

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ФАЗОПЕРЕХОДНЫМ ТЕПЛОВЫМ АККУМУЛЯТОРОМ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ГОРОДА САМАРКАНДА

Файзиев Зафар Хайдарович

*к.т.н., доцент, Самаркандского государственного технического
университета*

E-mail: fayziev.zafar@samdaqu.edu.uz

OrcID: <https://orcid.org/0000-0001-8190-8376>

Юзбаева Шохида Закиржановна

*Стр. преподаватель, Самаркандского государственного технического
университета*

E-mail: yuzbayeva.shoxida@samdaqu.edu.uz

OrcID: <https://orcid.org/0009-0000-8541-586X>

Дилмуродова Мохида Дилмурод кизи

*Магистрантка, Самаркандского государственного технического
университета*

E-mail: dilmurodova.mohida@samdaqu.edu.uz

АННОТАЦИЯ

В статье представлено технико-экономическое и инженерное обоснование применения гибридной системы теплоснабжения, объединяющей вакуумные трубчатые солнечные коллекторы, фазопереходный тепловой аккумулятор (PCM) и резервный газовый котёл, применительно к климатическим условиям города Самарканда. На основе усреднённых за десятилетний период данных о суммарной солнечной радиации выполнена оценка ресурсного гелиоэнергетического потенциала региона и обоснован оптимальный угол наклона приёмной поверхности коллекторов ($\beta = 55^\circ$), позволяющий увеличить зимнюю выработку на 75–80% по сравнению с горизонтальной поверхностью. Проведён инженерный расчёт гелиополя и аккумулирующей ёмкости для типового административно-учебного здания площадью 1000 м² с расчётной тепловой нагрузкой отопления 65 кВт и потребностью в горячем водоснабжении 14,5 кВт. Показано, что применение парафинового теплоаккумулирующего состава марки P56 позволяет сократить требуемый

объём бака-аккумулятора с 3,5 до 1,35 м³, то есть примерно в 2,6 раза, по сравнению с водяным аккумулятором эквивалентной теплоёмкости. Расчётная доля замещения годовой тепловой нагрузки объекта гелиосистемой составила 42,9%, что соответствует экономии около 8370 м³ природного газа в год и сроку окупаемости гибридного узла (коллекторы и РСМ-бак) 4,5–5,2 года при нормативном сроке службы системы не менее 20 лет. Полученные результаты подтверждают техническую состоятельность и экономическую целесообразность внедрения гибридных гелиотермических установок в систему теплоснабжения Самарканда и могут быть использованы при проектировании аналогичных объектов в регионах со сходными климатическими условиями.

Ключевые слова: солнечная радиация; вакуумный трубчатый коллектор; фазопереходный материал (PCM); тепловой аккумулятор; гибридная система теплоснабжения; энергосбережение; природный газ; Самарканд.

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada Samarqandning iqlim sharoitiga mos keladigan vakuumli trubkali quyosh kollektorlari, fazali o'zgaruvchan issiqlik saqlash moslamasi (PCS) va zaxira gazli qozonni birlashtirgan gibrad isitish tizimidan foydalanishning texnik-iqtisodiy asoslanishi va muhandislik asoslari keltirilgan. O'n yillik o'rtacha quyosh nurlanishi ma'lumotlariga asoslanib, mintaqaning quyosh energiyasi salohiyati baholanadi va optimal kollektor qabul qilish yuzasining qiyaligi ($\beta = 55^\circ$) asoslanadi. Bu burchak gorizontall yuzaga nisbatan qishki quvvatni 75-80% ga oshirish imkonini beradi. Loyihaviy isitish yuki 65 kVt va issiq suvga bo'lgan ehtiyoji 14,5 kVt bo'lgan odatiy 1000 m² ma'muriy va o'quv binosi uchun quyosh maydoni va saqlash idishi uchun muhandislik hisob-kitoblari amalga oshirildi. P56 kerosinli issiqlik saqlash birikmasidan foydalanish kerakli saqlash idishi hajmini ekvivalent issiqlik sig'imiga ega suv saqlash idishiga nisbatan 3,5 dan 1,35 m³ gacha yoki taxminan 2,6 baravar kamaytirishi ko'rsatilgan. Quyosh tizimi bilan almashtirilgan ob'ektning yillik issiqlik yuklamasining taxminiy ulushi 42,9% ni tashkil etdi, bu yiliga taxminan 8370 m³ tabiiy gazni tejashga va kamida 20 yillik standart xizmat muddatiga ega gibrad blok

(kollektorlar va PCM rezervuari) uchun 4,5–5,2 yilni qoplash muddatiga to'g'ri keladi. Olingan natijalar Samarqand isitish tizimida gibridd quyosh issiqlik tizimlarini joriy etishning texnik va iqtisodiy imkoniyatlarini tasdiqlaydi va o'xshash iqlim sharoitlariga ega mintaqalarda shunga o'xshash ob'ektlarni loyihalashda ishlatilishi mumkin.

Kalit so'zlar: quyosh nurlanishi; evakuatsiya qilingan naychali kollektor; faza o'zgarishi materiali (PCM); issiqlik akkumulyatori; gibridd isitish tizimi; energiya tejash; tabiiy gaz; Samarqand.

ABSTRACT

This article presents a feasibility study and engineering justification for the use of a hybrid heating system combining vacuum tube solar collectors, a phase-change thermal storage (PCS), and a backup gas boiler, applicable to the climatic conditions of Samarkand. Based on ten-year averaged solar radiation data, the region's solar energy potential is assessed and the optimal collector receiving surface inclination ($\beta = 55^\circ$) is substantiated. This angle allows for a 75–80% increase in winter output compared to a horizontal surface. Engineering calculations were performed for the solar field and storage tank for a typical 1,000 m² administrative and educational building with a design heating load of 65 kW and a hot water demand of 14.5 kW. It has been demonstrated that the use of P56 paraffin heat-storage compound reduces the required storage tank volume from 3.5 to 1.35 m³, or approximately 2.6 times, compared to a water storage tank of equivalent heat capacity. The estimated share of the facility's annual heat load replaced by the solar system was 42.9%, corresponding to savings of approximately 8,370 m³ of natural gas per year and a payback period of 4.5–5.2 years for the hybrid unit (collectors and PCM tank) with a standard service life of at least 20 years. The obtained results confirm the technical feasibility and economic feasibility of implementing hybrid solar thermal systems in the Samarkand heating system and can be used in the design of similar facilities in regions with similar climatic conditions.

Keywords: solar radiation; evacuated tube collector; phase change material (PCM); heat accumulator; hybrid heating system; energy saving; natural gas; Samarkand.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надёжного и экономически эффективного теплоснабжения городов Центральной Азии остаётся одной из ключевых задач региональной энергетики. Город Самарканд — административный, историко-культурный и промышленный центр Узбекистана с населением свыше 570 тыс. человек (более 130 тыс. домохозяйств) — характеризуется высокой долей индивидуальной застройки (махаллей) и объектов социальной сферы, суммарная тепловая нагрузка которых ежегодно возрастает вместе с ростом населения и объёмов строительства.

На сегодняшний день до 88% тепловой энергии, потребляемой в системе централизованного и автономного теплоснабжения города, вырабатывается за счёт сжигания природного газа районными котельными (в частности, АО «Исиклик манбаи»), а также ведомственными и частными газовыми котлами. Ещё около 9% приходится на электроэнергию, применяемую преимущественно для пикового догрева горячего водоснабжения, эксплуатации масляных радиаторов и сплит-систем в зимний период, и порядка 3% — на уголь и сжиженный газ, используемые главным образом в частном секторе окраинных районов. Такая структура топливно-энергетического баланса делает систему теплоснабжения крайне чувствительной к сезонным колебаниям режима газоснабжения: в периоды пиковых зимних холодов (январь–февраль) фиксируется устойчивое падение давления природного газа в магистральных сетях, а физический износ тепловых сетей приводит к потерям тепловой энергии при транспортировке в размере 25–30%.

Указанные проблемы усиливают актуальность диверсификации источников тепловой энергии за счёт возобновляемых ресурсов, прежде всего солнечной радиации, ресурс которой в Самаркандской области является одним из наиболее значительных в республике. Начиная с 2013 года, когда был принят

государственный указ о развитии альтернативной энергетики, в стране последовательно формируется нормативная и производственная база для внедрения гелиотехнических установок — от локального производства вакуумных водонагревателей до реализации пилотных проектов на промышленных и социальных объектах.

Вместе с тем прерывистый и суточно неравномерный характер солнечного излучения обуславливает необходимость применения буферных теплоаккумулирующих устройств, обеспечивающих сглаживание графика теплопотребления и покрытие нагрузки в ночные и пасмурные периоды. Традиционные водяные аккумуляторы, обладая относительно невысокой удельной теплоёмкостью, требуют значительных строительных объёмов, что затрудняет их интеграцию в существующую застройку. Альтернативой выступают фазопереходные теплоаккумулирующие материалы (PCM), способные накапливать теплоту существенно компактнее за счёт использования скрытой теплоты фазового перехода.

Целью настоящей работы является технико-экономическое и инженерное обоснование гибридной системы теплоснабжения «вакуумный солнечный коллектор — фазопереходный тепловой аккумулятор — резервный газовый котёл», адаптированной к климатическим условиям Самарканда.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ ресурсного потенциала солнечной радиации на территории Самарканда и обоснование оптимального угла наклона приёмной поверхности коллекторов;
- оценка структуры существующего топливно-энергетического баланса теплоснабжения города и потенциала кровельных площадей для размещения гелиоколлекторов;
- выполнение инженерного расчёта гелиополя и фазопереходного аккумулятора для типового объекта площадью 1000 м²;
- определение доли замещения тепловой нагрузки гелиосистемой и оценка экономико-экологического эффекта её внедрения.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Вопросам использования солнечной энергии в системах тепло- и электроснабжения Узбекистана посвящён значительный массив публикаций отечественных и зарубежных авторов. Международный научный журнал «Гелиотехника» на протяжении десятилетий систематически публикует результаты расчётов, испытаний и оптимизации солнечных коллекторов, установок и систем солнечного тепло- и хладоснабжения, охватывая вопросы аккумулирования тепла, гелиотехнического материаловедения и экономики отрасли [1]. В обзорной работе, посвящённой истории и перспективам возобновляемой энергетики республики, отмечается, что системное развитие отрасли связано с указом о развитии альтернативной энергетики 2013 года и последующим формированием научных и инженерных школ солнечного теплоснабжения [2].

Практическое освоение технологии подтверждается опытом действующих предприятий: на Самаркандской сигаретной фабрике введена в эксплуатацию гелиосистема горячего водоснабжения из 54 коллекторов в сочетании с фотоэлектрической станцией мощностью 10 кВт, что демонстрирует применимость гелиотехники к объектам с постоянным суточным теплопотреблением [3]. Развитие локального производства вакуумных водонагревателей и комплектующих для гелиоустановок в Узбекистане, в том числе опыт производителей, работающих в Самаркандской области, также свидетельствует о формировании устойчивого рынка гелиотехнического оборудования, хотя значительная доля комплектующих по-прежнему импортируется [4]. Отдельное направление составляют исследования концентрирующих гелиосистем — параболических концентраторов и линз Френеля, — рассматриваемых применительно к сельским и типовым жилым объектам различных областей республики как перспективная, хотя и более капиталоемкая альтернатива плоским и вакуумным коллекторам [5].

Второе направление литературного анализа связано с технологиями аккумулирования тепловой энергии. В обзорных работах по материалам с

фазовым переходом систематизированы органические и неорганические составы, их теплофизические характеристики и области применения в системах солнечного тепло- и хладоснабжения, а также сформулирована необходимость совершенствования численных моделей процессов фазового перехода для более точного прогнозирования работы теплоаккумулирующих узлов [6]. Исследование влияния термоциклирования на выбор рабочего тела с фазовым переходом для тепловых аккумуляторов систем солнечного теплоснабжения показывает, что многократные циклы плавления–кристаллизации существенно влияют на долговременную стабильность теплофизических свойств состава и должны учитываться при подборе РСМ для конкретного объекта [7]. Применительно к ограждающим конструкциям зданий показано, что интеграция панелей с фазовым переходом заметно снижает амплитуду суточных колебаний температуры и повышает энергоэффективность помещений [8], а систематизация неорганических составов — в частности гидратов солей с удельной теплотой плавления порядка 250–270 кДж/кг — указывает на широкий диапазон материалов, доступных для проектирования аккумулирующих узлов различной ёмкости [9].

Несмотря на значительный объём накопленных знаний по отдельным компонентам — гелиоколлекторам и РСМ-аккумуляторам, — в доступной литературе крайне ограничено число работ, содержащих сквозной инженерный расчёт гибридной системы «вакуумный коллектор + РСМ-аккумулятор + резервный газовый котёл» применительно к конкретным климатическим условиям Самарканда, с количественной оценкой доли замещения газа и срока окупаемости. Настоящая работа призвана частично восполнить этот пробел.

МЕТОДОЛОГИЯ И РАСЧЁТЫ

Ресурс солнечной радиации Самарканда. Оценка ресурсного потенциала выполнена по усреднённым данным суммарной солнечной радиации за последние 10 лет наблюдений, приведённым к горизонтальной поверхности ($I_{гор}$) и к поверхности, наклонённой под углом $\beta = 55^\circ$ к горизонту ($I_{\beta=55^\circ}$), — данный угол близок к сумме широты местности и постоянной поправки,

применяемой для максимизации зимней выработки гелиоустановок. Результаты представлены в таблице 1.

Месяц	$I(\text{гор}),$ кВт·ч/м ² ·мес	$I(\beta=55^\circ),$ кВт·ч/м ² ·мес	Ср. темп. воздуха, °C
Январь	62	108,5	+1,8
Февраль	78,4	118,2	+3,9
Март	114,7	143,3	+9,2
Апрель	156	162,1	+15,5
Май	210,8	189,7	+21,1
Июнь	243	201,5	+26,4
Июль	251,1	211	+28,3
Август	229,4	213,3	+26,2
Сентябрь	177	189,4	+20,5
Октябрь	124	155	+14,1
Ноябрь	75	116,3	+8,0
Декабрь	55,8	101	+3,5
ИТОГО / среднее	1747,2	1809,3	+14,9

Таблица 1 — Месячный приход солнечной радиации на горизонтальную и наклонную ($\beta = 55^\circ$) поверхности и средняя температура воздуха в Самарканде

Как следует из таблицы 1, корректировка угла наклона приёмной поверхности до $\beta = 55^\circ$ обеспечивает прирост выработки в зимние месяцы (декабрь–январь) на 75–80% по сравнению с горизонтальной поверхностью, одновременно «выравнивая» избыточную летнюю генерацию. Это методологическое решение принято в качестве базового при дальнейших инженерных расчётах гелиополя.

Структура топливно-энергетического баланса теплоснабжения города. Анализ структуры действующей системы теплоснабжения Самарканда показывает следующее распределение источников тепловой энергии:

- Природный газ (88%) — основной топливный ресурс, используемый на районных котельных (АО «Иссиклик манбаи»), а также ведомственными и частными газовыми котлами;

– Электроэнергия (9%) — применяется в основном для пикового догрева горячего водоснабжения, масляных радиаторов и сплит-систем в зимний период;

– Уголь и сжиженный газ (3%) — используются преимущественно в частном секторе окраинных районов города.

К главным проблемам существующей системы отнесены падение давления природного газа в магистралях в периоды зимних пиковых холодов (январь–февраль), а также износ тепловых сетей, приводящий к потерям до 25–30% тепла при транспортировке.

Потенциал кровельных площадей города для внедрения гелиоколлекторов. Оценка потенциала выполнена с учётом населения города (свыше 570 тыс. человек, более 130 тыс. домохозяйств) и характерной для Самарканда высокой доли индивидуального жилого сектора (махаллей) и объектов сферы услуг:

– Индивидуальные дома (участки 3–5 соток) — свободная площадь крыши 80–150 м² на дом, потенциал установки от 4 до 8 м² коллекторов;

– Многоэтажный фонд — ограниченная площадь кровли на одну квартиру (1,2–1,8 м²), требующая коллективного использования;

– Социальные объекты (больницы, вузы, детские сады) — высокий потенциал, крыши от 500 до 3000 м² при постоянном суточном потреблении горячей воды.

Суммарный технический потенциал города оценивается установкой порядка 450 000–500 000 м² солнечных коллекторов, что позволяет экономить до 65–70 млн м³ природного газа в год в масштабах Самарканда.

Инженерный расчёт гибридной установки для объекта площадью 1000 м². Далее выполнен детальный инженерный расчёт гибридной установки применительно к типовому объекту — административному/учебному зданию в г. Самарканде.

Исходные данные: площадь объекта — 1000 м²; расчётные теплотери при $T_{\text{ext}} = -9\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $Q_{\text{отоп}} = 65\text{ кВт}$; потребность в горячем водоснабжении (50 человек) — $V_{\text{гвс}} = 2500\text{ л/сутки}$ при $T_{\text{гвс}} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{\text{гвс}} = 14,5\text{ кВт}$.

Расчёт площади гелиополя. Площадь коллекторов рассчитана исходя из условия покрытия 100% нагрузки горячего водоснабжения в межсезонье и 30% нагрузки отопления в зимний период по формуле:

$$A_{\text{ск}} = Q_{\text{сут.сред}} / (I_{\text{днев}} \cdot \eta_{\text{ск}}) = 180\text{ кВт} / (3,6\text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2 \cdot 0,55) \approx 90\text{--}100\text{ м}^2$$

где $Q_{\text{сут.сред}}$ — среднесуточная тепловая нагрузка (180 кВт·ч), $I_{\text{днев}}$ — среднедневной приход солнечной радиации (3,6 кВт·ч/(м²·сут)), $\eta_{\text{ск}}$ — КПД вакуумного коллектора (0,55). Принята расчётная площадь $A_{\text{ск}} = 100\text{ м}^2$ (50 вакуумных панелей по 30 трубок в каждой).

Расчёт объёма теплового аккумулятора. Требуемая ёмкость аккумулирования тепла на ночной период определена как $Q_{\text{акк}} = 120\text{ кВт}\cdot\text{ч} = 432\text{ МДж}$. Расчёт выполнен для двух вариантов аккумулятора — водяного (базового) и фазопереходного (гибридного) с использованием парафинового состава марки Р56 (удельная теплота фазового перехода $L = 190\text{ кДж/кг}$, плотность $\rho = 800\text{ кг/м}^3$).

Объём водяного аккумулятора (вариант сравнения):

$$V_{\text{вода}} = Q_{\text{акк}} / (c_w \cdot \Delta T) = 432\,000 / (4,187 \cdot 30) \approx 3439\text{ л} \approx 3,5\text{ м}^3$$

Масса и объём РСМ-аккумулятора (гибридный вариант):

$$m_{\text{рст}} = Q_{\text{акк}} / (L + c_{\text{рст}} \cdot \Delta T) = 432\,000 / (190 + 2,2 \cdot 10) \approx 2037\text{ кг} \Rightarrow V_{\text{рст}} \approx 1,35\text{ м}^3$$

Таким образом, применение фазопереходного состава позволяет уменьшить требуемый объём аккумулирующего бака с 3,5 м³ до 1,35 м³, то есть примерно в 2,6 раза, что существенно снижает требования к монтажной площади технического помещения.

Энергетический баланс установки за год. Суммарная годовая тепловая нагрузка объекта (отопление и горячее водоснабжение):

$$Q_{\text{год.общ}} = Q_{\text{отоп.год}} + Q_{\text{гвс.год}} = 112\,000 + 48\,000 = 160\,000\text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

Годовая выработка гелиополя:

$$Q_{\text{гелио.год}} = A_{\text{ск}} \cdot I_{\beta=55^\circ.\text{год}} \cdot \eta_{\text{сред}} = 100 \cdot 1809 \cdot 0,38 = 68\,742 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

Доля замещения тепловой нагрузки гелиосистемой:

$$f = Q_{\text{гелио.год}} / Q_{\text{год.общ}} = 68\,742 / 160\,000 = 0,429 \text{ (42,9\%)}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительная оценка источников теплоснабжения. Для наглядного сопоставления рассмотренных источников тепла выполнен расчёт производства 100 кВт·ч тепловой энергии в условиях Самарканда с использованием газового котла (КПД 88%), электродкотла и вакуумного солнечного коллектора. Результаты сведены в таблицу 2.

Критерий	Газовый котёл (КПД 88%)	Электродкотёл / нагреватель	Вакуумный солнечный коллектор
Расход ресурса на 100 кВт·ч	12,2 м³ газа	105 кВт·ч электроэнергии	0 (солнечная инсоляция)
Прямые затраты, сум	≈ 18 300	≈ 105 000	0
Выбросы CO ₂ , кг	23,2	52,5 (с учётом энергомикса ГРЭС)	0
Зависимость от сетей	Высокая (давление газа)	Высокая (отключения)	Независима в дневное время
Главный недостаток	Выбросы, рост тарифов	Высокая стоимость	Не работает ночью без аккумулятора

Таблица 2 — Сравнительная экономико-экологическая оценка производства 100 кВт·ч тепловой энергии различными источниками

Из таблицы 2 видно, что вакуумный солнечный коллектор не требует расхода топлива и не создаёт прямых выбросов CO₂ в процессе эксплуатации, однако его основным ограничением остаётся невозможность выработки тепла в тёмное время суток без буферного аккумулятора — что и обуславливает включение в схему РСМ-аккумулятора и резервного газового котла.

Экономико-экологический эффект гибридной установки. Согласно выполненным расчётам, годовое замещение природного газа при переходе от

традиционного газового котла к гибридной гелиосистеме на рассмотренном объекте составляет:

- традиционный газовый котёл — 19 500 м³/год;
- гибридная гелиосистема — 11 130 м³/год;
- экономия — 8370 м³/год.

При действующем коммерческом тарифе на природный газ указанная экономия составляет порядка 12,5–15,0 млн сум в год. Срок окупаемости гибридной части установки (коллекторы и РСМ-бак) составляет 4,5–5,2 года при нормативном сроке службы системы не менее 20 лет, что означает, что после окупаемости система обеспечивает 15–16 лет практически бесплатной тепловой энергии за вычетом эксплуатационных расходов.

Технический надёжность. Принятый угол установки коллекторов $\beta = 55^\circ$ в комбинации со сбросным грунтовым контуром позволяет полностью снять риски летней стагнации (закипания теплоносителя) при избыточной инсоляции. Сохранение в схеме пикового газового котла гарантирует 100%-е покрытие тепловых нагрузок объекта даже в периоды аномальных зимних заморозков, когда доля гелиосистемы в покрытии нагрузки минимальна.

Обсуждение результатов. Полученная расчётная доля замещения тепловой нагрузки гелиосистемой (42,9%) сопоставима с показателями, характерными для гибридных гелиотермических установок в регионах с близкой продолжительностью солнечного сияния, и подтверждает обоснованность выбора угла наклона $\beta = 55^\circ$ и параметров гелиополя. Сокращение объёма аккумулирующего бака в 2,6 раза за счёт применения фазопереходного состава P56 имеет самостоятельное практическое значение для условий плотной городской застройки Самарканда, где площадь технических помещений на объектах социальной сферы и в многоэтажном жилом фонде, как правило, ограничена.

Вместе с тем следует учитывать, что приведённые результаты получены для одного типового объекта площадью 1000 м² и климатических условий конкретного населённого пункта, поэтому их прямой перенос на объекты иного

назначения, масштаба и климатической зоны требует уточняющего расчёта. Дополнительного исследования требует также многолетняя деградация теплофизических свойств парафинового состава при многократном термоциклировании, на что указывается и в цитируемых литературных источниках [7], а также вопросы оптимального регулирования пикового газового котла в составе гибридной схемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Ресурсный потенциал солнечной радиации Самарканда является значительным и при корректировке угла наклона приёмной поверхности коллекторов до $\beta = 55^\circ$ обеспечивает прирост зимней выработки на 75–80% по сравнению с горизонтальной поверхностью, что делает гелиотехнические установки технически применимыми в течение всего отопительного сезона.

2. Существующая структура теплоснабжения города, на 88% зависящая от природного газа, характеризуется системными проблемами — сезонным падением давления в магистралях и потерями тепла при транспортировке до 25–30%, — что обосновывает необходимость диверсификации источников энергии.

3. Инженерный расчёт гибридной установки для типового объекта площадью 1000 м² показал, что применение фазопереходного теплоаккумулирующего состава Р56 позволяет сократить объём аккумулирующего бака с 3,5 до 1,35 м³ (в 2,6 раза) по сравнению с водяным аккумулятором эквивалентной теплоёмкости.

4. Доля замещения годовой тепловой нагрузки объекта гелиосистемой составляет 42,9%, что соответствует экономии 8370 м³ природного газа в год и сроку окупаемости гибридного узла 4,5–5,2 года при сроке службы системы не менее 20 лет.

5. Применение гибридной системы «вакуумный коллектор ($\beta = 55^\circ$) + РСМ-аккумулятор + газовый котёл» в условиях климата Самарканда является технически обоснованным и экономически целесообразным решением,

позволяющим снизить сезонную нагрузку на газовые магистрали города и в 2,6 раза сократить производственные площади под аккумулирующее оборудование. Результаты работы могут быть использованы при проектировании систем теплоснабжения социальных и административных объектов Самарканда и регионов со сходными климатическими условиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международный научный журнал «Гелиотехника» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://academy.uz/ru/journals/mezdunarodnyj-naucnyj-zurnal-geliotehnika>
2. Возобновляемая энергетика Узбекистана. Вчера, сегодня, завтра // АВОК. — 2024. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8686
3. Солнечные водонагреватели в Ташкенте: правильно выбрать и где купить // Stroyka.uz. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://stroyka.uz/arch/publish/doc/text111126_solnechnye_vodonagrevateli_v_tash_kente_pravilno_vybrat_i_gde_kupit
4. Энергия солнца. Как банковский служащий наладил производство солнечных панелей в Узбекистане // Spot.uz. — 2018. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.spot.uz/ru/2018/03/31/all-solar/>
5. Параболические солнечные концентраторы в Узбекистане: научно-технический анализ и инновационные решения // Молодой учёный. — 2025. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/592/129068>
6. Материалы с фазовым переходом и численное моделирование процессов фазового перехода в моделях теплоаккумулирующих материалов // КиберЛенинка. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/materialy-s-fazovym-perehodom-i-chislennoe-modelirovanie-protssesov-fazovogo-perehoda-v-modelyah-teploakkumuliruyuschih-materialov>

7. Амер Ахмед Элсайед, Лебедев В. А. Влияние термоциклирования на выбор рабочего тела с фазовым переходом для теплоаккумуляторов систем солнечного теплоснабжения. — 2020.
8. Применение материалов с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях зданий // Известия ОрёлГУ. — 2019. — №2. — С. 90–105.
9. Материалы с изменяющимся фазовым состоянием // Известия ОрёлГУ. — 2019. — №6. — С. 66–85.
10. Fayziev, Z. X., Volkova, K. V., & Yuzbayeva, S. Z. Thermoregulation of Risers As A Means of Qualitative Regulation of Heat Transfer in the Heating System. *Middle european scientific bulletin*.
11. Yuzbayeva, S., & Volkova, K. Qayta tiklanadigan energiya manbalari. *Arxitektura, muhandislik va zamonaviy texnologiyalar jurnali*.
12. KHAYDAROVICH, F. Z. DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY (RES) IN UZBEKISTAN. *Solar Energy*, 76459, 265-1.
13. Zakirjanovna, Y. S., & Mohida, D. Passive and active systems in the use of solar energy. In *Collection of selected scientific papers of the international scientific-practical conference on “Problems and solutions of application of digital technologies in the field of engineering communications* (pp. 92-94).
14. Узбоев, М. Д., & Файзиев, З. Х. (2021). Экономия энергоресурсов, эффективное использование возобновляемых источников энергии. *Universum: технические науки*, (2-4 (83)), 8-10.
15. Zafar, F., Shokhida, Y., & Mohida, D. (2026). Main Problems OF Hydrodynamics OF A Flat-Plane Solar Collector. *Repository Antis Publisher*, 696473.