
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

**АБСОРБЦИОННАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЕГИПТА**

© 2025 г. К. Bakry^{a, *}, I. El-Mahallawi^{a, b}, H. Safwat^a

^aThe British University in Egypt, Faculty of Engineering, Cairo, 11837 Egypt

^bCairo University Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Cairo, 12613 Egypt

*e-mail: kholoud.bakry@gmail.com

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

После доработки 18.06.2024 г.

Принята к публикации 04.07.2024 г.

В связи с изменением климата в Египте (сильным потеплением) и планами страны по переходу на альтернативные источники энергии возникает необходимость создания экологически чистых систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Рассматривается возможность установки в административных зданиях солнечных абсорбционных систем охлаждения, таких как в библиотеке Британского университета (British University) в Египте, занимающей площадь 4402 м². Решением может стать замена 30% имеющихся обычных кондиционеров однокорпусными абсорбционными охладителями, в которых в качестве источника тепла используется горячая вода. Для нагрева воды, в свою очередь, применяется система, состоящая из солнечного коллектора с термовакуумными трубками и резервуара-аккумулятора горячей воды со стратификацией температуры по высоте. Согласно вычислениям, площадь солнечных коллекторов должна составлять 856 м². Подробный анализ проводился по уточненной модели системы с помощью программного пакета TRNSYS (Transient Simulation System Software), предназначенного для моделирования и расчета переходных режимов в оборудовании. В соответствии с полученными данными, оптимальный объем резервуара-аккумулятора горячей воды со стратификацией температуры по высоте должен быть равен 10 м³, а удельный объем бака на единицу площади солнечных коллекторов – 0.01 м³/м². Благодаря предложенной системе можно обеспечить охлаждение воздуха в здании библиотеки в течение 8–9 мес в году без использования вспомогательного нагревателя и снизить потребности в электроэнергии практически на 95% относительно ее расхода традиционной системой кондиционирования воздуха.

Ключевые слова: использование солнечной энергии для охлаждения, абсорбционный охладитель с нагревом горячей водой, солнечная тепловая энергия, энергетический КПД, кондиционирование воздуха в административных зданиях, потребление электроэнергии в Египте

DOI: 10.56304/S0040363625700948

В последние десятилетия объем расходуемой в Египте электроэнергии ежегодно возрастает примерно на 6.8%, при этом 42% приходится на жилищно-бытовой сектор и по 6% на коммерческую застройку и общественные здания. Из общего объема потребляемой электроэнергии на охлаждение воздуха в помещениях и холодильные системы в жилищно-бытовом секторе приходится 26%, тогда как доля систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в нежилых зданиях составляет 35–40%.

В Египте в связи с увеличением объема строительных работ и ростом населения повышается спрос на системы воздушного охлаждения [1]. В

2017 г. количество блочных зданий в стране достигло 14.3 млн. В Большом Каире с 2006 по 2017 г. объем строительных работ увеличился на 235% [2]. Общий фонд зданий в Египте включает в себя сооружения разных типов, в том числе объекты нежилого назначения. На рис. 1 показано распределение нежилых зданий по категориям, причем доля образовательных учреждений составляет 29%.

Почти 72% нежилых объектов полностью или частично кондиционированы [1]. Предполагается, что к 2050 г. рынок систем кондиционирования воздуха и охлаждения вырастет в 6.5 раза, что приведет к увеличению объема потребления не



Рис. 1. Категории нежилых зданий в Египте [1].

I – офисные помещения; *II* – образовательные учреждения; *III* – объекты здравоохранения и социальных служб; *IV* – гостиницы и рестораны; *V* – объекты оптовой и розничной торговли; *VI* – прочие здания (включая спортивные сооружения)

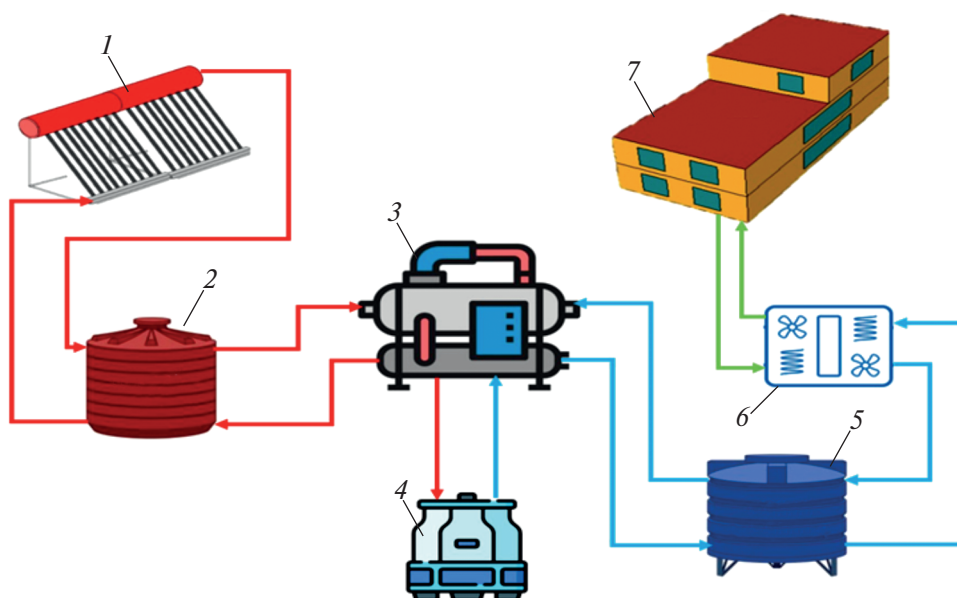


Рис. 2. Основное оборудование системы охлаждения на основе солнечной энергии [4].

1 – солнечный коллектор с двухслойными вакуумированными трубками; *2* – резервуар горячей воды; *3* – абсорбционный охладитель; *4* – градирня; *5* – бак охлажденной воды; *6* – блок подготовки воздуха; *7* – малоэтажное здание

только электроэнергии, но и хладагентов. Ожидается, что к 2050 г. спрос на электроэнергию повысится до 152 ТВт · ч, косвенные выбросы CO₂ достигнут 49 Мт (экв.), а прямые – 23 Мт (экв.) [3]. Поскольку существует прямая связь между ростом объема выбросов парниковых газов и выбросами хладагентов из традиционных систем кондиционирования воздуха (в результате утечек, потерь или утилизации хладагентов), повышается температура окружающего воздуха, что обуславливает более острую потребность в его охлаждении. Таким образом, переход к более экологичным системам кондиционирования позволит

устранить одну из основных причин увеличения энергопотребления при их эксплуатации.

Как было отмечено ранее, системы охлаждения с использованием солнечной энергии могут рассматриваться как рациональная “экологичная” замена обычных систем кондиционирования воздуха. Основное оборудование таких систем включает в себя солнечные коллекторы, абсорбционный охладитель с горячей водой в качестве источника тепла, резервуары-аккумуляторы, градирню и блок подготовки воздуха (рис. 2). Солнечная энергетическая система применяется для получения тепла, необходимого для работы абсорбционных

охладителей, а горячая вода, находящаяся в них, выступает в роли хладагента и нетоксичного абсорбента [4].

Возможность использования систем охлаждения на основе солнечной энергии как экологически чистой замены традиционных систем охлаждения рассмотрена на примере здания образовательного учреждения с помощью программного пакета TRNSYS [5], который предназначен для моделирования и расчета эксплуатационных характеристик систем электро- и теплоснабжения. Более того, этот пакет имеет все опции, необходимые для моделирования, так как включает в себя 150 моделей [6]. Поэтому для проведения настоящего исследования был выбран именно пакет TRNSYS, который ранее применялся главным образом для оценки целесообразности внедрения систем охлаждения на основе солнечной энергии путем анализа их технико-экономических показателей.

В 2016 г. в Пакистане исследовалась работа конкретной системы охлаждения воздуха в помещении площадью 14 м^2 [7] при среднесуточной инсоляции $5\text{--}6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (в летний период — $6\text{--}8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$). Для моделирования использовался программный пакет TRNSYS. Система состояла из солнечных коллекторов с двухслойными вакуумированными трубками, из которых горячая вода подавалась в стратифицированный резервуар-аккумулятор и затем в абсорбционный охладитель. Площадь солнечных коллекторов составляла 12 м^2 для обеспечения производительности охладительного устройства 3.5 кВт [8]. Коллекторы функционировали совместно с резервуаром-аккумулятором вместимостью 2 м^3 , удельный объем резервуара составил $0.17 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Следует отметить, что его объем был рассчитан с учетом того, что система должна обеспечивать необходимую холодильную нагрузку без применения дополнительного нагревателя. В использованной модели тепловыделение солнечных коллекторов с двухслойными вакуумированными трубками соответствовало требуемому теплоподводу, а энергопотребление системы достигало почти 14% нагрузки на охлаждение [7].

В 2018 г. были изучены факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики системы охлаждения на основе солнечной энергии в климатических условиях Египта [9]. Программный пакет TRNSYS применялся для моделирования системы охлаждения с холодопроизводительностью 494.5 кВт для здания университета площадью 2586 м^2 . Ограничением для проведения исследований являлась поверхность крыши, поэтому в модели максимальная площадь установленных на ней солнечных коллекторов с двухслойными вакуумированными трубками составляла 500 м^2 .

При моделировании определяли потребность в охлаждении здания библиотеки в период с мая по октябрь. Рассматривался вариант системы с применением дополнительного нагревателя. Было изучено влияние массового расхода воды в солнечном коллекторе на долю солнечной энергии в общем энергопотреблении системы и, следовательно, мощность дополнительного нагревателя. Было показано, что увеличение массового расхода воды до 50000 кг/ч приводит к росту доли солнечной энергии и снижению требуемой мощности дополнительного нагревателя, при массовом расходе более 50000 кг/ч доля солнечной энергии сократится. Согласно результатам расчетов, проведенных с учетом потребляемой мощности насоса, которая повышается с ростом расхода воды, ее оптимальный расход составляет 45000 кг/ч .

Для выбранных режимных параметров было определено количество тепла, необходимого для дополнительного нагрева воды при нормальной работе системы, которая использует 39.115 МДж тепла природного газа на 1 м^3 площади. Что касается эксплуатационных затрат, то энергопотребление в рассматриваемой системе на 85% меньше, чем в традиционной системе охлаждения [9].

В 2021 г. моделирование применялось для изучения характеристик абсорбционной системы охлаждения на основе солнечной энергии для составного одноэтажного жилого здания площадью 237 м^2 в субтропическом регионе Австралии. Система включала в себя солнечный коллектор с вакуумированными трубками и вспомогательный нагреватель в резервуаре-аккумуляторе, т.е. работала по циклу абсорбционной охлаждающей установки, в которой для нагрева используется горячая вода. При проведении этого исследования оценивались эксплуатационные характеристики системы, а также целесообразность ее применения по технико-экономическим и экологическим показателям в долгосрочной перспективе.

Проведен анализ влияния основных факторов, например площади солнечного коллектора и объема резервуара-аккумулятора, на эксплуатационные характеристики системы. Оказалось, что при удельном объеме резервуара-аккумулятора 0.02 , 0.06 , 0.01 и $0.04 \text{ м}^3/\text{м}^2$ и площади солнечных коллекторов 10 и 15 м^2 система не позволяет получить требуемую температуру воды на входе в абсорбционный охладитель, но при площади коллекторов 20 , 25 и 30 м^2 эти требования к температуре выполняются. Исследование показало, что для достижения необходимых экономических показателей в данном случае оптимальная система должна иметь коллекторы площадью 20 м^2 , работающие совместно с резервуаром-аккумулятором с удельным

Примеры мощных систем охлаждения на основе солнечной энергии, введенных в эксплуатацию в период с 2008 по 2022 г. [12–14]

Местоположение	Год ввода в эксплуатацию	Установленная мощность, кВт	Площадь коллектора, м ²	Тип коллектора	Холодопроизводительность, кВт
Барселона (Испания)	2022	560	800	С линзами Френеля	260
Падуа (Италия)	2022	1050	1500	С вакуумированными трубками	700
Измир (Турция)	2021	2500	6000	Параболический	3500
Грац (Австрия)	2020	2450	3500	Плоский	660
Цюрих (Швейцария)	2019	800	1143	С вакуумированными трубками	600
Депо в Мандае (Сингапур)	2018	2308	3297	То же	850
Коммуна Borgoricco (Италия)	2018	1046	1494	»	700
Коммуна Laives (Италия)	2018	—	—	»	176
ИКЕА Alexandra (Сингапур)	2017	1730	2472	Плоский	880
Военный госпиталь Escuela, Dr. Alejandro Davila Bolanos (Никарагуа)	2017	3115	4450	»	1023
Административное здание, Gujarat State Electricity Corporation (Индия)	2017	1102	1575	С вакуумированными трубками	528
Посольство Швейцарии в Нью-Дели (Индия)	2017	630	441	Параболический	210
Tianjin Zhongbei (Китай)	2015	—	—	С вакуумированными трубками	698
Средняя школа в г. Скоттсдейл, шт. Аризона, США	2014	3407	4865	Плоский	1750
Штаб-квартира MTN (Йоханнесбург, Южная Африка)	2014	272	484	С линзами Френеля	330
United World College (Сингапур)	2011	2710	3872	Плоский	1500
CGD Lisbon (Лиссабон, Португалия)	2008	1105	1579	»	585
Metro Cash & Carry (Рим, Италия)	2008	2100	3000	»	700

объемом $0.02 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Рекомендовано установить абсорбционные системы охлаждения в жилых зданиях, в первую очередь в климатических условиях, характерных для г. Макей в Австралии [10].

Согласно отчету о глобальном использовании солнечной энергии Solar Heat Worldwide (2023 г.), самая большая система охлаждения, работающая на энергии Солнца в качестве источника тепла, имеет холодопроизводительность 3500 кВт. Эта система введена в эксплуатацию в июне 2022 г. (г. Измир, Турция) [11] и включает в себя два двухкорпусных абсорбционных охладителя с холодильным коэффициентом 1.4 и холодопроизводительностью 1400 и 2100 кВт. В состав двухкорпусных абсорбционных охладителей на основе бромистого лития входит двухсекционный параболический солнечный коллектор тепловой мощностью $2500 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. В таблице перечислены некоторые мощные системы охлаждения на основе солнечной энергии, введенные в эксплуатацию в 2008–2012 гг. (информация заимствована из отчета [12]).

МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей статье представлены результаты исследования здания центральной библиотеки Британского университета в Египте, который находится в г. Каире в районе Shrouk City (координаты: 30.14° с.ш. и 31.6° в.д.). Библиотека занимает отдельное здание в центре университета и располагается на четырех этажах: цокольном, первом, втором и третьем. На цокольном этаже находятся два книжных магазина, восемь офисов разного назначения, кафе и 10 аудиторий для групповых занятий. На первом этаже расположены главный вход в библиотеку, стойка регистрации, оборудование для копирования и печати, выставочная зона, кафе, три лаборатории и шесть кабинетов для персонала, на втором — кабинет заведующего библиотекой, открытая учебная зона и 11 аудиторий для групповых занятий, на третьем этаже — 10 учебных аудиторий для исследователей и аспирантов, две лаборатории, четыре офиса, кинотеатр и зал для прослушивания аудиоматериалов. Полная вместимость библиотеки — 1200 человек.

Нагрузка на систему охлаждения (около 1330 кВт) обеспечивается компактными блочными кондиционерами типа DX и сплит-системами кондиционирования воздуха. Общая площадь помещений библиотеки составляет 4401.7 м^2 , площадь крыши — 1470 м^2 . С учетом наличия места для установки системы охлаждения на основе солнечной энергии в настоящем исследовании предложено заменить 30% тради-

ционных систем с годовой нагрузкой на охлаждение 385 кВт на новые системы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ

Как упоминалось ранее, библиотека Британского университета — это крупногабаритное здание с большой нагрузкой на системы охлаждения, крыша которого имеет небольшую площадь. Авторами настоящего исследования предложено установить на крыше солнечные коллекторы. Для этого следует выбрать тип системы коллекторов из вакуумированных трубок, определить ее размеры, а затем оценить количество тепла, вырабатываемое коллекторами, которое можно использовать для функционирования однокорпусного адсорбционного охладителя (с горячей водой в качестве источника тепла). Наконец, нужно рассчитать холодопроизводительность всей системы охлаждения.

В качестве инструмента моделирования для всех расчетных параметров использовался программный пакет TRNSYS, позволяющий выбрать оптимальный объем резервуара-аккумулятора и оценить потенциально возможное количество сэкономленной энергии и время, затрачиваемое на охлаждение системы. Модель системы, созданная в TRNSYS, состоит из шести основных элементов: климатических данных (компоненты программного обеспечения), модели солнечного коллектора с вакуумированными трубками, стратифицированного резервуара-аккумулятора горячей воды, абсорбционного охладителя с горячей водой, градирни и насосов (рис. 3). Вспомогательные элементы модели, реализованной в пакете TRNSYS, включают в себя зависящую от времени задающую функцию (forcing function), блок преобразования единиц измерения, графопостроитель для оперативного вывода файлов и блок решения уравнения энергии.

При разработке модели принимались следующие допущения:

нагрузкой системы охлаждения является только энергия охлажденной воды при условии, что потери отсутствуют и нагрузка не зависит от того, как она распределена;

температура горячей воды на выходе из абсорбционного охладителя, используемая в качестве источника тепла, постоянна и равна 72°C ;

по информации, полученной от сотрудников библиотеки, в зимний сезон (с ноября по февраль) большая часть времени система кондиционирования воздуха в здании (библиотеке) не функционирует.

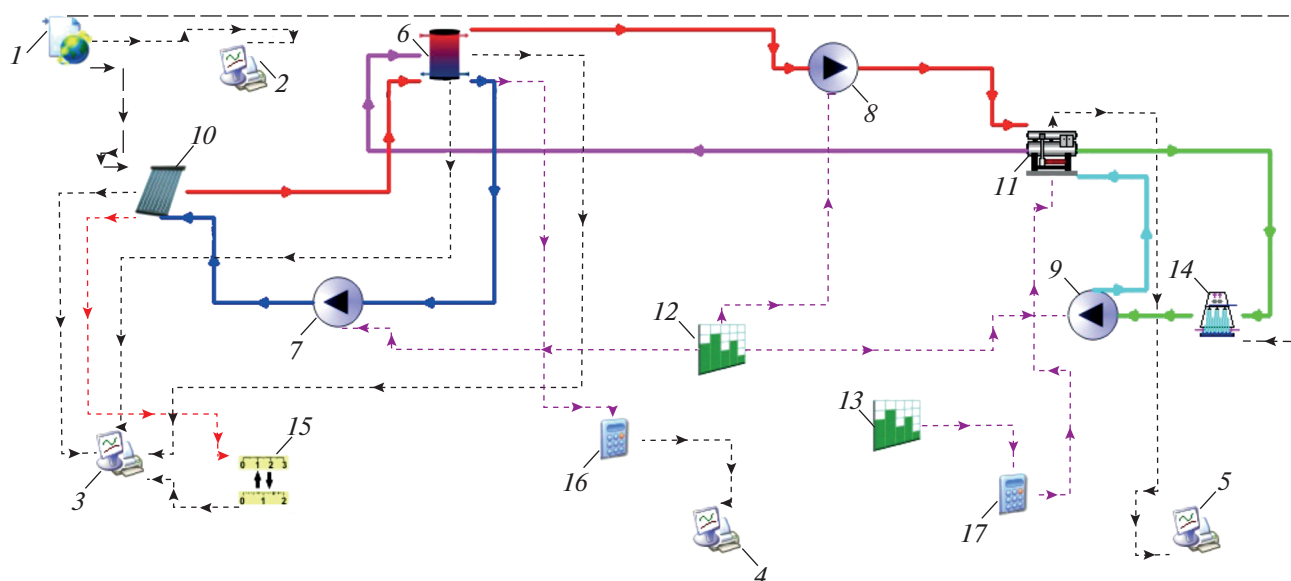


Рис. 3. Схема модели в TRNSYS.

1 – климатические данные; 2–5 – графопостроители № 1–4; 6 – резервуар-аккумулятор горячей воды; 7–9 – насосы № 1–3; 10 – солнечный коллектор; 11 – абсорбционный охладитель; 12, 13 – задающие функции, зависящие от времени, № 1, 2; 14 – градирня; 15 – инструмент преобразования единиц измерения внутри TRNSYS, тип 57-2; 16 – блок решения уравнения энергии охлажденной воды; 17 – показатели суточной нагрузки

Размеры солнечных коллекторов

Солнечные коллекторы с вакуумированными трубками применялись как источник энергии для абсорбционных охладителей с горячей водой в качестве нагревателя благодаря их более высокой эффективности по сравнению с плоскими коллекторами [15]. Для солнечных коллекторов характерны более низкие потери, и с их помощью можно нагреть воду до температуры, превышающей 90°C.

В модели, рассматриваемой в настоящей статье, использовались коллекторы с двухслойными вакуумированными тепловыми трубками, преимущество которых (по сравнению с прямоточными трубками) заключается в следующем: благодаря их соединению со сборным коллектором тепло передается без протока жидкости. Это упрощает монтаж и замену отдельных трубок, так как отпадает необходимость в сливе жидкости из всей системы.

С учетом указанных ранее координат здания при моделировании коллектор был обращен к югу. Так как крыша библиотеки была частично занята, предполагалось, что солнечные коллекторы будут установлены на искусственной крыше, площадь которой будет равна фактической площади крыши библиотеки. Для оценки площади, которая будет занята коллекторами, рассчитывалось минимальное расстояние d между рядами коллекторов, при котором не будет потерь, вызванных затенением. Для расчета параметра d

при угле наклона коллекторов $\beta = 30^\circ$ с учетом координат объекта (библиотеки) и угла падения солнечных лучей α равного 36.6° [16] использовалось уравнение [17]

$$d = w \left(\frac{\sin \beta}{\tan \alpha} + \cos \beta \right), \quad (1)$$

где w – ширина одного коллектора, м.

С учетом полученного расстояния d и параметров модели солнечного коллектора (длина $l = 2.25$ м, ширина $w = 2.20$ м и толщина $th = 0.12$ м) предложенная система будет состоять из 173 коллекторов общей площадью нетто 856 м². Далее приведены характеристики солнечных коллекторов, а также указан рассчитанный тепловой поток [18]:

КПД солнечного коллектора η	0.76
Оптический КПД	
солнечного коллектора η_o	0.682
Поправка для угла падения излучения $k(\theta)$	1.23
Коэффициент теплоотдачи:	
в линейной зависимости теплового	
потока от температурного напора c_1	1.49
в квадратичной зависимости теплового	
потока от температурного напора c_2	0

Разность между средней температурой солнечного коллектора и температурой воздуха $\Delta t = t_m - t_{amb}$, °C.....	50
Падающее излучение G , Вт/м ²	1000
Среднее падающее излучение G_{avg} , Вт/м ²	800
Прирост теплового потока, полученного от системы солнечных коллекторов, $\dot{Q}_{th}$, кВт....	520
Общая площадь системы солнечных коллекторов A_{tot} , м ²	856

Для определения теплового потока, поступившего от солнечных коллекторов, их КПД умножали на общую площадь коллекторов и среднее падающее солнечное излучение. Коэффициент полезного действия системы коллекторов рассчитывали по уравнению [18]:

$$\eta = \eta_0 \kappa(\theta) - c_1 \frac{t_m - t_{amb}}{G} - c_2 \frac{(t_m - t_{amb})^2}{G}. \quad (2)$$

Вычисленное значение η подставляли в формулу для расчета тепла, полученного от системы солнечных коллекторов [18]:

$$\dot{Q}_{th} = A_{tot} \eta G_{avg}. \quad (3)$$

Математическая модель солнечных коллекторов с вакуумированными трубками, выполненная в TRNSYS

При моделировании солнечных коллекторов в пакете TRNSYS типа 71 (модуль 71) применялось выражение (2). Основное отличие заключалось в использовании поправки для угла падения излучения, с учетом которой КПД оценивался как [19]

$$\eta = c_0 - c_1 \frac{\Delta t}{l_T} - c_2 \frac{\Delta t^2}{l_T}, \quad (4)$$

где c_0 — максимальный КПД коллектора; l_T — суммарное количество солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность коллектора, кДж/(ч · м²).

Холодопроизводительность однокорпусного абсорбционного охладителя с нагревом горячей водой

В предложенной авторами статье абсорбционной системе охлаждения на основе солнечной энергии применяется абсорбционный охладитель с нагревом горячей водой. В соответствии с данными, предоставленными изготовителем выбранной модели, температура охлажденной воды

на входе в охладитель и выходе из него равна 12 и 7°C соответственно, КПД охладителя составляет 0.81. Таким образом, номинальная холодопроизводительность абсорбционного охладителя $\dot{Q}_c$ определяется по теплу, полученному солнечными коллекторами, $\dot{Q}_{th}$ (в качестве входного параметра) и равняется 421.5 кВт. То есть значение $\dot{Q}_c$ рассчитывается по выражению [19]

$$\dot{Q}_c = COP \times \dot{Q}_{th}, \quad (5)$$

где COP — номинальный холодильный коэффициент аппарата.

Этот охладитель эквивалентен абсорбционному охладителю с нагревом горячей водой с $\dot{Q}_c = 420$ кВт. Однако значение $\dot{Q}_c$ выпускаемых моделей составляет 385 или 462 кВт. Поэтому для замещения 30% общей холодопроизводительности традиционной системы кондиционирования воздуха в здании библиотеки (1330 кВт) был выбран охладитель с $\dot{Q}_c = 385$ кВт.

Математическое моделирование однокорпусного абсорбционного охладителя с горячей водой, выполненное в TRNSYS

Для моделирования абсорбционного охладителя на основе горячей воды применялся модуль 107 из программного пакета TRNSYS, в котором используется унифицированный подход к поиску данных в каталогах оборудования, что дает возможность пользователю моделировать охладитель любого типоразмера. Тепловой поток $\dot{Q}_{hw}$, подводимый к охладителю с горячей водой, и температура охлажденной воды $t_{chw,out}$ на выходе из охладителя рассчитывались по следующим формулам [19]:

$$\dot{Q}_{hw} = \frac{Capacity}{COP} f_{d.e.in}, \quad (6)$$

$$t_{chw,out} = t_{chw,in} - \frac{\min(\dot{Q}_{remove}, Capacity)}{m_{chw} c_{pchw}}, \quad (7)$$

где $Capacity$ — номинальная холодопроизводительность устройства, кДж/ч; $f_{d.e.in}$ — доля расчетной подведенной энергии, потребляемая аппаратом в определенный момент времени (варьируется от 0 до 1); $t_{chw,in}$ — температура охлажденной воды на входе в охладитель, °C; $\dot{Q}_{remove}$ — тепловой поток, который должен быть отведен от охлаждаемой воды, для достижения заданной температуры, кДж/ч; m_{chw} — массовый расход охлаждаемой воды, кг/ч; c_{pchw} — удельная теплоемкость охлаждаемой воды, кДж/(кг · К).

Стратифицированный резервуар-аккумулятор горячей воды

Серийно выпускаемые установки небольшой мощности оснащены резервуарами объемом 0.3–1.0 м³, которые используются совместно с солнечными коллекторами. При этом удельный объем резервуара в пересчете на площадь коллектора варьируется от 0.02 до 0.14 м³/м² [9].

В настоящем исследовании рассматривается система средней мощности, для которой требуется резервуар большого объема (до 10 м³) для обеспечения аккумуляции тепла в течение более длительного времени, чем для резервуаров меньшего объема. Применялся стратифицированный резервуар-аккумулятор, преимущество которого состоит в том, что слои воды в нем имеют разные температуры. Кроме того, этот резервуар упрощает управление циркуляционным насосом в контуре солнечные коллекторы – резервуар-аккумулятор. Когда температура в коллекторе превышает температуру нижнего слоя воды в резервуаре, процесс прокачки теплоносителя циркуляционным насосом становится проще. Зарядка стратифицированного резервуара-аккумулятора начинается с его верхней части, а разрядка (отбор воды) – в нижней, при этом поддерживается максимально возможная температура верхнего слоя в течение длительного времени. Это означает, что стратифицированные резервуары-аккумуляторы могут хранить энергию в течение более длительного времени (по сравнению с нестратифицированными резервуарами), что повышает эффективность использования солнечных коллекторов. Поэтому в системе на основе солнечной энергии могут применяться резервуары-аккумуляторы меньшего объема, если в них обеспечена температурная стратификация жидкости.

Модель стратифицированного резервуара-аккумулятора горячей воды, созданная в TRNSYS

В системе, предложенной авторами настоящей статьи, для моделирования резервуара-аккумулятора применяли модуль 4 программного пакета TRNSYS, который представляет собой апробированную модель стратифицированного многоузлового резервуара, имеющего два входа и два выхода. В резервуаре есть два дополнительных вспомогательных нагревателя. Этот модуль позволяет рассчитать три режима эксплуатации. Используемый резервуар функционирует в режиме 1, при котором потоки жидкости поступают в него в фиксированных точках. В случае отсутствия вспомогательного нагревателя поток от горячего источника входит в резервуар сверху, при наличии нагревателя – в точке, располо-

женной чуть ниже нагревателя. Тепловой поток входит в нижнюю часть бака [19]. Два дополнительных нагревателя представляют собой электрические резистивные нагревательные элементы. В данной модели они не использовались, так как оценивалась длительность хранения аккумуляции энергии без дополнительного нагрева электронагревателями.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В этом разделе представлен анализ того, как объем бака влияет на температуру воды на выходе из охладителя, а также определен его оптимальный объем для максимального использования полезной энергии, полученной от солнечных коллекторов с вакуумными трубками.

Выбор оптимального объема резервуара

В выбранном однокорпусном абсорбционном охладителе горячая вода, которая является источником тепла, должна иметь температуру на входе в охладитель и выходе из него 95 и 72°C соответственно. Следовательно, температура горячей воды на выходе из резервуара должна быть равна температуре горячей воды на входе в парогенератор охладителя, т.е. 95°C. При моделировании этой части системы предполагалось, что производительность насоса в контуре системы солнечного нагрева – резервуар постоянная, как и площадь солнечных коллекторов с вакуумированными трубками (которая была определена ранее).

Расчеты проводились для модели резервуара объемом 1, 5, 10 и 15 м³. На рис. 4, а видно, что температура воды на выходе из резервуара вместимостью 1 м³ находится на отметке ниже 95°C в течение 6 мес в году. При увеличении объема резервуара эксплуатационные характеристики системы улучшаются и она работает более стабильно. Однако при выборе резервуара оптимального объема нужно учитывать размеры пространства, необходимые для его размещения, и затраты на его покупку и установку; для резервуара небольшого объема требуется меньше места, и расходы на его размещение будут ниже.

Согласно расчетам, при проведении которых учитывался тот факт, система охлаждения в здании библиотеки должна работать только в течение 8–9 мес в году и только в рабочее время, резервуар объемом 10 м³ обеспечивает требуемые эксплуатационные характеристики на протяжении всего года, а средняя температура воды на входе в абсорбционный охладитель поддерживается на уровне 95° ± 2% (рис. 4, б).

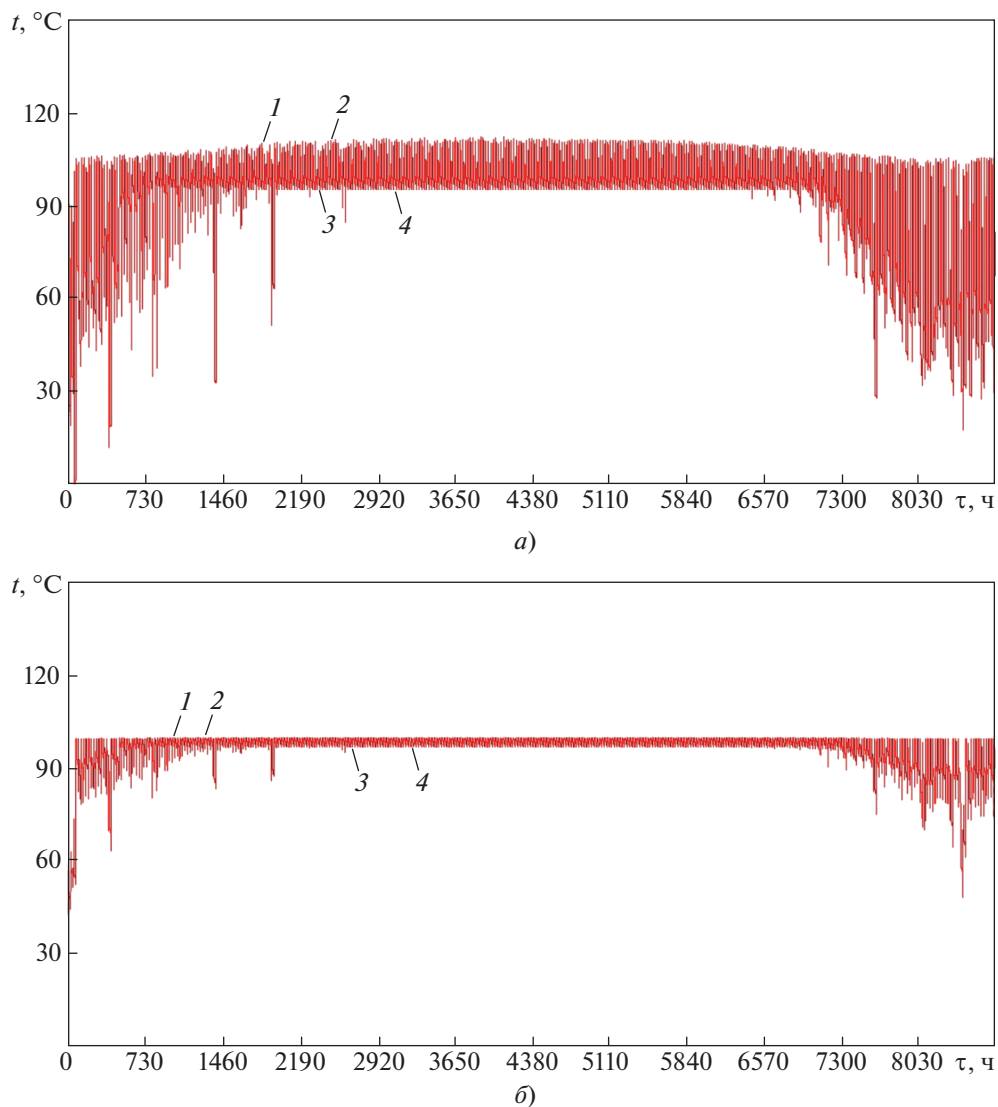


Рис. 4. Результаты расчета (по модели TRNSYS) температуры воды t на выходе из резервуара объемом 1 м^3 (а) и 10 м^3 (б). Температура воды: 1 – при переходе из резервуара в охладитель; 2 – на выходе из коллектора; 3 – горячей; 4 – источника. τ – период моделирования

Энергетический анализ работы солнечных коллекторов с помощью модели TRNSYS

Цель проведения энергетического анализа – определить эффективность использования энергии, полученной солнечными коллекторами, в течение года и энергии охлажденной воды в разное время года. Согласно результатам расчета, количество тепла, “собранный” системой солнечных коллекторов, превышает значение $\dot{Q}_{th} = 520 \text{ кВт}$, полученное при вычислениях и указанное ранее, в течение почти 9 мес за год, так как в этот период интенсивность солнечного излучения превосходит среднее его значение. Однако данный показатель становится меньше 520 кВт , когда интенсивность солнечного излучения сни-

жается относительно среднего значения. С учетом того что холодопроизводительность используемого абсорбционного охладителя, работающего на горячей воде, была уменьшена до 385 кВт , что ниже значения, рассчитанного ранее, требуемый показатель может быть достигнут при тепловой мощности системы коллекторов не менее 477.6 кВт [определенной по формуле (5)].

Таким образом, расчеты системы солнечных коллекторов площадью 856 м^2 , выполненные с шагом по времени 0.125 ч , показали, что подвод требуемой энергии от солнечных коллекторов достигается при среднемесячной тепловой мощности не менее 520 кВт , причем минимальное значение мощности (от 460 до 480 кВт) наблюдается в течение 3 мес в году (рис. 5).

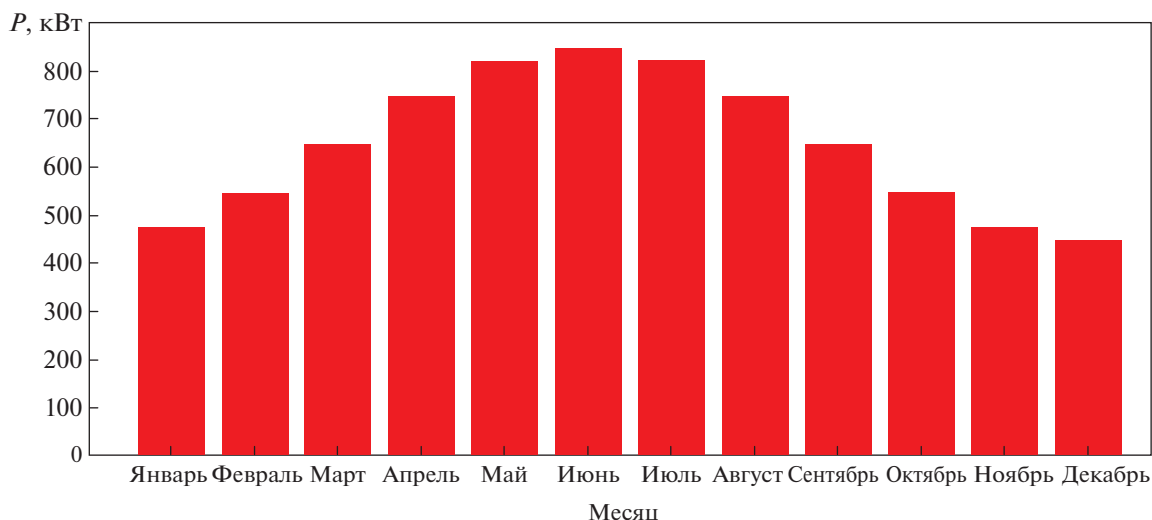


Рис. 5. Полезная мощность P системы солнечных коллекторов

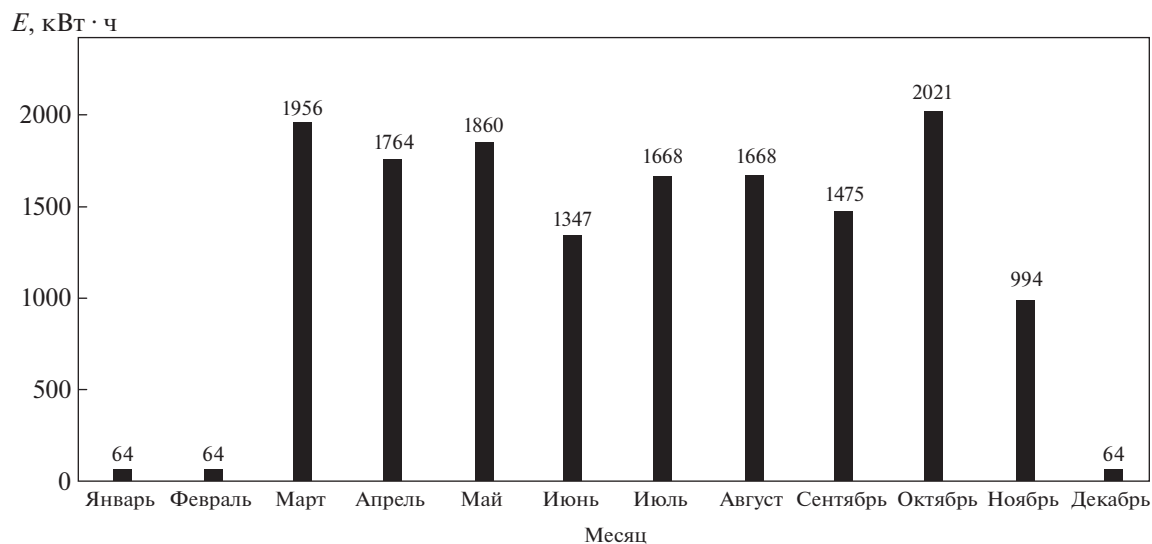


Рис. 6. Ежемесячное потребление электроэнергии E предложенной системы охлаждения на основе солнечной энергии

Сравнение энергопотребления традиционной системы охлаждения и системы с солнечными коллекторами

В системе охлаждения, представленной авторами настоящей статьи, источником тепла являются солнечные коллекторы, поэтому на охладитель приходится незначительное количество электроэнергии. Эта энергия потребляется насосами абсорбционного охладителя и циркуляционными насосами системы. В соответствии с данными, полученными от изготовителя охладителя, “поглощенная” мощность охладителя составляет 5.8 кВт.

Процесс потребления электроэнергии охладителем был смоделирован, а “израсходован-

ная” мощность насосов была рассчитана с помощью TRNSYS: на каждый из трех насосов приходится примерно 0.7 кВт, суммарная мощность равна 2.2 кВт. На рис. 6 представлены данные по ежемесячному энергопотреблению системы охлаждения, предложенной авторами статьи, с учетом количества рабочих часов. Суммарное годовое значение составляет 14 946 кВт·ч.

Потребление электроэнергии обычной системой охлаждения определялось вручную (т.е. без инструментов моделирования) в зависимости от температуры воздуха, указанной в руководствах по эксплуатации установленных кондиционеров. Энергопотребление вычисляли за один полный год с учетом рабочего и нерабочего време-

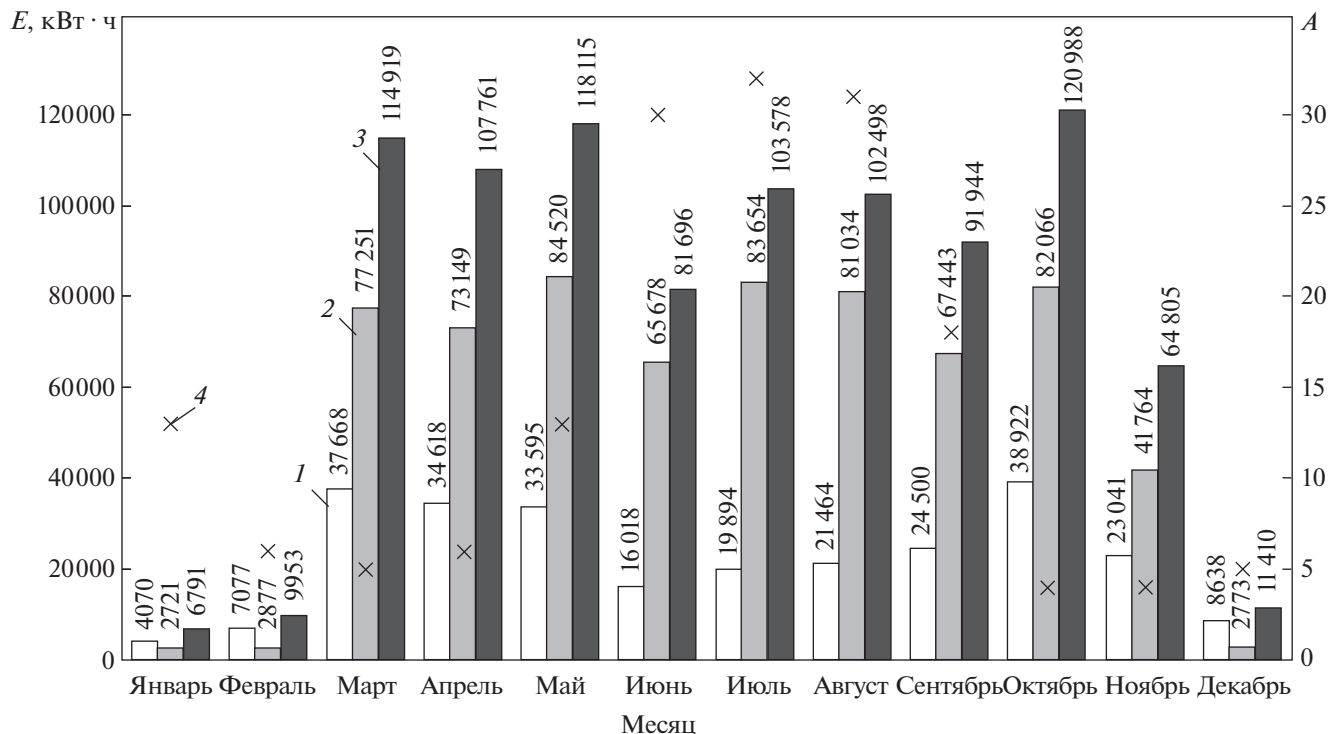


Рис. 7. Энергопотребление обычной системы охлаждения в рассматриваемом здании библиотеки. Потребление электроэнергии:

1 – сплит-системами, 2 – суммарное, 3 – блочными кондиционерами с непосредственным охлаждением воздуха; 4 – количество нерабочих дней A

ни, государственных праздников и выходных. Обычная система имеет мощность 1330 кВт, из которой 840 кВт приходится на 11 кондиционеров прямого охлаждения, а остальная часть – на сплит-системы. На рис. 7 показано энергопотребление традиционной системы кондиционирования воздуха, составляющее 934464 кВт·ч, из которых 664959 кВт·ч затрачивается на блочные кондиционеры с непосредственным охлаждением воздуха и 269505 кВт·ч – на сплит-системы.

Для замены 45% блочных кондиционеров предложено использовать моделируемую систему абсорбционного охлаждения на основе солнечной энергии, холодопроизводительность которой равна 385 кВт. Согласно расчетам, энергопотребление предложенной авторами системы охлаждения составляет менее 5% энергопотребления заменяемых кондиционеров (рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью настоящей работы было исследование возможности замены традиционной системы охлаждения здания библиотеки учебного заведения системой охлаждения на основе солнечных коллекторов. Для этого была создана модель системы и проведены расчеты для оценки влияния

различных параметров на ее (системы) эксплуатационные характеристики. Также было проведено сравнение энергопотребления существующей традиционной системы охлаждения и новой системы на основе возобновляемого источника энергии (энергии Солнца). Если в традиционном парокомпрессионном цикле охлаждение осуществляется посредством совершаемой работы [20], то в абсорбционном цикле для этого используется тепло. Поэтому в абсорбционных системах, функционирующих на солнечной энергии, электроэнергия нужна только для привода циркуляционных насосов.

Согласно результатам настоящего исследования, солнечный коллектор площадью 856 м² и резервуар-аккумулятор объемом 10 м³ обеспечивают передачу 385 кВт тепловой мощности в абсорбционный охладитель, поддерживая тем самым холодопроизводительность на уровне 385 кВт.

В ранее выполненной работе [4] показано, что увеличение площади солнечного коллектора и объема резервуара-аккумулятора способствует повышению средней температуры воды на входе в охладитель. По сравнению с другими исследованиями [7, 10], система, предложенная авторами настоящей статьи, удовлетворяет требованиям,

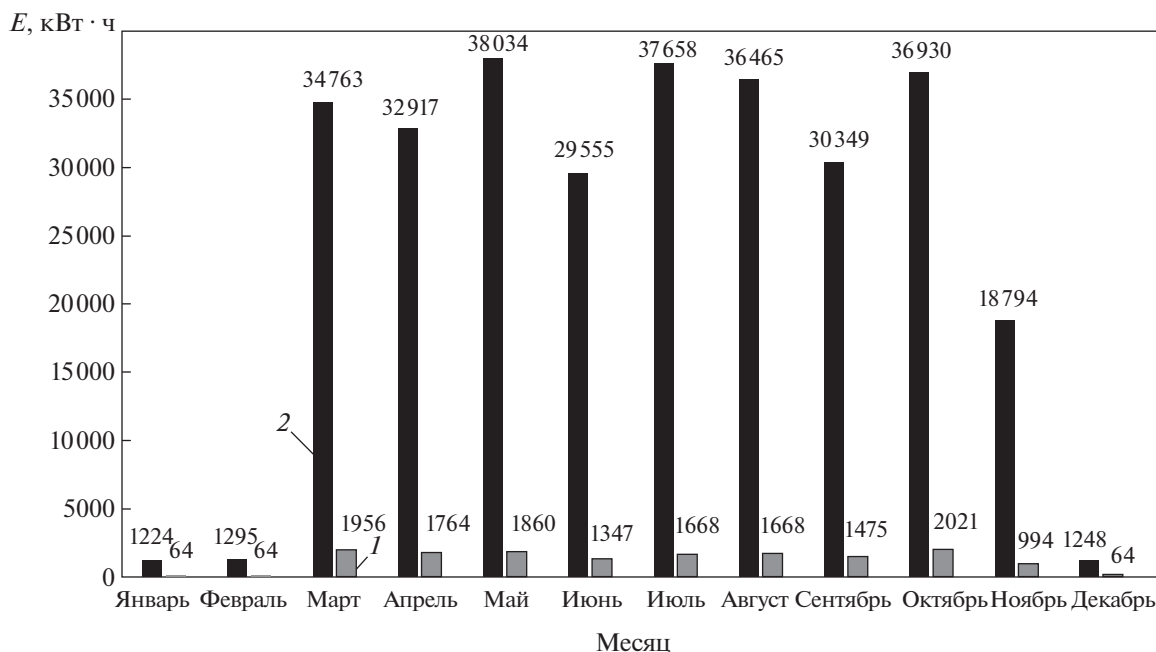


Рис. 8. Энергопотребление предложенной системы охлаждения на основе солнечной энергии (1) и заменяемых (45%) блочных кондиционеров с непосредственным охлаждением воздуха (2)

предъявляемым к параметрам горячей воды на входе в абсорбционный охладитель при относительно небольшом удельном объеме резервуара-аккумулятора ($0.01 \text{ м}^3/\text{м}^2$). Это обусловлено большой площадью пластин солнечных коллекторов, которыми они улавливают энергию, и высокого уровня инсоляции в Египте. Кроме того, в состав системы входит стратифицированный резервуар-аккумулятор горячей воды, позволяющий использовать слои воды с разной температурой.

Выполнены расчеты режимов работы системы при объеме резервуара 1, 5, 10 и 15 м^3 . Показано, что при увеличении объема эксплуатационные характеристики системы улучшаются, а колебания температуры воды на выходе из резервуара снижаются. Однако в качестве оптимального выбран объем резервуара 10 м^3 , так как именно при таком объеме удастся поддерживать требуемую температуру воды с погрешностью 2% в течение нескольких месяцев, когда необходимо охладить воздух в здании библиотеки.

Использование солнечных коллекторов большой площади позволяет получить количество энергии, необходимое для поддержания заданной температуры горячей воды, поступающей в абсорбционный охладитель. Но именно большая площадь коллекторов станет основной проблемой при практической реализации предложенной системы, так как она (система) будет занимать всю площадь крыши здания и охлаждать при этом только 30% воздуха в помещениях.

В предыдущих исследованиях в аналогичных системах солнечных коллекторов с вакуумированными трубками, являвшихся источником энергии для абсорбционного охладителя на основе бромистого лития (в котором в роли источника тепла выступала горячая вода), использовался вспомогательный нагреватель. Результаты моделирования системы, представленные в этом исследовании, свидетельствуют о возможности применения абсорбционных систем охлаждения на основе солнечной энергии без вспомогательного нагревателя. В одной из ранее рассмотренных систем [9], в которой также не был задействован вспомогательный нагреватель, электроэнергии затрачивалось на 86% меньше, чем в традиционной системе. Что касается системы, предложенной в настоящей статье, то при ее реализации можно снизить энергопотребление на 95% по сравнению с обычной системой. При использовании вспомогательного нагревателя потребление электроэнергии увеличится, но работа системы будет более устойчивой, ее воздействие на окружающую среду уменьшится, если в ней не будет использоваться природный газ.

Следует рассмотреть функционирующие в настоящее время системы охлаждения на основе солнечной энергии и уделить особое внимание тем, что были введены в эксплуатацию в последние годы. В 2022 г. в Барселоне (Испания) была установлена система, на каждый 1 кВт холодопроизводительности которой приходилось 3.1 м^2

солнечных коллекторов с линзами Френеля. В том же году в Падуе (Италия) была введена в эксплуатацию система, на каждый 1 кВт холодопроизводительности которой требовалось 2.1 м² солнечных коллекторов с вакуумированными трубками.

В крупнейшей системе охлаждения (3500 кВт) на 1 кВт холодопроизводительности приходится 1.7 м² параболического солнечного коллектора. Этот коллектор применяется для энергоснабжения двухкорпусного абсорбционного охладителя на основе бромистого лития с холодильным коэффициентом 1.4 [12]. Очевидно, что для установки параболического коллектора требуется меньше места, чем для трубчатого коллектора. Однако из-за отсутствия информации об абсорбционных охладителях, применяемых в солнечных коллекторах других типов, и их холодильном коэффициенте невозможно подобрать солнечный коллектор нужного типа, который имел бы оптимальную площадь в каждом конкретном случае. Поэтому при выборе коллектора не следует использовать один определяющий критерий, нужно принимать во внимание совокупность нескольких факторов. Единственный вывод, который можно сделать, заключается в том, что уже построена и эксплуатируется система охлаждения, имеющая холодопроизводительность 3.5 МВт, в которой используется энергия, полученная от параболического солнечного коллектора, на каждые 1.7 м² площади которого приходится 1 кВт холодопроизводительности (1.7 м²/кВт).

Для системы, смоделированной авторами статьи, требуется 2.2 м² солнечного коллектора из вакуумированных трубок на каждый 1 кВт холодопроизводительности (2.2 м²/кВт). Существование функционирующей системы, площадь солнечных коллекторов которой на единицу холодопроизводительности находится в том же диапазоне, что и у системы в Падуе [12], подтверждает достоверность результатов, полученных в рамках данного исследования, и доказывает “реалистичность” моделирования.

Энергопотребление традиционной системы кондиционирования воздуха составляет 934 464 кВт · ч. Установленная мощность абсорбционного охладителя, выбранного авторами статьи, равна 5.8 кВт. Мощность для привода циркуляционных насосов вычислялась в программном пакете TRNSYS: каждый из трех насосов должен иметь мощность примерно 0.7 кВт (суммарно 2.2 кВт). Количество электроэнергии, затрачиваемой ежемесячно на функционирование предложенной системы, рассчитывалось с учетом рабочего времени так, чтобы суммарное ее потребление за год соответствовало 14 946 кВт · ч.

Более того, внедрение такой системы вполне возможно и экономически целесообразно, поскольку срок службы систем охлаждения на основе солнечной энергии обычно варьируется от 20 до 25 лет, в то время как расчетный срок системы, предложенной авторами статьи, составляет 7 лет при ставке 10% по кредиту, полученному на строительство этой системы, и 6 лет – при ставке 5%. Для оценки срока окупаемости были определены капитальные и эксплуатационные затраты как для заменяемых блочных кондиционеров, так и для системы охлаждения на основе солнечной энергии, представленной в настоящем исследовании. Отношение капитальных затрат на традиционную систему и предложенную равно 40%, тогда как отношение эксплуатационных затрат “авторской” системы и заменяемой традиционной составило всего 5%. Затем был рассчитан чистый денежный поток путем умножения разницы в эксплуатационных затратах на индекс инфляции для определения текущей стоимости за год. Ежегодные данные по стоимости суммировались, затем из итогового значения вычитались капитальные затраты для получения точки безубыточности на седьмой или шестой год эксплуатации системы при процентной ставке по кредиту 10 и 5% соответственно.

Наконец, следует отметить положительный фактор замены широко распространенных систем, вырабатывающих электроэнергию путем сжигания газа, на системы на основе возобновляемых (чистых) источников энергии для окружающей среды: сокращается объем выбросов углерода {примерно с 500 до 27–58 г СО₂-экв/(кВт · ч) для солнечных энергетических систем [21–23]} и снижается уровень загрязнения воздуха.

ВЫВОДЫ

1. Система охлаждения на основе солнечной энергии с холодопроизводительностью 385 кВт предназначена для замены на 30% существующей традиционной системы кондиционирования в здании библиотеки университета (эквивалентно 45% блочных кондиционеров с непосредственным охлаждением воздуха). Ограничение на холодопроизводительность системы связано только с небольшой площадью крыши, на которой могут быть установлены солнечные коллекторы.

2. Оптимальный объем стратифицированного резервуара-аккумулятора горячей воды равен 10 м³, что обеспечивает удельный объем на единицу площади солнечных коллекторов, равный 0.01 м³/м². При таком объеме резервуара выполняются требования по поддержанию определенной температуры воды в течение нескольких месяцев (от пяти до девяти), когда здание необходимо охла-

ждать, с погрешностью 2% без использования дополнительного нагревателя.

3. Результаты расчетов показали, что для поддержания температуры горячей воды, при которой будет достигнута требуемая холодопроизводительность абсорбционного охладителя, площадь солнечных коллекторов должна составлять 856 м².

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам библиотеки British University (Египет) за поддержку, оказанную при поиске и сборе данных для подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cooling** sector status report Egypt: Analysis of the current market structure, trends, and insights on the refrigeration and air conditioning sector / A.A. Hassan, N. El Dallal, J. Grözinger, N. Surmeli-Anac, F. El Khodragy, B. Badawy, M. Adel, S. Schimschar, E.M.M. Youssef, K. Dinges, A. Dertinger, A. Pohl, S. Tamhane, Z.Ü. Sanal, M. Abdelhameed. Berlin, Germany: Guidehouse Germany GmbH, Cool Up: Upscaling Sustainable Cooling, 2022.
2. **Agency** for public mobilization and statistics (CAPMAS): Statistical year book. Cairo, Egypt, 2017. [Электрон. ресурс.] http://www.capmas.gov.eg/Pages/StaticPages.aspx?page_id=5034
3. **Cooling** sector prospects study Egypt: Energy and emission saving potential up to 2050 in the refrigeration and air conditioning sector / A.A. Hassan, J. Grözinger, N. Surmeli-Anac, M. Abunofal, N. El Dallal, F. Heydel, M. Offermann. Berlin, Germany: Guidehouse Germany GmbH, Cool Up: Upscaling Sustainable Cooling, 2023.
4. **Challenges** and opportunities for integrating RE systems in Egyptian building stocks / A.I. Elshamy, E. Elshazly, O.T. Oladinrin, M.Q. Rana, R.S. Abd el-Lateef, S.T. El-Badry, M. Elthakaby, A.M.R. Elbaz, K. Dewidar, I. El-Mahallawi // *Energies*. 2022. V. 15. Is. 23. P. 8988. <https://doi.org/10.3390/en15238988>
5. **Elshamy A.** Investigating the potential for implementing solar thermal cooling systems and energy efficiency measures for dwellings in Egypt: Ph.D. thesis. UK, Loughborough University, 2020. https://repository.lboro.ac.uk/articles/thesis/Investigating_the_potential_for_implementing_solar_thermal_cooling_systems_and_energy_efficiency_measures_for_dwellings_in_Egypt/137-21494
6. **TRNSYS**: transient system simulation tool. [Электрон. ресурс.] <https://www.trnsys.com/>
7. **Asim M., Dewsbury J., Kanan S.** TRNSYS simulation of a solar cooling system for the hot climate of Pakistan // *Energy Procedia*. 2016. V. 91. P. 702–706. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.233>
8. **Simulation** and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors / F. As-silzadeh, S.A. Kalogirou, Y. Ali, K. Sopian // *Renewable Energy*. 2005. V. 30. Is. 8. P. 1143–1159. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.017>
9. **Safwat H.M., Anees F.** Energy comparison of air conditioning split system vs. solar absorption systems with optimization for a prototype educational building // *Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Efficient Building Design*. Lebanon, Beirut, American University of Beirut, 4–5 Oct. 2018.
10. **Narayanan R., Harilal G.K., Golder S.** Feasibility study on the solar absorption cooling system for a residential complex in the Australian subtropical region // *Case Studies Therm. Eng.* 2021. V. 27. P. 101202. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101202>
11. **Lokurlu A., Ramesh A.** Parabolic trough collector (PTC) system for combined cooling and heating supply for a factory building in Turkey. EuroSun, 2022.
12. **Weiss W., Spörk-Dür M.** Solar heat worldwide 2023: global market development and trends 2022, detailed market figures 2021. Gleisdorf, Austria: AEE – Institute for Sustainable Technologies, IEA Solar Heating & Cooling Programme, 2023.
13. **Solar-cooled** building in the desert. Energy Innovation Austria. Arizona, USA, Scottsdale Desert Mountain High School. [Электрон. ресурс.] <https://www.energy-innovation-austria.at/article/desert-mountain-high-schoolarizona-usa-2/?lang=en>
14. **Fresnel** solar cooling system. [Электрон. ресурс.] <https://www.blackdotenergy.co.za/fresnel-solar-cooling-system/>
15. **A comparative** thermal performance assessment of various solar collectors for domestic water heating / A.R. Kalair, M. Seyedmahmoudian, M.S. Saleem, N. Abas, S. Rauf, A. Stojcevski // *Int. J. Photoenergy*. 2022. V. 2022. Is. 1. P. 9536772. <https://doi.org/10.1155/2022/9536772>
16. **El Shorouk** city latitude and longitude. [Электрон. ресурс.] <https://www.distancesto.com/coordinates/eg/el-shorouk-city-latitude-longitude/history/328583.html>
17. **How** to calculate inter-row spacing on ground or flat roof top solar plant. eSun Solar. [Электрон. ресурс.] <https://esunsolar.in/how-to-calculate-inter-row-spacing-on-ground-or-flat-roof-top-solar-plant/>
18. **Kohlenback P., Jakob U.** Solar cooling: The Earthscan expert guide to solar cooling systems. 1st ed. London, Routledge, 2014. <https://doi.org/10.4324/9781315867533>
19. **TRNSYS 17**: a transient system simulation program. V. 4: Mathematical reference. [Электрон. ресурс.] <https://web.mit.edu/parmstr/Public/TRNSYS/04-MathematicalReference.pdf>
20. **Stoecker W., Jones J.** Refrigeration and air conditioning. 2nd ed. McGraw-Hill, 1983.
21. **Carbon** footprint of electricity generation. Parliamentary Office of Science & Technology Postnote, 2006. Number 268.
22. **Renewable** energy – powering a safer future. Climate Action. [Электрон. ресурс.] <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
23. **Carbon** dioxide emissions from electricity. World Nuclear Association. [Электрон. ресурс.] <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity>

Solar Absorption Cooling System for Egypt Conditions

K. Bakry^{a, *}, I. El-Mahallawi^{a, b}, and H. Safwat^a

^a *The British University in Egypt, Faculty of Engineering, Cairo, 11837 Egypt*

^b *Cairo University Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, 12613 Egypt*

**e-mail: kholoud.bakry@gmail.com*

Abstract—Climate change with Egypt's increasingly hot weather and its plans towards energy transition, addressing an approach for clean heating, ventilation, and air condition solutions is becoming requisite. This paper examines the potential of utilizing solar absorption cooling systems in institutional buildings by presenting a case study of a proposed solar absorption cooling system for a library building with an area of 4402 m², located at the British University in Egypt. The proposed solution is to replace 30% of the existing conventional air conditioning units with a hot-water driven single-effect absorption chiller powered by solar thermal vacuum tube solar collectors, coupled with a stratified hot water storage tank. The potential area of the solar collectors was calculated to be 856 m². A detailed analysis was done using TRNSYS (Transient Simulation System Software) as a simulation tool, to find that the optimum stratified hot water storage tank size is to be 10 m³; with a specific volume per solar collectors' area of 0.01 m³/m². The proposed system covers the cooling demand of the library building for 8 to 9 months of the year without an auxiliary heater and saves almost 95% of the electrical energy consumed by the replaced conventional air conditioning system.

Keywords: solar cooling, hot water driven absorption chiller, solar thermal energy, energy efficiency, air conditioning in institutional buildings, electricity consumption in Egypt