

УДК 621.574.013–932.2

Абсорбционные системы охлаждения на солнечной энергии для Республики Крым

Ш. З. БАЙРАМОВ*, А. Н. КОРНИЛЬЕВ, д-р техн. наук А. В. БАРАНЕНКО,

канд. техн. наук О. С. МАЛИНИНА

Университет ИТМО

*E-mail: szbairamov@itmo.ru

В статье представлены результаты разработки и исследования абсорбционной системы охлаждения на солнечной энергии для Республики Крым. Выполнен анализ эффективности системы охлаждения на базе четырех комбинированных циклов абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) с двухступенчатой генерацией раствора для городов Евпатория, Джанкой, Керчь, Севастополь, Симферополь и Ялта. Работа АБХМ в значительной мере определяется температурными условиями и тепловой нагрузкой на генератор, при этом климатические факторы: солнечная инсоляция, продолжительность солнечного сияния и температурный режим также оказывают влияние на эффективность функционирования системы. Важным становится вопрос адаптации различных типов циклов АБХМ к конкретным климатическим условиям регионов для определения возможностей и ограничений их практического применения. В данном исследовании разработан комплексный алгоритм для оценки производительности солнечной системы охлаждения, интегрированной с АБХМ. Алгоритм реализует многоуровневое моделирование, учитывающее характеристики солнечных коллекторов, параметры термодинамического цикла АБХМ и детализированные метеорологические условия. Предложенная методология предоставляет инструмент для обоснованного выбора оптимальной конфигурации солнечной тепловой системы для интеграции с абсорбционной холодильной машиной.

Ключевые слова: абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина, комбинированный термодинамический цикл, солнечная система охлаждения, солнечный коллектор.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 27.01.2026, одобрена после рецензирования 26.02.2026, принята к печати 04.03.2026

DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-3-13

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Байрамов Ш. З., Корнильев А. Н., Бараненко А. В., Малинина О. С. Абсорбционные системы охлаждения на солнечной энергии для Республики Крым. // Вестник Международной академии холода. 2026. № 1. С. 3–13.

DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-3-13

Solar-powered absorption cooling systems for the Republic of Crimea

S. Z. BAYRAMOV*, A. N. KORNILIEV, D. Sc. A. V. BARANENKO, Ph. D. O. S. MALININA

ITMO University

*E-mail: szbairamov@itmo.ru

This article presents the results of the development and investigation of a solar-powered absorption cooling system for the Republic of Crimea. An analysis of the cooling system efficiency is conducted based on four combined cycles of a lithium bromide absorption refrigeration machines (LiBr ARMs) with two-stage solution generation for the cities of Yevpatoria, Dzhankoi, Kerch, Sevastopol, Simferopol, and Yalta. The operation of the LiBr ARMs is largely determined by temperature conditions and the thermal load on the generator, while climatic factors — such as solar insolation, sunshine duration, and temperature regime — also influence the system performance efficiency. In this study, a comprehensive algorithm for evaluating the performance of a solar cooling system integrated with an LiBr ARMs has been developed. The algorithm implements multi-level modeling, accounting for the characteristics of solar collectors, parameters of the LiBr ARMs thermodynamic cycle, and detailed meteorological conditions. The proposed methodology provides a tool for the reasoned selection of an optimal solar thermal system configuration for integration with an absorption chiller.

Keywords: lithium bromide absorption chiller, combined thermodynamic cycle, solar cooling system, solar collector.

Article info:

Received 27/01/2026, approved after reviewing 26/02/2026, accepted 04/03/2026

DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-3-13

Article in Russian

For citation:

Bayramov S. Z., Korniliev A. N., Baranenko A. V., Malinina O. S. Solar-powered absorption cooling systems for the Republic of Crimea. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2026. No 1. p. 3-13. DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-3-13

Введение

Использование энергии солнца для целей охлаждения является одним из направлений повышения энергоэффективности мирового холодильного сектора, доля которого в глобальном энергопотреблении достигает 20%. На необходимости выполнения исследований и их реализации в данной области акцентирует внимание Международный институт холода (МИХ) [1]–[3]. Названный сегмент техники низких температур активно развивается. За девять лет (с 2013 по 2021 г.) ежегодное количество статей в изданиях, реферируемых в базе данных Scopus, по системам охлаждения на основе абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин (АБХМ) с приводом от солнечной энергии увеличилось в 2,6 раза [4]. При этом особое внимание уделяется развитию термодинамических циклов АБХМ [5]. Также растет парк промышленных систем охлаждения на солнечной энергии, в которых доля АБХМ составляет 72% [2].

На эффективность названных систем охлаждения оказывают влияние температурный режим работы, солнечная инсоляция, продолжительность солнечного сияния. Важным является вопрос адаптации различных типов циклов АБХМ к конкретным климатическим условиям регионов для определения возможностей и ограничений практического их применения.

Выполняемые исследования подтверждают достаточный для целей охлаждения потенциал солнечной активности в регионах Земли с жарким климатом, а также высокую энергоэффективность холодильных установок на солнечной энергии [6, 7]. Авторы статьи [8] указывают на финансовую целесообразность применения системы кондиционирования воздуха (СКВ) на основе АБХМ и солнечной энергии в г. Измир (Турция) со сроком окупаемости 10,7 лет. В публикации [9] отмечено, что применение систем охлаждения на базе АБХМ с использованием солнечной энергии в Ливане, где количество солнечных дней в течение года составляет 300, может быть одним из направлений решения проблемы дефицита электроэнергии и кризиса отходов. В Таиланде [10] среднегодовой потенциал солнечной энергии составляет 18,2 МДж/м² в день. Поэтому солнечные системы охлаждения в этой стране, где СКВ потребляют половину электрической энергии, является перспективным способом снижения потребления невозобновляемых источников энергии. Авторы работы [11] констатируют, что солнечная энергия — это доступный и устойчивый источник энергии для удовлетворения растущего спроса на кондиционирование воздуха в Малайзии. Авторами [12] отмечена перспективность технических решений с использованием АБХМ на возобновляемых источниках энергии в СКВ зданий в средиземноморских странах, что является одним из направлений достижения европейских целей по декарбонизации экономики к 2050 г. Использование солнечной энергии в АБХМ для систем охлаждения и кондиционирования воздуха в зданиях, расположенных в субтропической климатической зоне, является

важнейшей альтернативой для снижения энергопотребления [13, 14]. В статье [15] представлены результаты анализа системы охлаждения, в которой АБХМ работает по одноступенчатому циклу на солнечной энергии, по циклу с двухступенчатой генерацией на природном газе. В данном случае газ является резервным источником тепла при низкой солнечной активности. Применение рассматриваемой системы обеспечивает существенную экономию ископаемых источников энергии.

На применение АБХМ с использованием энергии солнца влияют непостоянство и нестабильность солнечного излучения. Чтобы адаптироваться к колебаниям солнечной радиации, исследователи разрабатывают новые и гибкие солнечные системы охлаждения [16]. Динамические характеристики и эффективная стратегия управления таких систем охлаждения исследованы в работах [17]–[19]. В работе [20] предложено применение метода управления с разделенным диапазоном на концентрирующем солнечном коллекторе для повышения холодопроизводительности АБХМ в Испании. Разработанные контроллеры увеличивают на 66% производство тепловой энергии. Авторы [21] предложили систему охлаждения на солнечной энергии на базе одноступенчатой АБХМ и АБХМ с двухступенчатой генерацией раствора, в которой разработаны специальный генератор и эффективная система управления. Данное решение позволило увеличить средний КПД системы на 8,6% по сравнению с оригинальным вариантом подобной системы охлаждения. Период окупаемости новой системы составляет 9,3 года.

Использование АБХМ на солнечной энергии повышает энергоэффективность систем когенерации — полигенерации [22]–[24]. По результатам исследования [23] энергетический и эксергетический КПД для всей системы полигенерации составили 22,6% и 21,8% соответственно. Общий электрический КПД предложенной в работе системы полигенерации [24] может достигать 65% в базовом состоянии, при схожих значениях величин охлаждения/нагрева и электрической мощности друг к другу в количественном отношении.

Абсорбционные системы охлаждения на солнечной энергии в большинстве случаев применяют с аккумуляторами теплоты или холода [25, 26]. Это позволяет обеспечить стабильность охлаждения при снижении солнечной активности, а также увеличить период работы системы вплоть до круглосуточной эксплуатации.

Выполненный обзор показывает, что системы охлаждения на базе АБХМ с приводом от солнечной энергии обеспечивают повышение энергоэффективности объектов и экономию ископаемого топлива. Потребители проявляют заинтересованность в использовании таких систем в различных технологиях. В последние десятилетия высока активность исследований в данной области.

Цель настоящей работы заключается в разработке и исследовании абсорбционной системы охлаждения на солнечной энергии для Республики Крым.

АБХМ на различных термодинамических циклах, а также моделировать их работу в эквивалентных эксплуатационных условиях. Замена одного цикла на другой в рамках заданных граничных условий позволяет верифицировать расчетные модели и сопоставить их эксплуатационные характеристики циклов. Кроме того, данный подход обеспечивает систематизацию параметров и позволяет обосновать выбор цикла АБХМ с точки зрения энергоэффективности, устойчивости работы и адаптивности к изменяющимся внешним условиям.

Для каждого из рассматриваемых циклов, расчет которых проводится по известным методикам [28]–[30], заданы граничные условия, обеспечивающие корректность сопоставления расчетных данных:

- температура охлаждающей воды на входе в аппараты зависит от климатических условий региона эксплуатации;
- требуемая холодопроизводительность 150 кВт;
- перепады температур в аппаратах АБХМ, приняты согласно общепринятым рекомендациям;
- температура охлаждаемой среды (контур потребления холода) фиксирована и составляет 12 °С на входе и 7 °С на выходе, что соответствует стандартным условиям эксплуатации систем кондиционирования и технологического охлаждения.

Термодинамические параметры водного раствора бромидов лития определяются согласно математической модели, описывающей состояние раствора в широких диапазонах значений [31].

Учет климатических характеристик на уровне отдельного города обеспечивает адаптацию расчетной модели к специфике различных географических зон и создает основу для проведения корректного сравнительного анализа рабочих циклов АБХМ.

Такой подход позволяет оценить влияние региональных климатических факторов на эффективность работы системы, выявить пределы её эксплуатационной устойчивости и определить оптимальные условия применения. Дополнительно это способствует обоснованному выбору режимов функционирования и конфигураций оборудования для конкретных климатических сценариев.

Методология выполнения исследований

В данном исследовании разработан комплексный алгоритм для оценки производительности солнечной системы охлаждения на основе АБХМ. Алгоритм реализует многоуровневое моделирование, учитывающее характеристики солнечных коллекторов, параметры термодинамического цикла АБХМ и детализированные метеорологические условия. Основные этапы и расчетные формулы представлены ниже [33].

1. Предварительная обработка данных: преобразование профилей инсоляции по месяцам в почасовые.

Исходные данные о солнечной инсоляции [27] представлены в виде профилей по месяцам, где значение присваивается интервалу времени (например, 8–9, 10–11). Для получения почасовых значений $G_{\text{base}}(h)$ применяется алгоритм взвешенного распределения. Для двухчасового интервала $[h_1, h_2]$ с суммарной инсоляцией E_{total} распределение по часам осуществляется по правилу:

$$G_{\text{base}}(h_1) = E_{\text{total}} r_2;$$

$$G_{\text{base}}(h_2) = E_{\text{total}} (1 - r) 2,$$

где r — коэффициент распределения, зависящий от времени суток:

- для утренних часов ($h_1 < 11$): $r = 0,4$ (распределение 40/60 %);
- для дневных часов ($11 \leq h_1 \leq 15$): $r = 0,5$ (равномерное распределение 50/50 %);
- для вечерних часов ($h_1 > 15$): $r = 0,6$ (распределение 60/40 %).

Множитель «2» вводится для сохранения энергетического баланса при переходе от двухчасового интервала к часовым значениям интенсивности (Вт/м²). Если час попадает в несколько интервалов, конечное значение $G_{\text{base}}(h)$ вычисляется, как среднее арифметическое всех назначенных ему значений.

2. Определение площади солнечных коллекторов.

Для конкретной модели коллектора с габаритной площадью (A_{gross} , м²) рассчитывается необходимое количество модулей N (шт.):

$$N = \frac{A_{\text{total}}}{A_{\text{gross}}},$$

где A_{total} — общая площадь (м²), доступная для размещения солнечных коллекторов, задается в рамках исследования.

Фактическая площадь (м²), необходимая для расчетов, определяется следующим образом:

$$A_{\text{fact}} = N \cdot A_{\text{aperture}}.$$

3. Задание параметров термодинамического цикла АБХМ.

Для каждого рассматриваемого типа цикла задаются температура теплоносителя на выходе (t_{out} , °С) и на входе (t_{in} , °С) генератора АБХМ. Средняя расчетная температура в контуре определяется из выражения:

$$t_{\text{mid}} = \frac{t_{\text{out}} + t_{\text{in}}}{2}.$$

4. Корректировка инсоляции с учетом погодных факторов.

Базовое значение солнечной радиации G_{base} корректируется на основе текущих метеоусловий. Корректировка включает последовательное применение четырех поправочных коэффициентов. Коэффициенты определяются на основе информации о погодных условиях за каждый час каждого дня в рамках исследуемого периода [32].

Совокупный почасовой поправочный коэффициент рассчитывается, как произведение частных коэффициентов:

$$K_{\text{total}} = K_{\text{cloud}} K_{\text{precip}} K_{\text{wind}} K_{\text{temp}},$$

где K_{cloud} , K_{precip} , K_{wind} — коэффициенты облачности, осадков и ветра определяются по коду погоды и отражают степень уменьшения прямой солнечной радиации из-за облачного покрова.

Коэффициент температуры K_{temp} : отражает зависимость КПД от температуры окружающего воздуха. Рассчитывается относительно средней температуры 25 °С:

$$K_{temp} = 1 + (25 - t_{amb}) 0,007,$$

где коэффициент 0,007 корректировка 0,7% на градус.

Скорректированная интенсивность солнечной инсоляции (Вт/м²):

$$G_{corr} = G_{base} K_{total}.$$

5. Нормализация данных по месяцам.

Для компенсации погрешностей, возникающих при почасовом распределении сумм солнечной инсоляции по месяцам, выполняется процедура нормализации. Для каждого месяца рассчитывается среднее скорректированное значение инсоляции за день $G_{corr, day}$ по всем дням месяца. Коэффициент нормализации F_{norm} определяется, как отношение справочного показателя по месяцам E_{target} к полученному среднему значению:

$$F_{norm} = \frac{E_{target}}{G_{corr, day}}.$$

Окончательное рабочее значение инсоляции (G , Вт/м²), используемое для расчета КПД, солнечного коллектора:

$$G = G_{corr} F_{norm}.$$

6. Расчет тепловой эффективности солнечного коллектора.

Для группы плоских солнечных коллекторов, в которую входят плоский и вакуумный коллекторы, КПД в конкретный час рассчитывается по модели, учитывающей разность температур между теплоносителями и окружающей средой:

$$\eta = \eta_0 - \frac{a_1 \Delta t}{G} - \frac{a_2 (\Delta t)^2}{G},$$

где η_0 — оптический КПД коллектора;

a_1 — коэффициент тепловых потерь, Вт/(м² · °С);

a_2 — коэффициент тепловых потерь, Вт/(м² · °С);

Δt — разность температур между теплоносителем и окружающей средой, $\Delta t = t_{mid} - t_{amb}$, °С;

G — нормализованная интенсивность солнечной инсоляции, Вт/м².

Для каждого солнечного коллектора значения оптического КПД и коэффициентов теплопотерь приняты согласно данным каталога [34].

Рассчитанное значение ограничивается физически допустимым диапазоном $\eta \in [0,0; 1,0]$.

7. Расчет тепловой мощности, вырабатываемой солнечным полем.

Тепловая мощность (Q_{solar} , кВт), генерируемая всей площадью коллекторов, определяется как:

$$Q_{solar} = \frac{\eta \cdot G \cdot A_{fact}}{1000}.$$

8. Агрегация результатов и сравнительный анализ.

Для каждой комбинации «город — тип цикла АБХМ — модель коллектора» выполняется пошаговый расчет по всем часам расчетного периода. Результаты сохраняются в виде почасовых временных рядов.

На этапе анализа для каждой конфигурации рассчитываются интегральные показатели:

Средняя вырабатываемая тепловая мощность за период работы системы ($Q_{solar} > 0$), кВт:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{solar, i}.$$

Средний эксплуатационный КПД солнечного поля за период работы системы, %:

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta, i.$$

На основе этих показателей осуществляется сравнительный анализ и ранжирование различных моделей коллекторов по их энергетической эффективности в заданных климатических условиях и для конкретных температурных параметров цикла АБХМ. Это позволяет определить солнечные коллекторы с наибольшей выработкой тепловой энергии.

Так как солнечные коллекторы являются одним из основных элементов системы, для проведения исследования используются коллекторы, прошедшие лабораторные испытания [34], для которых определены их теплотехнические и оптические характеристики, среди которых оптический КПД и коэффициенты теплопотерь, используемые в расчетах.

При использовании данных из каталога солнечных коллекторов, включающего 840 наименований, отмечены медианные значения для оптического КПД и коэффициентов тепловых потерь, данные показаны в табл. 2.

Результаты расчетов

Все этапы многоуровневого моделирования и последующих расчетов были реализованы с применением языка Python для математического ядра и алгоритмов анализа данных, а также языка C# в среде Microsoft Visual

Таблица 2

Медианные значения характеристик солнечных коллекторов [34]

Table 2

Median values of solar collector characteristics [34]

Тип коллектора	Оптический КПД	a_1 , Вт/(м ² · °С)	a_2 , Вт/(м ² · °С ²)
вакуумный	0,5135	1,145	0,007
плоский	0,728	3,59	0,012

Studio для разработки пользовательского интерфейса и управления вычислительным процессом. После выполнения расчетов производительности солнечной тепловой системы для различных конфигураций полученные данные были обработаны с помощью Python, агрегированы и подвергнуты сравнительному анализу, что позволяет выявить оптимальные технические решения для заданных климатических условий и требований абсорбционных циклов.

В табл. 3 представлены данные о максимальной выработке тепловой энергии и КПД вакуумных и плоских солнечных коллекторов за весь период работы для каждого конкретного типа цикла КАБХМДГ в различных городах Крыма. Все значения тепловой мощности, приведенные в таблице, рассчитаны для площади солнечного поля равной 500 м². Количество коллекторов каждого типа для данной площади определялось исходя из площади одного коллектора. Это позволяет проводить корректное сравнительное сопоставление эффективности разных конфигураций систем.

Исходным требованием для всех расчетов принято значение холодопроизводительности $Q_0 = 150$ кВт. Исходя из этого, определяется необходимая тепловая нагрузка на генератор АБХМ, которую должна покрывать солнечная система.

Высокие показатели плоского коллектора, представленного в табл. 3 обусловлены его характеристиками, схожими со значениями для вакуумных коллекторов [34], а именно коэффициентами теплопотерь, при высоком значении оптического КПД. Данные табл. 4 содержат информацию об оптическом КПД и коэффициентах теплопотерь для солнечных коллекторов, представленных в табл. 3.

Для представленных в сводной таблице результатов анализа производительности солнечных коллекторов можно выделить три ключевые группы влияющих факторов: географические, технологические и методические.

Несмотря на принадлежность рассматриваемых городов к одной климатической зоне, наблюдаемые различия в КПД солнечных коллекторов обусловлены локальными вариациями погодных условий. К ним относятся незначительные, но статистически значимые различия в температуре окружающей среды, количестве осадков, влажности, а также в скорости и направлении ветра. Основным же фактором, определяющим разброс значений, являются различия в уровне солнечной инсоляции, согласно данным Global Solar Atlas [27].

Анализ данных инсоляции за период работы системы с марта по октябрь (табл. 1) показал, что наибольшие суммарные показатели (кВт·ч/м²) характерны для Севастополя. Месячная динамика распределения максимумов

Таблица 3

Данные о выработке тепловой энергии (кВт·ч) и КПД вакуумных и плоских солнечных коллекторов в различных городах Крыма

Table 3

Data on heat energy production (kW·h) and efficiency of vacuum and flat solar collectors in various cities of Crimea

Город/Тип цикла	Джанкой	Евпатория	Керчь	Севастополь	Симферополь	Ялта
Вакуумный коллектор — 011-7S089R, 215 шт., компания производитель — Ritter, Германия						
КАБХМДГ / Тип 1	60.46/23.76%	64.23/24.7%	61.37/23.76%	70.89/25.64%	58.42/22.82%	48.36/20.82%
КАБХМДГ / Тип 2	74.81/32.73%	79.50/33.68%	75.30/32.05%	85.83/34.17%	75.45/32.68%	64.34/30.68%
КАБХМДГ / Тип 3	77.39/34.36%	82.55/35.44%	78.91/34.13%	88.99/35.94%	77.85/34.19%	66.70/32.33%
КАБХМДГ / Тип 4	84.71/39.65%	89.50/40.36%	88.63/40.24%	95.46/40.54%	86.64/39.95%	76.95/39.26%
Вакуумный коллектор — 011-7S2788R, 60 шт., компания производитель — Avalen, Италия						
КАБХМДГ / Тип 1	58.88/22.96%	63.21/24.14%	59.54/22.87%	69.62/24.97%	57.72/22.36%	47.20/20.17%
КАБХМДГ / Тип 2	75.11/32.95%	79.98/33.96%	75.66/32.29%	86.04/34.32%	75.77/32.88%	64.46/30.84%
КАБХМДГ / Тип 3	77.68/34.62%	83.21/35.84%	79.68/34.6%	89.68/36.34%	78.16/34.44%	67.33/32.81%
КАБХМДГ / Тип 4	85.92/40.57%	90.83/41.31%	90.09/41.2%	96.38/41.3%	88.06/40.91%	78.41/40.32%
Вакуумный коллектор — 011-7S1889R, 215 шт., компания производитель — Ritter, Германия						
КАБХМДГ / Тип 1	65.36/28.35%	69.55/29.24%	66.93/28.25%	75.72/29.92%	66.40/28.55%	56.60/26.71%
КАБХМДГ / Тип 2	76.74/36.0%	80.87/36.56%	80.30/36.58%	86.44/36.81%	78.39/36.26%	69.42/35.47%
КАБХМДГ / Тип 3	78.32/37.18%	82.87/37.9%	82.44/37.95%	87.76/37.85%	80.80/37.76%	71.56/36.95%
КАБХМДГ / Тип 4	85.61/42.16%	90.21/42.73%	87.67/41.83%	94.76/42.53%	88.17/42.54%	78.50/41.91%
Вакуумный коллектор — 011-7S2628R, 195 шт., компания производитель — Solvis, Германия						
КАБХМДГ / Тип 1	60.45/23.76%	64.22/24.7%	61.36/23.76%	70.88/25.64%	58.41/22.82%	48.35/20.82%
КАБХМДГ / Тип 2	74.79/32.73%	79.48/33.68%	75.29/32.05%	85.82/34.17%	75.44/32.68%	64.33/30.68%
КАБХМДГ / Тип 3	77.38/34.36%	82.54/35.44%	78.90/34.13%	88.97/35.94%	77.84/34.19%	66.69/32.33%
КАБХМДГ / Тип 4	84.69/39.65%	89.48/40.36%	88.62/40.24%	95.44/40.54%	86.62/39.95%	76.94/39.26%
Плоский коллектор — 011-7S1890F, 272 шт., компания производитель — TVP Solar, Швейцария						
КАБХМДГ / Тип 1	73.58/30.59%	78.01/31.47%	79.93/32.4%	87.67/33.17%	74.42/30.78%	64.98/29.56%
КАБХМДГ / Тип 2	91.78/42.11%	97.17/42.99%	96.42/43.03%	106.29/44.24%	93.68/42.44%	82.47/41.34%
КАБХМДГ / Тип 3	94.77/44.14%	100.05/44.91%	99.06/44.79%	106.90/45.17%	96.77/44.44%	85.73/43.54%
КАБХМДГ / Тип 4	104.71/51.06%	110.43/51.81%	107.54/50.75%	116.29/51.61%	107.97/51.62%	95.79/50.69%

Характеристики коллекторов [34]

Таблица 4

Table 4

Collector characteristics [34]

Страна	Компания	Тип	Номер	Площадь, м ²	Оптический КПД	a_1 , Вт/(м ² ·°C)	a_2 , Вт/(м ² ·°C ²)
Германия	Ritter	вакуумный	011-7S089R	2,33	0,644	0,75	0,005
Италия	Avalen	вакуумный	011-7S2788R	8,24	0,638	0,52	0,007
Германия	Ritter	вакуумный	011-7S1889R	2,67	0,586	0,47	0,003
Германия	Solvis	вакуумный	011-7S2628R	2,57	0,644	0,75	0,005
Швейцария	TVP Solar	плоский	011-7S1890F	1,96	0,732	0,5	0,006

по городам, следующая: в марте-апреле лидирует Евпатория, с мая по сентябрь — Севастополь, в октябре — Симферополь. Для количественной оценки устойчивости высоких показателей был применен метод медианного сравнения. Для каждого города по месяцам рассчитывалось процентное отношение фактической инсоляции к медианному значению инсоляции по данному месяцу, после чего определялась медиана полученных процентных соотношений для города. Результаты показали, что медианное значение для Севастополя стабильно превышает аналогичные медианные показатели по другим городам на 3,4%, что объясняет его лидирующее положение в сводной таблице.

Наблюдаемый рост тепловой мощности системы при переходе от КАБХМДГ тип 1 к КАБХМДГ тип 4 имеет технологическое объяснение. Одним из ключевых параметров абсорбционных машин является температура теплоносителя, требуемая в генераторе. Для КАБХМДГ тип 4 данный параметр ниже относительно других типов циклов, что видно на рис. 2. Поскольку именно эта температура является целевой для контура солнечного коллектора, её более низкое значение позволяет коллектору работать с более высоким средним КПД на протяжении большего количества часов, что, в конечном итоге, приводит к увеличению общей выработки тепловой энергии солнечным полем.

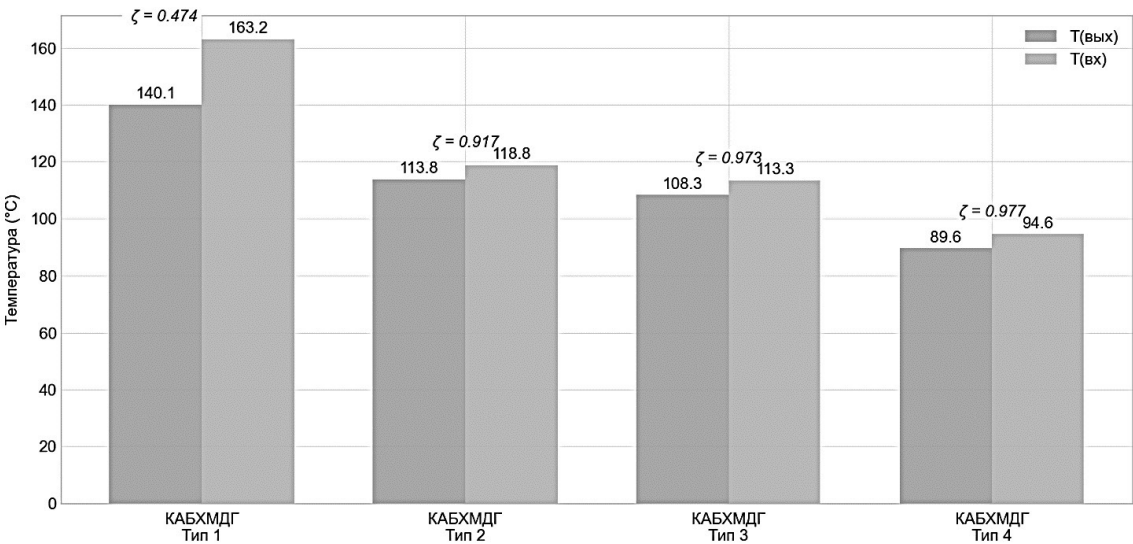


Рис. 2. Температурные параметры циклов КАБХМДГ тип 1, 2, 3, 4

Fig. 2. Temperature parameters for combined LiBr absorption refrigeration machines of types 1, 2, 3, and 4

Тепловые нагрузки на аппараты АБХМ

Таблица 5

Table 5

Thermal loads on various types of LiBr absorption refrigeration machines

Тип цикла	Q_o , кВт	Q_h , кВт	Q_k , кВт	Q_a , кВт	t_h (вх), °C	t_h (вых), °C	Тепловой коэффициент
КАБХМДГ / Тип 1	150	316,3	169,2	297,1	163,2	140,1	0,474
КАБХМДГ / Тип 2	150	163,5	100	213,5	118,8	113,8	0,917
КАБХМДГ / Тип 3	150	154,2	46,3	257,8	113,3	108,3	0,973
КАБХМДГ / Тип 4	150	153,5	105,6	198	94,6	89,6	0,977

Параметры исследуемых абсорбционных циклов приведены в табл. 5. В таблице представлены тепловые нагрузки на основные аппараты холодильной машины: испаритель (Q_o), генератор (Q_h), конденсатор (Q_k) и абсорбер (Q_a), температуры теплоносителя на входе t_h (вх) и выходе t_h (вых) из генератора, а также значения тепловых коэффициентов ζ .

Анализ сезонной динамики работы системы охлаждения выполнен на примере Севастополя, демонстрирующего наилучшие показатели выработки тепловой энергии (рис. 3). На графике сопоставлены: расчетная холодопроизводительность каждого из четырех типов циклов КАБХМДГ, постоянный уровень требуемой производительности холода, а также профиль доступной солнечной инсоляции. Как видно из графиков, кривые холодопроизводительности для циклов КАБХМД (тип 3) и КАБХМД (тип 4) расположены близко друг к другу, что обусловлено малым отличием значений их тепловых коэффициентов ζ .

Анализ холодопроизводительности системы указывает на необходимость интеграции резервного источника тепла. Моделирование подтверждает, что выработки тепловой энергии только за счет солнечных коллекторов недостаточно для гарантированного обеспечения заданной холодопроизводительности на протяжении всего периода эксплуатации (март — октябрь). В периоды снижения солнечной инсоляции (ранней весной, поздней осенью и во время продолжительной облачности) возник

ает устойчивый дефицит тепловой мощности, подаваемой от солнечного поля на генератор АБХМ.

Для соблюдения принципа надежности и соответствия проектным требованиям система должна быть дополнена резервным (дублирующим) теплогенератором. Данный подход соответствует общепринятой практике проектирования гибридных солнечно-тепловых установок, где солнечная компонента выполняет функцию покрытия базовой нагрузки с целью минимизации энергозатрат, а традиционный источник гарантирует стабильность энергоснабжения.

Оптимальным техническим решением в рамках рассмотренной конфигурации является установка котла-нагревателя (газового или электрического), встроенного в контур теплоносителя, питающего генератор АБХМ (см. рис. 1). Его задачей является автоматическая компенсация дефицита тепловой мощности для поддержания температуры теплоносителя на входе в генератор в соответствии с требуемым для конкретного цикла диапазоном. Такой гибридный принцип построения системы позволяет максимизировать использование возобновляемого ресурса без ущерба для ее надежности и соответствия заданной холодопроизводительности в любых погодных условиях.

Для анализа влияния температуры окружающего воздуха на эффективность солнечного коллектора в составе системы охлаждения исследована зависимость его КПД от данного параметра. На рис. 4 представлены усредненные для всей базы данных солнечных коллекторов, представленных в каталоге [34] за период с марта по октябрь и по всем исследуемым городам Крыма зависимости КПД от температуры окружающей среды для четырех типов абсорбционных циклов (КАБХМДГ тип 1–4).

Анализ графиков позволяет выявить две ключевые закономерности. Во-первых, для каждого конкретного типа цикла наблюдается ожидаемый рост КПД коллектора с повышением температуры окружающей среды. Эта тенденция объясняется уменьшением тепловых потерь в коллекторе при уменьшении разницы между температурой теплоносителя в контуре генератора и внешней средой.

Во-вторых, при сравнении циклов между собой установлено, что максимальные значения среднего КПД во всем температурном диапазоне достигаются для цикла КАБХМДГ тип 4. Это прямое следствие более низкой температуры греющего источника, требуемой для его генератора, что позволяет солнечному коллектору работать в более эффективном режиме.

Представленные зависимости дают репрезентативную картину ожидаемой эффективности солнечных коллекторов для климатической зоны Крымского полуострова при их интеграции в систему абсорбционного охлаждения и подтверждают преимущество низкотемпературных циклов.

Выводы

Анализ подтвердил существенное влияние географического фактора на эффективность солнечных коллекторов в условиях Крымского полуострова. Наибольшая выработка тепловой энергии и максимальные значения КПД коллекторов характерны для города Севастополь, что об-

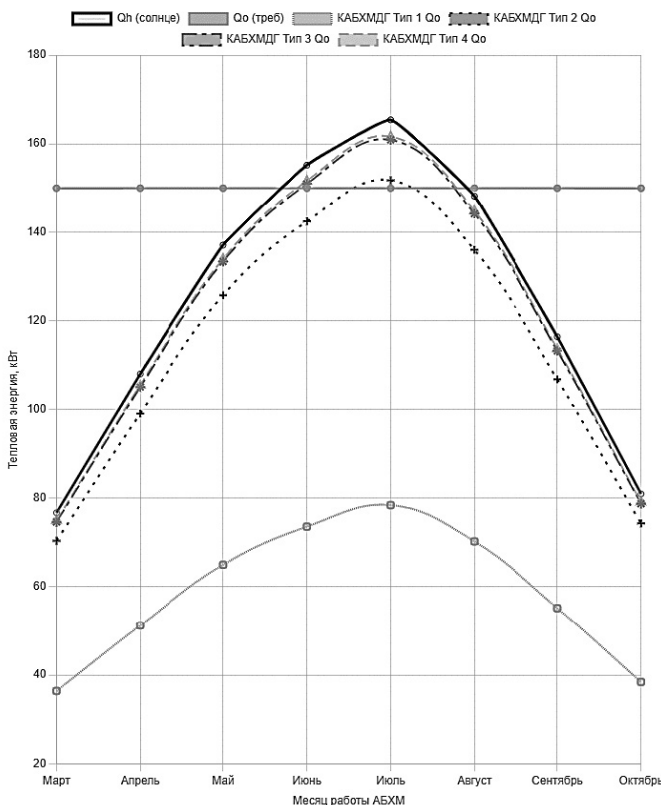


Рис. 3. Данные о выработке холода в Севастополе для циклов КАБХМДГ тип 1, 2, 3, 4

Fig. 3. Data on cold production in Sevastopol for the cycles of combined LiBr absorption refrigeration machines of the types 1, 2, 3, and 4

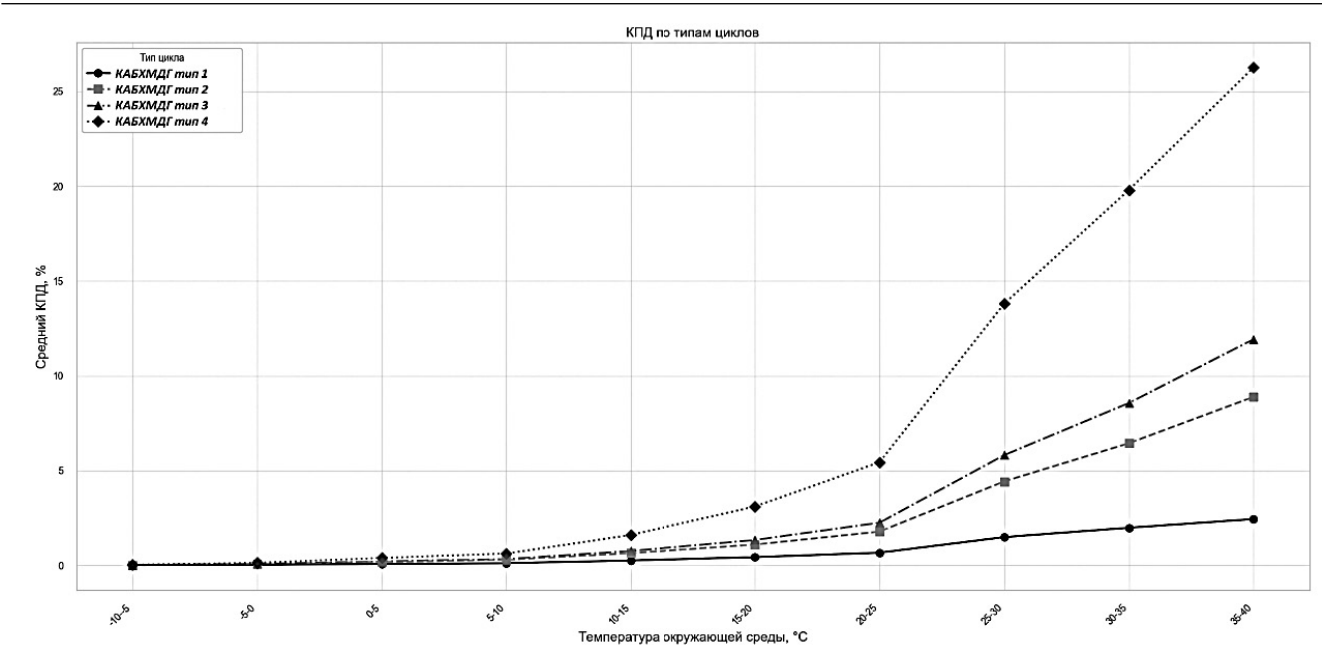


Рис. 4. Зависимость КПД солнечного коллектора от температуры окружающей среды для различных типов циклов КАБХМДГ
Fig. 4. Dependence of solar collector efficiency on ambient temperature for various cycles of combined LiBr absorption refrigeration machine

условлено его высокими показателями солнечной инсоляции, превышающими среднерегиональные значения.

Одним из ключевых технологических факторов, определяющих эффективность всех систем является температура теплоносителя, требуемая для работы генератора АБХМ. Снижение данного параметра приводит к повышению КПД коллекторов, и как следствие повышению их тепловой мощности. В этом контексте цикл КАБХМДГ тип 4, характеризующийся меньшей требуемой температурой греющего источника продемонстрировал преимущество над остальными рассматриваемыми циклами для всех типов солнечных коллекторов и во всех географических точках.

Сравнительный анализ различных моделей солнечных коллекторов выявил, что плоские и вакуумные коллекторы способны в равной степени обеспечивать высокие значения тепловой мощности для целей охлаждения. При этом, согласно данным табл. 2 и 3, вакуумные коллекторы имеют преимущество ввиду низких потерь тепла. Сезонная динамика работы системы и зависимость КПД от температуры окружающей среды соответствуют теоретическим термодинамическим закономерностям, подтверждая адекватность примененной расчетной модели.

Результаты анализа подтверждают, что солнечная составляющая системы не обеспечивает полного покрытия требуемой тепловой нагрузки в течение всего сезона, что обусловлено природной изменчивостью инсоляции. Для гарантированного и бесперебойного функционирования системы холодоснабжения необходима интеграция резервного источника тепла — котла-нагревателя. Это соответствует стандартной практике создания гибридных систем, где солнечные коллекторы покрывают базовую нагрузку, а традиционный теплогенератор компенсирует ее дефицит, обеспечивая надежность и выполнение проектных требований.

Результаты исследования позволяют рекомендовать для внедрения в климатических условиях Крыма систему солнечного абсорбционного охлаждения, сформированную на основе солнечных коллекторов, котла-нагревателя, аккумулятора тепловой энергии, АБХМ, работающей по циклу КАБХМДГ тип 4, градирни и другого вспомогательного оборудования.

Литература/References

1. Lazzarin R. 34th Informatory Note on Refrigeration Technologies. Solar cooling. Apr. 2017. Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://iifir.org/en/fridoc/solar-cooling-2017-34-lt-sup-gt-th-lt-sup-gt-informatory-note-on-l40752>

2. Lazzarin R. Solar Cooling 40th Informatory Note on Refrigeration Technologies. International Institute of Refrigeration. December, 2020. 75017. <http://dx.doi.org/10.18462/iif.NItec40.12.2020>

3. Ayou D. S., Corberán J. M., Coronas A. High-temperature heat pumps for industrial applications, 45th Informatory Note on Refrigeration Technologies. <http://dx.doi.org/10.18462/iif.NItec45.09.2021>

4. Al-Yasiri Q., Szabó M., Arici M. A review on solar-powered cooling and air-conditioning systems for building applications. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 2888–2907. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.172>

5. Бараненко А. В., Малинина О. С. Развитие систем холодоснабжения на базе абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 3–12. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-3-12 [Baranenko A. V., Malinina O. S. Refrigeration supply systems based on lithium bromide absorption refrigerating machines. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. no 1. p. 3–12. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-3-12 (in Russian)]

6. Aliane A., Abboudi S., Seladji C., Guendouz B. An illustrated review on solar absorption cooling experimental studies.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 65. P. 443–458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.012>
7. Aguilar-Jiménez J. A. Optimum operational strategies for a solar absorption cooling system in an isolated school of Mexico. *International Journal of Refrigeration*. 2020. Vol. 112. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.12.010>
 8. Altun A. F., Kilic M. Economic feasibility analysis with the parametric dynamic simulation of a single effect solar absorption cooling system for various climatic regions in Turkey. *Renew Energy*. 2020. Vol. 152. P. 73–95. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.055
 9. Christy Lahoud, Marwan El Brouche, Chawki Lahoud, Mohamed Hmadi. A Review of single-effect solar absorption chillers and its perspective on Lebanese case. *Energy Reports*. 2021. 7 (14):12–22. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.09.052
 10. Jaruwongwittaya T., Chen G. A review: Renewable energy with absorption chillers in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. vol. 14, no. 5, pp. 1437–1444. DOI: 10.1016/j.rser.2010.01.016
 11. Mir Hamed Hakemzadeh, Kamaruzzaman Sopian, Ahmad Fazlizan Abdullah, Hasila Jarimi, Mohd Faizal Fauzan, Adnan Ibrahim. Technoeconomics of solar thermal-assisted sorption cooling systems under tropical climate condition — A case of Malaysia. *Energy Conversion and Management: X*. 2022. vol. 16. P. 100305. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100305>
 12. Bilardo M., Ferrara M., Fabrizio E. Performance assessment and optimization of a solar cooling system to satisfy renewable energy ratio (RER) requirements in multi-family buildings. *Renew Energy*, 2020. vol. 155. pp. 990–1008. DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.044
 13. Qudama Al-Yasiri, Márta Szabó, Müslüm Arıcı. A review on solar-powered cooling and air-conditioning systems for building applications. *Energy Reports*. November 2022, Vol. 8, P. 2888–2907. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.172>
 14. Ramadas Narayanan, Gopi Krishnan Harilal, Santu Golder. Feasibility study on the solar absorption cooling system for a residential complex in the Australian subtropical region. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 27. P. 101202. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101202>
 15. Sun H., Xu Z., Wang H., Wang R. A solar/gas fired absorption system for cooling and heating in a commercial building. *Energy Procedia*. 2015. vol. 70, pp. 518–528. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.156
 16. Yousef FathiAlmas, Hossein Ghadamian, Mohammad Aminy, Meisam Moghadas. Thermo-economic analysis, energy modeling and reconstructing of components of a single effect solar — absorption lithium bromide chiller for energy performance enhancement. *Energy & Buildings*. 2023. Vol. 285. P. 112894. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112894>
 17. Alexios Spyridon Kyriakides, Athanasios Papadopoulos, Panos Seferlis, Ibrahim Hassan/Dynamic modelling and control of single, double and triple effect absorption refrigeration cycles. *Energy*. 1 November 2020. Vol. 210. P. 118529. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118529>
 18. Yujie Zhou, Lei Pan, Xu Han, Li Sun. Dynamic modeling and thermodynamic analysis of lithium bromide absorption refrigeration system using Modelica. *Applied Thermal Engineering*. 5 May 2023. Vol. 225. P. 120106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120106>
 19. Andres Z. Mendiburu, Justo J. Roberts, Leticia Jenisch Rodrigues, Sujit Kr Verma Thermodynamic. modelling for absorption refrigeration cycles powered by solar energy and a case study for Porto Alegre, Brazil. *Energy*. 2023. Vol. 266. P. 126457. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126457>
 20. Diogo Ortiz Machado, Adolfo J. Sanchez, Antonio J. Gallego, Gustavo A. de Andrade. Split-range control for improved operation of solar absorption cooling. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 192. P. 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.064>
 21. Shuangshuang Zhang, Wenjing Yu, Dechang Wang, Qinglu Song. Thermodynamic characteristics of a novel solar single and double effect absorption refrigeration cycle. *Energy*. 1 November 2024, Vol. 308, p. 132674. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132674>
 22. Mathkar A. Alharthia, Abdul Khaliqb, Saeed Alqaedc, Fahad Almeahmadid. Investigation of new combined cooling, heating and power system based on solar thermal power and single-double-effect refrigeration cycle. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. p. 289–309. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.002>
 23. Gursay M., Dincer I. A solar based system for integrated production of power, heat, hot water and cooling. *Energy*. 2023. vol. 282, p. 128943. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128943>
 24. Tan L., Chen C., Gong Z., Xia L. Performance evaluation on a novel combined cool/heat and power (CCP/CHP) system integrating an SOFC-GT plant with a solarassisted LiBr absorption cooling/heating unit. *Energy*. 2023. Vol. 283. P. 129102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129102>
 25. Liu M., Cheng Y., Cheng W., Zhan C. Dynamic performance analysis of a solar driving absorption chiller integrated with absorption thermal energy storage. *Energy Convers Manag*. 2021. vol. 247, p. 114769. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114769>
 26. Nasiru I. Ibrahim, Shafiqur Rehman, Fahad A. Al-Sulaiman, Farid Nasir Ani. A systematic thermodynamic performance assessment of a solar-driven double-effect absorption chiller integrated with absorption energy storage. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 221. P. 119868 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119868>
 27. Global Solar Atlas [Electronic resource]. Available at: <https://globalsolaratlas.info/map?c=45.0483,34.606934,8> (accessed: 20.12.2025)
 28. Malinina O. S., Baranenko A. V., Mushtaq A. Al-Furaiji, Lydova E. E. et al. Thermodynamic cycle of Lithium bromide absorption chiller with two-stage absorption and three-stage generation with associated mass flow. *AIP Conference Proceedings*. 2021. no 1 (2412). p. 030012. DOI: 10.1063/5.0075098
 29. Malinina O. S., Baranenko A. V., Klunnik A. K., Mushtaq A. Al-Furaiji. Combined cycle efficiency of lithium bromide water absorption chiller with double-stage generation (type 2). *AIP Conference Proceedings*. 2023. no 1 (2784). p. 030014. DOI: 10.1063/5.0140472
 30. Wang J., Zheng D. Performance of one and a half-effect absorption cooling cycle of H₂O/LiBr system. *Energy Conversion and Management*. 2009. no 12 (50). p. 3087–3095. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.08.004
 31. Галимова Л. В., Байрамов Д. З., Байрамов III. З. Методика первичного проектирования научно обоснованной схемы оптимизации энергосберегающей системы на базе парогазовой энергетической установки и абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины // Холодильная

техника. 2020. № 1. С. 28–33. [Galimova L. V., Bayramov D. Z., Bayramov S. Z. The method of a primary design of a scientifically grounded scheme for optimization an energy saving system on the basis of the steam-gas power plant and an absorption lithium bromide refrigerating machine. *Refrigeration Technology*. 2020. no 1. p. 28–33 (in Russian)]

32. World Weather. [Electronic resource]: Available at: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/> (accessed: 20.12.2025)]
33. John A. Duffie, William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, 2013. P. 944.
34. Solar Keymark. [Electronic resource]: Available at: <https://solarkeymark.eu/> (accessed: 20.12.2025)]

Сведения об авторах

Байрамов Шамиль Загидович

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, szbairamov@itmo.ru

Корнильев Алексей Никитович

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ankornilev@itmo.ru

Бараненко Александр Владимирович

Д. т. н., профессор, Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, avbaranenko@itmo.ru

Малинина Ольга Сергеевна

К. т. н., доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, osmalinina@itmo.ru

Information about authors

Bayramov Shamil Z.

PhD student, of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, szbairamov@itmo.ru

Korniliev Alexey N.

PhD student of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, ankornilev@itmo.ru

Baranenko Aleksandr V.

D. Sc., Professor, ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, avbaranenko@itmo.ru

Malinina Olga S.

Ph. D., Associate professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, osmalinina@itmo.ru



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



Выставка продуктов питания и напитков

InterFood Krasnodar

22–24 апреля 2026 г.

InterFood Krasnodar – эффективная бизнес-площадка для прямого контакта производителей и поставщиков с представителями предприятий оптовой торговли, независимой и сетевой розничной торговли, а также предприятий общественного питания регионов России.

РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- ✓ Мясо и птица.
- ✓ Рыбная продукция.
- ✓ Молочная продукция. Сыры.
- ✓ Бакалея. Зернопродукты. Макароны изделия.
- ✓ Кондитерская продукция. Хлебопекарная продукция.
- ✓ Безалкогольные и слабоалкогольные напитки.
- ✓ Продукты и напитки для предприятий общественного питания.
- ✓ Пиво и снековая продукция.

Организатор выставки: Компания MVK

г. Краснодар, ул. Конгрессная 1, павильон 2

Тел.: +7 (861) 200 12 34

e-mail: krasnodar@mvk.ru

Место проведения:

ВКК «Экспоград Юг»,

г. Краснодар, ул. Конгрессная, 1

<https://inter-food-su/ru-RU/>