ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621. 574.013-932.2
CC BY 4.0
DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-2-6-17 Оригинальная статья /Original article

Исследование системы холодоснабжения на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины в климатических условиях г. Астрахани с применением солнечной энергии

Ш.З. Байрамов, О.С. Малинина, А.В. Бараненко
Национальный исследовательский университет ИТМО,
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, Россия

Резюме. Цель. В данной работе рассматриваются показатели системы охлаждения на основе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) на солнечной энергии в климатических условиях г. Астрахани. **Метод.** Для анализа работы системы была разработана и верифицирована новая математическая модель, основанная на данных имитационного моделирования. Адекватность модели была проверена путем сравнения с существующими данными, а также проведены расчеты необходимого количества солнечных коллекторов. **Результат.** Исследование показало, что эффективность работы АБХМ зависит от режима подачи охлаждающей среды в абсорбер и конденсатор АБХМ. Параллельная подача демонстрирует лучшие результаты по величине теплового коэффициента. Динамика тепловой нагрузки на генератор показала, что солнечная инсоляция напрямую влияет на производительность системы, достигая максимальной эффективности при высоких уровнях солнечной энергии. **Вывод.** Результаты работы могут быть использованы для разработки и оптимизации систем холодоснабжения в условиях жаркого климата, что способствует более эффективному использованию солнечной энергии и повышению энергоэффективности.

Ключевые слова: энергоэффективность, моделирование системы холодоснабжения, абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина, солнечная энергия, аккумулирование тепловой энергии, действительный термодинамический цикл.

Для цитирования: Ш.З. Байрамов, О.С. Малинина, А.В. Бараненко. Исследование системы холодоснабжения на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины в климатических условиях г. Астрахани с применением солнечной энергии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):6-17. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-6-17

Investigation of an Absorption Refrigeration System in the Climatic Conditions of Astrakhan Using Solar Collectors

S.Z. Bayramov, O.S. Malinina, A.V. Baranenko
National Research University ITMO,
49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia

Abstract. Objective. This study examines the performance indicators of a solar-powered lithium bromide absorption chiller (LBAC) in the climate conditions of Astrakhan. **Method.** A new mathematical model based on simulation data was developed and verified to analyze the system's performance. The model's accuracy was validated by comparing it with existing data, and calculations were performed to determine the required number of solar collectors. **Result.** The study showed that the efficiency of the LBAC depends on the mode of coolant supply to the absorber and condenser of the LBAC. Parallel supply demonstrated better results in terms of thermal coefficient. The dynamics of the thermal load on the generator showed that solar insolation directly affects system performance, achieving maximum efficiency at high levels of solar energy. **Conclusion.** The results of this study can be used to design and optimize cooling systems in hot climates, promoting more efficient use of solar energy and enhancing energy efficiency.

Keywords: energy efficiency, refrigeration system modeling, lithium bromide absorption refrigeration machine, solar energy, thermal energy storage, actual thermodynamic cycle.

For citation: S.Z. Bayramov, O.S. Malinina, A.V. Baranenko. Investigation of an Absorption Refrigeration System in the Climatic Conditions of Astrakhan Using Solar Collectors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):6-17. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-6-17

Введение. Повышение энергоэффективности систем холодоснабжения весьма актуально и является одним из основных трендов развития техники низких температур. Широкое применение абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин (АБХМ) с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) обеспечивает экономию энергоресурсов. Исследованию систем холодоснабжения на базе АБХМ посвящено большое количество работ [1 – 11].

В работе [1] проведено экспериментальное исследование эффективности системы холодоснабжения на базе одноступенчатой АБХМ с использованием солнечных коллекторов для охлаждения конференц-зала. Авторы статьи [2] представили систему с использованием АБХМ на солнечной энергии для кондиционирования воздуха и получения пресной воды, где охлаждающей средой являлась морская вода.

В исследовании [3] авторами рассматривалась система холодоснабжения с гелиопреобразователями на базе АБХМ, работающая от солнечной энергии и природного газа, для торговых центров в Барранкилье, Колумбия. Результаты показали, что данная система может уменьшить выбросы парниковых газов. В работе [4] выполнена экспериментальная оценка эффективности АБХМ, разработанной для высокоэффективной системы охлаждения с использованием солнечных гелиопреобразователей энергии. Авторами статьи [5] предложена новая комбинированная система электро- и холодоснабжения с использованием одноступенчатой АБХМ и солнечных коллекторов для региона Доха, Катар. В статье [6] выполнен анализ эффективности АБХМ с двухступенчатой генерацией раствора для системы холодоснабжения центра обработки данных. В исследовании [7] предложена интеграция установки обратного осмоса и комбинированной системы холодоснабжения на базе одноступенчатой АБХМ и опреснения воды.

Результаты показали, что использование интеграционной системы снижает потребление электроэнергии системы холодоснабжения. В работе [8] на основе эксперимента выполнена оценка эффективности одноступенчатой АБХМ в системе кондиционирования жилых помещений. В статье [9] рассмотрена комбинированная компрессорно-абсорбционная система кондиционирования воздуха для климатических условий Алжира. Авторами исследования [10] предлагается система холодоснабжения, состоящая из одноступенчатой АБХМ с солнечными коллекторами и установки ночного радиационного охлаждения (НРО). Данная система включает в себя специализированный модуль, который служит для сбора солнечной тепловой энергии для работы АБХМ в дневное время и для реализации НРО в ночное время. Авторы работы [11] исследовали систему холодоснабжения на базе АБХМ с двухступенчатой генерацией раствора, работающую совместно с гелиопреобразователями солнечной энергии в условиях субтропического климата Гуанчжоу, Китай. В статье [12] приведены результаты исследования коллектора комбинированного типа с селективным покрытием, обеспечивающим поглощение теплоты солнечной радиации днем и излучение теплоты в космическое пространство ночью, применительно к использованию в системах охлаждения на базе АБХМ.

В рассмотренных исследованиях авторы использовали методы математического и имитационного моделирования, которые позволяют анализировать компоненты системы и прогнозировать их работу. Имитационные модели широко применяются для изучения различных инженерных систем, в том числе систем холодоснабжения на базе АБХМ [13 – 19].

В литературных источниках [13, 14] разработаны математические модели системы холодоснабжения на базе АБХМ для климатических условий Индонезии. Целью статьи [15] являлся поиск наиболее эффективного чиллера, работающего в связке с гелиопреобразователями тепловой энергии. Моделирование проводилось с использованием сред MATLAB и TRNSYS. В работе [16] использована среда MATLAB/Simulink для разработки математической модели системы холодоснабжения с использованием одноступенчатой АБХМ и солнечных вакуумных коллекторов в условиях климата Маана, Иордания. Авторы статьи [17] провели моделирование системы холодоснабжения на базе АБХМ, работающей на солнечной энергии в программной среде TRNSYS для кондиционирования воздуха в школе, расположенной в Пуэртеситос, Мексика. Целью работы [18] была разработка и проверка математической модели АБХМ для системы кондиционирования воздуха в климатических условиях Испании с использованием среды TRNSYS. В статье [19] проведено моделирование системы холодоснабжения с помощью программного обеспечения MATLAB для пяти климатических зон Алжира.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что системы холодоснабжения на базе АБХМ с использованием солнечной энергии представляют собой активно развивающийся сегмент холодильной техники, что подтверждается большим объемом публикаций в этой области. В рамках данных исследований особое внимание уделяется разработке и совершенствованию математических и имитационных моделей, которые направлены на анализ и оптимизацию работы АБХМ. Однако, несмотря на разнообразие моделей, все они обладают определенными ограничениями, касающимися точности расчетов и применимости в различных условиях. Результаты исследований, полученные с использованием существующих моделей, в большинстве случаев не могут быть адаптированы к другим климатическим условиям.

Постановка задачи. Цель работы состоит в исследовании показателей системы холодоснабжения на базе одноступенчатой АБХМ на солнечной энергии в условиях климата г. Астрахани, а также в расчете необходимого количества солнечных коллекторов на основе данных имитационного моделирования.

Методы исследования. Используемая в данном исследовании имитационная модель базируется на математической модели, позволяющей определять термодинамические параметры водного раствора бромида лития в широком диапазоне температур и концентраций, обеспечивая гибкость анализа и достигая точности с отклонением, в среднем, порядка 3%.

Исследуемая система холодоснабжения состоит из солнечных коллекторов, АБХМ, аккумулятора тепловой энергии, градирни и потребителя холода. Проанализированы различные схемы подачи охлаждающей среды через абсорбер и конденсатор АБХМ: параллельная, последовательная и противоточная. Энергоэффективность системы повышается за счет использования солнечных коллекторов и аккумуляторов теплоты. Солнечные коллекторы выступают в роли греющего источника.

Аккумулятор тепла позволяет поддерживать требуемую температуру охлаждения в ночное время и компенсировать пиковые нагрузки в течение дня. АБХМ работает по действительному, с учетом необратимых потерь, одноступенчатому термодинамическому циклу. Принцип действия и описание термодинамических процессов представлены в литературе [20, 21].

Имитационная модель системы холодоснабжения на базе АБХМ. Функциональная схема подключения системы холодоснабжения на базе АБХМ с использованием солнечных коллекторов и аккумулированием тепловой энергии представлена на рис. 1 [22]. Основой данной системы является АБХМ, которая состоит из пяти основных теплообменных аппаратов: генератор, конденсатор, абсорбер, испаритель и растворный теплообменник, а также включает в себя различное вспомогательное оборудование. Процессы, происходящие в теплообменных аппаратах АБХМ, обеспечивают выработку холода для системы

кондиционирования. Для осуществления рабочего цикла АБХМ необходим подвод теплоты от греющего источника в генератор. Тепло, выделяющееся в конденсаторе и абсорбере, отводится с помощью оборотной воды, охлаждаемой в градирне.

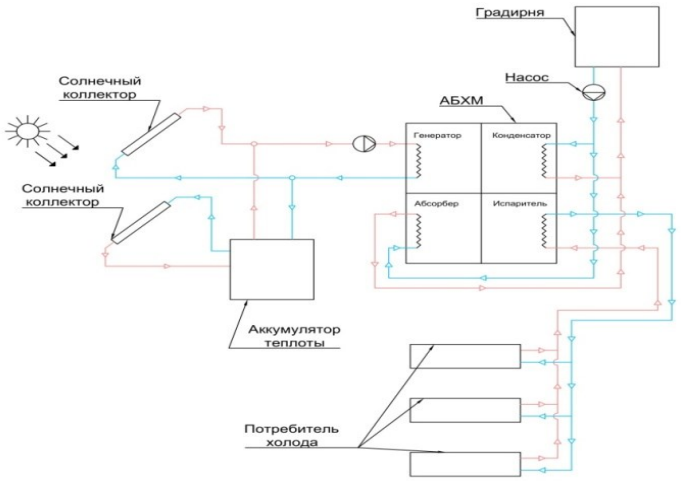

Рис. 1 - Функциональная схема подключений системы холодоснабжения на базе АБХМ с параллельной подачей охлаждающей воды в конденсатор и абсорбер
Fig. 1 - Functional diagram of the cooling system connections based on an absorption lithium bromide chiller with parallel supply of cooling water to the condenser and absorber

При выполнении теплового расчета действительного термодинамического цикла АБХМ используются уравнения для определения термодинамических параметров водного раствора бромида лития и энергетических показателей [20, 21, 23]:

Кратность циркуляции раствора $a = \frac{\xi_r}{\Delta\xi}$

где $\Delta\xi$ – зона дегазации, %.

Удельные тепловые потоки аппаратов, кДж/кг

Испаритель $q_0 = h_{1'} - h_3$

Конденсатор $q_к = h_{3'} - h_3$

Абсорбер $q_a = h_{1'} + (a-1)\cdot h_8 - a\cdot h_2$

Генератор $q_h = h_{3'} + (a-1)\cdot h_4 - a\cdot h_7$

Теплообменник растворов $q_т = (a-1)\cdot(h_4 - h_8)$

Тепловой коэффициент $\zeta = \frac{q_0}{q_h}$

Для определения энергетических показателей холодильной машины, необходимо определить массу рабочего вещества (D, кг/с), циркулирующего через аппараты $D = \frac{Q_0}{q_0}$.

Расход рабочего вещества будет одинаков для любого аппарата холодильной машины.

Полная тепловая нагрузка на теплообменный аппарат, кВт

$$Q_i = D\cdot q_i$$

где i – наименование аппарата.

Уравнения для расчета параметров коллектора изложены в литературе [24]:

Площадь поверхности плоского коллектора, м^2

$$S = a \cdot b$$

где a – длина коллектора, м; b – ширина коллектора, м

Площадь поверхности вакуумного коллектора, м^2

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = \pi \cdot d \cdot h$$

где r – радиус трубки, м; d – диаметр трубки, м; h – длина трубки, м.

Тепловой поток одной трубки/панели солнечного коллектора, кВт

$$Q_{sun} = S \cdot E \cdot \eta$$

где S – площадь трубки/панели, м^2; E – плотность потока солнечной радиации, кВт/м^2; η – КПД коллектора.

Общее количество трубок/панелей коллектора, шт.

$$N_{sun} = \frac{Q_h}{Q_{sun}}$$

Блок-схема имитационной модели. На основе функциональной схемы подключения, представленной на рис. 1, была разработана математическая модель, которая послужила основой для создания имитационной модели. Имитационная модель разработана в соответствии с блок-схемой, показанной на рис. 2.

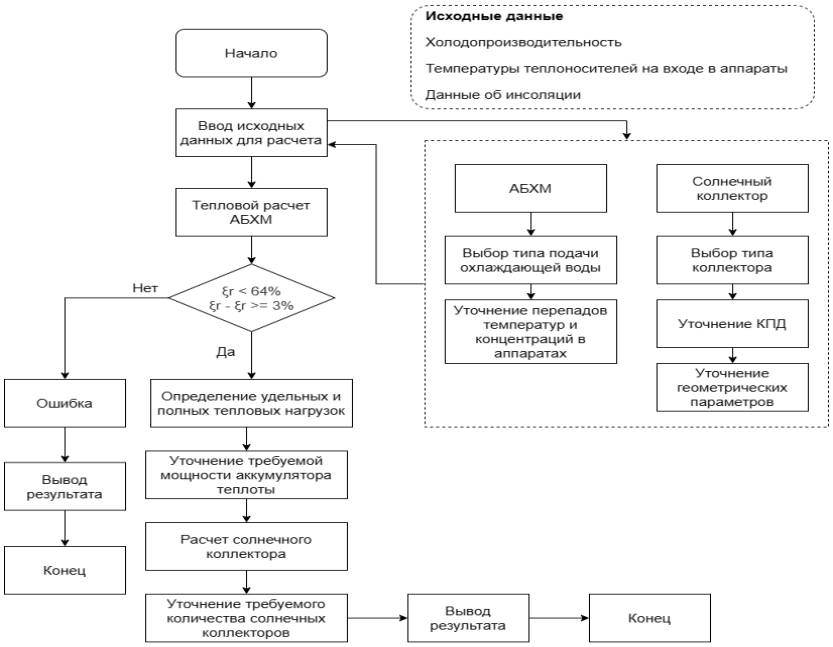

Рис. 2 - Блок-схема имитационной модели
Fig. 2 - Block diagram of the simulation model

При разработке модели приняты следующие допущения:отсутствует фактор загрязненности солнечных коллекторов; максимально допустимая концентрация водного раствора бромида лития в АБХМ составляет не более 64%; зона дегазации раствора менее 3% недопустима ввиду увеличения необратимых потерь машины.

Термодинамические параметры водного раствора бромида лития определяются согласно математической модели, описывающей состояние раствора в широких диапазонах значений [23]. Адекватность предложенной математической модели была проверена путем расчетов систем охлаждения из работ [14, 16, 18] и сравнения полученных результатов с данными, представленными в названных работах. Сопоставление показало расхождения не более 7%. Расчеты системы охлаждения для условий г. Астрахани с использованием известных моделей показали некорректные результаты, что по всей видимости связано с тем, что данные модели не адаптированы к климатическим условиям г. Астрахани.

С использованием модели проведены расчет и анализ системы холодоснабжения 3 этажного остекленного офисного здания, расположенного в городе Астрахань, при следующих исходных данных: холодопроизводительность Q_O = 150 кВт, температура охлаждаемой среды t_{s1} = 12 °С, температура охлаждающей воды принята равной t_{w1} = 30°С, температура греющего источника варьировалась в пределах t_{h1} = (96 ÷ 106)°С, необратимые потери действительного цикла были приняты согласно рекомендациям, изложенным в [20, 21]. Климатические данные, необходимые для проведения расчета (согласно СП131.13330.2020): температура окружающей среды $t_{o.c}$ = 33°С, среднее. Показатель плотности потока солнечной радиации определяется за период с апреля по сентябрь, так как в указанное время года в выбранном регионе требуется функционирование системы холодоснабжения.

Данные о распределении солнечной радиации по часам за указанный период в городе Астрахань представлены на рис. 3 [25].

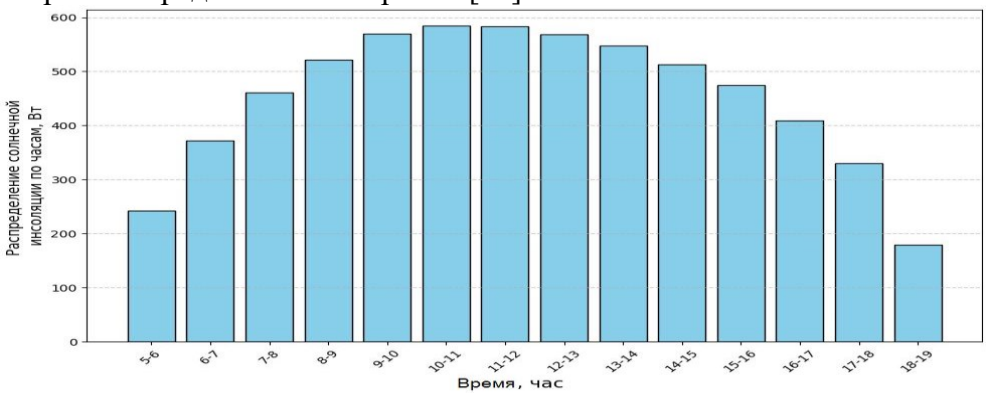

Рис. 3 - Распределение солнечной радиации по часам за выбранный период, Вт/м²
Fig. 3 - Hourly distribution of solar radiation for the selected period, W/m²

Солнечные коллекторы бывают различных типов и конструкций, каждая из которых подходит для определенных условий эксплуатации. Выбор оптимальной конструкции солнечного коллектора определяется рядом факторов, включая эффективность, стоимость и условия окружающей среды. Для изучаемой системы охлаждения, в которой температура теплоносителя не превышает 110 °С, целесообразно использовать плоские коллекторы, отличающиеся простотой и относительно невысокой стоимостью [26].

Среди наиболее распространенных выделяют:

- солнечные панели – простейшие по конструкции, подходящие для летнего периода. Ключевой элемент в них абсорбер, от качества которого зависит общая эффективность.
- вакуумные коллекторы – их конструкция сложнее первых, в то же время обеспечивающая более высокую эффективность. Вакуум позволяет снизить теплопотери, что делает их пригодными для использования не только в летний, но и переходные периоды. Кроме того, их устройство обеспечивает легкую замену трубок при поломке, что повышает общую надежность системы.

Ввиду более высокой эффективности, простоты ремонта, возможности работы в переходные периоды в исследуемой системе холодоснабжения были выбраны вакуумные солнечные коллекторы. При анализе действительного термодинамического цикла АБХМ рассматривалась параллельная подача охлаждающей среды в абсорбер и конденсатор, последовательная подача из абсорбера в конденсатор и противоточная подача из конденсатора в абсорбер.

Обсуждение результатов. На рис. 4 (a, b) представлены результаты расчета теплового коэффициента и теплового потока аккумулятора тепловой энергии при различной подаче охлаждающей среды через аппараты, где t_{h1} – температура греющего источника на входе в генератор, ζ – тепловой коэффициент, Q – тепловая нагрузка генератора.

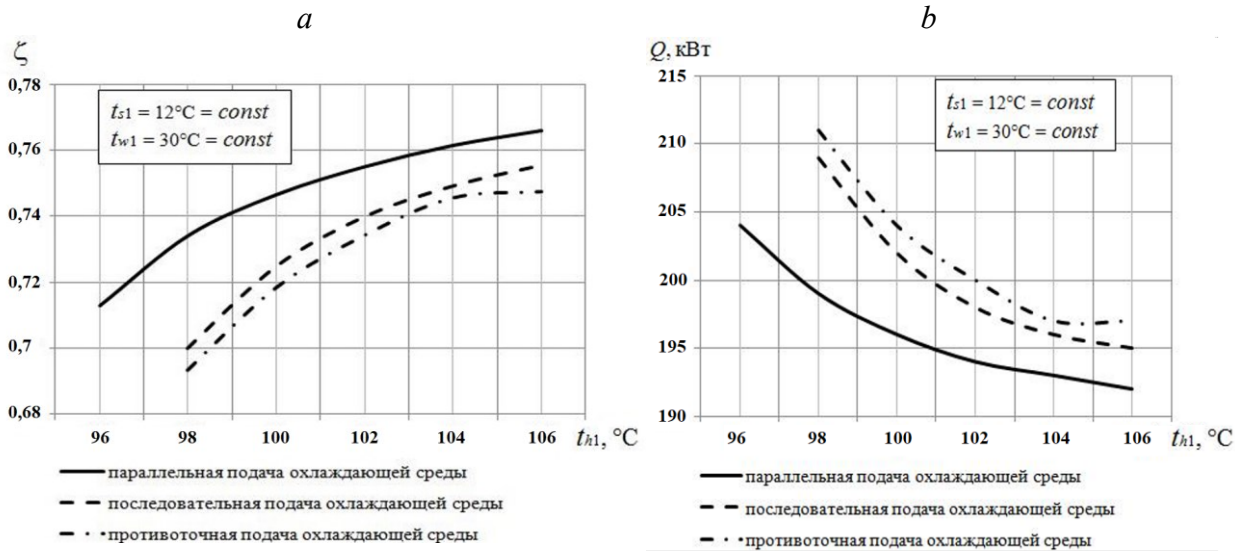

Рис. 4 - Результаты расчета теплового коэффициента (a)
и теплового потока аккумулятора тепловой энергии (b)
Fig. 4 - Calculation results of the thermal coefficient (a)
and the heat flow of the thermal energy storage (b)

Из графика на рис. 4 (a) видно, что с увеличением температуры греющего источника в указанном диапазоне происходит постепенное повышение теплового коэффициента ζ для всех рассмотренных режимов подачи охлаждающей среды. При параллельной подаче охлаждающей среды тепловой коэффициент увеличивается с 0,72 до 0,76; при последовательной подаче с 0,69 до 0,74; при противоточной подаче с 0,68 до 0,74.

Результаты показывают, что наиболее эффективной является параллельная подача охлаждающей среды, что объясняется более равномерным распределением тепловых потоков между абсорбером и конденсатором, что приводит к лучшему отводу теплоты. В свою очередь значение теплового потока аккумулятора тепловой энергии для обогрева генератора снижается при параллельной подаче охлаждающей среды с 207 до 197 кВт; при последовательной подаче охлаждающей среды с 211 до 198 кВт; при противоточной подаче охлаждающей среды с 213 до 200 кВт (рис. 4, b). Оптимальный режим наблюдается при $\Delta\xi$ = 5 % для параллельной подачи охлаждающей воды. При этом значения рабочих параметров равны ζ = 0,74, t_{h1} = 98 °C, Q_h = 203 кВт.

В соответствии с приведенным раннее методом расчета требуемого количества солнечных коллекторов, определим их количество, зная информацию о типе и характеристиках коллектора, требуемой тепловой нагрузке на генератор АБХМ, величине солнечной инсоляции по часам за рассматриваемый период. Так, для пикового значения Q_h = 203 кВт, апертурной площади вакуумного коллектора S = 2,84 м^2 и значения солнечной инсоляции E = 0,4 кВт/м^2, требуемое количество коллекторов составит 185 шт. В то же время, для обеспечения требуемого количества теплоты достаточно 70% от рассчитанного количества солнечных коллекторов, что равно 120 шт., ввиду меняющейся в течение дня потребности в холоде, и следовательно, нагрузке на генератор АБХМ, а также наличия аккумулятора тепловой энергии.

Рис. 5 иллюстрирует работу системы холодоснабжения в динамике по часам, отражая время заряда и использования аккумулятора теплоты для компенсации требуемого количества теплоты в пиковые часы. В системе охлаждения рассматривается аккумулятор теплоты с использованием жидкого теплоносителя – водного раствора пропиленгликоля массовой концентрацией 37%.

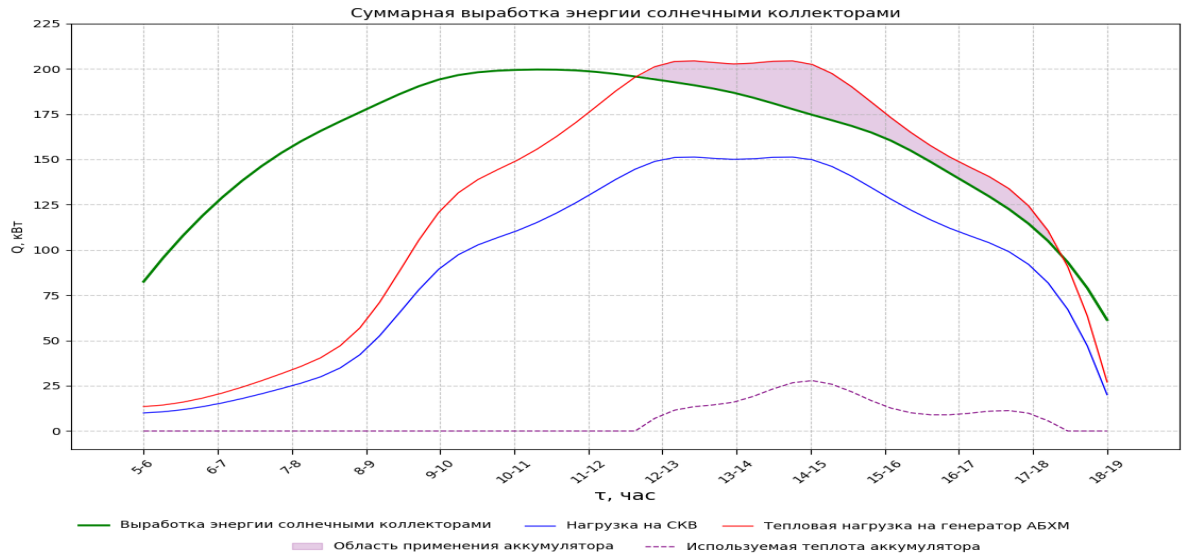

Рис. 5 - Динамика работы системы холодоснабжения, при изменении значения солнечной инсоляции в течение дня
Fig. 5 - Dynamics of the cooling system operation with changing solar irradiation throughout the day

На рис. 5 представлена динамика работы системы холодоснабжения в зависимости от изменения уровня солнечной инсоляции в течение дня. Данные иллюстрируют, как различные уровни инсоляции влияют на фактическое количество тепловой энергии, получаемой от солнечного коллектора, а также на разницу между требуемым и фактическим значениями теплоты.

В утренний период (6:00 – 9:00) солнечные коллекторы начинают вырабатывать тепловую энергию, которая направляется на заряд аккумулятора теплоты. Низкая потребность в охлаждении со стороны СКВ в это время позволяет накопить избыточное тепло для дальнейшего использования в течение дня. В основной рабочий период (9:00 – 18:00) солнечные коллекторы функционируют следующим образом. С 9:00 до 12:00 выработка тепловой энергии солнечными коллекторами достигает максимума. В этот период времени необходимость в охлаждении начинает расти, и выработанное тепло направляется на обеспечение генератора АБХМ. С 12:00 до 17:30 потребность в охлаждении достигает пиковых значений, что связано с повышением температуры окружающей среды и увеличением нагрузки на систему холодоснабжения. В случае недостаточной выработки тепла аккумуляторы теплоты компенсируют дефицит и поддерживают работу генератора. После 17:30 необходимость в охлаждении постепенно снижается, что уменьшает нагрузку на систему.

Важно отметить, что выработка тепловой энергии с солнечными коллекторами неравномерна и подвержена колебаниям из-за изменения уровня инсоляции в течение дня. Это приводит к временному дисбалансу между необходимым количеством теплоты для генератора и фактически доступной теплотой. Для обеспечения стабильной работы системы применяются аккумуляторы теплоты. Они компенсируют нехватку энергии в периоды сниженной солнечной активности, поддерживая эффективную работу системы даже при изменяющихся климатических условиях.

Ввиду этого, можно заключить, что, система холодоснабжения на базе АБХМ с использованием солнечных коллекторов и аккумуляторов тепловой энергии позволяет надежно покрыть потребность в охлаждении. Применение аккумуляторов обеспечивает бесперебойную работу системы, нивелируя влияние колебаний солнечной инсоляции, и способствует эффективному использованию возобновляемых источников энергии.

В табл. 1 представлены характеристики работы, рассмотренной системы холодоснабжения.

Таблица 1. Характеристики системы холодоснабжения
Table 1. Characteristics of the refrigeration system

Параметр Parameter	**Значение Value**
Одноступенчатая АБХМ Single-stage ABSM	
Тип подачи охлаждающей воды Cooling water supply type	Параллельная Parallel
Холодопроизводительность, кВт Cooling capacity, kW	150
Тепловая нагрузка генератора, кВт Generator thermal load, kW	203
Температура греющего источника на входе в генератор, °С Temperature of heating source at generator inlet, °С	98
Температура охлаждающей воды, °С Cooling water temperature, °С	30
Температура охлаждаемой среды, °СTemperature of cooled medium, °С	12
Аккумулятор теплоты Heat accumulator	
Часы заряда, ч Charging hours, h	6
Часы разряда, ч Discharging hours, h	5:30
Ёмкость, кВтч Capacity, kWh	60
Объем, м^3 Volume, m^3	5,2
Тип Type	ёмкостной capacitive
Температурный диапазон Temperature range	110 – 118
Теплоноситель Coolant	Водный раствор пропиленгликоля, 37 % масс/ Propylene glycol aqueous solution, 37% by weight
Вакуумные солнечные коллекторы Vacuum solar collectors	
Апертурная площадь, м^2 Aperture area, m^2	2,84
Длина трубки, м Tube diameter, m	1,8
Диаметр трубки, м Tube length, m	0,035
Количество трубок в 1 панели, шт. Number of tubes in 1 panel, pcs.	30
Размеры, м Dimensions, m	2 x 2,2
КПД Efficiency	70 %
Температурный диапазон, °С Temperature range, °С	110 – 118
Требуемое количество панелей, шт. Required number of panels, pcs	120

Вывод. В современных условиях устойчивое развитие и использование возобновляемых источников энергии становятся все более актуальными, поэтому исследование систем холодоснабжения на основе абсорбционных холодильных машин на солнечной энергии приобретает особую значимость. Цель данной работы заключалась в изучении показателей таких систем в климатических условиях г. Астрахани и в расчете необходимого количества солнечных коллекторов для их эффективной работы.

Анализ показал, что эффективность работы АБХМ значительно зависит от режима подачи охлаждающей среды. Параллельная подача демонстрирует лучшие результаты по величине теплового коэффициента и может быть рекомендована для применения в условиях повышенных температур. Динамика тепловой нагрузки на генератор также показала, как солнечная инсоляция влияет на производительность системы, с увеличением которой возрастает эффективность установки.

Результаты исследования подтверждают целесообразность использования солнечной энергии для обеспечения работы абсорбционных холодильных систем в жарком климате. Использование таких систем не только повышает их энергоэффективность, но и способствует экологической устойчивости, что является важным аспектом энергосберегающих технологий.

Благодарности. Статья написана в рамках выполнения научно-исследовательской работы №622295 «Экологически безопасные технологии энергосбережения и повышения эффективности низкотемпературных систем и преобразователей энергии».

Aknowledgements. The article was written as part of the research work No. 622295 "Environmentally friendly technologies of energy saving and increasing the efficiency of low-temperature systems and energy converters".

Библиографический список:

1. Li M., Xu C., Hassanien R.H.E., Xu Y., Zhuang B. Experimental investigation on the performance of a solar powered lithium bromide-water absorption cooling system // International Journal of Refrigeration. 2016. V. 71. P. 46–59.
2. López-Zavala R., Velázquez-Limón N., González-Uribe L.A., Aguilar-Jiménez J.A., Alvarez-Mancilla J., Acuña A., Islas S. A novel LiBr/H2O absorption cooling and desalination system with three pressure levels // International Journal of Refrigeration. 2019. V. 99. P. 469–478.
3. Rodriguez-Toscano A., Amaris C., Sagastume-Gutirerrez A., Bourouis M. Technical, environmental, and economic evaluation of a solar/gasdriven absorption chiller for shopping malls in the Caribbean region of Colombia // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. V. 30. P. 101743.
4. Xu Z.Y., Wang R.Z., Wang H.B. Experimental evaluation of a variable effect LiBr-water absorption chiller designed for high-efficient solar cooling system // International Journal of Refrigeration. 2015. V. 59. P. 135–143.
5. Nedaei N., Hamrang F., Garousi Farshi L. Design and 3E analysis of a hybrid power plant integrated with a single-effect absorption chiller driven by a heliostat field: A case study for Doha, Qatar// Energy.2022. V. 239. P. 122415.
6. Han B., Li W., Li M., Liu L., Song J. Study on LiBr/H2O absorption cooling system based on enhanced geothermal system for data center // Energy Reports. 2020. V. 6. P. 1090–1098.
7. Jalili B., Rezaeian A., Jalili P., Ganji D.D. The hybrid absorption cooling-desalination and reverse osmosis system to boost energy utilization efficiency // Energy Reports. 2023. V. 9. P. 5101–5110.
8. Chen J.F., Dai Y.J., Wang H.B., Wang R.Z. Experimental investigation on a novel air-cooled single effect LiBr-H2O absorption chiller with adiabatic flash evaporator and adiabatic absorber for residential application // Solar Energy. 2018. V. 159. P. 579–587.
9. Salhi K., Korichi M., Ramadan K.M. Thermodynamic and thermo-economic analysis of compression-absorption cascade refrigeration system using low-GWP HFO refrigerant powered by geothermal energy // International Journal of Refrigeration. 2018. V. 94. P. 214–229.
10. Hu T., Kwan T.H., Pei G. An all-day cooling system that combines solar absorption chiller and radiative cooling // Renewable Energy. 2022. V. 186. P. 831–844.
11. Li Z., Ye X., Liu J. Performance analysis of solar air cooled double effect LiBr/H2O absorption cooling system in subtropical city // Energy Conversion and Management. 2014. V. 85. P. 302–312.
12. Камара С., Сулин А. Б., Лысёв В. И. Аналитическое исследование производительности коллектора комбинированного типа для солнечного нагрева и ночного радиационного охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2022. № 1. С. 26–36. DOI: 10.17586/1606 4313 2022 21 1-26-36
13. Lubis A., Jeong J., Saito K., Giannetti N., Yabase H., Alhamid M.I., Nasruddin N. Solar-assisted single-double-effect absorption chiller for use in Asian tropical climates // Renewable Energy. 2016. V. 99. P. 825–835.
14. NasruddinN., Aisyah N., Alhamid M.I., Saha B.B., Sholahudin S., Lubis A. Solar absorption chiller performance prediction based on the selection of principal component analysis // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. V. 13. P. 100391.
15. Xu Z.Y., Wang R.Z. Comparison of CPC driven solar absorption cooling systems with single, double and variable effect absorption chillers // Solar energy. 2017. V. 158. P. 511–519.
16. Marashli A., Alfanatseh E., Shalby M., Gomaa M.R. Modelling single-effect of Lithium Bromide-Water (LiBr-H2O) driven by an evacuated solar tube collector in Ma'an city (Jordan) case study // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. V. 37. P. 102239.
17. Aguilar-Jimenez J.A., Velazquez-Limon N., Lopez-Zavala R., Gonzalez-Uribe L.A., Islas S., Gonzalez E., Ramirez L., Beltran R. Optimum operational strategies for a solar absorption cooling system in an isolated school of Mexico // International Journal of Refrigeration. 2020. V. 112. P. 1–13.
18. Martínez P.J., Martínez J.C., Martínez P. Performance comparison of solar autonomous and assisted absorption systems in Spain // International Journal of Refrigeration. 2016. V. 71. P. 85–93.
19. Ketfi O., Merzouk M., Kasbadji N.M., Bourouis M. Feasibility study and performance evaluation of low capacity water-LiBr absorption cooling systems functioning in different Algerian climate zones // International Journal of Refrigeration.2017. V. 82. P. 36–50.
20. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Тимофееский Л.С. Холодильные машины. СПб.: Политехника, 2006. 944 с.

21. Бараненко А.В., Тимофеевский Л.С., Долотов А.Г., Попов А.В. Абсорбционные преобразователи теплоты. СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. 338 с.
22. Малинина О.С., Бараненко А.В., Байрамов Ш.З. Оценка эффективности системы холодоснабжения на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины с аккумулированием тепловой энергии // Материалы 13-й Международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства». Омск: ОмГТУ, 2023. – С. 41–42.
23. Галимова Л.В., Байрамов Д.З., Байрамов Ш.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.
24. Велижанин А.А., Мингалеева Р.Д., Бессель В.В., Серовайский А.Ю. Изучение устройства и принципа действия солнечного коллектора: Учебно-методическое пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2023. 74 с.
25. Available: https://globalsolaratlas.info/detail?c=46.321801,48.056602,11&s=46.346928,48.055573. Global Solar Atlas, Accessed: Oct. 14, 2023. [Online].
26. Торопов А.Л. Комбинированные тепловые гелиосистемы. Ч. 1. Тепловые солнечные коллекторы для индивидуальных и децентрализованных систем отопления и горячего водоснабжения: учебное пособие. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2019. – 88 с.

References:

1. Li M., Xu C., Hassanien R.H.E., Xu Y., Zhuang B. Experimental investigation on the performance of a solar powered lithium bromide-water absorption cooling system. *International Journal of Refrigeration*. 2016;71:46–59.
2. López-Zavala R., Velázquez-Limón N., González-Uribe L.A., Aguilar-Jiménez J.A., Alvarez-Mancilla J., Acuña A., Islas S. A novel LiBr/H2O absorption cooling and desalination system with three pressure levels *International Journal of Refrigeration*. 2019;99:469–478.
3. Rodriguez-Toscano A., Amaris C., Sagastume-Gutirerrez A., Bourouis M. Technical, environmental, and economic evaluation of a solar/gasdriven absorption chiller for shopping malls in the Caribbean region of Colombia *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;30:101743.
4. Xu Z.Y., Wang R.Z., Wang H.B. Experimental evaluation of a variable effect LiBr-water absorption chiller designed for high-efficient solar cooling system. *International Journal of Refrigeration*. 2015;59:135–143.
5. Nedaei N., Hamrang F., Garousi Farshi L. Design and 3E analysis of a hybrid power plant integrated with a single-effect absorption chiller driven by a heliostat field: A case study for Doha, Qatar. *Energy* Reports. 2022; 239: 122415.
6. Han B., Li W., Li M., Liu L., Song J. Study on LiBr/H2O absorption cooling system based on enhanced geothermal system for data center. *Energy Reports*. 2020;6:1090–1098.
7. Jalili B., Rezaeian A., Jalili P., Ganji D.D. The hybrid absorption cooling-desalination and reverse osmosis system to boost energy utilization efficiency. Energy Reports. 2023; 9:5101–5110.
8. Chen J.F., Dai Y.J., Wang H.B., Wang R.Z. Experimental investigation on a novel air-cooled single effect LiBr-H2O absorption chiller with adiabatic flash evaporator and adiabatic absorber for residential application. *Solar Energy*. 2018;159:579–587.
9. Salhi K., Korichi M., Ramadan K.M. Thermodynamic and thermo-economic analysis of compression-absorption cascade refrigeration system using low-GWP HFO refrigerant powered by geothermal energy. *International Journal of Refrigeration*. 2018; 94: 214–229.
10. Hu T., Kwan T.H., Pei G. An all-day cooling system that combines solar absorption chiller and radiative cooling. *Renewable Energy*. 2022;186: 831–844.
11. Li Z., Ye X., Liu J. Performance analysis of solar air cooled double effect LiBr/H2O absorption cooling system in subtropical city. *Energy Conversion and Management*. 2014;85: 302–312.
12. Kamara S., Sulin A.B., Lysev V.I. Analytical study of the performance of a combined-type collector for solar heating and nocturnal radiative cooling. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2022;1:26–36. DOI: 10.17586/1606 4313 2022 21 1-26-36 (In Russ.)
13. Lubis A., Jeong J., Saito K., Giannetti N., Yabase H., Alhamid M.I., Nasruddin N. Solar-assisted single-double-effect absorption chiller for use in Asian tropical climates. *Renewable Energy.* 2016; 99: 825–835.
14. NasruddinN., Aisyah N., Alhamid M.I., Saha B.B., Sholahudin S., Lubis A. Solar absorption chiller performance prediction based on the selection of principal component analysis. *Case Studies in Thermal Engineering.* 2019;13:100391.
15. Xu Z.Y., Wang R.Z. Comparison of CPC driven solar absorption cooling systems with single, double and variable effect absorption chillers. *Solar energy*. 2017;158: 511–519.
16. Marashli A., Alfanatseh E., Shalby M., Gomaa M.R. Modelling single-effect of Lithium Bromide-Water (LiBr-H2O) driven by an evacuated solar tube collector in Ma'an city (Jordan) case study. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;37:102239.

17. Aguilar-Jimenez J.A., Velazquez-Limon N., Lopez-Zavala R., Gonzalez-Uribe L.A., Islas S., Gonzalez E., Ramirez L., Beltran R. Optimum operational strategies for a solar absorption cooling system in an isolated school of Mexico. *International Journal of Refrigeration*. 2020;112:1 – 13.
18. Martínez P.J., Martínez J.C., Martínez P. Performance comparison of solar autonomous and assisted absorption systems in Spain. *International Journal of Refrigeration*. 2016;71:85–93.
19. Ketfi O., Merzouk M., Kasbadji N.M., Bourouis M. Feasibility study and performance evaluation of low capacity water-LiBr absorption cooling systems functioning in different Algerian climate zones. *International Journal of Refrigeration.*2017; 82:36–50.
20. Baranenko A.V., Bukharin N.N., Pekarev V.I., Timofeevsky L.S. Refrigeration Machines. St. Petersburg: Polytechnica, 2006: 944. (In Russ.)
21. Baranenko A.V., Timofeevsky L.S., Dolotov A.G., Popov A.V. Absorption Heat Converters. St. Petersburg: SPbSUT, 2005: 338. (In Russ.)
22. Malinina O.S., Baranenko A.V., Bayramov Sh.Z. Evaluation of the efficiency of a cooling system based on an absorption lithium bromide chiller with thermal energy storage // Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference "Techniques and Technology of Petrochemical and Oil and Gas Production". Omsk: Omsk State Technical University, 2023; 41 – 42. (In Russ.)
23. Galimova L.V., Bayramov D.Z., Bayramov Sh.Z. Methodology for the preliminary design of a scientifically substantiated scheme for optimizing an energy-saving system based on a combined cycle power plant and an absorption lithium bromide chiller. *Refrigeration Technology*. 2020;1: 28–33. (In Russ.)
24. Velizhanin A.A., Mingaleeva R.D., Bessel V.V., Serovaysky A.Yu. Study of the structure and operating principle of a solar collector: Educational and Methodological Guide. – Moscow: Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2023:74. (In Russ.)
25. Available:https://globalsolaratlas.info/detail?c=46.321801,48.056602,11&s=46.346928,48.055573.Global Solar Atlas, Accessed: Oct. 14, 2023.[Online].
26. Toropov A.L. Combined Thermal Solar Systems. Part 1. Thermal Solar Collectors for Individual and Decentralized Heating and Hot Water Supply Systems: Textbook. – Moscow: Publishing House of the Academy of Natural Sciences, 2019: 88. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Александр Владимирович Бараненко, доктор технических наук, профессор; avbaranenko@itmo.ru, ORCID: 0000-0003-3675-9513

Ольга Сергеевна Малинина, кандидат технических наук, доцент; osmalinina@itmo.ru, ORCID: 0000-0002-1513-4672

Шамиль Загидович Байрамов, аспирант; bairamov.shamil@mail.ru, ORCID: 0009-0001-8090-3327

Information about authors:

Aleksandr V. Baranenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof.; avbaranenko@itmo.ru, ORCID: 0000-0003-3675-9513

Olga S. Malinina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; osmalinina@itmo.ru, ORCID: 0000-0002-1513-4672

Shamil Z. Bayramov, PhD Student; bairamov.shamil@mail.ru, ORCID: 0009-0001-8090-3327

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 19.03.2025.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 21.04.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 22.04.2025.