

Научная статья

УДК 621.59

DOI: [10.34759/trd-2021-121-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-11)

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Сергей Владимирович Загорный¹, Игорь Васильевич Наумчик²,
Марат Сергеевич Дзитоев³, Александр Владимирович Михайленко⁴✉

^{1,2,3,4}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

⁴vka@mil.ru✉

Аннотация. В работе обоснована возможность применения теплонасосной установки для термостатирования объектов ракетно-космических комплексов. Проведен анализ существующих и перспективных систем термостатирования и подходов к определению термодинамической эффективности тепловых машин. Показана целесообразность использования эксергетического КПД, который характеризует полноту преобразования равноценной энергии. Разработана методика и представлены результаты сравнительного анализа теплового насоса и химического источника тепла. Сформулировано условие для рационального выбора источника тепла в системах термостатирования ракетно-космических комплексов. Предложена схема системы термостатирования на базе теплонасосной установки и паракомпрессионной холодильной машины.

Ключевые слова: космические системы, теплонасосная установка, система термостатирования, эксергетический КПД, источник тепла, тепловая мощность, термодинамическая эффективность, эксергия, анергия, нагрев, охлаждение, энергетическая эффективность, цикл.

Для цитирования: Загорный С.В., Наумчик И.В., Дзитоев М.С., Михайленко А.В. Эксергетический анализ элементов систем термостатирования // Труды МАИ. 2021. № 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-11)

EXERGETIC ANALYSIS OF ELEMENTS OF THERMOSTATING SYSTEMS

**Sergey V. Zagornyj¹, Igor V. Naumchik², Marat S. Dzitoev³,
Aleksandr V. Mihaylenko⁴**

^{1,2,3,4}Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,
Saint Petersburg, Russia

⁴vka@mil.ru

Abstract. The subject of the research is the regularities of changes in the thermodynamic parameters of thermostating systems of rocket and space complexes, depending on the composition of their equipment. The purpose of the work is to improve the thermostating systems of special RKK equipment to ensure the specified heat and cooling capacity, as well as temperature to ensure and maintain the accuracy and stability of their output parameters. The article presents the main results obtained during the study. The exergetic analysis of thermostating systems for objects of rocket and space technology has been carried out.

Research has been carried out on the possibility of using heat pump installations for thermostating objects of rocket and space complexes, which allows obtaining energy of a higher potential using low-potential renewable energy from natural sources of heat or low-temperature secondary resources. The expediency of including a vapor compression refrigeration machine into the thermostating system based on a heat pump installation has been substantiated. Conditions are formulated under which the use of a heat pump will be more profitable than the use of a chemical heat source. A method of comparative analysis of a heat pump and a chemical heat source is presented, the results of which showed that direct heating consumes approximately twice as much fuel as heating using a heat pump. A schematic diagram of a universal all-season thermostating system based on a refrigeration and heating unit has been developed. The work performed is theoretical and experimental. The provisions outlined in the work are the result of the analysis and generalization of the research results of Russian and foreign scientists in the field of thermodynamics and heat transfer, the theory of heat engineering, the theory and practice of operating thermostating systems for rocket and space technology, as well as the results obtained in the course of research on the topic of research work of organizations industry and military scientific organizations of the Ministry of Defense of the Russian Federation. The main research results can be used both at the design stage in the formation of requirements for ensuring the specified heat and cooling capacity, temperature conditions and improving the level of thermodynamic efficiency of various objects of special equipment of rocket and space complexes, as well as to ensure the required values of the output indicators of the elements of thermostating systems at the stage exploitation.

Keywords: space systems, heat pump unit, thermostating system, exergetic efficiency, heat source, thermal power, thermodynamic efficiency, exergy, anergy, heating, cooling, energy efficiency, cycle.

For citation: Zagornyj S.V., Naumchik I.V., Dzitoev M.S., Mihajlenko A.V. The use of a heat pump unit for thermostating objects of rocket and space complexes. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-11)

Введение

Одним из главных направлений развития космонавтики является разработка космических систем различного назначения [1, 2], позволяющих значительно расширить масштабы использования космической информации в интересах деятельности государства [3]. Опыт эксплуатации различных объектов космических систем показывает, что для сохранения необходимой точности и стабильности их выходных показателей необходимо проводить операции их термостатирования [4, 5]. Поэтому чрезвычайно важной является задача разработки новой системы термостатирования (СТС) [6] объектов ракетно-космических комплексов для обеспечения заданной тепло- и холодопроизводительности, а, следовательно, и температуры.

В настоящее время используется достаточно большое количество разноцелевых систем термостатирования, отличающихся применением жидких и газообразных [7] теплоносителей и широким диапазоном технических характеристик.

В данной работе исследована возможность применения теплонасосной установки (ТНУ) для термостатирования объектов ракетно-космических комплексов [8] (РКК), при этом подводимый к ним или отводимый от них результирующий тепловой поток был равен тепловому потоку, вырабатываемому системой термостатирования.

ТНУ позволяет получить энергию более высокого потенциала, используя низкопотенциальную возобновляемую энергию естественных источников теплоты или низкотемпературных вторичных ресурсов. Обоснование внедрения теплонасосной установки требует глубоких знаний принципа работы этих систем, характера реализуемых в них процессов преобразования энергии, методов оценки степени совершенства процессов преобразования и возможных путей их совершенствования.

Анализ показал целесообразность и экономическую эффективность применения ТНУ в системах термостатирования РКК [9, 10].

Анализ систем термостатирования объектов ракетно-космических комплексов

В настоящее время характерно использование достаточно большого количества СТС, которые реализуют те или иные принципы получения тепла или, соответственно, холода для создания того или иного диапазона температур, при которых можно использовать агрегат (систему) в заданных условиях эксплуатации [11].

Существенное влияние на конструктивные особенности основных элементов СТС оказывают такие показатели как общая тепло- и холодопроизводительность системы и температура термостатирования. Этими показателями определяются энергозатраты на производство тепла и холода. С увеличением холодопроизводительности и уменьшением температуры термостатирования более жесткие требования по экономичности предъявляются к источнику холода, так как расход энергии на единицу отводимой тепловой мощности возрастает.

Источники тепла (электронагреватели, термоэлектрические устройства), применяемые в СТС, имеют невысокую экономичность. Для большинства систем их выбор определяется формой и мощностью нагревателей. Наиболее целесообразно использовать такие СТС, в которых отсутствуют специальные подогреватели. В этом случае для целей нагрева используется тепло, получаемое в генераторе холода (например, вихревой трубе, термоохлаждающем устройстве). В системах с использованием газообразных теплоносителей роль нагревателя может выполнять компрессор. Перспективным является использование теплонасосных установок.

Сравнительная характеристика применяемых и перспективных СТС объектов РКК приведена в таблице 1.

Сравнительная характеристика применяемых и перспективных СТС объектов РКК

| Наименование СТС | Характеристика СТС | |
|--|---|---|
| | Достоинства | Недостатки |
| Система с использованием парокомпрессионной холодильной машины | <ul style="list-style-type: none"> - высокая экономичность; - сравнительно небольшие габариты | <ul style="list-style-type: none"> - значительная металлоемкость и многоагрегатность; - сложность монтажа, обслуживания и ремонта; - наличие значительных вибрационных нагрузок; - сложность регулирования температуры термостатирования; - необходимость использования дорогостоящих теплоносителей (как правило, различных по составу и агрегатному состоянию); - высокая стоимость оборудования; - неравномерная работа тепло- и холодопроизводящего оборудования |
| Система с использованием газовой холодильной машины | <ul style="list-style-type: none"> - простота эксплуатации | <ul style="list-style-type: none"> - низкая экономичность; - необходимость наличия газа высокого давления в больших количествах |
| Система с использованием | <ul style="list-style-type: none"> - отсутствие механических движущихся частей; | <ul style="list-style-type: none"> - низкая термодинамическая эффективность; |

| Наименование СТС | Характеристика СТС | |
|---|--|---|
| | Достоинства | Недостатки |
| термоэлектрического охлаждения | <ul style="list-style-type: none"> - компактность; - бесшумность; - простота обслуживания и эксплуатации; - простота получения тепла и холода | <ul style="list-style-type: none"> - высокая стоимость; - неудовлетворительные массо-габаритные характеристики при большой холодопроизводительности; - необходимость в наличии источников постоянного тока |
| Система с использованием теплонасосной установки | <ul style="list-style-type: none"> - высокая эффективность преобразования электроэнергии; - надёжная автоматическая работа установки, не требующая постоянного присутствия человека; - минимальные эксплуатационные расходы; - длительный срок службы без капитального ремонта (10...20 лет); - малые габариты и вес; - использование в качестве источника низкопотенциальной теплоты различных объектов | <ul style="list-style-type: none"> - высокая стоимость оборудования |

Агрегаты СТС, даже входя в состав одной системы, чаще всего представляют собой не связанные между собой элементы. Целесообразно систему, решающую задачи мониторинга и обеспечения температурно-влажностного режима, объединить в одно целое, что позволит:

- увеличить достоверность и оперативность контроля;
- снизить количество обслуживающего персонала;
- снизить требуемые размеры для размещения оборудования.

Поэтому важным направлением совершенствования СТС является обеспечение универсальности оборудования при использовании различных сред. В связи с этим напрашивается вывод о возможности создания СТС с использованием теплонасосной установки [12], которая включает как теплопроизводящее, так и холодопроизводящее оборудование.

Оценка термодинамической эффективности теплонасосной установки

Под термодинамической эффективностью будем понимать полноту преобразования тепла в работу и наоборот – в тепловых машинах [13, 14].

В настоящее время для сравнительной характеристики тепловых машин применяют различные коэффициенты, которые определяются отношением полезного эффекта к затратам на получение этого полезного эффекта. Для сравнительной характеристики тепловых двигателей используют термический коэффициент, холодильных машин – холодильный коэффициент, тепловых насосов – коэффициент преобразования, что представлено в таблице 2.

Основной недостаток указанных коэффициентов – полученная и затраченная энергия разного качества, что не позволяет сравнивать эти коэффициенты между собой.

Таблица 2

Сравнительная характеристика тепловых машин

| Наименование коэффициента | Характеристика коэффициента | |
|-------------------------------|--|----------------------------|
| | Формула | Значение |
| Термический КПД | $\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ | $0 < \eta_t < 1$ |
| Холодильный коэффициент | $\varepsilon = \frac{T_o}{T_{oc} - T_o}$ | $0 < \varepsilon < \infty$ |
| Коэффициент преобразования | $\varphi = \frac{T_1}{T_1 - T_o}$ | $\varphi > 1$ |

Здесь $T_1 = T_{oc}$ – максимальная температура цикла;

$T_2 = T_o$ – минимальная температура цикла.

Поэтому целесообразно использовать эксергетический КПД [15, 16], который будет характеризовать полноту преобразования равноценной энергии. Для каждой группы тепловых машин эксергетический КПД представлен в таблице 3.

Эксергетический КПД тепловых машин

| Группа тепловых машин | Характеристика коэффициента | |
|-----------------------------|---|-------------------|
| | Формула | Значение |
| Тепловые двигатели | $\eta_e = \frac{\eta_{tp}}{\eta_{tk}} = \frac{\eta_{tp}}{\frac{T_1 - T_2}{T_1}}$ | $\eta_e < 1$ |
| Холодильные машины | $\eta_e^{XM} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_k} = \frac{\varepsilon_p}{\frac{T_2}{T_1 - T_2}}$ | $\eta_e^{XM} < 1$ |
| Тепловые насосы | $\eta_e^{TH} = \frac{\varphi_p}{\varphi_k} = \frac{\varphi_p}{\frac{T_1}{T_1 - T_2}}$ | $\eta_e^{TH} < 1$ |

Таким образом, эксергетический КПД целесообразно использовать для сравнения тепловых машин. В частности, эксергетический КПД является универсальным термодинамическим показателем, характеризующим источник холода независимо от типа и температурных условий работы и отражающим степень приближения к идеальному (в термодинамическом отношении) процессу получения холода. На рис. 1 показана зависимость эксергетического КПД различных охлаждающих устройств от температуры термостатирования [11].

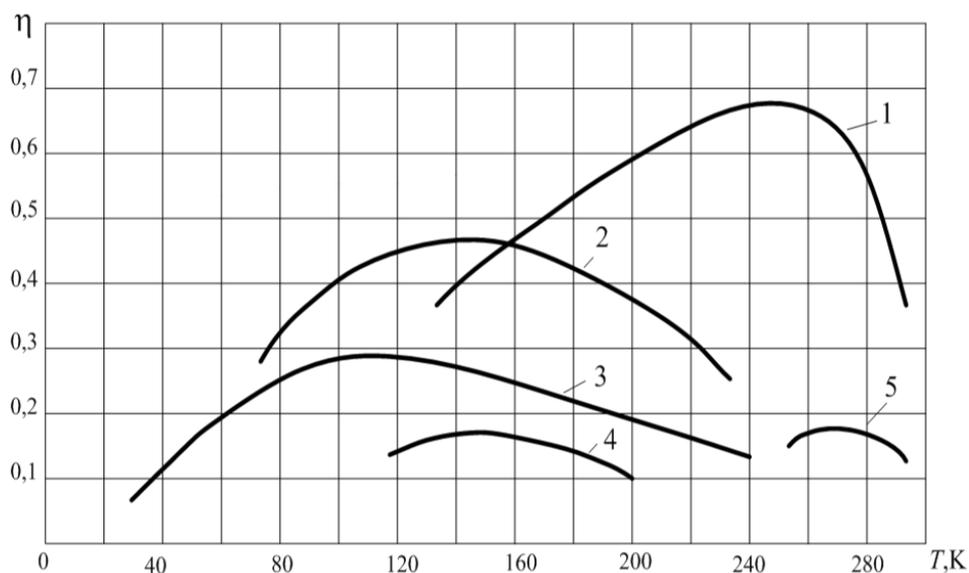


Рис. 1. Зависимость эксергетического КПД различных охлаждающих устройств от температуры: 1 – ПКХМ; 2 – ГХМ Стирлинга; 3 – ГХМ с внешней регенерацией холода; 4 – цикл с дросселированием; 5 – установка с вихревым расширением

Из графиков видно, что для каждого источника холода существует сравнительно узкий диапазон температур термостатирования, в пределах которого сохраняется высокая эффективность системы. Вместе с тем, как показывает сравнительный анализ, с точки зрения энергетической эффективности существенными преимуществами в рассматриваемом диапазоне температур обладают парокompрессионные холодильные машины [17] которые целесообразно включить в состав системы термостатирования на базе теплонасосной установки.

Анализ применения источников тепла в системах термостатирования

Основное оборудование систем термостатирования (СТС) используется сезонно, кроме того источники тепла имеют очень низкий КПД.

Проведем анализ процессов нагрева и охлаждения с эксергетической точки зрения [18, 19, 20, 21] с целью разработки энергосберегающих систем [22, 23].

В соответствии с законами термодинамики тепловой поток состоит из эксергии (E_q) и анергии (B_q) [24], которые представляют собой работоспособную и неработоспособную составляющие теплового потока соответственно [11]:

$$E_q = \left(1 - \frac{T_{oc}}{T_p}\right) Q_{СТС};$$

$$B_q = \frac{T_{oc}}{T_p} Q_{СТС},$$

где T_{oc} - температура окружающей среды;

T_p - температура термостатирования;

$Q_{СТС}$ - тепловой поток, формируемый системой термостатирования.

Основное назначение любого источника тепла – формирование греющего теплового потока, характеризуемого эксергией и анергией.

Существует два варианта получения для нагрева «смеси» эксергии и анергии:

– для формирования греющего теплового потока к анергии, отбираемой без затрат из окружающей среды, добавляют заданное количество эксергии в виде механической или электрической энергии (рис. 2);

– для формирования греющего теплового потока берут поток, состоящий на 100% из эксергии, и лишнюю эксергию превращают в необратимом процессе в анергию (рис. 3).

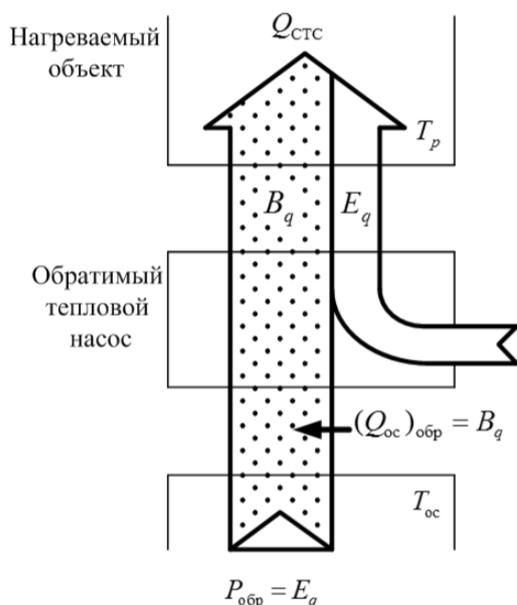


Рис. 2. Потoki эксергии и анергии в работающих обратимо тепловых насосах

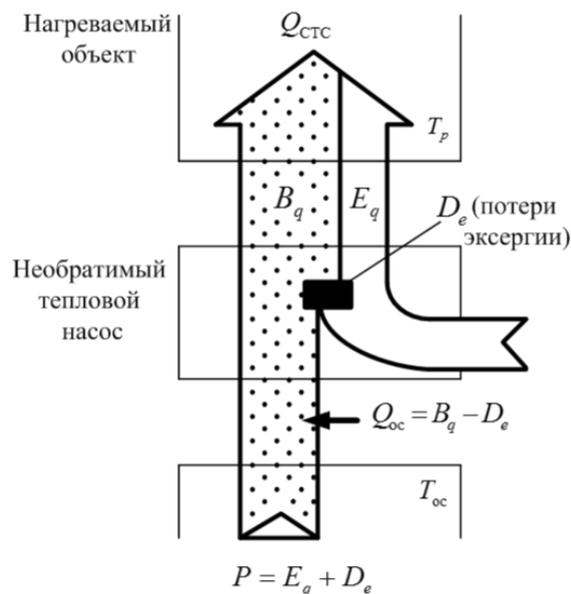


Рис. 3. Потoki эксергии и анергии в работающих необратимо тепловых насосах

Рассмотрим процесс формирования греющего потока с помощью электрического нагревателя, который служит примером реализации второго варианта получения для нагрева «смеси» эксергии и анергии, где используется чистая эксергия, из которой производится в необратимом процессе вся греющая анергия (рис. 4).

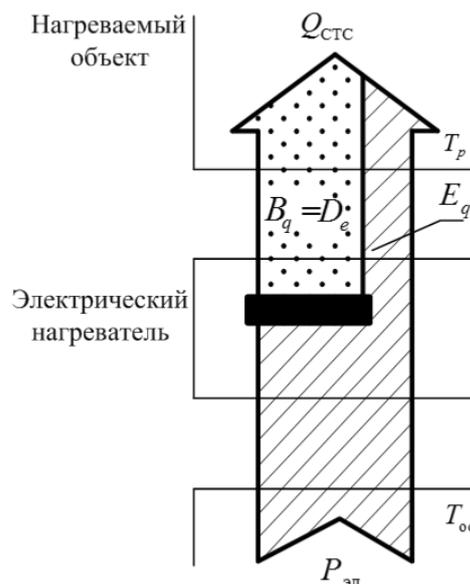


Рис. 4. Процесс получения анергии из чистой эксергии

Эксергетический КПД электрического нагревателя определяется следующим образом:

$$\eta_e = \frac{E_q}{P_{эл}} = 1 - \frac{T_{ос}}{T_p}.$$

Этот метод нагрева термодинамически невыгоден. Его эксергетический КПД тем ниже, чем ближе находится температура нагрева к температуре окружающей среды. Такой нагрев с термодинамической точки зрения был бы оправдан только при высоких температурах, но благодаря конструктивной простоте и низкой стоимости получил более широкое применение, чем тепловой насос. Эксергетический КПД нагревателя с непосредственным обогревом пламенем не выше, чем у электрического нагревателя. У такого типа нагревателей преобразованная в тепло химическая энергия состоит почти полностью из эксергии.

Далее рассмотрим условия, при которых применение теплового насоса будет более выгодным, чем использование химического источника тепла.

В качестве источника тепла системы термостатирования рассмотрим тепловой насос, для привода которого используется электрическая энергия, получаемая на тепловой электростанции. Необходимо вычислить минимальный эксергетический КПД теплового насоса (η_e), при котором для его эксплуатации расходовалось бы не больше топлива, чем при прямом обогреве тем же топливом.

Запишем выражение для определения греющего теплового потока при непосредственном обогреве

$$Q_{\text{СТС}} = \eta_{\text{КС}} m_{\text{В}} q_{\text{СТ}},$$

где $\eta_{\text{КС}}$ - КПД сжигания топлива;

$m_{\text{В}}$ - массовый расход топлива;

$q_{\text{СТ}}$ - теплота сгорания топлива;

$Q_{\text{СТС}}$ - тепловой поток, формируемый системой термостатирования.

Следовательно

$$m_{\text{В}} = Q_{\text{СТС}} / \eta_{\text{КС}} q_{\text{СТ}}.$$

В тепловой электростанции для привода теплонасосной установки можно преобразовать в электрическую энергию только часть теплоты сгорания топлива, поскольку неизбежны потери с дымовыми газами. Поэтому запишем выражение для потребляемой мощности

$$P = \eta_{\text{эс}} m_{\text{эс}} q_{\text{сг}}.$$

Потребляемая мощность связана с эксергией греющего потока следующей формулой:

$$P = \frac{E_q}{\eta_e} = \left(\frac{T_p - T_{\text{ос}}}{T_p} \right) Q_{\text{СТС}} \cdot \frac{1}{\eta_e}.$$

Для работы теплового насоса требуется расход топлива

$$m_{\text{эс}} = \frac{T_p - T_{\text{ос}}}{T_p} Q_{\text{СТС}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{эс}} \eta_e q_{\text{сг}}}.$$

При этом должно выполняться условие

$$\frac{T_p - T_{\text{ос}}}{T_p} Q_{\text{СТС}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{эс}} \eta_e q_{\text{сг}}} \leq Q_{\text{СТС}} / \eta_{\text{кк}} q_{\text{сг}}.$$

Эксергетический КПД теплового насоса определяется следующим образом:

$$\eta_e \geq \left(1 - \frac{T_{\text{ос}}}{T_p} \right) \frac{\eta_{\text{кк}}}{\eta_{\text{эс}}}.$$

Это условие должно выполняться для теплового насоса, если необходимо обеспечить его конкурентоспособность по отношению к непосредственному нагреву.

Например, если $\eta_{\text{кк}} = 0,70$, $\eta_{\text{эс}} = 0,32$, а $T_p = 293\text{К}$ и $T_{\text{ос}} = 253\text{К}$, тогда

$$\eta_e \geq \left(1 - \frac{253}{293} \right) \frac{0,70}{0,32} = 0,30.$$

Полученное значение эксергетического КПД теплового насоса относительно маленькое. Эксергетический КПД реального теплового насоса составляет 0,45

и более (рис. 1). Поэтому при непосредственном нагреве расходуется примерно вдвое больше топлива, чем с помощью теплового насоса.

Система термостатирования объектов РКК на базе холодильно-нагревательной установки

Предварительный анализ показывает, что применение ТНУ в СТС объектов РКК целесообразно и экономически выгодно. Следует отметить, что тепловой насос – это холодильная установка, которая работает в температурном диапазоне $T_{\text{ТНУ}}$ больше $T_{\text{ос}}$, в то время, как холодильная машина работает при $T_{\text{ху}}$ меньше $T_{\text{ос}}$. Состав оборудования холодильной и теплонасосной установок одинаков, поэтому последнюю можно назвать холодильно-нагревательной установкой (ХНУ). В системе циркулирует хладагент, который способен кипеть при низкой температуре и меняющий свое агрегатное состояние из парообразного в одной части цикла на жидкое в другой. ХНУ может работать в режимах «охлаждения» и «нагрева».

Принципиальная схема ХНУ представлена на рис. 5.

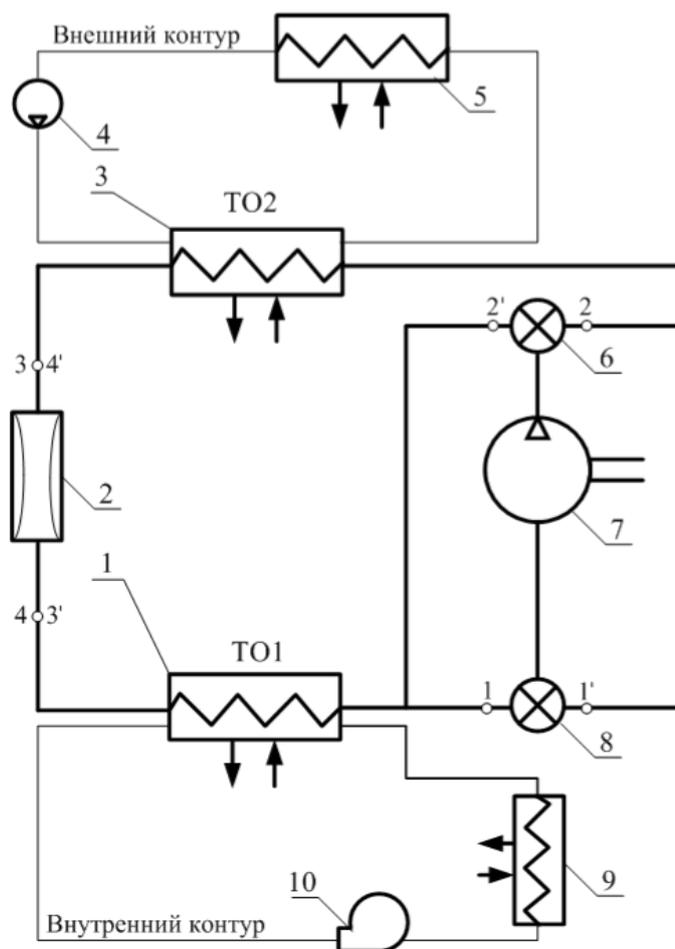


Рис. 5. Принципиальная схема ХНУ:

- 1 – теплообменник-испаритель; 2 – дроссель; 3 – теплообменник-конденсатор;
 4 – насос; 5 – теплообменник внешнего контура; 6, 8 – клапаны; 7 – компрессор;
 9 – объект термостатирования; 10 – вентилятор

В состав ХНУ входят компрессор 7, теплообменник-конденсатор 3, теплообменник-испаритель 1, клапаны 6 и 8 для переключения с одного режима работы на другой. Теплообменник-конденсатор играет функцию конденсатора в режиме «охлаждение» и испарителя в режиме «нагрев».

Кроме того в состав системы входят два контура теплообмена: внешний и внутренний.

В состав внешнего контура входит насос 4, теплообменник-конденсатор 3, теплообменник 5, предназначенный для отвода тепла от рабочего тела цикла в режиме «охлаждение» и подвода холода в режиме «нагрев».

В состав внутреннего контура входит теплообменник-испаритель 1, объект термостатирования 9, вентилятор 10. Внутренний контур предназначен для подвода холода в режиме «охлаждение» и тепла в режиме «нагрев».

В режиме работы «охлаждение» в установке реализуется цикл холодильной машины. В режиме «нагрев» – цикл теплонасосной установки.

Рассмотрим работу установки в режиме «охлаждение» (рис. 6).

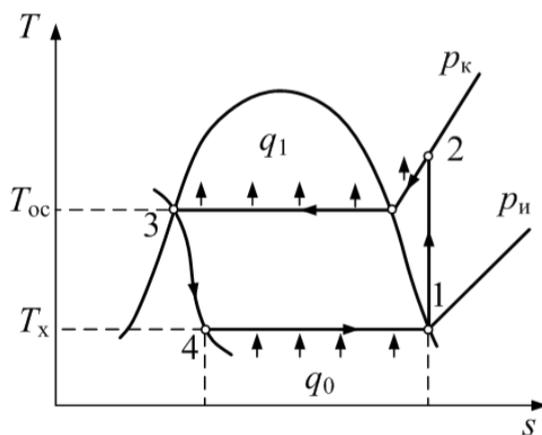


Рис. 6. Цикл парокомпрессионной
холодильной машины

Состояние рабочего тела соответствует точкам 1, 2, 3, 4. Цикл холодильной машины состоит из замкнутой последовательности процессов: 1-2 – адиабатное сжатие рабочего тела в компрессоре от давления p_n до давления p_k ; 2-3 – изобарное охлаждение рабочего тела в теплообменнике-конденсаторе; 3-4 – изоэнтальпное

дросселирование; 4-1 – испарение жидкого рабочего тела за счет отвода тепла от воздуха, используемого для термостатирования объекта. Положение клапанов соответствует режиму «охлаждение».

Внутренний контур обеспечивает термостатирование объекта.

Внешний контур отводит тепло конденсации от рабочего тела.

Рассмотрим работу установки в режиме «нагрев» (рис. 7).

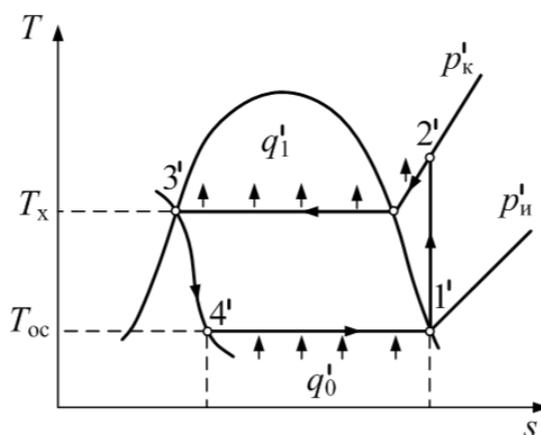


Рис. 7. Цикл теплонасосной установки

Состояние рабочего тела соответствует точкам 1', 2', 3', 4'. Цикл теплонасосной установки состоит из замкнутой последовательности процессов: 1'-2' – адиабатное сжатие рабочего тела в компрессоре от давления $p'_и$ до давления $p'_к$; 2'-3' – изобарное охлаждение рабочего тела в теплообменнике-конденсаторе; 3'-4' – изоэнтальпное дросселирование; 4'-1' – испарение жидкого рабочего тела за счет отвода тепла от воздуха, используемого для термостатирования объекта. Положение клапанов соответствует режиму «нагрев».

Внутренний контур обеспечивает термостатирование объекта.

Внешний контур отводит тепло конденсации от рабочего тела.

Таким образом, разработана принципиальная схема универсальной всепогодной СТС на базе ХНУ.

Заключение

В данной работе исследована возможность применения теплонасосных установок для термостатирования объектов ракетно-космических комплексов, которая позволяет получить энергию более высокого потенциала, используя низкопотенциальную возобновляемую энергию естественных источников теплоты или низкотемпературных вторичных ресурсов. Выполнен эксергетический анализ в системах термостатирования объектов РКК. Показана целесообразность включения в состав системы термостатирования на базе теплонасосной установки парокомпрессионной машины. Сформулированы условия, при которых применение теплового насоса будет более выгодным, чем использование химического источника тепла. Изложена методика сравнительного анализа теплового насоса и химического источника тепла, результаты расчета по которой показали, что при непосредственном нагреве расходуется примерно вдвое больше топлива, чем на нагрев с помощью теплового насоса. Разработана принципиальная схема универсальной всепогодной СТС на базе ХНУ.

Список источников

1. Сазонова Е.В. Космос и стратегическая стабильность // Современная наука и инновации. 2016. № 1(13). С. 192-199.
2. UNIDIR Space Security Conference Report, 2013. URL: <https://unidir.org/publication/space-security-2013-conference-report>
3. Фролов О.П. Угрозы военной безопасности Российской Федерации в космическом пространстве и направления деятельности по их предупреждению и парированию // XXIII Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы защиты и безопасности»: сборник трудов (Санкт-Петербург, 01 апреля 2020). – Санкт-Петербург: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2020. С. 55-61.
4. Буяков С.Н. Аспекты энергосбережения в системах обеспечения температурно-влажностного режима объектов ракетно-космических комплексов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2010. № 629. С. 24-28.
5. Бармин И.В., Климов В.Н. и др. Устройство для воздушного термостатирования отсеков ракеты-носителя и космической головной части на стартовом комплексе. Патент № 61847 U1 РФ, опубл. 10.03.2007.
6. Матвеева О.П., Романяк А.Ю., Удовик И.С. Структурно-функциональное моделирование систем обеспечения тепловых режимов космических аппаратов на стартовом комплексе // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва: сборник тезисов (Москва, 28-31 января 2020). - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2020. С. 627-629.

7. Бармин И.В., Михальченко С.М. и др. Способ термостатирования ракет-носителей газом высокого давления и система для его осуществления. Патент № 2335439 РФ, опубл. 10.10.2008.
8. Бармин И.В., Михальченко С.М. и др. Способ и устройство для термостатирования космических объектов и отсеков ракетносителей. Патент № 2335706 С1 РФ, опубл. 10.10.2008.
9. Калинин С.Ю., Рождественский А.В., Шленов Ю.В. Оценка экономической эффективности эксплуатации ракетно-космического комплекса // Труды МАИ. 2012. № 56. <http://trudymai.ru/published.php?ID=30147>
10. Недайвода А.К., Рождественский А.В. Оценка эффективности и качества ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2012. № 56. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30150>
11. Дзитоев М.С., Пеньков М.М., Наумчик И.В., Басотин Е.В. Системы термостатирования ракет-носителей и космических аппаратов. – СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 160 с.
12. Кирюшатов А.И., Катков Д.С. Оценка термодинамической эффективности теплонасосных установок // Аграрный научный журнал. 2015. № 10. С. 39–41.
13. Архаров А.М. и др. Теплотехника. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2018. – 876 с.
14. Чепурной М.Н., Куцак О.В., Дымнич И.Н. Сравнение энергоэффективности систем теплоснабжения от отопительных котельных и теплонасосных установок //

https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3191

15. Бродянский В.М., Верховкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем. – Киев: Наукова думка, 1991. – 360 с.
16. Sventitskiy I. The logical-mathematical analysis for substantiation of efficiency of heat pumps and refrigerators // Research in Agricultural Electric Engineering, 2015, no. 4, pp. 138-142.
17. Ибрагимов У.Х., Аванесов Т.Р. Повышение экономичности парокомпрессионных холодильных установок // Материалы XX Международной научной конференции «Исследования молодых ученых» (Казань, 20-23 мая 2021) – Казань: Изд-во «Молодой ученый», 2021. С. 11-13.
18. Шевченко В.И., Шевченко А.В., Шевченко М.В. Эксергетический метод оценивания технического состояния средств обеспечения температурно-влажностного режима // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-5. С. 936-941.
19. Пеньков М.М., Куценко В.Ф. Эксергетический метод оценивания качества систем терморегулирования // Альтернативная энергетика и экология. 2001. № 4. С. 54-56.
20. Гетман В.В., Лежнева Н.В., Чернов В.В. Метод эксергетического анализа для оценки термодинамического совершенства газовой теплонасосной установки // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 16. С. 52-55.
21. Ерофеев В.Л., Жуков В.А., Пряхин А.С. Энергетический и эксергетический подходы к оценке повышения эффективности тепловых двигателей // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала

С.О.Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1017-1026. DOI: [10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026](https://doi.org/10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026)

22. Кадыров И.Н. и др. Использование теплонасосных установок в промышленности // Молодой ученый. 2017. № 24 (158). С. 152-155.

23. Васильев Г.П. и др. Техничко-экономические аспекты применения теплонасосного оборудования на объектах метрополитена // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 6. С. 16-20.

24. Рудой В.И. Применение понятия анергии для расчёта удельного расхода топлива на ТЭЦ // Молодой ученый. 2021. № 34(376). С. 14-17.

References

1. Sazonova E.V. *Sovremennaya nauka i innovatsii*, 2016, no. 1(1), pp. 192-199.

2. *UNIDIR Space Security Conference Report*, 2013. URL: <https://unidir.org/publication/space-security-2013-conference-report>

3. Frolov O.P. *XXIII Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti»: sbornik trudov*, Saint Petersburg, Rossiiskaya akademiya raketnykh i artilleriiskikh nauk, 2020, pp. 55-61.

4. Buyakov S.N. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2010, no. 629, pp. 24-28.

5. Barmin I.V., Klimov V.N. et al. *Patent № 61847 U1 RF*, 10.03.2007.

6. Matveeva O.P., Romanyak A.Yu., Udovik I.S. *XLIV Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Koroleva: sbornik tezisov*. Moscow, MGTU imeni N.E. Baumana, 2020, pp 627-629.
7. Barmin I.V., Mikhal'chenko S.M. et al. *Patent № 2335439 RF*, 10.10.2008.
8. Barmin I.V., Mikhal'chenko S.M. et al. *Patent № 2335706 CI RF*, 10.10.2008.
9. Kalinin S.Yu., Rozhdestvenskii A.V., *Trudy MAI*, 2012, no. 56.
<http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30147>
10. Nedaivoda A.K., Rozhdestvenskii A.B. *Trudy MAI*, 2012, no. 56. URL:
<http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30150>
11. Dzitoev M.S., Pen'kov M.M., Naumchik I.V., Basotin E.V. *Sistemy termostatirovaniya raket-nositelei i kosmicheskikh apparatov* (Thermostating systems for launch vehicles and spacecraft), Saint Petersburg, VKA im. A.F. Mozhaiskogo, 2014, 160 p.
12. Kiryushatov A.I., Katkov D.S. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*, 2015, no. 10, pp. 39–41.
13. Arkharov A.M. et al. *Teplotekhnika* (Heat engineering), Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana, 2018, 876 p.
14. Chepurnoi M.N., Kutsak O.V., Dymnich I.N. *Energetika i elektrotekhnika*, 2011, no. 4, URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3191
15. Brodyanskii V.M., Verkhivker GP., Karchev Ya.Ya. et al. *Eksergeticheskie raschety tekhnicheskikh system* (Exergetic calculations of technical systems), Kiev, Naukova dumka, 1991, 360 p.

16. Sventitskiy I. The logical-mathematical analysis for substantiation of efficiency of heat pumps and refrigerators, *Research in Agricultural Electric Engineering*, 2015, no. 4, pp. 138-142.
17. Ibragimov U.Kh., Avanesov T.R. *Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Issledovaniya molodykh uchenykh»*, Kazan', Izd-vo «Molodoi uchenyi», 2021, pp. 11-13.
18. Shevchenko V.I., Shevchenko A.V., Shevchenko M.V. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2015, no. 11-5, pp. 936-941.
19. Pen'kov M.M., Kutsenko V.F. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2001, no. 4, pp. 54-56.
20. Getman V.V., Lezhneva N.V., Chernov V.V. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 16, pp. 52-55.
21. Erofeev V.L., Zhukov V.A., Pryakhin A.S. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O.Makarova*, 2017, vol. 9, no. 5, pp. 1017-1026.
DOI: [10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026](https://doi.org/10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026)
22. Kadyrov I.N. et al. *Molodoi uchenyi*, 2017, no. 24 (158), pp. 152-155.
23. Vasil'ev G.P. et al. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2015, no. 6, pp. 16-20.
24. Rudoi V.I. *Molodoi uchenyi*, 2021, no. 34(376), pp. 14-17.

Статья поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 21.12.2021

The article was submitted on 23.11.2021; approved after reviewing on 30.11.2021; accepted for publication on 21.12.2021.