

М.А. Падалка¹, Д.К. Щеглов²

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ С
ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ**



¹Максим Александрович Падалка,
Балтийский государственный технический университет
«Военмех» им. Д.Ф. Устинова
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(812)4957704, E-mail: padalkamaksim@mail.ru



²Дмитрий Константинович Щеглов,
АО «Северо-Западный региональный центр Концерна
ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод»,
канд. техн. наук, доцент, почетный машиностроитель,
Тел.: (812)6655661, E-mail: dk@bk.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы моделирования термодинамических процессов, происходящих в тепловых аккумуляторах на основе фазового перехода. Предложена математическая модель теплового аккумулятора, базирующаяся на ряде допущений. Для проверки корректности математической модели проведен ряд экспериментов над теплоаккумулирующим веществом со схожими условиями моделирования, исходными данными и допущениями. Сравнение результатов эксперимента и расчета показали корректность предлагаемого научно-методического аппарата с учетом выдвигаемых допущений.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, технологическая система, фазовый переход, тепловой процесс, теплоаккумулирующее вещество.

Введение

С начала освоения космоса одной из важнейших задач стало обеспечение необходимого теплового режима технологических систем, в том числе орбитальных. Еще с середины XX века были сделаны определённые научные заделы в области теплотехники, которыми пользуются и сегодня [13]. А именно разработаны различные способы обеспечения теплового режима в условиях космического пространства.

В настоящее время существует большое количество теплообменных аппаратов разных типов и принципов действия. У каждого типа есть свои особенности эксплуатации и области применения. Температурные диапазоны эксплуатации также различны. Одни теплообменные аппараты могут работать в нескольких средах, другие только в одной среде, например, в космосе [15].

К системам охлаждения с фазовым переходом относятся тепловые аккумуляторы. Тепловым аккумулятором называют устройство, предназначенное для аккумуляирования тепловой энергии путем фазового перехода теплоаккумулирующего вещества с целью обеспечения требуемого теплового режима системы [1].

В данной статье выделяются основные факторы, влияющие на термодинамические параметры технологических систем охлаждения с фазовым переходом, производится выбор допущений для математического моделирования теплового аккумулятора, описывается эксперимент над теплоаккумулирующим веществом в камере тепла/холода для обеспечения различных условий эксплуатации и проверки корректности полученной математической модели.

Методы

Исследование проводилось в три этапа. На первом этапе сформирована математическая модель теплового аккумулятора, работающего на основе фазового перехода. На втором этапе проведен ряд экспериментов на тепловом и термодинамическом макетах в камере тепла и холода при температурах от минус 60°C до плюс 60°C и избыточном давлении теплоносителя с целью проверки прочности и герметичности теплообменника, визуального изучения взаимодействия теплообменника тепловых аккумуляторов (ТА) с теплоаккумулирующим веществом (ТАВ). На третьем этапе проведена валидация математической модели с экспериментом. Выявлены факторы, которые необходимо учитывать при формировании облика тепловых аккумуляторов.

Основные допущения, принятые при составлении математической модели системы тел, содержащей ТАВ:

- выделенные отдельные тела системы являются изотермичными;
- тепловые проводимости, теплофизические свойства тел и теплоносителей и мощность источников энергии не зависят от температуры [8];

- тепловое взаимодействие тел с ТАВ осуществляется только через корпус ТА или его составные части [3];

- корпус ТА и масса ТАВ представляются в виде эквивалентных изотермических пластин конечной толщины, размеры которых в плане определяются суммарной площадью соприкосновения (контакта) между собой, а толщина, соответственно, массой корпуса и ТАВ [7];

- теплоперенос, происходящий в ТАВ, описывается уравнениями для одномерной модели с эквивалентными параметрами, учитывающими реальные размеры и форму устройства [2, 9].

Уравнение сохранения энергии для i -го тела представлено в виде [1]:

$$(cm)_{i \neq k} \frac{dT_i}{d\tau} = P_i + \sigma_{ci}(T_c - T_i) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ji}(T_j - T_i) + \sigma_{ki}(T_k - T_i) + \sigma_{\text{конв.Г}}(T_{\Gamma} - T_i) \quad (1)$$

где c_i – удельная теплоемкость;

m_i – масса;

T_i – температура;

τ – время;

P_i – рассеиваемая мощность i -го тела;

i, j – номера в системе;

n – количество всех тел;

k – порядковый номер корпуса ТА;

$\sigma_{ci}, \sigma_{ji}, \sigma_{ki}$ – тепловые проводимости i -го тела с окружающей средой, между телами i, j, k ;

$\sigma_{\text{конв.Г}}$ – тепловая проводимость между газом (жидкостью) и i -м телом системы при принудительной циркуляции или естественной конвекции;

T_{Γ} – средняя объемная температура газа или жидкости.

Уравнение сохранения энергии для корпуса k , который контактирует с ТАВ:

$$(cm)_k \frac{dT_k}{d\tau} = P_k + \sigma_{ck}(T_c - T_k) + \sum_{i=1}^n \sigma_{jk}(T_i - T_k) + \sigma_{\text{конв.Г}}(T_{\Gamma} - T_k) + Q_{\text{ТАВ } k} \quad (2)$$

где $Q_{\text{ТАВ } k}$ – количество теплоты, поглощенное или выделенное ТАВ.

Составляющее $Q_{\text{ТАВ } k}$ учитывает факторы переноса теплоты между ТАВ и корпусом ТА, а также взаимодействие с окружающей средой и источниками энергии.

В общем случае:

$$Q_{\text{ТАВ } k} = \pm \int_{\tau_1 S_{k(j, \tau)}}^{\tau_2} \frac{\int \lambda_{ж(т)} \partial T_{ж(т)} dS_k d\tau}{dn} \quad (3)$$

где $S_{k(j)}$, $S_{k(\tau)} = f(\tau)$ – полные площади соприкосновения жидкой и твердой фаз ТАВ с корпусом ТА;

λ – коэффициент теплопроводности;

τ – время;

S_k – площадь поверхности контакта между корпусом и ТАВ;

n – нормаль к поверхности;

T – температура;

ж, т – жидкое и твёрдое состояние вещества.

В тепловом аккумуляторе ТАВ в процессе осуществления теплопереноса и в зависимости от времени может находиться в двухфазном состояниях: жидкое – твердое при плавлении, твердое – жидкое при затвердевании и однофазном: при нагреве (в твердом) и охлаждении (в жидком) до и после достижения фазопереходных температур по объему ТАВ [12].

На этом этапе математического моделирования необходимо ввести еще одно допущение: внутренние процессы, происходящие в ТАВ, носят одномерный характер [10]. Такое допущение упростит доступность математической модели для практического применения при формировании облика и составных частей теплового аккумулятора. Тогда возможно заменить истинные температурные кривые по толщине ТАВ на приближенные аналоги в виде параболических зависимостей по толщине ТАВ. Таким образом, получены дифференциальные уравнения 1-го порядка.[5] Следовательно, величину $Q_{ТАВ\ k}$ в уравнении (1), которая будет функцией координат границы раздела фаз $\xi(\tau)$, представляется в двух видах. При идеальном контакте ТАВ со стенкой ТА:

$$Q_{ТАВ\ ж(т)} = \frac{\lambda_{ж(т)} n_{ж(т)} S_k}{\xi_{ж(т)}} (T_{кр} - T_k) \quad (4)$$

При наличии зазора между ТАВ и ТА:

$$Q_{ТАВ\ ж(т)} = \frac{\lambda_{ж(т)} n'_{ж(т)} S_k}{\xi_{ж(т)} + \frac{\lambda_{ж(т)} n'_{ж(т)}}{K_{зав} S_k}} (T_{кр} - T_k) \quad (5)$$

где $T_{кр}$ – температура фазового перехода на границе фаз;

n – показатель степени параболы в уравнениях описывающих профиль температур по толщине слоя ТАВ;

$K_{зав}$ – коэффициент теплопередачи в зазоре между корпусом и ТАВ.

Толщина расплавленного слоя рассчитывается по формуле:

$$\frac{d\xi_{пл}}{d\tau} = \frac{\frac{\lambda_{ж} n_{ж}}{\xi} (T_{кр} - T_k) \frac{c_{ж} \rho_{ж} \xi}{n_{ж+1}} \frac{dT_k}{d\tau}}{\frac{c_{ж} \rho_{ж}}{n_{ж+1}} (T_{кр} - T_k) + \rho_{ж} r + \frac{c_{т} \rho_{т} (T_{кр} - T_{тR_0}) (R - \xi) 2n_{т}}{(R - \xi_0) (n_{т+1})}} \quad (6)$$

где $\xi_{пл} = \xi_{ж}$.

$$\frac{d\xi_{затв}}{d\tau} = \frac{\frac{\lambda_{т} n'_{т}}{\xi} (T_{кр} - T_k) + \frac{c_{т} \rho_{т} \xi}{n'_{т+1}} \frac{dT_k}{d\tau}}{\frac{c_{т} \rho_{т}}{n'_{т+1}} (T_{кр} - T_k) + \rho_{т} r + \frac{c_{ж} \rho_{ж} (T_{жR_0} - T_{кр}) (R - \xi) 2n'_{ж}}{(R - \xi_0) (n'_{ж+1})}} \quad (7)$$

где $\xi_{затв} = \xi_{т}$;

r – скрытая теплота фазового превращения;

$\xi_0(d\tau)$ – начальная толщина слоя ТАВ (определение по формуле Стефана);

T_{TR_0}, T_{JR_0} – температура твердой и жидкой фазы ТАВ при ξ_0 и τ_0 на адиабатической границе внутри вещества;

$c_{ж}, c_{т}, \rho_{ж}, \rho_{т}$ – удельные теплоемкости и плотности жидкой и твердой фаз ТАВ.

Условие идеального контакта ТАВ с ТА

$$T_K = T_{ж}|_{X=0} = T_{т}|_{X=0} \quad (8)$$

Значения n определены экспериментальным образом и приняты в некоторых диапазонах. Например, $n_{ж} = 1.5 - 3, n_{т} = 1$ [4]. В данном случае температура тела равна средней объемной температуре жидкого или твердого ТАВ. В этом случае используется параболический закон, так как процесс нагрева или охлаждения ТАВ играет второстепенную роль. Уравнения теплового баланса записаны в двух видах. Для твердого ТАВ:

$$(cm)_{т} \frac{dT_{TV}}{d\tau} = \sigma_{к-т}(T_K - T_{тS}) = Q_{ТАВ т} \quad (9)$$

для жидкого ТАВ:

$$(cm)_{ж} \frac{dT_{жV}}{d\tau} = \sigma_{к-ж}(T_K - T_{жS}) = Q_{ТАВ ж} \quad (10)$$

$$\sigma_{к-т} = \frac{\lambda_{т}}{X_V} S_k = \frac{1}{1-1/(1+n)^{1/n}} \frac{\lambda_{т}}{R} S_k \quad (11)$$

$$\sigma_{к-ж} = \frac{\lambda_{ж}}{X_V} S_k = \frac{1}{1-1/(1+n)^{1/n}} \frac{\lambda_{ж}}{R} S_k \quad (12)$$

$$X_V = \left[1 - \frac{1}{(1+n)^{1/n}} \right] \quad (13)$$

где $\sigma_{к-т}, \sigma_{к-ж}$ – тепловые проводимости между корпусом и ТАВ в твердом или жидком состояниях;

$T_{тS}, T_{жS}$ – поверхностная температура слоя ТАВ в твердом или жидком состояниях;

X_V – координата по толщине слоя ТАВ, которая соответствует его средней объемное температуре $\bar{T}_V$;

R – толщина слоя ТАВ.

Математическая модель предусматривает, что через тепловой аккумулятор от источника энергии проходит теплоноситель [14]. Таким образом образуется замкнутый контур:

$$(cm)_{г} \frac{dT_{г}}{d\tau} \sum_{i=1}^n \sigma_{конв i} (T_i - T_{г}) \quad (14)$$

где $c_{г}, m_{г}$ – удельная и масса теплоносителя замкнутого контура.

Для сокращения времени расчета создана программа для определения параметров тепловых аккумулятора по представленной математической модели.

Для выполнения эксперимента создано два макета. Макет тепловой (МТ) предназначен для изучения поведения и взаимодействия ТАВ с металлическими элементами макета при температурах в камере тепла и

холода от минус 60 °С до плюс 60 °С, а также визуального изучения мест инициирования кристаллизации при охлаждении и протаивания при нагревании.

Макет теплогидравлический (МТГ) предназначен для проведения испытаний в камере тепла и холода при температурах от минус 60 °С до плюс 60 °С и избыточном давлении теплоносителя 0,6 МПа (6 кгс/см²) с целью: проверки прочности и герметичности теплообменника, визуального изучения взаимодействия теплообменника ТА с ТАВ и определения гидравлического сопротивления теплообменника ТА.

В состав теплового макета входят: полость для размещения ТАВ с перегородками. Корпус, перегородки и прутки выполнены из металла.

Корпус теплового макета изготовлен из металла в виде ванны с номинальными значениями размеров 246х93х50 мм и толщиной стенок 2 мм. Внутри теплового макета установлены металлические перегородки из алюминиевого сплава с номинальными значениями размеров 93х50 мм, в нижней части макета расположены стальные трубки с номинальным значением длины 230 мм и номинальным значением диаметра 5 мм, проходящие сквозь перегородки и имитирующие каналы прокачки теплоносителя. В качестве ТАВ используется гексадекан по ГОСТ 12525-85.

В состав МТГ входят: корпус, представляющий собой полость для размещения ТАВ и теплообменника ТА; теплообменник ТА с выходами (штуцерами) для подключения к контуру теплоносителя; элементы крепления макета к приспособлению для размещения в камерах тепла и холода; приспособления для заправки ТАВ.

Теплообменник состоит из двух коллекторов, соединенных 36 трубками с номинальным значением внутреннего диаметра 3,0 мм с толщиной стенки 0,2 мм. На трубки установлены 80 металлических тонкостенных перегородок (рёбер) из алюминиевого сплава толщиной 0,3 мм, а также 8 металлических перегородок для крепления трубок в корпусе. На одном из коллекторов установлены 2 штуцера для подключения к гидравлической системе.

Макет теплового аккумулятора выполнен герметичным и выдерживает максимальное избыточное давление не более 0,6 МПа (6 кгс/см²). В качестве ТАВ в МТГ используется гексадекан по ГОСТ 12525-85. В качестве теплоносителя используется «Тосол–А65М» ТУ 6-57-95-95.

Цель испытаний – изучение поведения и взаимодействия ТАВ с металлическими элементами МТ при температурах в камере тепла и холода (КТХ) от минус 60°С до плюс 60°С (определение степени адгезии гексадекана к металлам при замораживании), определение температур теплоносителя на входе в тепловой аккумулятор и на выходе, а также

визуальное определение мест инициирования кристаллизации при охлаждении и протаивания при нагревании.

Результаты

Результаты наблюдений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Ход эксперимента

Время	Температура в камере	Производимые действия и результаты наблюдений
09:00	+15 °С	Металлическая емкость с жидким гексадеканом и погруженными в него трубками (12Х18Н10Т), имеющая температуру 21 °С помещена в камеру.
09:10	+15 °С	Началась кристаллизация вблизи металлических стенок и трубок.
9:30	+15 °С	Жидкость по всей поверхности кристаллизовалась с образованием зернистой структуры и не гладкой поверхности.
09:30	+15 °С	Камера переведена в режим охлаждения до минус 60 °С с темпом охлаждения около 2 градусов в минуту.
11:36	минус 60 °С	Гексадекан в металлической емкости полностью кристаллизовался, образовав твердую структуру
11:39		Емкость достали из камеры. Извлечение вмерзших в гексадекан металлических трубок потребовало значительных усилий. Структура гексадекана твердая, имеются пустоты.
11:40	минус 60 °С	Камера переведена в режим нагрева до 60 °С с темпом нагрева около 9 градусов в минуту.
11:50	около 0 °С	Емкость установлена в камеру.
11:55	около 20 °С	Гексадекан начал таять вблизи металлических стенок емкости и трубок.
12:05	+60 °С	Гексадекан продолжает таять, на поверхности вещество полностью растаяло, на дне продолжает оставаться твердая однородная масса.
12:30	+60 °С	Гексадекан полностью растаял, на дне образовались капли (предположительно из влаги, поступившей с воздухом при переводе камеры из режима минус 60 °С к нагреву до 60 °С, и сконденсировавшейся на холодных поверхностях).

В ходе испытаний была успешно выполнена циклограмма температурного режима. Изучено поведение и взаимодействие ТАВ с металлическими МТ. На рисунках 1 и 2 показаны некоторые этапы эксперимента.



Рис. 1. Макет температуре минус 60 °С



Рис. 2. Макет температуре +60 °С

Макет подключён к теплогидравлической экспериментальной установке и помещён в КТХ при температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. Гидравлический контур был заполнен теплоносителем. расход теплоносителя задается в диапазоне от 0,05 до 0,194 л/с.

КТХ включается на режим охлаждения последовательно ступенями с шагом 20°C до температуры минус 60°C с выдержкой на каждой ступени не менее 10 мин. В рамках испытаний шаг снижения температуры и время выдержки увеличены ввиду большой тепловой инерции тепловой энергетической установки (см. рисунок 3).



Рис. 3. Макет теплового аккумулятора в камере тепла и холода

Регистрировались следующие величины:

- расход теплоносителя через теплообменник;
- температура теплоносителя на входе и выходе теплообменника;
- давление на входе и выходе теплообменника.

В результате получено гидравлическое сопротивление макетов при различных значениях расхода и температуры теплоносителя. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2. Ход эксперимента с теплогидравлической экспериментальной установкой

Время	Режим	Температура в камере, °С	Расход, л/с	Температура теплоносителя, °С		Давление теплоносителя, МПа	
				вход	выход	вход	выход
11:45		22,0	0,099	36,4	36,2	0,089	0,060
11:50		22,0	0,098	36,7	36,5	0,091	0,061
11:55		22,0	0,150	37,5	37,3	0,103	0,047
12:05	$Q_{\max}$	22,0	0,194	38,3	38,2	0,121	0,042
12:10	Выкл. насос	22,0	0,0	38,7	38,6	0,068	0,075
12:15		22,0	0,0	33,7	33,4	0,046	0,053
12:20	Охл. до 0 °С	20,1	0,0	32,9	32,7	0,044	0,051
12:52	Повыш. давления	0,5	0,0	25,2	25,7	0,120	0,126
13:10		0,5	0,0	25,2	25,7	0,069	0,076
13:10	Вкл. насос	0,0	0,180	25,0	24,4	0,135	0,039
13:15		0,0	0,181	24,9	24,5	0,135	0,041
13:20	Охл. до –20 °С	5,3	0,182	25,7	25,3	0,138	0,046
13:35		-17,2	0,182	25,8	25,2	0,140	0,047
13:45		-19,7	0,180	24,4	23,8	0,137	0,042
14:20		-20,0	0,177	22,0	21,4	0,136	0,038

14:22	Охл. до -40°C						
14:30		-32,0	0,176	21,0	20,3	0,135	0,035
14:35		-37,0	0,174	20,0	19,2	0,134	0,032
14:50		-40,0	0,171	17,2	16,4	0,132	0,025
15:00		-39,9	0,170	16,1	15,3	0,133	0,024
15:15		-39,7	0,168	15,0	14,2	0,134	0,024
15:20	Охл. до -60°C	-45,0	0,168	14,5	13,6	0,135	0,023
15:25		-49,7	0,166	13,8	12,8	0,135	0,021
15:30		-53,7	0,165	12,8	11,8	0,135	0,019
15:40		-58,5	0,161	10,8	9,7	0,136	0,015
15:45		-59,3	0,159	9,8	8,7	0,137	0,014
16:15		-59,8	0,155	7,2	5,9	0,142	0,012
16:30		-59,6	0,154	6,8	5,5	0,144	0,013
16:35	Уменьш. Q	-59,6	0,100	7,3	5,3	0,090	0,015
16:40		-59,6	0,100	7,7	5,7	0,088	0,014
16:45		-59,7	0,100	8,0	6,0	0,088	0,015
16:46		-59,8	0,090	8,4	6,2	0,079	0,017
16:50		-59,8	0,050	9,6	5,4	0,057	0,029
16:55		-59,9	0,050	9,8	5,7	0,058	0,030
17:00	Выкл. насос	-59,9	0,0	9,9	5,4	0,034	0,042

Результаты теоретических и экспериментальных исследований тепловых процессов в технологических системах охлаждения с фазовым переходом продемонстрировали высокую степень согласованности между результатами математического анализа и результатами испытаний (см. рисунок 4).

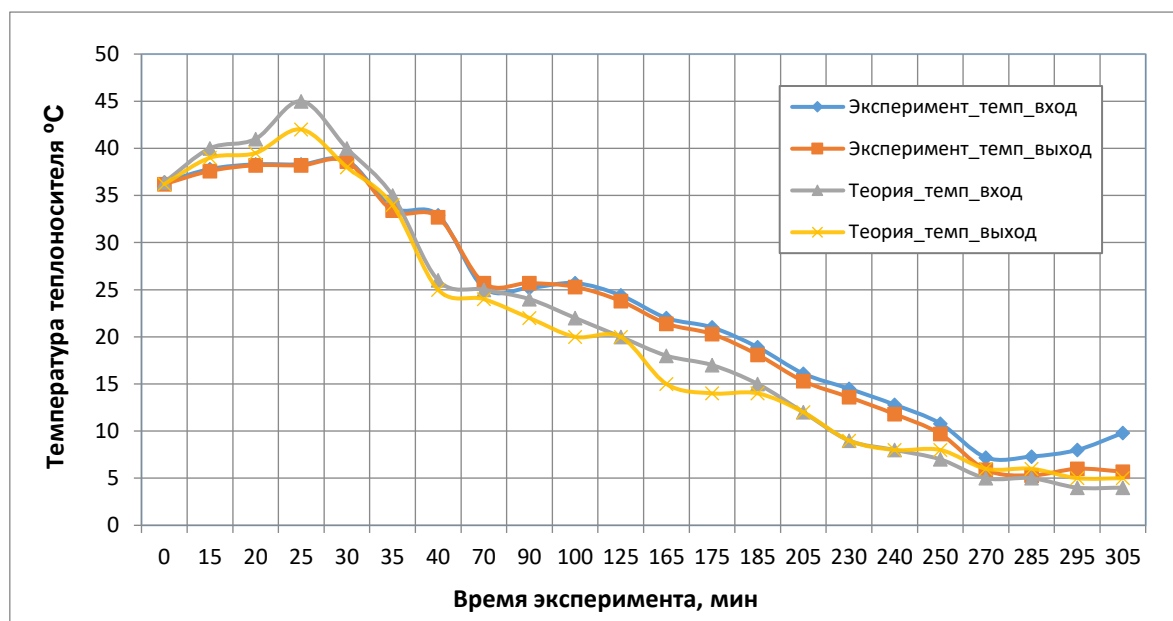


Рис. 4. Результаты математического моделирования и эксперимента

Обсуждение

Использование математической модели теплового аккумулятора, основанной на решении уравнений теплопроводности с учётом скрытой теплоты фазового перехода, позволяет адекватно изложить основные закономерности теплообмена.

Валидация математической модели проведена путем сопоставления расчетных данных с экспериментальными измерениями температур теплоносителя на входе и на выходе из теплового аккумулятора, температурных полей и скорости фазового перехода рабочего вещества в различных режимах охлаждения (см. рисунок 4).

Небольшие расхождения в результатах наблюдаются при окончании фазопереходных процессов, что, связано с теплообменом со стенкой теплового аккумулятора [6].

Таким образом, проведенная валидация подтверждает применимость разработанной математической модели для моделирования тепловых процессов в тепловых аккумуляторах.

Заключение

В результате проведённого исследования выполнено практическое подтверждение математической модели теплового аккумулятора как технологической системы охлаждения с фазовым переходом. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало хорошую сходимость результатов. Разработанная математическая модель теплового аккумулятора позволила количественно описать динамику теплообмена с учётом скрытой теплоты плавления, теплопроводности и фазовых превращений.

Дальнейшие исследования планируется направить на проведение более подробных вычислительных экспериментов для различных теплоаккумулирующих веществ и оценку влияния выбора ТАВ на облик системы охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Алексеев В.А., Малоземов В.В. Проектирование тепловых аккумуляторов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. 92 с.
- [2] Алексеев В.А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. – М.: Энергия, 1975.

- [3] Muhammad T. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. 2023. International Journal of Thermofluids. pp. 18-23.
- [4] Lee S., Kim H. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development. 2023. Energy and Buildings. pp. 112-121.
- [5] Waseem A., Xinyu H., Wenhao W., Zibin L., Asif M., Ruqiang Z. Nanoconfined phase change materials for thermal energy applications. 2018. Energy & Environmental Science. pp. 1392-1424.
- [6] Shchukina E.M., Graham M., Zheng Z., Shchukin D.G. Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. 2018. Chemical Society Reviews. pp. 4156-4175.
- [7] Морозов М.М., Лебедев Н.Н., Рациональное использование тепла: тепловые аккумуляторы. 2023. Энергосбережение. Т. 25, Выпуск 4, С. 12-18.
- [8] Дмитриев А.А., Орлова Т.Т. Новые фазопереходные материалы для теплового аккумулирования. 2020. Известия вузов. Энергетика. Т. 63, выпуск 5, С. 55-62.
- [9] Кузнецов С.С., Иванова А.А. Анализ энергетической эффективности тепловых аккумуляторов с теплоаккумулирующими материалами фазового перехода. 2017. Теплоэнергетика Т. 54, выпуск 5, С. 45-52.
- [10] Фецов С.С., Луценко Н.А. Численный анализ влияния геометрии боковых стенок на эффективность тепловых аккумуляторов на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами. 2020. Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13, № 2. С. 189-204.
- [11] Лекомцев П.Л., Калугин К.С. Исследование процессов теплопередачи в тепловых аккумуляторах с фазовым переходом теплоаккумулирующего материала при работе под воздействием ультразвукового поля. 2021. Вестник НГИЭИ. № 9 (124). С. 28-37.
- [12] Милёхин М.И., Умеренков Е.В. Тепловые аккумуляторы фазового перехода на основе парафина. 2024. Известия Юго-Западного государственного университета. № 28(3). С. 36-49.
- [13] Кухтин А.В., Денисов А.М. Математическая модель теплового аккумулятора в режиме отвода кратковременных тепловых потоков высокой мощности от элементов КА. Труды Всероссийской НПК «Современные проблемы улучшения ТТХ РКТ, ее создания, испытаний и эксплуатации» СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 711 с.
- [14] Борщев Н.О. Определение эффективной тепловой проводимости тепловых аккумуляторов методами пара метрической идентификации. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2024, № 1, С. 101-109. doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-101-109

- [15] Кухтин А.В., Денисов А.М., Девяткина Т.Ю. Практические рекомендации по разработке системы обеспечения теплового режима космического аппарата. 2018. Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. С. 113-123.

M.A. Padalka¹, D.K. Shcheglov²

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMAL PROCESSES IN TECHNOLOGICAL COOLING SYSTEMS WITH PHASE TRANSITION

¹Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
St Petersburg, Russia

²Obukhov Plant, St. Petersburg, Russia

Abstract

The article considers the issues of thermodynamic processes occurring in heat accumulators (HA) based on phase transition. A mathematical model of a heat accumulator with a number of assumptions is presented. To verify the correctness of the mathematical model, a number of experiments were conducted on a heat-accumulating substance (HAS) with similar modeling conditions, initial data and assumptions. Comparison of the experimental and calculation results showed the correctness of the proposed scientific and methodological apparatus taking into account the assumptions put forward.

Keywords: heat accumulator, technological system, phase transition, thermal process, heat-accumulating substance.

REFERENCES

- [1] Alekseev V.A., Malozemov V.V. Design of heat accumulators: Textbook. – M.: MAI-PRINT Publishing House, 2008. – 92 p.
- [2] Alekseev V.A. Cooling of electronic equipment using melting substances. – M.: Energiya, 1975
- [3] Muhammad T. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. 2023. International Journal of Thermofluids. pp. 18-23
- [4] Lee S., Kim H. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development. 2023. Energy and Buildings. pp. 112-121
- [5] Waseem A., Xinyu H., Wenhao W., Zibin L., Asif M., Ruqiang Z. Nanoconfined phase change materials for thermal energy applications. 2018. Energy & Environmental Science. pp. 1392–1424

- [6] Shchukina E.M., Graham M., Zheng Z., Shchukin D.G. Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. 2018. Chemical Society Reviews pp. 4156–4175
- [7] Morozov M.M., Lebedev N.N., Rational use of heat: heat accumulators. 2023. Journal "Energy Saving", Vol.: 25, Issue 4, Pp. 12–18
- [8] Dmitriev A.A., Orlova T.T. New phase-transition materials for heat storage. 2020. Journal: News of universities. Power engineering. Volume: 63, issue: 5, pp. 55–62
- [9] Kuznetsov S.S., Ivanova A.A. Analysis of energy efficiency of heat accumulators with phase-change heat-accumulating materials. 2017. Journal: Thermal Power Engineering Vol.54, issue 5, pp. 45-52
- [10] Fetsov S.S., Lutsenko N.A. Numerical analysis of the influence of side wall geometry on the efficiency of heat accumulators based on granular materials with phase transitions. 2020. Computational Continuous Media Mechanics. - 2020. - Vol. 13, No. 2. - P. 189-204
- [11] Lekomtsev P.L., Kalugin K.S. Study of heat transfer processes in heat accumulators with phase transition of heat-accumulating material during operation under the influence of an ultrasonic field. 2021. Bulletin of NGIEI. No. 9 (124). P. 28–37
- [12] Milekhin M.I., Umerenkov E.V. Phase-change heat accumulators based on paraffin. 2024. Bulletin of the South-West State University 28(3): 36-49
- [13] Kukhtin A.V., Denisov A.M. Mathematical model of a heat accumulator in the mode of removing short-term high-power heat flows from spacecraft elements // Proceedings of the All-Russian Scientific and Production Complex “Modern Problems of Improving the Performance Characteristics of Rocket and Spacecraft, Its Creation, Testing and Operation” St. Petersburg: A.F. Mozhaisky All-Russian Space Agency, 2013. 711 p.
- [14] Borshchev N.O. Determination of effective thermal conductivity of heat accumulators by parametric identification methods. News of higher educational institutions. Mechanical Engineering, 2024, No. 1, pp. 101–109, doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-101-109
- [15] Kukhtin A.V., Denisov A.M., Devyatkina T.Yu. Practical recommendations for the development of a spacecraft thermal management system. 2018. Tula State University News. Technical sciences. 2018. pp. 113-123