

Водные аккумуляторы энергии для солнечных электростанций

Water accumulators of energy for solar power plants

Д-р С. Розенберг, Лод, Израиль,
Новая Израильская Ассоциация Наук
Email: semyon.rozenberg@gmail.com, тел. + (972) 524854666

Rozenberg Simyon Ph.D., Lod, Israel,
New Israel Science Association
Email: semyon.rozenberg@gmail.com, tel. + (972) 524854666

Аннотация

В статье рассмотрено техническое решение, которое преобразует любое поле солнечных панелей в круглосуточный источник энергии. Рассмотренная система сочетает солнечные панели, водные аккумуляторы энергии и тепловые **машины-компрессоры и детандеры**. Эта экологически чистая система включает в себя накопители энергии, которые в 10-20 раз дешевле электрохимических батарей эквивалентной энергетической емкости и предлагают вдвое больший срок службы. Предложенное сочетание оборудования обеспечивает 79 % энергии от солнечных панелей с инвертором, достигая эффективности, аналогичной гидроаккумулирующим электростанциям. Система представляет собой инновационное уникальное сочетание устройств и потому является перспективной для патентования. Система не требует выделения отдельных земельных участков, поскольку оборудование устанавливается под солнечными панелями, что экономит пространство и снижает влияние на окружающую среду.

Капитальные затраты системы составляют порядка (CAPEX):

US\$ 34/кВтч или US\$ 500/кВт и цена ночной энергии составляет 1 ¢/кВтч .

В 2023 году средние капитальные затраты литий-ионных систем составляли US\$ 304 /кВтч. Исследование и развитие этой технологии в рамках НИОКР создаст возможности для повышения энергоэффективности и экологичности солнечных электростанций. На 2025 в мире действуют солнечные электростанции суммарной мощностью более 1400 ГВт, но к 2030 прогнозируется только 345 ГВт мощности накопителей энергии. Потому рынок рассмотренной технологии накопления очень актуален и составляет 1000 ГВт.

Ключевые слова: Солнечные электростанции, солнечные панели, тепловые насосы, тепловые машины, водяные накопители, водные аккумуляторы, стоимость энергии, компрессоры, детандеры, паровые поршневые моторы.

Abstract

The article discusses a technical solution that transforms any solar panel field into a day-and-night energy source. The system in question combines solar panels, water thermal energy accumulators **and thermal machines - compressors and expanders**. This environmentally friendly system includes energy storage devices that are 10-20 times cheaper than electrochemical batteries of equivalent energy capacity and offer twice the service life. The system supplies the consumer with 79 % of the energy that these solar panels would have generated during the day if directly connected via an inverter, achieving efficiency comparable to pumped-storage power plants.

The system is an innovative unique combination of devices and therefore is promising for patenting.

The system does not require the allocation of separate land plots, since the equipment is installed under the solar panels, which saves space and reduces the environmental impact.

The system's capital expenditure (CAPEX) is approximately:

US\$ 34/kWh or US\$ 500/kWh, and the night energy price is 1¢/kWh.

In 2023, the average capital cost of lithium-ion systems was US\$ 304 / kWh.

Research and development of this technology within the framework of R & D will create opportunities for increasing the energy efficiency and environmental friendliness of solar power plants. In 2025, solar power plants with a total capacity of more than 1400 GW are operating in the world, but by 2030 only 345 GW of energy storage capacity is predicted. Therefore, the market for the storage technology under consideration is very relevant and amounts to 1000 GW.

Key words: Solar power plants, solar panels, heat pumps, heat machines, water accumulators, water batteries, energy cost, compressors, expanders, steam piston engines.

1. Существующее положение

- Солнечная энергия вырабатывается только в дневное время. Проблему прерывистости солнечной и ветровой энергии можно решить только с помощью накопителей энергии. Средние капитальные затраты на май 2024 [1] на хранение тепловой энергии и сжатого воздуха составили US\$ 232 /кВтч и US\$ 293 /кВтч соответственно. В 2023 году средние капитальные затраты литий-ионных систем составляли US\$ 304 /кВтч для систем с четырехчасовой продолжительностью хранения, то есть, как правило, для более коротких сроков хранения. Стоит отметить, что стоимость литий-ионных батарей составляет 40–60% от общей стоимости проекта для систем хранения энергии на основе аккумуляторов (BESS). Более того, в Китае до 25% возобновляемой энергии тратится впустую из-за недостаточной емкости накопителей.

На 2025 в мире действуют солнечные электростанции суммарной мощностью более 1400 ГВт и к 2030 прогнозируется только 345 ГВт мощности накопителей энергии. Потому мировой рынок рассмотренной технологии накопления энергии очень актуален и составляет до 1000 ГВт.

В настоящее время в основном используются электрохимические аккумуляторы, батарейные инверторы и контроллеры заряда для солнечных батарей. Чаще всего используются литий-ионные (Li-Ion) и литий-железо-фосфатные (LiFePO₄) батареи. Циклические режимы работы аккумуляторов с периодическими или постоянными глубокими разрядами резко сокращают срок службы аккумуляторов. Поэтому глубина разряда таких аккумуляторов должна быть не более 80 %. Сроки службы литий-ионных батарей не более 5-ти лет. Литий-железо-фосфатные (LiFePO₄) батареи имеют лучшие характеристики, но почти в двое дороже.

- В мировой энергетике начали интенсивно проводить работы по использованию мало энергетического тепла. Строятся геотермальные электростанции, установки для использования отработанного тепла тепловых электростанций, детандеры с электрогенераторами на газоперекачивающих станциях и другие тепловые насосы. Эти установки в термодинамических циклах преобразуют низко энергетическое тепло в электроэнергию с помощью детандеров, работающих на различных хладагентах.

- Во всех странах нашли широчайшее распространение холодильные устройства – холодильники, морозильники и кондиционеры. Уже более ста лет эти аппараты служат в жилых квартирах, офисах, магазинах, складах, на ледяных аренах, в разных отраслях техники и науки. Сроки службы холодильных аппаратов превышают 10 лет.

- Во многих отраслях промышленности чрезвычайно востребованы пневмодвигатели благодаря своим неоспоримым преимуществам.

Они гарантируют высокую надежность, имеют оптимальное соотношение мощности и веса, не загрязняют окружающую среду, достаточно легко и просто регулируются. Пневмодвигатели работают на сжатом воздухе или на водяном паре. Промышленность производит различные поршневые паровые двигатели. Но иногда дешевле переоборудовать в паровые поршневые двигатели автотракторные дизельные двигатели. Поршневые паровые

машины имеют удельный расход пара в 2-2.5 раза меньше, чем паровые турбины такой же мощности.

2. Цель представленного теоретического исследования:

Цель – подтверждение эффективности использования вместо электрохимических батарей водяных аккумуляторов энергии.

Ниже рассмотрен Комплекс оборудования для аккумулирования энергии солнечных фотоэлектрических панелей, дополненных водяными аккумуляторами энергии и тепловыми машинами, как альтернатива электрохимическим батареям.

3. Экономический смысл

Исследуемый Комплекс оборудования превращает солнечные фотоэлектрические панели в автономный управляемый источник и ночной, и дневной круглосуточной генерации. Потребитель получает 79 % электрической энергии панелей, обеспечивая «возврат» энергии не хуже, чем у ГАЭС или у электрохимических аккумуляторов. Исследуемый Комплекс в 10-20 раз дешевле накопителей на электрохимических батареях той же емкости и еще имеет вдвое больший срок службы. Капитальные затраты системы составляют порядка CAPEX = **US\$ 34/кВтч или US\$ 500/кВт** и цена ночной энергии составляет **1 ¢/кВтч**.

Комплекс не требует выделения отдельных хозяйственных территорий, т.к. оборудование устанавливается под солнечными панелями. Как автономный управляемый источник круглосуточной генерации в децентрализованной энергосистеме Комплекс повышает устойчивость электроснабжения потребителей в сети.

4. Описание комплекса

Комплекс дополняет солнечную электростанцию и содержит водной аккумулятор энергии и тепловые машины. Схема Комплекса показана на Рис.1.

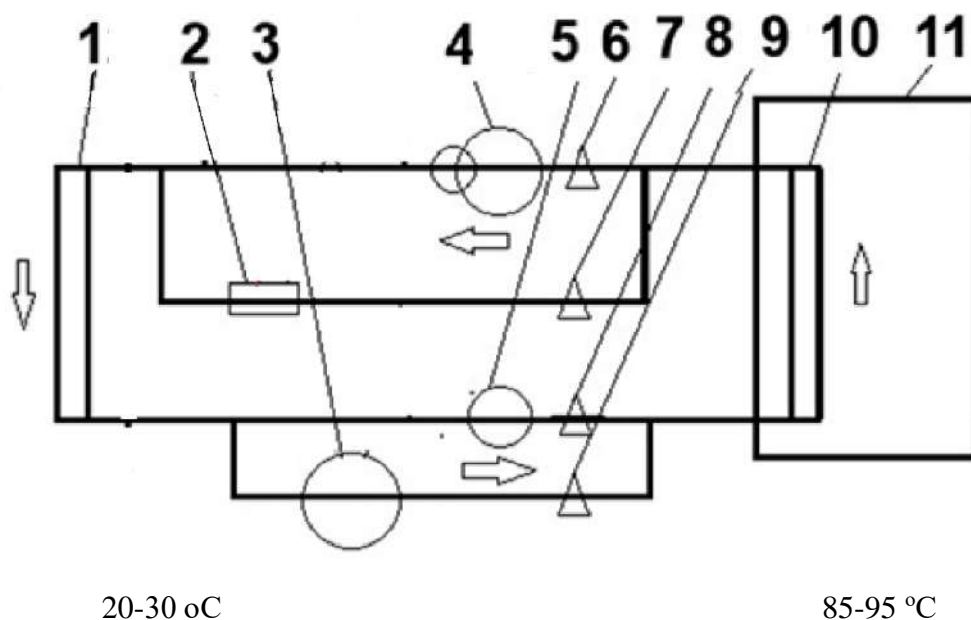


Рис. 1

Обозначения на Рис. 1:

- 1 - - воздушный радиатор, 2- дроссель, 3- поршневой компрессор,
- 4 - поршневой детандер с электрогенератором, 5 - насос хладагента,
- 6, 7, 8, 9 - клапан, 10 - теплообменник, 11 - бак горячей воды.

Описание работы Комплекса

4.1. В солнечное время дня

Солнечные фотоэлектрические панели в солнечное время дня вырабатывают электроэнергию. Часть этой электроэнергии подается через инвертор непосредственно потребителю, т.е. в электросеть. Солнечные панели и инвертор на схеме не показаны.

Другая часть электроэнергии поступает на мотор компрессора 3. Холодильный контур компрессора 3 состоит из дросселя 2, радиатора 1 и теплообменника 10.

В радиаторе 1 холодный хладагент отбирает тепло от окружающего воздуха, т.е. охлаждает его. В теплообменнике 10 хладагент конденсируется и нагревает в баке 11 горячую воду, т.е. отдает тепло горячей воде.

Контур компрессора т.о. выполняет функции теплового насоса: отбирает тепло от окружающего воздуха и передает его в горячую воду.

Охлажденный в радиаторе воздух может быть направлен в жилые, офисные или производственные помещения.

4.2. В несолнечное время дня

В несолнечное время мотор компрессора 3 выключается, клапаны 7 и 9 закрываются, а клапаны 6 и 8 открываются. Включаются насос 5 и детандер-генератор 4. Детандер 4 имеет электрогенератор, который отдает энергию потребителю, т.е. в электросеть.

Контур детандера 4 состоит из насоса 5, радиатора 1 и теплообменника 10. В теплообменнике 10 хладагент превращается в пар и отбирает тепло от горячей воды в баке 11. Тепловая энергия в баке 11 была запасена в солнечное время тепловым насосом в контуре компрессора 3.

Отработанный пар поступает в радиатор 1, в котором хладагент конденсируется и отдает тепло в окружающий воздух. Нагретый в радиаторе воздух может быть направлен для обогрева в жилые, офисные или производственные помещения.

5. Справочные данные по энергетике солнечных панелей

5.1. В Отчете Estimating the Optimum Tilt Angles for South-Facing Surfaces in Palestine от февраля 2020 [2] исследованы энергетические возможности солнечных панелей, в частности в Иерусалиме. (См. таблицы 15,16, 17, 18 в Приложении 1). Рассмотрим анализ таблиц 15, 16, 17 и 18 из отчета :

- В год при горизонтальном положении панелей пиковой мощностью 5 кВт (при угле 0°) получаемая энергия по 4-м измерениям составляет
 $1523 \text{ кВтч/кВт пик*год} : (7664+7574+7856+7371)/4=30465/4*5 \text{ кВт пик} =$
 $=7616 \text{ кВтч/год*5 кВт пик}.$

- Панели пиковой мощностью 5 кВт производят энергию в год при горизонтальном положении (угол 0°) $1523 \text{ кВтч/кВт пик*год}$ (по 4-м измерениям $7664+7574+7856+7371)/4=30465/4*5 \text{ кВт пик}$).

В последние годы некоторые солнечные электростанции уже устанавливают панели горизонтально для увеличения производительности от предоставленной территории.

5.2. Пиковая мощность большинства солнечных фотогальванических панелей составляет 0.18 кВт пик на 1 м² площади панели. Получаемая в год энергия на 1 квадратный метр составляет $274 \text{ кВтч/м}^2*\text{кВт пик*год} (=1523*0.18)$.

В самые солнечные дни в июле и июне по 4-м измерениям за 123 дня (см. Таблицы [2] в Приложении 1) получаем электроэнергии $29.6 \text{ кВтч/5 кВт*день} (=908+933+935+867)/123$.

В день получаем $5.92 \text{ кВтч/кВт*день} (=29.6/5)$ и на 1 м² площади панели имеем $1.066 \text{ кВтч/м}^2*\text{день} (=5.92*0.18)$

При средней продолжительности в эти месяцы солнечного дня **8.5 часов** имеем среднюю мощность панелей 0.126 кВт/м^2 ($=1.066 / 8.5$). В самые жаркие дни максимальная мощность панелей будет больше и составит не менее 0.13 кВт/м^2 .

5.3. Преобразование в солнечное время электрической энергии панелей

В данном исследовании на основании вышеприведенных сведений принимаем, что панели имеют максимальную мощность 0.13 кВт/м^2 (на 1 м^2 панели) и за **8.5 часов** производят днем энергию 1.1 кВтч/м^2 ($=0.13 * 8.5$).

5.4. Например, половину этой мощности 0.065 кВт/м^2 получает инвертор, который за **8.5 часов** производит энергии 0.5525 кВтч/м^2 ($=0.065 * 8.5$), и отдает потребителю днем электроэнергию 0.525 кВтч/м^2 ($=0.95 * 0.5525$) средней мощностью 0.062 кВт/м^2 ($=0.065 * 0.95$). Инвертор имеет КПД=0.95.

Оставшаяся часть мощности панелей 0.065 кВт/м^2 (из $0,13 \text{ кВт/м}^2$), направляется на двигатель компрессора для накопления энергии для несолнечного времени.

5.5. Соотношение мощностей для инвертора и насоса компрессора могут быть иными в зависимости от среднестатистических потребностей сети. Уменьшение доли энергии для компрессора уменьшает количество энергии, вырабатываемой в несолнечное время.

6. Анализ эффективности исследуемого комплекса, включающего солнечные панели, водной аккумулятор и тепловые машины.

6.1. Оценку эффективности Комплекса исследуем на примере «поля» солнечных фотоэлектрических панелей площадью 1000 м^2 . На этом поле, в этом исследуемом проекте горизонтально установлено почти вплотную **512** солнечных панелей наиболее распространенного размера **1 на 2 метра**. Панели расположены в **32** ряда по **16** панелей в ряду. Общая площадь поверхности **512** панелей составляет **1024 м²**. При дальнейшем анализе для наглядности принимаем, что суммарная площадь панелей составляет **1000 м²**. Мощность поля солнечных фотоэлектрических панелей составляет **180 кВт** пик ($=0.18 * 1000$), производительность составляет в год **274 000 кВтч** ($=1523 \text{ кВтч/кВт пик} * 180 \text{ кВт пик}$).

От солнечных панелей **в июне-июле** потребитель получает электроэнергии **525 кВтч в день** ($=0.525 * 1000$) - см. п. 5.4.

От Комплекса **в июне-июле** потребитель получает электроэнергии **300 кВтч** ($=0,3 * 1000$) **в несолнечное время** для использования в течение **15,5 часов** - см. пункт 6.3.

В год в солнечное время потребитель получает электроэнергии **174000 кВтч** ($=274000 * 525 / 825$) и **в несолнечное время 100 000 кВтч** ($=274000 * 300 / 825$).

6.2. Термодинамические расчеты

- Термодинамические расчеты проведены для самых жарких дней в июне-июле. В расчетах приняли, что температура окружающего воздуха днем составляет

30 оС, а температура хладагента в радиаторе в компрессорном контуре за счет отбора тепла составляет **25 оС**.

В несолнечное время температура окружающего воздуха составляет **20 оС**, а температура хладагента в контуре детандера в радиаторе за счет отбора тепла из контура детандера составляет **25 оС**.

Температура горячей воды баке **11** утром составляет **85 оС**, к концу дня поднимается до **95 оС** в компрессорном контуре. В несолнечное время температура горячей воды опускается от **95оС** до **85 оС** к утру в контуре детандера.

Термодинамические расчеты приведены в Приложении 2.

6.3. Получены следующие результаты термодинамических расчетов для площади панелей площадью 1000 м²:

- Холодильный коэффициент в холодильном цикле составляет $\epsilon_k = 4.585$.
- За 8.5 ч солнечного дня контур компрессора отбирает из окружающего воздуха энергию 6.6 ГДж.
- За эти 8,5 часов горячая вода 11 аккумулирует энергию **8.5** ГДж.
- В несолнечное время преобразование тепла в работу в контуре детандера имеет коэффициент работоспособности $K_p = \tau = 0.179$.
- Детандер 4 произведет работу и передаст потребителю за 15.5 часов несолнечного времени энергию 300 кВтч при средней мощности 20 кВт.

7. Основные характеристики Комплекса:

- Солнечные панели имеют суммарную площадь 1000 м²,
- Установленную мощность: 180 кВт пиковая,
- Годовое производство энергии **панелями**: 274000 кВт·ч.
- Годовое производство энергии в дневное время 174000 кВтч
- Годовое производство энергии в несолнечное время 100000 кВтч
- Дневная энергия: 525 кВт·ч в день в июне-июле
- Полезная возвращаемая (ночная) энергия: 300 кВт·ч в день в июне-июле.
- **Капитальные затраты (CAPEX)=34 \$/кВтч или 500 \$/кВт,**
цена ночной энергии составляет 1 ¢/кВтч –см. п.10.5.
- Мощность моторов компрессоров составляет 65 кВт.
- Мощность детандер-генераторов составляет 20 кВт
- Объем бака горячей воды составляет 200 м³.
- Мощность теплообменника составляет 280 кВт
- Мощность радиатора- 220 кВт.
- Эффективность возврата энергии составляет 79% - см.п.8.
- Требуемая емкость альтернативного аккумулятора: 830 кВт·ч –см.п.9.

8. Анализ энергетических показателей поля солнечных панелей площадью 1000 м²

- Инвертор получает входную мощность 0,065 кВт/м² (из 13 кВт/м²) и производит 525 кВт·ч в течение дня за 8.5 часов, обеспечивая среднюю выходную мощность 62 кВт.
 - Ночью детандер имеет среднюю мощность 20 кВт и вырабатывает 300 кВт·ч за 15,5 часов.
 - Таким образом, в общей сложности потребитель получает 825 кВт·ч энергии (=525+300) днем и ночью, со средней мощностью днем 62 кВт и ночью 20 кВт.
 - Если всю энергию панелей подавать через инвертор, то потребитель получил бы, но только в солнечное время энергию 1.045 кВтч/м² (=1.1*0.95).
- Система с компрессором и детандер-генератором отдает потребителю 79% энергии (=0,825/1,045) от энергии от панелей с инвертором.
- Это означает, что эффективность возврата энергии компрессорно-детандерной системой составляет 79%, что сопоставимо с эффективностью гидроаккумулирующей электростанции.
 - Важно, что эта система также обеспечивает потребителя энергией ночью, превращая солнечные панели в полностью автономный, управляемый круглосуточный источник энергии.

9. Оценка емкости альтернативной аккумуляторной батареи

Исследуем систему, содержащую солнечные панели, инвертор и аккумулятор.

- Если только часть энергии от панелей в самые жаркие дни подавать через инвертор, как в случае с водяными батареями, например, 0,5525 кВтч/м² (= 0,065×8,5), а остаток энергии

0,5525 кВтч/м² (= 0,065×8,5) запасать в электрохимической батарее для использования в несолнечные периоды то:

- Потребитель получит 0,525 кВтч/м² в течение дня (=0,5525×0,95) и 0,42 кВтч/м² в несолнечные периоды (=0,5525×0,8×0,95).

- Здесь мы предполагаем, что инвертор работает с эффективностью 95%, а батарея (включая потери контроллера) имеет эффективность возврата энергии 80%.

- Система, содержащая инвертор и аккумулятор, будет поставлять потребителю в общей сложности 0,945 кВт·ч/м² (=0.525+0.42) в течение дня и ночи, что составляет 90% (= 0,945/1,045) энергии, вырабатываемой системой, использующей только инвертор.

- Альтернативная аккумуляторная батарея должна возвращать каждую ночь эту запасенную энергию 0.5525 кВтч/м², но современные батареи допустимо разряжать только на 80 %. Поэтому батарея должна была бы иметь емкость не менее 0.69 кВтч/м² (=0.5525/0.8). Известно, что электрохимические аккумуляторы в процессе эксплуатации теряют свою емкость на 10-20%. Для предотвращения интенсивной потери емкости аккумулятора при его еженощной разрядке емкость аккумулятора должна быть увеличена не менее, чем на 20% и составлять не менее 0,83 кВтч/м² (=0,69*1,2).

10. Стоимость основного оборудования и материалов для поля солнечных панелей мощностью 180 кВт пик суммарной площадью 1000 м²

В этом разделе мы рассчитаем стоимость основного оборудования, используемого в системе солнечных панелей, включая компрессоры, расширители и их альтернативные варианты. Цены основаны на имеющейся информации и предположениях, таких как использование компрессоров и расширителей, изготовленных из переделанных автомобильных и тракторных дизельных двигателей.

10.1. Анализ цен на тепловые машины приведен в Приложении 3.

Анализ показал, что для дальнейшего исследования в Комплексе солнечных панелей на 180 кВт пик в качестве компрессоров и детандеров целесообразно использовать переоборудованные автотракторные дизели. Их средняя цена составляет US\$ 50/кВт. Суммарная мощность компрессоров составляет 65 кВт и стоимость US\$ 3250 (=50*65). Суммарная мощность детандеров составляет 20 кВт и стоимость US\$ 1000 (=50*20).

10.2. Цены на электромоторы для компрессоров составляют US\$ 1 /кВт [12]. Стоимость электромоторов на 65 кВт составляет US\$ 65.

Цены на электрогенераторы для детандеров составляют US\$ 2 /кВт [13]. Стоимость электрогенераторов на 20 кВт составляет US\$ 40.

10.3. Суммарная мощность теплообменников и радиатора составляет 0.5 кВт/м².

Цены на теплообменники по сведениям из интернета составляют от US\$ 1.3/кВт [14] до US\$ 10 /кВт [15]. Их средняя цена составляет US\$ 4/кВт. Стоимость теплообменника и радиатора для Комплекса солнечных панелей на 180 кВт пик составляет порядка US\$ 2000 (=4*0.5*1000).

10.4. Стоимость теплоизолированного бака

Расчет стоимости теплоизолированного бака приведен в Приложении 4.

Стоимость материалов и бетонных работ составляет US\$ 3060.

Стоимость теплоизоляции – вспененного полиэтилена составляет US\$ 550.

10.5. **Общая стоимость** основного оборудования и материалов для поля солнечных панелей пиковой мощностью 180 кВт и общей площадью 1000 м² составляет примерно:

Общая стоимость составляет US\$ 10 000, в том числе 3250 (компрессоры)+1000 (детандеры)+85 (электродвигатели)+40 (генераторы)+2000 (теплообменники)+3060 (бетон)+550 (изоляция).

Полезная запасаемая (ночная) энергия составляет 300 кВт·ч/день и 100000 кВтч в год.

Капитальные затраты (CAPEX) составляют 34 \$/кВтч (=10 000/300) или 500 \$/кВт (\$10000/20 /кВт)

Доля стоимости оборудования в годовой цене ночной энергии составляет 1 ¢/кВтч ($=\$10000/100000*10$). Здесь

-стоимость оборудования \$10000,

-годовое производство ночной энергии 100000 кВтч,

-срок службы холодильного оборудования 10 лет.

Стоимость оборудования для экспериментальных и опытных комплексов естественно будет в 2-3 (или более) раз больше, чем стоимость комплексов при достаточно масштабном серийном производстве. В Израиле цена продажи солнечной энергии составляет 0,02 \$/кВт·ч.= 2 ¢/кВтч [23]

10.6. Средние капитальные затраты на май 2024 [1] на хранение тепловой энергии и сжатого воздуха составили US\$ 232 /кВтч и US\$ 293 /кВтч соответственно. В 2023 году средние капитальные затраты литий-ионных систем составляли US\$ 304 /кВтч для систем с четырехчасовой продолжительностью хранения, то есть, как правило, для более коротких сроков хранения.

10.7. Альтернативная электрохимическая батарея для исследуемого Комплекса солнечных панелей суммарной площадью 1000 м² и мощностью 180 кВт пик должна была бы иметь емкость не 830 кВтч- см. п. 9.

Цена аккумуляторных батарей LiFePO₄ составляет US\$ 290/кВтч [19], [20], [21].

Цена аккумуляторных литий-ионных батарей (Li-Ion) составляет US\$ 151/кВтч Ноябрь 2024 [22]

Стоимость литий-ионных аккумуляторных батарей вместо исследуемого Комплекса должна была бы быть не менее US\$ 126 000 ($=151*830$), а цена аккумуляторных батарей LiFePO₄ составила бы не менее US\$ 241 000 ($=290*830$).

11. Результаты

11.1. Сравнение стоимости комплекса

- Стоимость комплекса оборудования для солнечных панелей (включая компрессор, детандер, теплообменник, бетонные работы и теплоизоляцию) составляет US\$ 10 000.

- Эта стоимость в 10–20 раз меньше стоимости альтернативных аккумуляторов (US\$ 126 000 или US\$ 241 000), необходимых для хранения того же количества электроэнергии.

Капитальные затраты (CAPEX) составляют US\$ 34 /кВтч или **500 \$/кВт и цена ночной энергии 1 ¢/кВтч. .**

11.2. Экологические соображения

- Рассматриваемый комплекс для солнечных панелей, использующий воду и хладагенты, циркулирующие в замкнутых контурах, которые не сообщаются с атмосферой, что делает его экологически чистым.

- Холодильные устройства и хладагенты, используемые в комплексе, не создавали экологических проблем на протяжении более ста лет эксплуатации.

- Однако электрохимические батареи создают экологические проблемы при производстве, эксплуатации и утилизации, что необходимо учитывать.

12. Заключение

12.1. Преимущества комплекса

- Комплекс оборудования для солнечных панелей, состоящий из холодильных компрессоров, детандеров и водяных аккумуляторов, предлагает высокорентабельную и экологически чистую альтернативу электрохимическим батареям.

- Общая капитальная стоимость комплекса значительно ниже, чем при хранении эквивалентной электроэнергии с использованием литий-ионных или LiFePO₄-аккумуляторов.

- Долгосрочная эксплуатационная устойчивость системы в сочетании с меньшим воздействием на окружающую среду делает ее привлекательной альтернативой электрохимическим батареям.

12.2. Представление исследования

Это исследование следует направить на рассмотрение техническим специалистам и потенциальным спонсорам, которые могут посчитать этот подход жизнеспособным и более устойчивым вариантом для хранения энергии и управления солнечной энергией.

Ссылки

[1] Source: Capex for energy storage technologies as of May 2024. <https://www.ess-news.com/2024/05/31/ides-poised-to-outcompete-lithium-ion-batteries/>

[2] Estimating the Optimum Tilt Angles for South-Facing Surfaces in Palestine <https://www.researchgate.net/publication/342903106>

[3] Determination of the energy efficiency of devices, installations and systems PhD A.V. Martynov. <http://www.energsovet.ru/stat616.html>

[4] Accumulation of cold in air conditioning systems of buildings and structures Semenov, A.I. Andreev. . [pp.300-303.]

https://astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0%20%D0%B8%20%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%202022%20%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%20%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%8C%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9.pdf?utm_source=orbita.co.il&utm_medium=referral&utm_campaign=orbita.co.il&utm_referrer=orbita.co.il

[5] Manufacturer price for compressors.

-<https://morena.ru/catalog/kompressor/germetichnye/porshnevye/kompressor-tag-2522-z-f1-t-tu-m-18-tecumseh-2855230105->

[6] Manufacturer price for compressors. https://nerancompressors.en.made-in-china.com/product/ZiTYkawBhPVp/China-Marine-Easy-to-Operate-Low-Noise-Air-Cooling-Medium-Pressure-Piston-Air-Compressor.html?pv_id=1if7g556bee&faw_id=1if7g5td7f43

[7] Manufacturer price for compressors. <https://sino-cold.en.made-in-china.com/product/BaOYojQkgxWn/China-Cold-Storage-Large-Refrigeration-Equipment-40HP-Sp4l2200-Refcomp-Semi-Hermetic-Piston-Compressors-Screw-Parallel-Condensing-Unit.html>

[8] Fördertechnik GmbH <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5783>

[9] Ukrainian manufacturers of pneumatic motors.

<https://krotimport.promportal.su/goods/11628804/pnevmodvigateli-p12-12-p9-12-p8-12-p6-3-12-p16-25-p13-16-dar-14-mp-9-dar-5-dar-30-ppn-3-04-040>

[10]. Cost of automobile and tractor engines used for compressors.

<https://www.dizkom.ru/dvigateli-ymz/yamz-v8/dvigatel-yamz-238gm2>

[11]. Cost of automobile and tractor engines. - [https://www.google.com/search?client=ms-google-coop&q=%D1%86%D0%B5%D0%BD%D0%B0+%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B5+%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8+%D0%94-240+\(%D0%94-242,243\),+%D0%94-245,+%D0%94-260.&cx=001877356986769440768:3pwk7ea_kfs](https://www.google.com/search?client=ms-google-coop&q=%D1%86%D0%B5%D0%BD%D0%B0+%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B5+%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8+%D0%94-240+(%D0%94-242,243),+%D0%94-245,+%D0%94-260.&cx=001877356986769440768:3pwk7ea_kfs)

[12] Price of compressor electric motors <https://www.alibaba.com/product-detail/Best-Quality-75kw-100HP-1000rpm->

[13] Price of expander electric generators.. https://www.alibaba.com/product-detail/200kva-160kw-dynamo-generator-diesel-250VA_1600092923481.html?spm=a2700.7724857.0.0.47001a18J8z2Zz

- [14] Price of heat exchangers. <https://teploobmennik-russia.ru/article/cena-na-plastinchatye-teploobmenniki-nn>
- [15] Price of heat exchangers. <https://teploobmennik-russia.ru/article/cena-na-plastinchatye-teploobmenniki-nn>
- [16] Experience in building seasonal heat accumulators. <https://www.c-o-k.ru/articles/sezonnyy-akkumulyator-teploty-i-holoda-dlya-sistemy-energospabzheniya-zdaniya>.
- [17] Concrete work price in Israel. <https://www.top-renovations.co.il/%D7%A9%D7%99%D7%A4%D7%95%D7%A5-%D7%91%D7%99%D7%AA/%D7%99%D7%A6%D7%99%D7%A7%D7%AA-%D7%91%D7%98%D7%95%D7%9F>
- [18] Price of foamed polyethylene insulation. <https://upakuykin.ru/katalog/vspennyj-polietilento-lshhina-5-mm-105-m-h-50-pog-m/>
- [19] Price of LiFePO₄ batteries. <https://lawnlove.com/blog/lithium-ion-battery-cost/#hours>.
- [20] Price of lithium-ion batteries. November 2024, <https://lawnlove.com/blog/lithium-ion-battery-cost/#hours>.
- [21] Further information on lithium battery prices. <https://solarverse.com.ua/ru/product/akkumulyatornaya-batareya-deye-rw-125-lv-256v-100ah-256kwh-lifepo4>
- [22] Further information on lithium battery prices. <https://batteryraft.ru/shop/akkumulyator-lifepo4-24v-230ach/>
- [23] https://www.pv-magazine.com/2024/07/11/edf-wins-israeli-pv-tender-with-bid-of-0-019-kwh/?utm_source=chatgpt.com

Приложение 1

Таблицы 15, 16, 17, 18 из отчета Estimating the Optimum Tilt Angles for South-Facing Surfaces in Palestine от февраля 2020 [2]

Table 15. The monthly average global radiation in Jerusalem for different tilt angles (β).

Months	Monthly Average Radiation (kWh/m ² /day) for Jerusalem											
	PVGIS						PVWatts					
	β (0°)	β (28°)	β (29°)	β (30°)	β (60°)	β (90°)	β (0°)	β (26°)	β (29°)	β (30°)	β (60°)	β (90°)
January	3.07	4.35	4.39	4.42	4.84	4.16	2.68	3.57	3.64	3.66	3.88	3.27
February	3.86	4.96	4.96	5.00	5.11	4.11	3.57	4.49	4.56	4.57	4.61	3.66
March	5.19	6.00	6.00	6.00	5.58	3.97	4.81	5.43	5.45	5.45	4.95	3.44
April	6.40	6.60	6.57	6.57	5.43	3.20	6.13	6.37	6.33	6.32	5.16	2.98
May	7.19	6.81	6.77	6.74	4.97	2.36	7.17	6.93	6.83	6.79	5.01	2.43
June	8.17	7.40	7.33	7.27	5.00	1.91	8.07	7.53	7.38	7.33	5.03	2.08
July	8.06	7.42	7.39	7.32	5.16	2.12	8.01	7.61	7.47	7.43	5.22	2.23
August	7.39	7.39	7.35	7.35	5.74	2.98	7.28	7.45	7.39	7.36	5.79	3.04
September	6.20	6.97	6.97	6.97	6.20	4.07	6.26	7.08	7.1	7.1	6.32	4.13
October	4.65	5.84	5.87	5.90	5.87	4.52	4.69	5.86	5.94	5.96	5.88	4.49
November	3.53	4.97	5.00	5.03	5.47	4.63	3.34	4.54	4.63	4.66	4.94	4.12
December	2.86	4.26	4.29	4.32	4.87	4.29	2.45	3.38	3.46	3.48	3.77	3.24
Annual Average	5.55	6.08	6.07	6.07	5.35	3.53	5.37	5.85	5.85	5.84	5.05	3.26

Table 16. The monthly average global radiation in Gaza city for different tilt angles (β).

Months	Monthly Average Radiation (kWh/m ² /day) for Gaza city										
	PVGIS						PVWatts				
	β (0°)	β (28°)	β (29°)	β (30°)	β (60°)	β (90°)	β (0°)	β (29°)	β (30°)	β (60°)	β (90°)
January	3.02	4.29	4.32	4.35	4.77	4.10	3.05	4.53	4.57	5.04	4.34
February	3.96	5.11	5.14	5.18	5.29	4.25	3.72	4.93	4.96	5.07	4.04
March	5.32	6.19	6.19	6.19	5.77	4.06	4.97	5.8	5.81	5.37	3.76
April	6.53	6.77	6.73	6.73	5.53	3.22	6.19	6.4	6.39	5.21	3.01
May	7.29	6.90	6.87	6.84	5.03	2.33	7.08	6.74	6.7	4.93	2.39
June	8.07	7.30	7.23	7.20	4.90	1.86	7.84	7.11	7.06	4.85	2.04
July	7.94	7.32	7.26	7.23	5.06	2.07	7.55	7.00	6.95	4.93	2.2
August	7.32	7.32	7.29	7.26	5.68	2.92	7.03	7.06	7.03	5.51	2.92
September	6.17	6.90	6.93	6.93	6.17	4.03	5.84	6.58	6.58	5.84	3.82
October	4.81	6.10	6.13	6.13	6.13	4.71	4.56	5.89	5.91	5.91	4.54
November	3.50	4.97	5.00	5.03	5.47	4.63	3.63	5.08	5.11	5.44	4.54
December	2.89	4.32	4.39	4.42	4.97	4.35	2.84	4.43	4.47	5.05	4.44
Annual Average	5.57	6.12	6.12	6.12	5.40	3.55	5.36	5.96	5.96	5.26	3.50

Table 17. Monthly energy generated by a 5 kWh system in Jerusalem.

Months	Monthly Energy Generated (kWh) For Jerusalem									
	PVGIS					PVWatts				
	$\beta = 0$	$\beta_{opt,y}$	$\beta_{opt,sa}$	$\beta_{opt,s}$	$\beta_{opt,m}$	$\beta = 0$	$\beta_{opt,y}$	$\beta_{opt,sa}$	$\beta_{opt,s}$	$\beta_{opt,m}$
January	382	553	612	614	617	339	457	496	498	498
February	431	556	584	580	584	410	517	540	539	540
March	632	726	708	712	730	602	676	663	663	679
April	732	751	752	758	758	721	746	746	751	751
May	832	782	830	810	833	844	813	847	838	848
June	896	804	881	893	896	918	853	909	915	918
July	908	832	899	907	908	933	883	931	935	935
August	841	837	856	848	857	845	861	869	864	872
September	697	776	738	761	776	706	793	759	784	795
October	548	689	709	713	713	557	692	718	718	718
November	413	592	651	640	653	393	534	580	573	582
December	352	539	611	616	617	306	426	469	473	474
Annual Sum	7664	8437	8831	8852	8942	7574	8251	8527	8551	8610
Percentage gain with respect to a horizontal plane (%)		10.1	15.2	15.5	16.7		8.9	12.6	12.9	13.7

Table 18. Monthly energy generated by a 5 kWh system in Gaza City.

Months	Monthly Energy Generated (kWh) for Gaza City									
	PVGIS					PVWatts				
	$\beta = 0$	$\beta_{opt,y}$	$\beta_{opt,sa}$	$\beta_{opt,s}$	$\beta_{opt,m}$	$\beta = 0$	$\beta_{opt,y}$	$\beta_{opt,sa}$	$\beta_{opt,s}$	$\beta_{opt,m}$
January	369	535	592	594	594	371	557	614	618	618
February	438	571	601	598	601	408	540	565	561	565
March	656	758	743	740	763	610	709	692	691	712
April	771	794	793	801	801	703	723	729	732	732
May	879	827	878	859	880	820	776	821	809	824
June	926	833	912	926	926	867	784	852	864	867
July	935	857	926	935	935	861	795	853	861	861
August	857	851	871	857	872	796	796	816	808	816
September	704	785	745	769	785	648	726	698	710	726
October	568	722	747	749	749	527	679	699	701	701
November	406	583	641	631	644	418	586	629	622	629
December	347	536	608	614	615	342	543	610	617	618
Annual Sum	7856	8652	9057	9073	9165	7371	8214	8578	8594	8669
Percentage gain with respect to a horizontal plane (%)		10.1	15.3	15.5	16.7		11.4	16.4	16.6	17.6

Приложение 2

Термодинамические расчеты

1. Расчеты проведены с использованием методики и сведений из работ:

- Определение энергетической эффективности аппаратов, установок и систем

К.т.н. А.В. Мартынов. [3]

- Аккумулирование холода в системах кондиционирования воздуха зданий и сооружений
А. Е. Семенов, А. И. Андреев. [4 стр.300-303.]

В работе [4] авторы проводили расчеты по программе CoolPack. Также на основании информации, которой располагали авторы, при расчетах были приняты КПД-индикаторный коэффициент $\eta_i = 0,8$, КПД-эффективный коэффициент- $\eta_{эф} = 0,95$, КПД-электрический - $\eta_{эл} = 0,95$. Те же значения эффективности были приняты и в данном исследовании.

2. **Электроэнергия панелей в солнечное время** аккумулируется в водяном баке для последующего преобразования в работу - в электроэнергию для потребителя.

- В данном исследовании на основании вышеизложенной информации мы предполагаем, что панели имеют максимальную мощность 0,13 кВт/м² (на квадратный метр панели) и вырабатывают энергию 1,1 кВт·ч/м² в течение дня (в июне-июле) за 8,5 часов (=0,13*8,5).

- Например, половину этой мощности 0.065 кВт/м² получает инвертор, который за 8.5 часов производит энергии 0.5525 кВтч/м² (=0.065*8.5), и отдает потребителю днем электроэнергию 0.525 кВтч/м² (=0.95*0.5525) средней мощностью 0.062 кВт/м² (=0.065*0.95). Инвертор имеет КПД=0.95.

Оставшаяся часть мощности панелей 0.065 кВт/м² (из 0,13 кВт/м²), направляется на двигатель компрессора для накопления энергии для несолнечного периода.

- Соотношение мощностей для инвертора и насоса компрессора могут быть иными в зависимости от среднестатистических потребностей сети. Уменьшение доли энергии для компрессора уменьшает количество энергии, вырабатываемой в несолнечное время.

Процессы происходят следующим образом.

- Половина электроэнергии от солнечных панелей поступает на компрессор, например, 0,065 кВт·ч/м²·ч из 0,13 кВт·ч/м²·ч. Здесь и далее в Приложении 2 все расчеты проведены для 1 квадратного метра солнечной панели.

- Полная реальная мощность, поступающая на компрессор, равна

$$N_k = N / \eta_i * \eta_{эф} * \eta_{эл} = 0,065 \text{ кВт/м}^2. \text{ См. [4]}$$

- Коэффициенты эффективности указаны в пункте 1 и их произведение равно 0,722 ($=\eta_i * \eta_{эф} * \eta_{эл} = 0,8 * 0,95 * 0,95$).

- Теоретическая мощность компрессора N в термодинамическом цикле при этих КПД составляет $N = Q_0 / \epsilon_k = N_k * \eta_i * \eta_{эф} * \eta_{эл} = 0,0065 * 0,722 = 0,047 \text{ кВт/м}^2$.

- В горячем баке температура составляет в середине цикла $T_g = 90 \text{ }^\circ\text{C} = 363 \text{ К}$.

- Температура хладагента в радиаторе днем в середине цикла $T_x = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ К}$ (охлаждение от $30 \text{ }^\circ\text{C}$ снаружи до $25 \text{ }^\circ\text{C}$ хладагента).

- Коэффициент охлаждения составляет $\epsilon_k = T_c / (T_h - T_c)$, где T_c и T_h – абсолютные температуры холодного хладагента в радиаторе и горячей воды: $\epsilon_k = T_x / (T_g - T_x) = 298 / (363 - 298) = 4,585$.

Энергия охлаждения, т.е. холодопроизводительность составляет в час

$E_o = Q_o = N * \epsilon_k = 0,047 * 4,585 = 0,2155 \text{ кВтч/ч} * \text{м}^2 = 0,776 \text{ МДж/ч} * \text{м}^2$. За 8,5 ч среднего солнечного времени контур компрессора отбирает из воздуха через радиатор энергию **6,6 МДж/м²** ($= 0,776 * 8,5$)

Эта энергия E_o охлаждает воздух через радиатор 1, т.е. хладагент отбирает от окружающего воздуха энергию **6,6 МДж/м²**.

«Охладитель» -нагреваемая горячая вода 11 в контуре компрессора получала в час днем энергию E_g , которая равна энергии термодинамического цикла $E_o = Q_o$ плюс энергия E_p , использованную насосом компрессора,

$$E_g = E_o + E_p = 0,2155 \text{ кВтч/м}^2 + 0,065 \text{ кВтч/м}^2 = 0,2805 \text{ кВтч/м}^2 = 1,0 \text{ МДж/ч} * \text{м}^2.$$

$$E_o = Q_o = N * \epsilon_k = 0,047 * 4,585 = 0,2155 \text{ кВтч/ч} * \text{м}^2.$$

Потребляемая насосом компрессора энергия за 1 час $E_p = 0,065 \text{ кВтч/м}^2$.

За 8,5 ч среднего солнечного времени горячая вода получила энергию

$$8,5 \text{ МДж/м}^2. (= 1,0 * 8,5)$$

3. Преобразование электрической энергии панелей в несолнечное время

- В исследуемом Комплексе компрессор и детандер это одинаковые тепловые поршневые машины, которые конструктивно отличаются только приводом клапанов. Поэтому в расчетах принято, что термодинамические КПД детандера такие же, как у компрессора и составляют: КПД индикаторный $\eta_i = 0,8$, КПД эффективный- $\eta_{эф} = 0,95$, КПД электрический - $\eta_{эл} = 0,95$. См. пункт 6.1.

Анализ сведений о действующих паропоршневых двигателях также показывает, что индикаторный КПД (η_i) лежит в пределах 0,75-0,85, и эффективный КПД ($\eta_{эф}$) лежит в пределах 0,90-0,95.

В несолнечное время компрессор 3 обесточен, а контур детандера 4 преобразует аккумулированное тепло в электроэнергию для потребителя.

Преобразование происходит от горячей воды 11 с температурой в середине цикла $T_g = 90 \text{ }^\circ\text{C} = 363 \text{ К}$ до температуры в радиаторе 1 ночью в середине цикла $T_x = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ К}$.

Коэффициент работоспособности τ составит 18%:

$$\tau = (T_g - T_x) / T_g = (363 - 298) / 363 = 0,179.$$

От энергии $E_{г}=8.5$ МДж/м², полученной днем за 8.5 ч горячей водой, можно теоретически получить работу

$$E_{р}=E_{г} \cdot \tau = 1.52 \text{ МДж /м}^2 (=8.5 \cdot 0.179) = 0.423 \text{ кВтч/м}^2.$$

С учетом КПД=0.722 термодинамического цикла детандер произведет работу и передаст потребителю за 15.5 часов несолнечного времени

$$E_{п}=0.3 \text{ кВтч/м}^2 (=0.423 \cdot 0.722) \text{ при средней мощности } 0.02 \text{ кВт/м}^2 (=0.3/15.5).$$

Радиатор в несолнечное время излучает энергию **7 МДж/м²** (=8.5-1.5), которая равна энергии 8.5 МДж/м², полученной горячей водой, минус энергию, теоретически превращенную в работу (1.52 МДж /м²).

Радиатор 1 должен рассеять за вечер и ночь энергию 7 МДж/м², чтобы хладагент в радиаторе к утру стал иметь температуру 25 оС или ниже.

Мощность 0.065 кВт/м² получает инвертор, который за 8.5 часов производит энергии 0.5525 кВтч/м² (=0.065*8.5), и отдает потребителю **днем** электроэнергию **0.525** кВтч/м² (=0.95*0.5525) средней мощностью 0.062 кВт/м² (=0.05*0.95).

В несолнечное время детандер 4 имеет мощность **0.02** кВт/м² и отдает потребителю энергию 0.3 кВтч/м².

Итого за день и ночь потребитель получает энергии 0.825 кВтч/м² (=0.525+0.3) средней мощностью днем 62 и ночью 20 Вт.

Если всю энергию панелей подавать через инвертор, то потребитель получил бы энергию и только днем 1.045 кВтч/м² (=1.1*0.95).

Система с компрессором и детандер-генератором отдает потребителю энергии 79 % (=0.825/1.045), от энергии панелей с инвертором. Однако и кроме того система отдает энергию также и ночью, т.е. превращает панели в автономный управляемый источник круглосуточной генерации. Т.о. потребитель получает 79 %, энергии, т.е. имеем «возврат» энергии как у ГАЭС или у аккумуляторов.

Расчет объема бака

- Объем бака горячей воды 11 днем получает энергию $E_{г}=8.5$ МДж/м² из контура компрессора.

Теплоемкость воды составляет 4212 Дж/кг*оС, теплоемкость 1 м³ воды от +85 оС до 95 оС составляет $E_{10}=1000 \cdot 4212 \cdot 10=42$ МДж/м³.

Масса горячей воды

$$M_{г}=1000 \cdot E_{г}/E_{10}=8.5 \text{ МДж/м}^2 /42 \text{ МДж/м}^3=0.2 \text{ м}^3/\text{м}^2=200 \text{ л/м}^2.$$

-**Теплообменник** днем отдает горячей воде от хладагента энергию **8.5 МДж/м²** за 8.5 часов. Теплообменник ночью отдает хладагенту энергию **7 МДж/м²** за 15.5 часов. Мощность теплообменника составляет **0.28 кВт/м²** (=8.5/8.5*3.6).

- **Радиатор** днем должен рассеять энергию 6.6МДж/м², а за ночь за 15.5 часов должен рассеять энергию 7 МДж/ м², чтобы хладагент к утру стал иметь температуру 25 оС или ниже.

Мощность радиатора составляет 0.22 кВт/м² (=6.6/8.5*3.6).

Приложение 3

Анализ цен на тепловые машины

- Суммарная мощность моторов компрессоров составит 65 кВт.

Цены на компрессоры для холодильных устройств по сведениям из интернета лежат в широких пределах: от US\$ 120 / кВт до US\$ 900 /кВт. Производители Европа и Китай: например, [5], [6], [7]. Если принять цену близкую к минимальной, например, US\$ 150 /кВт, то стоимость компрессоров для исследуемого комплекса составит US\$ 10 000.

- Суммарная мощность детандеров составит 25 кВт. Цены на детандеры для холодильных устройств по сведениям из интернета, например, австрийская паропоршневая машина производства компании Fördertechnik GmbH, обеспечивающая на выходе 150 кВт электроэнергии, стоит €280 тысяч, т.е.

1900 €/кВт(= 280000/150) [8]. Если принять такую цену, то стоимость детандеров для исследуемого комплекса составит около US\$ 52 000 (=280000*1.1*25/150).

- Исследуем альтернативные варианты детандеров и компрессоров.

- Промышленность производит линейку пневмодвигателей разной мощности П8-12, П12-12, П13-16, П16-25, ДАР-14. Цена US\$ 135 /кВт (=1078/8) [9].

- Как считают многие ученые и авторы, для изготовления поршневой паровой машины целесообразно использовать основные узлы и детали автотракторных дизелей. [8] На базе автотракторных дизельных двигателей можно изготавливать и компрессоры для хладагентов. Конструкции поршневых двигателей внутреннего сгорания и дизелей так хорошо отработаны, что их механические потери не превышают 10%. Такие же низкие потери будут и в изготовленных на их базе поршневых паровых машинах и компрессорах. Стоимость таких поршневых машин –детандеров и компрессоров- незначительно превышает стоимость дизеля, на базе которого они изготовлены. Цена автотракторных дизельных двигателей благодаря их массовому производству достаточно низкие и составляют, например, от US\$ 30/кВт [10] до US\$ 70/кВт [11].

- Сводка затрат на тепловые машины

Мощность оборудования	Стоимость US\$ за кВт	Общая стоимость US\$
Компрессор (опция из интернета) 80 кВт	150	12 000
Детандер (опция из интернета) 25 кВт	2090	52 250
Компрессор (пневмодвигатель) 80 кВт	135	10 800
Детандер (пневмодвигатель) 25 кВт	135	3 375
Компрессор (на базе дизельного двигателя) 65 кВт	50	3250
Детандер (на базе дизельного двигателя) 20 кВт	50	1 000

- Из вышеприведенного мы видим, что использование компрессоров и детандеров на основе дизельного двигателя (с ценой US\$ 50 /кВт) приведет к самой низкой стоимости как компрессоров, так и детандеров, в общей сложности US\$ 4250 для обоих. Этот вариант особенно привлекателен из-за низкой стоимости US\$ 50 /кВт и легкодоступных компонентов из автомобильного и сельскохозяйственного секторов.

С другой стороны, использование стандартных компрессоров и детандеров (с ценами US\$ 150 /кВт для компрессоров и US\$ 2090 /кВт для детандеров) будет значительно дороже, в общей сложности US\$ 59 000

Вариант с пневматическим двигателем находится посередине, предлагая общую стоимость US\$ 11 700 для компрессоров и детандеров.

Выбрав компоненты на основе дизельного двигателя, система может достичь значительной экономии затрат, при этом обеспечивая необходимую производительность для комплекса солнечных панелей.

- Для дальнейшего исследования принимаем, что в Комплексе солнечных панелей на 180 кВт пик в качестве компрессоров и детандеров используем переоборудованные автотракторные дизели. Их средняя цена составляет

US\$ 50/кВт. Суммарная мощность компрессоров составляет 65 кВт и стоимость US\$ 3250 (=50*65). Суммарная мощность детандеров принята 20 кВт и стоимость US\$ 1000 (=50*20).

Приложение 4

Расчет стоимости теплоизолированного бака

- Толщина теплоизоляции и толщина бетонных стенок, дна и перекрытий бака принимаем на основании опыта строительства сезонных аккумуляторов теплоты [16] с учетом особенностей исследуемого Комплекса.

- Объем бака горячей воды $V = 11$ составляет $V_{\text{г}} = 0.2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \times 1000 \text{ м}^2 = 200 \text{ м}^3$.

Бак горячей воды имеет внутренние размеры длина 18 м, ширина 6 м, глубина 2 м выполнен как бетонный короб с бетонным перекрытием. Толщина стен снизу 0.2 м, сверху 0.1 м, перекрытие и дно по 0.1 м.

Объем бетона составляет не более 36 м³.

- Площадь 1-го слоя теплоизоляции при общей толщине теплоизоляции 0.025 м (5 слоев по 0.005 м) составляет 330 м² и площадь 5-ти слоев составит не более 1700 м². Это составляет 35 рулонов по 50 м².

- Стоимость материалов и бетонных работ составляет US\$ 3060 (=85x36) при цене US\$ 85/м³ (=300 шекелей за кубометр) [17].

Вспененный полиэтилен в виде рулона толщина 5 мм, ширина 1,05 м, длина 50 п. м, цена составляет US\$ 15 за рулон. [18] Стоимость 35 рулонов теплоизоляции – вспененного полиэтилена составляет US\$ 550 (=15x35)