

УДК 631.225

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ ТЕПЛИЧНЫХ ХОЗЯЙСТВ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Попкова Оксана Сергеевна
Канд. техн. Наук, доцент
SPIN – код автора: 4884-0466
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Уткин Максим Олегович
Аспирант
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Атлы Виктория Салиховна
Студент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Применение возобновляемых источников энергии в агропромышленном комплексе является перспективным решением задач энергоэффективности и устойчивого развития сельского хозяйства. Одним из ключевых направлений является организация автономного отопления тепличных хозяйств, требующего стабильной температуры в круглогодичном режиме. В статье предложено численное моделирование системы отопления, состоящей из замкнутого контура с емкостью-испарителем и подземными теплообменными линиями, размещенными непосредственно под тепличными конструкциями. Для аккумуляции тепловой энергии от источников ВИЭ используется тепловой накопитель, нагревающий воду в емкости до состояния пара. Пар циркулирует, отдавая тепло грунту и обеспечивая стабильный температурный режим растений. Исследование выполнено с помощью программного комплекса SimInTech, в котором смоделированы различные режимы работы системы при температуре нагрева стенок емкости от 150 до 200 °С. Установлены зависимости давления в емкости от времени при разных температурных режимах, позволяющие определить предельные состояния для эффективного функционирования системы. Полученные результаты подтверждают техническую возможность и эффективность использования подобных систем для устойчивого и

UDC 631.225

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

NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER AND HEAT CARRIER CIRCULATION IN A GREENHOUSE HEATING SYSTEM BASED ON THERMAL ENERGY STORAGE

Popkova Oksana Sergeevna
Cand.Tech.Sci., Associate Professor
RSCI SPIN-code: 4884-0466
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Utkin Maksim Olegovich
Postgraduate student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Atly Viktoriya Salikhovna
Student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

The use of renewable energy sources in the agro-industrial complex is a promising solution to improve energy efficiency and ensure the sustainable development of agriculture. One of the key directions is the implementation of autonomous heating systems for greenhouses, which require a stable year-round temperature regime. This article presents a numerical modeling of a heating system consisting of a closed loop with an evaporator tank and underground heat exchange lines located directly beneath greenhouse structures. A thermal energy storage unit is used to accumulate heat from renewable energy sources, heating the water in the tank to steam. The steam circulates, transferring heat to the soil and maintaining a stable thermal environment for plant growth. The study was carried out using the SimInTech software, where different operating modes of the system were simulated with wall heating temperatures ranging from 150 to 200 °C. The dependence of pressure in the tank on time at various temperature modes was established, allowing determination of the limit conditions for efficient system operation. The obtained results confirm the technical feasibility and efficiency of using such systems for sustainable and autonomous greenhouse heating, leading to reduced energy consumption and increased crop yields under unstable climate conditions

автономного отопления тепличных хозяйств, обеспечивающего снижение энергозатрат и повышение урожайности в условиях нестабильного климата

Ключевые слова: ТЕПЛИЧНОЕ ХОЗЯЙСТВО, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ТЕПЛОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, SIMINTECH, ТЕПЛООБМЕН, ЦИРКУЛЯЦИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Keywords: GREENHOUSE FARMING, RENEWABLE ENERGY SOURCES, THERMAL ENERGY STORAGE, NUMERICAL MODELING, SIMINTECH, HEAT TRANSFER, HEAT CARRIER CIRCULATION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-028>

Введение. Одной из важнейших задач, стоящих сегодня перед агропромышленным комплексом, является повышение энергоэффективности технологических процессов при одновременном сокращении затрат на энергоносители. В условиях интенсивного ведения сельского хозяйства особую значимость приобретает тепличное растениеводство, поскольку оно позволяет существенно увеличить урожайность и стабилизировать поставки сельскохозяйственной продукции, нивелируя влияние климатических условий. Вместе с тем, именно тепличные комплексы отличаются высокой энергоёмкостью, связанной с необходимостью обеспечения оптимального температурного режима внутри помещений круглогодично.

Решение вопросов энергоснабжения теплиц традиционными методами требует значительных материальных затрат, поэтому актуальным становится поиск и реализация инновационных решений, позволяющих снизить себестоимость получаемой продукции. В этой связи перспективным направлением является применение аккумулирования тепловой энергии от возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Использование тепловых накопителей энергии в сочетании с современными схемами теплопередачи обеспечивает значительное снижение операционных расходов на отопление, особенно в холодные сезоны.

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/28.pdf>

Сегодня в России и за рубежом широко используются различные технические решения для аккумулирования тепловой энергии, включая жидкостные, твердотельные и фазопереходные системы. В частности, системы фазового перехода воды и водяного пара уже зарекомендовали себя как эффективные и относительно простые в технической реализации. Применение подобных решений для нужд агропромышленного комплекса представляется особенно актуальным в силу широкого распространения и простоты эксплуатации.

Сочетание систем хранения тепла и технологии замкнутых пароводяных контуров под теплицами позволяет существенно повысить энергоэффективность хозяйств, снизить экологическую нагрузку и обеспечить стабильные климатические параметры внутри тепличных конструкций [1]. Такие технологии, при условии их оптимального проектирования и численного моделирования, становятся ключевым фактором развития устойчивого сельского хозяйства в современных условиях.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Проблемы рационального использования тепловой энергии и её аккумулирования интенсивно исследуются в последние десятилетия в контексте различных отраслей, включая сельское хозяйство. Вопрос энергообеспечения тепличных комплексов стал предметом активного внимания научного сообщества, поскольку повышение эффективности теплообмена в данных системах напрямую влияет на экономические показатели предприятий агропромышленного сектора.

Современные исследования сосредоточены на создании эффективных и доступных решений для аккумулирования и использования тепла, полученного от возобновляемых источников энергии, таких как солнечная радиация, геотермальная энергия или избыточное тепло технологических процессов. Среди изучаемых вариантов особенно

выделяются тепловые аккумуляторы, использующие фазовый переход жидкость-пар, так как они сочетают высокую теплоёмкость с простотой конструкции и эксплуатации.

Несмотря на достаточную теоретическую проработку вопроса применения теплоаккумулирующих систем, практическая реализация подобных проектов в тепличном хозяйстве сталкивается с рядом нерешённых задач. Основными из них являются проблемы выбора оптимальной конструкции, режимов работы и компоновки оборудования с учётом особенностей грунтовых условий и климатических параметров региона.

В настоящее время проводится множество экспериментальных и численных исследований с целью повышения точности расчётов и определения оптимальных режимов работы подобных систем. Значительное внимание уделяется разработке эффективных численных моделей, способных прогнозировать поведение теплоносителя и фазовые превращения в реальных условиях эксплуатации тепличных хозяйств.

В то же время остаётся актуальным вопрос о создании надёжных и доступных инструментов для быстрого моделирования и предварительной оценки эффективности предложенных решений. В связи с этим особый интерес представляют программные комплексы, позволяющие оперативно осуществлять численное моделирование процессов теплопередачи в условиях, близких к реальным. Подобные программы, такие как SimInTech, дают возможность снизить трудозатраты на проектирование и повысить точность принимаемых решений, тем самым ускоряя внедрение энергоэффективных технологий в агропромышленный комплекс.

Цель исследований. Целью работы является численное исследование процессов теплопередачи и циркуляции теплоносителя в замкнутой подземной системе отопления тепличных хозяйств с использованием программного комплекса SimInTech.

Материалы и методы исследований. Численное моделирование процессов теплообмена и циркуляции теплоносителя в предложенной системе выполнено с использованием специализированного программного комплекса SimInTech (учебная версия). Данный программный продукт позволяет детально воспроизводить физические процессы в замкнутых гидродинамических и теплообменных контурах с учётом фазовых переходов жидкости в пар и обратно. SimInTech был выбран в силу своей доступности, удобного интерфейса, наглядности представления результатов и возможности гибкой настройки параметров расчёта в рамках образовательного процесса и научных исследований начального уровня.

В основу моделирования была положена схема, которая состоит из герметичной ёмкости с водой, находящейся под землёй под тепличным комплексом. К ёмкости подводится тепловая энергия от внешнего источника через стенку с заданной температурой поверхности, варьирующейся в диапазоне от 150 до 200 °С. Коэффициент теплоотдачи от нагретой поверхности задавался равным 100 Вт/(м²·°С). Такие параметры были выбраны исходя из предварительной оценки средних условий передачи тепла от типового высокотемпературного теплового накопителя энергии.

В верхней части ёмкости располагается линия теплоносителя, предназначенная для передачи тепла грунту под теплицей. Поскольку грунт является основным потребителем тепловой энергии, в модели задавались его постоянные термofизические характеристики: температура грунта принималась равной 20 °С, а коэффициент теплоотдачи от линии к грунту устанавливался на уровне 2 Вт/(м²·°С), что соответствует типичным значениям для влажного грунта в умеренном климате.

Для обеспечения циркуляции жидкости в замкнутом контуре слева предусматривался гидрозатвор, роль которого заключалась в предотвращении обратного движения конденсата и в обеспечении

стабильного круговорота воды и пара в системе. Это позволило поддерживать стабильность работы и исключить нежелательные явления, связанные с обратным движением среды и неконтролируемым падением давления в контуре.

Результаты исследований. На основе численного моделирования, проведённого в SimInTech, была получена зависимость изменения давления в ёмкости от продолжительности теплового воздействия, представленная на рисунке 1. Анализ полученных кривых позволяет выделить качественные и количественные закономерности, характеризующие поведение системы на различных режимах работы.

На начальном этапе (от 0 до 1 часа) происходит интенсивный рост давления в ёмкости, связанный с быстрым нагревом воды и началом её интенсивного испарения. Кривая давления при температуре нагрева стенки 200 °С (кривая 3) демонстрирует наиболее стремительный рост, достигая уровня в 1500 кПа всего за 1 час. При более низких температурах нагрева (175 и 150 °С – кривые 2 и 1 соответственно) этот процесс протекает медленнее и сопровождается меньшими абсолютными значениями давления в начале эксперимента.

После первого часа наблюдается постепенное замедление темпов роста давления во всех трёх исследуемых режимах. Это указывает на достижение системы состояния, близкого к равновесию, при котором поступающая от стенок ёмкости тепловая энергия частично уравнивается теплоотдачей грунту и фазовыми переходами пара обратно в жидкость в процессе его конденсации.

Через 3–4 часа наступает стабилизация давления, и все кривые выходят на плато. Для стенки, нагретой до 200 °С, давление в ёмкости стабилизируется на уровне около 1600 кПа. При нагреве стенки до 175 °С этот показатель равен примерно 850–900 кПа, а при 150 °С – порядка 450

кПа. Таким образом, наблюдается чёткая корреляция между температурой нагрева стенки и уровнем установившегося давления в ёмкости.

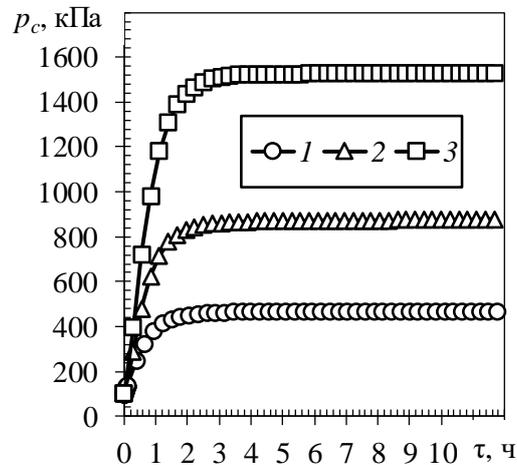


Рисунок 1 – Зависимость давления в емкости от времени при различной температуре стенки, °C: 1 – 150; 2 – 175; 3 – 200

Качественный анализ свидетельствует о высокой эффективности предложенной конструкции теплообменной системы, что позволяет достигать управляемого режима работы. Численные значения давления, достигнутые в установившемся режиме, соответствуют проектным ожиданиям и подтверждают техническую возможность стабилизации системы в широком диапазоне температур теплоносителя, что делает её перспективной для применения в тепличных комплексах различного размера и производительности.

Таким образом, проведённые численные исследования позволяют не только оценить режимы работы предложенной теплообменной системы, но и являются важным этапом для инженерного расчёта прочностных характеристик оборудования. Полученные уровни давления, достигающие значений от 450 до 1600 кПа, служат исходными данными для проектирования и подбора материалов ёмкости и трубопроводов.

Выводы. 1. На основе проведённого численного моделирования в программном комплексе SimInTech установлено, что предложенная

замкнутая система циркуляции воды и пара позволяет эффективно обеспечивать стабильное отопление грунта тепличного хозяйства. Система демонстрирует быстрое достижение равновесного состояния и стабильное поддержание необходимого уровня давления при заданных температурных условиях. 2. Выявлено, что повышение температуры стенки ёмкости с 150 до 200 °С значительно сокращает время выхода системы на стационарный режим и увеличивает равновесное давление в замкнутом контуре практически в 3 раза (с 450 до 1600 кПа). Это даёт возможность гибко управлять тепловой мощностью и адаптировать технологию к различным климатическим условиям и размерам теплиц. 3. Результаты показали, что для устойчивой работы системы принципиально важна конфигурация с гидрозатвором, исключающим нежелательное обратное течение жидкости. Использование гидрозатвора гарантирует стабильность циркуляции теплоносителя и предотвращает возникновение гидравлических ударов и перепадов давления в системе. 4. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения предложенной технологии для агропромышленного комплекса, особенно в условиях ограниченности традиционных энергетических ресурсов.

Библиографический список

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

References

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