

## РАСЧЕТ ДОЗЫ ЗАПРАВКИ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ С ДВУХФАЗНЫМ КОНТУРОМ

Н.О. Борщев

www.moriarty93@mail.ru

ФИАН, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Предложена методика оценки необходимого количества теплоносителя, заправляемого в контурную тепловую трубу, и влияния этой дозы заправки на тепловое состояние контурной трубы. Методом Рунге — Кутты 4-го порядка точности решена система теплогидравлических уравнений, описывающих тепловое состояние конструкции при ступенчатом задании тепловой нагрузки на испарительный теплообменник. На основании этой модели количество жидкого теплоносителя, необходимого для заправки, выбирается так, что при вертикальном положении контурной тепловой трубы конденсатор и паровой канал оказываются затопленными. Показано, что недозаправка или перезаправка теплоносителя в контурную тепловую трубу слабо влияет на ее работоспособность, за исключением предельных случаев. Если запас жидкого теплоносителя в компенсационной полости небольшой, это может вызвать недостаточное поступление его к фитилю и нарушение нормальной работы контурной тепловой трубы. В случае, когда доза заправки теплоносителя оказывается большой, то компенсационная полость полностью затапливается. При увеличении тепловой нагрузки и рабочей температуры объемное расширение теплоносителя приводит к его перетеканию из компенсационной полости в конденсатор

### Ключевые слова

*Контурная тепловая труба, тепловой баланс, система терморегулирования, космический аппарат*

Поступила 24.01.2023

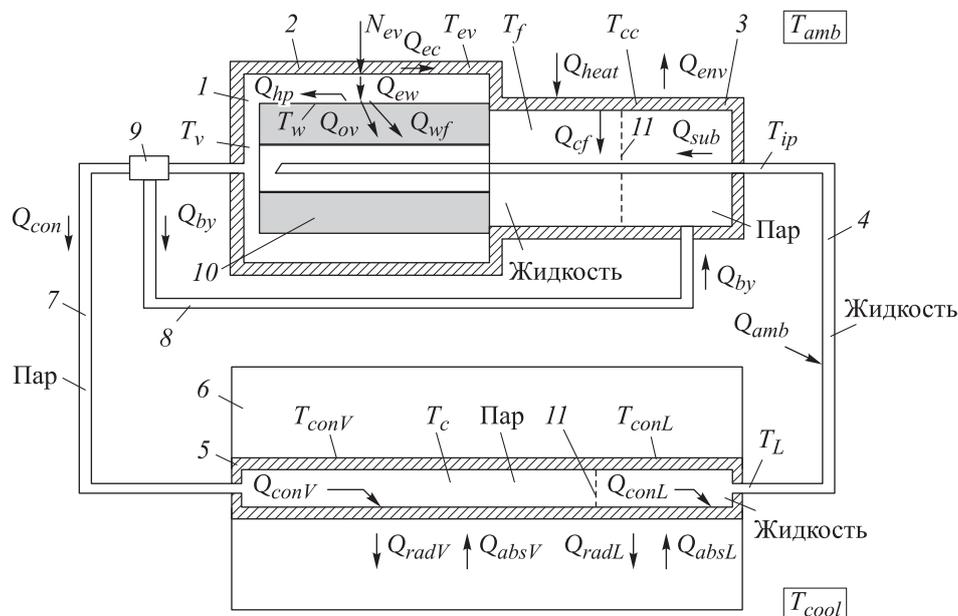
Принята 15.03.2023

© Автор(ы), 2023

---

**Введение.** При проектировании системы обеспечения теплового режима (СОТР) все чаще применяются контурные тепловые трубы (КТТ). Такие трубы позволяют отводить за счет теплового эффекта реакции большее количество теплоты от приборно-агрегатного оборудования космического аппарата, нежели КТТ, которые работают на однофазном теплоносителе. Актуальной задачей в настоящее время является оценка необходимой дозы заправки жидкого теплоносителя в КТТ, так как от этого зависит

тепловой режим всей системы обеспечения теплового режима. Для этого необходимо составить тепловую гидравлическую модель КТТ [1, 2]. Тепловая гидравлическая расчетная схема КТТ с клапаном-регулятором приведена на рис. 1 [1, 2].



**Рис. 1.** Тепловая гидравлическая расчетная схема КТТ с клапаном-регулятором:

- 1 — пароотводной канал; 2 — испаритель; 3 — корпус компенсационной полости;
- 4 — конденсатопровод; 5 — конденсатор; 6 — радиатор; 7 — паропровод;
- 8 — байпасная линия; 9 — клапан-регулятор; 10 — фитиль;
- 11 — граница раздела пар-жидкость

В соответствии с этой схемой теплота  $N_{ev}$  от приборов поступает на внешнюю поверхность корпуса испарителя, имеющего температуру  $T_{ev}$ . Одна часть теплоты  $Q_{ew}$  проходит сквозь стенку корпуса испарителя и попадает на наружную поверхность фитиля с температурой  $T_w$ . Другая часть теплоты  $Q_{ec}$  передается по корпусу испарителя на корпус компенсационной полости с температурой  $T_{cc}$ . Основная часть теплоты  $Q_{ew}$  расходуется на испарение жидкого теплоносителя и поступает с паром, имеющим температуру  $T_v$ , в пароотводные каналы 1 ( $Q_{hp}$ ). Часть теплоты  $Q_{wf}$  проходит сквозь капиллярную структуру фитиля и поступает в теплоноситель, находящийся в компенсационной полости. Учтено, что на нагрев встречного потока жидкого теплоносителя, поступающего к наружной поверхности фитиля под действием капиллярных сил, расходуется теплота  $Q_{ov}$ .

Корпус компенсационной полости получает теплоту  $Q_{ec}$  от корпуса испарителя, обменивается теплотой  $Q_{env}$  с окружающей средой и отдает часть теплоты  $Q_{cf}$  теплоносителя в компенсационную полость. На корпусе компенсационной полости установлен электронагреватель переменной мощности  $N_{heat}$ , предназначенный для регулирования температуры теплоносителя в компенсационной полости. Температура  $T_f$  жидкого теплоносителя в компенсационной полости зависит от количества теплоты  $Q_{cf}$ , поступающей от корпуса компенсационной полости в теплоноситель, количества теплоты  $Q_{wf}$  от внешней поверхности фитиля, а также от количества теплоты  $Q_{sub}$ , затраченной на подогрев от температуры  $T_{in}$  до  $T_f$  жидкого теплоносителя, выходящего из конденсатора. Жидкий теплоноситель, выходящий из конденсатора, подогревается от температуры  $T_L$  до  $T_{in}$  за счет теплообмена конденсатопровода с окружающей средой, имеющей температуру  $T_{amb}$ .

Выходящий из испарителя пар с температурой  $T_v$  поступает по паропроводу в конденсатор. В соответствии с уравнением Клайперона — Клаузиуса пар в конденсаторе имеет температуру  $T_c$ , которая ниже температуры  $T_v$ , за счет изменения давления при прохождении пара по паропроводу. Далее пар конденсируется, и жидкий теплоноситель поступает по конденсатопроводу в компенсационную полость. При конденсации пар отдает теплоту  $Q_{conV}$ , равную теплоте испарения  $Q_{hp}$ , трубке конденсатора, связанной с пластиной радиатора. Трубка конденсатора получает также внешнюю лучистую теплоту  $Q_{absV}$ , падающую на радиатор, и сбрасывает в космос теплоту  $Q_{radV}$ , приобретая температуру  $T_{conV}$ . Пройдя участок конденсации, жидкость охлаждается до температуры  $T_L$  на участке переохлаждения при контакте с трубкой конденсатора, имеющей на этом участке температуру  $T_{conL}$ . Эта температура зависит от количества теплоты  $Q_{conL}$ , поступившей от конденсата, количества внешней лучистой теплоты  $Q_{absL}$ , падающей на радиатор, и теплоты  $Q_{radL}$ , сброшенной в космос.

**Расчет дозы заправки в двухфазный контур.** Количество жидкого теплоносителя, необходимого для заправки, выбирается так, что при вертикальном положении КТТ конденсатор и паровой канал оказываются затопленными. При запуске происходит вытеснение теплоносителя из паропровода и конденсатора, а также заполнение центрального канала капиллярной структуры и компенсационной полости, которая играет роль

аккумулятора. Следовательно, при решении системы теплогидравлических уравнений [1, 2] необходимо выполнение первого и второго условий работоспособности [3–10]:

$$V_K + V_{пп} = V_{к.п} + V_{ц.к};$$

$$V_{ж} = V_{к.с} + V_{ж.к} + \varepsilon V_K \pm V_T,$$

где  $V_K$ ,  $V_{пп}$ ,  $V_{к.п}$ ,  $V_{ц.к}$ ,  $V_{ж}$ ,  $V_{к.с}$  и  $V_{ж.к}$  — объемы конденсатора, паропровода, компенсационной полости, центрального канала, жидкого теплоносителя, пор капиллярной структуры и конденсатопровода соответственно;  $\varepsilon$  — степень заполнения конденсатора при максимальной тепловой нагрузке;  $V_T$  — поправка на термическое расширение теплоносителя.

Масса полной заправки теплоносителя в КТТ

$$M_{ch} = M_{cc} + M_w + M_c + M_{vl} + M_{ll},$$

где  $M_{cc}$ ,  $M_w$ ,  $M_c$ ,  $M_{vl}$ ,  $M_{ll}$  — массы теплоносителя в компенсационной полости, фитиле испарителя, конденсаторе, паропроводе, конденсатопроводе.

Масса теплоносителя в компенсационной полости [11–22]

$$M_{cc} = \rho_l V_{l,cc} + \rho_v V_{v,cc},$$

где  $\rho_l$ ,  $\rho_v$  — плотность жидкой и паровой фаз;

$$V_{l,cc} = \frac{M_{cc} - \rho_v V_{cc}}{\rho_l - \rho_v}; \quad V_{v,cc} = \frac{\rho_l V_{cc} - M_{cc}}{\rho_l - \rho_v}$$

— объемы жидкой и паровой фаз в компенсационной полости. Тогда объемное паросодержание в компенсационной полости можно рассчитать по формуле

$$\alpha_{cc} = \frac{V_{v,cc}}{V_{cc}},$$

где  $V_{cc}$  — объем компенсационной полости.

Для обеспечения такого частичного заполнения при переходе тепловой трубы в стационарный режим работы необходимо соблюсти определенное соотношение между объемами ряда конструктивных элементов, что позволит сформулировать третье условие работоспособности КТТ. Необходимо, чтобы при запуске КТТ выталкиваемая из парового канала жидкость частично заполнила конденсатор и компенсационную полость. Это возможно при выполнении соотношения

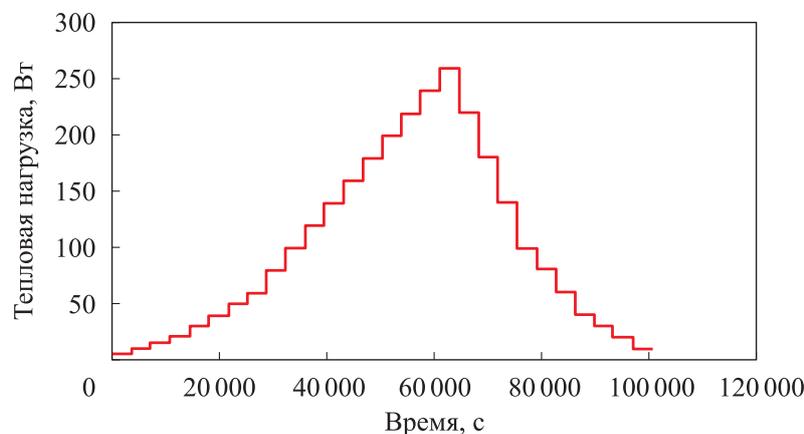
$$V_{vl} + V_c \approx V_{cc},$$

где  $V_{vl}$ ,  $V_c$  — внутренние объемы паропровода и конденсатора.

Наличие паровой фазы в компенсационной полости очень важно для нормальной работы КТТ. В соответствии с уравнениями, когда запас рабочей жидкости в компенсационной полости довольно небольшой, объемное паросодержание в компенсационной полости становится очень большим, что может вызвать недостаточное поступление жидкости к фитилю и нарушение нормальной работы КТТ. Чтобы гарантированно обеспечить нормальную работу КТТ, объемное паросодержание в компенсационной полости должно быть не менее 0,5. Когда количество заправляемой рабочей жидкости оказывается большим, объемное паросодержание в компенсационной полости может достигать нуля, т. е. она полностью затапливается жидкостью.

Масса теплоносителя в фитиле испарителя определяется как  $M_w = \rho_l \varepsilon_w V_w$  ( $V_w$ ,  $\varepsilon_w$  — объем и пористость фитиля); в конденсаторе — как  $M_c = \rho_l V_c$ ; в паропроводе — как  $M_{vl} = \rho_v V_{vl}$ ; в конденсаторопроводе — как  $M_{ll} = \rho_l V_{ll}$ .

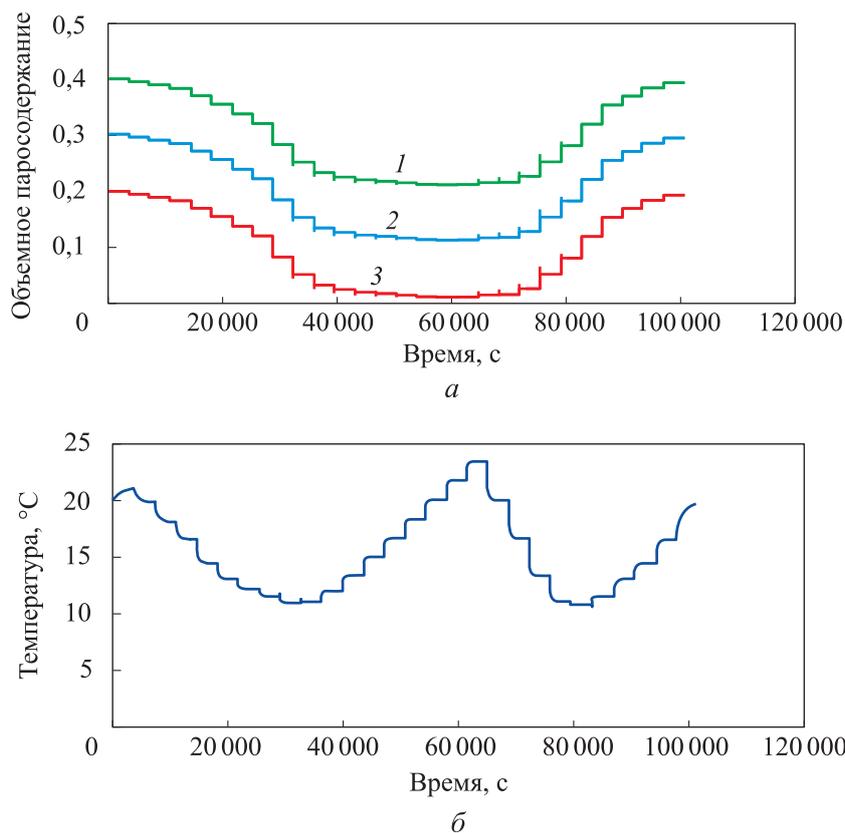
Зависимость тепловой нагрузки, передающейся от приборно-агрегатного оборудования на испаритель, от времени приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость тепловой нагрузки, передающейся от приборно-агрегатного оборудования на испаритель, от времени

Как отмечено ранее, объемное паросодержание в компенсационной полости должно быть не менее 0,5. Проведены расчеты температуры испарителя при различных начальных значениях объемного паросодержания в компенсационной полости, т. е. фактически компенсационная по-

лость была перезаправлена жидким теплоносителем. Зависимость объемного паросодержания в компенсационной полости при разных значениях заправки контура  $X_0 = 0,4, 0,3$  и  $0,2$  и температуры испарителя от времени приведены на рис. 3. Охлаждение конденсатора происходит с помощью конвективного теплообменника с нулевой температурой охлаждающей жидкости, регулирование отсутствует.



**Рис. 3.** Зависимости объемного паросодержания в компенсационной полости при значениях заправки контура  $X_0 = 0,4$  (1),  $0,3$  (2) и  $0,2$  (3) (а) и температуры испарителя (б) от времени

Температура испарителя практически не зависит от объема пара в компенсационной полости или от перезаправки ее теплоносителем. То же можно утверждать и о недозаправке. Основное правило надежного функционирования КТТ — наличие в компенсационной полости паровой и жидкой фаз. Лучше всего заправлять КТТ так, чтобы перед началом эксплуатации объем пара в компенсационной полости был равен объему жидкости.

В условиях наземной тепловакуумной отработки систем терморегулирования с двухфазным контуром существенное влияние оказывают гравитационные силы, поэтому при испытаниях испаритель и конденсатор КТТ располагают на одном горизонтальном уровне. При заправке КТТ как для проведения испытаний в условиях наземной вакуумной экспериментальной отработки, так и для работы в условиях невесомости теплоноситель должен занимать 0,5–0,6 объема компенсационной полости.

**Выводы.** Расчет дозы заправки теплоносителя в КТТ показал, что недозаправка или перезаправка жидкости в КТТ слабо влияет на ее работоспособность, за исключением предельных случаев. Если запас жидкого теплоносителя в компенсационной полости небольшой, это может вызвать недостаточное поступление его к фитилю и нарушение нормальной работы КТТ. При большей заправке теплоносителя компенсационная полость полностью затапливается. При увеличении тепловой нагрузки и рабочей температуры объемное расширение теплоносителя в компенсационной полости приводит к перетеканию его в конденсатор, при этом длина двухфазной зоны в конденсаторе уменьшается, соответственно увеличивается температура испарителя КТТ и посадочных мест аппаратуры. Чтобы гарантированно обеспечить нормальную работу КТТ, объемное паросодержание в компенсационной полости при заправке контура должно составлять 0,5–0,6.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вершинин С.В., Майданик Ю.Ф. Гибкие миниатюрные контурные тепловые трубы. *Тепловые процессы в технике*, 2012, т. 4, № 12, с. 559–565.
- [2] Борщев Н.О., Антонов В.А. Теплогидравлическая модель двухфазного контура с компенсационной полостью. *Тепловые процессы в технике*, 2022, т. 14, № 4, с. 167–177. DOI: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-4-167-177>
- [3] Zalmanovich S., Goncharov K. Radiators with LHP. *Int. Conf. Heat Pipes for Space Application*. Moscow, 2009, pp. 17–21.
- [4] Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Л., Химия, 1982.
- [5] Копятеквич Р.М., Гуля В.М., Тулин Д.В. и др. Тепловое проектирование и пофрагментная наземная отработка системы обеспечения теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения на базе сотопанелей с тепловыми трубами. *Космонавтика и ракетостроение*, 2010, № 3, с. 33–41.
- [6] Панин Ю.В., Антонов В.А., Балыкин М.А. К вопросу проектирования и эксплуатации КТТ в составе СТР посадочных модулей межпланетных станций для исследования тел Солнечной системы. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2021, № 4, с. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.26162/LS.2021.54.4.005>

- [7] Гакал П.Г., Рузайкин В.И., Турна Р.Ю. и др. Экспериментальный стенд для исследования теплогидравлических процессов в системе терморегулирования телекоммуникационного спутника. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2011, № 5, с. 21–30.
- [8] Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., Машиностроение, 1992.
- [9] Белов А.Е., Великанов А.А., Ильмов Д.Н. и др. Расчетно-экспериментальное исследование работы контурной тепловой трубы в стационарном режиме. *Теплоэнергетика*, 2022, № 3, с. 50–62. DOI: <https://doi.org/10.1134/S004036362203002X>
- [10] Афанасьев В.Н., Недайвозов А.В. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик контурной тепловой трубы с открытой компенсационной полостью. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2016, № 11, с. 38–54. URL: <http://engineering-science.ru/doc/849572.html>
- [11] Майданик Ю.Ф., Пастухов В.Г., Иванов А.В. Исследование работы контурной тепловой трубы с несколькими источниками тепла различной мощности. *Решетневские чтения*, 2017, т. 1, с. 145–146.
- [12] Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В., Пастухов В.Г. Охлаждающая панель с контурными тепловыми трубами для неравномерно распределенных источников тепла. *Решетневские чтения*, 2015, т. 1, с. 206–208.
- [13] Майданик Ю.Ф., Пастухов В.Г., Вершинин С.В. Разработка и применение миниатюрных контурных тепловых труб. *Решетневские чтения*, 2014, т. 1, с. 90–91.
- [14] Ван Юй, Денисов О.В., Денисова Л.В. Моделирование охлаждения процессора в наноспутнике с помощью контурных тепловых труб. *Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Инженерные исследования*, 2019, т. 20, № 3, с. 211–219. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219>
- [15] Maidanik Yu.F., Fershtater Yu.G. Theoretical basis and classification of loop heat pipes and circuits with capillary pumping. *10th Int. Conf. on Heat Pipes*. Stuttgart, Germany, 1997.
- [16] Kotlyarov E.Y., Serov G.P. Methods for improving the reliability of evaporators for contour heat pipes and circuits with capillary pumping. *24th Int. Conf. on Environmental Systems, Society of Automotive Engineers*, 1994, report 941578.
- [17] Борщев Н.О., Сорокин А.Е., Белявский А.Е. Разработка тепловой математической модели контурной тепловой трубы с тепловым гидроаккумулятором. *СТИН*, 2019, № 9, с. 37–40.
- [18] Минаков А.В., Гузей Д.В., Жигарев В.А. Турбулентная вынужденная конвекция наножидкостей в круглом канале. *Ученые записки Казанского университета. Сер. Физико-математические науки*, 2015, т. 157, № 3, с. 85–96.
- [19] Борщев Н.О., Юранев О.А. Теоретическая оценка времени захолаживания бака жидкого водорода при испытании на прочность. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 83–89. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-12-83-89>

[20] Аминов Д.М., Хафизов Ф.М. Экспериментальная оценка теплоотдачи инфракрасного нагревательного элемента. *Инновационная наука*, 2016, № 8-2, с. 16–18.

[21] Алифанов О.М., Иванов Н.А., Колесников В.А. Методика и алгоритм определения температурных зависимостей теплофизических характеристик анизотропных материалов из решения обратной задачи. *Вестник МАИ*, 2012, т. 19, № 5, с. 14–20. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=35690>

[22] Князев В.А., Никулин К.С. Эффективный коэффициент теплоотдачи в плоских щелях с неоднородным обогревом. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*, 2016, № 1, с. 56–64.

**Борщев Никита Олегович** — канд. техн. наук, ведущий инженер ФИАН (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53, стр. 4).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Борщев Н.О. Расчет дозы заправки системы терморегулирования с двухфазным контуром. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 4 (147), с. 4–15. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-4-4-15>

**CALCULATION OF THE REFUELING DOSE  
OF A TEMPERATURE CONTROL SYSTEM  
WITH THE TWO-PHASE CIRCUIT**

**N.O. Borshchev**

[www.moriarty93@mail.ru](mailto:www.moriarty93@mail.ru)

**LPI, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The paper proposes a method for evaluating the required amount of coolant filled up into a loop heat pipe and this filling dose effect on its thermal state. The Runge — Kutta method of the 4th order of accuracy was introduced to solve a system of thermohydraulic equations describing thermal state of the structure with the thermal load on the evaporative heat exchanger specified in the stepwise manner. Based on this model, the amount of coolant required for filling was to be selected, so that when the loop heat pipe was in a vertical position, the condenser and steam channel were flooded. It is shown that liquid underfilling or overfilling in the loop heat pipe has insignificant effect on its performance, except for the extreme cases. If the working fluid amount in the

**Keywords**

*Loop heat pipe, thermal balance, thermal control system, spacecraft*

compensation cavity is small, this could cause insufficient supply of fluid to the wick and disruption of the loop heat pipe normal operation. In case when the working fluid filling dose is significant, the compensation cavity is completely filled with liquid. As the thermal load and operating temperature increase, the liquid volumetric expansion liquid leads to its flow from the compensation cavity into the condenser

Received 24.01.2023

Accepted 15.03.2023

© Author(s), 2023

---

## REFERENCES

- [1] Vershinin S.V., Maydanik Yu.F. Flexible miniature loop heat pipes. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2012, vol. 4, no. 12, pp. 559–565 (in Russ.).
- [2] Borshchev N.O., Antonov V.A. Thermal-hydraulic model of a two-phase circuit with a compensation cavity. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2022, vol. 14, no. 4, pp. 167–177 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-4-167-177>
- [3] Zalmanovich S., Goncharov K. Radiators with LHP. *Int. Conf. Heat Pipes for Space Application*. Moscow, 2009, pp. 17–21 (in Russ.).
- [4] Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E. The properties of gases and liquids. New York, McGraw-Hill, 1977.
- [5] Kopyatkevich R.M., Gulya V.M., Tulin D.V., et al. Thermal designing and fragment-by-fragment ground development verification of thermal mode support system of non-pressurized spacecraft based on honeycomb panels with heat pipes. *Kosmonavtika i raketo-stroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2010, no. 3, pp. 33–41 (in Russ.).
- [6] Panin Yu.V., Antonov V.A., Balykin M.A. About design and operation of heat pipes as part of the thermal control systems of the landing module of interplanetary stations for the study of the solar system bodies. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2021, no. 4, pp. 31–38 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26162/LS.2021.54.4.005>
- [7] Gakal P.G., Ruzaykin V.I., Turna R.Yu., et al. Experimental facility for thermal hydraulic processes investigation in telecommunication satellites thermal control system. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no. 5, pp. 21–30 (in Russ.).
- [8] Idelchik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992.
- [9] Belov A.E., Velikanov A.A., Ilmov D.N., et al. Numerical and experimental study of loop heat pipe steady-state performance. *Therm. Eng.*, 2022, vol. 69, no. 3, pp. 190–201.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601522030028>
- [10] Afanasyev V.N., Nedayvozov A.V. Experimentally investigated thermo-hydraulic characteristics of the loop heat pipe with an open compensation chamber. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication], 2016, no. 11, pp. 38–54 (in Russ.).  
Available at: <http://engineering-science.ru/doc/849572.html>

- [11] Maydanik Yu.F., Pastukhov V.G., Ivanov A.V. Investigating a loop heat pipe operation with several heat sources of different power. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2017, vol. 1, pp. 145–146 (in Russ.).
- [12] Maydanik Yu.F., Vershinin S.V., Pastukhov V.G. A cooling panel with loop heat pipes for nonuniformly distributed heat sources. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2015, vol. 1, pp. 206–208 (in Russ.).
- [13] Maydanik Yu.F., Pastukhov V.G., Vershinin S.V. Development and application of miniature loop heat pipes. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2014, vol. 1, pp. 90–91 (in Russ.).
- [14] Van Yuy, Denisov O.V., Denisova L.V. Simulation of cooling of a processor in nanosatellite using the loop heat pipes. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Ser. Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research], 2019, vol. 20, no. 3, pp. 211–219 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219>
- [15] Maidanik Yu.F., Fershtater Yu.G. Theoretical basis and classification of loop heat pipes and circuits with capillary pumping. *10th Int. Conf. on Heat Pipes*. Stuttgart, Germany, 1997.
- [16] Kotlyarov E.Y., Serov G.P. Methods for improving the reliability of evaporators for contour heat pipes and circuits with capillary pumping. *24th Int. Conf. on Environmental Systems, Society of Automotive Engineers*, 1994, report 941578.
- [17] Borshchev N.O., Sorokin A.E., Belyavskiy A.E. Development of a thermal mathematical model of a contour heat pipe with a thermal accumulator. *STIN*, 2019, no. 9, pp. 37–40 (in Russ.).
- [18] Minakov A.V., Guzey D.V., Zhigarev V.A. Turbulent forced convection of nanofluids in a circular channel. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki* [Proceedings of Kazan University], 2015, vol. 157, no. 3, pp. 85–96 (in Russ.).
- [19] Borshchev N.O., Yuranev O.A. Theoretical estimate of cooling time of a liquid hydrogen tank during structural tests. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 12, pp. 83–89 (in Russ.).  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-12-83-89>
- [20] Aminov D.M., Khafizov F.M. Experimental evaluation of the heat transfer of an infrared heating element. *Innovatsionnaya nauka*, 2016, no. 8-2, pp. 16–18 (in Russ.).
- [21] Alifanov O.M., Ivanov N.A., Kolesnikov V.A. Methodology and algorithm determining the temperature dependence of thermal and physical characteristics for anisotropic materials basing on an inverse problem solution. *Vestnik MAI* [MAI Aerospace Journal], 2012, vol. 19, no. 5, pp. 14–20 (in Russ.).  
Available at: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=35690>
- [22] Knyazev V.A., Nikulin K.S. Effective heat-transfer coefficient in a flat parallel-plates duct with inhomogeneous heating. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika yadernykh reaktorov* [Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors], 2016, no. 1, pp. 56–64 (in Russ.).

**Borshchev N.O.** — Cand. Sc. (Eng.), Leading Engineer, LPI (Leninskiy prospekt 53, str. 4, Moscow, 119991 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Borshchev N.O. Calculation of the refueling dose of a temperature control system with the two-phase circuit. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 4 (147), pp. 4–15 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-4-4-15>