

УДК 536.2: 629.78

Выбор процессов теплоаккумулирования в системах обеспечения теплового режима космических аппаратов

Белявский А.Е.*, **Сорокин А.Е.****, **Строгонова Л.Б.*****, **Шангин И.А.******

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: 614kaf1@gmail.com*

***e-mail: sorokin_ae@rambler.ru*

****e-mail: buksan@list.ru*

*****e-mail: shigor53@rambler.ru*

Аннотация

В данной работе рассматриваются вопросы использования тепловых аккумуляторов в системах обеспечения теплового режима (СОТР) для обеспечения рационального теплового состояния космических аппаратов (КА), в том числе в обитаемых отсеках с целью медико-технического обеспечения жизнедеятельности экипажа, уменьшения массы СОТР КА при проектировании радиатора-излучателя по среднеинтегральной, а не максимальной тепловой нагрузке, при включении в систему теплового аккумулятора. Приведены зависимости объемных и тепломассовых характеристик различных процессов теплоаккумулирования. Обоснован выбор типа фазопереходных процессов с точки зрения перспективности для применения в СОТР КА. Сделаны выводы, что рациональными в тепловом отношении являются процессы плавления-затвердевания, термохимические реакции и реакции сорбции.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, космический полет, система обеспечения теплового режима, тепловая нагрузка, скрытая теплота плавления, химическая теплота, обратимые реакции, теплота сорбции.

Введение

Для осуществления космических полетов на борту космического аппарата должна быть создана эффективная система обеспечения теплового режима, поддерживающая тепловые условия работы экипажа, бортовых систем, приборных комплексов и элементов конструкции КА[1].

Система обеспечения теплового режима является сложной, глубоко интегрированной с КА системой, для анализа и проектирования которой применяются методы системотехники. Перспективным решением, позволяющим уменьшить массовые характеристики СОТР, является использование теплового аккумулятора. Тепловые аккумуляторы, поглощая тепло, предохраняют приборные отсеки аппарата от перегрева, а отдавая его, предохраняют аппарат от переохлаждения, чем обеспечивается работа аппаратуры в заданных температурных пределах [2,3,4]. При кратковременных тепловых нагрузках, которые имеют место за счет тепловыделения приборов во время сеансов связи или во время проведения научных измерений, тепловой аккумулятор может выполнять роль демпфера.

Варианты использования тепловых аккумуляторов в системах терморегулирования КА

Целесообразность применения тепловых аккумуляторов в системах обеспечения теплового режима КА возникает в тех случаях, когда аппарат находится под действием циклически изменяющихся внешних и внутренних тепловых нагрузок. Циклические внешние тепловые нагрузки имеют место либо на теневой орбите любой из планет Солнечной системы, либо на поверхности самих планет и их спутников. Аккумуляторы накапливают тепловую энергию на участке освещенной Солнцем, и отдают ее, когда аппарат попадает в тень планеты. Тепловые аккумуляторы могут использоваться как в пассивной, так и в активной системе обеспечения теплового режима КА.

Системы обеспечения теплового режима, основанные на конвекции в замкнутых контурах, получили наиболее широкое распространение в космических аппаратах. Поскольку излучение является единственным способом, которым тепло может быть отведено в космос без потерь хладагента, то все замкнутые конвективные системы имеют радиатор-излучатель. Радиатор-излучатель является в подобных системах наиболее габаритным и массивным элементом. Традиционно радиатор - излучатель проектируется из расчета работы при максимальной тепловой нагрузке. Применение теплового аккумулятора позволяет использовать радиатор – излучатель, спроектированный по среднеинтегральной тепловой нагрузке. При тепловой нагрузке на КА выше среднеинтегральной тепловой аккумулятор накапливает тепловую энергию, при нагрузке ниже – отдает.

Оптимальное использование аккумулятора тепла будет иметь место в таком случае, когда он является источником тепла во время прохождения аппаратом затененного участка траектории или нахождения его на ночной стороне планеты, а также в случае значительных кратковременных тепловых нагрузок. Необходимая тепловая энергия определяется следующими параметрами: термическим к.п.д. цикла, требуемой мощностью системы терморегулирования КА, предполагаемым сроком его действия на орбите или поверхности планеты, надежностью.

При выборе структуры СОТР КА должны быть тщательно определены температурные ограничения, обусловленные условиями работы аппаратуры или устройств. Если исходить из того, что в КА должны поддерживаться условия, определяемые нормальной работой аппаратуры, то система аккумуляции тепла должна поглощать тепло, начиная с некоторой заданной температуры, и освобождать его при более низких температурах.

Кроме использования тепловых аккумуляторов в активных системах терморегулирования, они могут найти широкое применение и в пассивных системах терморегулирования. Одно из основных преимуществ пассивной системы с тепловым аккумулятором – отсутствие движущихся частей, что способствует повышению надежности. Основная задача в таких системах терморегулирования заключается в том, чтобы свести к минимуму расстояние между элементами, где передача тепла осуществляется за счет теплопроводности, что, в свою очередь позволяет уменьшить градиент температур между источниками энергии и аккумулятором тепла.

Исследование концепций теплоаккумулирования в системах обеспечения теплового режима космических аппаратов

Классификация аккумуляторов тепловой энергии может быть осуществлена согласно способу аккумулирования: аккумуляторы теплосодержания в виде нагретых жидкостей и твердых тел и аккумуляторы скрытой теплоты в виде расплавов, паров, химических реакций и процессов абсорбции.

Для представления структуры эффективного применения теплоаккумулирующих устройств и систем с использованием фазопереходных материалов необходимо иметь информацию о теплофизических, конструктивных, эксплуатационных характеристиках тепловых аккумуляторов и их систем [5].

Существует условная классификация тепловых аккумуляторов и систем с их использованием по различным признакам [6]:

- по рабочему температурному диапазону;
- по принципу передачи теплового потока;
- по области применения;
- по конструктивному исполнению;
- по функциональному назначению.

На рисунке 1 показаны некоторые способы аккумулирования теплосодержания. Все эти способы в настоящее время исследованы и используются в космической технике.

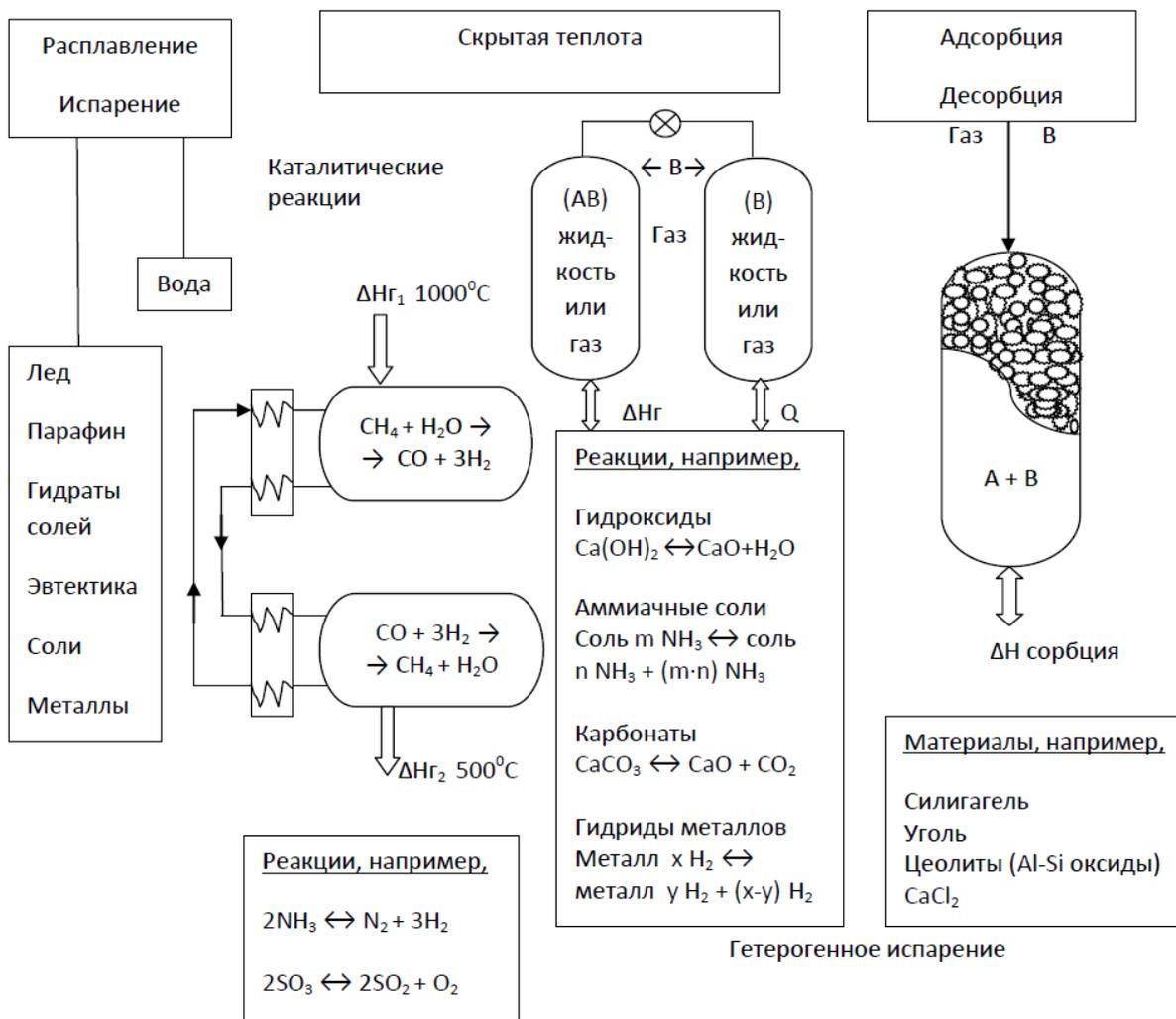


Рис.1. Некоторые способы аккумулирования теплосодержания

Концепция аккумулирования скрытой теплоты и аккумулирования термохимической теплоты имеет некоторые неясные моменты, и в литературе по данному вопросу наблюдается определенная путаница. Иногда под скрытой теплотой подразумевают только теплоту перехода твердой фазы в жидкую и жидкой фазы в паровую, а под химической теплотой подразумевают теплоту любого другого процесса, в котором участвуют химические соединения, а так же включают физические процессы адсорбции (десорбции), например, вода и силикагель.

Иногда считают, что скрытая теплота включает в себе все процессы фазовых

переходов, то есть помимо вышеуказанных процессов плавления и испарения, процессы, связанные с реакциями диссоциации, например, карбонатов или гидридов металлов, а так же физические процессы сорбции (десорбции). В этом случае иногда делается разделение на гомогенное и гетерогенное испарение, когда газы образуются из своей собственной жидкой фазы или из гетерогенного соединения. Химическая теплота, как отдельная группа, в этом случае включает только лишь теплоту реакции некоторых обратимых процессов диссоциации (часто каталитический), например, реакция $\text{CH}_4 / \text{H}_2\text{O}$ (газ).

Иногда химическая теплота подразделяется на теплоту сорбции и термохимическую теплоту. Теплота сорбции включает все виды теплоты, возникающей в результате реакции, при этом газообразные компоненты абсорбируются (адсорбируются) и десорбируются независимо от выдерживания стехиометрических пропорций. Термохимическая теплота в таком случае будет представлять собой теплоту обратимых реакций десорбции.

Здесь выделяются две главные группы: теплосодержание (которое может быть определено как изменение температуры при аккумуляции или выделении теплоты) и скрытая теплота (без каких либо заметных изменений температуры во время протекания фазовых превращений или химических процессов). Скрытая теплота, в свою очередь, подразделяется на теплоту плавления (парообразования), термохимическую теплоту и теплоту адсорбции (десорбции).

Термохимическая теплота классифицируется как происходящая в результате процессов образования химических компонентов в зафиксированных

стехиометрических пропорциях. Процессы сорбции образуют группу термохимических процессов, включающих также процессы адсорбции. На рисунке 1 показаны примеры и материалы для аккумулирования скрытой теплоты согласно этой классификации.

Аккумулирование теплосодержания является одной из возможных концепций аккумулирования энергии. При этом характеризующим свойством является теплоемкость. У твердых веществ (особенно у тяжелых элементов) эта величина достигает приблизительно $3 \cdot R$, где R -молярная газовая постоянная: $R \sim 8,3144$ Дж·с/моль·К. Таким образом, молярная тепловая энергия, аккумулированная в твердых веществах, может быть приблизительно описана с помощью выражения (правило Дюлонга - Петита) [7]:

$$q_{mol} = 3 \cdot R \cdot \Delta T, \text{ Дж/моль,}$$

согласно которому при разности температур $\Delta T=1\text{К}$ она приблизительно равна 25 Дж/моль. Если известна молярная масса $M^*\text{г/моль}$, то тепловая энергия q , аккумулированная в единице массы, определяется в виде величины зарядной емкости:

$$q=3 \cdot R \Delta T \cdot N, \text{ Дж,}$$

где N – количество молей вещества.

Сравнение с материалами, приведенными в литературе, показывает, что данное приближение достаточно хорошо выдерживается для твердых и жидких металлов, что нельзя сказать о соединениях. Их постоянный коэффициент

превышает величину 3. Количество аккумулируемой данным способом теплоты для $\Delta T=1\text{K}$ представлено для некоторых веществ в таблице 1[8,9,10,11].

Таблица 1

Вещество	Химическая формула	Количество теплоты при $\Delta T=1\text{k}$ в $m=1\text{кг}$, Дж/кг К
Вода	H_2O	4200
Парафин	C_3H_8	568
Фенол	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	266
Кислота элаидиновая	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$	2180
Нафталин	C_{10}H_8	195
Гидрофосфат натрия	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	70
Гидрофосфат лития	$\text{Li}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	203
Дюралюминий	-	880
Чугун	-	
Свинец (Т 300К)	Pb	173

При аккумулировании скрытой теплоты характеризующей величиной является теплота фазового перехода или химических соединений. Если теплота должна быть аккумулирована в расплаве, то для ее получения необходимо подвести некоторое количество теплоты Δh_m . Для большинства чистых металлов эта величина находится в интервале:

$$R \cdot T_m \leq h_{m,mol} < 1,5 \cdot R \cdot T_m,$$

где T_m - температура плавления. Для полупроводников, эвтектических и

неорганических соединений $\Delta h_{m,mol}$ находится в интервале:

$$2,5 \cdot R \cdot T_m < \Delta h_{m,mol} < 5 \cdot R \cdot T_m.$$

Для органических веществ можно использовать следующее приближенное выражение:

$$\Delta h_m \sim 0.7 \cdot T_m.$$

В выражениях Δh_m имеет размерность Дж/г, а температура плавления T_m - К.

Теплота плавления неорганических веществ может быть выражена формулой :

$$\Delta h_m \sim 24 \cdot T_m / M,$$

где Δh_m имеет размерность Дж/г, а молярная масса M - г/моль.

Если при испарении жидкости теплота аккумулируется в парообразной фазе, то скрытая теплота парообразования может быть приближенно выражена (для давления 10^5 Па или 1 бар) с помощью правила Трутона: $\Delta h_{mol,v} \sim 9 \cdot R \cdot T_v$,

где температура парообразования T_v имеет размерность К.

Сравнение с литературными данными, однако, показывает диапазон:

$$6 \cdot R \cdot T_v < \Delta h_{mol,v} < 15 \cdot R \cdot T_v,$$

который распространяется на большинство материалов, за исключением солей KCl и NaCl . Скрытая теплота парообразования некоторых веществ приведена в таблице 2.

Таблица 2

Вещество	Химическая формула	Температура парообразования С	Теплота парообразования кДж/м
Вода	H ₂ O	100	1633
Парафин	C ₆ H ₁₄	68	312
Фенол	C ₆ H ₆ O	182	381
Кислота лауриновая	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	225	196
Кислота элаидиновая	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	213	136
Нафталин	C ₁₀ H ₈	218	302
Парафин	C ₅ H ₁₂	36	388

При низком давлении объемная плотность аккумулирования тепла в паровой фазе очень мала, для водяного пара при атмосферном давлении отношение объема пара к объему жидкости – $V_V/V_L \sim 1600$, объемная плотность аккумулирования тепла – $\Delta h_v \sim 1,34 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3}$. Пар под давлением $50 \cdot 10^5$ Па (50 бар) имеет объемное отношение $V_V/V_L = 30$ и объемную плотность аккумулирования $\Delta h_v = 42 \text{ Дж/см}^3$.

В последнее время всё чаще рассматривается вопрос применения термохимических реакций для аккумулирования тепловой энергии.

Теплота реакции $\Delta H_r = m \cdot \Delta h$ может рассматриваться как теплота аккумулирования в реагентах, участвующих в обратимых химических реакциях. Особый интерес представляют собой реакции типа:

AB (твердое вещество или жидкость) $\pm \Delta H_r \leftrightarrow$

↔ A (твердое вещество или жидкость) + B (газ).

В таблице 3 приведены примеры таких реакций. Из соединения АВ газообразная фракция В выделяется в результате эндотермической реакции и вновь абсорбируется в результате экзотермической реакции. (Такие реакции классифицируются как "гетерогенное парообразование"). Для термохимических процессов молярная теплота реакции (на 10^5 Па или 1 бар) приблизительно находится в диапазоне:

$$11 \cdot R \cdot T_r < \Delta h_{mol,r,gas} < 19 \cdot R \cdot T_r,$$

где T_r - температура термохимической реакции.

Удельная теплоёмкость реакции может быть вычислена по формуле:

$$\Delta h_r \sim (100 \div 150) \cdot T_r / M_B, \text{ Дж},$$

где температура термохимической реакции T_r имеет размерность К, а молекулярная масса M_B - г /моль.

Процессы сорбции теоретически хорошо подходят для аккумуляции тепловой энергии. Принцип, лежащий в основе этих процессов, был известен давно, и за последнее время в этой области была проведена большая исследовательская работа [12,13,14].

Таблица 3

Реакция	Температура реакции, С	Теплота реакции, кДж/кг
H_2, Ni $\text{CH}_2=\text{CH}_2 \rightarrow \text{CH}_3-\text{CH}_3$	40	1303
H_2, Ni $\text{CH}_2-\text{CH}_2 \rightarrow \text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ $\quad \quad \quad \backslash \quad /$ $\quad \quad \quad \text{CH}_2$	80	1003
Cl_2 $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{HCl}$	25	2328
HNO_3 $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3\text{NO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	140	3227
Al_2O_3 $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{OH} \rightarrow \text{CH}_2=\text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	350	2781
ZnCl_2 $\text{CH}_3-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	180	1011
KOH $\text{CH}_3-\text{C} \equiv \text{CH} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow$ $\text{CH}_3-\text{C}=\text{CH}_2$ $\quad \quad \quad \text{O}-\text{C}_2\text{H}_5$	140	978

В реакциях разложения газ и пар выделяются из твердого вещества или жидкости, которые сами по себе превращаются в первичный аккумулятор и могут находиться в трех видах:

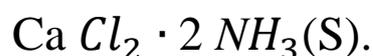
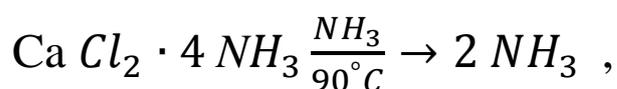
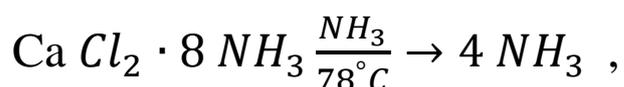
- в газообразном виде. Тепловые потери в этом случае находятся в пределах

допустимого, однако объемная плотность аккумулярования (при давлении 10^5 Па или 1 бар) небольшая, от 0,5 до 1 кВт/м³;

- в конденсированном виде. В этом случае имеется недостаток, заключающийся в том, что для обратимых реакций конденсированный пар должен быть вновь испарен;
- в виде газа на стадии ресорбции. Этот газ абсорбируется другим абсорбентом во вторичном аккумуляторе.

В качестве примера можно рассмотреть процесс сорбционного аккумулярования с помощью содержащей аммиак соли. Реакция десорбции, соответствующая зарядке, будет иметь вид:

первичный	вторичный
аккумулятор	аккумулятор
(нагретый)	(охлажденный)



Первичный аккумулятор нагревается с помощью внешнего источника, а хлорид кальция выделяет 4 моля аммиака при 78°C (при давлении в системе приблизительно $8,5 \cdot 10^5$ Па или 8,5 бар). При 90°C дополнительно выделяется еще 2 моля NH_3 . Сжиженный аммиак и твердый $\text{Ca Cl}_2 \cdot 2\text{NH}_3$ могут храниться в отдельных контейнерах при температуре окружающей среды в течении

неопределённого времени, без тепловых потерь.

Разрядка может быть осуществлена путем реабсорбции аммиака хлоридом кальция, в результате чего вышеуказанная реакция будет протекать в обратном порядке:



Теплота абсорбции может быть получена из первичного аккумулятора при температуре, например, около 60°C (что соответствует давлению $4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ или 4 бар). Величины теплоты реакции для двух стадий абсорбции аммиака почти равны:

$$\Delta h_{r,2-4} = 2510 \text{ кДж/кг} (\text{NH}_3),$$

$$\Delta h_{r,4-8} = 2430 \text{ кДж/кг} (\text{NH}_3).$$

Таким образом, в результате указанной реакции выделяется количество теплоты, почти дважды превышающее теплоту конденсации 1 кг водяного пара.

Приведенные выше зависимости объемных и тепломассовых характеристик различных концепций теплоаккумулирования позволяют проводить оценку указанных концепций с точки зрения эффективности использования теплового аккумулятора в СОТР КА. Необходимо признать, что наиболее эффективными признаны фазопереходные процессы плавления-затвердевания, термохимические реакции и реакции сорбции.

Успешное решение проблем освоения космического пространства требует

совершенствования традиционных и разработки новых способов и средств поглощения и отвода рассеиваемой аппаратурой энергии [15,16]. К ним следует отнести теплоаккумулирующие материалы и устройства на их основе, поглощающие энергию, рассеиваемую потребителями в циклических режимах включения.

Одним из новых направлений совершенствования тепловых аккумуляторов является использование композиционных формоустойчивых фазопереходных теплоаккумулирующих материалов [17,18,19,20], сохраняющих свою форму при переходе рабочего тела из твердого состояния в жидкое и обратно. Такого типа тепловые аккумуляторы не требуют герметизации объема фазопереходных теплоаккумулирующих материалов, но при этом необходимо обеспечение надежной механической и тепловой связи с конструкцией, на которой устанавливаются источники энергии.

Заключение

Применяемый в настоящее время при проектировании систем обеспечения теплового режима принцип проектирования радиатора–излучателя по максимальной тепловой нагрузке [21], действующей на космический аппарат, приводит к завышению его габаритов, и, как следствие, массы. Использование теплового аккумулятора в СОТР дает возможность обеспечить рациональное тепловое состояние космических аппаратов за счет уменьшения габаритно-массовых характеристик радиатора–излучателя, так как включение теплового аккумулятора в

систему терморегулирования позволяет проектировать радиатор по среднеинтегральной, а не максимальной тепловой нагрузке. При тепловой нагрузке на КА выше среднеинтегральной тепловой аккумулятор накапливает тепловую энергию, при нагрузке ниже среднеинтегральной – отдает.

Из проведенного исследования следует, что рациональными в тепловом отношении для применения в СОТР КА теплоаккумулирующими процессами являются фазопереходные процессы плавления-затвердевания, термохимические реакции и реакции сорбции.

Библиографический список

1. Андреев В.В. и др. Автоматические планетные станции. – М.: Наука, 1973. - 280 с.
2. Алексеев В.А. Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов. - Курск: Научком, 2016. - 248 с.
3. Бабаев Б.Д. Принципы теплового аккумулирования и используемые теплоаккумулирующие материалы // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 5. С. 760 – 776.
4. Ильин Р.А., Хромых В.Ю. Классификация теплоаккумулирующих материалов // V Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития технических наук». Сборник трудов (Челябинск, 11 июля 2018). - Челябинск: НИИ ЦРОН, 2018. - 18 с.
5. Makarenko A.V., Sorokin A.E. Model of influence of power line elements on power

efficiency of mechatronic modules for advanced mobile objects // Russian Aeronautics, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 128 - 133.

6. Алексеев В.А, Малоземов В.В. Проектирование тепловых аккумуляторов. - М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. - 92 с.

7. Гольстрем В.А., Кузнецов Ю.М. Справочник по экономии топливно-энергетических ресурсов. – Киев: Техника, 1985. - 384 с.

8. Shinde G.D.and P.R. Suresh. A Review on Influence of Geometry and Other Initial Conditions on the Performance of a PCM Based Energy Storage System // International Journal of Thermal Technologies, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 214 - 222.

9. Алексеев В.А., Карабин А.Е. Новый тип тепловых аккумуляторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 49.

URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28050>

10. Егоров К.В., Алексеев В.А. и др. Стенд тепловых испытаний. Патент РФ № 2553411, 10.06.2015.

11. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. - 395 с.

12. Алексеев В.А., Кудрявцева Н.С., Титова А.С. Выбор параметров климатической камеры для испытаний малогабаритной бортовой аппаратуры // Труды МАИ. 2011.

№ 49. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=27715>

13. KaiWang et al. Analyzing and modeling the dynamic thermal behaviors of direct contact condensers packed with PCM spheres // Continuum Mechanics and

Thermodynamics, 2013, no. 25, pp. 23 – 41.

14. Norton B. Harnessing Solar Heat. Springer Science+Business Media Dordrecht, New York, London, 2014, XVII, 258 p.

15. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10 - 15.

16. Панин Ю.В., Коржов К.Н. Разработка теплопередающего устройства для альтернативного способа терморегулирования системы обеспечения теплового режима космического аппарата // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=56911>

17. Cabeza L., Tay N. (Eds.). High Temperature Thermal Storage Systems Using Phase Change Materials, Academic Press, 2018, 328 p.

18. Остапенко В.В. Фазопереходный аккумулятор теплоты для нужд систем теплоснабжения. Дисс....канд. техн. наук. - Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 2015. - 173 с.

19. Nabeel S. Dhaidan, J.M. Khodadadi, Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 43, March 2015, pp. 449 - 477, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.017>.

20. Kenisarin M.M., Kenisarina K.M. Form-stable phase change materials for thermal energy storage // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, vol. 16(4), pp. 1999 - 2040.

21. Кудрявцева Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования КА. – М.: Изд-во МАИ, 2012. - 228 с.