

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ТЕПЛООВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ ОБОГРЕВА ТЕПЛИЧНОГО ХОЗЯЙСТВА****А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, М. О. Уткин, Д. Т. Халиуллин, О. С. Дмитриева**

Реферат. В условиях современного энергопотребления и возрастающего спроса на энергоэффективные технологии особую актуальность приобретают системы теплового накопления, способные обеспечить эффективное использование избыточной энергии. Одним из перспективных направлений в этой области является использование высокотемпературных теплоносителей и специализированных теплоизоляционных материалов. Настоящая работа посвящена разработке и исследованию теплового накопителя энергии, использующего олово в качестве теплоносителя и керамический теплоаккумулятор с вольфрамовыми экранами для теплоизоляции. В рамках исследования была разработана и смоделирована конструкция теплового накопителя энергии, предназначенная для аккумулирования тепловой энергии и её последующего использования в системах обогрева тепличных хозяйств и других объектов агропромышленного комплекса. Целью работы является численное двухмерное моделирование процесса нагрева теплового накопителя энергии с использованием программного комплекса SimInTech. В ходе численного моделирования рассчитывались зависимости изменения температуры наружной поверхности теплоизоляции (асбеста) от времени при различных значениях массового расхода олова 0,1-0,3 кг/с, количества вольфрамовых экранов от 3 до 12 и их степени черноты от 0,04 до 0,8. Результаты показали, что увеличение числа вольфрамовых экранов замедляет нагрев наружной поверхности теплоизоляции, что повышает эффективность системы. С увеличением расхода олова ускоряется процесс нагрева, что указывает на более быструю передачу тепла. Изменение степени черноты вольфрамовых экранов оказывает влияние на интенсивность теплопередачи: экраны с высокой степенью черноты поглощают больше тепла, что требует увеличения их количества для поддержания изоляционных свойств. Исследование подтвердило возможность использования программного комплекса SimInTech для моделирования процессов нагрева теплового накопителя, двухмерная осесимметричная модель позволила учесть изменения температуры в радиальном и осевом направлениях, что обеспечило точное представление тепловых процессов.

Ключевые слова: тепловой накопитель энергии, высокотемпературный теплоноситель, теплоаккумулятор, моделирование, теплопередача, система теплоизоляции.

Введение. Тепличное отопление играет ключевую роль в росте и урожайности сельскохозяйственных культур в регионах с неблагоприятными климатическими условиями для открытого грунта [1]. Таким образом крайне важно разработать подходящий метод обогрева теплиц из-за растущей потребности в продуктах питания [2]. При этом затраты на отопление составляют значительную долю эксплуатационных расходов сельского хозяйства, а ископаемое топливо является основным используемым топливом, что влияет на доходы [3]. Кроме того, в отрасли широко распространены потери тепла и энергии [4]. В связи с этим важным направлением с практической и научной точки зрения является разработка энергоэффективных и энергосберегающих методов снижения потребления энергии для управления температурным режимом теплицы [5]. В этом направлении проводятся исследования, например, предложены технологии с использованием электрообогрева [6], солнечной тепловой энергии и энергии биомассы [7], теплоты уходящих газов [8], материалов с фазовым переходом для хранения тепла [9] и др. [10]. Рекуперация отходящего тепла может значительно снизить потребление энергии и выбросы парниковых газов в сельскохозяйственном производстве. В этом исследовании предлагается новый комбинированный режим обогрева теплицы, интегрированный с системой теплового накопителя

энергии и солнечными панелями.

Поскольку культуры отличаются по своим потребностям в тепле актуальной задачей является разработка эффективных методов моделирования процесса нагрева теплового накопителя энергии [11], что позволит детально изучить распределение температур в нем, эффективность теплоизоляции и др. параметры при различных условиях эксплуатации, что обеспечит мониторинг и доступ к системе теплоснабжения [12].

Целью работы является оценка эффективности обогрева тепличного хозяйства с использованием разработанного теплового накопителя энергии при помощи двухмерного моделирования процесса в среде SimInTech.

Авторами работы предлагается использовать тепловой накопитель энергии (рис. 1), включающий теплоаккумулятор 3 из сверхвысокотемпературной керамики, два слоя теплоизоляции: первый – из множества тонкостенных экранов 5 с небольшими зазорами между ними, заполненными аргоном, и второй – из асбестового полотна 6. Такой выбор теплоизоляции обусловлен тем, что экраны из вольфрама препятствуют излучению тепла, а аргон между ними ввиду своей низкой теплопроводности, ограничивает конвективную теплопередачу, а также предотвращает окисление вольфрамовых экранов при температурах более 600°C. Для заправки аргона в тепловой накопитель предусмотрен

штуцер 8. Отметим, что толщина первого слоя теплоизоляции рассчитывается таким образом, чтобы максимальная температура его наружной стенки в ходе эксплуатации теплового накопителя энергии составляла не более 900°C с целью применения в качестве второго слоя теплоизоляции асбестовых материалов, способных выдерживать температуры до $1000\text{--}1500^{\circ}\text{C}$ и более выгодных в закупке с экономической точки зрения.

Для передачи тепловой энергии теплоаккумулятору 3 и последующего его отбора тепла применяется в качестве высокотемпературного теплоносителя 1 олово, т.к. в процессе эксплуатации теплового накопителя рабочие температуры достигают 2000°C . Поэтому цилиндрический канал 2 и корпус теплоаккумулятора 4 изготавливаются из тугоплавкого материала вольфрама (рис. 1).

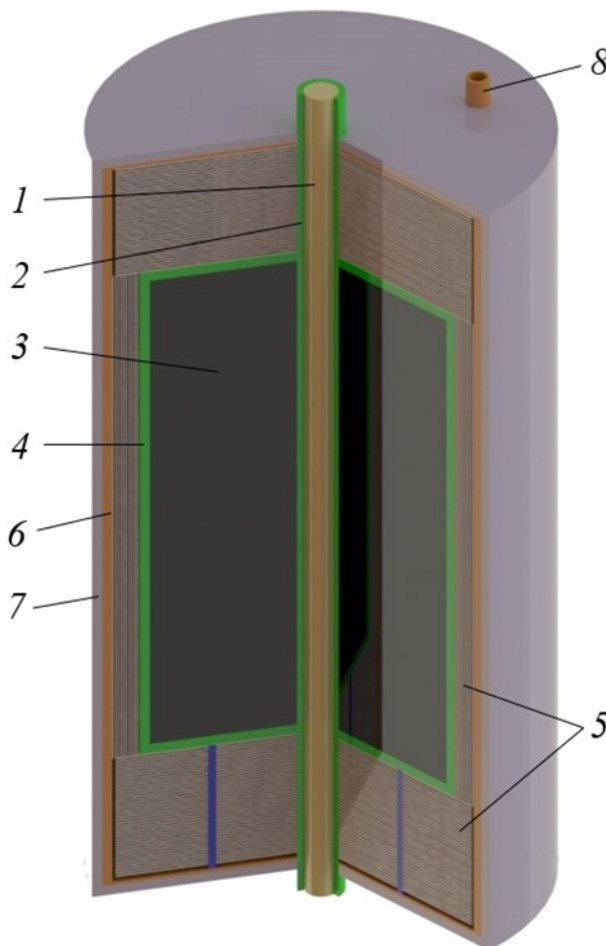


Рис. 1 – Тепловой накопитель энергии (вид с разрезом):

1 – высокотемпературный теплоноситель; 2 – цилиндрический канал; 3 – теплоаккумулятор; 4 – корпус теплоаккумулятора; 5, 6 – первый и второй слой теплоизоляции соответственно; 7 – корпус теплонакопителя; 8 – штуцер

При этом, олово обладает высокой теплоемкостью, низкой стоимостью и экологичностью, не вступает в реакцию с внутренними стенками цилиндрического канала из вольфрама, что предотвращает коррозию и продлевает срок службы системы. Сверхвысокотемпературная керамика обладает высокой тепловой инерцией, что позволяет аккумулировать большое количество тепловой энергии и медленно ее отдавать, обеспечивая стабильную работу системы даже при циклических нагрузках.

Тепловой накопитель энергии (рис. 1) может быть использован для отопления теплиц или других объектов агропромышленного

комплекса по следующей схеме реализации (рис. 2). В первом контуре олово нагревается с помощью избыточной электроэнергии, вырабатываемой солнечными панелями 3 до температуры $1500\text{--}2000^{\circ}\text{C}$, за счет электричества, поступающего на трубчатые электронагреватели. Циркуляция олова по контуру 6 осуществляется электромагнитным насосом 7 через теплообменник 8 и тепловой накопитель энергии 5 без использования движущихся механических частей за счет взаимодействия электрического тока и магнитного поля, что делает систему надежной и долговечной даже при экстремально высоких температурах.

Теплообменник 8 содержит вольфрамовую трубку, по которой течет нагретое олово, вокруг которой находится воздушная прослойка, далее находится цилиндрическая труба, по которой течет теплоноситель (вода). Причем наружная цилиндрическая труба связана со вторым контуром, включающим систему трубопроводов 9 и 10, расположенных под теплицей 2. Вода в цилиндрической трубе нагревается за счет излучения от вольфрамовой трубки, превращаясь в пар, который поднимается

по трубам 10 и подогревает грунт 1 под теплицей 2. Сконденсированный пар в виде капель воды возвращается под действием силы тяжести по линии 9 в теплообменник 8, в котором снова нагревается, превращаясь в пар. Таким образом, осуществляется замкнутый цикл, обеспечивающий эффективное использование тепловой энергии олова для генерации пара, позволяющий системе эффективно и экологично осуществлять обогрев тепличного хозяйства для роста и созревания культур.

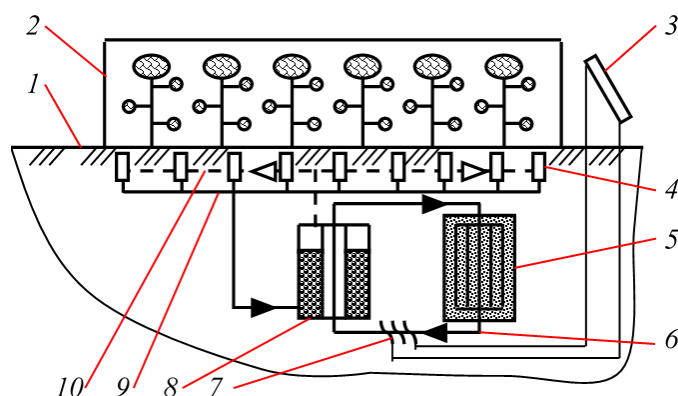


Рис. 2 – Схема применения теплового накопителя энергии для обогрева тепличного хозяйства: 1 – поверхность грунта; 2 – тепличное хозяйство; 3 – солнечные панели; 4 – тепловые трубы; 5 – тепловой накопитель энергии; 6 – линия циркуляции жидкого металла; 7 – насос-нагреватель; 8 – теплообменник; 9 – линия движения воды; 10 – линия движения пара

Условия, материалы и методы. Конструкция теплового накопителя энергии и процесс его работы были смоделированы с использованием программного продукта SimInTech в учебной версии (рис. 3) в нестационарной постановке. В рамках исследования решалась двухмерная осесимметричная задача, что позволило учесть изменение температуры в радиальном и осевом направлениях теплонакопителя.

На входе в цилиндрический канал теплонакопителя, через который циркулирует олово, задавался его расход G в диапазоне от 0,1 до 0,3 кг/с, при начальной температуре $t_0 = 1700^\circ\text{C}$. На выходе из канала задавалось атмосферное давление $P_{\text{атм}} = 10^5$ Па. По мере движения олова по высоте цилиндрического канала происходит передача тепла к

поверхности стенок канала, теплоаккумулятору и другим элементам системы теплоизоляции, что учитывается в расчетах. Высота канала была разбита на 10 расчетных блоков, в каждом из которых производился расчет локальной температуры t и коэффициента теплоотдачи α . При создании теплоаккумулятора в качестве материала была выбрана керамика толщиной 0,5 м. Внутренний слой теплоизоляции теплоаккумулятора состоит из нескольких вольфрамовых экранов, каждый толщиной 0,5 мм, с зазорами величиной 0,5 мм, заполненными аргоном. Наружный слой изоляции выполнен из асбеста толщиной 0,2 м. Температура окружающей среды t_f принята равной 20°C , коэффициент теплоотдачи от второго слоя изоляции к окружающей среде $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ (рис. 3).

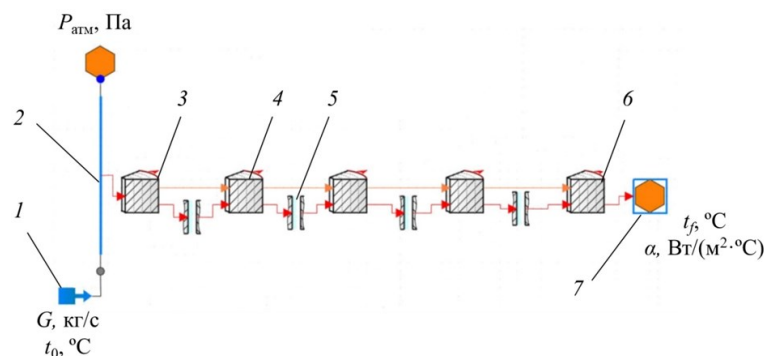


Рис. 3 – Расчетная схема модели теплового накопителя энергии в SimInTech: 1 – МГД-насос; 2 – линия движения олова; 3 – теплоаккумулятор (керамика); 4 – вольфрамовые экраны (3 шт.); 5 – зазоры с аргоном; 6 – асбестовая теплоизоляция; 7 – внешняя среда

В ходе моделирования варьировалось количество вольфрамовых экранов от 3 до 12, а также их степень черноты ε от 0,04 до 0,8, что позволило провести исследование их влияния на изменение температуры нагрева наружной поверхности второго слоя во времени.

В процессе моделирования использовались основные уравнения теплопередачи, учитывались все виды теплообмена. Для учета температурного поля температура осреднялась

на основе результатов, полученных из 10 расчетных блоков вдоль высоты трубы.

Результаты и обсуждение. На основе данных, полученных в результате расчета средствами SimInTech построены зависимости изменения температуры нагрева наружной поверхности второго слоя теплоизоляции (асбеста) теплового накопителя энергии t в течение времени τ при различных условиях моделирования (рис. 4, 5).

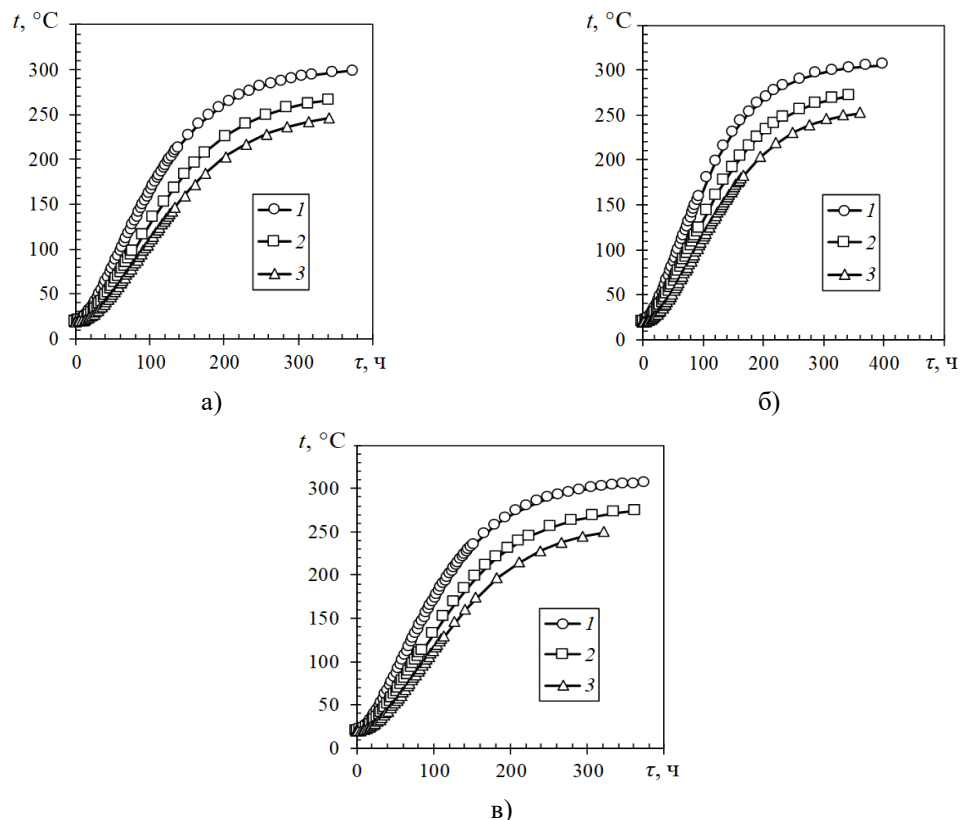


Рис. 4 – Изменение температуры нагрева наружной поверхности второго слоя теплоизоляции из асбеста в течение времени со степенью черноты вольфрамовых экранов $\varepsilon = 0,04$ при разном их количестве в первом слое: а) при расходе олова $G = 0,1$ кг/с; б) при расходе олова $G = 0,2$ кг/с; в) при расходе олова $G = 0,3$ кг/с; 1 – количество вольфрамовых экранов – 3 шт.; 2 – количество вольфрамовых экранов – 8 шт.; 3 – количество вольфрамовых экранов – 12 шт.

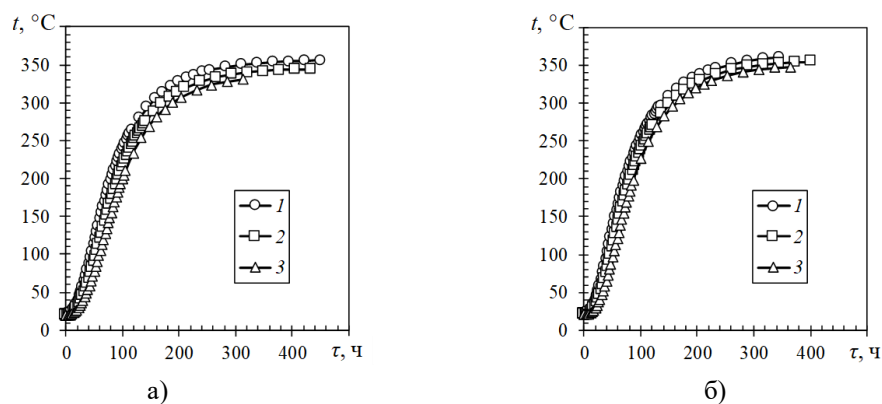


Рис. 5 – Изменение температуры нагрева наружной поверхности второго слоя теплоизоляции из асбеста в течение времени при расходе олова $G = 0,3$ кг/с и разном количестве вольфрамовых экранов в первом слое: а) со степенью черноты $\varepsilon = 0,5$, б) со степенью черноты $\varepsilon = 0,8$; 1 – количество вольфрамовых экранов – 3 шт.; 2 – количество вольфрамовых экранов – 8 шт.; 3 – количество вольфрамовых экранов – 12 шт.

Видно, что увеличение числа вольфрамовых экранов в первом слое теплоизоляции (от 3 до 8) способствует уменьшению скорости нагрева наружной поверхности асбеста, что свидетельствует о повышении эффективности теплоизоляционных свойств. При увеличении расхода олова с 0,1 до 0,3 кг/с происходит более быстрый нагрев наружной поверхности асбеста (рис. 4, *а-в*), т.к. большее количество тепловой энергии переносится через теплоаккумулятор за единицу времени. Изменение степени черноты вольфрамовых экранов ε от 0,04 (рис. 4, *в*) до 0,5-0,8 (рис. 5, *а* и *б*) приводит к более интенсивному поглощению теплового излучения при прохождении через несколько вольфрамовых экранов, т.к. отражательная и поглощающая способности материала напрямую зависят от его степени черноты, то при низком значении $\varepsilon = 0,04$ (рис. 4, *в*) вольфрамовый экран действует как отражатель, поскольку большая часть падающего теплового излучения не поглощается, а отражается от его поверхности. При высокой степени черноты $\varepsilon = 0,8$ (рис. 5, *б*) материал становится поглотителем тепловой энергии. Чем выше степень черноты, тем больше падающей тепловой энергии он поглощает и, соответственно, больше нагревается. Поглощенная энергия приводит к увеличению температуры материала теплоизоляции, т.к. большая часть излучения трансформируется в тепловую энергию внутри структуры. Так, изменение температуры наружной поверхности асбеста составляет от 305 до 359°C при увеличении степени черноты вольфрамовых экранов ε от 0,04 до 0,8 в количестве 3 шт. Ввиду этого, при высоких значениях ε , необходимо увеличить количество вольфрамовых экранов (рис. 4, *в* и рис. 5, *а-б*).

На представленных графиках (рис. 4, 5) можно наблюдать, что все температурные зависимости с течением времени выходят на асимптоту, указывающую на достижение стационарного состояния в процессе передачи тепловой энергии. Данный этап характеризует баланс между теплопоступлением от жидкометаллического теплоносителя олова и тепловыми потерями через слои теплоизоляции. Иными словами, система достигает термодинамического равновесия. Переход на асимптотическую часть графика можно интерпретировать как момент завершения процесса зарядки теплового накопителя энергии. В точках выхода на асимптоту дальнейший рост температуры практически прекращается, что указывает на полное накопление тепла в системе.

При массовом расходе олова $G = 0,1$ кг/с и степени черноты вольфрамовых экранов $\varepsilon = 0,04$ температура наружной поверхности теплоизоляции из асбеста t составила 298 ($\tau = 374$ ч), 265 ($\tau = 342$ ч) и 246 ($\tau = 340$ ч) °C при количестве экранов 3, 8 и 12 шт. соответственно (рис. 4, *а*). С увеличением расхода олова до значений $G = 0,2$ кг/с температура наружной поверхности асбеста t составила

305 ($\tau = 400$ ч), 270 ($\tau = 344$ ч) и 252 ($\tau = 361$ ч) °C при количестве экранов 3, 8 и 12 шт. соответственно (рис. 4, *б*). При $G = 0,3$ кг/с температура наружной поверхности асбеста t составила 305 ($\tau = 375$ ч), 274 ($\tau = 363$ ч) и 249 ($\tau = 322$ ч) °C при количестве экранов 3, 8 и 12 шт. соответственно (рис. 4, *в*). Таким образом, оценочное время зарядки теплового накопителя энергии в среднем составляет 352, 368 и 353 ч при расходе олова 0,1, 0,2 и 0,3 кг/с соответственно и при $\varepsilon = 0,04$ (рис. 4, *а-в*).

При степени черноты вольфрамовых экранов $\varepsilon = 0,5$ и массовом расходе олова $G = 0,3$ кг/с температура наружной поверхности второго слоя теплоизоляции составила 355 ($\tau = 450$ ч), 344 ($\tau = 433$ ч) и 331 ($\tau = 313$ ч) °C при количестве экранов 3, 8 и 12 шт. соответственно (рис. 5, *а*). При увеличении степени черноты вольфрамовых экранов ε до 0,8 температура наружной поверхности асбеста t составила 359 ($\tau = 344$ ч), 354 ($\tau = 400$ ч) и 347 ($\tau = 363$ ч) °C при количестве экранов 3, 8 и 12 шт. соответственно (рис. 5, *б*). Стоит отметить, что для степени черноты вольфрамовых экранов $\varepsilon = 0,04$ результаты представлены выше на рисунке 4, *в*. Оценочное время зарядки теплового накопителя энергии в среднем составляет 353, 404 и 369 ч для условия, когда степень черноты вольфрамовых экранов равна 0,04 (рис. 4, *в*), 0,5 (рис. 5, *а*) и 0,8 (рис. 5, *б*) соответственно при $G = 0,3$ кг/с.

Таким образом, достигнутые стационарные состояния при проведенных численных расчетах соответствуют моменту полной зарядки теплового накопителя энергии, что позволяет оценить необходимое время для завершения данного процесса.

Исследование продемонстрировало возможность использования программного обеспечения SimInTech для моделирования процессов теплопередачи в тепловом накопителе энергии. В данном случае рассматривались конструкции накопителя энергии с количеством экранов от 3 до 12, однако в реальных промышленных установках число экранов может быть значительно больше, что значительно улучшит теплоизоляционные свойства и продлит срок эксплуатации системы.

Выводы. В результате проведенного исследования была достигнута цель оценки эффективности обогрева тепличного хозяйства с использованием разработанного теплового накопителя энергии. Использование двумерного моделирования в среде SimInTech позволило детально изучить распределение температур в тепловом накопителе, эффективность теплоизоляции и другие параметры при различных условиях эксплуатации.

Увеличение количества вольфрамовых экранов с 3 до 12 шт. замедлило нагрев наружной поверхности теплоизоляции, что свидетельствует о значительном улучшении теплоизоляционных характеристик системы. Это подтверждает гипотезу о влиянии количества экранов на теплоизоляцию.

Увеличение расхода олова с 0,1 до 0,3 кг/с ускорило процесс нагрева системы и сократило время выхода на стационарное состояние. Это подтверждает более эффективную передачу тепла при большем расходе теплоносителя.

Увеличение степени черноты вольфрамовых экранов от 0,04 до 0,8 привело к более интенсивному поглощению теплового излучения, что требует увеличения количества экранов для поддержания оптимальной теплоизоляции.

Время полной зарядки теплового накопителя варьировалось от 352 до 404 часов в зависимости от массового расхода олова и степени черноты экранов. Это позволяет прогнозировать сроки эксплуатации системы и планировать ее использование.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации систем теплоснабжения в тепличных хозяйствах, что приведет к росту экономического эффекта производства за счет повышения энергоэффективности и сокращения затрат на отопление.

Рекомендации и направления для дальнейшего развития: разработать более сложные модели, учитывающие трехмерные эффекты и динамические изменения в системе, исследовать влияние других материалов и конструкций экранов на эффективность теплоизоляции.

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

Литература

1. Смирнов П.А., Тихонова А.В. Опыт-аналитическое определение критических температурных точек теплицы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 4 (68). С. 98–105. doi: 10.12737/2073-0462-2023-98-105.
2. Research of different heating modes of greenhouses / K. V. Osintsev, I. S. Prikhodko, V. S. Shichkina [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Article 052007. doi: 10.1088/1755-1315/723/5/052007.
3. Tahery D., Roshandel R., Avami A. An integrated dynamic model for evaluating the influence of ground to air heat transfer system on heating, cooling and CO₂ supply in Greenhouses: Considering crop transpiration // Renewable Energy. 2021. Vol. 173. P. 42–56. doi: 10.1016/j.renene.2021.03.120.
4. Пындак В.И., Новиков А.Е., Амчеславский О.В. Теплицы для малоземельных хозяйств // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 1 (41). С. 234–240.
5. Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Исследование влияния различных факторов на тепловую мощность лучисто-конвективной системы отопления зимней теплицы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 6. С. 149–161. doi: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-149-161.
6. Разработка электрического саморегулируемого позисторного подогревателя грунта / В. Ф. Калинин, С. В. Кочергин, А. В. Кобелев и др. // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2017. № 1. С. 163–168.
7. Integration of a heating and cooling system driven by solar thermal energy and biomass for a greenhouse in Mediterranean climates / J. Prieto, R. M. Ajnannadhif, O. P. Fernández-del [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 221. Article 119928. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119928.
8. Новиков С.В., Бурденкова Е.Ю. Использование теплоты уходящих газов котла-утилизатора бинарной ПГУ для обогрева тепличного хозяйства // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 3. С. 20–24. doi: 10.18635/2071-2219-2020-3-20-24.
9. Nishad S., Krupa I. Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. Part C. Article 102241. doi: 10.1016/j.seta.2022.102241.
10. Sethi V.P., Sharma S.K. Survey and Evaluation of Heating Technologies for Worldwide Agricultural Greenhouse Applications // Solar Energy. 2008. Vol. 82. № 9. P. 832–859. doi: 10.1016/j.solener.2008.02.010.
11. Modeling the destruction of the grain shell of cereal crops / E. G. Nurullin, A. V. Dmitriev, D. T. Khaliullin [et al.] // BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. Vol. 52. – Kazan: EDP Sciences, 2022. – P. 00060. – DOI 10.1051/bioconf/20225200060.
12. Zinurov V., Nikandrova M., Kharkov V. Assessment of Thermal Storage Technologies in Energy Sector // IEEE Xplore. 2020. P. 68–71. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281236.

Сведения об авторах:

Дмитриев Андрей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, e-mail: ieremiada@gmail.com

Зинуров Вадим Эдуардович – кандидат технических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой инженерной графики, e-mail: vadd_93@mail.ru

Уткин Максим Олегович – аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств, e-mail: 209maks@mail.ru

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Халиуллин Дамир Тагирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и оборудования в агробизнесе, e-mail: damirtag@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия

Дмитриева Оксана Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования пищевых производств, e-mail: ja_deva@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

NUMERICAL SIMULATION OF HEATING OF A THERMAL ENERGY STORAGE DEVICE
FOR HEATING A GREENHOUSE

A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, M. O. Utkin, D. T. Khaliullin, O. S. Dmitrieva

Abstract. In the context of modern energy consumption and increasing demand for energy-efficient technologies, heat accumulation systems capable of ensuring the efficient use of excess energy are of particular relevance. One of the promising areas in this area is the use of high-temperature heat carriers and specialized thermal insulation materials. This work is devoted to the development and study of a thermal energy storage device using tin as a heat carrier and a ceramic heat accumulator with tungsten screens for thermal insulation. As part of the study, a design of a thermal energy accumulator was developed and modeled, intended for the accumulation of thermal energy and its subsequent use in heating systems of greenhouses and other objects of the agro-industrial complex. The aim of the work is a numerical two-dimensional simulation of the heating process of a thermal energy storage device using SimInTech software package. In the course of numerical simulation, the dependences of the change in the temperature of the outer surface of the thermal insulation (asbestos) on time were calculated at different values of the mass flow rate of tin of 0.1–0.3 kg/s, the number of tungsten screens from 3 to 12 and their emissivity from 0.04 to 0.8. The results showed that an increase in the number of tungsten screens slows down the heating of the outer surface of the thermal insulation, which increases the efficiency of the system. With an increase in tin consumption, the heating process accelerates, which indicates faster heat transfer. A change in the emissivity of tungsten screens affects the intensity of heat transfer: screens with a high emissivity absorb more heat, which requires an increase in their number to maintain the insulating properties. The study confirmed the possibility of using SimInTech software package for modeling the heating processes of a heat accumulator; a two-dimensional axisymmetric model made it possible to take into account temperature changes in the radial and axial directions, which ensured an accurate representation of thermal processes.

Key words: thermal energy storage, high-temperature coolant, heat accumulator, modeling, heat transfer, thermal insulation system.

References

1. Smirnov PA, Tikhonova AV. [Experimental and analytical determination of critical temperature points of a greenhouse]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022; Vol.17. 4 (68). 98–105 p. doi: 10.12737/2073-0462-2023-98-105.
2. Osintsev KV, Prikhodko IS, Shichkina VS. Research of different heating modes of greenhouses. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; Article 052007. doi: 10.1088/1755-1315/723/5/052007.
3. Tahery D, Roshandel R, Avami A. An integrated dynamic model for evaluating the influence of ground to air heat transfer system on heating, cooling and CO₂ supply in Greenhouses: Considering crop transpiration. *Renewable Energy*. 2021; Vol.173. 42–56 p. doi: 10.1016/j.renene.2021.03.120.
4. Pyndak VI, Novikov AE, Amcheslavskiy OV. [Greenhouses for small-scale farms]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie*. 2016; 1 (41). 234–240 p.
5. Pavlov MV, Karpov DF. [Study of the influence of various factors on the thermal power of the radiant-convective heating system of a winter greenhouse]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2019; Vol.21. 6. 149–161 p. doi: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-149-161.
6. Kalinin VF, Kochergin SV, Kobelev AV. [Development of an electric self-regulating resistor soil heater]. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017; 1. 163–168 p.
7. Prieto J, Ajnannadhif RM, Fernandez-del OP. Integration of a heating and cooling system driven by solar thermal energy and biomass for a greenhouse in Mediterranean climates. *Applied Thermal Engineering*. 2023; Vol.221. Article 119928. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119928.
8. Novichkov SV, Burdenkova EYu. [Using the heat of exhaust gases from a waste heat boiler of a binary combined cycle gas turbine to heat a greenhouse]. *Energobezopasnost i energosberezhenie*. 2020; 3. 20–24 p. doi: 10.18635/2071-2219-2020-3-20-24.
9. Nishad S, Krupa I. Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: a review. *Sustainable energy technologies and assessments*. 2022; Vol.52. Part C. Article 102241. doi: 10.1016/j.seta.2022.102241.
10. Sethi VP, Sharma SK. Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*. 2008; Vol.82. 9. 832–859 p. doi: 10.1016/j.solener.2008.02.010.
11. Nurullin EG, Dmitriev AV, Khaliullin DT. Modeling the destruction of the grain shell of cereal crops. *BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources"*. Vol.52. Kazan: EDP Sciences. 2022; 00060 p. – DOI 10.1051/bioconf/20225200060.
12. Zinurov V, Nikandrova M, Kharkov V. Assessment of thermal storage technologies in energy sector. *IEEE Xplore*. 2020; 68–71 p. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281236.

Authors:

Dmitriev Andrey Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Automation of Technological Processes and Production, e-mail: ieremiada@gmail.com
Zinurov Vadim Eduardovich – Ph.D. of Technical Sciences, acting head of Department of Automation of Technological Processes and Production, Department of Engineering Graphics, e-mail: vadd_93@mail.ru
Utkin Maksim Olegovich – post-graduate student of Department of Automation of Technological Processes and Production, e-mail: 209maks@mail.ru
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
Khaliullin Damir Tagirovich – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Head of Department of Machines and Equipment in Agribusiness, e-mail: damirtag@mail.ru
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia
Dmitrieva Oksana Sergeevna – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Department of Food Production Equipment, e-mail: ja_deva@mail.ru
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.