

УДК 629.78.048.7: 004.942

doi: 10.32620/aktf.2020.4.02

П. С. КОВАЛЬ, К. С. ЕПИФАНОВ, Р. Ю. ТУРНА

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ДВУХТЕМПЕРАТУРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОАККУМУЛЯТОРА С ТЕПЛОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ДЛЯ УСЛОВИЙ НЕВЕСОМОСТИ

На космических аппаратах с большим тепловыделением в системах терморегулирования (СТР) целесообразно использовать двухфазные контуры теплопереноса (ДФК). ДФК имеет большие преимущества по сравнению с однофазными контурами теплопереноса. В таких контурах тепло аккумулируется и переносится в виде скрытой теплоты парообразования. ДФК могут переносить значительно большее количество теплоты на единицу массового расхода, температуру объектов можно поддерживать практически постоянной на всем участке теплоподвода и приближенной к температуре насыщения. Кроме того, все процессы теплопередачи, протекающие при кипении более интенсивны, чем при обычном конвективном теплообмене. Поэтому масса, габариты СТР на базе ДФК будут меньше, чем на базе однофазного контуров. Гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА) является важнейшим элементом ДФК. В статье предлагается упрощенная двухтемпературная математическая модель для описания неравновесных тепло-массообменных процессов в ТГА в условиях невесомости. Математическая модель ТГА формируется при помощи метода идеализированных элементов. Авторами подробно приведены уравнения сохранения энергии для контрольных объемов и тепловых узлов, уравнения сохранения массы, уравнения для тепловых потоков и потоков массы. Модель позволяет быстро провести расчет и проанализировать приемлемый результат для предварительных оценок. Ранее авторами была опубликована работа, где описывается детальная многотемпературная модель, которая позволяет оценить неравновесность в жидкой фазе. Детальная модель позволяет рассчитать практически любой процесс в ТГА с достаточно высокой точностью, но программа при этом достаточно объемная и расчет занимает много времени. Поэтому по рекомендации разработчиков программного комплекса AMESim авторы сформировали упрощенную двухтемпературную неравновесную модель ТГА.

Модель реализована в программной среде Fortran и протестирована на установление квазистационарного режима и проверена на соблюдение теплового баланса. На основе данных космического эксперимента по разогреву ТГА с аммиаком выполнена оценка предполагаемой величины конвективной составляющей теплопереноса в условиях невесомости.

Важно, что данная концепция и модель могут быть уточнены исходя из реальной конструкции гидроаккумулятора. Например, уравнения могут быть записаны для цилиндрического ТГА, размещения нагревателя на поверхности корпуса или в центре и т.д.

Ключевые слова: космический аппарат; невесомость; система терморегулирования; двухфазный контур теплопереноса; гидроаккумулятор с тепловым регулированием; ТГА; аммиак; неравновесная двухтемпературная математическая модель тепло-массообменных процессов.

Введение

Из-за роста тепловыделения приборов на борту космических аппаратов рационально проектировать системы регулирования (СТР) на базе двухфазных контуров теплопереноса. В таких контурах тепло накапливается в виде скрытой теплоты парообразования, что позволяет переносить большое количество тепла на единицу массового расхода теплоносителя по сравнению с системами на основе однофазных контуров. В ДФК процессы теплопередачи происходят более интенсивно, чем при однофазном конвективном теплообмене. Масса теплообменных

аппаратов и всего контура теплопереноса существенно меньше их массы по сравнению с однофазными аналогами.

Усиленные исследования ДФК для больших космических платформ проводились в СССР, Европе, США в 80-х годах [1]. В 90-х годах ракетно-космическая корпорация (РКК) «Энергия» создала проект центральной системы теплоотвода (ЦСТО) для российского сегмента Международной космической станции (МКС) [2]. В 1999 году модель ДФК ЛЭУ-1М была испытана на борту корабля «Прогресс» в составе космической станции «Мир» [3]. В этих работах активно участвовал Центр технической

физики (ЦТФ) украинского Национального аэрокосмического университета (ХАИ).

В связи с ростом мощности стационарных спутников их разработчики в 2000-х годах также заинтересовались системами терморегулирования (СТР) на базе ДФК [4].

ДФК (рис. 1) состоит из насоса 1, испарителя 2, тепловыделяющего оборудования 3, конденсатора 4, радиатора-излучателя 5, гидроаккумулятора 6. Гидроаккумулятор должен поддерживать необходимый уровень давления и требуемый кавитационный запас на входе в насос, а также впускать или выпускать в контур теплоноситель на разных режимах работы ДФК. Перспективными и эффективными для применения в ДФК являются гидроаккумуляторы с тепловым регулированием (ТГА) [5, 6]. ТГА (рис. 2) имеет паровую полость 7, жидкостную полость 8 и нагреватель 9. ТГА обладает весомыми преимуществами по сравнению с классическими мембранными аккумуляторами. Если нужно повысить давление в ТГА, то нагреватель 9 включается, жидкость выдавливается из ТГА в контур. Для обеспечения смачивания поверхности нагревателя теплоносителем в условиях невесомости в конструкцию ТГА внедрены капиллярные структуры.

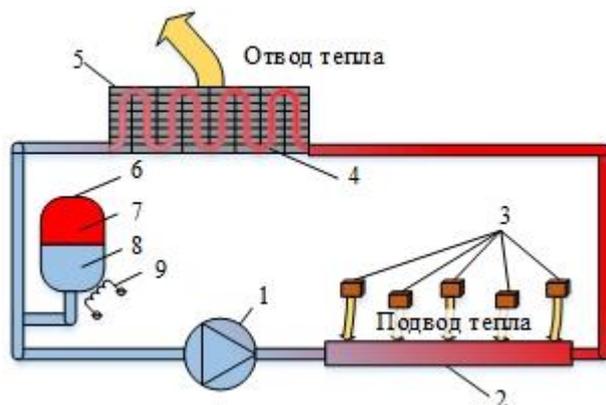


Рис. 1. Двухфазный контур теплопереноса: 1 – насос; 2 – испаритель; 3 – тепловыделяющее оборудование; 4 – конденсатор; 5 – радиатор-излучатель; 6 – гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА); 7 – пар; 8 – жидкость; 9 – нагреватель ТГА

Следует отметить, что процесс теплопереноса в ТГА с участием капиллярных структур близкий к аналогичным процессам в тепловых трубах.

Гравитация оказывает весомое влияние на тепло-массообменные процессы в ТГА. В условиях космического полета гравитации нет, поэтому полное физическое моделирование ТГА на земле исключено. Это делает актуальной задачу разработки

математических моделей, позволяющих предсказывать характеристики ТГА в невесомости.

Простейшая математическая модель ТГА – равновесная модель, в которой пар и жидкость находятся в термодинамическом равновесии, температура пара и жидкости во всем объеме ТГА одинаковая и равна температуре насыщения при заданном давлении в ТГА.

Реальные процессы теплопереноса в ТГА могут сопровождаться существенной неравновесностью, при которой температура жидкости не равна температуре пара. Неравновесность может оказывать влияние на процессы регулирования ДФК. Поэтому для прогнозирования параметров ДФК в процессе регулирования следует использовать неравновесную математическую модель тепло-массообменных процессов в ТГА.

В работе [7] приведена многотемпературная неравновесная модель ТГА. Однако она достаточно объемная, что затрудняет ее включение в программные комплексы типа AMESim. По предложению разработчиков этой программы, в настоящей статье предлагается упрощенная двухтемпературная неравновесная модель ТГА.

1. Постановка задачи

Целями данной работы являются:

- разработка упрощенной двухтемпературной модели;
- прогнозирование величины коэффициента конвективного теплопереноса k на основе анализа экспериментальных данных на летной установке ЛЭУ-1М;
- тестирование модели на установление квазистационарного режима и проверка соблюдения теплового баланса.

2. Обобщенная содержательная модель ТГА

Обобщенная содержательная модель ТГА представлена на рис. 2 в виде бака 1 объемом $V = F \cdot L$, где F – площадь поперечного сечения; L – длина аккумулятора. Емкость заполнена паром 7 и жидкостью 8 теплоносителя. На левой границе емкости расположен нагреватель 9. На правой границе находится внешняя стенка 5. Жидкость может входить/выходить в/из ТГА через патрубок 4 около внешней стенки. Внутренняя поверхность бака покрыта капиллярной структурой 3, которая обеспечивает смачивание всех твердых поверхностей, в том числе поверхности нагревателя. Из этого следует, что паровая фаза контактирует только с межфазной поверхностью жидкость – пар 2, так называемой «σ-

фазой» [8]. Тепло-массообмен с паром может происходить только через «σ-фазу».

Предполагается, что температура пара и жидкости различны, но имеют единственное значение по всему объему пара и жидкости. Температура пара равна температуре насыщения при заданном давлении в ТГА. Поступающая жидкость сразу же смешивается с уже имеющейся в ТГА жидкостью.

Нагреватель 9, внешняя стенка 5 также характеризуются единственным значением температуры.

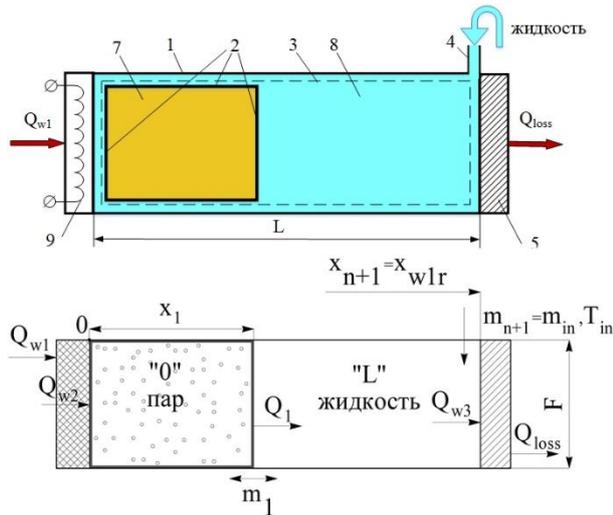


Рис. 2. Обобщенная содержательная модель ТГА и схема разбиения объема ТГА на элементы: 1 – емкость ТГА; 2– межфазная поверхность; 3 – капиллярная структура; 4 – патрубок подвода/отвода жидкости; 5 – внешняя стенка ТГА; 7 – пар; 8 – жидкость; 9 – нагреватель ТГА

3. Математическая модель

Математическая модель ТГА формируется при помощи разработанного в ЦТФ в 80-х годах метода идеализированных элементов. В связи с представленной содержательной моделью ТГА разбивается на серию физических элементов. Схема разбиения объема ТГА на элементы и их условные обозначения представлены на рис 2 и в таблице 1. Каждый элемент характеризуется единственным набором параметров состояния. Аналогичный подход используется во многих расчетных программах, например, в AMESim, Sinda-Fluint и др.

Каждый физический элемент ТГА соответствует определенному идеализированному элементу. Идеализированные элементы – это геометрические образы уравнений термодинамики и теплопередачи, характеризуют способность элементов ТГА аккумулировать и переносить теплоноситель, изменять его энергию, передавать теплоту между теплоносителем и поверхностью элементов ТГА и т.д.

В таблице 1 отображены идеализированные элементы предлагаемой математической модели и соответствующие им физические процессы или элементы ТГА.

Объединенные идеализированные элементы образует нодализационную схему, которая является топологическим представлением математической модели (рис. 3, 4). Нагреватель моделируется тепловым узлом 2w, внешняя стенка – тепловым узлом 3w. Паровая фаза моделируется одним контрольным объемом «0». Межфазная поверхность моделируется контрольным объемом «σ-фаза». Контрольный объем L используются для моделирования жидкой фазы.

Таблица 1

Номенклатура идеализированных элементов

Идеализированный элемент	Характеристика идеализированного элемента	Физический элемент или моделируемый процесс	Обозначение
Конечный контрольный объем	Объем с теплоносителем. Открытая термодинамическая система. Описывается нестационарными законами сохранения массы и энергии.	Элементарный объем теплоносителя.	L
Ветвь	Связывает между собой «конечные» контрольные объемы.	Перенос массы и энергии между контрольными объемами.	↔
Тепловой узел	Объем со свойством накопления тепловой энергии.	Элементы конструкции.	2 _w
Тепловой проводник	Тепловые связи между физическими элементами за счет теплопроводности, теплоотдачи или излучения.	Перенос теплоты теплопроводностью, теплоотдачей или излучением.	⚡
σ-фаза	Нулевой по массе контрольный объем. Температура = температуре насыщения.	Межфазная поверхность	σ

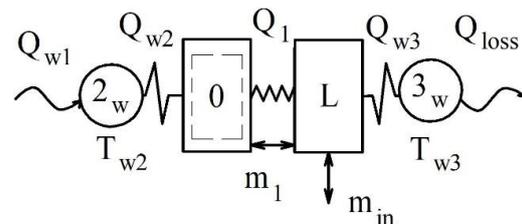


Рис. 3. Топологическое представление неравновесной математической модели ТГА без элемента «σ-фаза»

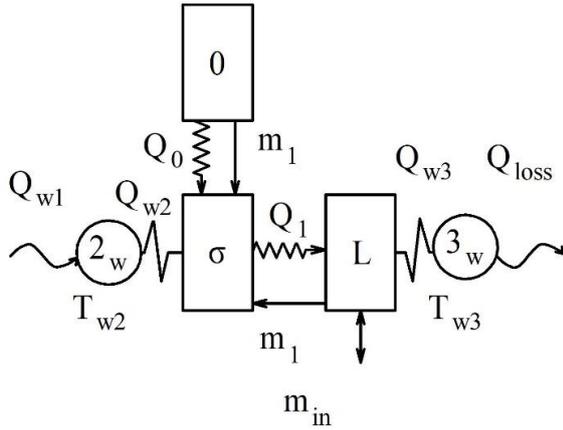


Рис. 4. Топологическое представление неравновесной математической модели ТГА с элементом «σ-фаза»

Схемы на рис. 3 и 4 эквивалентны. Система уравнений, полученная на основании этих двух схем, одинаковая.

4. Основные уравнения

1. В общем случае уравнение сохранения энергии для конечного контрольного объема с подвижной границей имеет вид:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\sum(m \cdot h)_j + (\sum Q)_j - h_j \cdot (\sum m)_j}{M \cdot c_v} - \frac{M \left(p + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \right) \frac{\partial v}{\partial \tau}}{M \cdot c_v}, \quad (1)$$

где $\sum(m \cdot h)_j$ – суммарный поток энтальпии в контрольный объем;

$(\sum Q)_j$ – суммарный поток тепла в контрольный объем;

$(\sum m)_j$ – суммарный поток массы в контрольный объем.

h_j – энтальпия j-го контрольного объема.

После преобразований с учетом принятых допущений уравнения сохранения энергии принимают вид:

– для парового контрольного объема «0»:

$$\frac{dT_0}{d\tau} = \frac{m_1 \cdot \left[u_0'' - h' \cdot Y - h_L \cdot (1 - Y) + p \cdot v_0'' \right]}{M_0 \cdot \left[\left(\frac{du''}{dT} \right)_{sat} + p \cdot \left(\frac{dv''}{dT} \right)_{sat} \right]} + \frac{Q_{w2} - Q_1}{M_0 \cdot \left[\left(\frac{du''}{dT} \right)_{sat} + p \cdot \left(\frac{dv''}{dT} \right)_{sat} \right]}, \quad (2)$$

где Y – вспомогательный коэффициент. Если $m_1 \geq 0$, то $Y = 1$, иначе $Y = 0$

$$M_0 = \frac{V_{HCA} - M_{HCA} \cdot v_L}{v'' - v_L}, \quad (3)$$

где v_L – удельный объем жидкости, m^3/kg .

Массообмен между паровой и жидкой фазами рассчитывается на основании законов сохранения массы и энергии с учетом того, что на межфазной поверхности (σ-фаза) не происходит накопления массы и энергии (см. рис.3б):

$$m_1 = \frac{A_1 \cdot (Q_{w2} - Q_1) + M_0 \cdot A_3 \cdot v_L \cdot m_{in}}{(M_0 \cdot A_3 \cdot (v'' - v_L) - A_1 \cdot A_2)}, \quad (4)$$

$$A_1 = \left[M_0 \left(\frac{dv_0''}{dT_0} \right)_{sat} + M_L \cdot \left(\frac{dv_0'}{dT_0} \right)_{sat} \right];$$

$$A_2 = \left[u_0'' - h' \cdot Y - h_L \cdot (1 - Y) + p \cdot v_0'' \right];$$

$$A_3 = \left[\left(\frac{du''}{dT} \right)_{sat} + p \cdot \left(\frac{dv''}{dT} \right)_{sat} \right];$$

Q_{w2}, Q_1 – тепловые потоки, которые вычисляются по формулам (10) и (16), соответственно.

– для жидкостного контрольного объема «L»:

$$\frac{dT_L}{d\tau} = \frac{(\sum mh)_L + Q_1 - Q_{w3} - h_L \cdot (m_1 - m_{in})}{M_L \cdot B_2} + \frac{C_2 \cdot (m_1 A_2 + Q_{w2} - Q_1)}{M_L \cdot B_2}, \quad (5)$$

$$\text{где } B_2 = c_{vL} + T_L \cdot v_L \cdot \frac{\alpha_L^2}{\beta_L};$$

$$B_3 = \beta_L \cdot v_L \cdot \left[T_L \cdot \frac{\alpha_L}{\beta_L} - p \cdot \left(1 + \left(\frac{dp}{dT_0} \right)_{sat} \right) \right];$$

$$C_2 = \frac{M_L \cdot B_3}{M_0 \cdot A_3};$$

Q_{w2}, Q_1, Q_{w3} – тепловые потоки, которые вычисляются по формулам (10) и (16).

При выводе этих уравнений считалось, что параметры жидкости не сильно отклоняются от линии насыщения. Поэтому можно записать:

$$\frac{dv_L}{d\tau} \approx \frac{dv'(T_0)}{d\tau} = \left(\frac{dv'}{dT} \right)_{sat} \cdot \frac{dT_0}{d\tau}. \quad (6)$$

Коэффициенты сжимаемости жидкого теплоносителя α и β зависят только от температуры T_0 :

$$\alpha = \frac{1}{v_L} \left(\frac{\partial v_L}{\partial T} \right)_p = f(T_0);$$

$$\beta = -\frac{1}{v_L} \left(\frac{\partial v_L}{\partial p} \right)_T = f(T_0).$$
(7)

Эти допущения позволили получить выражение для межфазного массообмена m_1 (4) в явном виде.

2. Уравнения сохранения массы для контрольных объемов:

– масса пара M_0 рассчитывается по формуле (3). Фактически это уравнение сохранения объема ТГА. Благодаря использованию формулы (3) ошибки не накапливаются при длительном интегрировании.

– для жидкостного контрольного объема «L»:

$$\frac{dM_L}{dt} = m_1 - m_{in}. \quad (8)$$

Поток m_1 считаем положительными, если он направлен по оси x . m_{in} считаем положительным, если жидкость выходит из ТГА.

3. Уравнения сохранения энергии для тепловых узлов.

– Нагреватель (2w)

$$C_2 \cdot \frac{dT_{w2}}{dt} = Q_{w1} - Q_{w2}, \quad (9)$$

где C_2 – полная теплоемкость нагревателя, Вт/К;

Q_{w1} – мощность нагревателя, Вт;

$$Q_{w2} = \alpha_2 \cdot F_{w2} \cdot (T_{w2} - T_0), \text{ Вт} - \text{тепловой поток от нагревателя к паровому контрольному объему}; \quad (10)$$

α_2 – коэффициент теплоотдачи от нагревателя к паровому контрольному объему, Вт/м²/К;

– Внешняя стенка (3w).

$$C_3 \cdot \frac{dT_{w3}}{dt} = Q_{w3} - Q_{loss}, \quad (11)$$

где C_3 – полная теплоемкость внешней стенки (конструкции) ТГА, Вт/К;

Q_{w3} , Вт – тепловой поток от жидкости к внешней стенке, определяемый по формуле

$$Q_{w3} = \alpha_3 \cdot F_{w3} \cdot (T_L - T_{w3}), \quad (12)$$

где α_3 – коэффициент теплоотдачи от жидкости к внешней стенке, Вт/м²/К;

Q_{loss} – тепловой поток, отводимый от ТГА посредством излучения к внешнему контейнеру.

$$Q_{loss} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot F_{w3} \cdot \left[\left(\frac{T_{w3}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_\infty}{100} \right)^4 \right], \quad (13)$$

где ε – степень черноты наружной поверхности ТГА;

$c_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана;

F_{w3} – площадь наружной поверхности бака, м²;

T_∞ – температура стенок контейнера, в котором находится ТГА, К.

4. Уравнения для потоков энтальпии.

При вычислении потоков энтальпии применяется правило «донорства»: поток переносит энтальпию от источника к стоку. Входящий в контрольный объем суммарный поток энтальпии считается положительным. В общем случае $\sum(m \cdot h)_j \neq h_j \cdot \sum m$.

– Потоки энтальпии в жидкостные контрольные объемы.

$$\begin{aligned} (\sum m \cdot h)_L &= -m_1 \cdot (h'Y + (1-Y) \cdot h_L) - \\ &- m_{in} \cdot (h_{in} \cdot (1-z) + h_L \cdot z), \end{aligned} \quad (14)$$

где z , Y – вспомогательные коэффициенты, учитывающие правило «донорства»:

$$\text{if } m_1 \geq 0, \text{ then } Y = 1, \text{ else } Y = 0; .$$

$$\text{if } m_{in} \geq 0, \text{ then } z = 1, \text{ else } z = 0;$$

– Потоки энтальпии в паровой контрольный объем

$$\begin{aligned} (\sum m \cdot h)_0 &= -m_1 \cdot [(1-Y) \cdot h_L + Y \cdot h'] \\ \text{if } m_1 \geq 0, \text{ then } Y &= 1, \text{ else } Y = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

5. Уравнения для теплового потока между контрольными объемами.

Для расчета используется уравнение теплопроводности в жидкости. Реально теплота в общем случае передается и теплопроводностью, и термокапиллярной конвекцией. Конвективная составляющая учитывается множителем k при коэффициенте теплопроводности λ .

$$Q_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot \lambda_L \cdot H \cdot (T_0 - T_L)}{\ln \frac{x_{wlr}}{x_1}}. \quad (16)$$

Тепловые потоки между контрольными объемами, между тепловыми узлами и контрольными объемами считаются положительными, если они направлены во вне ТГА.

6. Свойства теплоносителя.

Считается, что в паровой фазе теплоноситель всегда находится на линии насыщения. Давление в ТГА определяется температурой пара

$$p = p_{\text{sat}}(T_0). \quad (17)$$

Удельный объем жидкости рассчитывается с учетом коэффициента сжимаемости. Это важно для некоторых теплоносителей, находящихся вблизи критической точки, например, для аммиака

$$v_L = \frac{v'(p)}{1 + \alpha \cdot (T_{\text{sat}} - T_L)} = \frac{v'(T_0)}{1 + \alpha \cdot (T_0 - T_L)}. \quad (18)$$

Удельная энтальпия жидкости:

$$h_L = h'(T_0) + c_{pL}(T_0) \cdot (T_L - T_0), \quad (19)$$

$$h_{\text{in}} = h'(T_0) + c_{pL}(T_{\text{in}}) \cdot (T_{\text{in}} - T_0). \quad (20)$$

5. Условия однозначности, искомые параметры системы

Условия однозначности включают:

- объем V_{HCA} и геометрия ТГА;
- начальное состояние ТГА, температуры T_0, T_L, T_{w2}, T_{w3} ;
- мощность нагревателя Q_{w1} и закон управления нагревателем;
- изменение массы теплоносителя в ТГА во времени $M_{\text{HCA}} = f(\tau)$.
- температура входящей в ТГА жидкости. $T_{\text{in}} = T_{\text{pump}} = f(\tau)$, если жидкость входит в ТГА. Если жидкость выходит из ТГА, то $T_{\text{in}} = T_L$.

Неизвестными в модели являются: температуры в контрольных объемах T_0 и T_L ; температуры тепловых узлов T_{w2}, T_{w3} ; масса пара M_0 и жидкости M_L в контрольных объемах; тепловые потоки между контрольными объемами и тепловыми узлами $Q_1, Q_{w2}, Q_{\text{loss}}$; потоки массы между контрольными объемами m_1 ; давление в ТГА p . Для решения системы дифференциальных уравнений используется стандартный метод Рунге-Кутты численного интегрирования.

Данная концепция и модель могут быть уточнены исходя из реальной конструкции ТГА. Например, уравнения могут быть записаны для цилиндрического ТГА, размещения нагревателя в центре или на поверхности корпуса и т.д.

6. Тестирование модели

При тестировании программы, составленной по вышеописанной модели, были проведены тесты на установление квазистационарного режима и проверка соблюдения теплового баланса. Квазистационарный режим характеризуется постоянным теплоподводом от нагревателя и периодическим поступлением и удалением некоторого количества жидкости.

Исходные данные для теста № 1

- $Q_{w2} = 16$ Вт – мощность нагревателя, он включен на протяжении всего расчета;
- коэффициент конвективного теплопереноса $k=30$;
- начальные температуры теплоносителя и тепловых узлов 20°C ;
- температура входящей жидкости $T_{\text{in}} = 13^\circ\text{C}$;
- расход входящей/выходящей жидкости описывается функцией вида

$$m_{\text{in}} = 0.5 \cdot \sin(0.02 \cdot \tau), \text{ г/сек},$$

где τ – время, сек. Угол при \sin в радианах. Зависимость представлена на рис. 5.

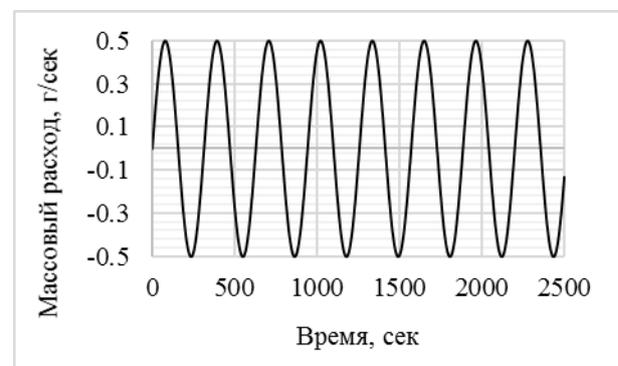


Рис. 5. График зависимости массового расхода от времени

- начальное объемное паросодержание $\phi = 65\%$;
- температура окружающей среды $T_\infty = 20^\circ\text{C}$;
- тепловые потери рассчитываются по уравнению $Q_{\text{loss}} = \alpha_4 \cdot F_4 \cdot (T_{w3} - T_\infty)$;
- Геометрия ТГА:
 - объем ТГА $V_{\text{HCA}} = 0.0205 \text{ м}^3$;
 - диаметр нагревателя 0.02 м;
 - диаметр центральной трубы 0.025 м;
 - внутренний диаметр бака 0.2312 м;
 - наружный диаметр бака 0.224 м;
 - эквивалентная длина ТГА $H=0.527$ м;

Коефіцієнти теплоотдачи:

$$-\alpha_1 = 5000 \text{ Вт/м}^2/\text{К};$$

$$-\alpha_2 = 4000 \text{ Вт/м}^2/\text{К};$$

$$-\alpha_3 = 400 \text{ Вт/м}^2/\text{К};$$

$$-\alpha_4 = 20 \text{ Вт/м}^2/\text{К}.$$

Необходимо было получить квазистационарное состояние. В нашей модели оно было достигнуто за $\tau = 30000$ сек. Результаты теста № 1 представлены на рис. 6 и 7.

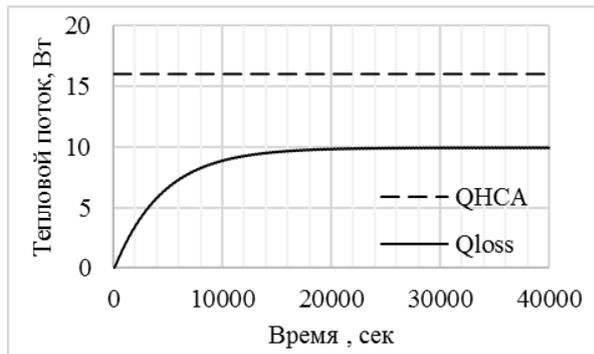


Рис. 6. График зависимости тепловых потоков от времени (Q_{w2}, Q_{loss}) в тесте № 1

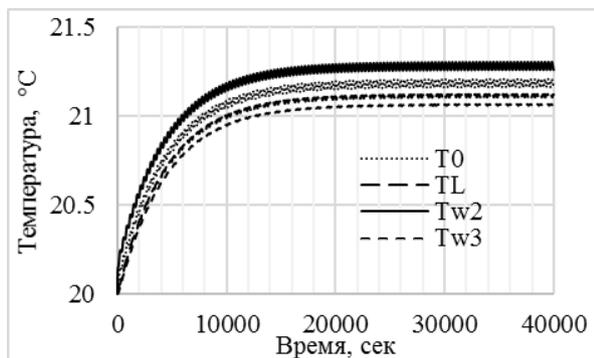


Рис. 7. График зависимости температур теплоносителя и тепловых узлов от времени в тесте № 1

При этом температура пара $T_0 = 21.19^\circ\text{C}$, а температура жидкости $T_L = 21.12^\circ\text{C}$.

Исходные данные для теста № 2

Идентичны тесту № 1, за исключением – начальные температуры теплоносителя и тепловых узлов 23°C .

Необходимо также получить квазистационарное состояние, в нашей модели оно было достигнуто за $\tau = 30000$ сек.

Результаты теста № 2 представлены на рис. 8 и рис. 9.

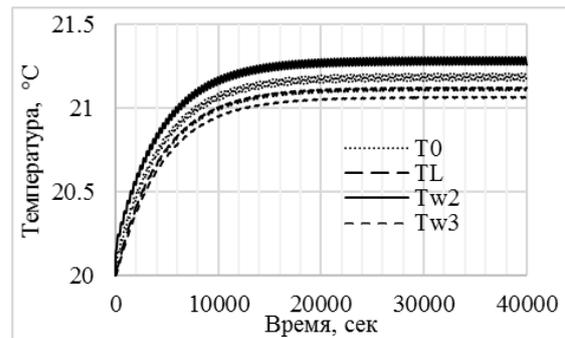


Рис. 8. График зависимости тепловых потоков от времени (Q_{w2}, Q_{loss}) в тесте № 2

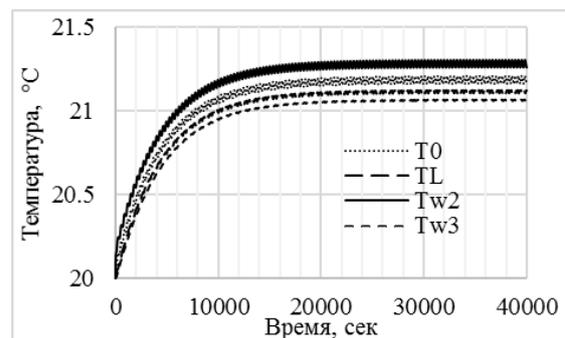


Рис. 9. График зависимости температур теплоносителя и тепловых узлов от времени в тесте № 2

При этом температура пара $T_0 = 21.19^\circ\text{C}$, а температура жидкости $T_L = 21.12^\circ\text{C}$.

Как видим, квазистационарные состояния в обоих тестах идентичны.

7. Оценка величины коэффициента конвективного теплопереноса «к»

При расчете теплопереноса внутри жидкости эффективная теплопроводность λ_{ef} определяется с учетом коэффициента конвективного теплопереноса k :

$$\lambda_{ef} = k \cdot \lambda_L,$$

где λ_L – коэффициент молекулярной теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

Коэффициент конвективного теплопереноса «к» – эмпирическая величина и зависит от конкретной конструкции ТГА. Определить «к» на основе наземных экспериментов не представляется возможным. На земле основной вклад в теплоперенос вносит гравитационная конвекция. В невесомости – термокапиллярная конвекция, струи поступающей/выходящей жидкости, микрогравитационные возмущения.

Для оценки величины «к» в условиях отсутствия гравитации были обработаны результаты летного эксперимента по разогреву ТГА с моделью ЛЭУ-1М [3, 6]. В результате получены рекоменда-

ции по величине «k» для многотемпературной модели ТГА.

Сопоставление расчетов по многотемпературной и двухтемпературной модели показало, что в двухтемпературной модели ТГА можно использовать значение $k \approx 45$.

Выводы

Предлагаемая упрощенная математическая модель ТГА протестирована и верифицирована. По данным космического эксперимента внутри бака ТГА имеет место значительная термокапиллярная конвекция. На основе выполненного анализа для оценки вклада конвекции в теплоперенос рекомендуется использовать в математической модели ТГА значение $k=45$.

По сравнению с многотемпературной моделью, расчеты с помощью двухтемпературной модели производятся достаточно быстро и с приемлемой точностью. Этого достаточно для первичного анализа переходных процессов в ТГА.

Принятые обозначения

T	– температура, °C, K
m	– массовый расход, кг/сек
v	– удельный объем, м ³ /кг
M	– масса, кг
Q	– тепловой поток, Вт
u, h	– удельная внутренняя энергия и энтальпия, Дж/кг
P	– давление, Па
c _v , c _p	– удельная изохорная и изобарная теплоемкости, Дж/кг/К
τ	– время, сек
C	– полная теплоемкость, Дж/К
F	– площадь, м ²
x	– координата, м
α	– изобарный коэффициент объемного расширения, 1/К
β	– изотермический коэффициент объемного расширения, 1/Па
λ	– коэффициент теплопроводности, Вт/м/К

Индексы

HCA	– гидроаккумулятор с тепловым регулированием
in	– входящий
sat	– насыщение
v, 0	– паровая фаза, «0» контрольный объем
L, 1	– жидкая фаза
w	– стенка (тепловой узел)
'	– насыщенная жидкость

"	– насыщенный пар
loss	– потери
HCA	– гидроаккумулятор с тепловым регулированием
in	– входящий
sat	– насыщение
v, 0	– паровая фаза, «0» контрольный объем
L, 1	– жидкая фаза
w	– стенка (тепловой узел)
'	– насыщенная жидкость
"	– насыщенный пар
loss	– потери

Литература

1. Никонов, А. А. Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов [Текст] / А. А. Никонов, Г. А. Горбенко, В. Н. Блинков // *Ракетно-космическая техника, машиностроение*. – М. : ЦНТИ «Поиск», 1991. – 302 с.
2. Басов, А. А. Двухфазный контур системы обеспечения теплового режима научно-энергетического модуля. Численное моделирование гидравлических характеристик [Текст] / А. А. Басов, М. А. Лексин, Ю. М. Прохоров // *Космическая техника и технологии*. – М. : РКК «Энергия», 2017. – № 2 (17). – С. 80-89.
3. Семенцов, А. Н. Моделирование двухфазного контура теплопереноса централизованной системы теплоотвода российского сегмента международной космической станции в условиях космического полета [Текст] : дис. канд. техн. наук / Семенцов А. Н. – Москва, 2003. – 168 с.
4. Ellis, Michael C. Development Of A Pumped Two-phase System for Spacecraft Thermal Control [Text] / Michael C. Ellis, Richard C. Kurwitz // *46th International Conference on Environmental Systems : материалы Междунар. семинара, 10-14 июля 2016 г.* – Вена, Австрия. – 16 с.
5. Пат. 2117891. Российская Федерация. Устройство для поддержания давления в теплоносителе в контуре системы терморегулирования космического аппарата. [Текст] / Гончаров Б. А., Латышев И. Н., Прохоров Ю. М., Сарычев Л. Н., Семенцов А. Н., Федотов В. К., Цихоцкий В. М., Горбенко Г. А. ; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; приоритет от 12.08.1997. – 17 с.
6. Епифанов, К. С. Идентификация модели теплового гидроаккумулятора контура теплопереноса Российского сегмента Международной космической станции «Альфа» [Текст] / К. С. Епифанов, А. Н. Семенцов / *Авиационно-космическая техника и технология*. – X., 1999. – Вып. 9. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 527-533.
7. *Mathematical Model of Heat Controlled Accumulator (HCA) for Microgravity Conditions [Текст]*

/ Г. А. Горбенко, П. С. Коваль, К. С. Єпіфанов и др. // *SAE International Journal Aerospace*. – 2020. – Т. 13, Вып. 1. – 19 с.

8. Nigmatulin, R. I. *Dynamics of Multiphase Media [Text] / R. I. Nigmatulin*. – Hemisphere, N.Y., 1990. – Vol. 1, 2. – 878 p.

References

1. Nikonov, A. A., Gorbenko, G. A., Blinkov, V. N. *TeplООbmennye kontury s dvukhfaznym teplonositelem dlya sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov* [Heat-exchange loops with a two-phase coolant for spacecraft thermal control systems]. *Raketonkosmicheskaya tekhnika, mashinostroenie*, Moscow, TsNTI «Poisk» Publ., 1991. 302 p.

2. Basov, A. A., Leksin, M. A., Prokhorov, Yu. M. *Dvukhfaznyy kontur sistemy obespecheniya teplovogo rezhima nauchno-energeticheskogo modulya. Chislennoye modelirovaniye gidravlicheskikh kharakteristik* [A two-phase loop of thermal control system of science-power module. numerical simulation of hydraulic characteristics]. *Space technique and technology*, Moscow, RSC Energia Publ., 2017, no. 2 (17), pp. 80-89.

3. Semencov, A. N. *Modelirovanie dvukhfaznogo kontura teploperenosa tsentralizovannoy sistemy teplootvoda rossiyskogo segmenta mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii v usloviyah kosmicheskogo poleta*. Diss. dokt. tehn. nauk [Simulation of two-phase

heat transfer loop of a centralized heat removal system Doc. Diss.]. Moscow, 2003. 168 p.

4. Ellis, Michael C., Kurwitz, Richard C. Development of a Pumped Two-phase System for Spacecraft Thermal Control. *46th International Conference on Environmental Systems*, 10-14 July 2016, Vena, Austria. 16 p.

5. Goncharov, B. A., Latyshev, I. N., Prokhorov, Yu. M., Sarychev, L. N., Sementsov, A. N., Fedotov, V. K., Tsikhotskii, V. M., Gorbenko, G. A. *Ustroistvo dlya podderzhaniya davleniya v teplonositele v konture sistemy termoregulirovaniya kosmicheskogo apparata* [Device for maintaining pressure in the loop coolant of thermal control system of space vehicle]. Patent RF, no. 2117891, 1998. 17 p.

6. Epifanov, K. S., Semencov, A. N. Identifikatsiya modeli teplovogo gidroakkumulyatora kontura teploperenosa Rossiyskogo segmenta Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii «Alfa» [Identification of the model of heat controlled accumulator of the heat transfer loop of the Russian segment of the International Space Station "Alpha"]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologiya – Aerospace technic and technology*, 1999, vol. 9, pp. 527-533

7. Gorbenko, G. O., Koval, P. S., Epifanov, K. S., Gakal, P. G., Turna, R. Y. Mathematical model of heat-controlled accumulator (HCA) for microgravity condition. *SAE international journal Aerospace*, 2020, vol. 13, iss. 1. 19 p.

8. Nigmatulin, R. I. *Dynamics of Multiphase Media*, Hemisphere, N.Y., 1990, vol. 1,2. 878 p.

Поступила в редакцию 20.04.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

ДВОХТЕМПЕРАТУРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІДРОАКУМУЛЯТОРА З ТЕПЛОВИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ДЛЯ УМОВ НЕВАГОМОСТІ

П. С. Коваль, К. С. Єпіфанов, Р. Ю. Турна

На космічних апаратах з великим виділенням тепла в системах терморегулювання (СТР) доцільно використовувати двофазні контури теплопереносу (ДФК). ДФК має великі переваги в порівнянні з однофазними контурами теплопереносу. У таких контурах тепло акумулюється і переноситься у вигляді прихованої теплоти пароутворення. ДФК можуть переносити значно більшу кількість теплоти на одиницю масової витрати, температуру об'єктів можна підтримувати практично постійною на всій ділянці теплопідводу і наближеної до температури насичення. Крім того, всі процеси теплопередачі, що протікають при кипінні більш інтенсивні, ніж при звичайному конвективному теплообміні. Тому маса, габарити СТР на базі ДФК будуть менше, ніж на базі однофазного контурів. Гідроаккумулятор з тепловим регулюванням (ТГА) є найважливішим елементом ДФК. У статті пропонується спрощена двохтемпературна математична модель для опису нерівноважних тепло-масообмінних процесів в ТГА в умовах невагомості. Математична модель ТГА формується за допомогою методу ідеалізованих елементів. Авторами детально наведені рівняння збереження енергії для контрольних об'ємів і теплових вузлів, рівняння збереження маси, рівняння для теплових потоків і потів маси. Модель дозволяє швидко провести розрахунок і проаналізувати прийнятний результат для попередніх оцінок. Раніше авторами була опублікована робота, де описується детальна багатотемпературна модель, яка дозволяє оцінити нерівноважність в рідкій фазі. Детальна модель дозволяє розрахувати практично будь-який процес в ТГА з досить високою точністю, але програма при цьому досить об'ємна і розрахунок займає багато часу. Тому за рекомендацією розробників програмного комплексу AMESim автори сформували спрощену двохтемпературну нерівноважну модель ТГА. Модель реалізована в програмному середовищі Fortran і протестована на встановлення кваліфікаційного режиму і перевірена на дотримання теплового балансу. На основі даних космічного експерименту з розігріву ТГА з аміаком виконана оцінка передбачуваної величини конвективної складової теплопереносу в умовах невагомості. Важливо, що дана

концепція і модель можуть бути уточнені виходячи з реальної конструкції гідроаккумулятора. Наприклад, рівняння можуть бути записані для циліндричного ТГА, розміщення нагрівача на поверхні корпусу або в центрі і т.д.

Ключові слова: космічний апарат; невагомість; система терморегулювання; двофазний контур теплопереносу; гідроаккумулятор з тепловим регулюванням; ТГА; аміак; нерівноважна двоштемпературна математична модель тепло-масообмінних процесів.

TWO-TEMPERATURE MATHEMATICAL MODEL OF HEAT CONTROLLED ACCUMULATOR WITH THERMAL REGULATION FOR ZERO GRAVITY CONDITIONS

P. Koval, K. Yepifanov, R. Turna

It is advisable to use two-phase heat transfer circuits (TPC) on spacecraft with high heat release in thermal control systems (TCS). TPC has many advantages over single-phase heat transfer loops. In such circuits, heat is accumulated and transferred in the form of latent heat of vaporization. TPC can transfer a much larger amount of heat per unit mass flow rate, the temperature of objects can be maintained almost constant throughout the heat supply area and close to the saturation temperature. Besides, all heat transfer processes occurring during boiling are more intense than with conventional convective heat transfer. Therefore, the mass and dimensions of the TCS based on the TPC will be less than based on single-phase circuits. The thermally regulated pressure accumulator (HCA) is the most important element of the TPC. The article proposes a simplified two-temperature mathematical model for describing nonequilibrium heat-mass transfer processes in HCA under zero gravity. The mathematical model of the HCA is formed using the method of idealized elements. The authors detail the energy conservation equations for control volumes and thermal units, mass conservation equations, equations for heat fluxes and mass flows. It allows you to quickly carry out the calculation and analyze an acceptable result for preliminary estimates. Previously, the authors published the work, which describes a detailed multi-temperature model that allows us to estimate the nonequilibrium in the liquid phase. A detailed model allows you to calculate almost any process in the HCA with fairly high accuracy, but the program is quite voluminous and the calculation takes a lot of time. Therefore, on the recommendation of the developers of the AMESim software package, the authors formed a simplified two-temperature nonequilibrium HCA model. The model is implemented in Fortran software and tested to establish a quasistationary regime and tested for thermal balance. Based on the data of a space experiment on heating HCA with ammonia, the estimated value of the convective component of heat transfer under zero gravity is estimated. This concept and model can be refined based on the actual design of the accumulator. For example, equations can be written for a cylindrical HCA, placing the heater on the surface of the housing or in the center, etc.

Keywords: spacecraft; zero gravity; thermal control system; two-phase heat transfer circuit; heat controlled accumulator; HCA; ammonia; nonequilibrium two-temperature mathematical model of heat and mass transfer processes.

Коваль Полина Сергеевна – аспирант каф. аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Епифанов Константин Сергеевич – канд. техн. наук, доцент каф. аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Турна Рустем Юсуфович – директор Центра Технической Физики (ЦТФ), Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Polina Koval – PhD student of Dep. of Aerospace Heat Engineering, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: polina.koval@ctph.com.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-7001-020X.

Kostiantyn Yepifanov – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dep. of Aerospace Heat Engineering, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: kostiantyn.iepifanov@ctph.com.ua, ORCID Author ID: 0000-0001-7623-0839.

Rustem Turna – Managing Director of Center of Technical Physics (CTPh), National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: rustem.turna@ctph.com.ua, ORCID Author ID: 0000-0001-5773-1400.