

П. С. КОВАЛЬ¹, Э. Р. РЕШИТОВ¹, Р. Ю. ТУРНА^{1,2}¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Центр Технической Физики*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ГИДРОАККУМУЛЯТОРЕ С ТЕПЛОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ДЛЯ УСЛОВИЙ НЕВЕСОМОСТИ

В современном мире с увеличением мощности тепловыделений космических аппаратов возникла потребность в использовании эффективных систем теплоотвода с двухфазными контурами теплопереноса (ДФК). Их преимущества определяются тем, что ДФК могут переносить значительно большее количество теплоты на единицу расхода, чем при использовании однофазного теплоносителя. Энергопотребление насоса для прокачки теплоносителя незначительное, а использование теплообмена при кипении позволяет поддерживать температуру объектов практически на всей протяженности контура близкой к температуре насыщения. Все процессы теплопередачи, протекающие при изменении агрегатного состояния вещества (кипение, конденсация) происходят значительно интенсивней, чем при конвективном теплообмене в однофазной жидкости. Особенностью данной системы является изменение массы теплоносителя в контуре при изменении режимов работы двухфазной системы теплопереноса. Для регулирования количества теплоносителя в контуре, а также для поддержания заданного давления (температуры кипения) предназначен гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА). Реальные процессы теплообмена в ТГА протекают неравновесно, что усложняет расчет системы терморегулирования. В данной работе описана концепция неравновесной математической модели для расчета теплообменных процессов в ТГА. Показано, что неравновесность процессов можно учесть коэффициентом конвективного теплопереноса « k » в математической модели ТГА: $k = 1$ соответствует отсутствию конвекции; $k > 100$ соответствует близкому к равновесному процессу. На основе анализа летного космического эксперимента по разогреву ТГА сделан прогноз величины коэффициента конвективного теплопереноса k в условиях невесомости. Для оценки влияния величины « k » на процесс регулирования двухфазного контура теплопереноса в условиях невесомости рекомендуется использовать значения $k = 30 \pm 15$. В наземных экспериментах при высокой интенсивности конвекции в ТГА процессы существенно более равновесные, чем в невесомости. Сделан вывод, что равновесный процесс (высокие значения k) можно рассматривать как более консервативный по отношению к процессу регулирования в невесомости.

Ключевые слова: гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА); математическая модель; неравновесность; коэффициент конвективного теплопереноса.

Введение

В связи с ростом тепловыделений на борту космических аппаратов стоит задача разработки систем терморегулирования (СТР) на основе двухфазных контуров теплопереноса (ДФК) [1, 2].

Одним из ключевых элементов ДФК является гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА) [3]. ТГА позволяет достаточно просто управлять давлением в ДФК, температурой кипения теплоносителя или кавитационным запасом на входе в насос.

В 90-х годах ракетно-космическая корпорация (РКК) «Энергия» разработала проект центральной системы теплоотвода (ЦСТО) для российского сегмента Международной космической станции (МКС). В 1999 году модель ДФК ЛЭУ-1М была ис-

пытана на борту корабля «Прогресс» в составе космической станции «Мир» [4]. В этих работах принимал участие Центр технической физики (ЦТФ) Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

Реальные процессы теплообмена в ТГА протекают неравновесно, что усложняет расчет системы терморегулирования ДФК. ЦТФ разработал математическую модель, описывающую неравновесные теплообменные процессы в ТГА в условиях невесомости [5]. Математическая модель в последние годы была существенно доработана и верифицирована с использованием экспериментальных данных летного эксперимента на ЛЭУ-1М [4].

1. Постановка задачи

Целями данной работы являются:

- определение критерия адекватности величины конвективной составляющей теплопереноса;
- прогнозирование величины коэффициента конвективного теплопереноса k на основе анализа экспериментальных данных на летной установке ЛЭУ-1М;
- анализ переходного процесса в ДФК и определение консервативного значения k .

2. Концепция математической модели

Математическая модель ТГА разработана на основе метода идеализированных элементов. Согласно этому подходу конструкция ТГА и теплоноситель в нем разбивается на ряд элементов (контрольных объемов), характеризующихся единственным набором параметров состояния. Паровая фаза описывалась одним контрольным элементом с температурой T_0 , которая совпадала с температурой насыщения T_s , определенной по давлению в ТГА $P_{НСА}$.

Теплоперенос между контрольными объемами в жидком теплоносителе в общем случае осуществляется теплопроводностью и конвекцией. Конвективная составляющая учитывается множителем k при коэффициенте молекулярной теплопроводности λ_L

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

где λ_L – коэффициент молекулярной теплопроводности, Вт/(м*К)

Коэффициент конвективного теплопереноса k является эмпирической величиной и зависит от конкретной конструкции ТГА. Определить k на основе наземных экспериментов невозможно. На земле в теплоперенос основной вклад вносит гравитационная конвекция. В невесомости – термокапиллярная конвекция, струи поступающей/удаляемой жидкости, микрогравитационные возмущения.

Для обоснования величины k в условиях невесомости были обработаны результаты космического эксперимента с моделью ЛЭУ-1М по разогреву ТГА при его постоянной заправке теплоносителем (аммиаком).

3. Критерий адекватности величины k

На рис.1 приведены результаты измерения давления и температуры цилиндрического корпуса ТГА в летном эксперименте. Наблюдаемая разница между температурой насыщения (T_s) и температурой внешнего цилиндрического корпуса ТГА (T_{w3}) не превышала 0,5 К, что практически соответствует погрешности измерения. Это свидетельствует о близости к равновесному процессу разогрева в эксперименте.

Видно, что при $k = 1$ (конвекция отсутствует) расчетные температуры пара и корпуса сильно разнятся и не совпадают с экспериментом.

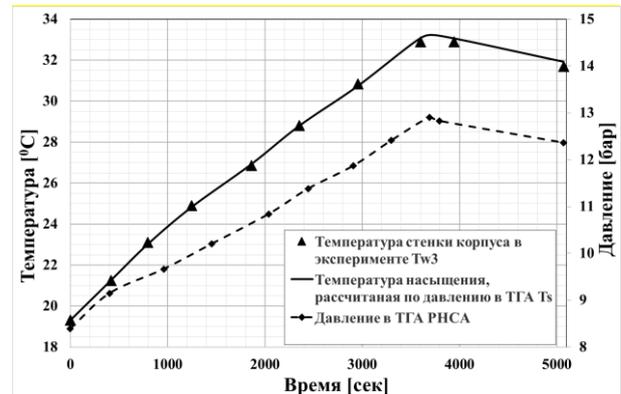


Рис. 1. Результаты летного эксперимента [4]

Эксперимент был обработан с использованием неравновесной математической модели авторов при различных значениях « k » (рис. 2, а, б). Исходные данные здесь и далее соответствуют условиям летного эксперимента. Результаты расчета оказались весьма чувствительны к величине коэффициента « k ».

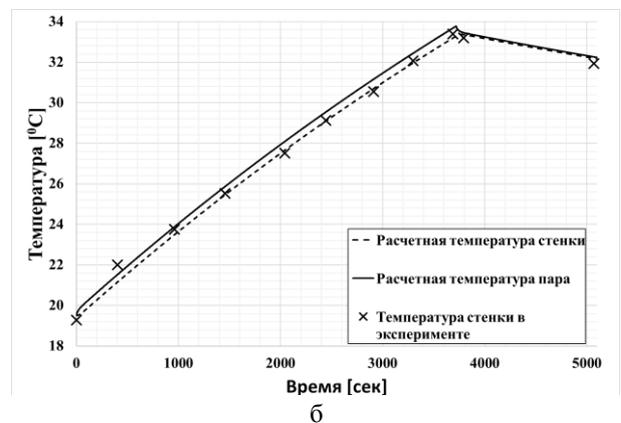
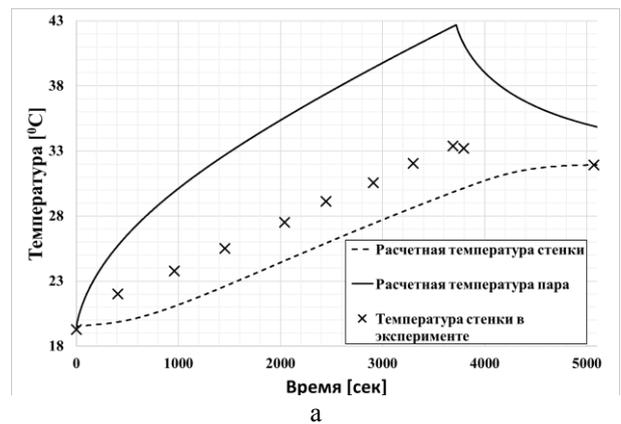


Рис. 2. Расчетное изменение температур в ТГА в зависимости от времени при значениях $k = 1$ (а) и $k = 30$ (б)

При $k = 30$ расчетный процесс разогрева приближается к экспериментальному. Дальнейший анализ консервативности величины k выполнен при значениях $k = 1, 15, 30, 45$ и 100 . Значение $k = 1$ соответствует отсутствию конвективного теплопереноса. Значение $k = 100$ соответствует близкому к равновесному процессу разогрева ТГА.

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчета. В качестве критерия адекватности величины k эксперименту принято условие, что расчетная максимальная разность температур между паром и корпусом ТГА должна находиться в диапазоне $\Delta T_{\max} \approx 0,5 \dots 1,0$ К ($\Delta T = T_0 - T_{w3}$).

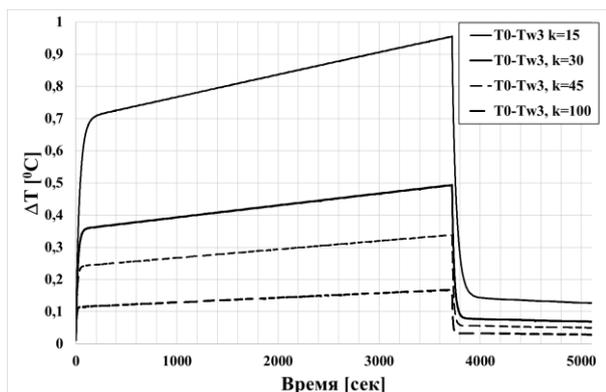


Рис. 3. Расчетный график зависимости $\Delta T = T_0 - T_{w3}$ от времени в летном эксперименте для различных k

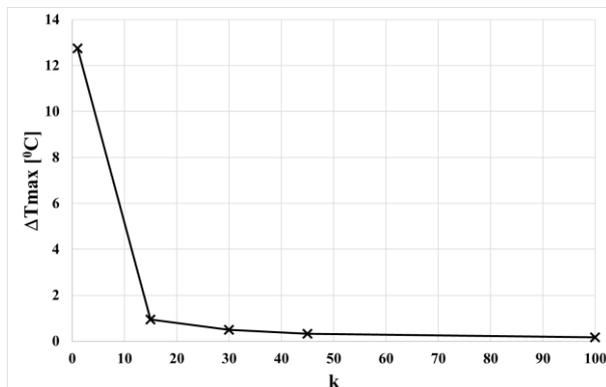


Рис. 4. График зависимости ΔT_{\max} от величины k

Из рис. 1 видно, что максимальная разница температур ΔT имеет место в момент отключения нагревателя на ≈ 3720 секунде. Обозначим эту величину ΔT_{\max} и используем ее в качестве критерия адекватности.

На основе вариантных расчетов из этого условия определено значение коэффициента конвективного теплопереноса $k = 30$, при котором математическая модель хорошо описывает летный эксперимент. В силу того, что эксперимент оказался близким к равновесному, определить точно экспериментальное значение « k » из него невозможно. Мы лишь можем утверждать, что в летном эксперименте ин-

тенсивность конвекции была высокой, интенсивность конвективного теплопереноса была не ниже $k = 30$. Реально интенсивность конвективного теплопереноса возможно была существенно выше. С этой точки зрения рекомендованное значение $k = 30$ уже является консервативным.

График зависимости ΔT_{\max} от k представлен на рис. 4. Видно, что уменьшение k от 100 до 15 приводит к увеличению ΔT_{\max} с $0,17$ К до $1,0$ К. Видно, что критерию $\Delta T_{\max} \approx 1,0$ К соответствует значение $k = 15$. Поэтому для более консервативных оценок можно использовать значение $k = 15$.

4. Анализ переходного процесса в ДФК при различных значениях k

Неравновесность теплообменных процессов в ТГА проявляется во время заполнения/опорожнения ТГА, включения/выключения нагревателя и влияет на процесс регулирования ДФК.

Выполнены расчеты характерного гипотетического процесса заполнения и опорожнения ТГА. Конструкция ТГА принята аналогичной использованной в летном эксперименте в установке ЛЭУ-1М. Объем ТГА ~ 7 литров. Мощность нагревателя принята 205 Вт. Теплоноситель - аммиак. Целью расчетов было определение влияния неравновесности (величины « k ») на процесс регулирования.

Исходные данные для расчетов включают графики изменения массы теплоносителя в ТГА и температуры жидкости на входе в насос ДФК T_{pump} (на выходе из конденсатора ДФК) (рис. 5, а, б). Эти графики определяются только сценариями работы ДФК: изменением тепловой нагрузки и условий тепловода на орбите. Они могут быть получены расчетным или экспериментальным путем при наземных испытаниях ДФК.

В приведенном сценарии переходного процесса можно выделить три характерных периода:

- период «а». Быстрое заполнение ТГА жидкостью. Этот период характерен для запуска ДФК из однофазного в двухфазный режим;
- период «б». Медленное увеличение температуры жидкости на входе в насос (на выходе из конденсатора ДФК). Период характерен для увеличения нагрузки в ДФК, работающем на двухфазном режиме;
- период «с». Опорожнение ТГА в связи с выключением нагрузки в ДФК. Переход из двухфазного в однофазный режим.

В расчетах принят следующий закон регулирования:

– если «измеряемый» по температурам кавитационный запас ($T_{w3} - T_{\text{pump}}$) < 10 , то нагреватель включен; ($T_{w3} - T_{\text{pump}}$) > 10 – нагреватель выключен;
– если $T_{w3} < 30$ – нагреватель включен, $T_{w3} > 30$ – нагреватель выключен.

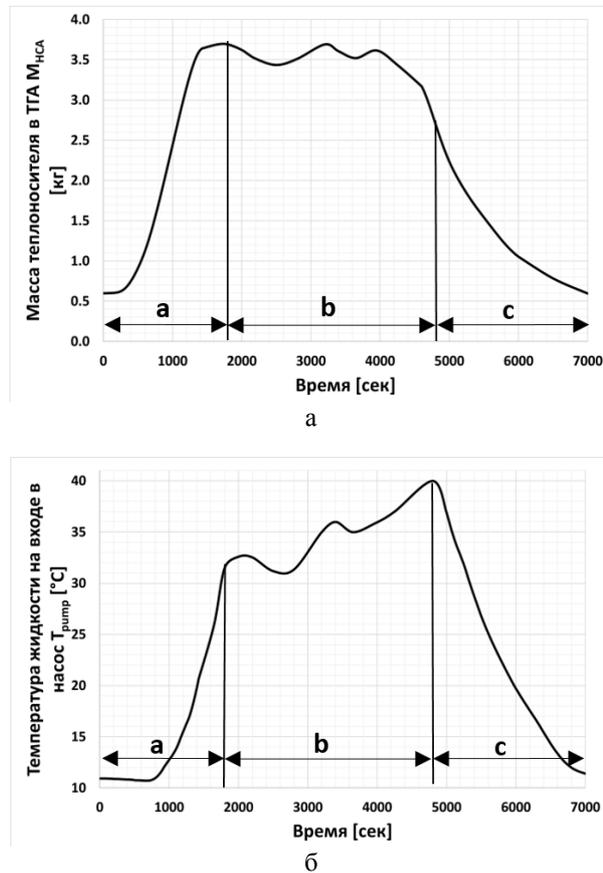


Рис. 5. Исходные данные для расчета переходного процесса в ТГА: а – изменение массы теплоносителя в ТГА во времени; б – изменение температуры жидкости на входе в насос Трпмп

Таким образом, регулирование осуществлялось по температуре цилиндрического корпуса ТГА T_{w3} . Поэтому «истинный» кавитационный запас ($T_0 - T_{\text{pump}}$) отличался от «кажущегося, измеряемого» ($T_{w3} - T_{\text{pump}}$) тем больше, чем выше была неравновесность процесса. Результаты расчетов приведены на графиках рис. 6.

Разница между температурой пара T_0 и внешней стенки T_{w3} , между «измеренным» ($T_{w3} - T_{\text{pump}}$) и «истинным» ($T_0 - T_{\text{pump}}$) кавитационным запасом существенно зависят от величины «к». На этих же рисунках приведена гистограмма включения нагревателя ТГА.

В процессе быстрого заполнения ТГА холодной жидкостью (период «а») нагреватель не справляется с поддержанием необходимого кавитационного запаса (~ 10 К). Наибольшее снижение «истинного» кавитационного запаса имеет место при близ-

ком к равновесному процессу ($k=100$). Измеренный кавитационный запас также приближается к нулю. Имеется опасность кавитации насоса.

В случае неравновесного процесса ($k=30$) «истинный» кавитационный запас существенно выше «измеренного». Опасности кавитации насоса в этом случае нет.

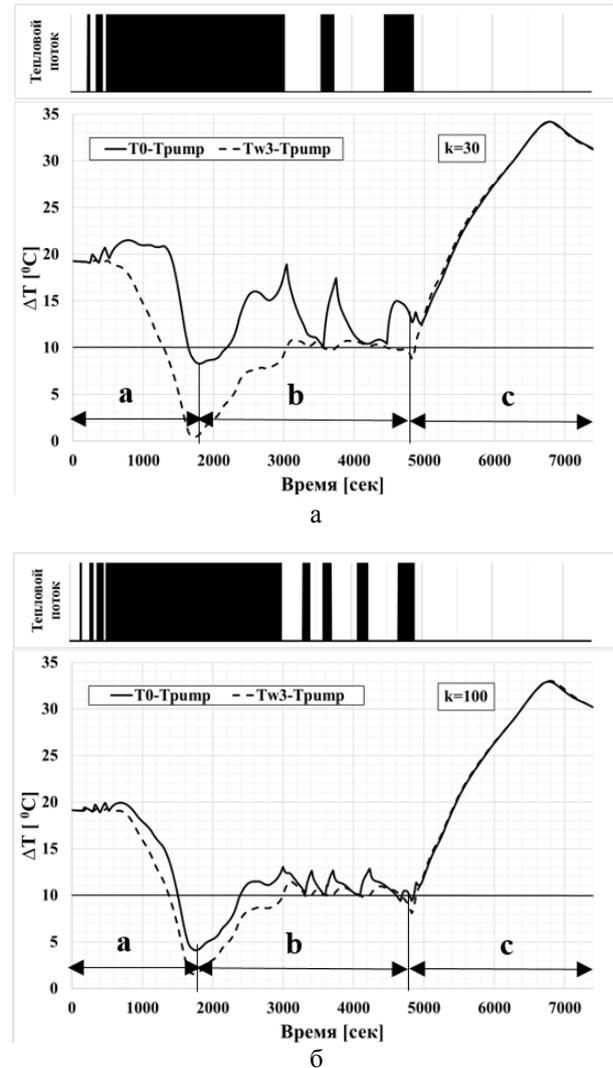


Рис. 6. Изменение «истинного» ($T_0 - T_{\text{pump}}$) и «измеренного» ($T_{w3} - T_{\text{pump}}$) кавитационного запаса при $k=30$ (а) и $k=100$ (б)

Таким образом, равновесный процесс (высокие значения k) можно рассматривать как более консервативный по отношению к задаче регулирования в невесомости. В наземных экспериментах интенсивность конвекции в ТГА априори существенно выше, чем в невесомости, поэтому результаты наземных экспериментов являются более консервативными. Необходимая мощность нагревателя ТГА, определенная по результатам наземных испытаний ДФК будет заведомо достаточной для условий работы в невесомости.

Выводы

1. Реальные процессы теплопереноса в гидроаккумуляторе с тепловым регулированием (ТГА) в условиях невесомости носят неравновесный характер. Степень неравновесности можно учесть коэффициентом конвективного теплопереноса «к» в математической модели ТГА. $k = 1$ соответствует отсутствию конвекции; $k > 100$ соответствует близкому к равновесному процессу.

2. Для оценки влияния величины «к» на процесс регулирования двухфазного контура теплопереноса (ДФК) в условиях невесомости рекомендуется использовать значения $k = 30 \pm 15$. Эти данные получены на основе анализа результатов летного эксперимента по разогреву ТГА.

3. Равновесный процесс (высокие значения k) можно рассматривать как более консервативный по отношению к процессу регулирования в невесомости, т.к. он требует большей мощности нагревателя для поддержания заданного кавитационного запаса. В наземных экспериментах при высокой интенсивности конвекции в ТГА процессы существенно более равновесные, чем в невесомости. Необходимая мощность нагревателя ТГА, определенная по результатам наземных испытаний ДФК, будет заведомо достаточной для условий работы ДФК в невесомости.

Литература

1. 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 технология*. – М.: РКК Энергия. – 2017. – № 2 (17). – С. 80-89.

2. Анализ влияния объема гидроаккумулятора на работоспособность двухфазного контура теплопереноса системы терморегулирования космического аппарата [Текст] / П. Г. Гакал, Г. А. Горбенко, Э. Р. Решитов и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 8(152). – С. 24-29.

3. Пат. РФ 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., Семенов А. Н., Федотов В. К., Цихоцкий В. М., Горбенко Г. А.; заявитель и патентообладатель – ОАО РКК «Энергия»; приоритет от 12.08.1997.

4. Семенов, А. Н. Моделирование двухфазного контура теплопереноса централизованной системы

теплоотвода российского сегмента международной космической станции в условиях космического полета [Текст] : дис. ... канд. техн. наук. / А. Н. Семенов. – Москва, 2003. – 168 с.

5. Епифанов, К. С. Идентификация модели теплового гидроаккумулятора контура теплопереноса Российского сегмента Международной космической станции «Альфа» [Текст] / К. С. Епифанов, А. Н. Семенов // *Авиационно-космическая техника и технология*. Вып. 9. Тепловые двигатели и энергоустановки : сб. науч. трудов. – Харьков : Гос. Аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ун-т», 1999. – С. 527-533.

References

1. Basov, A. A., Leksin, M. A., Prokhorov, Yu. M. Dvukhfaznyy kontur sistemy obespecheniya teplovogo rezhima nauchno-energeticheskogo modulya. Chislennoye modelirovaniye gidravlicheskih 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.

2. Gakal, P. G., Gorbenko, G. O., Reshytov, E. R., Turna, R. Y. Analiz vliyaniya obyema gidroakkumulyatora na rabotosposobnost dvukhfaznogo kontura teploperenosa sistemy termoregulirovaniya kosmicheskogo apparata [The analysis of the heat control accumulator volume impact on the operability of two-phase heat transfer loop of a spacecraft thermal control system]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2018, no. 8 (152), pp. 24-29.

3. 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, № 2117891, 1998.

4. Semencov, A. N. *Modelirovanie dvukhfaznogo kontura teploperenosa tsentralizovannoy sistemy teplootvoda rossiyskogo segmenta mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii v usloviyah kosmicheskogo poleta*. Diss. kand. tehn. nauk [Simulation of two-phase heat transfer loop of a centralized heat removal system. Diss. PhD]. Moscow, 2003. 168 p.

5. 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-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, Release 9. *Heat engines and electric-power installation, Collection of Scientific Works*, Kharkov, State Aerospace University "Kharkiv Aviation University", 1999, pp. 527-533

Поступила в редакцию 23.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЕНТУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСУ В ГІДРОАКУМУЛЯТОРІ З ТЕПЛОВИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ДЛЯ УМОВ НЕВАГОМОСТІ

П. С. Коваль, Е. Р. Решитов, Р. Ю. Турна

У сучасному світі з збільшенням потужності тепловиділень космічних апаратів виникла потреба у використанні ефективних систем відводу тепла з двофазним контурами теплопереносу (ДФК). Їх переваги визначаються тим, що ДФК можуть переносити значно більшу кількість теплоти на одиницю витрати, ніж при використанні однофазного теплоносія. Енергоспоживання насоса для прокачування теплоносія незначне, а використання теплообміну при кипінні дозволяє підтримувати температуру об'єктів практично на всій протяжності контуру близької до температури насичення. Всі процеси теплопередачі, що протікають при зміні агрегатного стану речовини (кипіння, конденсація) відбуваються значно інтенсивніше, ніж при конвективному теплообміні в однофазній рідині. Особливістю даної системи є зміна маси теплоносія в контурі при зміні режимів роботи двофазної системи теплопереносу. Для регулювання кількості теплоносія в контурі, а також для підтримки заданого тиску (температури кипіння) призначений гідроакумулятор з тепловим регулюванням (ТГА). Реальні процеси тепломасообміну в ТГА протікають нерівноважної, що ускладнює розрахунок системи терморегулювання. У даній роботі описана концепція нерівноважної математичної моделі для розрахунку тепломасообмінних процесів в ТГА. Показано, що нерівноважність процесів можна врахувати коефіцієнтом конвективного теплопереносу « k » в математичній моделі ТГА: $k = 1$ відповідає відсутності конвекції; $k > 100$ відповідає близькому до рівноважного процесу. На основі аналізу льотного космічного експерименту з розігріву ТГА зроблений прогноз величини коефіцієнта конвективного теплопереносу k в умовах невагомості. Для оцінки впливу величини « k » на процес регулювання двофазного контура теплопереносу в умовах невагомості рекомендується використовувати значення $k = 30 \pm 15$. У наземних експериментах при високій інтенсивності конвекції в ТГА процеси істотно більш рівноважні, ніж в невагомості. Зроблено висновок, що рівноважний процес (високі значення k) можна розглядати як більш консервативний по відношенню до процесу регулювання в невагомості.

Ключові слова: гідроакумулятор з тепловим регулюванням (ТГА); математична модель; нерівноважність; коефіцієнт конвективного теплопереносу.

DETERMINATION OF THE CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN A HEAT CONTROLLED ACCUMULATOR FOR THE CONDITIONS OF WEIGHTLESS

P. S. Koval, E. R. Reshytov, R. Y. Turna

In the modern world with the increasing power of spacecraft heat dissipation, the need has arisen to use efficient heat removal systems with two-phase heat transfer contours. Their advantages are determined by the fact that they can carry a much larger amount of heat per unit of consumption than when using a single-phase coolant. The energy consumption of the pump for pumping the coolant is insignificant, and the use of heat exchange during boiling allows you to maintain the temperature of objects almost the entire length of the circuit close to the saturation temperature. All heat transfer processes occurring with a change in the state of aggregation of a substance (boiling, condensation) occur much more intensively than during convective heat exchange in a single-phase liquid. A feature of this system is the change in mass of the coolant in the circuit when changing the operating modes of the two-phase heat transfer system. To regulate the amount of coolant in the circuit, as well as to maintain a predetermined pressure (boiling point), a hydraulic accumulator with thermal regulation (HCA) is used. The actual processes of heat and mass transfer in HCA are non-equilibrium, which complicates the calculation of the thermal control system. This paper describes the concept of a nonequilibrium mathematical model for calculating heat and mass transfer processes in HCA. It is shown that the nonequilibrium of processes can be taken into account by the convective heat transfer coefficient “ k ” in the mathematical model of HCA: $k = 1$ corresponds to the absence of convection; $k > 100$ corresponds to an equilibrium process. Based on the analysis of the flight space experiment for heating HCA, a prediction was made of the value of the convective heat transfer coefficient k under zero-gravity conditions. To assess the influence of the “ k ” value on the process of regulating the two-phase heat transfer contour under weightless conditions, it is recommended to use the values $k = 30 \pm 15$. In ground-based experiments at high-intensity convection in HCA, processes are much more equilibrium than in zero gravity. It is concluded that the equilibrium process (high values of k) can be considered as more conservative concerning the regulatory process in weightlessness.

Keywords: heat controlled accumulator (HCA); mathematical model; disequilibrium; convective heat transfer coefficient.

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

Решитов Эдем Русланович – аспирант кафедры 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.

Koval Polina Sergeevna – 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.

Reshytov Edem Ruslanovich – PhD student of Dep. of Aerospace Heat Engineering, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: edem.reshitov@ctph.com.ua, ORCID Author ID: 0000-0001-5772-6302.

Turna Rustem Yusufovich – 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.