

УДК 621.928.6

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

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБОГРЕВА ТЕПЛИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

Зинуров Вадим Эдуардович

Канд. техн. наук

SPIN – код автора: 1564-3438

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Чадаев Алексей Николаевич

аспирант

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

Разакова Карина Ирековна

студент

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

В статье рассматривается разработка методики расчета накопителя энергии для обогрева теплиц с использованием солнечных панелей. Система включает аккумулятор энергии, теплообменный канал, теплоноситель (олово), два слоя теплоизоляции (вольфрамовые листы и минеральная вата) и корпус. В дневное время солнечная энергия преобразуется в электрическую и аккумулируется в теплоносителе. В ночное время или при низкой инсоляции накопленное тепло используется для обогрева теплиц. Разработанный итерационный алгоритм расчета основан на базовых законах теплообмена и включает расчеты геометрических размеров теплоизоляции и температурного поля. Алгоритм включает следующие этапы. 1. Расчет геометрических размеров теплоизоляции. 2. Учет всех видов теплообмена. 3. Итерационные расчеты температуры. 4. Расчет второго теплоизоляционного слоя. Результаты показали, что при тепловом потоке 800 Вт общая толщина теплоизоляции должна составлять не менее 157 мм (первый слой – 138 мм, второй слой – 19 мм). Получена модифицированная формула для расчета коэффициента теплоотдачи от наружной стенки накопителя к окружающей среде. Система позволяет эффективно использовать возобновляемую энергию для стабильного обогрева теплиц. Актуальность данного исследования для аграрного сектора обусловлена потребностью в стабильном и экономичном обогреве теплиц, что способствует повышению урожайности и снижению затрат на

UDC 621.928.6

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

### **THE USE OF A THERMAL ENERGY STORAGE DEVICE FOR HEATING GREENHOUSES USING SOLAR PANELS**

Zinurov Vadim Eduardovich

Cand.Tech.Sci.

RSCI SPIN-code: 1564-3438

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Chadaev Alexey Nikolaevich

Post graduate student

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

Razakova Karina Irekovna

student

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

The article discusses the development of a calculation method for an energy storage unit used for greenhouse heating with solar panels. The system includes an energy accumulator, a heat exchange channel, a heat transfer fluid (tin), two layers of thermal insulation (tungsten sheets and mineral wool), and a casing. During the day, solar energy is converted into electricity and stored in the heat transfer fluid. At night or during periods of low solar insolation, the stored heat is used to heat the greenhouses. The developed iterative calculation algorithm is based on the fundamental laws of heat transfer and includes calculations of the thermal insulation dimensions and temperature field. The algorithm includes the following steps: 1. Calculation of thermal insulation dimensions. 2. Consideration of all types of heat transfer. 3. Iterative temperature calculations. 4. Calculation of the second thermal insulation layer. The results showed that for a heat flow of 800 W, the total thickness of the thermal insulation should be at least 157 mm (first layer – 138 mm, second layer – 19 mm). A modified formula for calculating the heat transfer coefficient from the outer wall of the accumulator to the surrounding environment was obtained. The system allows for the efficient use of renewable energy for stable greenhouse heating. The relevance of this research for the agricultural sector is due to the need for stable and economical greenhouse heating, which contributes to increased crop yields and reduced energy costs

энергоресурсы

Ключевые слова: ТЕПЛИЧНОЕ ХОЗЯЙСТВО, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ТЕПЛОАККУМУЛЯТОР, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ, ГРАФИТОВЫЙ АККУМУЛЯТОР, ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, СОЛНЕЧНЫЕ ПАНЕЛИ, СОХРАНЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Keywords: GREENHOUSE FARMING, RENEWABLE ENERGY SOURCES, THERMAL STORAGE, THERMAL INSULATION, GRAPHITE ACCUMULATOR, HEAT TRANSFER, SOLAR PANELS, THERMAL ENERGY STORAGE

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-201-009>

**Введение.** Современное сельское хозяйство сталкивается с множеством вызовов, включая изменение климата, необходимость повышения урожайности и снижение затрат на энергоносители. Одним из перспективных направлений решения этих задач является использование возобновляемых источников энергии для обеспечения стабильного функционирования теплиц.

Солнечные панели, преобразующие солнечную энергию в электрическую, предлагают экологически чистый и устойчивый источник энергии. Однако их использование ограничено дневным временем, когда инсоляция максимальна. Для обеспечения круглосуточного обогрева теплиц и повышения энергетической независимости аграрного сектора необходимо разрабатывать системы аккумулирования избыточной энергии, полученной от солнечных панелей. Такая система позволит аккумулировать избыток энергии в дневное время и использовать его для обогрева теплиц в ночное время или в периоды низкой солнечной активности.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** Исследования в области применения возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве активно развиваются. Тепличные комплексы, использующие солнечные панели для производства электроэнергии, демонстрируют значительные преимущества с точки зрения экологичности и экономичности. Однако существующие системы часто сталкиваются с

<http://ej.kubagro.ru/2024/07/pdf/09.pdf>

проблемами, связанными с нехваткой энергии в ночное время и при плохих погодных условиях.

Различные исследования показывают, что применение тепловых накопителей энергии могут значительно повысить эффективность таких систем. Однако, вопросы оптимизации теплоизоляции, выбора материалов и экономической обоснованности таких систем остаются актуальными [2].

Авторами работы была разработана конструкция накопителя энергии. Накопитель энергии включает несколько ключевых компонентов: теплоноситель 1, теплообменный канал 2, аккумулятор энергии 3, резервуар 4, два слоя теплоизоляции 5 и 6, корпус 7 и патрубок 8 (рис. 1).

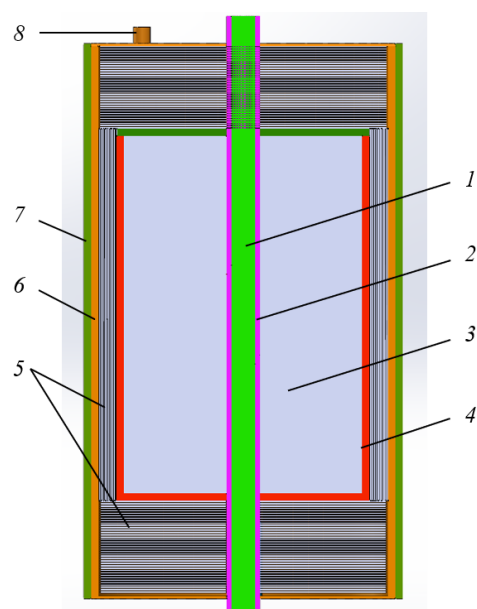


Рисунок 1 – Двухмерная модель накопителя энергии: 1 – теплоноситель; 2 – теплообменный канал; 3 – аккумулятор энергии; 4 – резервуар; 5 – первый слой теплоизоляции; 6 – второй слой теплоизоляции; 7 – корпус накопителя энергии; 8 – патрубок

Днем солнечные панели преобразуют солнечную энергию в электрическую, которая используется для нагрева теплоносителя. Нагретый теплоноситель циркулирует через теплообменный канал, передавая тепло аккумулятору энергии, где оно аккумулируется в течение дня. В ночное время или в периоды низкой солнечной активности

накопленное тепло передается обратно теплоносителю через теплообменный канал. Нагретый теплоноситель затем используется для обогрева теплицы, поддерживая оптимальные температурные условия. Патрубок обеспечивает удаление воздуха из накопителя энергии и закачку в него аргона. Два слоя теплоизоляции минимизируют теплопотери и обеспечивают эффективное сохранение тепла.

В качестве теплоносителя планируется использование олова, аккумулятором энергии будет графит, первый слой теплоизоляции будет состоять из вольфрамовых листов, а второй слой — из минеральной ваты.

В качестве теплоносителя ожидается использование олова, которое будет переводиться в жидкое состояние при его температуре более 230 °С с помощью магнитогидродинамического насоса. Оно будет циркулировать через теплообменный канал, передавая накопленное тепло графитовому аккумулятору энергии. Температура аккумулятора энергии будет составлять до 2500 °С. В связи с этим, первый слой теплоизоляции будет представлять собой вольфрамовые листы, а второй слой минеральную вату.

**Цель исследований.** Целью работы является разработка методики расчета накопителя энергии.

**Материалы и методы исследований.** Для разработки методики расчета накопителя энергии был создан итерационный алгоритм, который включает расчеты геометрических размеров теплоизоляции и температурного поля. Алгоритм основан на базовых законах теплообмена и включает следующие этапы. 1. Расчет геометрических размеров теплоизоляции. 2. Учёт всех видов теплообмена (При расчете толщины первого теплоизоляционного слоя учитываются кондуктивный, конвективный и лучистый теплообмен. 3. Итерационные расчеты температуры (Задаётся итерационное значение температуры  $\Delta t$  с шагом 1 °С для определения  $t_2 = t_1 - \Delta t$ , что позволяет вычислить тепловой поток  $Q$ ).

Итерационный процесс применяется последовательно для каждого соседнего вольфрамового листа. Расчет завершается, когда температура последнего вольфрамового листа достигает 900 °С, что позволяет использовать минеральную вату в качестве второго слоя теплоизоляции).

4. Расчет второго теплоизоляционного слоя (Толщина второго слоя, состоящего из минеральной ваты, определяется с учетом теплопроводности и закона Ньютона-Рихмана).

Рассмотрим основные формулы, которые используются в итерационном алгоритме. Тепловой поток через первый теплоизоляционный контур может быть рассчитан по выражению (1):

$$Q = Q_{\text{Radiation}} + Q_{\text{Conductive}} + Q_{\text{Convection}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{Radiation}}$  – лучистый тепловой поток, Вт, который вычисляется по формуле (2);  $Q_{\text{Conductive}}$  – кондуктивный тепловой поток, Вт, который вычисляется по формуле (3);  $Q_{\text{Convection}}$  – конвективный тепловой поток, Вт.

$$Q_{\text{Radiation}} = C_{1-2} F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi, \quad (2)$$

где  $C_{1-2}$  – коэффициент взаимного излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $F$  – площадь излучающей поверхности, м<sup>2</sup>;  $T_1$ ,  $T_2$  – температура вольфрамовых поверхностей, К;  $\varphi$  – средний угловой коэффициент.

$$Q_{\text{Conductive}} = \frac{2\pi h \lambda_f (t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (3)$$

где  $h$  – высота устройства, м;  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности аргона, Вт/(м·°С);  $t_1$ ,  $t_2$  – температуры вольфрамовых поверхностей, °С;  $r_1$ ,  $r_2$  – радиусы вольфрамовых листов, м.

Конвективный тепловой поток вычисляется аналогично кондуктивному, но с учетом эквивалентного коэффициента теплопроводности  $\lambda_f = \lambda_3 / \varepsilon_c$ , где  $\varepsilon_c$  – это коэффициент конвекции, который

зависит от числа Релея  $Ra$ , характеризующего интенсивность конвективных тепловых потоков.

Для расчета второго теплоизоляционного слоя применяются выражения (4) и (5).

$$Q_{\text{мин.вата}} = \frac{2\pi h \lambda_{\text{мин.вата}} (t_t - t_m)}{\ln \frac{r_m}{r_t}}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{\text{мин. вата}}$  – коэффициент теплопроводности минеральной ваты, Вт/(м·°С);  $t_t$  – наружная температура первого теплоизоляционного слоя, °С;  $t_m$  – наружная температура второго теплоизоляционного слоя, °С;  $r_m$  – наружный радиус первого слоя, м;  $r_t$  – наружный радиус второго слоя, м.

$$Q_{\text{внеш}} = F_m \alpha (t_m - t_f), \quad (5)$$

где  $F_m$  – площадь поверхности наружной стенки второго слоя, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $t_f$  – температура окружающей среды, °С.

**Результаты исследований.** Результаты исследований показали высокую эффективность предлагаемой системы теплоизоляции, состоящей из первого теплоизоляционного слоя (вольфрамовые экраны и аргоновые прослойки) и второго слоя (минеральная вата). При постоянном тепловом потоке  $Q$ , который составляет 800 Вт, толщина двух слоев теплоизоляции должна быть 157 мм или более.

Первый слой теплоизоляции состоит из 138 слоев вольфрамовых листов общей толщиной 138 мм, что снижает температуру внешней поверхности до 877 °С. Это позволяет использовать минеральную вату в качестве второго слоя теплоизоляции толщиной 19 мм, что снижает температуру внешней поверхности до 32,4 °С.

Анализ различных видов теплопередачи (лучистый, кондуктивный и конвективный) показал, что ближе к теплоаккумулятору ( $r < 263$  мм) преобладает лучистый теплообмен. С уменьшением температуры доля

конвективного теплообмена увеличивается из-за снижения вязкости газа. Во втором теплоизоляционном слое теплопередача происходит за счет теплопроводности.

В ходе расчетов использовалась формула, предложенная А. Г. Касаткиным [1], для вычисления коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от наружной стенки второго теплоизоляционного слоя во внешнюю среду. Формула (6) применима для температурного диапазона от 50 до 350 °С:

$$\alpha = 9,3 + 0,058t_m. \quad (6)$$

Недостатком данной формулы является её ограниченность в применении при температурах менее 50 °С. Согласно правилам технической эксплуатации тепловых энергоустановок, температура поверхности тепловой изоляции не должна превышать 45 °С при температуре окружающего воздуха 25 °С. Поэтому формула (6) была модифицирована для температурного интервала 20–350 °С с использованием логарифмической аппроксимации (рис. 2), при условии, что тепловой поток  $Q_{\text{внеш}} = 0$  Вт при  $t_m = 20$  °С согласно выражению (5). В результате была получена формула (7).

$$\alpha = -29,49 + 9,88 \ln t_m. \quad (7)$$

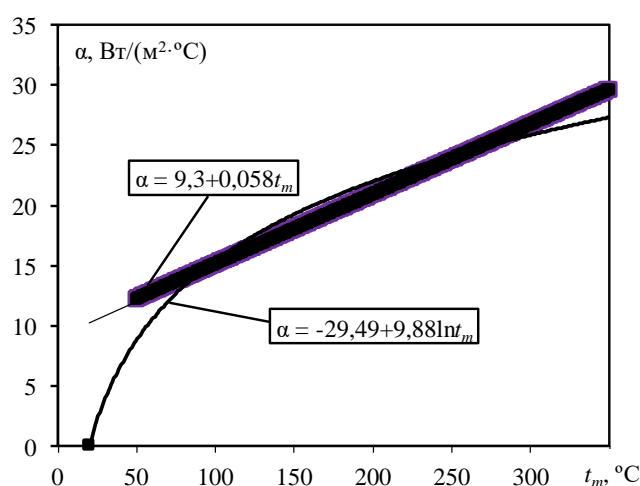


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от наружной стенки второго теплоизоляционного слоя к окружающей среде

Среднее отклонение при аппроксимации составило 1,26, а максимальное отклонение – 3,05 при  $t_m = 50$  °С.

**Выводы.** 1. Разработанная методика расчета накопителя энергии позволяет эффективно моделировать и оптимизировать его конструкцию, обеспечивая минимальные теплопотери и стабильный обогрев теплиц. 2. Получена модифицированная формула для расчета коэффициента теплоотдачи от наружной стенки накопителя энергии к окружающей среде. 3. При тепловой потоке 800 Вт необходима теплоизоляция толщиной не менее 157 мм.

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

#### Библиографический список

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов / А. Г. Касаткин; 10-е изд. стереотипное, доработанное. Перепеч. с изд. 1973 г. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
2. Shukla, A. Solar greenhouse with thermal energy storage: a review / A. Shukla, A. Sharma, K. Kant // Current Sustainable/Renewable Energy Reports. - 2016. - V. 3. - Pp. 58-66. DOI: 10.1007/s40518-016-0056-y.

#### References

1. Kasatkin, A. G. Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tehnologii: Uchebnik dlja vuzov / A. G. Kasatkin; 10-e izd. stereotipnoe, dorabotannoe. Perepech. s izd. 1973 g. – М.: ООО ТИД «Ал'янс», 2004. – 753 s.
2. Shukla, A. Solar greenhouse with thermal energy storage: a review / A. Shukla, A. Sharma, K. Kant // Current Sustainable/Renewable Energy Reports. - 2016. - V. 3. - Pp. 58-66. DOI: 10.1007/s40518-016-0056-y.