

УДК 629.7

Л.И. Кныш

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПЕРЕНОСА В АККУМУЛЯТОРЕ ТЕПЛА «ТВЁРДОЕ ТЕЛО – ЖИДКОСТЬ» КОСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

Приведено результати дослідження теплофізичних, геометричних та динамічних параметрів високотемпературного теплоаккумулюючого модуля фазового переходу «тверде тіло – рідина» космічної термодинамічної енергетичної установки. Створено узагальнену квазістаціонарну математичну модель, на основі якої отримана неявна залежність температури теплоносія від основних показників теплоаккумулятору. Проведено порівняння результатів теоретичного та експериментального дослідження.

**Ключові слова:** *тепловий акумулятор, фазовий перехід «тверде тіло – рідина», космічна термодинамічна енергетична установка, квазістаціонарний метод.*

Приведены результаты исследование теплофизических, геометрических и динамических параметров высокотемпературного теплоаккумулирующего модуля фазового перехода «твёрдое тело – жидкость» космической термодинамической энергетической установки. Создана обобщённая квазистационарная математическая модель, на основе которой получена неявная зависимость температуры теплоносителя от основных показателей теплоаккумулятора. Проведено сравнение результатов теоретического и экспериментального исследования.

**Ключевые слова:** *тепловой аккумулятор, фазовый переход «твёрдое тело – жидкость», космическая термодинамическая энергетическая установка, квазистационарный метод.*

**The results of research thermalphysics, geometrics and dynamics parameters of high-temperature thermal energy module with phase change materials «solid phase – liquid» of space dynamic energy system adduced. The generalized quasistationary mathematic model was produced. On the basis of this model was derived implicit temperature dependency of heat transfer from main indicators heat storage. The comparison theoretical and experimental result was conducted.**

© Л. И. Кныш, 2014

**Keywords:** *thermal energy storage module, phase change materials «solid phase – liquid», space dynamic energy system, quisistationary method.*

**Введение.** Энергетические системы космических аппаратов должны обеспечивать четыре основные функции: бесперебойное энергоснабжение всех систем и механизмов, создание дополнительного резервного запаса энергии, оптимальное распределение энергетических мощностей на борту и регулировка подачи энергии. Решение этих вопросов является приоритетным и определяет развитие всей космической отрасли. Множество современных научных проектов в области космонавтики связаны с длительными полётами, что

приводит к концептуальному пересмотру систем энергообеспечения. Солнечные фотоэлектрические установки не смогут обеспечить необходимый уровень выходной мощности в долгосрочных космических экспедициях. Массогабаритные показатели таких энергосистем не согласуются с требованиями по стоимости и эксплуатации на орбите. Очевидно, что в ближайшее время на смену прямому преобразованию солнечного излучения на борту космического аппарата придёт термодинамический способ получения энергии, эффективность и надёжность которого значительно выше. Так, для реализации проекта космического зонда «Juno» (американское космическое агентство NASA и военно-космическая корпорация Northrop Grumman) по изучения трёх спутников Юпитера был выбран динамический преобразователь на основе газотурбинного цикла Брайтона с ядерной силовой установкой. Выходная электрическая мощность такого источника энергии 250 кВт при ресурсе в 10 лет [1]. Разработка и внедрение подробных систем приведёт к снижению их стоимости и возможности использования на околоземных орбитах. В этом случае в качестве источника энергии, безусловно, будет использоваться солнечное излучение, улавливаемое параболическим концентратором [2].

Концепция термодинамической солнечной энергетической установки на основе газотурбинного цикла Брайтона с параболическим концентратором не нова. Начиная с 60-ых годов прошлого века, космические энергосистемы такого типа успешно тестируются (50 000 часов и более), как на орбите, так и в вакуумной камере. Выбор в пользу фотоэлектрического способа связан, скорее, с более адаптированной элементной базой и традициями, чем с реальными энергетическими потребностями в космосе [3].

Солнечные космические энергетические установки на основе газотурбинного цикла Брайтона имеют значительные преимущества по эффективности перед фотоэлектрическими солнечными батареями, практически не деградируют в процессе эксплуатации, невосприимчивы к действию факторов космического пространства. Немаловажным преимуществом таких систем является возможность использования в них высокотемпературных фазопереходных аккумуляторов «твёрдое тело – жидкость», массогабаритные параметры которых ниже, чем у традиционных химических батарей. Такие тепловые аккумуляторы достаточно надёжны и обеспечивают необходимый температурный уровень системы на протяжении множества периодов «заряд – разряд».

Фазопереходные аккумуляторы должны обеспечивать бесперебойную работу энергетической системы космического аппарата на теневой стороне орбиты. Это предполагает высокий уровень детальности при проведении теоретических расчётов, которые должны быть подтверждены экспериментальными исследованиями. Очевидно, на начальных этапах проектирования экспериментальных установок, важным моментов является выбор их технического решения, геометрических характеристик, определение скоростного режима теплоносителя в канале и пр. Решение подобной задачи

возможно с использование квазистационарного подхода, особенностям реализации которого посвящено данное исследование.

**Постановка задачи.** Тепловой аккумулятор в составе солнечной космической энергетической установки может быть представлен в двух типах тепловой связи с основной системой – параллельной и последовательной. В первом случае тепловой аккумулятор представляет собой автономное устройство с конвективным отводом тепловой энергии от теплоаккумулирующего материала (ТАМ) теплоносителем основной системы. Во втором – теплоприёмник и тепловой аккумулятор представляют собой единое устройство. Поток концентрированного солнечного излучения расходуется не только на подогрев теплоносителя, но и на плавление ТАМа. Детальное численное исследование подобных теплоприёмников – аккумуляторов было проведено в [4].

Выбор типа тепловой связи космических аккумулирующих модулей зависит от компоновочной схемы космического аппарата, его назначения, особенностей полёта, а также от вида энергоустановки, для которой проектируется накопитель тепла. Теплоаккумуляторы с последовательной и параллельной тепловой связью практически равнозначны с точки зрения обеспечения стабильной работы термодинамического цикла. Хотя в работе [5] указывается, что автономный накопитель тепла обладает лучшими параметрами надёжности и энергетически более эффективен. Как правило, такие аккумуляторы представляют собой кожухотрубные теплообменники с расположенными внутри каналами с теплоносителем и ТАМом. Каждый канал – это система типа «труба в трубе» с фазопереходным с ТАМом, в котором накапливается тепло на режиме зарядке и отдаётся движущемуся теплоносителю на режиме разрядке. Теплоноситель может двигаться как внутри канала с ТАМом, так и в межтрубном пространстве.

Квазистационарная математическая модель энергопереноса в единичном канале накопителя тепла при условии, что теплоноситель движется в межтрубном пространстве, состоим из уравнения баланса энергии:

$$GC_p dT(x)d\tau = 2\pi dr dx \rho_{ТАМ} L, \quad (1)$$

где  $G$  и  $C_p$  – расход и теплоёмкость теплоносителя;  $\rho_{ТАМ}$  и  $L$  – плотность и теплота фазового перехода ТАМа;  $T$  – температура в каждом сечении теплоаккумулирующего модуля;  $x$ ,  $r$  и  $\tau$  – продольная, поперечная координата и время;

и уравнения теплопередачи:

$$C_p dT(x)d\tau = k(T_\phi - T(x))dx, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи;  $T_\phi$  – температура фазового перехода ТАМа.

При вычислении коэффициента теплопередачи учитывается термическое сопротивление образующейся твёрдой или жидкой фазы ТАМа, термическое сопротивление стенок канала, а также особенности конвективной теплоотдачи между ТАМом и движущимся в канале теплоносителем. Следует отметить, что конвективная составляющая в расплаве ТАМа будет незначительной, ввиду специфики функционирования теплообменного устройства в условиях низкой гравитации.

Рабочим телом цикла Брайтона космической солнечной энергетической установки выступают инертные газы или их смеси. Хорошими теплофизическими показателями обладает смесь инертных газов гелия и ксенона, турбулентный режим течения которой организуется в межтрубном пространстве. Такой режим обеспечивает более интенсивную теплоотдачу при незначительных дополнительных энергетических затратах на прокачку газообразного теплоносителя. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_K$  для турбулентного потока в этом случае вычисляется на основе классических критериальных уравнений М.А. Михеева:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr_{TH}}{Pr_{TAM}} \right)^{0,25}.$$

В качестве ТАМов могут быть использованы различные вещества, стабильные при плавлении. Однако температура плавления таких веществ должна соответствовать верхней температуре газотурбинного цикла в составе которого функционирует накопитель тепла. При выборе типа ТАМа для космических энергосистем важным также является значение скрытой теплоты фазового перехода. Высокие значение этого параметра обеспечивают минимизацию массогабаритных характеристик теплообменника, что, в конечном счёте, влияет на показатели стоимости энергетической установки в целом.

Возможность использования различных ТАМов и разных типов теплоносителей требует обобщённого подхода при решении задачи, позволяющего выявить теплофизические, динамические и геометрические характеристики теплоаккумулирующей системы и их влияние на общие энергетические параметры установки.

Переходя в системе уравнений (1) – (2) к безразмерным параметрам, имеем

$$d\theta = -d\bar{r}^2, \quad (3)$$

и

$$\frac{d\theta}{d\bar{x}} = - \frac{\Phi \cdot St \cdot \theta \cdot \bar{R}}{4 - \bar{R} \cdot Bi \cdot \ln \bar{r}^2}, \quad (4)$$

где  $\theta = \frac{T_\phi - T(x)}{T_\phi - T_0}$  – избыточная температура в каждом сечении теплоаккумулятора;  $\bar{r} = \frac{r}{R}$  – безразмерная радиальная координата;  $\bar{x} = \frac{x}{R}$  – безразмерная продольная координата;  $St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr}$  – число Стантона;  $Bi = \frac{\alpha \cdot 2R_{TH}}{\lambda_{ТАМ}}$  – число Био;  $\bar{R} = \frac{R}{R_{TH}}$  – безразмерный геометрический параметр, показывающий соотношения радиусов каналов с ТАМом и теплоносителем;  $\Phi = \frac{8\bar{R}}{2\bar{R} + 1}$  – безразмерная величина, характеризующая геометрию кольцевого канала.

В критериях Ниссельта и Рейнольдса в качестве определяющего размера выступает гидравлический диаметр кольцевого канала, значения которого равно  $2R_{TH}$ .

Уравнения (3) – (4) дополняются граничными условиями такого вида

$$\text{при } \bar{x} = 0 \quad \theta = 1, \text{ а } \bar{r} = 0. \quad (5)$$

Особенностью математической модели (3) – (5) является отсутствие в ней в явном виде значения скрытой теплоты фазового перехода. Это связано с допущением о поступательном характере движения границы раздела фаз. Более того, предполагалось, что среднее значение скорости движения этой границы представляет собой отношение интегральных тепловых поток в теплоносителе и ТАМе [6].

**Метод решения и анализ полученных результатов.** Система уравнений (3) – (5) была решена аналитически с использованием стандартного разложения функций в степенные ряды. В ходе решения получена неявная зависимость безразмерной избыточной температуры теплоносителя в каждом сечении от безразмерной длины канала, которая имеет вид:

$$\frac{\Phi \cdot St \cdot \bar{x}}{Bi} = \frac{\pi^2}{6} - \left( \frac{4 \ln \theta}{Bi \cdot \bar{R}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\theta^k}{k^2} \right). \quad (6)$$

Неявный характер зависимости и наличие в решении бесконечного ряда несколько усложняет проведения анализа, делая необходимым организацию итерационной процедуры для определения значений температуры в каждом сечении канала с теплоносителем.

Численные эксперименты проводились с использованием в качестве теплоносителя смеси инертных газов гелия и ксенона в соотношении 0,37/0,63, а в качестве высокотемпературного ТАМа фторида лития, температура плавления которого  $T_\phi = 1121K$ , а скрытая теплота фазового перехода

$L = 1050 \text{ кДж} / \text{К}$ . Температура в входе в теплоаккумулятор на режиме разрядке принималась равной  $T_0 = 1000 \text{ К}$ . Высокие уровни температур теплоносителя существенным образом влияют на его теплофизические показатели. Температурная зависимость динамического коэффициента вязкости смеси инертных газов учитывалась на основании формулы Сазерленда, а плотность находилась на основании уравнения Менделеева – Клапейрона.

На рис.1 представлен характер изменения температуры теплоносителя в каждом сечении канала. В качестве обобщенного комплекса выступает величина  $\frac{\Phi \cdot St \cdot \bar{x}}{Bi}$ , в которой учитывается геометрические, динамические и теплофизические параметры теплоаккумулирующего модуля.

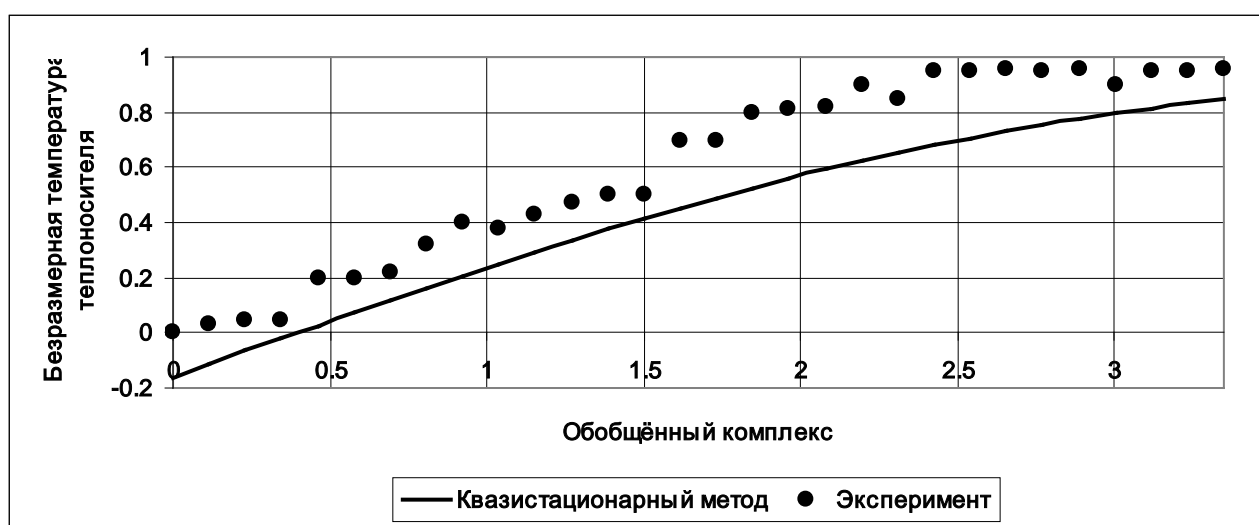


Рис.1. Изменение избыточной температуры теплоносителя в зависимости от геометрических, динамических и теплофизических параметров теплоаккумулятора

На представленном графике значение безразмерной температуры выражается в виде  $\bar{\theta} = 1 - \theta$ . Введение такой переменной связано с необходимостью сравнить полученные аналитически результаты с результатами натуральных экспериментов. В [5] приведено описание эксперимента, который проводился с использованием гидрида лития  $LiH$  в качестве теплоаккумулирующего материала. Рабочим телом данной установки являлся жидкометаллический теплоноситель – эвтектический сплав  $NaK$ . При описании результатов эксперимента было использовано значение избыточной температуры теплоносителя в несколько другой записи, что сделало необходимым введение переменной  $\bar{\theta}$ .

Сравнивая результаты теоретических и экспериментальных исследований, можно сделать вывод об их качественном совпадении. Что показывает возможность использования приближённого квазистационарного подхода на начальных этапах проектирования высокотемпературных теплоаккумулирующих модулей. Некоторое количественное отклонение экспериментальных и теоретических данных, скорее всего, объясняется

использованием в натурном эксперименте жидкометаллического теплоносителя, для которого характеры числа Прандтля в диапазоне  $Pr \approx 0,005 \div 0,05$ . Для теплоносителей с такими значениями чисел Прандтля необходимо производить обязательный учёт теплопроводности в продольном направлении, что невозможно осуществить в рамках предложенного решения.

**Выводы.** На основе созданной приближённой квазистационарной модели тепломассопереноса в высокотемпературном теплоаккумуляторе фазового перехода «твёрдое тело – жидкость», получена неявная аналитическая зависимость, в которой учитываются основные показатели модуля и их влияние на его энергетические характеристики. Построен численный алгоритм, позволивший получить зависимость температуры теплоносителя от геометрических, динамических и теплофизических параметров теплоаккумулятора. Проведенное сравнение полученных результатов с данными экспериментальных исследований показало их качественное совпадение.

### Библиографические ссылки

1. Unlocking Jupiter's Mysteries [*Электронный ресурс*]: сайт NASA. – *Режим доступа*: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/juno/main/#.U0k0DIV\\_uos](http://www.nasa.gov/mission_pages/juno/main/#.U0k0DIV_uos)
2. Кныш Л.И. Влияние геометрии концентратора на энергетические показатели системы приёма космической солнечной энергетической установки / Л.И. Кныш // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т.17, №5 – С.19–23.
3. Егоров И.Н. Проблемы многодисциплинарной оптимизации силовых установок перспективных аэрокосмических систем/ И.Н. Егоров, Г.В. Кретинин, И.А. Лещенко, С.В. Купцов // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики. – 2000. – №1. – С. 25 – 31.
4. Кныш Л.И. Оптимизация геометрических и динамических характеристик теплоаккумулирующего модуля / Л.И. Кныш, А.А. Рядно // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т.25, №6 – С. 9 –15.
5. Грилихес В.А. Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов / В.А. Грилихес, В.М. Матвеев, В.П. Полуектов – М., Машиностроение, 1975. – 248с.
6. Пехович А.И. Тепловые расчёты твёрдых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких – Л., Энергия, 1976. – 342с.

Надійшла до редакції ...10.06.2014.