



ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННОГО ПОДЗЕМНОГО ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА В ЗДАНИИ С НУЛЕВЫМ УГЛЕРОДНЫМ СЛЕДОМ

Султангузин И.А.¹, Чайкин В.Ю.¹, Цэрэндорж Ц.¹, Яворовский Ю.В.¹, Говорин А.В.²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²АО «САГА электроникс», г. Москва, Россия

tserendorzhT@mpei.ru, chaikinVY@mpei.ru

Резюме: ЦЕЛЬЮ данной статьи является анализ эффективности работы сезонного подземного теплового аккумулятора для обеспечения отопления жилого дома и оптимизация режимов его эксплуатации на основе экспериментальных данных 2022-2024 годов. Решение вопроса сезонности этого вида энергии позволит увеличить объёмы выработки энергии и достичь нулевого углеродного следа для энергоэффективных зданий. **ЗНАЧИМОСТЬ.** Впервые на экспериментальном уровне оценены реальные режимы работы подземного теплового аккумулятора в сочетании с плоскими солнечными коллекторами в условиях длительного холодного периода. Определен температурный предел безопасной эксплуатации теплового аккумулятора (ТА) с теплоизоляцией из XPS (83,7°C), что позволяет повысить надежность проектирования. Полученные данные использованы для адаптации и уточнения математических моделей в TRNSYS, что повышает точность прогнозирования работы системы. Практическая значимость: достижение снижения энергопотребления на отопление и ГВС до 42% по сравнению с исходным уровнем. Увеличение периода работы отопительной системы без включения теплового насоса – до 20 декабря 2024 года. Подтверждение достижимости нулевого углеродного следа для жилого дома. Возможность применения результатов при проектировании энергоэффективных зданий в условиях холодного климата. **МЕТОДЫ.** Экспериментальные измерения температур и энергопотребления оборудования в 2022-2024 гг. Математическое моделирование тепловых процессов: ANSYS Steady State Thermal – определение максимальной безопасной температуры ТА. TRNSYS – прогнозирование работы системы в зимний период. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В результате проведенных экспериментальных и расчетных исследований были осуществлены анализ и оценка данных мониторинга выработки и потребления тепловой энергии. Потребление электрической энергии на отопление и горячее водоснабжение дома за счет использования теплового насоса и солнечных коллекторов снизилось с 4420 кВт·ч в 2022 году до 3050 кВт·ч в 2023 году, т.е. на 31%, а в 2024 году снизилось до 2568 кВт·ч, т.е. на 42%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Использование сезонного подземного теплового аккумулятора и солнечных коллекторов для отопления и ГВС, в сочетании с фотоэлектрическими панелями и электрочастью для автомобиля, обеспечило достижение нулевого углеродного следа в 2023 и 2024 гг.

Ключевые слова: энергоэффективность; тепловой насос; возобновляемые источники энергии; сезонный подземный тепловой аккумулятор; солнечный коллектор.

Для цитирования: Султангузин И.А., Чайкин В.Ю., Цэрэндорж Ц., Яворовский Ю.В., Говорин А.В. Исследование сезонного подземного теплового аккумулятора в здании с нулевым углеродным следом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 141-155. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-141-155.

RESEARCH OF SEASONAL UNDERGROUND THERMAL STORAGE IN A NET-ZERO CARBON BUILDING

Sultanguzin I.A.¹, Chaikin V.Y.¹, Tsetsgee Ts.¹, Yavorovsky Y.V.¹, Govorin A.V.²

¹National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia

²SAGA Electronics JSC, Moscow, Russia

tserendorzhT@mpei.ru, chaikinVY@mpei.ru

Abstract: THE PURPOSE of this paper is to analyze the efficiency of a seasonal UTES for heating a residential building and optimize its operational modes based on experimental data from 2022-2024. Addressing the seasonality of this energy source will increase energy generation and achieve net-zero carbon for energy-efficient buildings. SIGNIFICANCE. For the first time, the actual operating modes of UTES in combination with flat-plate solar collectors have been experimentally assessed under conditions of a long cold period. The temperature limit for safe operation of the UTES with XPS thermal insulation (83.7°C) has been determined, which allows for increased design reliability. The data obtained has been used to adapt and refine mathematical models in TRNSYS, improving the accuracy of system operation prediction. Practical significance: achieving a reduction in energy consumption for heating and hot water supply of up to 42% compared to the baseline. Extension of the heating system operation period without turning on the heat pump – until December 20, 2024. Confirmation of the achievability of net-zero carbon for individual building. Potential application of the results in the design of energy-efficient buildings in cold climates. METHODS. Experimental measurements of equipment temperatures and energy consumption in 2022-2024. Mathematical modeling of thermal processes: ANSYS Steady State Thermal – determination of the maximum safe temperature of the heating system. TRNSYS – forecasting system performance in winter. RESULTS. The experimental and computational study enabled comprehensive analysis and evaluation of thermal energy production and consumption monitoring data. The integrated heat pump and solar collector installation yielded substantial energy conservation: Electricity consumption for the heat supply system of building, thanks to the use of a heat pump and solar collectors, decreased from 4420 kWh in 2022 to 3050 kWh in 2023, i.e. by 31%, and in 2024 decreased to 2568 kWh, i.e. by 42%. CONCLUSION. The use of a UTES and solar collectors for the heat supply system, in combination with photovoltaic panels and electric car charging, ensured the achievement net-zero carbon in 2023 and 2024.

Keywords: energy efficiency; heat pump; renewable energy; seasonal underground thermal energy storage; solar collector.

For citation: Sultanguzin I.A., Chaikin V.Y., Tsetsgee Ts., Yavorovsky Y.V., Govorin A.V. Research of seasonal underground thermal storage in a net-zero carbon building. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (1): 141-155. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-141-155.

Введение (Introduction)

На данный момент, в мире наблюдается рост популярности строительства энергоэффективных домов. В связи с увеличением применения возобновляемых источников энергии возникает необходимость в исследованиях, направленных на повышение энергоэффективности зданий. Солнечные коллекторы являются одной из наиболее востребованных технологий для использования солнечной энергии. Значимость проблемы обусловлена тем, что зимой потребность в тепле возрастает, тогда как интенсивность солнечной радиации снижается. Для решения задачи сезонного накопления тепловой энергии и эффективного использования солнечной энергии применяется подземный тепловой аккумулятор. Популярной в строительстве остается концепция пассивного дома, для которой характерен показатель удельного теплопотребления на отопление менее 15 кВт·ч/(м²·год). Для достижения более высокой эффективности и снижения теплопотребления до нуля используются ВИЭ¹. В России нет зданий, отвечающих всем требованиям стандартов пассивного дома [1, 2] из-за сурового климата. Тем не менее, методы и основные принципы, заложенные в основу их конструкции, уже используются для строительства энергоэффективных домов.

Основным источником отопления рассматриваемого здания является грунтовый тепловой насос (ТН), совместно с ним работают солнечные коллекторы и сезонный подземный тепловой аккумулятор. Производство тепловой энергии в солнечных коллекторах зависит от времени суток, погодных условий и времени года. Преимущество комбинированных систем, объединяющих солнечные коллекторы и тепловые насосы, заключается в их признании как экологически безопасных и энергоэффективных технологий, обеспечивающих теплоснабжение и охлаждение зданий.

Сезонный подземный тепловой аккумулятор может служить эффективным

¹Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов

решением проблемы неравномерного производства тепловой энергии солнечными коллекторами. Выделяют два основных подхода к сезонному аккумулированию тепла и холода: с использованием теплового аккумулятора [3] и льдоаккумулятора [4]. Основное преимущество льдоаккумулятора заключается в том, что он может накапливать значительно больше энергии, чем обычные теплоаккумуляторы, за счет использования теплоты фазового перехода из воды в лед и обратно. Оба варианта расположены под землей и нагреваются за счет СК. В исследованиях [5, 6] показаны преимущества варианта с подземным ТА. Это позволяет использовать теплоту воды, нагретой до температуры (от 25 до 85°C), для отопления дома в осенний период. Работа льдоаккумулятора осуществляется только совместно с тепловым насосом. Это связано с тем, что температура внутри емкости опускается до 0 градусов используя скрытую теплоту кристаллизации.

В последние годы для запасаения тепла в системах солнечной энергетики всё шире используются материалы с фазовым переходом. Такой подход позволяет значительно увеличить ёмкость теплоаккумуляторов, что делает их особенно эффективными при сезонном накоплении тепловой энергии [7, 8].

Цель данного исследования – оценить возможность применения сезонного подземного теплового аккумулятора в системе отопления здания. Это требует комплексного подхода, включающего модернизацию инженерных систем, интеграцию возобновляемых источников энергии и организацию подземного хранения тепла. Анализ литературы показывает, что большинство работ посвящено теоретическому и компьютерному моделированию таких систем, тогда как экспериментальных исследований режимов их работы существенно меньше. Основной проблемой солнечной энергии является её неравномерное распределение: максимум солнечной радиации приходится на летние месяцы при высоком тепловом спросе зимой. Для устранения этого дисбаланса необходим сезонный подземный тепловой аккумулятор. В ряде исследований [9, 10] рассматриваются различные технологии сезонного накопления тепла, включая подземные тепловые аккумуляторы, водоносные горизонты и скважинные аккумуляторы, которые могут применяться в системах централизованного теплоснабжения [11, 12]. Наибольший интерес для нас представляют системы сезонного накопления тепловой энергии для отдельного здания [13, 14]. В исследовании [15], проведён сравнительный анализ потребностей в тепле для отопления, а также рассчитаны и проанализированы критические параметры площади солнечного коллектора и ёмкости аккумулирования при условии 100%-ной доли солнечной энергии. Были определены величины объемов хранения с использованием различных технологий хранения тепла, включая сезонный подземный ТА, различные термохимические способы с использованием различных материалов.

В России с её холодным климатом важно улучшать эффективность теплоснабжения зданий. Для этого нужно провести всесторонний анализ, который поможет уменьшить влияние фактора сезонности при применении солнечной энергии. Солнечная энергия в сочетании с сезонным аккумулированием тепла может существенно покрыть тепловые потребности зданий в таких условиях. В статье [16] описана солнечная тепловая система с подземным водным аккумулятором тепла объемом 36 м³, используемым для сезонного накопления тепла. Солнечная тепловая система обеспечивает отопление помещений и горячее водоснабжение для энергоэффективного двухэтажного дома в Оттаве, Канада.

Объектом исследования является дом с сезонным аккумулятором тепловой энергии в Московской области [5]. СК выступают ключевым источником теплоснабжения в энергоэффективных домах. В весенне-летние месяцы солнечные коллекторы производят энергии значительно больше, чем требуется дому в течение дня. Следовательно, важно обеспечить эффективное аккумулирование избыточной энергии для ее долгосрочного хранения и последующего применения совместно с тепловыми насосами в холодный осенне-зимний сезон.

Энергетический баланс здания формализуется посредством следующих уравнений:

$$Q_{\text{Приток}} = Q_{\text{Сумм}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{Приток}} = Q_{\text{СК}} + Q_{\text{ТН}} + Q_{\text{ТВ}} - Q_{\text{Пот}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{Сумм}} = Q_{\text{Отоп}} + Q_{\text{Вент}} + Q_{\text{ГВС}} \quad (3)$$

где поступление тепловой энергии равно $Q_{\text{Приток}}$, используется на суммарное потребление тепла $Q_{\text{Сумм}}$ и тепловые потери в сезонном ТА $Q_{\text{Пот}}$, $Q_{\text{Приток}}$ включает в себя

$Q_{СК}$ – тепло от солнечных коллекторов, поступающее непосредственно в дом, тепловую энергию от теплового насоса $Q_{ТН}$, внутреннее тепловыделение $Q_{ТВ}$. Потребление тепловой энергии включает в себя отопительную нагрузку $Q_{Омон}$, тепловую вентиляционную нагрузку $Q_{Вент}$ и горячее водоснабжение $Q_{ГВС}$.

Дальнейшие исследования направлены на уменьшение расхода тепловой энергии, получаемой от теплового насоса. Сезонный подземный теплоаккумулятор включается в уже существующую систему отопления здания. Теплообеспечение осуществляется геотермальным тепловым насосом, который связывается с установленным в теплоаккумуляторе теплообменником (рис. 1). Это позволяет дольше и эффективнее использовать тепловую энергию, получаемую от солнечного источника.

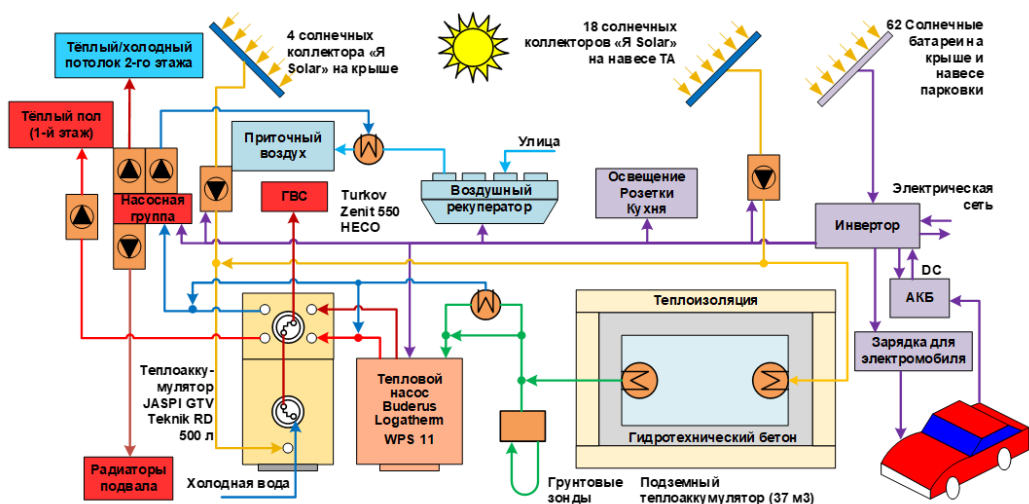


Рис. 1. Схема энергоснабжения дома с сезонным подземным тепловым аккумулятором *Fig. 1. House energy supply scheme with seasonal thermal energy storage*

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

В исследовании [17] потери тепла в надземных и подземных коммуникациях составляют 6%, а потери энергии от ТА в землю в течение года составляют примерно 48% по фактическим данным. Таким образом, эффективность использования тепловой энергии подземного ТА составляет около 46%. Для уточнения этих данных требуются дополнительные расчетные и экспериментальные исследования.

Схема энергоснабжения энергоэффективного дома представлена на рисунке 1. Теплоснабжение здания функционирует в зависимости от времени года. Электроэнергия поступает из двух ключевых источников: из электросети и от 62 солнечных фотоэлектрических панелей, установленных на крыше и навесе, суммарной мощностью 22,14 кВт. Избыточная энергия направляется обратно в сеть для реализации. ГВС обеспечивается за счет использования бака емкостью 500 литров, а также при необходимости электрическим бойлером. Летом охлаждение дома осуществляется с помощью вертикальных подземных скважин теплового насоса, без использования компрессора.

Для четырех сезонов года предусмотрены соответствующие режимы функционирования системы теплоснабжения здания, представленной на рисунке 1. Далее приведены характеристики каждого режима.

1. Весенний режим

В весенний период тепловая энергия, генерируемая от солнечных коллекторов на крыше и частично от наземных СК, направляется напрямую для теплоснабжения здания. В солнечные дни ТН отключен, а избыточная солнечная энергия от наземных СК направляется в подземный ТА.

2. Летний режим

Солнечная энергия от СК направляется для нагрева ТА на протяжении всего летнего сезона. ГВС в солнечные дни покрывается от СК на крыше, электрический бойлер в это время не работает. Летом вода в подземном ТА нагревается до максимальной температуры. Охлаждение дома в жаркие дни осуществляется с помощью

циркуляционного насоса, подающего охлажденный теплоноситель из подземных скважин. Компрессор ТН в это время также не работает.

3. Осенний режим

Осенью тепловая энергия из ТА поступает в бак объемом 500 литров, а затем используется для теплоснабжения дома. В солнечные дни тепловая энергия от СК напрямую подается в дом. ТН в это время не работает. ТН включается, когда температура воды в ТА снижается до 21-22°C.

4. Зимний режим

ТН начинает работать на отопление дома при температуре воды в ТА ниже 21°C, забирая тепло из ТА. Когда температура в ТА опускается ниже 7°C, происходит переключение ТН с ТА на грунтовые зонды.

Одной из задач данной работы является исследование возможности поступления тепла от подземного ТА непосредственно в дом. В этом режиме тепловой насос не используется.

Ключевой задачей при исследовании режимов работы является определение условий достижения максимальной температуры в теплоаккумуляторе и управление функционированием системы аккумулирования тепла при высоких температурах. В летний период температура внутри теплоаккумулятора значительно повышается, а её чрезмерное увеличение может вызвать деградацию теплоизоляционных свойств конструкции.

Численное и физическое экспериментальное исследование сезонного подземного теплового аккумулятора

Все данные, представленные в статье, получены в результате экспериментов на энергоэффективном доме площадью 200 м², расположенном в Московской области. Для обеспечения работы оборудования в системе теплоснабжения объекта применялись системы управления и мониторинга [18]. Эти системы в режиме реального времени анализируют температуры в системе отопления и оптимизируют режимы работы оборудования. В системах мониторинга данные о температурах, расходах теплоносителя и тепловой мощности собираются в течение длительного периода времени.

Здание дополнительно утеплено, что уменьшает нагрузку на отопление, вентиляцию и кондиционирование. При его возведении применялись принципы пассивного дома, а планировка была разработана с использованием программного обеспечения РНПП [1, 2]. В РНПП создана математическая модель, определившая удельное годовое потребление тепла в размере 37 кВт·ч/(м²·год). Полученные данные позволили повысить энергоэффективность здания.

На рисунке 1 представлена схема объекта, которая в процессе эксплуатации была дополнена оборудованием для улучшения энергоэффективности.

Сезонный подземный теплоаккумулятор размещен на расстоянии 7 метров от здания (рис. 2). В качестве образца для тепловой схемы с теплоаккумулятором использовался пассивный дом в Ирландии [3]. В публикациях [18, 19] представлен подробный обзор современных теплоизоляционных материалов, применяемых в системах хранения тепловой энергии.

На основе анализа данных работ в качестве теплоизоляционных материалов для сезонных подземных ТА по соотношению цена-качество были выбраны экструдированный пенополистирол (XPS) и полиизоцианурат (PIR) [5, 6].

ТА был изготовлен из гидротехнического бетона с толщиной теплоизоляции от 500 до 600 мм. Сезонный подземный теплоаккумулятор состоит из трёх основных элементов: крыши, стен и дна. Дно изолировано слоем толщиной 550 мм, включающим 500 мм XPS и 50 мм PIR-плиты. Стены утеплены на 500 мм, где 400 мм представлены XPS, а по 50 мм составляют внутренний и наружный слой PIR. Крыша оснащена утеплением толщиной 600 мм, состоящим из 500 мм XPS и двух 50-миллиметровых слоев PIR.

Термическое сопротивление стен ТА достигает 16,2 (м²·К)/Вт (табл. 1), термическое сопротивление дна составляет 17,0 (м²·К)/Вт, а для потолка 19,15 (м²·К)/Вт. Объем сезонного подземного ТА составляет 37 м³ (рис. 2).

В некоторых работах, используется аналитический метод расчета сезонного подземного теплового аккумулятора в виде шара, но для более сложных конструкций сезонных подземных ТА с теплоизоляцией обычно применяют компьютерное моделирование [12, 20].

Расчетный параметр стены ТА
Design parameter of TES's envelope

Материалы	λ (теплопроводность),	R (тепловое сопротивление),	Толщина мм
	Вт/(м·К)	(м ² ·К)/Вт	
Бетон	2.04	0.12	200
Пенополиизоцианурат PIR-PIRRO	0.023	4.34	100
Экструдированный пенополистирол. URSA XPS N-III	0.034	11.76	400
ИТОГ		16.21	700

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

Солнечную энергию эффективнее всего производить в СК с вакуумными трубками для получения высокой температуры теплоносителя. Однако проблемой сезонного хранения тепловой энергии являются теплопотери. Эти потери могут быть уменьшены за счет хранения теплоносителя с низкой температурой, но в этом случае рекомендуется использовать тепловой насос для получения температуры в соответствии с потребностями системы отопления. С помощью программы TRNSYS можно разработать динамическую модель энергетической системы [20].

В данной работе рассматривается возможность использования сезонного подземного теплового аккумулятора в сочетании с системой плоских СК для обеспечения эффективной работы рассматриваемой системы в течение всего года с применением подхода жизненного цикла.



Рис. 2. Процесс монтажа сезонного подземного ТА Fig. 2. Installation process of a TES device

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

Подземный ТА для хранения тепла был смоделирован с помощью Steady State Thermal в программном обеспечении Ansys, в результате чего была определена максимально возможная температура нагрева воды в ТА. В качестве основного теплоизоляционного материала планировалось применение экструдированного пенополистирола (XPS), максимальная температура которого не должна превышать 75°C из-за риска деформации и выделения вредных веществ. Расчеты продемонстрировали, что применение PIR-плиты с максимальной температурой эксплуатации 120°C толщиной 50 мм, примыкающей к бетону, обеспечивает возможность повышения температуры воды в сезонном подземном ТА до 83°C без разрушения полистирола XPS (рис. 3).

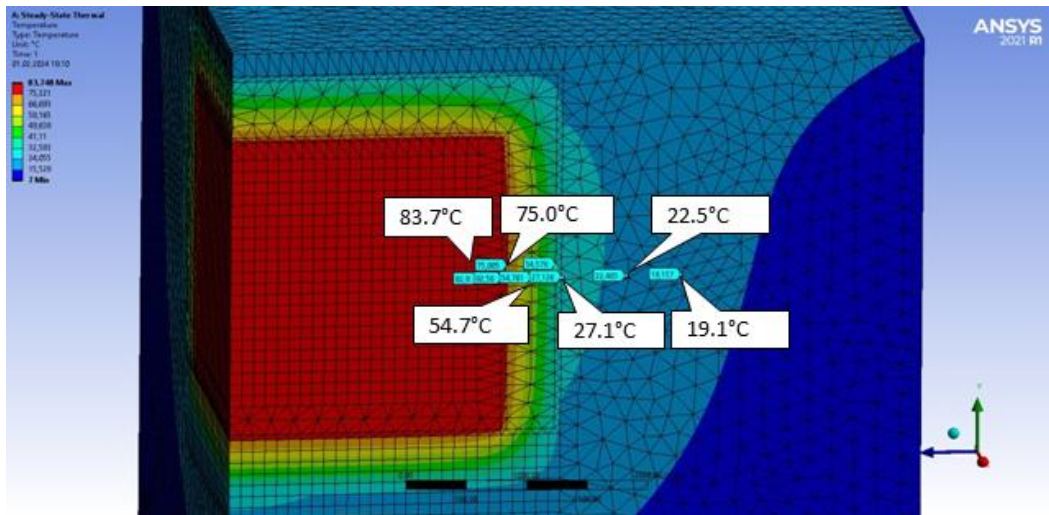


Рис. 3. Моделирование подземного теплового аккумулятора на расчетную температуру воды
 Fig. 3. Modeling of TES for the calculated water temperature
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Система мониторинга и управления энергообеспечением здания

Система управления зданием (Building Management System) используется для автоматизации процессов в современных зданиях. В системах отопления, вентиляции и кондиционирования она позволяет экономить тепло и электроэнергию благодаря круглосуточному контролю параметров внутри помещений с учётом факторов, таких как присутствие людей, использование бытовой техники, освещения и инсоляции. В работах [18, 23] дается подробное объяснение системы мониторинга «ПолиТЭР» и управления «ZOND» здания.

В течение длительного периода времени в сезонном ТА проводился постоянный мониторинг различных параметров с последующим анализом.

На рисунке 4 представлена копия экрана программы мониторинга «ПолиТЭР» на 23 сентября 2024 года с фиксацией мгновенных значений температур воды в системе подземного ТА и наземных СК, температур внутри теплоизоляции над ТА и в боковой его части, а также температур грунта на различных расстояниях от ТА. Видно, что температура воды в ТА достигла уровня 75,6°C.

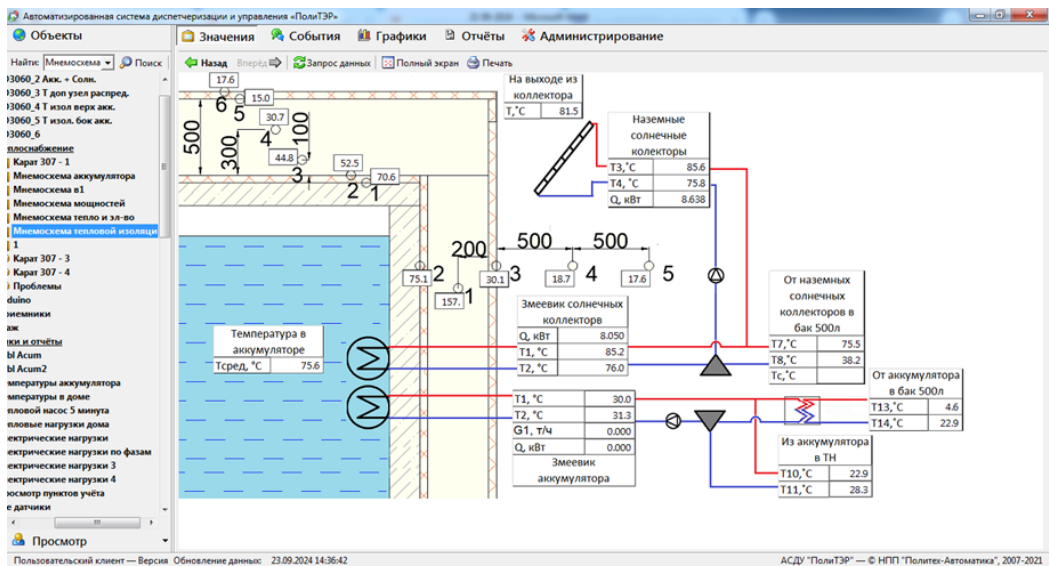


Рис. 4. Мониторинг параметров подземного ТА в программе ПолиТЭР
 Fig. 4. Monitoring of TES parameters in the PolyTER program
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты эксперимента (Results)

Метеостанция MISOL WS-2310-1 расположена на крыше исследуемого дома, а метеоданные, непрерывно измеряемые в течение трех лет, представлены на рисунке 5. В работе [23] описаны результаты измерений метеостанции.

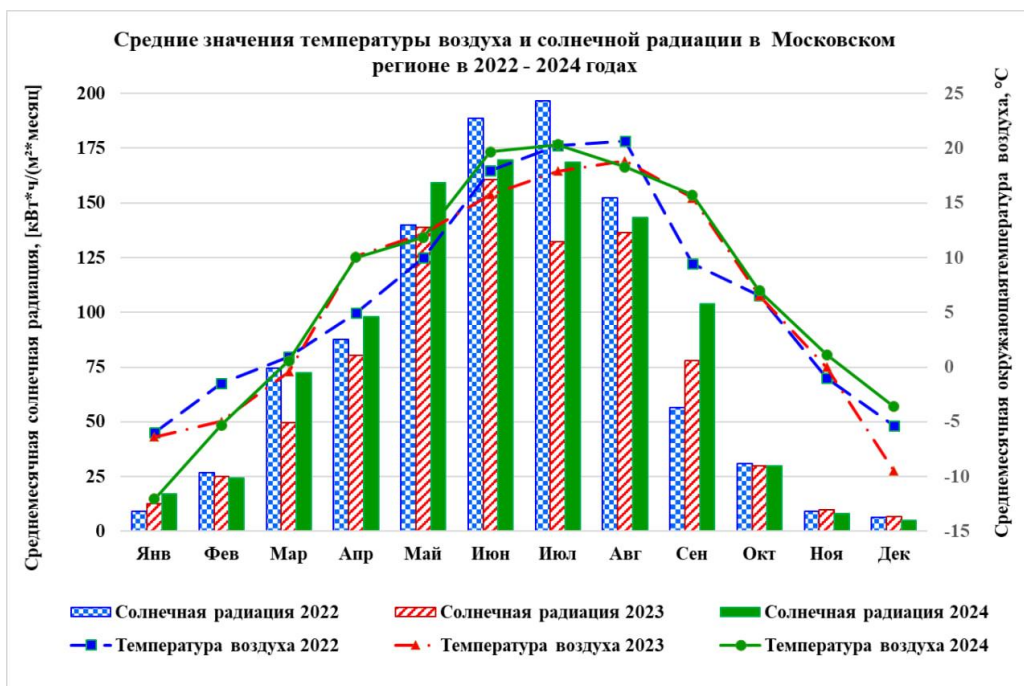


Рис. 5. График солнечной радиации и наружной радиации Fig. 5. Graph of solar radiation and outdoor radiation

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

На графике (рис. 6) представлены сравнительные данные о температуре внутри подземного теплового аккумулятора. Расчеты, проведенные с помощью программного обеспечения TRNSYS показали, что максимальная температура воды в подземном ТА в 2022 году составляла 72°C [18]. В 2022 году (пунктирная линия) в тестовом режиме было залито 27 м³ воды. В этот период максимальная температура составляла 73°C.

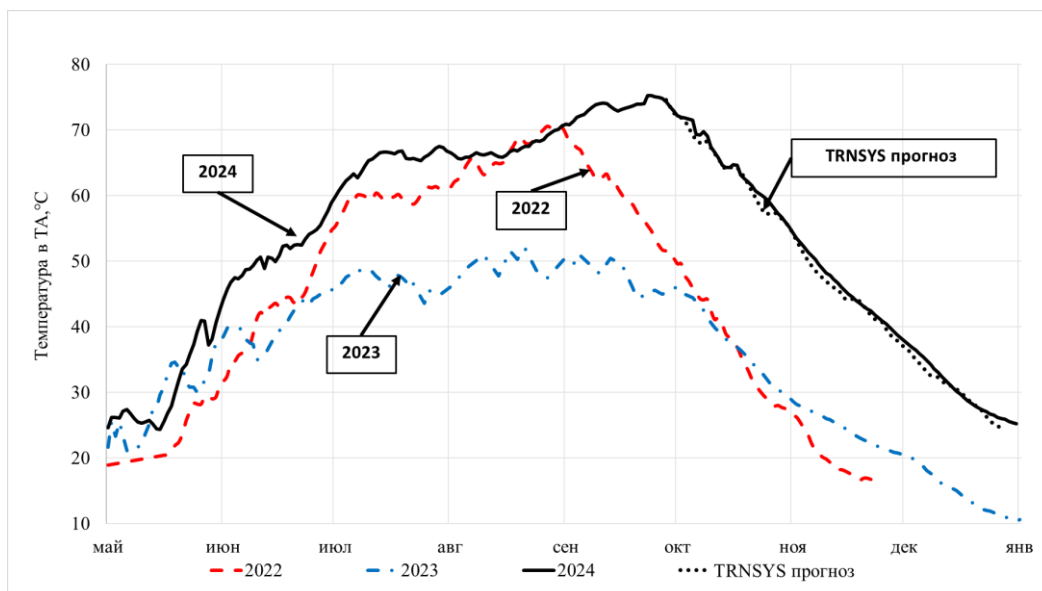


Рис. 6. Сравнение температуры в сезонном подземном тепловом аккумуляторе 2022-2024 Fig. 6. Comparison temperature in TES 2022-2024

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

В конце 2022 года были обнаружены утечки воды из-за недостаточной гидроизоляции. В апреле 2023 года была выполнена гидроизоляция с использованием Репреcrete и мастики Task-R. После этого в подземный теплоаккумулятор было залито 35 м³ воды. В течение 2023 года максимальная температура достигла лишь 52°C, что связано с продолжительным ремонтом теплоаккумулятора. Для расчёта температуры в аккумуляторе в программе TRNSYS были использованы данные о выработке тепловой энергии на СК из системы мониторинга, а также информация о тепловых нагрузках за

2021 год, что позволило смоделировать тепловую нагрузку и вычислить количество энергии, потребляемой для отопления дома напрямую из ТА.

В мае 2024 года было дополнительно установлено шесть СК Яsolar, объём воды был увеличен до 37 м³ в ТА. До середины июля температура в ёмкости росла и достигла 65°C, а к концу сентября достигла максимальной температуры 75.6°C (рис. 6). Расчеты в программе TRNSYS показали, что прогноз значений температуры воды в ТА составит 25°C к 25 декабря 2024 года, что обеспечит отопление дома от подземного ТА до этой даты без использования теплового насоса. Расчеты в TRNSYS проводились на основе фактических данных, полученных в системе мониторинга «ПолиТЭР» к концу сентября 2024 года. Моделирование осуществлялось с 1 октября до конца 2024 года с учетом прогнозной тепловой нагрузки дома, полученной усреднением данных 2020 и 2021 годов, когда не было подземного ТА (рис. 6). При сравнении графиков смоделированной температуры и реальных показателей разница составила в среднем 0,7°C. В 2024 году благодаря большей температуре в сезонном тепловом аккумуляторе, он смог использоваться в качестве источника тепла до 24 декабря, сократив использование ТН для отопления.

На рисунке 7 и в таблице 2 показано потребление различных видов энергии на отопление и ГВС с 2022 по 2024 год. Тепловая энергия, полученная от солнца для зарядки ТА в 2024 году, составила 11215 кВт·ч, в 2023 году – 6633 кВт·ч, а в 2022 году – 5900 кВт·ч.

Разница обусловлена тем, что в сентябре 2023 года потребление солнечной энергии на зарядку сезонного ТА было существенно выше вследствие повышенных значений солнечной радиации в данный период (рис. 5). В то же время рост выработки тепловой энергии в 2024 году объясняется увеличением числа солнечных коллекторов.

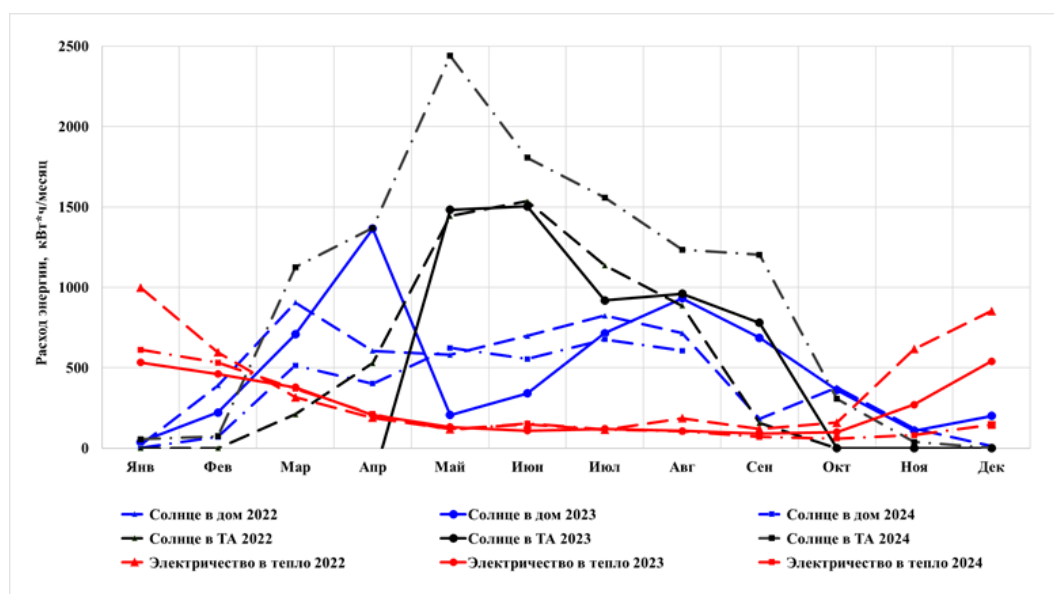


Рис. 7. Потребление электроэнергии на отопление и использование солнечной энергии для сезонного подземного теплового аккумулятора и жилого дома

Fig. 7. Electricity consumption for heating and solar energy use for the UTES and building

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

В результате установки дополнительных шести солнечных коллекторов в мае 2024 года накопленная в ТА солнечная энергия достигла 2440 кВт, что больше на 1000 кВт по сравнению с 2022 и 2023 годами.

В 2023 году дом получил 4477 кВт·ч солнечного тепла, что меньше значения 2022 года (5436 кВт·ч). Снижение объясняется тем, что в начале 2022 года солнечная энергия подавалась напрямую на отопление, тогда как в 2023 году – преимущественно на сушку теплоаккумулятора. В 2024 году объём солнечного тепла, поступающего в дом, ещё больше уменьшился из-за перераспределения тепловых потоков в пользу подземного аккумулятора. При этом накопленная солнечная энергия использовалась для отопления дома в октябре-ноябре 2022 года и в октябре–декабре 2023 и 2024 годов. Как видно из рисунка 7 и таблицы 2, использование электрической энергии для системы отопления дома в осенний период снизилось на 31% с 4420 кВт·ч в 2022 году до 3050 кВт·ч в 2023

году, и еще на 42% до 2568 кВт·ч в 2024 году.

Это связано с более эффективным использованием СК совместно с ТА и большей запасенной энергией. Потребление электроэнергии на ТН, электрический нагреватель и насосную группу, обслуживающую ТА, снизилось до 3050 кВт·ч в 2023 году с 5840 кВт·ч в 2021 году, что представляет собой сокращение на 48%. В осенний отопительный период 2024 года было потрачено всего 357 кВт·ч электрической энергии, что на 64% меньше, чем 1005 кВт·ч в 2023 году. Такое сокращение связано с тем, что подземный ТА повышает эффективность системы в осенне-зимний период.

В величину общего потребления электроэнергии входят расход электроэнергии на инженерные системы и бытовые нужды [21]. Инженерные системы включают в себя тепловые насосы, подогреватели, оборудование тепловых аккумуляторов, устройства для зарядки электромобилей. Двухнаправленный счётчик измеряет как потребление электроэнергии из сети, так и передачу лишней электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими панелями, обратно в сеть.

Таблица 2

Table 2

Потребление электроэнергии на отопление и солнечной энергии в ТА и в доме, кВт·ч

Electricity consumption for heating and solar energy to TES and to Home

Месяц	Солнце в дом			Солнце в ТА			Электроэнергия на отопление		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024
Янв	18	10	2	0	22	56	999	533	611
Фев	389	78	70	0	67	74	596	461	531
Мар	906	266	514	211	310	1126	317	378	369
Апр	605	572	401	529	587	1369	189	206	211
Май	581	206	623	1444	1483	2440	119	131	113
Июн	699	341	555	1536	1504	1807	149	109	153
Июл	824	716	677	1137	920	1559	115	120	117
Авг	716	932	607	887	960	1234	186	108	105
Сен	184	687	542	156	780	1203	120	92	70
Окт	378	361	283	0	0	306	160	101	60
Ноя	122	108	359	0	0	39	617	270	82
Дек	14	201	323	0	0	2	853	540	145
Год	5436	4477	4955	5900	6633	11215	4420	3050	2568

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

В 2021 году, до внедрения ТА, расход электроэнергии на ТН составил 4200 кВт·ч, а на электрический бойлер – 850 кВт·ч. При исключении из расчётов теплоступлений от солнечных коллекторов на крыше, составляющих в среднем 2370 кВт·ч, аналогичный объём тепловой энергии может быть выработан тепловым насосом с коэффициентом трансформации 3. В этом случае тепловой насос дополнительно потребит 790 кВт·ч электрической энергии. Таким образом, при невозможности применения возобновляемых источников энергии для целей отопления потребуется приобрести 5840 кВт·ч электроэнергии (4200 + 850 + 790). Следовательно, затраты на электроэнергию возрастут на 3272 кВт·ч по сравнению с вариантом использования солнечных коллекторов и теплоаккумулятора.

Установка и эксплуатация сезонного подземного теплоаккумулятора (ТА) объёмом 37 м³ совместно с 12 наземными солнечными коллекторами (СК) рассматриваются как один из этапов на пути к достижению углеродной нейтральности здания. В рамках реализации концепции нулевого углеродного следа дополнительно на крыше были установлены 4 плоских солнечных коллектора и 30 фотоэлектрических панелей общей электрической мощностью 11,9 кВт (рис. 8), включая 10 модулей Delta BST-360, 10 модулей Delta BST-380 и 10 модулей Delta BST-450. Кроме того, был смонтирован навес с 32 фотоэлектрическими панелями Delta BST-320 электрической мощностью 10,24 кВт, оснащённый зарядной станцией для электромобиля Volkswagen ID.4. На его зарядку, при пробеге 6,0 тыс. км в период с июня по декабрь 2023 года, было израсходовано 1,3 МВт·ч солнечной электроэнергии [22].

Согласно данным системы мониторинга «ПолиТЭР», в 2023 году потребление электроэнергии домом составило 8,7 МВт·ч, при этом генерация солнечной

электростанции достигла 17,4 МВт·ч. Из внешней сети было получено 7,9 МВт·ч, тогда как в сеть было передано 15,0 МВт·ч. В результате проведенного в 2023 году эксперимента установлено, что объём сэкономленной электроэнергии по сравнению с типовым домом, возведённым в соответствии с действующими нормативными требованиями к теплозащите, составил 35 МВт·ч. Таким образом, суммарное сокращение выбросов парниковых газов для данного дома оценивается примерно в 14,9 тонн CO₂ в год.

Полученные результаты подтверждают, что солнечная энергия может рассматриваться как основной источник теплового и электрического энергоснабжения жилого дома и электромобиля, обеспечивая комфортное проживание и удовлетворение транспортных потребностей населения при одновременном достижении нулевого углеродного следа в условиях холодного климата на протяжении большей части года [21, 22].



Рис. 8. Сезонный подземный тепловой аккумулятор с солнечными коллекторами (справа), солнечными панелями на навесе для электромобилей (слева) и на крыше (в центре)

Fig. 8. TES with solar collectors (right), PV solar panels on the EV carport (left) and on the roof (center)

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

Заключение (Conclusion)

В данном исследовании рассмотрены режимы работы сезонного подземного теплового аккумулятора для обеспечения отопления и ГВС в доме в период 2022-2024 годов. В 2024 году температура воды в ТА достигла максимального значения 75,6°C. Запасенная энергия использовалась для работы системы отопления до 20-ого декабря. Эксперимент подтвердил результаты моделирования. Значения, полученные в ходе эксперимента, свидетельствуют о высокой эффективности сезонного ТА и плоских солнечных коллекторов. На основании проведенных исследований, в мае 2024 года было установлено шесть дополнительных наземных солнечных коллекторов, что повысило эффективность работы системы и позволило увеличить период зимней эксплуатации оборудования без использования теплового насоса.

С помощью модуля Steady State Thermal программного обеспечения ANSYS было определено, что максимальная температура воды грунтового теплового аккумулятора не должна превышать 83,7°C, чтобы не разрушить теплоизоляционный материал полистирол XPS.

Потребление электрической энергии на отопление и горячее водоснабжение дома за счет использования теплового насоса и солнечных коллекторов снизилось с 4420 кВт·ч в 2022 году до 3050 кВт·ч в 2023 году, то есть на 31%, а в 2024 году снизилось до 2568 кВт·ч, то есть на 42% по сравнению с 2022 годом.

Расчеты в программе TRNSYS показали, что прогнозируемая температура воды в ТА составит 22°C к 20 декабря. Это позволит осуществлять отопление дома с использованием подземного ТА без необходимости включения теплового насоса до указанной даты. Полученные экспериментальные данные позволят уточнить математические модели, построенные в программе TRNSYS. Использование сезонного подземного ТА и наземных СК для отопления дома и ГВС вместе с солнечными панелями, электромобилем и электрической зарядкой позволило достичь нулевого углеродного следа.

Литература

1. Sultanguzin I.A., Kalyakin I.D., Govorin A.V., Khristenko B.A., Yavorovsky Y.V., “Optimization of the energy efficient active house”, in Digests of Conference 3. INGENIUERTAG 2016. Der Fakultat Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Osteuropatag. neseff-netzwerktreffen 2016. pp. 8-12 November 2016.
2. Hill B., “Passive house development in Russia”, in the III World Summit Smart Energy Russia, March 2019, Moscow. 95 p.
3. Clarke J., Colclough S., Griffiths P., McLeskey Jr.J.T., A passive house with seasonal solar energy store: in situ data and numerical modelling // International Journal of Ambient Energy. 2014. Vol. 35. Pp. 37-50.
4. Carbonell D., Philippen D., Haller M.Y., Frank E. “Development and validation of mathematical model for ice storages with heat exchangers that can be de-iced”, ISES Solar World Congress. 2013. Pp. 2342 – 2352.
5. Султангузин И.А., Христенко Б.А., Чайкин В.Ю., Яцюк Т.В., Кругликов Д.А., Яворовский Ю.В., Нечаев А.Н., Скоробатюк А.В. Сезонный аккумулятор теплоты и холода для системы энергоснабжения здания // Журнал СОК, № 3, 2021. С. 44 – 50.
6. Sultanguzin I., Alimgazin A., Chaikin V., Yatsyuk T., Nechaev A. and Skorobatyuk A., “Research and Development of Seasonal Heat and Ice Storage for Energy Supply System of Building”, AIP Conference Proceedings 2650, 030027 (2022); 22 November 2022.
7. Dolgun G. K., Keçebaş A., Ertürk M., and Daşdemir A. “Optimal insulation of underground spherical tanks for seasonal thermal energy storage applications”, Journal of Energy Storage, vol. 69, 1 October 2023, 107865.
8. Hua W., Xin Lv., Zhang X., Ji Zh., and Zhu J. “Research progress of seasonal thermal energy storage technology based on supercooled phase change materials”, Journal of Energy Storage, vol. 67, 1 September 2023, 107378.
9. Dahash A., Ochs F., Janetti M. B., and Streicher W. “Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems”, Applied Energy, vol. 239, 1, pp. 296-315, April 2019.
10. Mahon H., O'Connor D., Friedrich D., and Hughes B. “A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops”, Energy, vol. 239, Part C, 15 January 2022, 122207.
11. Luo Y., Cui D., Hu L., Ochs F., Tosatto A., Xu G., Tian Zh., Dahash A., Yu J., Yuan G., Chen Y., Wang D., Liu Y., and Fan J. “Semi-analytical modeling of large-scale water tank for seasonal thermal storage applications”, Energy and Buildings, vol. 278, 1 January 2023, 112620.
12. Xu G., Hu L., Luo Y., Tian Zh., Deng J., Yuan G., and Fan J. “Numerical modeling and parametric analysis of thermal performance for the large-scale seasonal thermal energy storage”, Energy and Buildings, vol. 275, 15 November 2022, 112459.
13. Beausoleil-Morrison I., Kemery B., Wills A. D., and Meister C. “Design and simulated performance of a solar-thermal system employing seasonal storage for providing the majority of space heating and domestic hot water heating needs to a single-family house in a cold climate”, Solar Energy, Volume 191, October 2019, pp. 57-69.
14. Xu B., Zhang T., Wang S., and Chen Zh. “Dynamic characteristics and energy efficiency evaluation of a novel solar seasonal thermal storage - heating system”, Appl. Therm. Eng., vol. 234, 5 November 2023, 121223.
15. Ma Z., Bao H., Roskilly A.P., “Feasibility study of seasonal solar thermal energy storage in domestic dwellings in the UK. Solar Energy”, vol. 162, 489–499. 2018.
16. C Meister C., and Beausoleil-Morrison I. “Experimental and modelled performance of a building-scale solar thermal system with seasonal storage water tank”, Solar Energy, vol. 222, pp. 145-159, 1 July 2021.
17. Чайкин В.Ю., Шайхеева А.Р., Султангузин И.А., Яворовский Ю.В., Скоробатюк А.В., Нечаев А.Н. Тепловая изоляция коммуникаций подземного аккумулятора теплоты // Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием «Энерго-сбережение - теория и практика». Москва, НИУ «МЭИ», 10 – 14 октября 2022 г., М.: ООО Центр полиграфических услуг «Радуга», 2022. – С. 52-56.
18. Chaikin V.Y., Tssetgee Ts., Dakkah B. Bo., Sultanguzin I.A., Yavorovsky Yu.V., Nechaev A.N.. “Annual cycle of a seasonal heat accumulator of thermal energy of an energy-efficient house”, Pro-ceedings of the 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022, Moscow, March 16-18, 2023. 5 p.
19. Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J. “A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems”, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 109, pp. 71 – 84, 2019.

20. Pintanel M.T., Martínez-Gracia A., Uche J., del Amo A., Bayod-Rújula Á.A., Usón S., and Arauzo I. “Energy and environmental benefits of an integrated solar photovoltaic and thermal hybrid, seasonal storage and heat pump system for social housing”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 213, August 2022, 118662.

21. Султангузин И.А., Говорин А.В., Яцюк Т.В., Калякин И.Д., Яворовский Ю.В., Чайкин В.Ю., Бу Дакка Б., Цэцгээ Ц. Достижение нулевого углеродного следа в единой системе «энергоэффективный дом – электромобиль». Часть 1. // Энергосбережение. - 2024. - № 5. –С. 16-22.

22. Султангузин И.А., Говорин А.В., Яцюк Т.В., Калякин И.Д., Яворовский Ю.В., Чайкин В.Ю., Бу Дакка Б., Цэцгээ Ц. Достижение нулевого углеродного следа в единой системе «энергоэффективный дом – электромобиль». Часть 2. // Энергосбережение. - 2024. - № 6. –С. 54-58.

23. Султангузин И. А., Чайкин В. Ю., Яворовский Ю. В., Цэрэндорж Ц., Калякин И. Д., Говорин А. В., Скоробатюк А. В. Система солнечного электроснабжения дома с нулевым углеродным следом // Энергосбережение. – 2025. – № 2. – С. 12-29.

Авторы публикации

Султангузин Ильдар Айдарович – д-р техн. наук, профессор кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>. SultanguzinIA@mpei.ru

Чайкин Владислав Юрьевич – ассистент и аспирант кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-1320-124>. vlad@imarh.ru

Цэрэндорж Цэцгээ – ассистент и аспирант кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>. tserendorzhT@mpei.ru

Яворовский Юрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-5741-8385>. yavorovskyyv@yandex.ru

Говорин Александр Владимирович – советник генерального директора АО «САГА электроникс», г. Москва, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0001-0328-9466>. a.govorin@mail.ru

References

1. Sultanguzin I.A., Kalyakin I.D., Govorin A.V., Khristenko B.A., Yavorovsky Y.V., “Optimization of the energy efficient active house”, in *Digests of Conference 3. INGENIUERTAG 2016*. Der Fakultat Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Osteuropatag. neseff-netzwerktreffen 2016. pp. 8-12, November 2016.

2. Hill B., “Passive house development in Russia”, in the III World Summit Smart Energy Russia, March 2019, Moscow. 95 p.

3. Clarke J., Colclough S., Griffiths P., McLeskey Jr.J.T., A passive house with seasonal solar energy store: in situ data and numerical modelling // *International Journal of Ambient Energy*. 2014. Vol. 35. Pp. 37-50.

4. Carbonell D., Philippen D., Haller M.Y., Frank E. “Development and validation of mathematical model for ice storages with heat exchangers that can be de-iced”, *ISES Solar World Congress*. 2013. Pp. 2342 – 2352.

5. Sultanguzin I.A., Khristenko B.A., Chaikin V.Yu., Yatsyuk T.V., Kruglikov D.A., Yavorovsky Yu.V., Nechaev A.N., Skorobatiuk A.V. Seasonal heat and cold accumulator for the energy supply system of a building // *SOK Magazine*, No. 3, 2021. pp. 44 – 50. (In Russ)

6. Sultanguzin I., Alimgazin A., Chaikin V., Yatsyuk T., Nechaev A. and Skorobatyuk A., “Research and Development of Seasonal Heat and Ice Storage for Energy Supply System of Building”, *AIP Conference Proceedings* 2650, 030027 (2022); 22 November 2022.

7. Dolgun G. K., Keçebaş A., Ertürk M., and Daşdemir A. “Optimal insulation of underground spherical tanks for seasonal thermal energy storage applications”, *Journal of Energy Storage*, vol. 69, 1 October 2023, 107865.

8. Hua W., Xin Lv., Zhang X., Ji Zh., and Zhu J. “Research progress of seasonal thermal energy storage technology based on supercooled phase change materials”, *Journal of Energy Storage*, vol. 67, 1 September 2023, 107378.

9. Dahash A., Ochs F., Janetti M. B., and Streicher W. “Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems”, *Applied Energy*, vol. 239, 1, pp. 296-315, April 2019.
10. Mahon H., O'Connor D., Friedrich D., and Hughes B. “A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops”, *Energy*, vol. 239, Part C, 15 January 2022, 122207.
11. Luo Y., Cui D., Hu L., Ochs F., Tosatto A., Xu G., Tian Zh., Dahash A., Yu J., Yuan G., Chen Y., Wang D., Liu Y., and Fan J. “Semi-analytical modeling of large-scale water tank for seasonal thermal storage applications”, *Energy and Buildings*, vol. 278, 1 January 2023, 112620.
12. Xu G., Hu L., Luo Y., Tian Zh., Deng J., Yuan G., and Fan J. “Numerical modeling and parametric analysis of thermal performance for the large-scale seasonal thermal energy storage”, *Energy and Buildings*, vol. 275, 15 November 2022, 112459.
13. Beausoleil-Morrison I., Kemery B., Wills A. D., and Meister C. “Design and simulated performance of a solar-thermal system employing seasonal storage for providing the majority of space heating and domestic hot water heating needs to a single-family house in a cold climate”, *Solar Energy*, Volume 191, October 2019, pp. 57-69.
14. Xu B., Zhang T., Wang S., and Chen Zh. “Dynamic characteristics and energy efficiency evaluation of a novel solar seasonal thermal storage - heating system”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 234, 5 November 2023, 121223.
15. Ma Z., Bao H., Roskilly A.P., “Feasibility study of seasonal solar thermal energy storage in domestic dwellings in the UK. *Solar Energy*”, vol. 162, 489–499. 2018.
16. Meister C., and Beausoleil-Morrison I. “Experimental and modelled performance of a building-scale solar thermal system with seasonal storage water tank”, *Solar Energy*, vol. 222, pp. 145-159, 1 July 2021.
17. Chaikin V.Yu., Shaikheeva A.R., Sultanguzin I.A., Yavorovsky Yu.V., Skorobatiuk A.V., Nechaev A.N. Thermal insulation of communications of an underground heat accumulator // Proceedings of the Eleventh All-Russian Conference with International Participation “Energy Saving - Theory and Practice”. Moscow, National Research University "MPEI", October 10 - 14, 2022, M.: LLC Center for Printing Services "Raduga", 2022. - P. 52-56. (In Russ)
18. Chaikin V.Y., Tssetsgee Ts., Dakkah B. Bo, Sultanguzin I.A., Yavorovsky Yu.V., Nechaev A.N. “Annual cycle of a seasonal heat accumulator of thermal energy of an energy-efficient house”, Pro-ceedings of the 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022, Moscow, March 16-18, 2023. 5 p.
19. Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J. “A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 109, pp. 71 – 84, 2019.
20. Pintanel M.T., Martínez-Gracia A., Uche J., del Amo A., Bayod-Rújula Á.A., Usón S., and Arauzo I. “Energy and environmental benefits of an integrated solar photovoltaic and thermal hybrid, seasonal storage and heat pump system for social housing”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 213, August 2022, 118662.
21. Sultanguzin I.A., Govorin A.V., Yatsyuk T.V., Kalyakin I.D., Yavorovsky Yu.V., Chaikin V.Yu., Bu Dakka B., Tssetsgee Ts. Achieving a net-zero carbon in a single system “energy efficient house – electric vehicle”. Part 1. // Energy saving. - 2024. - No. 5. – P. 16-22. (In Russ)
22. Sultanguzin I.A., Govorin A.V., Yatsyuk T.V., Kalyakin I.D., Yavorovsky Yu.V., Chaikin V.Yu., Bu Dakka B., Tssetsgee Ts. Achieving a net-zero carbon in a single system “energy efficient house – electric vehicle”. Part 2. // Energy saving. - 2024. - No. 6. – P. 54-58. (In Russ)
23. Sultanguzin I. A., Chaikin V. Yu., Yavorovsky Yu. V., Tserendorj Ts., Kalyakin I. D., Govorin A. V., Skorobatyuk A. V. Solar power supply system for a house with net-zero carbon // Energy Saving. - 2025. - No. 2. - 12-29 P. (In Russ)

Authors of the publication

Ildar A. Sultanguzin – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>. SultanguzinIA@mpei.ru

Vladislav Y. Chaikin – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-1320-124>. vlad@imarh.ru

Tssetsgee Tserendorj – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>. tserendorzhT@mpei.ru

Yury V. Yavorovsky – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,

© Султангузин И.А., Чайкин В.Ю., Цэрэндорж Ц., Яворовский Ю.В., Говорин А.В.

Moscow, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5741-8385>. yavorovskyyv@yandex.ru

Aleksandr V. Govorin – SAGA Electronics JSC, Moscow, Russia. ORCID*:
<https://orcid.org/0009-0001-0328-9466>. a.govorin@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **01.12.2025 г.**

Отредактировано **24.12.2025 г.**

Принято **12.01.2026 г.**