION, GREENHOUSE HEATING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-217-051>

Введение. Энергоснабжение объектов АПК всё чаще рассматривается в логике «гибридных» схем, где традиционные источники теплоты дополняются возобновляемыми (солнечная и ветровая генерация, биогаз/биомасса) и утилизацией вторичных тепловых ресурсов. На практике ключевым ограничением становится не столько установленная мощность, сколько несовпадение во времени между выработкой и потреблением: пик генерации от ВИЭ приходится на дневные часы и благоприятные метеоусловия, тогда как потребность в тепле для технологических процессов и особенно для отопления теплиц часто максимальна вечером, ночью и в периоды похолоданий. В результате даже при наличии ВИЭ хозяйства вынуждены держать высокий резерв традиционной теплогенерации, а доля замещения топлива оказывается ниже потенциальной.

Высокотемпературные тепловые накопители энергии (ТНЭ) позволяют превратить «неровную» энергию ВИЭ в управляемый тепловой поток. Варианты реализации включают аккумулирование тепла за счёт электрического нагрева (Power-to-Heat), солнечных концентраторов или комбинированных источников с последующим отбором теплоты через теплообменники на заданный температурный уровень. Для тепличных хозяйств такая связка принципиально удобна: высокотемпературный контур обеспечивает высокую плотность запасаемой энергии и возможность быстрого заряда при избытке электричества, а потребителю

<http://ej.kubagro.ru/2026/03/pdf/51.pdf>

теплоты может быть передана энергия на уровне 40–90 °С (вода/воздух) через каскад теплообмена или промежуточный теплоноситель. Это повышает стабильность микроклимата и снижает зависимость от оперативных колебаний цен на энергоносители [1].

Дополнительный мотив применения ТНЭ в тепличной энергетике связан с управлением режимами: наличие накопителя позволяет сглаживать кратковременные провалы генерации, поддерживать температуру воздуха и почвы в допустимых пределах и уменьшать частоту включений резервных котлов, что снижает эксплуатационный износ и повышает ресурс оборудования. В регионах с холодным климатом и ограниченной электрической мощностью тепличных площадок накопитель фактически формирует «тепловую инерцию» системы, позволяя использовать дешёвую/избыточную электроэнергию в те часы, когда она доступна, и отдавать тепло в пиковые периоды спроса. Таким образом, ТНЭ становится элементом повышения энергетической устойчивости производства, а не только компонентом энергосбережения [2].

Состояние исследований и актуальность проблемы. Современные решения по тепловому аккумулированию энергии обычно классифицируют по механизму накопления (чувствительная теплота, фазовый переход, термохимическое накопление) и температурному уровню. Для высокотемпературных применений наиболее распространены системы на основе твёрдых теплоаккумулирующих материалов (огнеупоры, керамика, графит, насыпи/пакованные слои) и высокотемпературных теплоносителей (газы, расплавы солей или металлов), обеспечивающих интенсивный внутренний теплообмен и высокую удельную энергоёмкость. В исследованиях подробно обсуждаются критерии выбора материалов по теплоёмкости, теплопроводности, термостойкости и стойкости к циклированию, а также

компоновка теплообменных каналов и методы интенсификации теплообмена.

Отдельное направление – интеграция ТНЭ с установками преобразования «электричество → тепло» (Power-to-Heat), что позволяет аккумулировать избыток электроэнергии ВИЭ и использовать его в виде управляемого теплового ресурса. Для теплиц и объектов микроклимата это даёт очевидную пользу: можно накапливать энергию при дневном избытке солнечной генерации или при ночных провалах цены на электроэнергию и отдавать тепло в часы максимальной тепловой нагрузки. Практически высокотемпературный накопитель часто работает как верхний уровень температурного каскада, а потребителю теплота подаётся через понижающий теплообмен (вода/воздух) либо в комбинированных схемах с тепловыми насосами.

В литературе отмечается, что при масштабировании от экспериментальных установок к модульным промышленным системам резко возрастает доля внешних потерь: увеличиваются площади ограждений, усложняется конструкция экранов и узлов сопряжений, проявляются тепловые мосты, а режимы эксплуатации выходят за рамки «стандартных» условий. На высоких температурах вклад лучистого теплообмена и особенности теплоизоляционных материалов могут существенно влиять на баланс, поэтому даже при близких конструкциях результаты по эффективности могут заметно различаться. Следовательно, требуются параметрические исследования, позволяющие выделять факторы, наиболее чувствительные для конкретного конструктивного исполнения ТНЭ. Для условий АПК значимость внешних факторов выше, чем для стационарной энергетики: оборудование размещают в неотапливаемых помещениях, контейнерных модулях и на открытых площадках, где температура окружающего воздуха и условия обдува меняются в широких пределах [3].

При интеграции ТНЭ с ВИЭ в задачах тепличного отопления критичным становится обеспечение предсказуемого теплового отпуска в ночные часы и периоды ухудшения погоды, когда генерация от ВИЭ минимальна, а тепловая нагрузка максимальна. Высокотемпературный накопитель в таких схемах выступает буфером, который «переводит» нерегулярный электрический профиль (PV/ветер) в управляемый тепловой поток через Power-to-Heat, однако энергетическая эффективность цикла в реальной эксплуатации определяется не только внутренним теплообменом, но и внешними потерями через ограждение. Это означает, что даже при неизменной конструкции ТНЭ сезонные изменения температуры воздуха и теплоотдачи могут изменять итоговую полезную долю аккумулированной энергии и требовать увеличения резерва по мощности/топливу [4].

Цель исследований. Оценить влияние температуры окружающей среды на эффективность заряда высокотемпературного ТНЭ.

Материалы и методы исследований. Численное моделирование выполнено в программной среде SimInTech, предназначенной для имитационного моделирования динамических систем и тепловых процессов на основе блочно-схемного описания. Расчётная модель ТНЭ реализована в виде связанной структуры функциональных блоков, отражающих многослойную ограждающую конструкцию и внешние граничные условия. Такой подход обеспечивает наглядное задание параметров слоёв (теплофизические свойства и толщины), а также возможность параметрического варьирования условий теплообмена и температуры окружающей среды без изменения топологии модели.

Объектом исследования является высокотемпературный тепловой накопитель с наружной волокнистой теплоизоляцией толщиной $\delta = 100$ мм. Для оценки влияния внешних условий рассмотрены четыре значения температуры окружающей среды $t_{\text{окр}} = 5, 10, 20$ и 30 °С при фиксированном коэффициенте теплоотдачи с наружной поверхности $\alpha_{\text{нар}} =$

10 Вт/(м²·К), что соответствует спокойной естественной/слабой вынужденной конвекции воздуха в производственных помещениях.

Расчёт выполнен в нестационарной постановке теплопроводности для многослойной ограждающей конструкции ТНЭ. Теплообмен с окружающей средой на внешней границе задан граничным условием третьего рода. На внутренней границе реализован подвод тепла от высокотемпературного теплоносителя; режим заряда рассмотрен в течение 8 часов. Для сопоставимости режимов использована безразмерная эффективность заряда $\eta(\tau)$, определяемая как отношение полезно аккумулированной энергии к суммарно подведённой энергии за время τ :

$$\eta(\tau) = 1 - \frac{Q_{\text{пот}}(\tau)}{Q_{\text{подв}}(\tau)}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{пот}}(\tau)$ — интегральные теплотери через наружную поверхность, Вт; $Q_{\text{подв}}(\tau)$ — это суммарное количество теплоты, подведённой в накопитель за время τ от до 8 ч.

Численные результаты представлены дискретным рядом с шагом 1 мин (480 точек на интервале 0–8 ч), что позволяет анализировать как общую динамику $\eta(\tau)$, так и малые различия между режимами. Для повышения наглядности дополнительно использована приведённая величина потерь $\Delta\eta(\tau) = (1-\eta) \cdot 10^3$, а также отклонение $\eta(t_{\text{окр}}) - \eta(20\text{ °C})$ относительно базового режима. Постобработка выполнялась в электронных таблицах: исходные значения $\eta(\tau)$ использовались для построения кривых $\eta(\tau)$, $\Delta\eta(\tau)$ и сравнительных разностей между температурными режимами, что обеспечивает воспроизводимость при обновлении расчётных данных.

Результаты исследований. Полученные временные зависимости приведённых теплотерь при $\delta=100$ мм и $\alpha_{\text{нар}}=10$ Вт/(м²·К) характеризуются устойчивым монотонным ростом $\Delta\eta$ по мере увеличения времени заряда, что отражает накопление потерь через ограждение при

прогреве теплоизоляции и росте температурного уровня наружной поверхности (рис. 1). Для всех рассмотренных температур окружающей среды сохраняется единая упорядоченность режимов по величине потерь: при понижении $t_{окр}$ тепловой напор на внешней границе возрастает, поэтому в течение всего цикла выполняется соотношение $\Delta\eta(5\text{ }^{\circ}\text{C}) > \Delta\eta(10\text{ }^{\circ}\text{C}) > \Delta\eta(20\text{ }^{\circ}\text{C}) > \Delta\eta(30\text{ }^{\circ}\text{C})$. На начальном участке заряда различия между режимами малозаметны из-за близости η к единице: уже через 1 ч потери составляют 0,56 % при $t_{окр}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 0,373 % при $t_{окр}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как для $t_{окр}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина $\Delta\eta$ остаётся порядка 0,001 %, а при $t_{окр}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически равна нулю в пределах численной точности. По мере прогрева ограждающих слоёв различия накапливаются и становятся устойчивыми в инженерном смысле: при $\tau=4$ ч получены значения 2,514%; 2,084%; 1,212% и 0,323% для $t_{окр}=5, 10, 20$ и $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. К завершению интервала заряда ($\tau=7,983$ ч) потери достигают 22,584% ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 21,981% ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$), 20,75 % ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) и 19,4 % ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$).

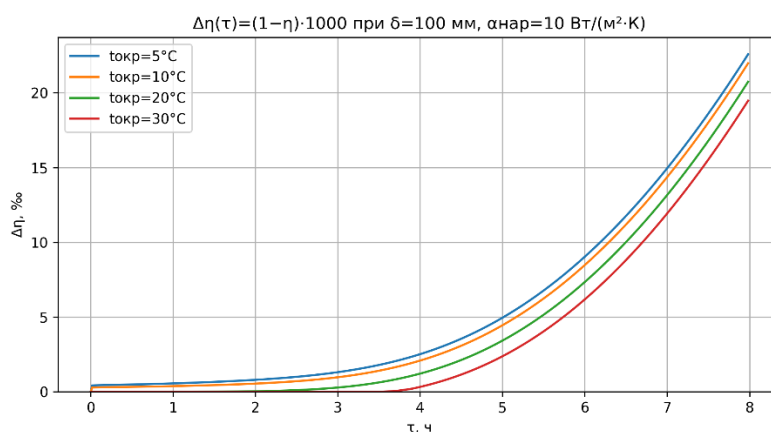


Рисунок 1 – Зависимость приведённых теплопотерь от времени заряда при температуре окружающей среды $t_{окр} = 5, 10, 20$ и $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\delta = 100$ мм, $\alpha_{нар} = 10$ Вт/(м²·К)).

Таким образом, при неизменных δ и $\alpha_{нар}$ повышение температуры окружающей среды от 5 до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению накопленных потерь на $3,1\%$, что эквивалентно увеличению эффективности η примерно

на 0,00311 (0,31 процентного пункта) к концу 8-часового цикла. Для количественной оценки чувствительности к $t_{окр}$ использовано отклонение эффективности относительно базового режима при 20 °С.

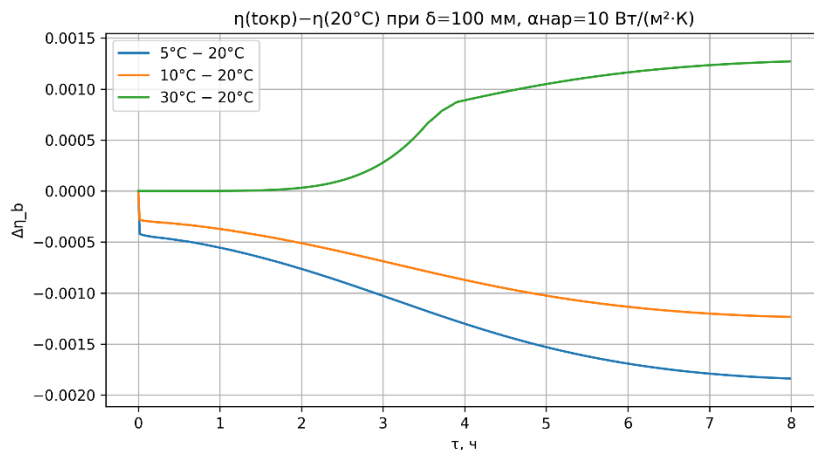


Рисунок 2 – Отклонение эффективности заряда от базового режима при $t_{окр} = 5, 10, 20$ и 30 °С ($\delta = 100$ мм, $\alpha_{нар} = 10$ Вт/(м²·К)).

На ранних стадиях $|\Delta\eta_b|$ близко к нулю, что указывает на слабую проявленность влияния внешних условий до момента прогрева наружных слоёв. В последующем модуль отклонения нарастает почти монотонно: при $\tau=4$ ч получены $\eta_5-\eta_{20}=-0,0013$, $\eta_{10}-\eta_{20}=-0,00087$ и $\eta_{30}-\eta_{20}=+0,000889$; к $\tau=7,983$ ч отклонения составляют $-0,001838$, $-0,001235$ и $+0,001271$ соответственно. Знак отклонения сохраняется для всего интервала: более холодная среда снижает η относительно базового режима, более тёплая — повышает. В совокупности результаты показывают, что при $\delta=100$ мм влияние $t_{окр}$ в диапазоне 5–30 °С проявляется преимущественно как смещение уровня интегральных потерь при сохранении общей динамики процесса заряда, а различия целесообразно анализировать в приведённой форме (в промилле) и через отклонения относительно базового режима (рис. 2).

Таким образом, повышение температуры окружающей среды при заданных δ и $\alpha_{\text{нар}}$ приводит к статистически устойчивому уменьшению приведённых теплопотерь и росту эффективности заряда.

Выводы. 1. При $\delta = 100$ мм и $\alpha_{\text{нар}} = 10$ Вт/(м²·К) приведённые теплопотери $\Delta\eta(\tau)=(1-\eta)\cdot 10^3$ монотонно возрастают в процессе заряда; на всём интервале выполняется порядок $\Delta\eta(5\text{ }^\circ\text{C}) > \Delta\eta(10\text{ }^\circ\text{C}) > \Delta\eta(20\text{ }^\circ\text{C}) > \Delta\eta(30\text{ }^\circ\text{C})$, что подтверждает снижение потерь при повышении температуры окружающей среды. 2. К концу интервала $\tau = 7,983$ ч накопленные потери составляют 22,584 % (5 °С), 21,981 % (10 °С), 20,746 % (20 °С) и 19,475 % (30 °С). Повышение $t_{\text{окр}}$ от 5 до 30 °С уменьшает $\Delta\eta$ на 3,109% и эквивалентно увеличивает эффективность заряда примерно на 0,00311. 3. Отклонение эффективности от базового режима $t_{\text{окр}} = 20$ °С практически отсутствует в начале заряда и нарастает после прогрева ограждения

Библиографический список

1. Теоретические и прикладные аспекты проектирования высокотемпературного теплового накопителя энергии на основе графитового материала / В. Э. Зинуров, А. Н. Чадаев, А. В. Дмитриев [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2025. – Т. 25, № 4. – С. 71-81. – DOI 10.14529/power250409
2. Bloess A., Schill W.-P., Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials // Applied Energy. – 2018. – Vol. 212. – P. 1611–1626. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073
3. Calderón-Vásquez I., Cortés E., García J. et al. Review on modeling approaches for packed-bed thermal storage systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 143. – Art. 110902. – DOI: 10.1016/j.rser.2021.110902.
4. Pardo P., Deydier A., Anxionnaz-Minvielle Z., Rougé S., Cabassud M., Cognet P. Review on high temperature thermochemical heat energy storage // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 32. – P. 591–610. – DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.014.

References

1. Teoreticheskie i prikladnye aspekty proektirovaniya vysokotemperaturnogo teplovogo nakopitelja jenergii na osnove grafitovogo materiala / V. Je. Zinurov, A. N. Chadaev, A. V. Dmitriev [i dr.] // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jenergetika. – 2025. – T. 25, № 4. – S. 71-81. – DOI 10.14529/power250409

2. Bloess A., Schill W.-P., Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 212. – P. 1611–1626. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073

3. Calderón-Vásquez I., Cortés E., García J. et al. Review on modeling approaches for packed-bed thermal storage systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 143. – Art. 110902. – DOI: 10.1016/j.rser.2021.110902.

4. Pardo P., Deydier A., Anxionnaz-Minvielle Z., Rougé S., Cabassud M., Cognet P. Review on high temperature thermochemical heat energy storage // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 32. – P. 591–610. – DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.014.