

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 536.241

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-5-153-167

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ОТ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЫ В ГРУНТЕ ТЕПЛИЧНОГО ХОЗЯЙСТВА

Уткин М.О., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vadd_93@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Отопление тепличного пространства в зимнее время было и остается одной из самых энергоемких статей затрат при эксплуатации тепличного хозяйства. Комбинирование возобновляемых источников энергии с высокотемпературными тепловыми накопителями позволяет сгладить дисбаланс генерации и потребления, однако данный подход требует верифицированных моделей теплообмена грунта для надежного проектирования подземных систем обогрева. **ЦЕЛЬ.** Численное моделирование и верификация процессов теплопередачи от трубы, размещенной в грунте, с учетом его влажности, для последующего применения в системах локального обогрева тепличного грунта. **МЕТОДЫ.** Проведены две серии лабораторных опытов: с высушенным (влажность менее 10%) и увлажненным (влажность около 45%) суглинком. Температуры регистрировались 20 датчиками DS18B20 и тепловизором UTi260B. Создана двумерная модель, построена сеточная модель. Выполнены нестационарные численные расчеты в ANSYS Fluent. В программе решалось уравнение нестационарной теплопроводности методом конечных объемов, учтены реальные теплофизические свойства грунта. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Средняя относительная погрешность между расчетными и экспериментальными температурами составила менее 6% для высушенного и около 4% для увлажненного грунта, что подтверждает адекватность модели. Увлажненный грунт прогревается на 15-20% быстрее и достигает на 2-3°C более высоких температур в зоне 2-4 см, что связано с уменьшением термического сопротивления насыщенной поровой структуры. Термограммы показали, что эффективная ширина прогрева одиночной трубы ограничена 1-2 см, ввиду этого необходимо использовать пучок труб или змеевик для равномерного воздействия на корнеобитаемый слой. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Верифицированная модель служит инструментом для оптимизации геометрии трубного контура с учетом влагосодержания почвы.

Ключевые слова: тепловой накопитель энергии; тепловые трубы; тепличное хозяйство; теплоперенос в грунте; влажность почвы; верификация эксперимента; подземный обогрев.

Благодарности: работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20061.

Для цитирования: Уткин М.О., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э. Численное и экспериментальное исследование теплопереноса от цилиндрической трубы в грунте тепличного хозяйства // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 153-167. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-153-167.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER FROM A CYLINDRICAL PIPE IN GREENHOUSE SOIL

Utkin M.O., Dmitriev A.V., Zinurov V.E.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vadd_93@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE.* Heating of greenhouse spaces during the winter season has been and remains one of the most energy-intensive cost items in greenhouse operation. The integration of renewable energy sources with high-temperature thermal storage systems helps to mitigate the imbalance between energy generation and consumption; however, this approach requires validated ground heat transfer models for the reliable design of subsurface heating systems. *THE PURPOSE.* To perform numerical modeling and experimental validation of heat transfer from a buried pipe, considering soil moisture content, for subsequent application in localized greenhouse soil heating systems. *METHODS.* Two series of laboratory experiments were conducted using dried (moisture < 10%) and moistened (moisture $\approx$ 45%) loamy soil. Soil temperature was monitored using 20 DS18B20 sensors and a UTi260B thermal imager. A two-dimensional computational domain was developed, and a mesh grid was constructed. Transient numerical simulations were performed in ANSYS Fluent. The unsteady-state heat conduction equation was solved using the finite volume method, incorporating actual thermophysical properties of the soil. *RESULTS.* The average relative deviation between simulated and experimental temperatures was below 6% for dried soil and around 4% for moistened soil, confirming model accuracy. Moistened soil exhibited 15-20% faster heating and achieved 2-3 °C higher temperatures in the 2-4 cm depth range due to reduced thermal resistance in the saturated pore structure. Thermographic imaging showed that the effective heating width of a single pipe was limited to 1-2 cm, indicating the need for a pipe bundle or coil arrangement to ensure uniform heating of the root zone. *CONCLUSION.* The validated model serves as a tool for optimizing the geometry of subsurface pipe layouts based on soil moisture content.

Keywords: thermal energy storage; heat pipes; greenhouse heating; soil heat transfer; soil moisture; experimental validation; subsurface heating.

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-20061.

For citation: Utkin M.O., Dmitriev A.V., Zinurov V.E. Numerical and experimental study of heat transfer from a cylindrical pipe in greenhouse soil. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 153-167. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-153-167.

Введение (Introduction)

Зимнее тепличное овощеводство играет ключевую роль в устойчивом обеспечении населения продуктами питания, особенно в регионах с неблагоприятным для открытого грунта климатом [1]. В последние годы площадь зимних тепличных комплексов в России продолжает уверенно расти. По данным, озвученным на VI Сельскохозяйственном форуме-выставке «Тепличная отрасль – 2025», к концу 2024 года она достигла около 3,35 тыс. га, что примерно на 70 га больше, чем годом ранее. На том же форуме подчеркнуто, что приоритетом отрасли остаются строительство, реконструкция и модернизация производственных мощностей с целью довести площадь зимних теплиц до 3,4 тыс. га к концу 2025 года [2]. Однако обеспечение оптимального микроклимата в теплицах требует больших энергозатрат, прежде всего на отопление. Отопление теплиц остается одной из самых энергоемких статей. По разным оценкам, на него приходится от 30 до 70% совокупных эксплуатационных затрат в тепличном производстве в зависимости от климатической зоны [3]. В условиях России доля расходов на обогрев может достигать 30-50% в себестоимости овощей, выращенных в зимних теплицах [4]. Традиционно теплоснабжение теплиц базируется на сжигании ископаемого топлива. Прежде всего природного газа, реже угля или жидкого топлива, что не только повышает затраты, но и увеличивает углеродный след производства [5, 6]. Кроме того, конструкции теплиц характеризуются значительными потерями тепла: светопрозрачные ограждения (особенно пленочные) обладают низкой теплоизоляцией, из-за чего внутренняя температура быстро снижается без обогрева. Таким образом, высокие энергетические и финансовые издержки тепличного производства требуют разработки энергоэффективных технологий отопления.

Повышение энергоэффективности и снижение энергетических затрат на отопление теплиц остаются ключевыми задачами аграрной энергетики. В последние годы реализуются проекты по совершенствованию ограждающих конструкций, утеплителей, вентиляции и управления микроклиматом, а также по внедрению возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и утилизации низкопотенциального тепла, что снижает зависимость от ископаемого топлива [7].

Среди альтернативных решений применяются электрические системы обогрева – греющие кабели, почвенные электронагреватели и позисторные элементы, обеспечивающие стабильную температуру корнеобитаемого слоя. Наиболее перспективными признаны тепловые насосы воздуха и грунта: при среднем COP равным 3,5 они демонстрируют высокую энергоэффективность и позволяют сократить выбросы CO₂. Кроме того, те же установки могут работать на охлаждение, что важно для южных регионов [8].

Широко применяются и солнечно-биоэнергетические схемы. Известны пассивные («китайские» солнечные теплицы) и активные системы с солнечными коллекторами и ФЭП панелями. Их эффективность увеличивается при комбинации с биотопливными котлами [9]. В Китае, например, внедрены котельные на древесных пеллетах мощностью 1,2 МВт, что обеспечило двукратное снижение затрат за счет замещения угля [10].

Перспективный резерв – утилизация вторичного тепла. Тепличные хозяйства используют котлы-утилизаторы для отбора тепла дымовых газов газопоршневых и газотурбинных установок. Такие когенерационные системы одновременно покрывают тепловую нагрузку и подают CO₂ растениям [11].

Для сглаживания разбалансировки между генерацией ВИЭ и теплопотреблением теплиц все шире внедряются накопители энергии. Использование материалов с фазовым переходом (PCM), водяных и грунтовых теплоаккумуляторов позволяет повысить ночные температуры на 5-9°C и снизить энергопотребление на 10-14% [12].

Активные грунтовые аккумуляторы выполняются в виде трубчатого контура под теплицей: избыток тепла аккумулируется днем и возвращается ночью. В связке с тепловыми насосами система обеспечивает обогрев и охлаждение [13].

Таким образом, перспективным направлением является комбинированное использование ВИЭ и высокоэффективных тепловых накопителей энергии в системах обогрева теплиц. Накопители тепловой энергии аккумулируют избыток энергии, вырабатываемый ВИЭ в периоды пиковой генерации, и отдают ее в фазы дефицита, повышая надежность теплоснабжения [14]. На практике это реализуется, например, через буферные водяные баки: современные тепличные комплексы запасают дневное тепло от котельных или солнечных коллекторов и используют его ночью, что повышает стабильность и снижает расход топлива [15].

В Нидерландах внедрены сезонные системы хранения тепла в водоносных горизонтах: избыточное геотермальное или солнечное тепло летом закачивается в подземный водоносный пласт, зимой извлекается для отопления теплиц [16]. Для регионов с суровым климатом требуются аккумуляторы, способные работать при высоких температурах и минимальных теплопотерях. Здесь перспективны тепловые накопители энергии на расплавах солей и жидких металлах, обеспечивающие рабочий диапазон в несколько сотен градусов и высокую плотность энергии [17, 18].

Для уменьшения утечек тепла разрабатываются многослойные теплоизоляции с чередованием отражающих экранов и газовых прослоек, что позволяет длительно удерживать тепло при компактных размерах аккумулятора [19]. Такие решения особенно полезны, когда избыток электроэнергии от солнечных батарей или ветрогенераторов преобразуется в тепло и аккумулируется в высокотемпературных тепловых накопителях энергии для последующего использования. Внедрение технологий накопления энергии увеличенной емкости является необходимым условием для глубокой интеграции возобновляемой энергетики в энергосистему.

Практическую состоятельность интеграции накопителей энергии в распределенные и автономные энергосистемы подтверждают результаты отечественных исследований. Так, для локальных сетей предложен сверхпроводящий электрокинетический накопитель СПЭНЭ-1, выполняющий функции регулятора энергетических потоков [20]. Эксперименты с многоэлементными литий-ионными батареями показали, что корректная стратегия заряд-балансировки повышает КПД накопителя и снижает эксплуатационные потери [21]. В автономных дизельных энергокомплексах включение электрохимических накопителей позволило сократить расход топлива до 15% [22]. Недавние комплексные испытания модульного комплекса СПЭНЭ-1 подтвердили его работоспособность в низкотемпературных условиях и масштабируемость для распределенной энергетики [23].

Авторами работы был разработан тепловой накопитель энергии с высокотемпературным рабочим телом (рис. 1), представляющий собой вертикальный цилиндр с твердотельной графитовой теплоаккумулирующей средой, заключенной в вольфрамовый контейнер 3 и пронизанный центральным каналом 2 из того же металла [24]. В канале циркулирует высокотемпературный жидкометаллический теплоноситель –

олово 1, нагреваемое трубчатыми электронагревателями до 2000-2500°C, что обеспечивает высокую плотность аккумулируемой энергии при приемлемых удельных затратах энергии на перекачку. Для перемещения жидкого олова может быть использован магнитогидродинамический насос. Тепловой накопитель энергии включает двухконтурную теплоизоляцию, которая сведена к системе отражающих вольфрамовых экранов, разделенных инертным аргоном, и наружному слою минеральной ваты, что ограничивает теплотери при внешних температурах $\leq 20^\circ\text{C}$ до нескольких процентов хранимого запаса. Герметичный патрубок 8 позволяет вакуумировать внутренний объем и заполнить его аргоном, предотвращая окисление графита при высоких рабочих температурах [25].

Представленный тепловой накопитель энергии (рис. 1) предлагается интегрировать в систему обогрева теплицы через тепловые трубы. Предлагаемая схема (рис. 2) содержит два взаимосвязанных контура [26]. В периоды энергетического профицита, когда солнечная или ветровая генерация превышает текущие нужды хозяйства, то жидкий металл (олово) циркулирует по герметичному кольцу при помощи магнитогидродинамического насоса-нагревателя 7, нагревая теплоаккумулирующую среду внутри теплового накопителя энергии 5 до 1500-2500°C. В периоды энергетического дефицита поток движется во второй контур: раскаленное олово проходит через теплообменный аппарат 8 (рис. 2).

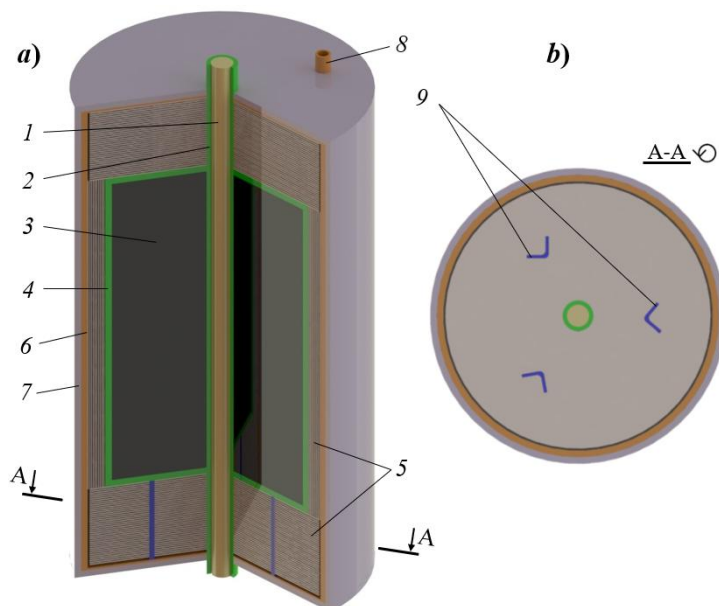


Рис. 1. Трехмерная модель накопителя тепловой энергии периодического действия: 1 – жидкометаллический высокотемпературный теплоноситель (олово); 2 – цилиндрический канал из тугоплавкого материала (вольфрам); 3 – теплоаккумулятор из твердого высокотемпературного рабочего тела (графит); 4 – цилиндрическая емкость из вольфрама для хранения теплоаккумулятора; 5 – вольфрамовое экранирование; 6 – цилиндрический металлический корпус; 7 – теплоизоляционный материал (минеральная вата); 8 – патрубок; 9 – опоры. а) вид со сложным разрезом; б) вид с наклонным разрезом начальной модели (без разрезов) секущей плоскостью в сечении А-А

Fig. 1. Three-dimensional model of a periodic action thermal energy storage: 1 – liquid metal high-temperature heat transfer fluid; 2 – cylindrical channel made of refractory material; 3 – heat accumulator made of solid high-temperature working substance; 4 – cylindrical container for storing the heat accumulator; 5 – shielding; 6 – cylindrical casing; 7 – thermal insulation; 8 – nozzle; 9 – supports. a) the view with a complex section; b) the view with an inclined section of the initial model (without sections) with a secant plane in section A-A

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

В конструкции теплообменника вольфрамовые трубки, по которым движется жидкое олово, окружены газовой прослойкой и помещены внутрь цилиндрических труб 9 с протекающей по ним водой. Под действием теплового излучения вода нагревается и переходит в состояние насыщенного пара, который по трубопроводу 10 подается в корнеобитаемый слой теплицы, эффективно прогревая его до требуемой температуры.

Однако даже при правильно подобранной длине и диаметре тепловых труб распределение тепла в грунте остается неравномерным. Во-первых, насыщенный пар постепенно конденсируется, т. е. формируется продольный температурный градиент в корнеобитаемом слое. Во-вторых, теплопередача существенно зависит от состава и влажности почвы: при переходе от сухого суглинка к влажному суглинку коэффициент теплопроводности грунта возрастает, что изменяет локальную плотность теплового потока и максимальную глубину прогрева [27]. Численные исследования горизонтальных теплообменников показывают, что изменение содержания воды с 10 до 25% может сократить время выхода грунта на целевую температуру почти на 30% [28]. Аналогично, CFD-моделирование теплиц с камнями-накопительными слоями выявило выраженный «клин» повышенных температур у входа и падение теплового потока на дальнем участке труб [29].

В этих условиях актуальным направлением исследований является применение верифицированного численного моделирования для прогноза распределения температур и тепловых потоков в грунте от нагретой трубы, с учетом переменной влажности и гранулометрического состава почвы.

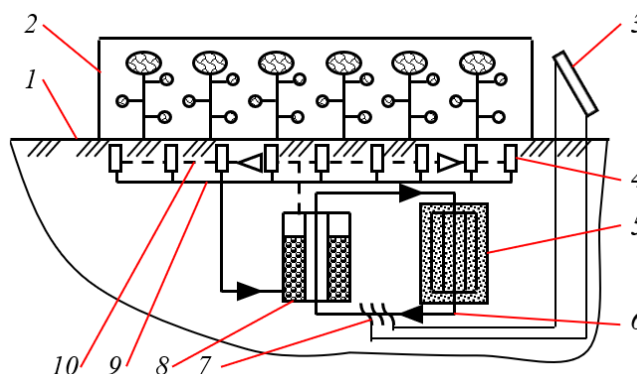


Рис. 2. Принципиальная схема использования теплового накопителя энергии для отопления тепличного комплекса: 1 – поверхность грунта; 2 – тепличное помещение; 3 – солнечные панели; 4 – тепловые трубы; 5 – тепловой накопитель энергии; 6 – контур циркуляции жидкого металла; 7 – насос-нагреватель; 8 – теплообменник; 9 – контур циркуляции воды; 10 – линия подачи пара

Fig. 2. Schematic diagram of using a thermal energy storage system for greenhouse heating: 1 – ground surface; 2 – greenhouse structure; 3 – solar panels; 4 – heat pipes; 5 – thermal energy storage (TES) unit; 6 – liquid metal circulation loop; 7 – pump-heater; 8 – heat exchanger; 9 – water circulation loop; 10 – steam supply line

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Целью работы является численное моделирование и верификация процессов теплопередачи от трубы, размещенной в грунте, с учетом его влажности, для последующего применения в системах локального обогрева тепличного грунта.

Научная значимость исследования заключается в применении современных инструментов вычислительной гидродинамики в среде ANSYS Fluent для численного моделирования теплопереноса в грунте от линейного теплового источника.

Практическая значимость исследования состоит в возможности применения результатов моделирования для расчета и оптимизации систем локального подогрева корнеобитаемого слоя почвы в зимних теплицах. Разработанный подход позволяет повысить энергоэффективность тепличных хозяйств за счет рационального распределения тепловых потоков, адаптированных к конкретным почвенно-климатическим условиям и уровню влажности грунта.

Материал и методы (Material and methods)

Для проведения физических экспериментов был изготовлен лабораторный стенд (рис. 3), смонтированный на двух перфорированных монтажных панелях (90×30 см), соединенных мебельными уголками и установленных на жесткое основание. На верхней панели размещались элементы силовой части: два автоматических выключателя IEK ВА 47-29 (2Р, 16А), ШИМ-модуль на 4 кВт и цифровой вольт-ампер-ваттметр D52-2066 с токовым датчиком 100 А. Эти устройства закреплены на DIN-рейку, что упрощает коммутацию и обеспечивает оперативный доступ к аппаратуре при настройке.

Нижняя панель служила опорой для пластикового контейнера (34×21×52 см).

Контейнер был заполнен 50 кг предварительно подготовленного грунта, уложенного послойно. По центру емкости, на глубине 5 мм от поверхности, закреплен трубчатый электронагреватель Redber (255 Вт, 300 мм). Подвод питания выполнен силиконовым термостойким кабелем ПУНВ $1 \times 2,5 \text{ мм}^2$; мощность ТЭНа задавалась ШИМ-регулятором и поддерживалась на уровне 100 Вт, максимальная температура корпуса нагревателя ограничивалась 200°C . Текущая температура ТЭНа контролировалась высокотемпературным терморезистором ЕТР-01А, подключенным к мультиметру Mastech MAS838.

Температурное поле грунта регистрировалось двадцатью цифровыми датчиками DS18B20. Они располагались в трех горизонтальных слоях: поверхностном (верхний уровень), среднем (2 см) и глубинном (4 см – нижний уровень) (рис. 4b). При этом было использовано по 6 точек в каждом ярусе. Два дополнительных датчика контролировали температуру корпуса ТЭНа и параметры воздуха. Сенсоры подключались к плате регистрации на контроллере ATmega 328 (чипсет CH340G). Адреса датчиков задавались в программе с помощью библиотеки microDS18B20. Связь с ПК осуществлялась по USB через гальвано-развязку ADUM 3160. Сбор данных выполнялся программой RuTTY с периодом 1 с, что обеспечивало непрерывный массив температурных значений. Для визуального контроля теплового поля каждые 15 мин проводилась тепловизионная съемка поверхности грунта портативным тепловизором UNI-T UTi260B (от -2 до $+550^\circ\text{C}$). Шесть мини-термогигрометров с выносными зондами регистрировали температуру и относительную влажность на поверхности каждые 5 мин.

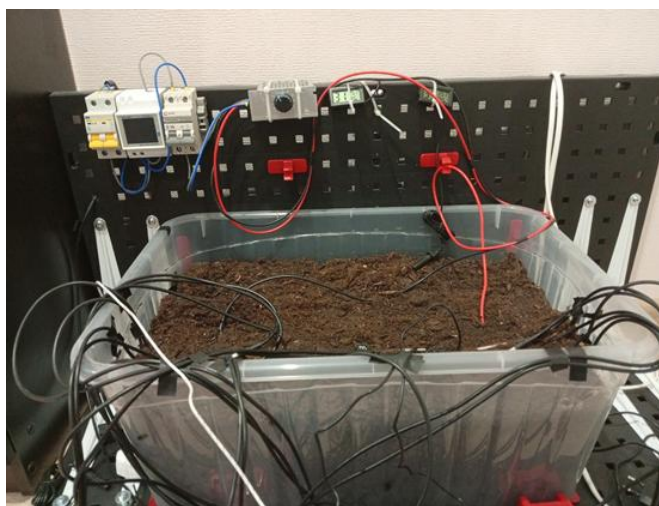


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки Fig. 3. The external view of the experimental setup

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Визуализация и компоновка элементов лабораторной установки представлена на рисунке 4. Трехмерная модель экспериментального стенда с указанием ключевых компонентов представлена на рисунке 4a. Такая компоновка обеспечивает удобство размещения оборудования, термическую изоляцию контейнера от основания и возможность вариативной установки измерительных приборов. На рисунке 4с приведены координаты размещения датчиков в сечениях контейнера. Приведенная схема была использована при построении численной модели в ANSYS Fluent и при подготовке экспериментальных данных к верификации.

Для проверки влияния влагосодержания почвы было рассмотрено две серии экспериментов: первая серия – с высушенным грунтом (влажность $\leq 10\%$), вторая серия – с увлажненным грунтом (влажность $\approx 42\text{--}51\%$). Параметры каждой серии приведены ниже в таблицах 1 и 2.

Одним из ключевых параметров при моделировании теплопереноса в почве является ее плотность, от которой напрямую зависят теплоемкость и теплопроводность. Для получения достоверных расчетных данных в рамках настоящего исследования была определена плотность исследуемого грунта с использованием косвенного метода – по объему вытесненной жидкости. Метод основан на известном принципе Архимеда и позволяет достаточно точно определить плотность твердой фазы без применения сложного оборудования. Для проведения эксперимента использовалось следующее

оборудование: ареометр АОН-1 940-1000 ГОСТ 18481-81, Ареометр АОН-1 1000-1060 ГОСТ 18481-81, мерная стеклянная емкость объемом 250 мл, цифровые весы, тара для отбора пробы и дистиллированная вода. Перед основными измерениями проводилось определение плотности используемой воды с помощью ареометров.

Для повышения точности было выполнено 10 последовательных замеров. В результате установлено, что среднее значение плотности воды составило $1000,6 \text{ кг/м}^3$, что соответствует нормативным значениям для дистиллированной воды при температуре около 20°C . Далее осуществлялось взвешивание пустой тары для отбора пробы. Затем в нее засыпался исследуемый грунт, и тара повторно взвешивалась. После этого пробы последовательно помещались в мерную емкость с водой, в которой предварительно был зафиксирован исходный уровень жидкости. После помещения высушенного грунта измерялся новый уровень воды, позволявший определить объем вытесненной жидкости.

Таблица 1

Table 1

Параметры высушенного грунта в контрольной зоне

Parameters of dried soil in the control zone

Время, мин	Верхний уровень (глубина залегания 0 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	6,9	1	22
30	6,9	1	22
90	6,9	1	22
Время, мин	Средний уровень (глубина залегания 20 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7	1	22
30	7	1	22
90	7	1	22
Время, мин	Нижний уровень (глубина залегания 40 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7	8	22
30	7	8	22
90	7	8	22

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

В завершение проводилось финальное взвешивание пустой тары для исключения налипания или остаточной влаги, способной повлиять на точность измерений. Все три измерения показали высокую воспроизводимость.

Таблица 2

Table 2

Параметры увлажненного грунта в контрольной зоне

Parameters of moistened soil in the control zone

Время, мин	Верхний уровень (глубина залегания 0 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7,9	42	25
30	7,9	52	25
90	7,9	52	25
Время, мин	Средний уровень (глубина залегания 20 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7,5	25	25
30	7,5	25	24
90	7,5	25	24
Время, мин	Нижний уровень (глубина залегания 40 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7,1	51	24
30	7,1	47	24
90	7,1	47	24

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Масса пробы составила в среднем около 6,43 г, объем вытесненной воды – около 5 см³, а итоговые значения плотности – от 1280 до 1292 кг/м³. Среднее арифметическое значение по результатам трех замеров составило 1286,7 кг/м³. Полученная величина была использована на последующем этапе для численного моделирования процессов теплопереноса от трубчатого нагревателя в почвенной среде. Результаты позволяют утверждать, что исследуемый высушенный грунт является слабо увлажненным и однородным по составу, что подтверждается незначительным разбросом значений при многократных измерениях.

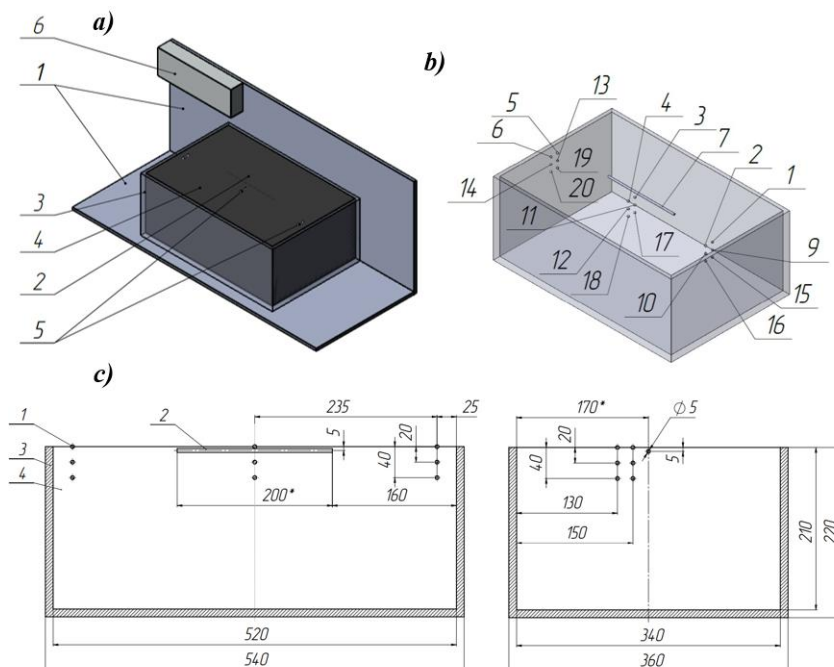


Рис. 4. а) Трехмерная модель экспериментальной установки: 1 – монтажные панели; 2 – резистор; 3 – контейнер пластиковый; 4 – грунт; 5 – датчик температуры; 6 – измерительный блок; б) Расположение и глубина залегания датчиков (аксонометрический вид): 1-6 – верхний уровень (поверхность грунта); 9-16 – средний уровень (глубина залегания 2 см); 15-20 – нижний уровень (глубина залегания 4 см); 7 – температура резистора, 8 (позиция не показана) – температура наружного воздуха; в) Схема расположения и глубина залегания датчиков

Fig. 4. a) Three-dimensional model of the experimental setup: 1 – mounting panels; 2 – resistor; 3 – plastic container; 4 – soil; 5 – temperature sensor; 6 – measurement unit; б) Arrangement and burial depth of sensors (axonometric view): 1-6 – upper level (soil surface); 9-14 – middle level (burial depth 2 cm); 15-20 – lower level (burial depth 4 cm); 7 – resistor temperature; 8 (position not shown) – ambient air temperature; в) Layout and depth of sensors

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Также была исследована теплопередача в условиях повышенной влажности почвы. Для этого предварительно в сухой грунт было внесено 4 л дистиллированной воды с нейтральным уровнем pH равным 7 (табл. 2). В результате насыщения почвы вода равномерно распределилась по всему объему контейнера. Начальная массовая влажность составила 42% на верхнем уровне и достигала 51% на нижнем, снижаясь к концу эксперимента до 47% вследствие испарения. При этом значения pH оставались стабильными. Повышенное содержание влаги оказало влияние на физические характеристики грунта: в частности, его плотность уменьшилась с 1286 кг/м³ до 1280 кг/м³, что обусловлено структурным разбуханием и перераспределением пористости. Были также пересчитаны теплофизические параметры среды – теплоемкость составила 2921 Дж/(кг·°C), теплопроводность 0,13 Вт/(м·°C), что отражает повышение теплопередающей способности увлажненного субстрата.

Для проведения численного моделирования процессов теплопереноса от нагретой трубы в почвенной среде использовалась программная среда ANSYS Fluent, входящая в состав пакета ANSYS Workbench. Данная система основана на численном решении уравнений теплопроводности и энергии методом конечных объемов. Ранее численные исследования в среде ANSYS Fluent показали высокую точность моделирования

теплообмена при внешнем обтекании нагреваемой трубы [30]. Расчетная модель базировалась на нестационарной форме уравнения теплопроводности, учитывающей внутренний источник тепла:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; C_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·°C); T – температура, К; t – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C), Q – объемный источник тепла, Вт/м³.

Геометрия модели соответствовала габаритам физической установки. Для расчетов была построена двумерная расчетная сетка в модуле ANSYS Meshing с использованием структурированной схемы разбиения. Размер одного элемента – 5 мм, минимальная длина ребра – 2 мм. Для повышения точности в зоне контакта с нагревателем была реализована инфляция (inflation) с плавным переходом и числом слоев 5. Общее количество элементов составило 35705 (рис. 5).

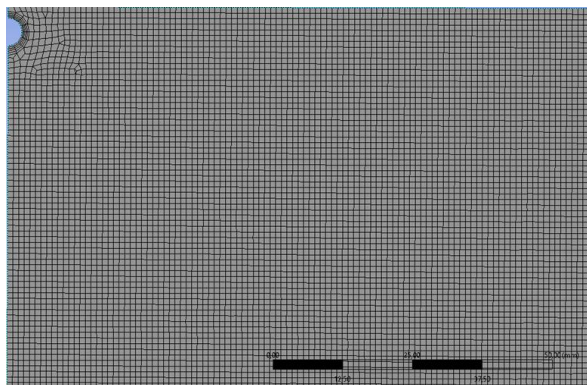


Рис. 5. Внешний вид расчетной сетки

Fig. 5. External view of the computational mesh

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет выполнялся в нестационарной постановке (transient) с шагом по времени 1 с и общим числом шагов 3600. В качестве метода инициализации использовалась Standard Initialization, начальная температура всей расчетной зоны была установлена на уровне 23°C. Учет энергии (Energy Equation) был активирован. Расчеты проводились с использованием 4 ядер процессора и 8 потоков, с включенной настройкой Double Precision. На каждом шаге выполнялось до 20 итераций, обеспечивая сходимость расчета по температурному полю. Следует отметить, что модель (рис. 5) реализована с учетом условия симметрии относительно вертикальной оси, проходящей через центр нагревателя. Это позволяет сократить вычислительную область в два раза без потери точности, что существенно снижает требования к ресурсам при расчете.

Результаты и обсуждение (Research results and discussion)

Тепловизионные изображения (рис. 6) позволили визуализировать температурное поле в области размещения ТЭНа. На изображении (a) видно, что при достижении температуры поверхности ТЭНа 95,1°C тепловое влияние ограничивается узкой зоной вокруг нагревателя. Изображение (b), полученное спустя 50 мин после момента (a), при температуре ТЭНа 154,5°C, демонстрирует аналогичную тепловую картину с незначительным увеличением зоны прогрева. Таким образом, даже при значительном росте температуры нагревателя, прогрев почвы на удалении более 1-2 см от ТЭНа остается ограниченным. Это подтверждает резкий градиент температур вблизи нагревателя и указывает на необходимость использования нескольких нагревательных элементов для равномерного воздействия на корнеобитаемый слой.

Для верификации результатов численного моделирования был проведен анализ температурных данных в контрольных точках, расположенных в центральной части контейнера: 3, 4, 11 и 12. Их выбор обусловлен максимальной равномерностью прогрева и отсутствием краевых эффектов. В остальных точках температурные изменения оказались незначительными и нехарактерными для анализа переходных процессов.

На рисунках 7 и 8 приведены графики сравнения численных и экспериментальных данных для двух вариантов грунта: высушенного и увлажненного. Из анализа данных таблиц видно, что характер теплопередачи существенно различается в зависимости от степени увлажнения почвы.

В случае высушенного грунта (рис. 7), температура в расчетных точках модели (3 и

11) достигает значений $31,8^{\circ}\text{C}$ и $36,8^{\circ}\text{C}$ соответственно, тогда как в экспериментальных точках (3 и 11) значения составляют $29,9^{\circ}\text{C}$ и $33,2^{\circ}\text{C}$ соответственно.

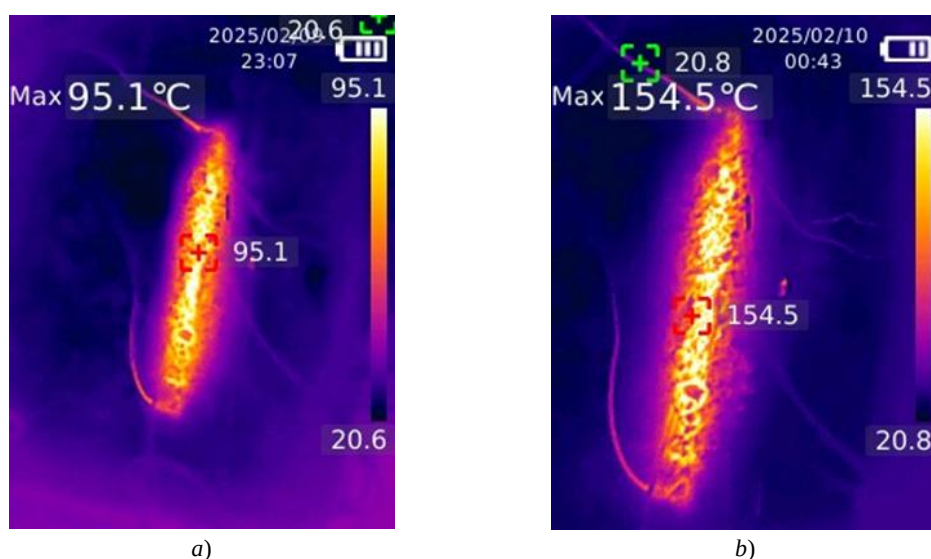


Рис. 6. Тепловизионные изображения нагревательного элемента в процессе эксперимента: (a) момент достижения температуры поверхности ТЭНа $95,1^{\circ}\text{C}$; (b) момент достижения температуры поверхности ТЭНа $154,5^{\circ}\text{C}$ через 50 мин после измерения (a)

Fig. 6. Thermal images of the heating element during the experiment: (a) the moment the surface temperature of the heater reached $95,1^{\circ}\text{C}$; (b) the moment the surface temperature of the heater reached $154,5^{\circ}\text{C}$, 50 min after measurement (a)

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Это демонстрирует хорошую сходимость моделирования с экспериментом, особенно в точках, удаленных от центра ТЭНа (точки 11 и 12), где теплоперенос идет преимущественно за счет теплопроводности. Небольшое расхождение между моделированием и экспериментом (до $2-3^{\circ}\text{C}$) может быть обусловлено локальными неоднородностями материала, различиями в теплофизических параметрах и тепловыми потерями в реальной системе.

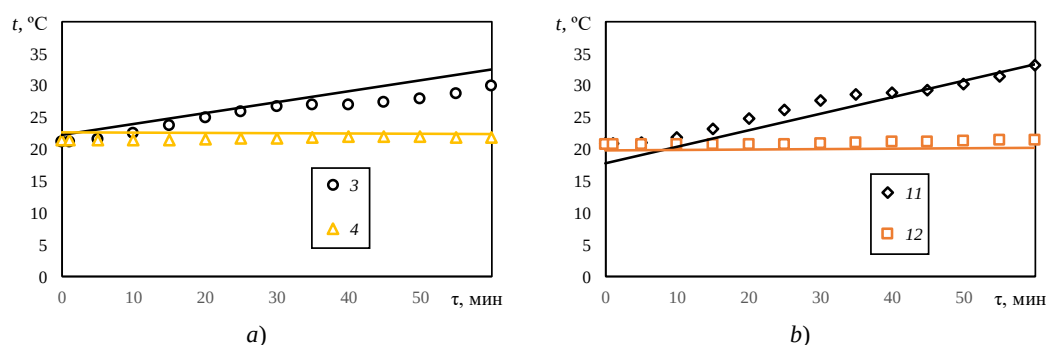


Рис. 7. Верификация результатов численного моделирования с экспериментальными данными для высушенного грунта: (a) температурные значения в точках 3 и 4, (b) температурные значения в точках 11 и 12. Линии – результаты численного моделирования, маркеры – данные физического эксперимента

Fig. 7. Verification of numerical simulation results against experimental data for dried soil (a) temperature values at points 3 and 4, (b) temperature values at points 11 and 12. Lines represent numerical simulation results; markers correspond to physical experiment data

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

В случае увлажненного грунта (рис. 8), наблюдаются как более высокие абсолютные температуры, так и более активный рост температуры во времени. Несмотря на высокую сходимость трендов, отмечается, что в некоторых точках практические данные превосходят численные, что может свидетельствовать о наличии дополнительных механизмов теплопереноса, включая капиллярное перемещение влаги и конвективную составляющую в микропорах. Например, температура в точке 3 достигает $35,5^{\circ}\text{C}$, тогда

как в соответствующей экспериментальной точке 3 – 33,4°C. Аналогичная тенденция наблюдается и в точке 11: расчетное значение – 30,9°C, экспериментальное – 33,3°C.

Сравнительный анализ кривых на графиках (рис. 7 и 8) показывает, что увлажненный грунт прогревается быстрее и интенсивнее, особенно в средних и нижних слоях (точки 11 и 12), что объясняется снижением сопротивления теплопередаче в насыщенной структуре.

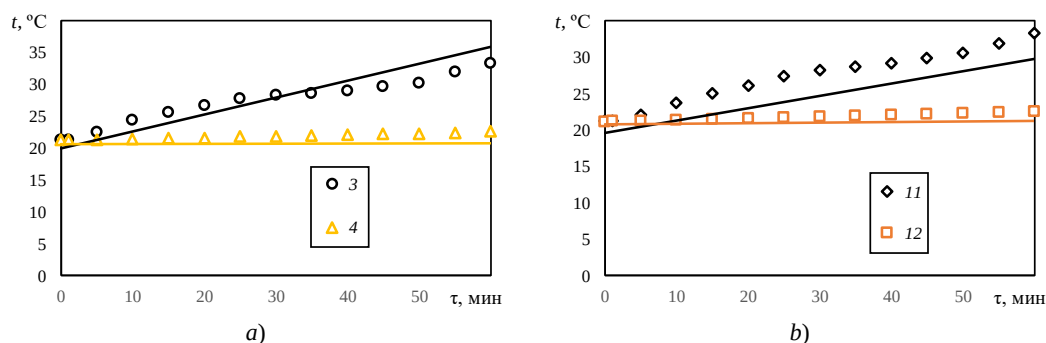


Рис. 8. Верификация результатов численного моделирования с экспериментальными данными для увлажненного грунта: (а) температурные значения в точках 3 и 4, (б) температурные значения в точках 11 и 12. Линии – результаты численного моделирования, маркеры – данные физического эксперимента

Fig. 8. Verification of numerical simulation results against experimental data for moistened soil: (a) temperature values at points 3 and 4, (b) temperature values at points 11 and 12. Lines represent numerical simulation results; markers correspond to physical experiment data

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, численная модель корректно описывает тепловые процессы как в высушенном, так и во влажном грунте, демонстрируя стабильную сходимость с экспериментальными наблюдениями. Средняя относительная погрешность между расчетными и измеренными значениями температуры в контрольных точках составляет менее 6% для высушенного грунта и около 4% для увлажненного. Наиболее высокая точность достигнута в точках, расположенных в средней зоне, где температурный градиент стабилен. Результаты также указывают на критическую зависимость эффективности прогрева от влажности среды, что должно учитываться при проектировании подземных систем обогрева, систем антиобледенения или инженерной инфраструктуры в агротехнических приложениях.

Выводы (Conclusions)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработана концепция применения высокотемпературного теплового накопителя энергии с жидкометаллическим теплоносителем для отопления тепличного комплекса. Модульный TES, связанный с тепловыми трубами, способен аккумулировать профицитную энергию ВИЭ и обеспечивать тепловую нагрузку теплицы в периоды энергетического дефицита, одновременно уменьшая потребление ископаемого топлива и углеродный след производства.

2. Экспериментальные термограммы показали, что одиночный линейный нагреватель формирует узкую зону эффективного прогрева (1-2 см). Для равномерного прогрева корнеобитаемого слоя необходим теплообменный пучок либо змеевик из параллельных труб, обеспечивающий перекрывающиеся тепловые поля и сглаженный температурный профиль по ширине грядки.

3. Построенная численная модель в ANSYS Fluent адекватно воспроизводит тепловые процессы в грунте. Средняя относительная погрешность между расчетными и измеренными температурами не превышает 6 % для высушенного и 4 % для увлажненного грунта.

4. Влажность почвы является важным фактором эффективности подземного обогрева. Увлажненный грунт (влажность $\approx 45\%$) прогревается на 15-20% быстрее и достигает на 2-3°C более высоких температур, чем высушенный образец, вследствие уменьшения теплового сопротивления насыщенной поровой структуры.

При проектировании систем следует учитывать сезонную динамику влажности, возможный капиллярный перенос влаги и необходимость адаптивного управления тепловым потоком.

В последующих этапах работы планируется расширить модель за счет учета

фазовых превращений в контуре подачи пара. Особое внимание будет уделено конденсации насыщенного пара в процессе его транспортировки по трубопроводам и инфильтрации в грунт.

Литература

1. Soussi A., Zero E., Ouammi A., et al. Smart greenhouse farming: a review towards near zero energy consumption // *Discov Cities*. 2025. Vol. 2. Art. 55. doi: 10.1007/s44327-025-00096-w.
2. Тепличная отрасль – 2025 // *APK-news.ru*: сайт новостей агропромышленного комплекса Юга и Кавказа; 28 апр. 2025. Сочи; 2025. Доступно по: <https://www.apk-news.ru/teplichnaya-otrasl-2025/>. Ссылка активна на 18 июля 2025.
3. Sun W., Wei X., Zhou B., Lu C., Guo W. Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: system design and implementation // *Applied Energy*. 2022. Vol. 325. Art. 119815. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119815.
4. Соковикова А.В. Повышение эффективности энергосбережения отопительно-вентиляционными установками защищенного грунта с применением в системе управления логических контроллеров // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2009. № 3–4(20–21). С. 48–49.
5. Boyacı S., Kocięcka J., Jagosz B., Atılğan A. Energy efficiency in greenhouses and comparison of energy sources used for heating // *Energies*. 2025. Vol. 18, N3. Art. 724. doi: 10.3390/en18030724.
6. Ahamed M.S., Guo H., Tanino K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses // *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 178. pp. 9–33. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.
7. Cuce E., Harjunowibowo D., Cuce P.M. Energy use in greenhouses in the EU: a review recommending energy-efficiency measures and renewable-energy adoption // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, N10. Art. 5150. doi: 10.3390/app12105150.
8. Seo Y., Seo U.-J. Ground source heat pump (GSHP) systems for horticulture greenhouses adjacent to highway interchanges: a case study in South Korea // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 135. Art. 110194. doi: 10.1016/j.rser.2020.110194.
9. Prieto J., Ajnannadhif R.M., Fernández-del-Olmo P. 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. Art. 119928. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119928.
10. Huang T., Li H., Zhang G., Xu F. Experimental study on biomass heating system in the greenhouse: a case study in Xiangtan, China // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, N14. Art. 5673. doi: 10.3390/su12145673.
11. Ghaderi M., Reddick C., Sorin M. A systematic heat recovery approach for designing integrated heating, cooling and ventilation systems for greenhouses // *Energies*. 2023. Vol. 16, N14. Art. 5493. doi: 10.3390/en16145493.
12. Nishad S., Krupa I. Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: a review // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 52. Art. 102241. doi: 10.1016/j.seta.2022.102241.
13. 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 // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 173. pp. 42–56. doi: 10.1016/j.renene.2021.03.120.
14. Adesanya M.A., Rabiou A., Ogunlowo Q.O., et al. Experimental evaluation of hybrid renewable and thermal energy storage systems for a net-zero energy greenhouse: a case study of Yeosu-Si // *Energies*. 2025. Vol. 18, N10. Art. 2635. doi: 10.3390/en18102635.
15. Zhang X., Li Y., Wang P. Thermo-economic analysis of a low-cost greenhouse thermal solar plant with seasonal energy storage // *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 276. Art. 116626. doi: 10.1016/j.enconman.2023.116626.
16. van der Stelt A., Rouwette N., Bloemendal J. Aquifer thermal energy storage for low-carbon greenhouse heating in the Netherlands // *Applied Energy*. 2024. Vol. 331. Art. 120545. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120545.
17. Fan M., Ding Y., Liang X. Molten salts tanks thermal energy storage: aspects to consider for renewable integration // *Energies*. 2022. Vol. 17, N1. Art. 22. doi: 10.3390/en17010022.
18. Reimann T., Neldner K. A perspective on high-temperature heat storage using liquid metal as heat-transfer fluid // *Energy Storage*. 2023. Vol. 3. Art. e530. doi: 10.1002/est2.530.
19. Li S., Chen H., Wang J. Modeling and implementation of multilayer insulation for small-scale high-temperature thermal energy storage tank // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 214. Art. 124567. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.124567.

20. Смоленцев Н.И., Кондрин С.А. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии для локальных электрических сетей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19. № 3–4. С. 53–60.
21. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19. № 9–10. С. 140–145.
22. Федотов А.И., Федотов Е.А., Абдуллазянов А.Ф. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 3–17. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17.
23. Смоленцев Н.И., Бондарева В.Ю. Результаты разработки и экспериментальных исследований накопительного комплекса с накопителем энергии СПЭНЭ-1 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 121–131. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131.
24. Чадаев А.Н., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., и др. Алгоритм расчета многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 166–179. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179.
25. Чадаев А.Н., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., и др. Оценка процесса переноса энергии в тепловом накопителе с высокотемпературным рабочим телом при его разрядке // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 4. С. 73–85. doi: 10.14529/power240409.
26. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Уткин М.О., и др. Численное моделирование нагрева теплового накопителя энергии для обогрева тепличного хозяйства // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 1(77). С. 47–53. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-47-53.
27. Li S., Sun T., Du Y., et al. Influence of moisture on heat transfer of ground heat exchangers in unsaturated soils // Renewable Energy. 2022. Vol. 193. pp. 1177–1185.
28. Liu Z., Du Y., Song C., et al. Effect of soil moisture content on thermal performance of ground source heat exchangers: An electromagnetism topology-based analysis // Energy Reports. 2023. Vol. 10. pp. 3914–3928.
29. Bazgaou A., Fatnassi H., Bouharrou R., et al. CFD modeling of the microclimate in a greenhouse using a rock bed thermal storage heating system // Horticulturae. 2023. Vol. 9. Art. 183. doi: 10.3390/horticulturae9020183.
30. Бадретдинова Г.Р., Калимуллин И.Р., Зинуров В.Э., и др. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. № 2. С. 176–186. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.

Авторы публикации

Уткин Максим Олегович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9743-7107>. 209maks@mail.ru

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» (АТПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>. ieremiada@gmail.com

Зинуров Вадим Эдуардович – канд. техн. наук, и.о. зав. кафедрой «Инженерная графика» (ИГ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>. vadd_93@mail.ru

References

1. Soussi A., Zero E., Ouammi A., et al. Smart greenhouse farming: a review towards near zero energy consumption. *Discov Cities*. 2025;2:55. doi: 10.1007/s44327-025-00096-w.
2. Teplichnaya otrasl' – 2025. APK-news.ru: site of the agro-industrial complex news of the South and the Caucasus; 28 Apr 2025. Sochi; 2025. Available at: <https://www.apk-news.ru/teplichnaya-otrasl-2025/>. Accessed: 15 Jul 2025. (In Russ.).

3. Sun W., Wei X., Zhou B., Lu C., Guo W. Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: System design and implementation. *Applied Energy*. 2022;325:119815. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119815.
4. Sokovikova A.V. Improving the energy efficiency of greenhouse heating and ventilation systems using logic controllers. *Vestn. Izhevsk. State Agric. Acad.* 2009;3–4(20–21):48–49. (In Russ.)
5. Boyacı S., Kocięcka J., Jagosz B., Atılgan A. Energy efficiency in greenhouses and comparison of energy sources used for heating. *Energies*. 2025;18(3):724. doi: 10.3390/en18030724.
6. Ahamed M.S., Guo H., Tanino K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosyst. Eng.* 2019;178:9–33. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.
7. Cuce E., Harjunowibowo D., Cuce P.M. Energy use in greenhouses in the EU: A review recommending energy-efficiency measures and renewable-energy adoption. *Applied Sciences*. 2022;12(10):5150. doi: 10.3390/app12105150.
8. Seo Y., Seo U.-J. Ground source heat pump (GSHP) systems for horticulture greenhouses adjacent to highway interchanges: A case study in South Korea // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;135:110194. doi: 10.1016/j.rser.2020.110194.
9. Prieto J., Ajnannadhif R.M., Fernández-del-Olmo P. Integration of a heating and cooling system driven by solar thermal energy and biomass for a greenhouse in Mediterranean climates. *Applied Thermal Engineering*. 2023;221:119928. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119928.
10. Huang T., Li H., Zhang G., Xu F. Experimental study on biomass heating system in the greenhouse: A case study in Xiangtan, China. *Sustainability*. 2020;12(14):5673. doi: 10.3390/su12145673.
11. Ghaderi M., Reddick C., Sorin M. A systematic heat recovery approach for designing integrated heating, cooling and ventilation systems for greenhouses. *Energies*. 2023;16(14):5493. doi: 10.3390/en16145493.
12. Nishad S., Krupa I. Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;52:102241. doi: 10.1016/j.seta.2022.102241.
13. 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. *Renewable Energy*. 2021;173:42–56. doi: 10.1016/j.renene.2021.03.120.
14. Adesanya MA, Rabi A, Ogunlowo QO, et al. Experimental evaluation of hybrid renewable and thermal energy storage systems for a net-zero energy greenhouse: A case study of Yeosu-Si. *Energies*. 2025;18(10):2635. doi: 10.3390/en18102635.
15. Zhang X, Li Y, Wang P. Thermo-economic analysis of a low-cost greenhouse thermal solar plant with seasonal energy storage. *Energy Convers. Manag.* 2023;276:116626. doi: 10.1016/j.enconman.2023.116626.
16. van der Stelt A, Rouwette N, Bloemendal J. Aquifer thermal energy storage for low-carbon greenhouse heating in the Netherlands. *Applied Energy*. 2024;331:120545. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120545.
17. Fan M, Ding Y, Liang X. Molten salts tanks thermal energy storage: aspects to consider for renewable integration. *Energies*. 2022;17(1):22. doi: 10.3390/en17010022.
18. Reimann T, Neldner K. A perspective on high-temperature heat storage using liquid metal as heat-transfer fluid. *Energy Storage*. 2023;3:e530. doi: 10.1002/est2.530.
19. Li S, Chen H, Wang J. Modeling and implementation of multilayer insulation for small-scale high-temperature thermal energy storage tank. *Int J Heat Mass Transf.* 2024;214:124567. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.124567.
20. Smolentsev N.I., Kondrin S.A. Superconducting electrokinetic energy storage for local electric networks. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017;19(3–4):53–60. (In Russ.)
21. Serdechnyi D.V., Tomashevsky Yu.B. Operational features of a multi-element lithium-ion battery-based energy storage system. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017;19(9–10):140–145. (In Russ.)
22. Fedotov A.I., Fedotov E.A., Abdullazyanov A.F. Use of electrochemical energy storage in autonomous power supply systems to reduce fuel consumption of power plants. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021;23(1):3–17. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17. (In Russ.)
23. Smolentsev N.I., Bondareva V.Yu. Results of development and experimental research of the energy storage complex with SPENE-1 energy storage. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2024;26(6):121–131. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131. (In Russ.)
24. Chadaev A.N., Dmitriev A.V., Zinurov V.E., et al. Algorithm for calculating a multilayer thermal insulation system of a thermal energy storage unit with a high-temperature working fluid. *Proceedings of the*

higher educational institutions. *ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2024;26(6):166–179. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179. (In Russ.)

25. Chadaev A.N., Dmitriev A.V., Zinurov V.E., et al. Evaluation of energy transfer in a thermal energy storage unit with high-temperature working fluid during discharge. *Bull. South Ural State Univ. Ser. Power Eng.* 2024;24(4):73–85. doi: 10.14529/power240409. (In Russ.)

26. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Utkin M.O., et al. Numerical modeling of thermal energy storage heating for greenhouse farming. *Vestn. Kazan State Agrar. Univ.* 2025;20(1(77)):47–53. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-47-53. (In Russ.)

27. Li S., Sun T., Du Y., et al. Influence of moisture on heat transfer of ground heat exchangers in unsaturated soils. *Renewable Energy*. 2022;193:1177–1185.

28. Liu Z., Du Y., Song C., et al. Effect of soil moisture content on thermal performance of ground source heat exchangers: An electromagnetism topology-based analysis. *Energy Reports*. 2023;10:3914–3928.

29. Bazgaou A., Fatnassi H., Bouharrou R., et al. CFD modeling of the microclimate in a greenhouse using a rock bed thermal storage heating system. *Horticulturae*. 2023;9:183. doi: 10.3390/horticulturae9020183.

30. Badretdinova G.R., Kalimullin I.R., Zinurov V.E., et al. Evaluation of turbulence models for external flow around a heated pipe. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2023;25(2):176–186. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186. (In Russ.)

Authors of the publication

Maksim O. Utkin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9743-7107>. 209maks@mail.ru

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>. ieremiada@gmail.com

Vadim E. Zinurov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>. vadd_93@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 18.07.2025 г.

Отредактировано 24.08.2025 г.

Принято 13.09.2025 г.